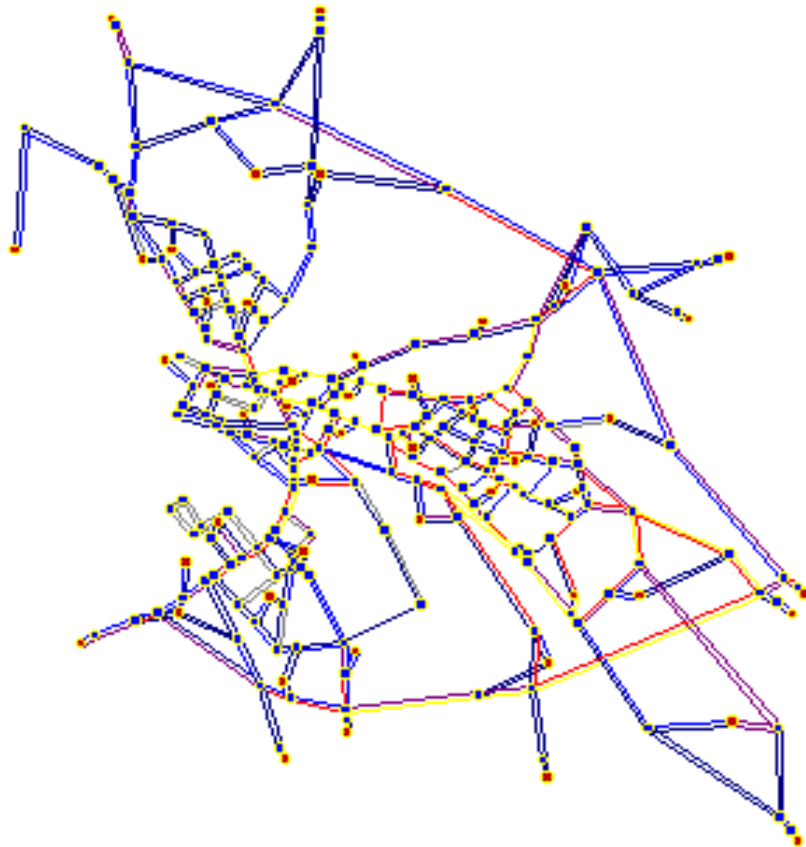


**BRUNO MONTELLA**

**PIANIFICAZIONE E CONTROLLO  
DEL TRAFFICO URBANO:  
MODELLI E METODI**



## INDICE

### INDICE

|                                                            |          |
|------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Prefazione</b>                                          | <b>I</b> |
| <b>1. L'OFFERTA DI TRASPORTO</b>                           |          |
| 1) Introduzione.                                           | 1        |
| 2) Il trasporto privato.                                   | 1        |
| 2.1) Il modello di offerta di trasporto privato.           | 2        |
| 2.2) Normativa C.N.R. per le reti urbane.                  | 5        |
| 2.3) Intersezioni urbane non semaforizzate.                | 8        |
| 2.3.1) Procedura di calcolo.                               | 9        |
| 2.3.2) Osservazioni.                                       | 21       |
| 2.3.3) Schede per l'esecuzione della procedura.            | 22       |
| 2.3.4) Esempio numerico                                    | 24       |
| 2.4) Intersezioni urbane semaforizzate.                    | 27       |
| 2.4.1) Principi basilari.                                  | 27       |
| 2.4.2) Il progetto dell'impianto semaforico.               | 32       |
| 2.4.3) Flussi pedonali.                                    | 42       |
| 2.4.4) Il ritardo nelle intersezioni semaforizzate.        | 43       |
| 2.4.5) Semafori attuati.                                   | 45       |
| 2.4.6) La regolazione semaforica coordinata.               | 48       |
| 2.4.7) Normativa C.N.R. per le intersezioni semaforizzate. | 52       |
| 2.5) L'analisi del deflusso nelle arterie urbane.          | 61       |
| 2.5.1) Livelli di servizio.                                | 62       |
| 2.5.2) La determinazione del livello di servizio.          | 63       |
| 2.6) Le funzioni di costo e di prestazione.                | 70       |
| 2.6.1) Funzioni di costo.                                  | 70       |
| 2.6.2) Funzioni di prestazione.                            | 74       |
| 2.7) Aree di scambio.                                      | 77       |
| 2.7.1) Zone di scambio                                     | 77       |
| 2.7.2) Rotatorie                                           | 78       |
| 2.8) Considerazioni generali.                              | 80       |

## INDICE

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 3) Il trasporto pubblico.                                          | 84  |
| 3.1) Il modello di offerta di trasporto pubblico.                  | 84  |
| 3.2) Sistemi di trasporto.                                         | 86  |
| 3.2.1) Autobus.                                                    | 86  |
| 3.2.2) Taxi.                                                       | 88  |
| 3.2.3) Filobus.                                                    | 89  |
| 3.2.4) Tram.                                                       | 89  |
| 3.2.5) L.R.T. (Light Rail Transit).                                | 90  |
| 3.2.6) H.R.T. (High Rail Transit).                                 | 91  |
| 3.2.7) Funicolare.                                                 | 91  |
| 3.2.8) M.W.T. (Moving Way Transit).                                | 92  |
| 3.2.9) L.G.T. (Light Guideway Transit).                            | 95  |
| 3.2.10) P.R.T. (Personal Rapid Transit).                           | 100 |
| 3.2.11) Paratransit.                                               | 101 |
| 3.3) Prestazioni dei sistemi di trasporto pubblico.                | 104 |
| 3.4) Campi di utilizzazione in un sistema plurimodale.             | 111 |
| 3.5) Gli impianti ausiliari: depositi e officine.                  | 115 |
| 4) Aree di sosta e di fermata.                                     | 117 |
| 4.1) Aree di fermata e di sosta per il trasporto pubblico su gomma | 117 |
| 4.1.1) Fermate su strada.                                          | 117 |
| 4.1.2) Autostazioni.                                               | 121 |
| 4.2) Parcheggi e aree di sosta per il trasporto privato.           | 131 |
| 4.2.1) Sosta su strada.                                            | 131 |
| 4.2.2) Sosta fuori strada.                                         | 132 |
| 4.3) Stazioni per il trasporto pubblico su ferro.                  | 141 |
| 4.3.1) Banchine.                                                   | 142 |
| 4.3.2) Tipologia stazioni.                                         | 147 |
| 4.3.3) Capacità.                                                   | 149 |
| 4.4) L'offerta di sosta.                                           | 155 |
| 5) Le indagini sull'offerta: schede di rilevamento.                | 157 |
| 5.1) Schede per la rilevazione dell'offerta.                       | 158 |
| 6) Gli spostamenti pedonali.                                       | 169 |
| 6.1) Caratteristiche del flusso pedonale.                          | 169 |
| 6.2) Determinazione del livello di servizio.                       | 175 |

## INDICE

### 2. LA DOMANDA DI TRASPORTO

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1) Richiami relativi alle caratteristiche della domanda di trasporto, con particolare riferimento all'evoluzione di essa nel corso della giornata, della settimana e dei mesi. |     |
| 177                                                                                                                                                                            |     |
| 1.1) Volume giornaliero.                                                                                                                                                       | 177 |
| 1.2) Volume orario.                                                                                                                                                            | 178 |
| 1.3) Volume sub-orario.                                                                                                                                                        |     |
| 179                                                                                                                                                                            |     |
| 1.4) Variazioni mensili e stagionali.                                                                                                                                          | 182 |
| 1.5) Variazioni settimanali.                                                                                                                                                   | 184 |
| 1.6) Variazioni giornaliere.                                                                                                                                                   | 185 |
| 2) Richiami sui modelli di domanda di trasporto.                                                                                                                               | 188 |
| 2.1) I modelli di generazione e distribuzione                                                                                                                                  | 193 |
| 2.2) Il modello di scelta modale                                                                                                                                               | 197 |
| 2.3) La modellizzazione della scelta del percorso e calcolo dei flussi su una rete di trasporto privato.                                                                       | 199 |
| 2.4) La modellizzazione della scelta del percorso e calcolo dei flussi su una rete di trasporto pubblico urbano.                                                               | 205 |
| 2.4.1) Schema generale di comportamento degli utenti.                                                                                                                          | 205 |
| 2.4.2) Formulazione di un modello di scelta.                                                                                                                                   | 207 |
| 2.4.3) Definizione di ipercammino.                                                                                                                                             | 207 |
| 2.4.4) I modelli di scelta tra ipercammini.                                                                                                                                    | 212 |
| 2.4.5) L'utilizzazione dei modelli di scelta nelle procedure di assegnazione.                                                                                                  | 214 |
| 2.4.6) il calcolo dei flussi.                                                                                                                                                  | 215 |
| 3) Un modello di simulazione delle scelte di sosta.                                                                                                                            | 218 |
| 4) Metodologie di stima della domanda.                                                                                                                                         | 221 |
| 4.1) Stima diretta.                                                                                                                                                            | 221 |
| 4.1.1) Stima della media di un valore.                                                                                                                                         | 223 |
| 4.1.2) Stima della frazione di elementi della popolazione che posseggono una data caratteristica.                                                                              | 224 |
| 4.2) Stima da modello.                                                                                                                                                         | 225 |
| 4.3) Stima con i flussi di traffico.                                                                                                                                           | 226 |
| 4.4) Stima della domanda di sosta.                                                                                                                                             | 228 |

## INDICE

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5) Indagini e metodologie per il rilevamento delle caratteristiche della domanda di trasporto. | 231 |
| 5.1) Indagini sui flussi di traffico.                                                          | 231 |
| 5.2) Indagini lungo linee di valico.                                                           | 242 |
| 5.3) Indagini alle intersezioni.                                                               | 245 |
| 5.4) Indagini O.D. a domicilio.                                                                | 252 |
| 5.5) Altre tipologie di indagine.                                                              | 256 |
| 5.6) Indagini sulla sosta.                                                                     | 260 |

### 3. LA PROGETTAZIONE DELL'ESERCIZIO.

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1) Analisi delle direttive per la redazione, adozione ed attuazione dei Piani Urbani del Traffico. | 262 |
| 1.1) Definizioni, obiettivi e strategie.                                                           | 262 |
| 1.1.1) Definizione di Piano Urbano del Traffico e sua obbligatorietà.                              | 262 |
| 1.1.2) Obiettivi fondamentali e strategie generali di intervento.                                  | 263 |
| 1.2) Articolazione, contenuti e procedure di adozione/attuazione.                                  | 267 |
| 1.2.1) Articolazione e contenuti progettuali.                                                      | 267 |
| 1.2.2) Procedure di adozione.                                                                      | 274 |
| 1.3) La gestione ed il controllo dei Piani urbani del traffico.                                    | 276 |
| 1.3.1) Gestione ordinaria.                                                                         | 276 |
| 1.3.2) Gestione dell'emergenza.                                                                    | 277 |
| 1.4) Indagini e rilevazioni.                                                                       | 279 |
| 1.4.1) Indagini sulla domanda di trasporto.                                                        | 279 |
| 1.4.2) Indagini sull'offerta di trasporto.                                                         | 279 |
| 1.4.3) Altre indagini particolari.                                                                 | 280 |
| 2) Le metodologie di progettazione delle reti di trasporto privato.                                | 283 |
| 2.1) Il progetto della rete di trasporto privato mediante simulazione.                             | 285 |
| 3) Le metodologie di progettazione delle reti di trasporto pubblico.                               | 304 |
| 3.1) Metodi di ottimizzazione per il progetto di una rete di trasporto pubblico.                   | 304 |
| 3.2) Il progetto della rete di trasporto collettivo mediante simulazione.                          | 314 |

## INDICE

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.3) Metodo di ottimizzazione della frequenza e della dimensione dei veicoli               | 326 |
| 3.4) La simulazione della rete integrata trasporto privato/trasporto collettivo.           | 328 |
| 4) L'analisi multiobiettivo per la valutazione delle reti di trasporto pubblico e privato. | 330 |
| 4.1) Tipologia delle tecniche di valutazione.                                              | 330 |
| 4.2) La stima dei pesi.                                                                    | 331 |
| 4.3) I metodi di analisi multiobiettivo discreti quantitativi.                             | 332 |
| 4.4) Il metodo ELECTRE IV.                                                                 | 339 |

## 4. IL CONTROLLO DELLA GESTIONE E DELL'ESERCIZIO

|                                                                                                |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1) Il controllo della gestione dei sistemi di trasporto pubblico e privato.                    | 341 |
| 1.1) Il controllo della gestione di un'azienda di trasporto pubblico.                          | 341 |
| 1.2) La gestione ed il controllo dei Piani urbani di traffico.                                 | 345 |
| 1.2.1) Indicatori di prestazione per la gestione ed il controllo dei piani urbani di traffico. | 346 |
| 2) Il controllo dell'esercizio in tempo reale.                                                 | 351 |
| 2.1) Il controllo nel sistema di trasporto pubblico.                                           | 351 |
| 2.1.1) Funzioni.                                                                               | 352 |
| 2.1.2) Le possibili strategie di controllo.                                                    | 354 |
| 2.1.3) Tecnologie adottate.                                                                    | 356 |
| 2.2) Il controllo nel sistema di trasporto privato.                                            | 358 |
| 2.2.1) Principi basilari del controllo dei veicoli.                                            | 358 |
| 2.2.2) Metodologie di controllo.                                                               | 361 |

## APPENDICE

|                                                                                                             |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1) Metodo inglese per il calcolo del flusso di saturazione di un accesso ad una intersezione semaforizzata. | A 1  |
| 2) Determinazione del livello di servizio delle intersezioni semaforizzate.                                 | A 4  |
| 3) Esempio di calcolo degli ipercammini di costo minimo.                                                    | A 35 |
| 4) Schede di intervista.                                                                                    | A 50 |

## INDICE

**Bibliografia**

B 1

## **PREFAZIONE**

### **Finalità**

La finalità di questo libro è quella di fornire agli allievi ingegneri, ed a quant'altri si occupano dell'ingegneria dei sistemi di trasporto e del traffico, una visione *a sistema* dei problemi del settore ed un insieme di modelli, metodologie, strumenti e tecniche che gli consentano di risolvere i problemi con elevato rigore scientifico e sufficiente precisione. La scelta delle due espressioni "elevato rigore scientifico" e "sufficiente precisione" non è casuale. Esse, infatti, riflettono le due anime presenti nell'ingegneria dei sistemi di trasporto che da un lato comprendono nella maniera più completa possibile il fenomeno della mobilità di persone e merci e dall'altro ne tentano una schematizzazione e modellizzazione che consenta di conseguire risultati quanto più prossimi è possibile alla realtà. Questa è la mentalità, rigorosa da un lato e pragmatica dall'altro, che l'esperto in trasporti dovrà assumere nell'affrontare e risolvere i problemi che gli si porranno. E' evidente, che la precisione nell'interpretazione delle conseguenze progettuali è l'elemento qualificante del progetto stesso che molte volte è, purtroppo, verificabile solo ex-post. Con questo libro si è cercato di esplicitare al meglio questo concetto e di mettere in grado il lettore di calcolare ex ante, con rigore e precisione, i risultati del suo progetto.

L'ingegneria dei sistemi di trasporto risale alla seconda metà degli anni quaranta. Essa si è evoluta ed ha assunto l'attuale consolidato assetto di rigore scientifico nella seconda metà degli anni sessanta, con l'instaurarsi di ampi fenomeni di congestione stradale nelle principali città degli Stati Uniti. Successivamente, negli anni '70, si è avuta l'individuazione di un nucleo teorico, riflettente essenzialmente la modellizzazione della domanda e l'interfaccia domanda-offerta (Domencich e Mc Fadden 1975), che è andato via via arricchendosi man mano che i "trasportisti" si appropriavano degli strumenti di lavoro indispensabili provenienti dalla matematica applicata, dalla ricerca operativa, dall'economia. La successiva diffusione dei calcolatori ed il rapido sviluppo di elevate potenzialità di calcolo, con

costi accessibili a tutti, hanno consentito il maturarsi della disciplina che allo stato gode di un buon supporto teorico. In questa ottica l'ingegneria dei trasporti ha oggi un ruolo sempre più ampio e centrale nei processi di pianificazione urbana. La sua presenza è, infatti, indispensabile nella decisione delle realizzazioni di opere che coinvolgono la mobilità di persone e/o merci. La pianificazione delle opere dell'ingegneria è un momento cruciale per un equilibrato sviluppo del territorio. Tale necessità che è presente a tutti i livelli territoriali si pone con obbligatorietà nei casi urbani dove è oggi impensabile la redazione di un qualsiasi piano territoriale senza la presenza di un esperto in trasporti.

Recentemente, infatti, la normativa italiana (articolo 36 del nuovo Codice della Strada) rende obbligatoria per tutti i comuni con popolazione residente superiore ai 30.000 abitanti l'adozione del "*Piano Urbano del Traffico veicolare*" (PUT) e la sua revisione biennale. Conseguentemente il Ministero dei Lavori Pubblici ha nel 1995 emanato le "*Direttive per la Redazione, Adozione ed Attuazione dei Piani Urbani del Traffico*" che trattano sia la fase della redazione del PUT sia le fasi dell'adozione e dell'attuazione dello stesso. In molti Paesi europei si è già da molti anni più avanti rispetto a tale normativa e l'ausilio dell'esperto in trasporti è richiesto non solo per tali livelli di piano.

## **Contenuti**

Nel testo sono contenuti i modelli, le metodologie, gli strumenti e le tecniche per far fronte alla più ampia casistica dei problemi di trasporto e di traffico, con particolare riferimento a quelli che danno adito a progetti di soluzione attuabili nel breve-medio periodo. In particolare sono contenuti i principali elementi per: l'analisi, la modellizzazione ed il rilievo della domanda e dell'offerta di trasporto e di sosta con le relative caratteristiche; le metodologie per la progettazione ed il controllo dell'esercizio delle reti di trasporto pubblico e privato, anche in tempo reale.

Con tali strumenti, il risultato cui si perviene è la possibilità di redazione dei Piani Urbani di Traffico, dei Piani di Sosta e dei Piani di Gestione delle reti di Trasporto Collettivo. E' altresì contenuta una parte dedicata al problema degli spostamenti pedonali con tutte le loro implicazioni di mobilità e di accessibilità utilizzando anche sistemi di trasporto di ausilio agli spostamenti pedonali.

Sono infine inclusi una serie di esempi numerici al fine di meglio chiarire quanto di volta in volta esposto.

### **Organizzazione del libro**

Il libro è organizzato in quattro capitoli e una appendice. Il primo capitolo relativo all'offerta di trasporto e di sosta contiene: il modello di offerta di trasporto privato e collettivo, la normativa C.N.R. per le reti urbane, i principali elementi dell'analisi del deflusso nelle arterie urbane, le principali funzioni di costo e di prestazione dei sistemi sia privato che collettivo, gli elementi principali delle intersezioni urbane semaforizzate e non, i sistemi di trasporto pubblico con i relativi campi di utilizzazione, l'offerta di sosta, i parcheggi e le stazioni. Il secondo relativo alla domanda di trasporto e di sosta contiene: le caratteristiche temporali della domanda, i modelli di domanda di trasporto e di sosta, le metodologie di stima della domanda, le indagini e metodologie per il rilevamento delle caratteristiche della domanda. Il terzo relativo alla progettazione dell'esercizio contiene: gli aspetti giuridico normativi e le metodologie di progettazione delle reti di trasporto privato e collettivo, le analisi per la valutazione dei progetti. Il quarto relativo al controllo della gestione e dell'esercizio contiene: il controllo della gestione dei sistemi di trasporto pubblico e privato sia statico che dinamico (in tempo reale). L'appendice contiene: il "Metodo inglese" per il calcolo del flusso di saturazione di un accesso ad una intersezione semaforizzata; la determinazione del livello di servizio delle intersezioni semaforizzate; un esempio di calcolo degli ipercammini di costo minimo; un esempio di schede di intervista.

Prima di concludere questa prefazione si ritiene doveroso ringraziare l'ing. Mariano Gallo per il suo paziente lavoro e la sua utile collaborazione.

## **CAPITOLO 1**

### **L'OFFERTA DI TRASPORTO**

#### **1) Introduzione.**

L'offerta di trasporto è data dall'insieme dei dispositivi, mobili o fissi, che in qualche modo consentono o favoriscono il trasporto di persone e/o cose. Noi ci riferiamo fondamentalmente al trasporto di persone, esaminando separatamente le caratteristiche dei sistemi di trasporto pubblico e privato.

I dispositivi per il trasporto possono essere suddivisi in tre categorie: i veicoli (apparati mobili), le strutture (apparati fissi), gli impianti ausiliari:

- A) I *veicoli* costituiscono l'elemento mobile del sistema, che si muove in una opportuna sede per realizzare il trasporto; essi sono, quindi, l'elemento di trasporto vero e proprio. I veicoli possono essere suddivisi in base alla sede in cui si muovono, e quindi sono: terrestri (fuori strada, su strada, ferroviari, a fune, a nastro, a tubo), aerei (a bassa quota, ad alta quota, extratmosferici), natanti (d'alto mare, di piccolo cabotaggio, lacuali, di canali). Di questi in un ambito dei trasporti urbani e metropolitani consideriamo solo quelli terrestri. I veicoli vanno valutati e caratterizzati in base alle loro prestazioni (capacità, velocità, etc.), ai disturbi prodotti (inquinamento, pericolosità) ed al costo di esercizio.
- B) Le *infrastrutture* costituiscono gli elementi fissi dei dispositivi per il trasporto, e rappresentano, se ci sono, le sedi del moto.
- C) Gli *impianti ausiliari* sono costituiti da tutto l'insieme di dispositivi che non sono né veicoli né infrastrutture; essi possono interfacciare o meno con l'utente del sistema (si pensi ad una stazione di metropolitana nel primo caso, ed a un deposito di mezzi pubblici nel secondo).

Nella nostra trattazione esaminiamo separatamente le tre categorie ora viste nel caso di trasporto privato, di trasporto pubblico e di aree di interscambio.

#### **2) Il trasporto privato.**

Si intende per sistema di trasporto privato l'insieme di dispositivi per il trasporto (veicoli, infrastrutture ed impianti ausiliari), che consentono il trasporto di persone con mezzi propri ed esclusivi.

I veicoli utilizzati sono: le biciclette, i ciclomotori, i motocicli, le automobili ed i mezzi commerciali. Del trasporto pedonale, che è un "modo di trasporto" privato, parleremo più avanti.

Non soffermandoci sulle caratteristiche e le prestazioni dei singoli veicoli, trattiamo fondamentalmente le infrastrutture e gli impianti ausiliari.

Le prime sono costituite dalle strade, urbane ed extraurbane, con diverse caratteristiche funzionali e di capacità.

Gli impianti ausiliari sono gli impianti di parcheggio, i semafori e tutti quei dispositivi che non essendo né veicoli né infrastrutture facilitano il funzionamento del sistema di trasporto.

Nei paragrafi seguenti saranno trattati sia le infrastrutture che gli impianti ausiliari in ambito urbano.

### 2.1) Il modello di offerta di trasporto privato.

Per offerta di trasporto si intende l'insieme degli elementi fisici (strade, veicoli, parcheggi, etc.) e organizzativi (sensi unici, politiche di sosta, etc.) che, nel loro insieme, consentono la mobilità di persone e merci.

E' evidente che il sistema di offerta di trasporto è di notevole complessità: di esso se ne potrà dare solo una rappresentazione schematica che ne simuli il funzionamento reale. Il livello di dettaglio utilizzato nella suddetta rappresentazione è strettamente correlato agli scopi perseguiti dall'analisi dell'offerta.

La rappresentazione del sistema di offerta consiste in primo luogo nella descrizione delle diverse alternative di trasporto e di sosta a disposizione dell'utente.

Trattiamo per semplicità separatamente l'offerta di trasporto privato, l'offerta di trasporto pubblico e l'offerta di sosta, pur essendo i tre sistemi strettamente interconnessi e mutuamente influenzabili.

Il sistema di offerta di trasporto privato viene rappresentata mediante una **rete**, intesa come **grafo pesato**.

Un grafo  $G$  è costituito da una coppia ordinata di insiemi: un insieme  $N$  di elementi detti **nodi** ed un insieme  $L$  di coppie di nodi appartenenti ad  $N$  detti **archi** o **rami**; gli archi rappresentano delle relazioni tra i nodi che essi collegano.

Nello studio dei sistemi di trasporto gli archi del grafo sono sempre orientati, cioè l'arco  $(i,j)$  è diverso dall'arco  $(j,i)$  ed il grafo è detto "orientato".

Le rappresentazioni numeriche del grafo, che ne consentono l'immissione negli elaboratori elettronici, possono essere matriciali o vettoriali; le più comuni sono le seguenti:

- *matrice di adiacenza*; è una matrice che ha un numero di righe e di colonne pari al numero di nodi; il generico elemento  $ij$  della matrice vale 1 se l'arco  $(i,j)$  fa parte del grafo, vale 0 altrimenti;
- *matrice di incidenza nodi-archi*; ad ogni riga corrisponde un nodo e ad ogni colonna un arco; l'elemento  $ij$  della matrice vale 1 se il nodo  $i$  è il nodo iniziale dell'arco

corrispondente alla colonna  $j$ , vale  $-1$  se è il nodo finale, mentre vale  $0$  se il nodo  $i$  non gli appartiene;

- *stella in uscita (forward star)*; tale rappresentazione consiste in due vettori **a** e **b**; nel primo vengono riportati i nodi finali degli archi che hanno come nodo iniziale il nodo 1, poi i nodi finali degli archi che hanno come nodo iniziale il nodo 2, e così via; nel vettore **b** sono riportati i numeri che indicano le posizioni occupate nel vettore **a** dagli ultimi nodi dei successivi blocchi.

Si definisce *cammino, percorso o itinerario* una sequenza di archi, nella quale il nodo iniziale di ciascun arco coincide con il nodo finale dell'arco che lo precede; se il nodo iniziale del percorso coincide con quello finale il percorso stesso è detto *circuito o loop*.

Il grafo è detto *completo* se ciascun nodo è collegato con un arco a ciascun altro nodo; è detto, invece, *connesso* se ogni nodo del grafo è collegato ad ogni altro da almeno un percorso. Si definisce *albero di radice "i"* un grafo privo di circuiti nel quale esiste un solo percorso che collega un nodo "i" con ciascun altro nodo.

Nella rappresentazione di un sistema di trasporto privato assumono rilevanza i nodi del grafo in cui si considera abbiano origine e destinazione gli spostamenti interessanti l'area di studio; tali nodi sono detti *centroidi*.

E' importante quindi definire le seguenti due matrici:

- *matrice di incidenza archi-percorsi A*; è una matrice che ha un numero di righe pari al numero di archi del grafo, e un numero di colonne pari ai percorsi tra i centroidi; il generico elemento  $ij$  vale  $1$  se l'arco corrispondente alla riga  $i$  fa parte dell'itinerario corrispondente alla colonna  $j$ ; vale  $0$  altrimenti;
- *matrice di incidenza coppie di nodi-percorsi B*; è una matrice che ha un numero di righe pari al numero di possibili coppie di nodi centroidi, e un numero di colonne pari ai possibili percorsi tra i centroidi; il generico elemento  $ij$  è uguale a  $1$  se la coppia di nodi corrispondenti alla riga  $i$  è collegata dal percorso corrispondente alla colonna  $j$ , vale  $0$  altrimenti.

Si definisce **rete** un grafo ai cui archi è associata una caratteristica quantitativa; nel campo dello studio dei sistemi di trasporto tale caratteristica è in genere un costo, inteso come costo generalizzato dello spostamento, o come tempo di percorrenza.

Nella maggior parte dei casi si può ammettere che il costo associato ad un arco sia individuato dal *tempo di percorrenza*; essendo esso funzione dei flussi che percorrono l'arco (a parità di configurazione geometrica dell'arco stesso) non si può parlare semplicemente di *costo* associato all'arco, ma si deve parlare di *funzione di costo*.

Possiamo quindi dire che una **rete** è costituita dall'insieme  $N$  di nodi, dall'insieme  $L$  di archi, e da un insieme di funzioni di costo  $FC$  associate agli archi.

La procedura per la costruzione del modello di rete si articola nelle seguenti fasi:

- individuazione e delimitazione dell'area di studio;
- zonizzazione;

- estrazione del grafo;
- definizione delle funzioni di costo e di prestazione associate ai rami.

Nella prima fase è necessario individuare l'area geografica all'interno della quale si trova il sistema di trasporto da studiare e nella quale si può ritenere che si esauriscano i principali effetti degli interventi da realizzare; tale area è detta appunto *area di studio*.

Gli spostamenti che si effettuano in una data area possono, in generale, iniziare e terminare in un qualunque punto del territorio. Per trattare il fenomeno è tuttavia necessario suddividere l'area di studio (ed eventualmente l'area esterna ad essa) in *zone di traffico* fra le quali si svolgono gli spostamenti che riguardano il sistema di progetto. Questi spostamenti sono detti spostamenti *interzonali*; sono detti, invece, spostamenti *intrazonali* quelli che hanno l'origine e la destinazione all'interno della stessa zona di traffico. Una volta effettuata la zonizzazione si ipotizza che i punti terminali degli spostamenti in ingresso o in uscita da ciascuna zona di traffico siano concentrati in un unico punto detto *centroide di zona*.

L'*estrazione del grafo* è la fase in cui si rappresenta mediante un grafo il sistema di offerta di trasporto; i nodi del grafo indicano le diverse posizioni significative nello spazio e nel tempo in cui può venirsi a trovare un utente del sistema di trasporto: ad esempio due nodi collegati da un arco possono indicare due punti del territorio uniti da una strada.

Sulla base delle diverse caratteristiche è possibile suddividere l'insieme dei nodi del grafo e l'insieme degli archi dello stesso in sottoinsiemi. Nel caso del sistema di trasporto privato, i nodi vengono suddivisi in *nodi centroidi* e *nodi reali* e gli archi in *archi connettori* ed *archi reali*. I nodi centroidi sono i nodi in cui si ipotizzano concentrati gli spostamenti in ingresso o in uscita da ciascuna zona di traffico; vi è un centroide per ogni zona che viene posizionato nel baricentro dei luoghi di inizio e fine degli spostamenti: ad esso non corrisponde in genere nessun punto fisico. I nodi reali rappresentano, invece, posizioni spazio-temporali significative e con una interpretazione fisica. Gli archi reali sono quelli cui corrispondono spostamenti tra nodi reali; sono, invece, detti archi connettori quelli che collegano i nodi centroidi ai nodi reali e viceversa.

Per giungere a definire la rete di trasporto è necessario associare, come detto, ad ogni ramo un costo generalizzato che l'utente deve sostenere per percorrerlo; tale costo generalizzato nelle reti di trasporto viene spesso identificato con il tempo di percorrenza di un ramo. Quest'ultimo dipende dal numero di utenti, cioè dal flusso, che percorre il ramo stesso e varia con esso. Bisogna perciò individuare una relazione tra flussi e costi che viene detta *funzione di costo*; essa rappresenta la relazione matematica che lega il costo medio di trasporto ai flussi che lo influenzano ed alle caratteristiche fisiche e funzionali dell'arco.

Le *funzioni di prestazione* associabili ad un arco sono rappresentative dei costi generalizzati sopportati anche dai non-utenti del sistema di trasporto, quali ad esempio l'inquinamento acustico ed atmosferico.

Le funzioni di costo e di prestazione più utilizzate sono trattate in un prossimo paragrafo.

## 2.2) Normativa CNR per le reti urbane.

Le reti stradali urbane di trasporto sono costituite da strade di diverse caratteristiche ognuna delle quali riveste all'interno della struttura di rete una propria funzione.

Il C.N.R. [1.1] ha suddiviso le strade urbane in 4 categorie:

- A) **Strade primarie**: sono i tronchi terminali e passanti delle strade extraurbane, i quali prevalentemente raccolgono e distribuiscono il traffico di interscambio fra il territorio urbano e quello extraurbano, e sono eventualmente percorsi dal traffico di attraversamento rispetto all'area urbana.
- B) **Strade di scorrimento**: sono totalmente comprese nell'ambito urbano e hanno la funzione prevalente di canalizzare gli spostamenti di maggiore lunghezza e caratterizzati dai flussi più elevati.
- C) **Strade di quartiere (o interquartieri)**: sono a servizio di ambiti urbani molto più limitati rispetto a quelli lungo i quali si sviluppano le strade di scorrimento; hanno quindi lunghezze e volumi di traffico notevolmente inferiori.
- D) **Strade locali**: sono a servizio di quelle zone, denominate *comparti ambientali*, delimitate degli assi della viabilità di scorrimento e di quartiere. Lo schema di rete all'interno del comparto è tale che le strade locali consentono l'accesso ai diversi edifici del comparto, ma non ne consentono l'attraversamento.

Nelle norme del C.N.R. si precisa inoltre che una strada appartenente ad una categoria può connettersi solo con strade della categoria immediatamente superiore ed immediatamente inferiore; in questo modo si limitano al minimo le intersezioni e quindi le interruzioni di flusso lungo i percorsi caratterizzati da maggiore lunghezza e più rilevanti volumi di traffico.

Il traffico sulle strade urbane presenta caratteristiche notevolmente più complesse rispetto a quelle delle strade extraurbane; infatti, insieme al flusso delle automobili e dei veicoli per il trasporto merci occorre considerare anche gli autoveicoli in servizio pubblico, i veicoli in sosta e le correnti pedonali. Per tale motivo non si riesce ad individuare, come per le strade extraurbane, un intervallo di velocità di progetto in base al quale progettare le caratteristiche della strada.

Le norme del CNR definiscono per ciascun tipo di strada le caratteristiche limiti dell'asse (vedi tab. 1.1) ed inoltre le caratteristiche funzionali di ogni categoria di strada in relazione alle componenti di traffico (vedi tab. 1.2).

Per le strade urbane sono poi previste delle *fasce di pertinenza* comprese tra il bordo della carreggiata e il confine della proprietà privata; esse servono a ridurre gli effetti negativi conseguenti all'inquinamento atmosferico ed acustico generato dal flusso veicolare ed inoltre servono a mantenere fluida la circolazione stradale, riducendo al massimo le interferenze tra il flusso ed eventuali elementi di disturbo; nelle fasce di pertinenza devono, quindi, trovare collocazione: banchine e piazzole o corsie per la sosta di emergenza; stalli di sosta e relative corsie di manovra; fermate dei mezzi pubblici e relative pensiline; isole spartitraffico e separatori fisici tra movimenti e soste veicolari; fasce a verde; piste ciclabili; marciapiedi e passaggi pedonali di servizio.

TAB. 1.1

[1.1]

| DENOMINAZIONE                | Velocità minima di progetto (km/h) | Pendenza trasvers. max. in curva(###) | Raggio planimetri-co minimo (m) | Raggio altimetrico minimo (m) |             | Pendenza longitudinale massima (###) |
|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------|--------------------------------------|
| <b>Strade primarie</b>       | 80                                 | 7.0                                   | 250                             | conv. 3.500                   | conc. 2.500 | 6                                    |
| <b>Strade di scorrimento</b> | 60                                 | 4.5                                   | 120                             | 1.500                         | 1.000       | 6                                    |
| <b>Strade di quartiere</b>   | 40                                 | 3.0                                   | 75                              | 600                           | 400         | 7                                    |
| <b>Strade locali</b>         | 40                                 | -                                     | 20                              | 300                           | 200         | 10                                   |

Il C.N.R. fornisce, perciò, una ulteriore tabella (vedi tab. 1.3), in cui sono riportate le caratteristiche geometriche minime della sezione trasversale delle strade urbane; la larghezza minima delle fasce di pertinenza, riportata nell'ultima colonna della tabella, consente i seguenti usi:

- Per le strade locali, una corsia di sosta e un marciapiede.
- Per le strade di quartiere: una corsia di sosta a 45°, la relativa corsia di manovra per la sosta e un marciapiede.
- Per le strade di scorrimento: una banchina, uno spartitraffico di separazione della carreggiata di servizio (che è utilizzata per le manovre di svolta, per le immissioni da passi carrabili, per la sosta) e un marciapiede.
- Per le strade primarie: una corsia per la sosta di emergenza, uno spartitraffico, eventualmente organizzato con piste di accelerazione e decelerazione, ed eventualmente da una scarpata che raccordi la quota della strada in questione con quella delle strade parallele.

TAB. 1.2

[1.1]

| DENOMINAZIONE                   | Componenti di traffico ammesso                                                  | Regolazione dei mezzi pubblici                        | Regolazione della sosta                                           | Regolazione del traffico pedonale |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>1. Strade primarie</b>       | Movimenti di veicoli pubbl. e privati                                           | Esclusa la fermata                                    | Proibita anche la fermata                                         | Escluso                           |
| <b>2. Strade di scorrimento</b> | Movimenti veicolari e pedonali, sosta dei veicoli privati in appositi parcheggi | In corsia riservata e con fermate organizzate         | Immissioni ed uscite dai parcheggi localizzate in punti opportuni | Su marciapiedi protetti           |
| <b>3. Strade di quartiere</b>   | Movimenti veicolari e pedonali, sosta dei veicoli privati in appositi parcheggi | Con fermate organizzate ed eventuale corsia riservata | Immissioni ed uscite dai parcheggi localizzate in punti opportuni | Su marciapiedi                    |
| <b>4. Strade locali</b>         | Movimento e sosta di veic. privati e correnti pedonali                          | Esclusi                                               | Libera, a norma de codice della strada                            | Eventuale corsia pedonale a raso  |

TAB. 1.3

[1.1]

| DENOMINAZIONE         | Tipo di carreggiate                  | Largh. delle corsie (m) | N. di corsie per senso di marcia | Largh. minima dello spartitraffico (m) | Largh. della corsia di emerg. (m) | Largh. delle banchine (m) | Largh. min. dei marciapiedi (m) | Largh. minima delle fasce di pert. (m) |
|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|
| Strade primarie       | A senso unico, da spartitraff.       | 3.50                    | 2 o più                          | 1.60 (con barriere)                    | 3.00                              | 1.00                      | -                               | 20                                     |
| Strade di scorrimento | Separate ovunque possibile           | 3.25                    | 2 o più                          | 1.10 (con barriere)                    | -                                 | 0.50                      | 3.00                            | 15                                     |
| Strade di quartiere   | Ad unica carreggiata in doppio senso | 3.00                    | 1 o più                          | 0.50 (event. a raso)                   | -                                 | 0.50                      | 4.00                            | 12                                     |

|                  |                                                    |      |         |   |   |      |      |   |
|------------------|----------------------------------------------------|------|---------|---|---|------|------|---|
| Strade<br>locali | Ad unica<br>carreg-<br>giata in<br>doppio<br>senso | 2.75 | 1 o più | - | - | 0.50 | 3.00 | 5 |
|------------------|----------------------------------------------------|------|---------|---|---|------|------|---|

### 2.3) Intersezioni urbane non semaforizzate.

L'intersezione di due o più strade in ambito urbano viene realizzata nella maggior parte dei casi con intersezioni a raso; il deflusso dei veicoli alle suddette intersezioni può essere regolato con uno dei seguenti sistemi:

- precedenza a destra;
- priorità data ad una strada principale: gli accessi delle strade secondarie sono dotate di un segnale di “STOP” o di “dare precedenza”;
- impianto semaforico.

In alcuni casi si possono utilizzare rotatorie (soprattutto quando le strade convergenti in un'unica intersezione sono più di 4) e zone di scambio (quando le due strade che si intersecano sono, nella zona di intersezione, quasi parallele tra di loro).

La scelta del tipo di controllo da utilizzare deve essere fatta caso per caso a seconda dei flussi che percorrono le diverse strade e dell'importanza reciproca di essi.

In questo paragrafo esaminiamo le intersezioni non semaforizzate riportando le metodologie utilizzate per il calcolo della capacità e del livello di servizio.

Più precisamente trattiamo gli incroci regolati con segnale di “STOP” o di “dare precedenza”; le intersezioni libere, cioè regolate con “precedenza a destra”, sono interessate da flussi modesti e quindi non presentano problemi di saturazione degli accessi; le intersezioni semaforizzate saranno ampiamente trattate nei prossimi paragrafi.

Nelle intersezioni regolate con diritto di precedenza per una delle due strade (strada principale) un veicolo percorrente la strada secondaria, che vuole immettersi o attraversare la strada principale, deve attendere che si presenti un “**distanziamento temporale**” tra due veicoli successivi (*gap*) sufficiente allo scopo; la stessa cosa dovrà fare un veicolo della strada principale che vuole svoltare a sinistra.

La capacità dell'accesso della strada secondaria dipende dalla distribuzione dei *gap* disponibili nel flusso della strada principale, e dalla ampiezza dei *gap* che sono accettati dai veicoli della strada secondaria per effettuare le volute manovre.

Riportiamo di seguito la procedura sviluppata dall'*HCM* 1994 [1.2] per il calcolo del livello di servizio di una intersezione non semaforizzata tra una strada principale ed una secondaria.

Essendo diverse le manovre che possono essere effettuate all'intersezione viene stabilita una priorità tra di esse, in modo tale che, quando è disponibile un *gap*, esso viene utilizzato dal veicolo tra quelli in attesa la cui manovra è prioritaria rispetto alle altre; l'ordine di priorità si basa sulla difficoltà relativa tra le varie manovre ed è il seguente:

- Manovre di Rango  $r = 1$  (le manovre di rango 1 saranno indicate nel seguito con il pedice *i*): attraversamento sulla strada principale, e svolta a destra dalla strada principale.

- Manovre di Rango  $r = 2$  (subordinate alle manovre di rango 1, sono indicate nel seguito con il pedice  $j$ ): svolta a sinistra dalla strada principale, e svolta a destra dalla strada secondaria nella strada principale.
- Manovre di Rango  $r = 3$  (subordinate alle manovre di rango 1 e 2, sono indicate nel seguito col pedice  $k$ ): attraversamento sulla strada secondaria (nel caso di intersezione a 4 bracci), e svolta a sinistra dalla strada secondaria (nel caso di intersezione a T).
- Manovre di Rango  $r = 4$  (subordinate a tutte le altre manovre, sono indicate nel seguito col pedice  $l$ ): svolta a sinistra dalla strada secondaria (nel caso di intersezione a 4 bracci).

### 2.3.1) Procedura di calcolo.

La metodologia di calcolo è strutturata nei seguenti passi:

- 1) Definizione della geometria attuale e delle condizioni di traffico dell'intersezione oggetto di studio.
  - 2) Calcolo del volume di conflitto attraverso il quale ogni manovra della strada secondaria, e la svolta a sinistra sulla strada principale, deve passare.
  - 3) Calcolo della dimensione del *gap* necessario affinché i veicoli che devono effettuare manovre all'intersezione possano attraversare i flussi con essi in conflitto.
  - 4) Calcolo della capacità dei *gap* nei flussi di traffico principali in grado di accogliere ognuna delle manovre subordinate che userà gli stessi *gap*.
  - 5) Correzione delle capacità calcolate per tener conto dei fattori di impedenza e delle corsie condivise.
  - 6) Stima del ritardo totale medio di ognuna delle manovre subordinate e determinazione del livello di servizio per ogni manovra e per l'intersezione.
- Esaminiamo nel seguito i suddetti passi.

#### *A) Dati di input.*

I dati richiesti per poter sviluppare la procedura riguardano il tipo di controllo previsto ("STOP" o "dare precedenza"), i volumi di traffico (previsti o misurati), la loro composizione, il tipo di manovra effettuato, la velocità del flusso dei veicoli sulla strada principale e la geometria completa dell'intersezione; quest'ultima deve includere:

- canalizzazioni;
- numero e senso di marcia delle corsie;
- pendenza degli accessi.

Per convenzione, i pedici da 1 a 6 sono usati per indicare le correnti relative alla strada principale, mentre i pedici da 7 a 12 indicano le correnti relative alla strada secondaria.

I flussi di traffico vengono convertiti da “Veicoli per ora” in “Automobili per ora” usando la tabella 1.4.

TAB. 1.4

[1.2]

| Tipo di veicolo               | Pendenza (###) |       |      |       |       |
|-------------------------------|----------------|-------|------|-------|-------|
|                               | -4###          | -2### | 0### | +2### | +4### |
| Motocicli                     | 0.3            | 0.4   | 0.5  | 0.6   | 0.7   |
| Autovetture                   | 0.8            | 0.9   | 1.0  | 1.2   | 1.4   |
| SU/RVs <sup>a</sup>           | 1.0            | 1.2   | 1.5  | 2.0   | 3.0   |
| Veicoli composti <sup>b</sup> | 1.2            | 1.5   | 2.0  | 3.0   | 6.0   |
| Tutti i veicoli <sup>c</sup>  | 0.9            | 1.0   | 1.1  | 1.4   | 1.7   |

<sup>a</sup> *Single-unit trucks* (autocarri e autobus) e *recreational vehicle* (roulotte e caravan).

<sup>b</sup> Comprende gli autotreni, autoarticolati ed autosnodati.

<sup>c</sup> Se la composizione dei veicoli non è nota, questi valori possono essere usati come prima approssimazione.

#### B) Calcolo del volume di conflitto.

Il “**volume di conflitto**”  $V_{c,x}$  è il volume di traffico con il quale la manovra  $x$  entra in conflitto; esso è il volume all'interno del quale dovranno essere ricercati i *gap* necessari per poter effettuare la manovra.

Il calcolo del volume di conflitto, in veicoli per ora, viene effettuato come riportato in fig. 1.1 (a) e (b); in essa la linea in grassetto indica la manovra in questione, mentre le altre linee indicano le manovre che entrano in conflitto con essa.

Un veicolo che svolta a destra dalla strada secondaria si immette nella corsia di destra della strada principale, per cui il *gap* sufficiente alla manovra deve essere ricercato nel flusso di questa corsia; il volume di conflitto è dato, allora, dal volume che interessa solo la corsia di destra della strada principale e che prosegue dritto; a questo va aggiunto la metà del volume che svolta a destra dalla strada principale nella secondaria, perché non tutti i veicoli che effettuano tale manovra utilizzano l'indicatore di direzione, ed alcuni mantengono una velocità tale da indurre il conducente in attesa all'intersezione a ignorare o rifiutare dei *gap* sufficienti.

**FIG. 1.1 (a)**

[1.2]

**FIG. 1.1 (b)**

[1.2]

La manovra di svolta a sinistra dalla strada principale entra in conflitto con il flusso della strada principale che, nel verso opposto, attraversa l'intersezione e con quello che, sempre in verso opposto, svolta a destra; il volume di conflitto è dato dalla somma dei suddetti termini.

Un veicolo della strada secondaria che attraversa l'intersezione entra in conflitto con i flussi di traffico che eseguono le seguenti manovre: attraversamento dell'intersezione da parte dei veicoli che percorrono la strada principale, per entrambi i sensi di marcia; svolta a sinistra e a destra dalla strada principale dei veicoli che percorrono le corsie della semicarreggiata più lontana; svolta a sinistra dalla strada principale dei veicoli che percorrono la semicarreggiata più vicina. Il volume di conflitto è dato dalla somma dei suddetti termini, ai quali va aggiunto metà del flusso che effettua la svolta a destra dalla semicarreggiata più vicina, per i motivi visti prima.

La svolta a sinistra dalla strada secondaria è la manovra più complessa. Le manovre con cui si entra in conflitto sono:

- attraversamento dei flussi sulla strada principale per entrambi i sensi di marcia;
- svolta a sinistra dalla strada principale per entrambi i sensi di marcia;
- svolta a destra e attraversamento da parte dei veicoli della strada secondaria che si trovano sul lato opposto dell'intersezione (prendendone la metà).

Per ottenere il volume di conflitto si sommano ai flussi che eseguono le manovre suddette anche la metà dei flussi che svoltano a destra dalla strada principale.

### *C) Calcolo del gap critico e della capacità potenziale.*

Il “**gap critico**”  $t_g$  è definito come la dimensione media del distanziamento temporale (gap) che viene accettato dal conducente in una data situazione.

Il suddetto valore varia nella realtà da utente ad utente, e, a seconda delle situazioni, anche per lo stesso utente.

Il tempo che intercorre tra la partenza di un veicolo dall'accesso all'intersezione e la partenza del veicolo successivo, in caso di veicoli in coda, viene detto “**follow-up time**”  $t_f$ .

La tab. 1.5 riporta i valori di  $t_g$  e di  $t_f$ ; tali valori sono stati ricavati per via sperimentale e sono validi per autovetture.

TAB. 1.5

[1.2]

| Manovra                              | Gap critico $t_g$ (sec)        |                                    | Follow-up time $t_f$ (sec) |
|--------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
|                                      | Strada principale a due corsie | Strada principale a quattro corsie |                            |
| Svolta a sinistra, strada principale | 5,0                            | 5,5                                | 2,1                        |
| Svolta a destra, strada secondaria   | 5,5                            | 5,5                                | 2,6                        |
| Attraversamento, strada secondaria   | 6,0                            | 6,5                                | 3,3                        |
| Svolta a sinistra, strada secondaria | 6,5                            | 7,0                                | 3,4                        |

La “**capacità potenziale**” è la capacità ideale di una data manovra, quando vi sono le seguenti condizioni:

- Il flusso di traffico sulla strada principale non blocca la strada secondaria.
- Ogni manovra della strada secondaria e le manovre di svolta a sinistra dalla strada principale hanno a loro disposizione una corsia esclusiva
- Nessun'altra manovra di Rango 2, 3 o 4 impedisce la suddetta manovra.

Essa viene calcolata con la seguente formula, tratta da uno studio svolto in Germania sull'argomento:

$$c_{p,x} = \frac{3600}{t_f} \cdot e^{-\frac{[V_{c,x}] t_0}{3600}}$$

dove:

$c_{p,x}$  = capacità potenziale della manovra secondaria  $x$  (pcph<sup>1</sup>)

$V_{c,x}$  = volume di conflitto della manovra  $x$  (vph)

$t_0 = t_g - (t_f/2)$

$t_g$  = gap critico (sec)

$t_f$  = follow-up time (tempo che intercorre tra la partenza di un veicolo dalla strada secondaria e la partenza del successivo, nella condizione di veicoli in coda) (sec)

Nelle fig. 1.2 e 1.3 sono riportate delle curve che consentono il calcolo della capacità potenziale, rispettivamente per strada principale a due corsie e per strada principale a quattro corsie, utilizzando i valori di  $t_g$  e  $t_f$  di tab. 1.5.

<sup>1</sup> Passenger cars per hour: autovetture equivalenti per ora.

**FIG 1.2**

[1.2]

**FIG. 1.3**

[1.2]

*D) Fattori di impedenza.*

Il calcolo della capacità potenziale, così come effettuata al punto precedente, non tiene conto che un veicolo in attesa all'intersezione a volte non può sfruttare un *gap* sufficiente alla sua manovra, se vi sono veicoli che devono effettuare manovre prioritarie alla sua.

In pratica la capacità potenziale è la capacità della manovra in questione se essa fosse l'unica ad essere svolta all'intersezione, e quindi avesse a sua disposizione tutti i *gap* che si presentano nel flusso principale.

Nella realtà capita che un veicolo che deve effettuare una manovra di Rango basso (ad es. 3 o 4), risulta impedito dai veicoli che, contemporaneamente, effettuano manovre di rango superiore.

Per tale motivo si calcola la **capacità effettiva** di manovra  $c_{m,x}$ .

Si assume che le manovre di Rango 1 non siano influenzate dalle manovre di rango inferiore, cioè che i veicoli del flusso di traffico principale non subiscano ritardi a seguito delle manovre effettuate alle intersezioni dagli altri veicoli.

I flussi di traffico di Rango 2 devono dare la precedenza solo ai flussi di attraversamento e di svolta a destra della strada principale (Rango 1). Per questo motivo non vi sono impedenze addizionali per cui si ha:

$$c_{m,j} = c_{p,j}$$

dove  $j$  indica le manovre di Rango 2.

Le manovre di Rango 3 non solo devono dare la precedenza ai flussi principali (Rango 1), ma entrano in conflitto anche con la manovra di svolta a sinistra sulla strada principale (Rango 2). Per questo motivo non tutti i *gap* di dimensione accettabile possono essere utilizzati, in quanto alcuni vengono sfruttati dalla manovra prioritaria di Rango 2. L'influenza di questo fattore è tanto maggiore quanto maggiore è la probabilità che vi siano veicoli della strada principale in coda che effettuino la suddetta manovra; tale probabilità è data da:

$$P_{0,j} = 1 - \frac{v_j}{c_{m,j}}$$

dove  $j=1, 4$  (svolte a sinistra di Rango 2).

La capacità di manovra  $c_{m,k}$  di tutte le manovre di Rango 3 si ottiene moltiplicando la capacità potenziale  $c_{p,k}$  per un fattore correttivo  $f_k$  dato da:

$$f_k = \prod_j (p_{0,j})$$

Si ha quindi:

$$c_{m,k} = (c_{p,k}) \cdot f_k$$

Le manovre di Rango 4 (cioè le svolte a sinistra dalla strada secondaria in una intersezione a 4 bracci) sono potenzialmente impedita dalle code di tre flussi di traffico di rango più elevato:

- Flussi che svoltano a sinistra dalla strada principale (Rango 2).
- Flussi di attraversamento sulla strada secondaria (Rango 3).
- Flussi che svoltano a destra dalla strada secondaria (Rango 2).

Anche in questo caso i fattori di impedenza sono legati alle probabilità che vi siano veicoli in attesa di effettuare le suddette manovre prioritarie; non essendo, però, tali probabilità indipendenti tra loro, il calcolo della capacità di manovra viene così effettuato:

$$c_{m,l} = (c_{p,l}) \cdot f_l$$

dove il fattore di correzione è così calcolato:

$$f_l = (p')(p_{0,j})$$

e

$$p' = 0,65 \cdot p'' - \frac{p''}{p'' + 3} + 0,6\sqrt{p''}$$

con  $p'' = (p_{0,j})(p_{0,k})$

#### *E) Capacità promiscua della corsia.*

Fino a questo punto si è assunto che ogni manovra avesse a disposizione una corsia a suo esclusivo servizio. In realtà una corsia “h” della strada secondaria può essere a servizio di più tipi di manovra; nel caso più comune sono consentite 3 manovre: svolta a sinistra (LT), attraversamento (TH), svolta a destra (RT). La capacità promiscua della corsia “h” (csh) è data da:

$$c_{sh} = \frac{V_{lt} + V_{th} + V_{rt}}{\left(\frac{V_{lt}}{c_{mlt}}\right) + \left(\frac{V_{th}}{c_{mth}}\right) + \left(\frac{V_{rt}}{c_{mrt}}\right)}$$

dove:

$V_{lt}$ ,  $V_{th}$  e  $V_{rt}$  sono i volumi che effettuano le singole manovre;

$c_{mlt}$ ,  $c_{mth}$  e  $c_{mrt}$  sono le capacità di manovra delle singole manovre.

Se i movimenti possibili sono solo 2, nell'espressione compaiono solo i termini che li riguardano.

*F) Livello di servizio.*

Il “**livello di servizio**” di una intersezione non semaforizzata è correlato al ritardo medio per veicolo all'intersezione come riportato in tab. 1.6.

**TAB. 1.6**

[1.2]

| Livello di servizio | Ritardo totale medio (sec/veic.) |
|---------------------|----------------------------------|
| A                   | $\leq 5$                         |
| B                   | $>5 \text{ e } \leq 10$          |
| C                   | $>10 \text{ e } \leq 20$         |
| D                   | $>20 \text{ e } \leq 30$         |
| E                   | $>30 \text{ e } \leq 45$         |
| F                   | $>45$                            |

La formula per il calcolo del ritardo è la seguente:

$$D = \frac{3600}{c_{m,x}} + 900T \left[ \frac{V_x}{c_{m,x}} - 1 + \sqrt{\left(\frac{V_x}{c_{m,x}} - 1\right)^2 + \frac{\left(\frac{3600}{c_{m,x}}\right)\left(\frac{V_x}{c_{m,x}}\right)}{450T}} \right]$$

dove:

$D$  = ritardo totale medio (sec/veic)

$V_x$  = volume per la manovra  $x$ , espresso come tasso di flusso orario.

$c_{m,x}$  = capacità di manovra  $x$ , espressa come tasso di flusso orario.

$T$  = periodo dell'analisi (h) (per periodi di 15 minuti  $T=0,25$ ).

Questa equazione è riportata graficamente in figura 1.4.

**FIG. 1.4**

[1.2]

Il ritardo così calcolato è relativo ad una singola manovra; il ritardo medio per un accesso è ottenuto come media pesata dei ritardi delle manovre ad esso relativi: esso consente di valutare il livello di servizio dell'accesso.

$$D_A = \frac{D_r V_r + D_t V_t + D_l V_l}{V_r + V_t + V_l}$$

Analogamente il ritardo medio dell'intersezione, che consente di valutare il livello di servizio della stessa, è dato dalla media pesata dei ritardi dei diversi accessi.

$$D_I = \frac{D_{A,1} V_{A,1} + D_{A,2} V_{A,2} + D_{A,3} V_{A,3} + D_{A,4} V_{A,4}}{V_{A,1} + V_{A,2} + V_{A,3} + V_{A,4}}$$

La lunghezza della coda di veicoli può essere desunta dalla figura 1.5 in funzione del grado di saturazione e della capacità di manovra della corsia.

**FIG. 1.5**

[1.2]

### 2.3.2) Osservazioni.

La metodologia di calcolo tende a sottostimare la capacità dell'intersezione, per tre motivi:

- 1) Si assume che il *gap* critico rimane costante nel tempo mentre osservazioni dirette hanno posto in evidenza che esso tende a diminuire al crescere dei tempi di attesa all'intersezione.
- 2) Si assume che la circolazione sulla strada principale non sia influenzata o interrotta dai flussi provenienti dalle strade laterali; in molti casi, però, i conducenti in attesa sulla strada laterale si immettono su quella principale utilizzando *gap* molto piccoli, costringendo così al rallentamento i veicoli del flusso principale.
- 3) Si assume che gli arrivi all'intersezione dei veicoli che percorrono la strada principale sia casuale e che la distribuzione dei *gap* sia ad essa correlata; in molti casi ciò non è vero perché i flussi della strada principale possono aver incontrato, prima di giungere all'intersezione, dei sistemi di controllo semaforizzati; in questi casi i veicoli giungono all'intersezione sotto forma di "plotoni".

L'ultimo punto può avere una significativa influenza sulla capacità dell'intersezione. Si consideri la fig. 1.6; essa mostra i plotoni che percorrono una strada principale dopo aver attraversato una intersezione semaforizzata. I veicoli 1 e 2 sono in attesa allo STOP in due differenti intersezioni aspettando di poter attraversare i flussi; le loro posizioni rappresentano i due casi estremi possibili.

Il veicolo 1 ha a che fare con dei plotoni alternati: non appena termina il passaggio del plotone dei veicoli provenienti da un senso comincia il passaggio dei veicoli del plotone proveniente dal senso opposto. Il veicolo 1, in ogni istante, può avere a che fare col passaggio di veicoli.

Il veicolo 2 si trova, invece, in una situazione molto differente: in certi intervalli di tempo entrambi i plotoni passano contemporaneamente mentre in altri non ne passa nessuno. Per il veicolo 2, quindi, l'attraversamento dell'intersezione risulta molto più semplice che per il veicolo 1.

Nella realtà ci si trova sempre in situazioni intermedie rispetto le due condizioni limiti ora viste, per cui si può dire che con la metodologia dell'*HCM* la si sottostima la capacità dell'intersezione di un 10-20 %.

**FIG. 1.6**

[1.2]

**2.3.3) Schede per l'esecuzione della procedura.**

L'*HCM* del 1985 riporta due schede utili per l'esecuzione della procedura descritta.

La prima è composta di tre pagine e viene utilizzata per un incrocio a quattro rami, con due di essi (opposti tra loro) regolati con segnale di "STOP" o di "dare precedenza".

La seconda scheda, che riportiamo in fig 1.7 (a), si usa, invece, per l'analisi di una intersezione a T, e risulta composta da una unica pagina.

**FIG. 1.7 (a)**

[1.2]

### 2.3.4) Esempio numerico.

Si supponga di voler calcolare il livello di servizio dell'intersezione a T i cui dati sono riportati, congiuntamente allo sviluppo della procedura, nella scheda di fig. 1.7 (b).

La pendenza è nulla per entrambi gli accessi e non si hanno precise informazioni sulla composizione del flusso veicolare. E', inoltre, presente una corsia riservata per la svolta a sinistra sulla strada principale. L'accesso dalla strada secondaria è costituito da un'unica corsia; analogamente vi è un'unica corsia a disposizione dei veicoli che attraversano l'intersezione dalla strada principale.

La strada secondaria ha un segnale di STOP.

I flussi di traffico si riferiscono al periodo 7:30-8:30 del mattino e sono riportati in fig 1.7 (b).

Nel riquadro in alto a destra della scheda si riportano, per le manovre di rango inferiore (4, 7 e 9) i volumi corretti in funzione della composizione del flusso; nel caso in esame è sufficiente moltiplicare tali volumi per 1.1 (vedi tab. 1.4).

In primo luogo si esamina la svolta a destra dalla strada secondaria; per essa si calcola il volume di conflitto (vedi fig. 1.1):

$$V_{c,9} = 1/2 V_3 + V_2 = 25 + 300 = 325 \text{ veic/h}$$

La capacità potenziale della stessa manovra può essere letta nella fig. 1.2 in funzione del volume di conflitto; essa è pari a 920 veic/h.

Siccome non vi sono altre manovre all'intersezione di rango superiore (tranne quelle sulla strada principale) che entrano in conflitto con essa, la capacità effettiva di manovra è pari a quella potenziale.

La seconda manovra che si considera è la svolta a sinistra dalla strada principale; per essa il calcolo del volume di conflitto, della capacità potenziale e della capacità effettiva di manovra avviene come per il caso precedente.

La probabilità che vi siano veicoli in coda che aspettano di effettuare tale manovra sulla strada principale, tenuto conto della presenza della corsia riservata per le svolte a sinistra, è data da:

$$p_{0,4} = 1 - v_4/c_{m,4} = 1 - (220/1125) = 0.80$$

Per la svolta a sinistra dalla strada secondaria si opera come nei casi precedenti, tenendo però conto, nel calcolo della capacità effettiva di manovra, del coefficiente riduttivo  $f_7$  dovuto alla probabile presenza in coda dei veicoli che effettuano la manovra di svolta a sinistra dalla strada principale, manovra di rango superiore alla precedente.

Siccome le manovre 7 e 9 hanno la corsia condivisa, si calcola per esse la capacità promiscua data da:

$$c_{sh} = (55 + 110) / (55/280 + 110/920) = 522 \text{ veic/h}$$

Il ritardo totale per ogni manovra si può leggere sulla fig. 1.4 o calcolare dalla apposita formula (vedi pag. 18).

I ritardi medi per veicolo delle manovre ed i relativi LdS (vedi tab. 1.6) risultano pari a:

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| $D_7 = 6 \text{ sec/veic}$ | LdS B |
| $D_9 = 6 \text{ sec/veic}$ | LdS B |
| $D_4 = 4 \text{ sec/veic}$ | LdS A |

Il ritardo medio dell'intersezione è dato da:

$$D = \frac{6 \cdot 50 + 6 \cdot 100 + 4 \cdot 200}{300 + 50 + 200 + 350 + 50 + 100} = 1.6 \text{ sec/veic}$$

**FIG. 1.7 (b)**

## 2.4) Intersezioni urbane semaforizzate.

La regolazione semaforica è la tecnica usualmente adottata per il controllo degli incroci urbani caratterizzati da flussi rilevanti, tali cioè da non consentire l'adozione di una regolazione basata sulle usuali regole di priorità (precedenza a destra) o su una segnaletica fissa ("STOP" o "dare precedenza").

La funzione principale dell'impianto semaforico è di disciplinare le manovre che avvengono all'intersezione, determinando il periodico arresto di ciascuna corrente in modo tale da consentire, sfalsandolo nel tempo, il passaggio di tutti i veicoli ed evitare, se possibile, traiettorie di conflitto tra i veicoli o tra veicoli e flussi pedonali; in questo modo si aumenta la sicurezza dell'intersezione e si riducono i ritardi ad essa connessi.

### 2.4.1) Principi basilari.

Una intersezione ha più rami di ingresso (accessi) e di uscita, e ciascuno di essi può avere una o più corsie. Ogni corsia può a sua volta servire una o più correnti di traffico<sup>1</sup>.

Il segnale emesso dal semaforo può essere di tre tipi:

- luce verde: indica "via libera";
- luce gialla: indica che i veicoli che sopraggiungono devono fermarsi, se sono in condizioni di sicurezza per farlo, altrimenti devono liberare al più presto l'intersezione;
- luce rossa: comanda l'arresto dei veicoli.

Il "**ciclo semaforico**" è una sequenza completa di segnali e la sua durata è indicata con C (sec).

Si dice "**intervallo**" un periodo di tempo durante il quale i segnali restano fissi.

E' detta "**fase**" la frazione di un ciclo che assegna ad alcune correnti di traffico (gruppo di correnti) simultaneamente il segnale di "via libera" durante uno o più intervalli: nel caso di un incrocio a quattro bracci il caso più semplice si ha quando il ciclo semaforico è a due fasi, una con verde per due accessi e rosso per gli altri due e l'altra viceversa; si possono però avere cicli a tre o più fasi semaforiche, quando, ad es., si vogliono evitare punti di conflitto tra i veicoli che svoltano a sinistra e quelli che attraversano l'intersezione in senso opposto.

E' detto, poi, "**intervverde**" o "**intervallo di cambio**" la somma dei tempi di "giallo" e "tutto rosso" (rosso a tutti i semafori) che si hanno alla fine di una fase di verde per consentire l'arresto del flusso e lo sgombero dell'area di conflitto, prima di dare il via

---

<sup>1</sup>Si intende per corrente di traffico l'insieme di veicoli che giunti all'intersezione devono eseguire la stessa manovra: attraversamento, svolta a destra o svolta a sinistra.

libera ad altre correnti di traffico; a volte esso è indicato semplicemente come “tempo di giallo”, includendo in esso anche il tempo di “tutto rosso”. L’interverde è indicato con  $Y_i$  (sec) per la corrente, o gruppo di correnti “i”.

E’ detto **“tempo di verde”**  $G_i$  (sec) l’intervallo di tempo durante il quale viene dato il segnale di verde alla corrente “i”.

Analogamente si definisce il **“tempo di rosso”**  $R_i$ .

I valori  $R$ ,  $Y$  e  $G$  variano in genere da corrente a corrente, ma per tutte si ha:

$$C = G_i + Y_i + R_i$$

Consideriamo ora una coda di veicoli che si è formata ad un accesso all’intersezione durante un tempo di rosso; quando il segnale diventa di via libera (luce verde) il primo veicolo della coda, dopo un tempo di percezione e reazione, parte e lascia l’intersezione; la stessa cosa fanno a seguire gli altri veicoli in coda.

Il volume (o portata) che attraversa la linea di arresto dell’accesso alla comparsa del verde aumenta dal valore zero, che si ha durante il tempo di rosso, ad un valore massimo, detto **“flusso di saturazione”**  $s$  (è ovvio che tale valore massimo si raggiunge solo se l’accesso è saturo, cioè quando il numero di veicoli che chiede di passare è maggiore di quello che riesce a transitare), si mantiene poi praticamente costante fino a pochi istanti dopo la comparsa del giallo, per andare infine a zero. Questo andamento è riportato in fig. 1.8.

**FIG. 1.8**

Il flusso di saturazione “s” può essere riferito ad una sola corsia dell'accesso o a più corsie di esso (tutte quelle a cui viene dato contemporaneamente il segnale di verde); anche in questo caso il pedice “i” individua la corrente o le correnti che utilizzano le suddette corsie.

Risulta molto comodo nelle applicazioni considerare per il deflusso in un accesso saturo solo due periodi alternati:

— **verde efficace**:  $g_i$  (sec);

— **rosso efficace**<sup>2</sup>:  $r_i$  (sec).

Durante il periodo di verde efficace si assume che il deflusso dei veicoli della corrente “i” avvenga con volume costante e pari al flusso di saturazione; esso è, pertanto, minore del verde reale durante il quale il flusso in transito non è sempre quello di saturazione. Durante il rosso efficace si assume volume nullo. Si avrà, quindi:

$$\begin{aligned} C &= g_i + r_i \\ r_i &> R_i \\ g_i &< G_i + Y_i \end{aligned}$$

Per il calcolo del tempo di verde efficace si deve far riferimento a situazioni di accesso saturo, per le quali si impone:

$$g_i \cdot s_i = \int_0^{G_i+Y_i} v_i(t) dt$$

dove  $v_i(t)$  è la portata che attraversa la linea di arresto all'intersezione nell'istante di tempo  $t$ .

Da tale relazione si nota che  $g_i$  è tale che  $g_i/s_i$  è uguale al numero medio di veicoli effettivamente transitati durante il ciclo; quindi:

$$g_i = \frac{1}{s_i} \cdot \int_0^{G_i+Y_i} v_i(t) dt \quad (\text{sec})$$

L'uso del verde efficace equivale a sostituire all'area sottesa alla curva  $v_i(t)$  quella equivalente di un rettangolo di altezza  $s_i$  e base  $g_i$ .

Il rosso efficace è dato invece da:  $r_i = C - g_i$ .

La differenza tra la somma dei tempi di verde e interverde ed il verde efficace è detta **“tempo perso”**  $L_i$  (sec):

<sup>2</sup>In alcuni casi il termine inglese effective è anche tradotto come effettivo, per cui non è raro trovare, per queste grandezze la dizione “verde effettivo” e “rosso effettivo”.

$$L_i = G_i + Y_i - g_i$$

Il tempo perso tiene conto che all'inizio ed alla fine dell'intervallo di tempo  $G_i + Y_i$  il deflusso dei veicoli avviene con portata minore di quella di saturazione a causa dell'“inerzia” del flusso in fase di avviamento e dell'arresto graduale durante la fase di giallo; pertanto il tempo perso viene diviso in due aliquote: *tempo perso all'avviamento*  $L_{ai}$  e *tempo perso per lo sgombero*  $L_{si}$ . Si ha quindi che:

$$L_i = L_{ai} + L_{si}$$

I valori di  $L_{ai}$  e di  $L_{si}$  variano da caso a caso; usualmente risulta:

—  $L_{ai} = 2\text{---}3$  sec.

—  $L_{si} = 1\text{---}2$  sec.

E' evidente, poi, che:  $r_i = R_i + L_i$

Nel caso in cui gli accessi non sono saturi, si può operare considerando che il deflusso dei veicoli avvenga con tasso pari a quello di saturazione dall'inizio del verde efficace sino allo smaltimento della coda, e con tasso pari a quello di arrivo per il restante periodo di verde efficace.

Gli impianti semaforici possono operare in tre modi diversi:

- 1) **Funzionamento predeterminato.** In caso di funzionamento predeterminato la lunghezza del ciclo, le fasi, i tempi di verde e gli interverde hanno tutti dei valori prestabiliti. Il segnale varia all'interno del ciclo in maniera costante: ogni ciclo è lo stesso, con la stessa durata e lunghezza costante delle fasi.
- 2) **Funzionamento semiattuato.** In questo secondo caso la strada principale ha sempre il segnale di verde, finché dei *detector*, inseriti nella pavimentazione della strada secondaria, non segnalano l'arrivo di uno o più veicoli all'intersezione. A questo punto l'impianto darà il segnale di verde agli accessi della strada secondaria, dopo aver arrestato il flusso della strada principale, consentendo così il passaggio dei veicoli. Il tempo di verde assegnato ai flussi della strada secondaria viene calcolato volta per volta in funzione del numero di veicoli che chiedono di transitare senza superare, però, un valore massimo prefissato. In questo caso le durate del ciclo e dei tempi di verde si adeguano all'andamento della domanda di trasporto; inoltre, i tempi di verde sono virtualmente utilizzati al massimo, visto che l'eventuale parte in eccesso per la strada secondaria è ceduto alla strada principale.
- 3) **Funzionamento attuato.** Nel caso di funzionamento attuato tutti gli accessi sono sorvegliati da *detector*, i quali, rilevato il flusso, inviano i dati ad una centralina che

stabilisce caso per caso le durate del ciclo e dei tempi di verde, che quindi variano considerevolmente con la domanda. In questo caso vengono fissati per ogni fase i valori massimo e minimo dei tempi di verde. Alcune fasi del ciclo possono essere interamente saltate, perché inutili, se i *detector* non segnalano in corrispondenza dell'accesso, che ha il verde in quella fase, la presenza di domanda.

Il funzionamento dell'impianto può, inoltre, essere a:

- **semaforo isolato**; quando l'impianto è progettato e gestito indipendentemente da altri impianti adiacenti;
- **rete semaforica**; quando diversi impianti adiacenti sono progettati e gestiti in modo coordinato.

Le manovre effettuate dai veicoli di un accesso all'intersezione durante una fase di verde possono essere di due tipi:

- a) **manovra protetta**: quando i veicoli che effettuano la manovra non entrano in conflitto con altre correnti veicolari o pedonali, che abbiano la precedenza;
- b) **manovra permessa**: quando i veicoli che effettuano la manovra entrano in conflitto con altre correnti prioritarie; è il caso della svolta a sinistra, qualora essa sia consentita in contemporanea con un flusso di attraversamento dall'accesso opposto.

Le problematiche da risolvere nello studio delle intersezioni semaforizzate sono molteplici; esse si possono distinguere in:

- **problemi di verifica**;
- **problemi di progetto**.

Il problema di verifica consiste fondamentalmente nella determinazione del livello di servizio dell'intersezione, noti i flussi di traffico, la geometria dell'intersezione e le caratteristiche del segnalamento.

I problemi di progetto sono in genere dei problemi "parziali": cioè note alcune caratteristiche dell'intersezione se ne vogliono progettare delle altre. Il caso più comune, che è poi quello che a noi interessa, si ha quando, note la geometria dell'intersezione e la domanda che la interessa, si vogliono progettare le caratteristiche dell'impianto semaforico:

- tipo di funzionamento;
- durata del ciclo;
- fasi;
- tempi di verde, giallo e rosso.

### 2.4.2) Il progetto dell'impianto semaforico.

La progettazione di un nuovo impianto semaforico ad una intersezione a raso si articola in quattro momenti fondamentali:

- 1) **Scelta del tipo di regolazione** (predeterminata o attuata).
- 2) **Scelta del piano di fasatura.**
- 3) **Progettazione del ciclo semaforico.**
- 4) **Determinazione del livello di servizio raggiunto.**

Esaminiamo di seguito i suddetti passi.

#### *A) Il tipo di regolazione.*

La scelta del tipo di regolazione (predeterminata, semiattuata o attuata) deve essere fatta caso per caso, soprattutto in relazione all'entità dei flussi che circolano sulle strade che si intersecano e alla loro relativa importanza.

L'impianto semaforico a **funzionamento predeterminato**, detto anche a "tempi di fase fissi", è la più semplice forma di regolazione di una intersezione a raso ed è anche la più diffusa per il costo contenuto e l'affidabilità raggiunta. Essa è adatta nel caso di intersezioni soggette a volumi di traffico che non variano di molto tra i diversi accessi e nel corso della giornata.

La **regolazione "attuata"** è la forma più flessibile (e costosa) di gestione degli impianti semaforici e viene, perciò, utilizzata solo se si ha una effettiva variazione di domanda nel corso della giornata e su direttrici di traffico intenso. In seguito (vedi paragrafo 2.4.5) tratteremo in modo più approfondito le varie metodologie di regolazione attuata del traffico.

#### *B) Il piano di fasatura.*

Fondamentale importanza assume, ai fini della progettazione dell'impianto, la scelta del piano di fasatura; esso consiste nello stabilire in quante fasi deve essere articolato il ciclo semaforico, quali manovre consentire in ogni fase e quale deve essere la successione tra le fasi.

Generalmente si preferisce, quando possibile, utilizzare due sole fasi, perché ciò riduce al minimo gli intervalli di "tempo perso", che si hanno ogni volta che si cambia fase. In questo caso, però, le manovre di svolta sono di tipo "permesso", per cui, nel caso di flussi di svolta elevati, si possono avere fenomeni di congestione dell'intersezione: in questi casi si preferisce utilizzare schemi multifase.

Per progettare il piano di fasatura bisogna conoscere, oltre l'entità dei flussi veicolari che effettuano le varie manovre e l'entità dei flussi pedonali, anche la geometria

dell'intersezione; infatti uno schema multifase potrà essere previsto solo se la geometria dell'intersezione consente la disposizione di un numero di corsie di attesa in ogni accesso almeno pari alle fasi di verde previste per lo stesso accesso. Ad esempio la presenza di una fase apposita per le svolte a sinistra richiede che sia presente una apposita corsia.

Ci sono molti criteri per stabilire quando è necessario predisporre una fase apposita per la svolta a sinistra; in genere ciò si fa quando i volumi che chiedono di svoltare eccedono i 150-200 veic./h e quando i flussi di attraversamento dall'accesso opposto sono elevati.

Una fase apposita per la svolta a destra protetta si predispone solo se i flussi pedonali sono molto elevati (maggiori di 1700-1800 ped./h).

La figura 1.9 mostra piani di fasatura detti comunemente “verde anticipato” e “verde ritardato” (le frecce a linea continua indicano le manovre “protette” durante la fase in oggetto, mentre quelle a linea tratteggiata indicano le manovre “permesse”). Nel caso (a) l'accesso inferiore ha verde prima di quello superiore: in questa fase (A1) la svolta a sinistra è “protetta”; si parla allora di “verde anticipato”. Quando anche l'altro accesso ha il verde, le svolte a sinistra possono essere, a seconda dei casi, “proibite” o “permesse”; se proibite è necessaria la predisposizione di una apposita corsia.

Nel caso (b) entrambi gli accessi hanno il verde contemporaneamente, ma l'accesso superiore è bloccato prima di quello inferiore, consentendo da quest'ultimo svolte a sinistra “protette” (“verde ritardato”).

Solitamente l'uso di queste fasi è combinato in modo da dare “verde anticipato” ad un accesso e “verde ritardato” all'altro, per consentire, in opportuni intervalli di tempo, svolte a sinistra “protette” ad entrambi gli accessi (caso (c)).

L'uso del “verde anticipato” e del “verde ritardato” consente di ridurre i “tempi persi” e i ritardi causati dall'aggiunta di una fase esclusiva per le svolte a sinistra.

### *C) Progettazione del ciclo semaforico.*

Scelto il tipo di regolazione ed il piano di fasatura bisogna progettare il ciclo semaforico, cioè determinare le durate del ciclo e dei tempi di “verde efficace” da dare ad ogni corrente di traffico (o gruppo di correnti); bisogna poi valutare il “tempo perso” e calcolare la durata dell'interverde, in modo da poter definire completamente le durate dei segnali di verde, giallo e rosso che compongono il ciclo.

Trattiamo di seguito i metodi classici per il calcolo della durata del ciclo ed i metodi per il calcolo del “tempo perso” e dell'interverde.

La durata del ciclo e la sua ripartizione in tempi di verde e rosso per ogni accesso o gruppo di corsie dovrebbe essere almeno tale da assicurare lo smaltimento di tutti i veicoli in arrivo all'intersezione da ciascuno dei suoi rami nel tempo di un ciclo; ciò per evitare la formazione di code crescenti nel tempo.

**FIG. 1.9**

[1.3]

Nel caso semplice di un incrocio a due fasi si può quindi dire che deve essere<sup>3</sup>:

$$\begin{aligned}s_1 \cdot g_1 &\geq v_1 \cdot C \\ s_2 \cdot g_2 &\geq v_2 \cdot C\end{aligned}$$

dove:

$s_i$ = flusso di saturazione dell'accesso o gruppo di corsie che ha il verde nella fase "i".

$g_i$ = verde efficace della fase "i".

$v_i$ = volume (o portata) in arrivo all'accesso che ha il verde nella fase "i".

$C$ = durata del ciclo semaforico.

Queste relazioni esprimono la condizione che il numero di veicoli in arrivo in un ciclo agli accessi comandati da una certa fase deve essere minore o uguale del numero di veicoli smaltibile; cioè il numero di veicoli in arrivo deve essere minore o uguale della capacità dell'accesso. Infatti la capacità di un accesso all'intersezione viene definita come il massimo tasso di flusso che, servendosi dello stesso accesso, attraversa l'intersezione; essa è data da:

$$c_i = s_i \cdot (g_i / C)$$

dove:

$c_i$ = capacità dell'accesso o gruppo di corsie "i".

La durata minima che deve avere il ciclo semaforico si ottiene imponendo l'uguaglianza:

---

<sup>3</sup>Una fase, in genere, dà il segnale di via libera a più accessi simultaneamente; in questo caso le relazioni si riferiscono, per ogni fase, all'accesso in cui il rapporto  $v/s$  è massimo. Nel caso in cui abbiamo per lo stesso accesso più corsie, ognuna della quali riservata ad una manovra effettuata nella fase, le stesse relazioni sono valide, considerando, però, per  $s_i$  e  $v_i$  il flusso di saturazione e la portata in arrivo della corsia per la quale il rapporto  $v/s$  è massimo.

$$s_1 \cdot g_1 = v_1 \cdot C \quad g_1 = \frac{v_1}{s_1} \cdot C$$

$$s_2 \cdot g_2 = v_2 \cdot C \quad g_2 = \frac{v_2}{s_2} \cdot C$$

Sommando membro a membro ottengo:

$$(g_1 + g_2) = \left( \frac{v_1}{s_1} + \frac{v_2}{s_2} \right) \cdot C$$

essendo:  $g_1 = G_1 + Y_1 - L_1$

$$g_2 = G_2 + Y_2 - L_2$$

ed inoltre:  $C = G_1 + Y_1 + G_2 + Y_2$  si ha:

$$C - (L_1 + L_2) = C \cdot \left( \frac{v_1}{s_1} + \frac{v_2}{s_2} \right)$$

da cui si ottiene la durata minima del ciclo:

$$C_{\min} = \frac{L_1 + L_2}{1 - \left( \frac{v_1}{s_1} + \frac{v_2}{s_2} \right)}$$

Nel caso di N fasi si può operare allo stesso modo ottenendo come durata minima del ciclo:

$$C_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^N L_i}{1 - \sum_{i=1}^N \frac{v_i}{s_i}}$$

Bisogna a questo punto precisare che i volumi in arrivo all'intersezione, utilizzati nella procedura, devono essere i tassi di flusso massimi riferiti a periodi di 15 min. all'interno dell'ora di punta.

La durata del ciclo semaforico così ottenuta non è la migliore possibile, né è detto che sia effettivamente utilizzabile; essa è, infatti, solo un valore limite dell'effettiva durata del ciclo (un altro valore limite deriva dalla presenza dei flussi pedonali, come sarà detto in seguito). Può poi capitare che tale valore sia troppo elevato: la durata del ciclo non dovrebbe mai superare i 90####100 s. per un ciclo a due fasi e i 120 s. per un ciclo multifase; questo perché una attesa eccessiva alla soglia dell'intersezione non è accettata dagli utenti. Se si superano tali limiti si dovrebbe modificare la geometria dell'intersezione.

La durata ottima del ciclo può essere calcolata tendendo a minimizzare il ritardo all'intersezione; uno studio in tal senso è stato svolto dal Webster. L'espressione a cui è giunto, molto complicata, è stata poi approssimata alla seguente:

$$C_0 = \frac{1.5 \cdot L + 5}{1 - \sum (v / s)}$$

dove:

C<sub>0</sub>= durata ottima del ciclo (sec).

L= somma dei tempi persi di tutte le fasi (sec).

**FIG. 1.10**

[1.4]

La figura 1.10 mostra l'andamento del ritardo medio al variare della domanda, e dimostra l'esistenza di una durata ottima del ciclo ( $C_0$ ) che minimizzi il ritardo per ogni valore della domanda; si nota inoltre come durate più piccole di quella ottima incrementino di molto il ritardo, mentre durate più grandi lo incrementano di poco.

Nota la durata del ciclo semaforico, le durate di "verde efficace" da dare ai due accessi sono date da:

$$g_1 = \frac{v_1}{s_1} \cdot C$$

$$g_2 = \frac{v_2}{s_2} \cdot C$$

La somma dei tempi di verde e giallo sono dati da:

$$G_1 + Y_1 = g_1 + L_1$$

$$G_2 + Y_2 = g_2 + L_2$$

I valori di  $L_1$  e  $L_2$  necessari per l'esecuzione della procedura possono essere stimati in base all'esperienza (essi sono somma di due termini, come già detto, e variano tra 3 e 5 s.), oppure, per intersezioni già in funzione, misurati con osservazioni dirette sul campo.

Uno dei metodi per calcolare il flusso di saturazione "s" dell'accesso (in veicoli per ora di verde efficace) è il cosiddetto "metodo inglese", riportato in appendice 1; per intersezioni già esistenti si possono effettuare delle misure sperimentali

Calcolati la durata del ciclo ed i tempi di verde efficace da dare ad ogni fase "i", le durate dei segnali di verde, giallo e rosso per la fase "i" si ottengono tenuto conto che:

$$G_i + Y_i = g_i + L_i \quad R_i = C - (G_i + Y_i)$$

Dato che  $g_i$ ,  $L_i$  e  $C$  sono noti, è sufficiente calcolare  $Y_i$ .

Il termine  $Y_i$  ("intervverde" o "intervallo di cambio") è costituito da due periodi distinti: la durata del giallo semaforico e la durata del "tutto rosso". La prima quantità in genere varia in un intervallo compreso tra 2 e 5 secondi, mentre la durata del "tutto rosso" è compresa nell'intervallo 0###2 sec. La durata del giallo semaforico viene determinata in modo tale che i veicoli possano arrestarsi o procedere in sicurezza in corrispondenza dell'intersezione. La durata del "tutto rosso" invece deve consentire ai veicoli che si trovano all'interno dell'area di conflitto alla fine del giallo semaforico di sgomberare l'intersezione, prima che il diritto di via libera venga assegnato alle altre correnti in attesa.

Sono state proposte diverse formule per il calcolo della durata del “giallo semaforico” ( $y$ ) e del “tutto rosso” (AR); per il primo termine riportiamo la seguente formula facilmente utilizzabile nella pratica [1.5]:

$$y = t + \frac{v}{2 \cdot a + 2 \cdot G \cdot i}$$

dove:

$y$ = durata del giallo semaforico (sec).

$t$ = tempo di percezione e reazione (sec).

$v$ = velocità dei veicoli all'intersezione (m/s).

$a$ =decelerazione ( $m/s^2$ ).

$G$ = accelerazione di gravità ( $m/s^2$ ).

$i$ = pendenza dell'accesso.

Valori raccomandati:

$t$ = 1.0 sec.

$a$ = 3.0  $m/s^2$ .

$G$ = 9.81  $m/s^2$ .

Per quanto riguarda il “tutto rosso” rimandiamo ai valori forniti dalle Norme CNR per le intersezioni semaforizzate, esaminate nel paragrafo 2.4.7.

L'interverde  $Y$  sarà la somma dei due termini suddetti:

$$Y = y + AR$$

Calcolato l'interverde abbiamo in pratica definito le durate reali dei segnali da assegnare ad ogni fase “ $i$ ”, e quindi il ciclo semaforico è del tutto definito.

#### *D) Esempio numerico.*

Si debbano progettare i parametri di regolazione semaforica per una intersezione a 4 bracci. Si sia stabilito di voler utilizzare due sole fasi semaforiche.

Indichiamo con 1 e 3 gli accessi Nord e Sud, che hanno il verde nella fase 1, e con 2 e 4 gli accessi Est ed Ovest, che hanno il verde nella fase 2. Il tasso di flusso massimo in arrivo ad ogni accesso nei 15 minuti più carichi dell'ora di punta, per i quattro accessi, sia:

$$\begin{aligned}
 v_1 &= 800 \text{ veic/h} \\
 v_2 &= 1.000 \text{ veic/h} \\
 v_3 &= 950 \text{ veic/h} \\
 v_4 &= 600 \text{ veic/h}
 \end{aligned}$$

Gli accessi Nord e Sud abbiano larghezza 5,0 m e quelli Est e Ovest larghezza 4,5 m.

Il flusso di saturazione degli accessi, calcolato con il metodo inglese (vedi appendice 1), supponendo per semplicità unitari i coefficienti correttivi (condizioni ideali) è pari a:

$$\begin{aligned}
 s_1 &= s_3 = 2.500 \text{ veic/h} \\
 s_2 &= s_4 = 2.240 \text{ veic/h}
 \end{aligned}$$

Il rapporto  $v/s$  (indice di carico) per i quattro accessi sono:

|                  |                  |
|------------------|------------------|
| FASE 1           | FASE 2           |
| $v_1/s_1 = 0,32$ | $v_2/s_2 = 0,45$ |
| $v_3/s_3 = 0,38$ | $v_4/s_4 = 0,27$ |

Gli indici di carico da utilizzare per il calcolo dei parametri di regolazione saranno  $v_3/s_3 = 0,38$  e  $v_2/s_2 = 0,45$ , in quanto massimi relativamente agli accessi che hanno il verde nella stessa fase. Ipotizzando pari a 5 sec il tempo perso ( $L_i$ ) relativo sia alla fase 1 che alla fase 2, la durata del ciclo semaforico minimo è data da:

$$C_{\min} = \frac{L_1 + L_2}{1 - \left( \frac{v_3}{s_3} + \frac{v_2}{s_2} \right)} = \frac{10}{1 - (0,38 + 0,45)} = 58,8 \text{ sec}$$

Assumiamo una durata effettiva del ciclo semaforico pari a 70 sec; non conviene, infatti, assumere come durata del ciclo proprio quella minima, ma incrementarla di almeno un 10-15 % per limitare i ritardi alle intersezioni e cautelarsi da eventuali fluttuazioni aleatorie della domanda.

Il verde efficace da dare ad ogni fase sarà pari a:

$$g_1 = C \cdot (v_3/s_3) = 70 \cdot 0,38 = 26,6 \text{ sec} \cong 27 \text{ sec}$$

$$g_2 = C \cdot (v_2/s_2) = 70 \cdot 0,45 = 31,5 \text{ sec} \cong 31 \text{ sec}$$

Detto  $Y_i$  Il tempo di interverde,  $R_i$  il rosso semaforico e  $G_i$  il verde semaforico si ha:

$$G_1 + Y_1 = g_1 + L_1$$

$$G_2 + Y_2 = g_2 + L_2$$

Dove  $Y_i = y_i + AR_i$ , con  $y_i$  tempo di giallo semaforico e  $AR_i$  tempo di tutto rosso. Il valore di  $y_i$  può essere calcolato, come visto nel paragrafo precedente, nel seguente modo:

$$y_i = t + \frac{v_a}{2 \cdot a + 2 \cdot G \cdot i} = 1 + \frac{11}{2 \cdot 3 + 2 \cdot 9,8 \cdot 0} \cong 3 \text{ sec}$$

Avendo supposto che, per entrambi gli accessi, la velocità dei veicoli all'intersezione ( $v_a$ ) sia pari a 40 km/h = 11 m/s, pendenza nulla, decelerazione 3 m/s<sup>2</sup> e tempo di percezione e reazione 1 sec.

Aggiungendo ad esso 2 sec di tutto-rosso si ottiene:

$$Y_i = 5 \text{ sec}$$

I tempi di verde  $G_i$  e rosso  $R_i$  per le due fasi saranno:

$$G_1 = g_1 + L_1 - Y_1 = 27 + 5 - 5 = 27 \text{ sec}$$

$$G_2 = g_2 + L_2 - Y_2 = 31 + 5 - 5 = 31 \text{ sec}$$

$$R_1 = C - (G_1 + Y_1) = 70 - (27 + 5) = 38 \text{ sec}$$

$$R_2 = C - (G_2 + Y_2) = 70 - (31 + 5) = 34 \text{ sec}$$

#### *E) La determinazione del livello di servizio.*

La determinazione del livello di servizio, per la intersezione così progettata, viene effettuata con la metodologia utilizzata per le intersezioni già esistenti, e riportata in appendice 2. Se il livello di servizio raggiunto non è soddisfacente bisogna ritornare alle fasi precedenti della progettazione e adottare opportuni provvedimenti, di tipo strutturale (costruzione sottopassi o sovrappassi, allargamento accessi, predisposizione di nuove corsie per le svolte etc.) o di tipo gestionale (diverso tipo di regolazione, diversa fasatura, nuovo ciclo semaforico etc.).

Il progetto di una intersezione semaforizzata risulta essere, allora, un processo di tipo iterativo, che, in genere, non si esaurisce alla prima iterazione.

### 2.4.3) Flussi pedonali.

In condizioni normali l'intervallo di tempo minimo da assegnare al verde pedonale deve essere compreso tra i 4 e i 7 secondi [1.6]. E' stato, poi, visto sperimentalmente che un intervallo di 4 secondi è adeguato solo per flussi molto modesti (massimo 10 pedoni per ciclo), mentre 7 secondi possono essere usati per volumi moderati (da 10 a 20 pedoni per ciclo) [1.7]. A tale intervallo di tempo minimo va sommato il tempo impiegato dai pedoni per attraversare l'intersezione; il tempo di verde pedonale minimo è allora dato da:

$$G_p = (4 \div 7 \text{ sec}) + \frac{\text{Distanza}}{\text{Velocità}}$$

Il valore minimo del verde pedonale risulta anche essere un vincolo per la minima durata del rosso per le manovre che vengono attraversate. Si deve infatti avere che:

$$R_i = [C - G_i - (y_i + AR_i)] > G_{pi}$$

dove:

$R_i$  = tempo di rosso per la manovra sull'accesso "i" (sec).

$C$  = durata ciclo semaforico (sec).

$G_i$  = tempo di verde per la manovra sull'accesso "i" (sec).

$y_i + AR_i$  = interverde (sec).

$G_{pi}$  = minimo tempo di verde pedonale per l'attraversamento dell'accesso "i" (sec).

Introducendo il tempo perso totale  $L$ , la stessa equazione può essere scritta come:

$$(C - L) - g_i \geq G_{pi}$$

da cui:

$$C \geq [L + G_{pi}] + g_i$$

che risulta essere un limite alla durata minima del ciclo semaforico.

#### 2.4.4) Il ritardo nelle intersezioni semaforizzate.

Prima di poter trattare la metodologia che ci consente di determinare il livello di servizio di una intersezione semaforizzata è necessario studiare i fenomeni di ritardo che si hanno in corrispondenza di essa; il “ritardo” è infatti uno dei principali indicatori delle prestazioni dell'intersezione.

Il ritardo può essere definito in una serie di modi diversi; per i nostri scopi interessa il “**ritardo medio di fermata**”, che è il rapporto tra la somma dei tempi trascorsi dai veicoli fermi in un ramo di accesso in un dato periodo di tempo ed il volume di traffico in arrivo a quel ramo nello stesso intervallo; si esprime usualmente in s/veic.

Le formule proposte per il calcolo del ritardo da diversi autori sono molteplici; noi tratteremo solo quelle più utilizzate nella pratica.

Bisogna distinguere due casi:

- **accessi sottosaturi**: la domanda è minore della capacità degli accessi ( $v/c < 1$ );
- **accessi sovrasaturi**: la domanda è maggiore della capacità degli accessi ( $v/c > 1$ ).

Nel caso di accessi sottosaturi una formula attendibile è quella proposta da Webster [1.4]:

$$d = \frac{C \cdot [1 - (g/C)]^2}{2 \cdot [1 - (v/s)]} + \frac{(v/c)^2}{2 \cdot v \cdot [1 - (v/c)]} - 0.65 \cdot (c/v^2)^{1/3} \cdot (v/c)^{2+(g/C)}$$

Il primo addendo è l'espressione del ritardo per arrivi uniformi; il secondo termine incrementa i valori del ritardo per tener conto della influenza della componente casuale degli arrivi; il terzo addendo, di derivazione sperimentale, contribuisce ad una correzione (in diminuzione) della lieve sovrastima comportata dalla considerazione dei soli due primi termini di derivazione teorica. In effetti il terzo termine riduce il ritardo calcolato con i soli primi due del 5###15 ###, per cui può essere più semplicemente sostituito applicando un fattore pari a 0,9 ai primi due termini:

$$d = 0.90 \cdot \left\{ \frac{C \cdot [1 - (g/C)]^2}{2 \cdot [1 - (v/s)]} + \frac{(v/c)^2}{2 \cdot v \cdot [1 - (v/c)]} \right\}$$

La formula di Webster è valida solo per valori del rapporto  $v/c < 1$ ; per  $v/c$  che tende ad 1 il ritardo tende ad infinito. E' evidente che tale formula non è utilizzabile per accessi sovrasaturi, nè dà risultati attendibili quando  $v/c$  è maggiore di 0,8.

Per tale motivo sono state proposte diverse formule che consentono il calcolo del ritardo all'intersezione anche per quelle intersezioni che sono prossime alla saturazione o sovrasature. In appendice, trattando il livello di servizio delle intersezioni semaforizzate, riporteremo la formula consigliata dall'*HCM 1994* per il calcolo del ritardo all'intersezione; essa, per valori medi delle condizioni di progressione semaforica che si possono avere, è la seguente:

$$d = 0.38 \cdot C \cdot \frac{[1 - (g/C)]^2}{1 - (g/C) \cdot X} + 173 \cdot X^2 \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{16 \cdot X}{c}} \right]$$

tale formula è ritenuta valida fino a  $v/c=1,2$ .

*A) Esempio.*

Calcoliamo, con la formula dell'*HCM* sopra riportata, il ritardo medio all'intersezione per i due accessi più carichi dell'intersezione progettata nell'esempio del paragrafo 2.4.2. In questa formula  $X = v/s$  e  $c = s$  per i vari accessi.

$$\begin{aligned} d_3 &= 0,38 \cdot 70 \cdot \frac{[1 - (27/70)]^2}{1 - (27/70) \cdot 0,38} + \\ &+ 173 \cdot 0,38^2 \cdot \left[ (0,38 - 1) + \sqrt{(0,38 - 1)^2 + \frac{16 \cdot 0,38}{2500}} \right] = 12 \text{ sec/ veic} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_2 &= 0,38 \cdot 70 \cdot \frac{[1 - (31/70)]^2}{1 - (31/70) \cdot 0,45} + \\ &+ 173 \cdot 0,45^2 \cdot \left[ (0,45 - 1) + \sqrt{(0,45 - 1)^2 + \frac{16 \cdot 0,45}{2240}} \right] = 11 \text{ sec/ veic} \end{aligned}$$

### 2.4.5) Semafori attuati.

I semafori attuati si adattano alle variazioni di domanda ottimizzando l'assegnazione del verde disponibile tra le varie fasi; essi sono particolarmente indicati per la regolazione del traffico nelle ore di morbida e risultano particolarmente efficaci per le intersezioni non eccessivamente cariche e per quelle in cui la domanda è variabile nell'arco della giornata.

Nella maggior parte dei casi, gli impianti attuati sono utilizzati soprattutto in aree extraurbane o periferiche; la loro diffusione è attualmente limitata a causa dei costi abbastanza elevati.

In questi impianti il verde semaforico viene assegnato alle diverse fasi in tempo reale, in funzione di uno o più parametri del deflusso delle correnti che chiedono di attraversare l'intersezione dai diversi accessi.

Le più comuni modalità di attuazione sono due:

- 1) **attuazione a volume;**
- 2) **attuazione a volume-densità.**

#### *A) Attuazione a volume.*

Nella progettazione di un impianto semaforico attuato la prima cosa da fare è stabilire il tempo di verde da dare ai flussi pedonali e la durata dell'interverde; tali valori possono essere calcolati come visto ai paragrafi precedenti. Deve poi essere fissato il tempo di verde massimo da dare ad ogni accesso ed inoltre:

- un *intervallo iniziale*,  $I_i$ ;
- un *intervallo veicolare*,  $I_v$ .

Con riferimento alla figura 1.11, il verde di una qualunque fase inizia con un tempo fisso (intervallo iniziale) che ha la funzione di permettere la partenza e lo sgombero dell'intersezione ai veicoli situati tra il rivelatore e la linea di arresto, nell'ipotesi che tale spazio sia saturato da veicoli accodati. A tale intervallo va sommato un intervallo veicolare, commisurato al tempo occorrente ad un veicolo in avvicinamento a percorrere la distanza tra il rivelatore e la linea di arresto.

La somma dell'intervallo iniziale e del primo intervallo veicolare dà il minimo periodo di verde possibile per l'accesso.

Se durante il trascorrere dell'intervallo veicolare un veicolo passa sul rivelatore (tale istante è rappresentato in figura da un asterisco), esso annulla la frazione non utilizzata dell'intervallo in questione e dà inizio al trascorrere di un nuovo intervallo veicolare e così di seguito, fino a che o non arriva nessun veicolo in un intervallo veicolare oppure si

è raggiunto il massimo valore del periodo di verde; a questo punto inizia la fase dell'interverde.

**FIG. 1.11**

[1.7]

Se un veicolo passa davanti al rivelatore quando è già trascorso un intero intervallo veicolare, la sua attuazione non prolungherà il verde ma resterà memorizzata come prenotazione per il ciclo successivo; in questo modo si evita che un veicolo passato sul rivelatore ed arrestatosi senza sgomberare l'intersezione venga "dimenticato" e non riceva più il verde.

#### *B) Attuazione a volume-densità.*

In questo secondo caso l'intervallo iniziale è programmato per avere una durata variabile in funzione del numero di veicoli sopraggiunti durante la fase di rosso, e che, quindi, si trovano in coda nel tratto di strada compreso tra il rivelatore e la linea di arresto; l'intervallo iniziale è, allora, variabile dal valore minimo, che è quello che consente ad un unico veicolo di liberare l'intersezione, ad un valore massimo, quando il tratto di strada compreso tra il rivelatore e la linea di arresto è saturo di veicoli. In questo modo il sistema segue ancora più da vicino le variazioni della domanda nel tempo.

Anche l'intervallo veicolare nel funzionamento a volume-densità non è costante, ma diminuisce col passare del tempo (secondo una legge prefissata), a partire dall'istante in cui una delle altre fasi viene prenotata dal passaggio di un veicolo davanti al rivelatore, fino ad un valore minimo che può porsi pari al distanziamento temporale tra due veicoli successivi in condizioni di flusso di saturazione ( $h$ ).

Con questo tipo di attuazione si evita che il verde sia prolungato fino alla durata massima a causa dell'arrivo di veicoli sparsi: il prolungamento del verde si ha solo se il plotone di veicoli in arrivo all'intersezione è sufficientemente addensato.

Trascorso senza attuazioni l'intervallo veicolare ammissibile, viene impedito il prolungamento del verde, ma, prima di passare all'interverde, viene completato l'ultimo intervallo veicolare fino al valore iniziale, così da permettere all'ultimo veicolo passato sul rivelatore di raggiungere la linea di arresto e di sgomberare l'intersezione; il veicolo successivo viene comunque arrestato.

#### *C) Posizionamento del rivelatore.*

La scelta della distanza tra il rivelatore e la linea di arresto è di fondamentale importanza: le durate dell'intervallo iniziale,  $I_i$ , e dell'intervallo veicolare,  $I_v$ , dipendono infatti da tale distanza.

L'intervallo iniziale può essere calcolato come:

$$I_i = 4 + 2 \cdot \text{int}\left(\frac{\text{Distanza}}{6}\right) \quad (\text{sec})$$

dove l'approssimazione al numero intero viene fatta per eccesso e la distanza è in metri.

L'intervallo veicolare è dato semplicemente da:

$$I_v = \frac{\text{Distanza}}{\text{Velocità}} \quad (\text{sec})$$

E' evidente che la scelta della distanza va fatta in modo tale da evitare una durata del tempo di verde minimo troppo limitata o troppo elevata; ad esempio un campo accettabile per  $I_i$  è di 10÷14 secondi e per  $I_v$  di circa 2÷3 secondi; la distanza è variabile, allora, tra i 15 ed i 25 metri.

#### 2.4.6) La regolazione semaforica coordinata.

Nel caso in cui due o più intersezioni semaforizzate sono vicine tra loro, è conveniente coordinare i relativi tempi di verde per consentirne ai veicoli un rapido attraversamento, possibilmente senza arresti; quando ciò si realizza si parla di impianti semaforici coordinati.

In genere la regolazione coordinata può essere utilizzata per intersezioni distanti tra loro non più di 800 m; per distanze superiori le intersezioni devono essere considerate indipendenti, in quanto il plotone di veicoli che, al verde, lascia una intersezione non arriva compatto alla successiva, e gli arrivi possono ritenersi nuovamente casuali.

In fig. 1.12 è rappresentato su un diagramma spazio-tempo la traiettoria percorsa da un veicolo; al tempo  $t=t_1$  il primo semaforo ha il verde, il veicolo parte, percorre la strada e all'istante di tempo  $t=t_2$  incontra il secondo semaforo: il veicolo si arresterà o meno a seconda del segnale trovato; la regolazione coordinata delle intersezioni mira a limitare quanto più è possibile gli arresti del flusso di veicoli.

La differenza tra gli inizi dei due tempi di verde di due intersezioni successive è detto “**sfasamento**” (*signal offset*); esso viene indicato generalmente in secondi, o, più raramente, come frazione della durata del ciclo.

I vantaggi della regolazione coordinata sono molteplici: evitando l'arresto dei veicoli che percorrono un determinato itinerario si riducono di molto il tempo dello spostamento e l'inquinamento atmosferico; è previsto questo tipo di regolazione per le strade di scorrimento, sia dalle norme CNR [1.8] sia dalle direttive per la redazione dei PUT [1.9].

**FIG. 1.12**

[1.3]

I parametri-base del sistema sono lo sfasamento,  $\phi$ , già definito e la velocità di deflusso della corrente veicolare,  $V$ .

La relazione che lega la velocità di coordinamento ottimale " $V^o$ " con lo sfasamento " $\phi$ " e la distanza tra le intersezioni " $d$ " è:

$$V^o = 3.6 \cdot \frac{d}{\phi}$$

con  $V^o$  espressa in km/h,  $d$  in metri e  $\phi$  in secondi.

$V^o$  è in pratica la velocità che deve mantenere un veicolo che giunge alla prima intersezione nell'istante in cui essa inizia la fase di verde, per giungere all'intersezione successiva nell'istante in cui per questa seconda inizia la fase di verde.

Teoricamente si possono attuare infiniti schemi di sincronizzazione variando durata di ciclo e sfasamento; però si preferisce o è necessario in molti casi mantenere uguali per tutte le intersezioni la durata del ciclo e la sua ripartizione in tempi di verde e rosso.

Il massimo numero di veicoli che può essere coordinato è pari a:

$$N = \frac{g}{h} \quad (\text{veic./ciclo})$$

dove:

$g$  = durata del verde efficace (sec/ciclo)

$h$  = distanziamento temporale tra due veicoli in condizione di saturazione (sec/veic.)

La capacità di smaltimento di un itinerario sincronizzato, detta anche “capacità d’onda”, riferita ad un’ora di funzionamento vale:

$$c = 3600 \cdot \frac{(g / C)}{h} \quad (\text{veic./h})$$

Il caso più semplice di coordinamento si presenta per le strade a senso unico, sia che le intersezioni siano pressoché equamente distanziate che in caso contrario; nel primo caso per mantenere costante la velocità di coordinamento lo sfasamento deve essere costante, mentre nel secondo caso esso deve variare in proporzione alla distanza tra le successive intersezioni:

— Per distanza pressoché uguale tra le intersezioni lo sfasamento è costante e vale:

$$\Sigma = 3.6 \cdot \frac{d}{V} \quad (\text{sec})$$

— Per distanza variabile tra le intersezioni gli sfasamenti sono variabili e valgono:

$$\Sigma_i = 3.6 \cdot \frac{d_i}{V} \quad (\text{sec})$$

Nel caso di strade a doppio senso di circolazione la regolazione coordinata è estremamente difficile da realizzare; essa è possibile solo:

- quando le intersezioni si trovano a distanza pressoché uguale tra loro e le velocità di coordinamento nei due sensi sono uguali;
- quando le intersezioni si trovano ancora a distanza pressoché uguale tra loro e le velocità di coordinamento sono diverse ma legate da una relazione stabilita.

Pertanto non si ritiene che sia un regime realisticamente attuabile e per la relativa specifica trattazione si rimanda a testi specialistici e/o a specifici programmi *software*.

#### **2.4.7) Normativa C.N.R. per le intersezioni semaforizzate.**

Il Bollettino Ufficiale del C.N.R. n. 150 del 15/12/1992 [1.8] riporta delle indicazioni riguardanti gli impianti semaforici<sup>1</sup>.

Nelle suddette norme viene inizialmente descritto il funzionamento e l'utilità degli impianti semaforici e sono date le definizioni base di fase semaforica e ciclo semaforico; in seguito sono riportate le indicazioni pratiche riguardanti l'utilizzo e la progettazione dell'impianto.

Viene precisato che un impianto semaforico a tre luci può essere impiegato sulle intersezioni delle strade di quartiere e locali, ed eccezionalmente su quelle delle strade di scorrimento; in quest'ultimo caso però la regolazione semaforica è ammessa solo se di tipo coordinato oppure, se l'intersezione è isolata, solo se è possibile un piano di fasatura a due fasi e senza punti di conflitto tra le correnti veicolari provenienti dalle strade di scorrimento.

Bisogna, poi, da un lato valutare se la regolazione semaforica è necessaria, cioè se è ancora possibile o meno il deflusso delle correnti di traffico con le normali regole di priorità (limite inferiore della regolazione semaforica), e dall'altro valutare se i flussi di traffico all'intersezione sono effettivamente smaltibili dalla capacità dell'impianto (limite superiore della regolazione semaforica). A tal proposito le norme consigliano di riferirsi al valore della durata minima del ciclo semaforico, sufficiente a smaltire i flussi di traffico:

- se la durata del ciclo è inferiore ai 30 secondi conviene realizzare intersezioni a raso non semaforizzate;
- se la durata del ciclo è compresa tra 30 e 120 secondi bisogna realizzare intersezioni a raso semaforizzate;
- per durate del ciclo maggiori di 120 secondi è necessaria una intersezione a livelli sfalsati.

In quest'ultimo caso, però, le norme indicano che prima di adottare tale soluzione si effettuino tutti i possibili tentativi per riportare il ciclo semaforico a valori inferiori a tale soglia: ad esempio ampliamenti dell'area di intersezione, miglioramenti della canalizzazione e del piano di fasatura, deviazione di alcune correnti veicolari su direttrici stradali alternative.

---

<sup>1</sup>I simboli adottati in questo paragrafo, uguali a quelli da noi utilizzati nella precedente trattazione, non coincidono, in generale, con quelli utilizzati dalle norme CNR.

*A) Durata del ciclo semaforico.*

La normativa precisa che, “*qualora non risultino disponibili criteri di valutazione più raffinati*”, la durata del ciclo semaforico può essere calcolata come:

$$C = \frac{L}{1 - Z}$$

dove:

$L$  = somma dei perditempi durante un ciclo (sec).

$Z$  = somma degli indici di carico delle singole fasi veicolari.

Tale formula coincide con quella del ciclo teorico minimo in grado di smaltire tutti i flussi che giungono all'intersezione.

Il termine  $L$  è dato da:

$$L = P + \sum_{i=1}^N L_i \quad (\text{sec})$$

dove:

$P$  = durata (in secondi) della fase esclusivamente pedonale eventualmente presente (raramente necessaria).

$N$  = numero delle fasi semaforiche veicolari.

$L_i$  = perditempo (sec) della  $i$ -esima fase.

Il perditempo  $L_i$  di ogni fase semaforica è dato dai seguenti tempi:

- avviamento alla partenza, in genere 3 secondi (da aumentare congruamente nel caso in cui sono presenti molti mezzi pesanti, specialmente su rami di accesso in salita);
- metà del tempo di giallo ( $y_i$ ), da assumere costante e pari a 4 secondi;
- ove presente il tempo di tutto-rosso ( $AR_i$ ), espresso in secondi.

Risulta allora:

$$L_i = 5 + AR_i$$

e quindi:

$$L = P + \sum_{i=1}^N (5 + AR_i)$$

A loro volta i tempi di tutto-rosso sono tabellati (vedi tabb. 1.7 e tab.1.8) per le strade di scorrimento e di quartiere in funzione di:

$V_a$  = velocità (km/h) dei veicoli in arrivo, da porre pari alla velocità di progetto della strada o al limite di velocità imposto;

$D$  = lunghezza della traiettoria (m), all'interno dell'area di intersezione, della corrente più vincolante in termini di tempo di sgombero dell'intersezione medesima;

$V_v$  = velocità dei veicoli (km/h) della corrente più vincolante, come sopra definita, all'interno dell'intersezione, da valutare di volta in volta in ragione delle traiettorie dei veicoli.

La tabella relativa alle strade di quartiere può essere utilizzata anche per le strade locali.

Il termine  $Z$  (somma degli indici di carico delle singole fasi veicolari) è dato da:

$$Z = \sum_{i=1}^{\Phi} z_i$$

dove  $z_i$  è l'indice di carico per ciascuna fase, dato da:

$$z_i = (v_j / s_j)_{\max}$$

dove:

$v_j$  = flusso previsto in transito della corrente di traffico  $j$ .

$s_j$  = flusso di saturazione della medesima corrente di traffico  $j$ .

I flussi veicolari in transito  $v_j$  si riferiscono in genere ad una base temporale di 15 minuti primi; essi vanno espressi in unità autovetture (UA) adottando opportuni coefficienti di equivalenza (in genere: un autotreno o autoarticolato = 5 UA; un autobus o autocarro di peso superiore ai 50 q = 3 UA; un'autovettura = 1 UA; un motociclo = 0.5 UA).

TAB. 1.7

[1.8]

| <b>STRADE DI SCORRIMENTO</b>                                                           |                                                         |    |    |    |    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|
| Velocità dei veicoli in arrivo (km/h) $V_a = 70$                                       |                                                         |    |    |    |    |    |
| Pendenza (*) $i\% = 0$                                                                 |                                                         |    |    |    |    |    |
| I tempi di tutto rosso tabulati (**) ed espressi in secondi sono arrotondati all'unità |                                                         |    |    |    |    |    |
|                                                                                        | Velocità $V_v$ di attraversamento più vincolante (km/h) |    |    |    |    |    |
| Lunghezza<br>traiettoria D (m)                                                         | 70                                                      | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 |
| 7                                                                                      | 0                                                       | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  |
| 9                                                                                      | 1                                                       | 1  | 1  | 1  | 2  | 2  |
| 11                                                                                     | 1                                                       | 1  | 1  | 1  | 2  | 3  |
| 13                                                                                     | 1                                                       | 1  | 1  | 2  | 2  | 3  |
| 15                                                                                     | 1                                                       | 1  | 1  | 2  | 2  | 3  |
| 17                                                                                     | 1                                                       | 1  | 1  | 2  | 3  | 4  |
| 19                                                                                     | 1                                                       | 1  | 2  | 2  | 3  | 4  |
| 21                                                                                     | 1                                                       | 1  | 2  | 2  | 3  | 5  |
| 23                                                                                     | 1                                                       | 2  | 2  | 2  | 3  | 5  |
| 25                                                                                     | 1                                                       | 2  | 2  | 3  | 3  | 5  |
| 27                                                                                     | 2                                                       | 2  | 2  | 3  | 4  | 6  |
| 29                                                                                     | 2                                                       | 2  | 2  | 3  | 4  | 6  |
| 31                                                                                     | 2                                                       | 2  | 2  | 3  | 4  | 6  |
| 33                                                                                     | 2                                                       | 2  | 3  | 3  | 4  | 7  |
| 35                                                                                     | 2                                                       | 2  | 3  | 3  | 5  | 7  |
| 37                                                                                     | 2                                                       | 2  | 3  | 4  | 5  | 7  |
| 39                                                                                     | 2                                                       | 3  | 3  | 4  | 5  | 8  |
| 41                                                                                     | 2                                                       | 3  | 3  | 4  | 5  | 8  |
| 43                                                                                     | 2                                                       | 3  | 3  | 4  | 6  | 9  |
| 45                                                                                     | 2                                                       | 3  | 3  | 4  | 6  | 9  |
| 47                                                                                     | 3                                                       | 3  | 4  | 5  | 6  | 9  |
| 49                                                                                     | 3                                                       | 3  | 4  | 5  | 6  | 10 |
| 51                                                                                     | 3                                                       | 3  | 4  | 5  | 7  | 10 |
| 53                                                                                     | 3                                                       | 3  | 4  | 5  | 7  | 10 |
| 55                                                                                     | 3                                                       | 3  | 4  | 5  | 7  | 11 |

(\*) In situazione di pendenza negativa massima ammissibile ( $i = -6\%$ ) i tempi di tutto rosso sopra indicati devono essere incrementati di 1 s.

(\*\*) Con riferimento a coefficiente di aderenza pari a 0,35 (valore indicato dalle norme in corrispondenza della velocità di 70 km/h).

TAB. 1.8

[1.8]

| <b>STRADE DI QUARTIERE</b>                                                             |                                                         |    |    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----|----|----|
| Velocità dei veicoli in arrivo (km/h) $V_a = 50$                                       |                                                         |    |    |    |
| Pendenza (*) $i\% = 0$                                                                 |                                                         |    |    |    |
| I tempi di tutto rosso tabulati (**) ed espressi in secondi sono arrotondati all'unità |                                                         |    |    |    |
|                                                                                        | Velocità $V_v$ di attraversamento più vincolante (km/h) |    |    |    |
| Lunghezza<br>traiettoria D (m)                                                         | 50                                                      | 40 | 30 | 20 |
| 7                                                                                      | -                                                       | -  | 0  | 1  |
| 9                                                                                      | -                                                       | 0  | 0  | 1  |
| 11                                                                                     | -                                                       | 0  | 1  | 2  |
| 13                                                                                     | 0                                                       | 0  | 1  | 2  |
| 15                                                                                     | 0                                                       | 1  | 1  | 2  |
| 17                                                                                     | 0                                                       | 1  | 1  | 3  |
| 19                                                                                     | 1                                                       | 1  | 2  | 3  |
| 21                                                                                     | 1                                                       | 1  | 2  | 3  |
| 23                                                                                     | 1                                                       | 1  | 2  | 4  |
| 25                                                                                     | 1                                                       | 2  | 2  | 4  |
| 27                                                                                     | 1                                                       | 2  | 3  | 5  |
| 29                                                                                     | 1                                                       | 2  | 3  | 5  |
| 31                                                                                     | 1                                                       | 2  | 3  | 5  |
| 33                                                                                     | 2                                                       | 2  | 3  | 6  |
| 35                                                                                     | 2                                                       | 2  | 4  | 6  |
| 37                                                                                     | 2                                                       | 3  | 4  | 6  |
| 39                                                                                     | 2                                                       | 3  | 4  | 7  |
| 41                                                                                     | 2                                                       | 3  | 4  | 7  |
| 43                                                                                     | 2                                                       | 3  | 5  | 7  |
| 45                                                                                     | 2                                                       | 3  | 5  | 8  |
| 47                                                                                     | 3                                                       | 3  | 5  | 8  |
| 49                                                                                     | 3                                                       | 4  | 5  | 9  |
| 51                                                                                     | 3                                                       | 4  | 6  | 9  |
| 53                                                                                     | 3                                                       | 4  | 6  | 9  |
| 55                                                                                     | 3                                                       | 4  | 6  | 10 |

(\*) Anche in situazione di pendenza negativa massima ammissibile ( $i = -7\%$ ) si può trascurare il suo effetto nella valutazione del calcolo del tutto rosso.

(\*\*) Con riferimento a coefficiente di aderenza pari a 0,40 (valore indicato dalle norme in corrispondenza della velocità di 50 km/h).

Per quanto riguarda il flusso di saturazione  $s_j$  esso può essere calcolato “in assenza di specifici risultati da indagini locali” come:

$$s_j = 165 \cdot a_j + 45 \quad (\text{UA/15'})$$

dove:

$a_j$  = larghezza della sezione di accesso (in m) della corrente (o delle correnti)  $j$  in esame.

Tenendo conto delle larghezze standard delle corsie di canalizzazione si può valutare  $Z$  nel seguente modo:

$$Z = \sum_{i=1}^N \left\{ \left( \frac{v_j}{575 \cdot m_j + 410 \cdot n_j + 45} \right)_{\max} \right\}_i$$

dove:

$m_j$  = numero di corsie di larghezza pari a 3.50 m assegnate alla corrente  $j$  (per il transito anche dei mezzi pesanti).

$n_j$  = numero di corsie di larghezza pari a 2.50 m assegnate alla medesima corrente  $j$  (per il transito di sole autovetture).

#### B) Durata dei tempi di verde.

Il tempo di verde di ogni fase veicolare “si può valutare” con la seguente espressione:

$$G_i = 1 + (C - L) \cdot \frac{Z_i}{Z}$$

somma del verde effettivo  $((C-L)z_i/Z)$  e del perditempo alla partenza (3 sec) meno due secondi del tempo di giallo utilizzati dal veicolo passato nell'ultimo istante di verde.

Viene inoltre consigliato di verificare che la coda formatasi all'intersezione non interferisca con l'intersezione subito “a monte” di essa.

Per quanto riguarda le fasi pedonali si distinguono due casi:

- fasi esclusivamente pedonali;
- fasi pedonali contemporanee a quelle veicolari.

Nel primo caso la durata del verde pedonale è compresa tra 5 e 10 secondi, in relazione all'entità dei flussi pedonali ed alla larghezza degli attraversamenti.

Nel secondo caso, determinato il tempo di verde, di giallo e di eventuale tutto-rosso della corrispondente corrente veicolare, si deve vedere se la loro somma è sufficiente a consentire l'attraversamento pedonale contemporaneo (si deve tener conto che al verde pedonale si deve sommare il tempo di giallo pedonale, che può essere preso pari ad un numero di secondi pari alla larghezza in metri dell'attraversamento).

Per quanto riguarda la scelta del numero delle fasi si evidenzia che esso è in stretta relazione con il numero di punti di conflitto (intersecazione e immissione) che si vuole eliminare, e che le fasi devono essere quanto meno è possibile. Si ammettono punti di conflitto tra una corrente veicolare ed una pedonale se non lo si ritiene pericoloso dal punto di vista della sicurezza e se non vi sono seri intralci alla circolazione. Si ammettono punti di conflitto tra correnti veicolari purché il flusso della corrente secondaria in conflitto non sia superiore ai seguenti valori:

- 30 UA/15', su intersezioni con possibilità di accumulo di 1 o 2 veicoli all'interno dell'area di intersezione medesima, e comunque senza influire sulla corrente principale in conflitto;
- 60 UA/15', su intersezioni con possibilità di accumulo pari a più di due veicoli all'interno dell'area di intersezione medesima, e comunque senza influire sulla corrente principale in conflitto.

Se è possibile più di una fasatura si deve individuare quella che minimizza la durata del ciclo.

### *C) Esempio.*

Se si utilizza la metodologia del CNR per la progettazione dei parametri di regolazione dell'intersezione già studiata nell'esempio del paragrafo 2.4.2, si nota che il procedimento è perfettamente analogo, ad esclusione del calcolo dei tempi persi e del flusso di saturazione.

I tempi persi delle due fasi veicolari, fermo restante il valore di 2 sec per il tutto-rosso, sono dati da:

$$L_1 = 5 + AR_1 = 5 + 2 = 7 \text{ sec}$$

$$L_2 = 5 + AR_2 = 5 + 2 = 7 \text{ sec}$$

Il flusso di saturazione per i due accessi di diversa larghezza è dato da:

$$s_1 = s_3 = [165 \cdot a_1 + 45] \cdot 4 = [165 \cdot 5,0 + 45] \cdot 4 = 3480 \text{ veic/h}$$

$$s_2 = s_4 = [165 \cdot a_2 + 45] \cdot 4 = [165 \cdot 4,5 + 45] \cdot 4 = 3150 \text{ veic/h}$$

Il ciclo semaforico è, allora, dato da:

$$C = \frac{L}{1 - Z} = \frac{14}{1 - (950 / 3480 + 1000 / 3150)} = 34 \text{ sec}$$

La differenza riscontrata rispetto al metodo di calcolo classico è dovuta al modo con cui si calcola il flusso di saturazione dell'intersezione; la formula proposta dal CNR risulta essere alquanto approssimata e sembra nettamente sopravvalutare il flusso di saturazione, soprattutto per larghezze dell'accesso superiore a 3,5 m.

#### *D) Regolazione attuata del traffico.*

L'uso di impianti semaforici attuati è consigliata dalla normativa, salvo nei casi di impianti coordinati.

Con riferimento al dispositivo di chiamata veicolare in prossimità della linea d'arresto (circa 5 m), la durata del tempo di via libera veicolare si può ritenere funzione dei seguenti 3 parametri:

- *tempo di verde minimo*, necessario ad avviare il plotone dei veicoli (compreso tra 6 e 10 sec);
- *intervallo di prolungamento del verde* (che può essere fissato pari a 2 secondi salvo accessi con forte pendenza e con rilevante presenza di traffico pesante);
- *tempo di verde massimo*, oltre il quale le attese dei veicoli delle altre fasi non risultano più tollerabili.

#### *E) Coordinamento delle intersezioni.*

Le intersezioni semaforizzate, se non isolate, devono essere coordinate tra loro se appartenenti ad itinerari costituiti da strade di quartiere.

Le intersezioni debbono altresì essere coordinate quando le distanze tra loro sono tali da non garantire sufficienti zone di accumulo.

*“Il progetto di coordinazione delle intersezioni lungo un itinerario deve, almeno, fornire i seguenti elementi”:*

- calcolo della durata del ciclo per ogni intersezione (riferito ai quarti d'ora di punta);

- individuazione dell'intersezione per la quale il ciclo è massimo;
- determinazione del tempo di verde (coincidente con la banda minima di verde dell'itinerario), nella predetta intersezione per la quale il ciclo è massimo;
- scelta di una possibile velocità di coordinamento;
- individuazione della coordinazione migliore, cioè di quella i cui parametri (ciclo, ampiezza della banda di verde e velocità) sono i più vicini al ciclo massimo, ampiezza di banda e velocità precedentemente determinati;
- verifica ad ogni intersezione che i tempi di verde di tutte le fasi semaforiche trasversali siano in grado di smaltire i flussi massimi delle relative correnti di traffico.

### 2.5) L'analisi del deflusso nelle arterie urbane.

Nelle strade urbane il flusso veicolare è disturbato anche da cause estranee alla corrente veicolare stessa (attraversamenti pedonali, intersezioni, auto in fase di parcheggio, etc.); esse vanno trattate quindi in modo diverso rispetto alle strade extraurbane ed esiste per esse una apposita procedura per il calcolo del livello di servizio (LdS).

Noi trattiamo ora le strade di scorrimento e di quartiere, cui si può applicare la procedura per il calcolo del LdS proposta dall'*HCM* 1994 [1.2]; tali strade sono caratterizzate dal servire un traffico di percorrenza medio-lunga e con volumi di traffico sufficientemente elevati. Per le strade primarie si è più prossimi in genere alle condizioni di flusso ininterrotto, mentre le strade locali sono interessate da bassi volumi di traffico.

Sono individuati tre fattori caratterizzanti le condizioni operative del deflusso veicolare sulle strade urbane:

- *fattore di localizzazione*: caratteristiche geometriche della strada e grado di utilizzazione della zona attraversata dall'infrastruttura;
- *fattore di interazione*: densità veicolare, presenza di mezzi pesanti, movimenti di svolta alle intersezioni;
- *fattore di segnalamento*: presenza di intersezioni semaforizzate che obbligano i veicoli a fermarsi e a ripartire in plotoni.

Questi fattori incidono sulla capacità e sul livello di servizio (LdS) offerto dalla strada. A causa di essi, infatti, un utente non riesce a mantenere la propria *velocità desiderata*, definita come la massima velocità che l'utente manterrebbe su quella determinata strada sotto una data serie di condizioni locali. La media delle velocità desiderate degli utenti che percorrono un determinato segmento di una strada è detta **velocità a flusso libero (VFL)**.

Dobbiamo ora definire altre due velocità che caratterizzano il flusso veicolare su di una strada urbana:

- **Velocità media di viaggio (VMV)**;
- **Velocità media di marcia (VMM)**.

La prima è data dalla media delle *velocità di viaggio*, che a sua volta è data dal rapporto tra lo spazio percorso da un veicolo ed il tempo impiegato, compresi i tempi di attesa alle intersezioni.

La seconda è data dalla media delle *velocità di marcia*, le quali sono ancora date dal rapporto tra lo spazio percorso da un veicolo ed il tempo impiegato, escludendo però da quest'ultimo i tempi di attesa.

Se un veicolo si arresta ad una intersezione si avrà che  $VMV < VMM$ ; se invece viene solo rallentato si avrà  $VMV = VMM < VFL$ ; infine se un veicolo passa l'intersezione senza

subire rallentamenti o arresti si ha  $VMV=VMM=VFL$ . Per stimare, quindi, la velocità media di viaggio su una certa tratta è indispensabile conoscere il numero e le caratteristiche delle intersezioni lungo la tratta stessa.

### 2.5.1) Livelli di servizio.

Il LdS di una arteria urbana viene individuato dalla **velocità media di viaggio** di un suo *segmento*, di una sua *sezione* (unione di segmenti) o dell'intera arteria; essa si calcola in funzione del *tempo di marcia* dei segmenti stradali e del *ritardo d'accesso* delle intersezioni. Nella tab. 1.9 sono riportati i livelli di servizio per ciascuna delle tre classi di arterie, considerate dall'HCM, definiti dal valore limite inferiore della velocità media di viaggio (VMV).

TAB. 1.9

[1.2]

| Classe arteria     | I          | II      | III     |
|--------------------|------------|---------|---------|
| Campo VFL (km/h)   | 72###56    | 56###48 | 56###40 |
| VFL caratteristica | 64         | 53      | 43      |
| LdS                | VMV (km/h) |         |         |
| A                  | ### 56     | ### 48  | ### 40  |
| B                  | ### 45     | ### 39  | ### 31  |
| C                  | ### 35     | ### 29  | ### 21  |
| D                  | ### 27     | ### 23  | ### 14  |
| E                  | ### 21     | ### 16  | ### 11  |
| F                  | < 21       | < 16    | < 11    |

Le condizioni di deflusso in corrispondenza dei 6 livelli di servizio sono:

- A) Condizioni di deflusso libero; la VMV ### 90### VFL della classe della strada; i veicoli hanno ampia possibilità di manovra e il ritardo medio alle intersezioni semaforizzate è molto basso (5 s/veic.).
- B) La VMV ### 70### VFL; i veicoli subiscono leggere limitazioni di manovra e i ritardi ai semafori non provocano notevoli disagi.
- C) Rappresenta condizioni limite di flusso stabile; le capacità di manovra e di cambio corsia sono più limitate rispetto al LdS B; si formano code alle intersezioni semaforizzate e la VMV ### 50% VFL; i conducenti avvertono tensioni nella guida.
- D) Un piccolo incremento di domanda può causare un sostanziale incremento dei ritardi alle intersezioni; VMV ### 40### VFL; ciò è dovuto all'effetto congiunto di una progressione semaforica sfavorevole, di una errata progettazione dei cicli semaforici e di alti volumi di traffico.

- E) Vi sono elevati ritardi alle intersezioni, per cui la VMV ### 1/3 della relativa VFL; formazione di code e totale impossibilità di manovra all'interno della corrente veicolare.
- F) E' il livello di servizio della congestione, tipico in ambito urbano nelle ore di punta; le VMV sono molto basse, ### 1/4 della VFL. Le intersezioni sono spesso sovrasature e si formano code crescenti.

### 2.5.2) La determinazione del livello di servizio.

Descriviamo ora la procedura per il calcolo del livello di servizio di una strada urbana [1.2].

La procedura è articolata in sette fasi, non tutte indispensabili se si dispone di dati misurati direttamente. Nelle strade a doppio senso di marcia la procedura va applicata separatamente ad ogni senso. Nella figura 1.13 vengono indicate le fasi della procedura.

Le fasi 4, 5 e 6 possono essere "saltate" se si rileva direttamente la velocità media di viaggio; ciò si può ovviamente fare solo per strade già esistenti.

Esaminiamo le 7 fasi:

#### *Fase 1: individuazione dell'arteria.*

Si definisce la lunghezza del tratto di strada da esaminare, la sua collocazione nell'area urbana e si acquisiscono tutti i dati di traffico, di segnalamento semaforico e di geometria.

#### *Fase 2: determinazione della classe della strada.*

In questa fase si deve individuare la classe della strada cui competono particolari valori della VMV che ne individua il livello di operatività.

Vengono definite tre classi di arterie urbane distinte per funzione e tipologia progettuale; per individuare la classe di appartenenza si deve prima individuare la sua categoria *funzionale* e, poi, quella *progettuale*. Per strade già esistenti la classe può essere individuata da misure dirette della VFL.

Le *categorie funzionali* previste sono due: una strada urbana, in base alla funzione assoluta, può essere perciò classificata di 1° o 2° livello a seconda del peso assunto da alcuni particolari parametri.

Una strada di 1° livello è a servizio di notevoli flussi di traffico e collega importanti centri di attività esistenti nell'area urbana; inoltre serve una notevole aliquota del traffico in ingresso o in uscita dall'area stessa, oppure collega strade primarie con zone di intensa generazione e/o attrazione di spostamenti.

Un'arteria di 2° livello è invece una infrastruttura di connessione e completamento del sistema di strade di 1° livello; gli spostamenti hanno lunghezza più contenuta e le aree servite sono più modeste.

Per individuare la *categoria progettuale* di una arteria urbana si considerano gli aspetti geometrici e di traffico caratterizzanti la strada: geometria della carreggiata, densità di impianti semaforici, esistenza di corsie per la svolta, eventuali limiti di velocità, opportunità di sosta, attraversamenti pedonali, controllo degli accessi, intensità degli insediamenti laterali alla strada.

Sono state proposte tre categorie di strade per quanto riguarda l'aspetto progettuale, che possono essere correlate alla localizzazione della strada:

- 1) In zona periferica (I categoria ### strada di scorrimento di 1° livello).
- 2) In zona semicentrale (II categoria ### strada di scorrimento di 2° livello).
- 3) In zona centrale urbana (III categoria ### strada di quartiere).

Nella tabella 1.10 vengono riassunti gli elementi che devono essere considerati per l'inquadramento funzionale e progettuale di una strada urbana.

#### *Fase 3: suddivisione dell'arteria.*

Un'arteria viene suddivisa in “*segmenti*”; un segmento viene definito come la distanza misurata in un senso di marcia tra due intersezioni semaforizzate adiacenti. Se due o più segmenti consecutivi sono simili per classe, lunghezza, limiti di velocità etc., possono essere aggregati in una “*sezione*”; in questo caso nelle successive fasi di calcolo ci si riferisce alla lunghezza media dei segmenti costituenti la sezione.

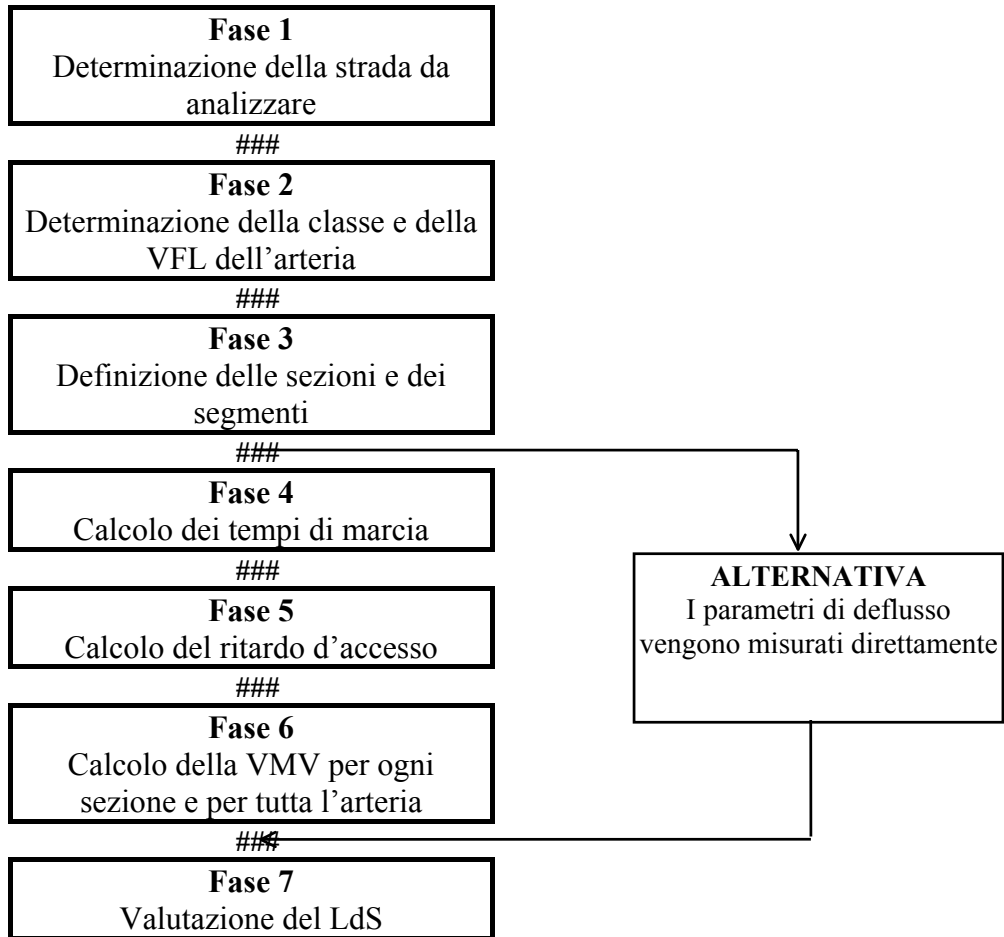
#### *Fase 4: calcolo del tempo di marcia.*

Il tempo impiegato da un veicolo a percorrere un segmento, una sezione o l'intera arteria viene calcolato come somma del tempo di marcia e del ritardo di accesso alle intersezioni semaforizzate.

Il tempo medio di marcia per km (TM/K espresso in sec./km) è riportato in tabella 1.12 in funzione della classe di strada, della VFL e delle lunghezza media dei segmenti che compongono la sezione.

FIG. 1.13

[1.2]



TAB. 1.10

[1.2]

| Categoria funzionale             |                                                              |                                                          |                                                    |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| PARAMETRO                        |                                                              | Strade primarie e scorrimento                            | Strade di quartiere                                |
| Mobilità                         |                                                              | Molto importante                                         | Importante                                         |
| Accesso                          |                                                              | Molto limitato                                           | Abbastanza diffuso                                 |
| Punti collegati                  |                                                              | Primarie urbane, importanti generatori di traffico       | Arterie di 1° livello                              |
| Tipologia spostamenti            |                                                              | Lunghe percorrenze, traffico in entrata/uscita e diretto | Brevi percorrenze, entro zone di limitata ampiezza |
| CATEGORIA PROGETTUALE            |                                                              |                                                          |                                                    |
| PARAMETRO                        | I Categoria (primarie)                                       | II Categoria (scorrim.)                                  | III Categoria (quartiere)                          |
| Densità passi carrabili          | Bassa                                                        | Media                                                    | Elevata                                            |
| Tipologia                        | Multicorsia a carregg. divisa o unica a 2 corsie + emergenza | Multicorsia a carregg. divisa o unica a 2 o più corsie   | A S.U. o D.S. a 2 o più corsie                     |
| Sosta                            | Nulla                                                        | Limitata                                                 | Elevata                                            |
| Svolte a sx. in corsia esclusiva | Sempre                                                       | Usualmente                                               | Talvolta                                           |
| Semafori/km                      | 1###3,0                                                      | 2,5###6                                                  | 4###8                                              |
| Velocità (km/h)                  | 65###70                                                      | 50###55                                                  | 45###55                                            |
| Attività pedonale                | Limitata                                                     | Media                                                    | Elevata                                            |
| Insedimenti collaterali          | Bassi                                                        | Medi                                                     | Alti                                               |

Determinate le categorie (funzionale e progettuale) della strada, è facile individuare la classe con la tab. 1.11.

TAB. 1.11

[1.2]

| CATEGORIA PROGETTUALE                     | CATEGORIA FUNZIONALE   |           |
|-------------------------------------------|------------------------|-----------|
|                                           | Primarie e scorrimento | Quartiere |
|                                           | CLASSE ARTERIA         |           |
| 1 <sup>a</sup> (suburbana-primaria)       | I                      | II        |
| 2 <sup>a</sup> (semicentrale-scorrimento) | II                     | II o III  |
| 3 <sup>a</sup> (centrourbana-quartiere)   | II o III               | III       |

TAB. 1.12

[1.2]

| CLASSE ###           | I                             |     |     | II  |     | III   |       |       |
|----------------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|
| VFL (km/h) ###       | 72                            | 64  | 56  | 56  | 48  | 56    | 48    | 40    |
| Lunghezza media (km) | TEMPI DI MARCIA PER KM (s/km) |     |     |     |     |       |       |       |
| 0,08                 | ###                           | ### | ### | ### | ### | ##### | 141   | 165   |
| 0,16                 | ###                           | ### | ### | ### | ### | 103   | 112   | 137   |
| 0,24                 | ###                           | ### | ### | 90  | 96  | 87    | 93    | 112   |
| 0,32                 | ###                           | ### | ### | 84  | 88  | 81    | 87    | 103   |
| 0,40                 | ###                           | ### | ### | 80  | 83  | 76    | 82    | 95    |
| 0,48                 | ###                           | ### | ### | 75  | 79  | ##### | ##### | ##### |
| 0,64                 | 68                            | 76  | 78  | ### | ### | ##### | ##### | ##### |
| 0,80                 | 65                            | 69  | 74  | ### | ### | ##### | ##### | ##### |
| ###1,60              | 62                            | 63  | 68  | ### | ### | ##### | ##### | ##### |
|                      | 58                            | 60  | 65  | ### | ### |       |       |       |
|                      | 55                            | 58  | 64  | ### | ### |       |       |       |
|                      | 50                            | 56  | 64  | ### | ### |       |       |       |
|                      |                               |     |     | ### | ### |       |       |       |

1. Se un'arteria di classe I ha un segmento <0,32km si dovrebbe rivedere la classificazione; se esso deve restare distinto, si potranno usare i valori di L=0,32km.

2. Analogamente, le arterie di classe II e III con segmenti >0,4km dovrebbero essere riclassificate; se necessario si potranno estrapolare i dati in tabella.

3. Se non è possibile stimare un valore della VFL si possono assumere i seguenti valori: 64 km/h per classe I; 56 km/h per classe II; 48 km/h per classe III.

*Fase 5: calcolo del ritardo d'accesso alle intersezioni.*

Il ritardo di accesso all'intersezione viene calcolato con metodologie di cui abbiamo trattato nel paragrafo 2.4.4 per le intersezioni semaforizzate e nel paragrafo 2.3.1 per le

intersezioni non semaforizzate riferendosi al traffico di attraversamento dell'intersezione; il ritardo così calcolato è il “*ritardo di fermata all'intersezione*”: è stato visto sperimentalmente che esso deve essere moltiplicato per 1.3 per ottenere il “*ritardo totale di accesso*” ( $\delta_a$ ).

*Fase 6: calcolo della VMV.*

La velocità media di viaggio viene calcolata con la seguente relazione:

$$VMV = \frac{3600 \cdot L}{(TMK \cdot L + \delta_a)} \quad (\text{km/h})$$

dove:

L= lunghezza della sezione

TMK= tempo medio di marcia per km dei segmenti componenti una arteria o una sezione, in s/km.

###a= ritardo totale agli accessi delle intersezioni comprese nell'arteria o nelle sezioni, in s.

La VMV per tutta l'arteria è calcolata come media pesata delle velocità di viaggio delle sezioni in cui è stata suddivisa.

*Fase 7: attribuzione del livello di servizio.*

Il LdS dell'arteria è individuato attraverso il calcolo della VMV, come al punto precedente; si entra quindi nella tab. 1.9 in corrispondenza della classe di arteria individuata con il valore della VMV e si ricava il corrispondente LdS.

### 2.5.3) Esempio.

Si voglia valutare il LdS di un'arteria urbana, suddivisibile in 5 segmenti i quali abbiano le seguenti caratteristiche:

| Segm. | Lungh. | Corsie | Zona   | Sosta    | Semaforo | VFL     | Ritardo |
|-------|--------|--------|--------|----------|----------|---------|---------|
| 1     | 250 m  | 2      | Centro | Limitata | SI       | 50 km/h | 10 sec  |
| 2     | 300 m  | 2      | Centro | Limitata | SI       | 50 km/h | 15 sec  |

|          |       |   |            |          |    |         |        |
|----------|-------|---|------------|----------|----|---------|--------|
| <b>3</b> | 280 m | 2 | Centro     | Limitata | SI | 50 km/h | 12 sec |
| <b>4</b> | 150 m | 1 | Semicentr. | Elevata  | NO | 40 km/h | 5 sec  |
| <b>5</b> | 200 m | 1 | Semicentr. | Elevata  | NO | 40 km/h | 7 sec  |

I segmenti 1, 2 e 3 possono costituire un'unica sezione (sezione 1) in quanto sono simili per lunghezza classe e velocità; analogamente i segmenti 4 e 5 costituiranno un'altra sezione (sezione 2); entrambe le sezioni, esaminate le tabb. 1.10 ed 1.11, si possono giudicare di III classe. Di ogni sezione si calcola, poi, la lunghezza media dei segmenti:

| <b>SEZIONE</b> | <b>Classe</b> | <b>Lungh. totale sezione</b> | <b>Lungh. media segmenti</b> |
|----------------|---------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>1</b>       | III           | 830 m                        | 270 m                        |
| <b>2</b>       | III           | 350 m                        | 175 m                        |

Nota la classe della sezione e la lunghezza media dei suoi segmenti, interpolando i dati della tabella 1.12 si ricavano i tempi di marcia per km (TMK) delle due sezioni:

$$TMK_1 = 91 \text{ sec/km}$$

$$TMK_2 = 130 \text{ sec/km}$$

Il ritardo totale di accesso nelle due sezioni si ottiene moltiplicando per 1,3 la somma dei ritardi di fermata relativi ai segmenti di ogni sezione:

$$\delta_{a1} = 1.3 (10 + 15 + 12) = 48,1 \text{ sec}$$

$$\delta_{a2} = 1.3 (5 + 7) = 15,6 \text{ sec}$$

Si possono, quindi, calcolare le velocità medie di viaggio delle due sezioni:

$$VMV_1 = \frac{3600 \cdot 0,83}{(91 \cdot 0,83 + 48,1)} = 24,1 \text{ km / h}$$

$$VMV_2 = \frac{3600 \cdot 0,35}{(130 \cdot 0,35 + 15,6)} = 20,6 \text{ km / h}$$

La velocità media di viaggio relativa all'intera arteria è data da:

$$VMV = (24,1 \cdot 830 + 20,6 \cdot 350) / (830 + 350) = 23 \text{ km/h}$$

cui corrisponde, in base alla tab. 1.9, un livello di servizio C.

## 2.6) Le funzioni di costo e di prestazione.

Per poter individuare completamente le caratteristiche di una rete di trasporto bisogna associare ad ogni arco una *funzione di costo*, che rappresenta il costo percepito dall'utenza nel percorrere l'arco stesso, ed una *funzione di prestazione*, che rappresenta, invece, i costi non percepiti dagli utenti dell'arco stesso (ad es. consumo carburante) ed i costi dei "non utenti" (ad es. inquinamento).

Le funzioni di costo sono necessarie nella fase di assegnazione della domanda alla rete di trasporto, mentre quelle di prestazione si utilizzano quando si voglia valutare e confrontare diversi piani di trasporto alternativi, ad es. con una analisi Multicriteria.

### 2.6.1) Funzioni di costo.

Il "*costo di trasporto*" viene definito da un vettore di grandezze tra di esse non omogenee (tempo, costo monetario, comfort, etc.), riferito ad un utente medio e ritenuto uguale per tutti gli altri utenti del sistema. La componente del costo di trasporto che risulta prevalente sulle altre, anche perché è quella percepita di più dall'utente, è il tempo di viaggio; essa è di solito l'unica componente di cui si tiene conto nei calcoli.

La "*funzione di costo*" di un arco è una relazione che lega il costo del trasporto sull'arco ai flussi sugli archi della rete e alle caratteristiche geometriche della strada rappresentata dall'arco stesso. Il costo del trasporto è funzione, in genere, non solo del flusso che percorre l'arco stesso, ma anche di flussi che percorrono gli altri archi, soprattutto nel caso di strade urbane (si pensi alle continue intersezioni tra strade e, quindi, tra flussi); in questo caso la funzione di costo è detta *non separabile*.

La funzione di costo è detta *separabile*, se il costo dipende solo dal flusso che si ha sull'arco stesso (ciò si ha, ad es., per strade extraurbane a carreggiate separate).

Per semplicità le funzioni di costo si considerano comunque separabili (anche nel caso urbano); eventualmente si tiene conto delle interferenze dovute ai flussi sugli altri archi con l'introduzione di coefficienti correttivi o calcolando i tempi di attesa alle intersezioni.

Generalmente una funzione di costo associata ad un arco di una rete di trasporto è la somma di due termini: il *tempo di running* ed il *tempo di attesa all'intersezione*. Il primo termine tiene conto del tempo totale necessario a percorrere l'arco; il secondo è il tempo di attesa nel punto di intersezione che si trova al termine dell'arco stesso. Riferendoci all'arco  $i$ -esimo possiamo allora scrivere:

$$T_i = T_{i,r} + T_{i,w}$$

dove:

$T_i$  = tempo totale speso per percorrere l'arco.

$T_{i,r}$  = tempo di running.

$T_{i,w}$  = tempo di attesa all'intersezione.

Nel caso di reti urbane il termine dovuto al tempo di attesa all'intersezione assume un peso notevole rispetto al tempo totale; nel caso, invece, di archi extraurbani, caratterizzati in genere da lunghezze notevoli, il tempo di attesa all'intersezione può essere trascurato rispetto al tempo di percorrenza. Per questo motivo le funzioni di costo che si adottano nei due casi sono tra loro diverse.

#### A) Reti extraurbane.

Per un arco "i" di una rete extraurbana o urbana, in cui prevale la condizione di flusso ininterrotto (strada di scorrimento), la funzione di costo può assumere la seguente espressione:

$$T_i = T_i^0 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot \left( \frac{f_i}{C_i} \right)^\beta \right]$$

dove:

$T_i^0$  = tempo di percorrenza dell'arco "i" in condizioni di circolazione libera (cioè a flusso nullo).

$f_i$  = flusso sull'arco i.

$C_i$  = capacità dell'arco i.

$\alpha$  e  $\beta$  = coefficienti stimati sulla base di osservazioni sperimentali.

Nella fig. 1.14 è riportato l'andamento della funzione.

Per  $\alpha = 2,62$  e  $\beta = 5$  si ha la cosiddetta formula di Steembrink; il Bureau of Public Roads (B.P.R.) suggerisce  $\alpha = 0,15$  e  $\beta = 4$ , ma al posto della capacità  $C_i$  considera la cosiddetta "capacità pratica"  $C_{p,i} = 0,75 C_i$ .

Il termine  $T_i^0$  è dato dalla somma dei rapporti fra la lunghezza  $s_k$  e la velocità  $v_{p,k}$  di progetto dei k elementi geometrici che compongono il tracciato dell'arco i-esimo:

$$T_i^0 = \sum_k \frac{s_k}{v_{p,k}}$$

**FIG. 1.14**

[1.10]

*B) Reti urbane.*

Nel caso di reti stradali urbane il tempo di attesa alle intersezioni è una aliquota importante, se non preponderante, del tempo totale di spostamento su ciascun arco della rete.

Il tempo di *running* è dato dalla seguente relazione:

$$T_{i,r} = \frac{S_i}{V_i} \cdot 3600 \quad (s)$$

dove:

$S_i$  = lunghezza in km dell'arco  $i$ .

$V_i$  = velocità di percorrenza dell'arco  $i$  (km/h).

La  $V_i$  si può ritenere pari a [1.11]:

$$V_i = 10 + 3 \cdot L_i$$

dove  $L_i$  è la larghezza della carreggiata, o semicarreggiata, della strada schematizzata dall'arco  $i$  ed a meno dell'eventuale spazio dedicato alla sosta.

Un'altra relazione per il calcolo della  $V_i$ , ricavata per alcune aree urbane italiane [1.10], è la seguente:

$$V_i = 31,1 + 2,8L_{ui} - 1,2P_i - 12,8T_i^2 - 10,4D_i - 1,4INT_i \cdot \left(\frac{1000}{L_i}\right)^{0,7} + \\ -(0,000053 + 0,000123 \cdot X_i) \cdot \left(\frac{f_i}{L_{ui}}\right)^2$$

dove:

$V_i$  ed  $L_i$  sono già state definite

$L_{ui}$  è la larghezza utile dell'arco in metri

$P_i$  è la pendenza media dell'arco  $i$  in percentuale

$T_i$  è il grado di tortuosità della strada in scala (0-1)

$D_i$  è il grado di disturbo della circolazione in scala (0-1)

$INT_i$  è il numero di intersezioni secondarie al km

$X_i$  è una variabile che vale 1 se la strada è senza possibilità di sorpasso, zero altrimenti

$f_i$  è il flusso dell'arco in veic./h

Il calcolo del tempo medio di attesa all'intersezione (ritardo) si calcola come esposto nel paragrafo 2.4.4 per le intersezioni semaforizzate e nel paragrafo 2.3.1 per le intersezioni non semaforizzate.

### 2.6.2) Funzioni di prestazione.

Le funzioni di prestazione che solitamente vengono prese in considerazione per le strade urbane riguardano:

- il consumo di carburante;
- l'inquinamento atmosferico.

Il *consumo urbano di carburante*, espresso in litri ogni 100 km per veicolo, può essere ricavato in funzione della velocità media del veicolo, con le seguenti relazioni é [1.10]:

$$c = 125 + \frac{800}{V_M \cdot (V_M + 8)} \quad \text{per } V_M < 10 \text{ km/h}$$

$$c = 7,0 + \frac{99}{V_M} \quad \text{per } 10 \leq V_M \leq 60 \text{ km/h}$$

dove  $V_M$  è la velocità commerciale media dei veicoli che percorrono l'arco in questione.

L'andamento di queste relazioni è riportato in fig. 1.15.

**FIG. 1.15**

[1.10]

Per quanto riguarda *l'inquinamento atmosferico*, si può ricavare il tasso di emissione, ovvero i grammi di inquinante per veicolo e per km percorso, con la seguente relazione [1.10]:

$$e(V_M) = K_1 + K_2 \cdot \frac{1}{V_M} \quad (\text{g/veicolo} \cdot \text{km})$$

dove:

$V_M$  = velocità commerciale media (km/h)

$K_1$  e  $K_2$  assumono i seguenti valori:

Per HC:  $K_1=1,36$  (g/veicolo·km)  $K_2=21,46$  (g/veicolo·h)

Per CO:  $K_1=16,03$  (g/veicolo·km)  $K_2=476,1$  (g/veicolo·h)

L'andamento della funzione è riportato in fig. 1.16.

**FIG. 1.16**

[1.10]

La concentrazione di monossido di carbonio (CO) in un punto può essere calcolata, in prima approssimazione, in funzione del flusso di veicoli transitanti, della distanza dal recettore (punto in cui si misura la concentrazione) e della velocità dei veicoli stessi. Una formula proposta è la seguente [1.12]:

$$C = 1,19 + 0,108 \cdot f \cdot V^{-0,795} \cdot e^{-0,25 \cdot D}$$

dove:

C= concentrazione (ppm)

f= flusso dei veicoli (veic./h)

V= velocità media del flusso (km/h)

D= distanza del recettore dal centro della strada (m)

## 2.7) Aree di scambio.

Le aree di scambio possono essere di due diversi tipi:

- A) Zone di scambio; quando due strade a senso unico convergono e, dopo un tratto comune, divergono (fig. 1.17).
- B) Rotatorie (fig. 1.18).

Il primo tipo si ha quando immissioni e uscite si susseguono a distanza ravvicinata e si rinviene frequentemente anche in ambito urbano.

Le rotatorie sono, invece, comunemente utilizzate sia per sistemare intersezioni in cui convergono più di 4 strade, sia nei casi in cui, per la configurazione dell'area di incrocio o per gli elevati flussi che chiedono di svoltare a sinistra da ogni accesso, l'impiego di una regolazione semaforica risulta essere improponibile o insoddisfacente.

### 2.7.1) Zone di scambio.

Il fenomeno dello scambio di due correnti di traffico è simile a quello dell'immissione da una corsia di accelerazione in una corsia di marcia normale: il veicolo che effettua lo scambio percorre la propria corsia e, prima di trasferirsi su quella parallela, attende che si presenti nel flusso di quest'ultima un intervallo temporale (*gap*) sufficiente allo scopo. La zona di scambio dovrà essere quindi tanto più lunga quanto maggiori sono le portate di scambio.

FIG. 1.17

[1.2]

Il veicolo che deve cambiare corsia tende a rallentare mentre attende di poter eseguire la manovra, facendosi superare dai veicoli della corrente parallela per osservare l'ampiezza degli intervalli a disposizione; il rallentamento del veicolo sarà tanto maggiore quanto più corta è la zona di scambio, per il timore di percorrerla tutta senza aver avuto la possibilità di scambiare. Questo rallentamento determina una generale caduta di velocità nella zona di scambio, per cui, per evitare la congestione del traffico, è necessario aumentare la larghezza della sezione stradale.

L'*HCM* del 1994 [1.2] riporta una procedura per il calcolo del livello di servizio di una zona di scambio nel caso autostradale; tale procedura può essere utilizzata anche per la progettazione procedendo per tentativi, fino ad ottenere, con le dimensioni assegnate, il livello di servizio desiderato.

Non riteniamo di dover riportare in questa sede la suddetta procedura, in quanto essa è applicabile in ambito urbano solo nel caso di strade a più corsie, con elevate velocità di progetto e lontano da impianti semaforici, situazione molto rara nelle città italiane. Essa può pertanto solo essere utilizzata per avere un ordine di grandezza progettuale ma si consiglia, se del caso, il ricorso a procedure di simulazione per una più adeguata verifica dell'esercizio.

### **2.7.2) Rotatorie.**

Altro esempio di area di scambio è lo schema detto "a rotatoria".

Tutti i rami che confluiscono nell'intersezione vengono immessi, generalmente con l'ausilio di isole triangolari, in una strada a più corsie chiusa su se stessa ad asse circolare o ellittico, detta appunto *rotatoria*, la quale viene percorsa in senso antiorario.

I veicoli provenienti da uno qualsiasi dei rami confluiscono nella rotatoria e la percorrono finché non raggiungono il ramo in cui debbono immettersi; il funzionamento corretto si ha quando i veicoli, raggiunta la rotatoria, si spostano dalla corsia esterna a quelle più interne, in modo da non ostacolare i veicoli che provengono o si immettono nei rami successivi.

Il numero di corsie della rotatoria varia da 2 a 4 in dipendenza del numero di veicoli che la percorrono e del numero di manovre di scambio che si verificano nei vari rami; in ogni caso non è conveniente superare le 4 corsie, perché il continuo spostamento dei veicoli da una corsia all'altra provocherebbe il cattivo funzionamento del sistema.

**FIG. 1.18**

[1.13]

## 2.8) Considerazioni generali.

Nei paragrafi precedenti sono state esposte alcune metodologie per la progettazione e per la verifica del livello di servizio delle “*facilities*” (strade, intersezioni, impianti semaforici, etc.) che compongono il sistema di trasporto privato in ambito urbano; nella maggior parte dei casi l'elemento in questione è stato studiato separatamente dagli altri o correlato, come nel caso delle reti semaforiche, con altri elementi simili, senza considerarne l'inserimento in un più ampio contesto di rete.

Inoltre le metodologie esposte si riferiscono ad un funzionamento “normale” del sistema, cioè quando i vari fattori in gioco (geometrici, di traffico, meteorologici) assumono dei valori che non si discostano molto da quelli medi previsti; è evidente, quindi, che, qualora per eventi aleatori (incidenti, lavori in corso, condizioni meteorologiche molto sfavorevoli, improvvise punte di domanda, etc.), ci si allontana dai suddetti valori, si possono avere fenomeni di congestione del traffico.

In questo paragrafo si esaminano le cause che fanno decadere la qualità del servizio offerto, provocando la congestione, e i rimedi che possono essere adottati per limitare al minimo i disagi che ne derivano.

Il fenomeno della congestione può essere “**ricorrente**” o “**non ricorrente**”.

La congestione è detta ricorrente quando essa è innescata da un evento giornaliero, o da un evento periodico (ad esempio un incontro di calcio); in questi casi il fenomeno può essere previsto in anticipo e possono essere prese delle opportune contromisure, definitive o provvisorie.

La congestione è detta, invece, non ricorrente quando essa si verifica solo in alcuni giorni dell'anno, in un luogo noto, ma con frequenza casuale, oppure quando essa si verifica raramente nel sito in questione, per cui è provocata da un evento del tutto imprevedibile; in quest'ultimo caso è molto difficile adottare provvedimenti, poiché dispositivi per il controllo del traffico non possono essere posti in ogni punto della rete.

La congestione può essere, ancora, “**apparente**” o “**reale**”.

Nel primo caso non si è raggiunta la saturazione reale della *facility*, cioè il rapporto  $v/c$  è minore dell'unità, ma, a causa di diversi fattori, quali cattiva regolazione semaforica, diminuzione larghezza degli accessi a causa delle auto in sosta, notevole presenza di mezzi pubblici, etc., si ha una saturazione apparente. Si può, in questo caso, risolvere il problema con interventi di tipo gestionale quali divieti di sosta, itinerari alternativi per gli autobus, nuovi parametri di regolazione semaforica.

Nel secondo caso, invece, il rapporto  $v/c$ , nei periodi di punta, è effettivamente maggiore dell'unità, per cui sono necessari interventi tesi ad aumentare la capacità (allargamento degli accessi all'intersezione, etc.) ed altri tesi a disincentivare la domanda (itinerari alternativi, etc.).

Se si esamina un fenomeno di congestione all'interno di uno schema di rete, si può notare come essa, in genere, si estenda col passare del tempo da una intersezione all'altra,

per cui in molti casi è sufficiente risolvere il problema iniziale per riportare alla normalità il funzionamento dell'intera rete; si può in questi casi individuare **l'intersezione critica**, cioè quella che dà inizio al fenomeno di congestione.

Motivi che, spesso, possono causare la congestione sono i seguenti

- convergenza di più strade in una sola;
- sovrapposizione di più sistemi di trasporto; ad esempio una autostrada che si immette in una rete urbana;
- concentrazione di spostamenti in destinazione o in origine; ad es. stazioni, stadi, raccordi autostradali, etc.;
- mancanza di percorsi alternativi; se il sistema di strade esistente è inadeguato a servire la domanda di trasporto, perché non esistono più percorsi che servono una determinata coppia O/D;
- lavori in corso; se di lunga durata possono essere classificati come una fonte di congestione ricorrente;
- conflitti con i flussi pedonali alle intersezioni;
- insufficiente capacità delle intersezioni.

Il problema della congestione deve essere affrontato sia con interventi a breve termine, di rapida ed economica applicazione, che consentano un immediato miglioramento delle condizioni della circolazione, sia con interventi a lungo termine, a livello di pianificazione, che, anche se con maggiori costi e tempi più lunghi di realizzazione, riportino definitivamente la situazione alla normalità; in alcuni casi possono essere sufficienti anche solo interventi del primo tipo.

La prima cosa da fare è individuare la causa principale della congestione e cercare di eliminarla con provvedimenti a breve termine.

Dato che, nella maggior parte dei casi, la congestione ha inizio in una intersezione, si deve principalmente agire su quest'ultima; i provvedimenti possibili sono:

- Progettazione di un nuovo ciclo semaforico che tenga conto di: nuove fasi (ad esempio fase protetta per le svolte a sinistra); diversa ripartizione del verde efficace tra gli accessi; etc.
- Interventi strutturali: nuove corsie riservate per le svolte; sovrappassi o sottopassi pedonali per evitare ulteriori punti di conflitto; allargamento degli accessi; etc.
- Interventi gestionali: divieti di sosta; sensi unici; cambiamento di itinerari ai mezzi pubblici; etc.

Questi interventi sono eseguibili senza eccessive spese e in breve tempo (tranne alcuni strutturali).

Gli interventi a lungo termine (pianificazione) consistono in una completa riorganizzazione della circolazione stradale (pubblica e privata), che eviti la formazione di nodi congestionati.

Per la congestione non ricorrente, dovuta a fenomeni aleatori, si possono prevedere dei segnali a messaggio variabile che inducano i guidatori ad un cambiamento di percorso.

Altri provvedimenti che si possono prendere nei riguardi delle intersezioni semaforizzate per far fronte a fenomeni di congestione sono:

- Controllare l'entità del flusso che giunge all'intersezione critica, programmando in modo opportuno i tempi di verde delle intersezioni di monte; in questo modo si aumenta il grado di saturazione delle intersezioni di monte (che comunque rimangono sottosature, cioè  $v/c < 1$ ) e si sottosatura l'intersezione critica<sup>1</sup>.
- Una metodologia analoga può essere utilizzata per evitare che la congestione si abbia all'interno di una certa area, che si vuole proteggere (ad esempio un centro storico); per ottenere ciò si limita, mediante una opportuna semaforizzazione, la capacità degli accessi nella suddetta area, trasferendo l'eventuale fenomeno di congestione nelle aree esterne.

Per il calcolo della durata del ciclo semaforico di una intersezione in una rete congestionata si deve tener conto anche della lunghezza dei rami a valle dell'intersezione. Affinché, infatti, la congestione non si estenda da una intersezione alla precedente, bloccando anche il flusso trasversale, è necessario dare ai veicoli che superano una data intersezione la possibilità di accumularsi nel ramo di valle (se anche esso è congestionato).

Se indichiamo con  $V_i$  il numero di veicoli che in un'ora attraversa l'accesso dell'intersezione e se ogni veicolo richiede uno spazio pari a  $D$ , si deve avere:

$$\left( \frac{V_i \cdot C}{3.600} \right) \cdot D \leq L$$

dove  $C$  è la durata del ciclo semaforico in secondi ed  $L$  è la lunghezza del ramo di valle.

E' evidente allora che, in situazione congestionata, la durata del ciclo semaforico deve essere:

$$C \leq \left( \frac{L}{D} \right) \cdot \left( \frac{3.600}{V_i} \right)$$

---

<sup>1</sup> Si noti, però, che questo metodo non tende a minimizzare il ritardo e gli arresti alle intersezioni, ma piuttosto controlla la formazione di code in modo da massimizzare la produttività del sistema.

durate del ciclo maggiori sono inutili e spesso dannose.

Nel caso di semaforizzazione coordinata gli sfasamenti sono, in genere, progettati in modo da muovere i veicoli lungo la strada in modo scorrevole.

Se lungo la strada non esistono code, lo sfasamento è dato da  $L/V$ , dove  $L$  è la distanza in metri tra due intersezioni e  $V$  è la velocità dei veicoli in m/s.

Se invece esiste una coda di  $Q$  veicoli, lo sfasamento ideale  $\Sigma_{ideale}$  è:

$$\Sigma_{ideale} = \frac{L}{V} - Q \cdot h$$

dove  $h$  è il distanziamento temporale tra due veicoli relativo al flusso di saturazione dell'intersezione, in secondi.

In questo modo, prima che i veicoli provenienti dall'intersezione di monte giungano a quella critica, la fila in quest'ultima è stata smaltita, per cui riescono a oltrepassarla o si arrestano (dipende dalla durata del verde) formando una coda che però non va a bloccare il flusso di attraversamento dell'intersezione precedente.

### 3) Il trasporto pubblico.

#### 3.1) Il modello di offerta di trasporto pubblico.

L'offerta di trasporto pubblico viene schematizzata anch'essa con una **rete** intesa come **grafo pesato**<sup>1</sup>.

In questo caso il grafo risulterà costituito da nodi ed archi che simulino il funzionamento del sistema di trasporto pubblico. Riferendoci ad un sistema di trasporto su strada, che è quello sul quale si può intervenire nella redazione di un PUT, i nodi e gli archi del grafo vengono classificati, secondo la funzione svolta, nel seguente modo:

- *Nodi centroidi*. Sono, come detto, quei nodi nei quali si ipotizza vengano concentrate le origini e le destinazioni degli spostamenti da e per le zone di traffico.
- *Nodi pedonali*. Sono nodi reali che unitamente agli archi pedonali costituiscono la rete pedonale; essi sono disposti nei punti di confluenza o divergenza delle strade che sono anche a servizio dei pedoni.
- *Nodi fermata*. Sono i nodi rappresentativi di ogni fermata servita da una o più linee.
- *Nodi linea*. Sono i nodi che, in corrispondenza di un nodo fermata, rappresentano l'accesso alla generica linea passante per la fermata in esame.
- *Archi pedonali*. Sono quegli archi del grafo che connettono un nodo centroide con un nodo pedonale o due nodi pedonali o un nodo pedonale ed uno fermata o, ancora, due nodi fermata o un nodo centroide ed uno fermata.
- *Archi di salita*. Sono gli archi che hanno come nodo iniziale un nodo fermata e come nodo finale un nodo linea.
- *Archi di discesa*. Hanno come nodo iniziale un nodo linea e come nodo finale un nodo fermata.
- *Archi a bordo*. Sono gli archi che collegano due nodi di linea successivi.

Il primo passo per l'estrazione del grafo consiste nella costruzione della rete pedonale; si individuano i nodi pedonali sulle strade percorse dalle linee e sulle altre strade che possono essere utilizzate dai pedoni per raggiungere le linee stesse. Si individuano i nodi fermata e si collegano i nodi pedonali tra di loro e con i nodi fermata mediante archi pedonali.

Vengono quindi collegati i nodi centroidi con i nodi della rete pedonale (o eventualmente con i nodi fermata) mediante archi pedonali.

Sul grafo della rete pedonale così ottenuto, in corrispondenza di ogni nodo fermata, adiacentemente ad esso, verranno posti tanti nodi linea quante sono le linee interessanti la fermata in esame.

---

<sup>1</sup> Nel seguito ci riferiremo al modello di offerta utilizzato per schematizzare il sistema di trasporto pubblico su gomma; con alcune differenze il modello può essere adattato anche ad altri tipi di trasporto pubblico.

Tali nodi verranno collegati al nodo fermata corrispondente mediante un arco di salita ed uno di discesa; i nodi di linea appartenenti ad una stessa linea verranno collegati tra loro attraverso un ramo a bordo, orientato secondo la effettiva direzione di marcia.

I nodi saranno dapprima numerati progressivamente secondo questo ordine: nodi centroidi, nodi pedonali, nodi fermata, nodi linea.

Effettuata questa numerazione progressiva, ad ogni nodo viene associato un codice; più precisamente:

- Per i nodi centroidi e per quelli pedonali il codice corrisponde con il numero progressivo già assegnato.
- Per i nodi fermata il codice assume un aspetto del tipo XXX00, dove XXX è un numero progressivo assegnato a partire da 101 compreso.
- Per i nodi linea il codice è del tipo XXXLL dove XXX coincide con il numero progressivo assegnato al codice del nodo fermata corrispondente ed LL è l'indicatore della linea interessante il nodo in esame.

Il grafo viene in questo caso rappresentato con una matrice che ha un numero di righe pari al numero di nodi ed un numero di colonne pari al massimo numero di rami *in entrata* al singolo nodo. Nella riga *i*-esima vengono riportati tutti i nodi iniziali di quei rami aventi il nodo *i* come nodo finale.

Ad ogni categoria di arco sarà associato un parametro atto a caratterizzare il costo del ramo stesso:

- *Rami pedonali*. Per questa categoria di rami si ipotizza una velocità di percorrenza di 1 m/s; ad ogni ramo pedonale sarà allora associato un tempo di percorrenza (in secondi) pari alla lunghezza (in metri) del ramo.
- *Rami salita*. Viene associato a ciascun ramo di salita un tempo proporzionale al tempo medio di attesa per l'utente su quella linea.
- *Rami discesa*. Ai rami discesa viene associato un tempo unitario (1 secondo), essendo esso trascurabile rispetto agli altri tempi in gioco.
- *Rami a bordo*. A questi si associa il tempo medio di percorrenza, valutato in funzione della velocità commerciale delle singole linee. La velocità commerciale si calcola in base alle tabelle di marcia aziendali.

### 3.2) Sistemi di trasporto.

I sistemi di trasporto pubblico sono usualmente divisi in:

- 1) sistemi di trasporto **convenzionali**;
- 2) sistemi di trasporto **non convenzionali**.

I primi sono i sistemi di trasporto comunemente adottati; tra essi distinguiamo:

- A) autobus;
- B) taxi;
- C) filobus;
- D) tram;
- E) L.R.T. (*Light Rail Transit*) o “metropolitana leggera”;
- F) H.R.T. (*Heavy Rail Transit*) o “metropolitana pesante”;
- G) funicolare.

I secondi sono sistemi di trasporto collettivo ancora poco usati, in via di sperimentazione o comunque utilizzati in situazioni particolari; essi sono solitamente così classificati:

- a) M.W.T. (*Moving Way Transit*): sono sistemi a moto continuo di ausilio alla circolazione pedonale: tappeti mobili, scale mobili, nastri a moto continuo che trascinano cabine o altri veicoli.
- b) L.G.T. (*Light Guideway Transit*): comprendono quei sistemi in sede propria che movimentano piccoli veicoli isolati o in convoglio con esercizio in linea completamente automatico, ma non a moto continuo.
- c) P.R.T. (*Personal Rapid Transit*): includono sistemi simili agli L.G.T., solo che il servizio è personale (per un solo utente) e che il percorso (ancora personale) è diretto senza fermate intermedie; per ottenere ciò è necessario sistemare tutte le fermate fuori linea.
- d) P.T. (*Paratransit*): sono sistemi di trasporto che effettuano il servizio con veicoli da 4 a 25 posti a sedere, senza percorso fisso e con sistema a chiamata.

Esaminiamo ora per grandi linee i sistemi di trasporto sopra menzionati.

#### 3.2.1) Autobus.

L'autobus è il sistema di trasporto pubblico attualmente più usato in ambito urbano; in molti casi esso è anche l'unico sistema di trasporto pubblico, soprattutto nel caso di agglomerati urbani di media e piccola dimensione.

La maggior parte degli autobus hanno 2 assi e un totale di 6 ruote, ma vi sono modelli che possono avere fino a 3 assi e fino a 10 ruote. La capacità di un autobus è in media di 70 posti, ma può variare tra 15 (minibus) e 125 posti (autoarticolato). In genere la

propulsione è a gasolio, anche se si stanno sviluppando, soprattutto per motivi ambientali, motori elettrici, ibridi o a gas naturale.

Un dato medio di consumo per un veicolo a gasolio è di 2.5 km/l.

Le principali caratteristiche dell'autobus sono:

- possibilità di operare teoricamente in ogni strada (versatilità);
- bassi costi di investimento (economicità);
- capienza limitata dei mezzi.

La vita tecnica di un autobus è relativamente breve (8÷12 anni) data la costante evoluzione dei mezzi il parco veicoli è piuttosto eterogeneo.

Per quanto riguarda le dimensioni gli autobus possono essere classificati in:

- 1) minibus;
- 2) autobus;
- 3) autobus articolati.

I minibus sono utilizzati:

- per servizi specializzati (trasporto sporadico di piccoli gruppi di persone);
- come navetta di collegamento;
- per percorsi con poca utenza;
- per percorsi brevi (linee di quartiere);
- per percorsi angusti preclusi agli autobus normali.

Hanno un numero di posti variabile da 20 a 35.

L'autobus è un veicolo a corpo unico; il numero di passeggeri trasportabili e dei posti a sedere varia con il tipo di percorso al quale l'autobus è destinato:

- per autobus urbani la capienza è di circa 100 persone di cui 25 sedute;
- per autobus regionali la capienza è di 50÷80 passeggeri di cui circa 50 seduti.

L'autobus articolato risulta essere in molti casi conveniente per la sua più alta produttività di esercizio che riduce il costo per passeggero-km sulle direttrici a forte domanda. Essendo in grado di offrire una maggiore capacità, riduce l'affollamento tipico dell'ora di punta e offre un numero maggiore di posti a sedere nelle altre fasce orarie, aumentando il comfort offerto. La capacità totale è di 100-125 posti, di cui 40-66 a sedere.

La figura 1.19 mostra la capacità offerta da una linea di autobus in posti offerti/h in funzione della frequenza in veic./h e della capacità del singolo veicolo.

**FIG. 1.19****[1.14]****3.2.2) Taxi.**

Il taxi è la più antica forma di trasporto pubblico; esso può essere utilizzato anche nei casi di domanda molto bassa, e, a volte, anche come unico modo di trasporto pubblico nel caso di piccole comunità.

Il servizio offerto è *da ovunque a ovunque*, in quanto vi si può accedere non solo in apposite aree nei pressi di grandi generatori di traffico, ma anche in un qualsiasi punto della città con un servizio a chiamata.

### 3.2.3) Filobus.

Il filobus è l'unico mezzo di trasporto pubblico su gomma senza generatore di forza motrice al suo interno e alimentato con presa di corrente.

Ha le caratteristiche positive della trazione elettrica: buona accelerazione e decelerazione, ridottissimo rumore, assenza di gas combustibili e lunga durata. Richiede però discreti investimenti dovendosi attrezzare le strade per la sua alimentazione e costi significativi di manutenzione della linea. E' in grado di operare brevi spostamenti lungo percorsi senza fili usando una alimentazione a batterie o, in modelli recenti, un piccolo motore a gasolio. Le dimensioni e la capacità del veicolo sono quelle di un autobus normale o articolato.

Di questo genere di veicoli in Italia ne esistono oggi molto meno che venti anni fa; le aziende di trasporto trovavano allora meno impegnativo acquistare autobus che non richiedevano costi aggiuntivi per le infrastrutture e non erano a queste vincolati, in modo da poter cambiare le linee molto facilmente. Esiste però oggi la tendenza al ripristino dell'uso di questo tipo di veicolo, soprattutto per limitare l'inquinamento acustico ed atmosferico dei centri urbani.

### 3.2.4) Tram.

La tramvia è un sistema di trasporto utilizzato principalmente in zone urbane, in strade a traffico misto, e qualche volta in corsia preferenziale; il tratto in corsia preferenziale generalmente è circa il 40% del percorso totale del mezzo.

I veicoli possono essere sia a cassa semplice che articolati.

I tram possono essere costituiti da:

- veicolo con 1 cassa con 4 assi: 13÷14 m;
- veicolo con 4 assi articolato: 18 m;
- veicolo con 6 assi articolato: 18÷22 m;
- veicolo con 8 assi (a 3 casse doppiamente articolato): 23÷29 m.

I veicoli più diffusi sono quelli a 4 o 6 assi, con un numero variabile di posti a sedere (dal 20 al 40% dei suoi 100÷180 passeggeri di carico totale).

I veicoli hanno trazione elettrica con alimentazione aerea tramite presa di corrente ad asta (trolley o pantografo).

Anche se il veicolo più diffuso è unidirezionale, sono in esercizio in diverse città mezzi bidirezionali con aperture su ambo i lati e doppia cabina di guida.

Le fermate hanno mediamente una distanza di 200÷500 m in ambito urbano.

La potenzialità massima di una linea con veicoli da 220 passeggeri ed intertempi I di 3 minuti<sup>1</sup> è di 4.400 pass/h

### 3.2.5) L.R.T. (Light Rail Transit).

La “metropolitana leggera” (L.R.T.) è un modo di trasporto su rotaia che offre un servizio di collegamento tra aree urbane centrali e zone periferiche, con una rete ramificata.

La metropolitana leggera differisce dalla tramvia soprattutto per il diverso utilizzo e la diversa gestione; essa viaggia in sede propria per gran parte del percorso (in galleria, viadotto o corsie riservate a raso), ha alta capienza ed elevata qualità del servizio di trasporto (velocità, alta frequenza, comfort).

I veicoli possono essere costituiti da:

- veicolo articolato a 6 o 8 assi;
- treno composto da vagoni a 4 o 6 assi;
- treno composto da vagoni a 8 assi.

La lunghezza è variabile tra 20 e 32 metri; la capienza è di circa 250÷300 persone di cui un 20÷50% sedute.

La distanza intercorrente tra le fermate varia tra i 350 e i 600 m.

Quando la metropolitana leggera è dotata di sede propria lungo tutto il percorso, viene definita (metropolitana leggera veloce) o L.R.R.T. (*Light Rail Rapid Transit*); in questo caso l'esercizio può essere completamente automatizzato e regolato da centrali operative e, data l'alta frequenza, pur con vetture di piccole dimensioni è possibile il trasporto di un elevato numero di passeggeri. Il personale viaggiante svolge in questi casi solo una funzione di controllo.

La metropolitana leggera pur offrendo una capacità di trasporto più contenuta della metropolitana pesante (di seguito descritta), una minore velocità commerciale e dei sistemi di regolazione e controllo della marcia meno sofisticati, permette realizzazioni più rapide ed economiche.

La potenzialità di una metropolitana leggera con veicoli da 350 posti ed intertempi I di 180 sec è di 7.000 pass/h.

---

<sup>1</sup> Intertempi minori sono possibili (fino a circa 30 sec.) dal punto di vista teorico, ma praticamente irrealizzabili perchè potrebbero facilmente provocare fenomeni di code tra i veicoli della linea.

### 3.2.6) H.R.T. (*High Rail Transit*).

La “metropolitana pesante” (H.R.T.) o, più semplicemente, “metropolitana” è un sistema di trasporto a corsia completamente riservata, senza interferenze esterne.

La trazione elettrica, i sistemi di segnalamento e la guida semplice consentono di ottenere elevate velocità commerciali, alta frequenza, alto grado di comfort, grande regolarità di esercizio, affidabilità e sicurezza.

La tipica carrozza è lunga da 16 a 23 m e larga da 2.5 a 3.2 m; la portata di ogni carrozza varia tra le 120 e le 250 persone, di cui 25÷60% sedute. Ogni treno può essere composto da 1 a 10 carrozze.

La metropolitana è solitamente situata in galleria nelle aree urbane centrali, mentre altre soluzioni (viadotti, rilevati, tratte protette complanari alla sede stradale) sono comuni nelle zone periferiche a minore densità abitativa.

Data la elevata velocità commerciale e l'alta frequenza dei mezzi la metropolitana soddisfa spostamenti a livello urbano e metropolitano, sia di breve che di media distanza.

La potenzialità di una linea con convoglio costituito da 10 carrozze con portata di 250 persone a carrozza ed intertempo I di 120 sec è di 75.000 pass/h.

### 3.2.7) Funicolare.

La funicolare è un sistema di trasporto su sede propria (in galleria o all'aperto) che collega due o più insediamenti vicini in linea d'aria (non più di 3 o 4 km) ma posti a quote sensibilmente diverse (100÷500 m).

In genere gli impianti sono costituiti da due treni collegati tra loro e con le ruote del motore mediante cavi di acciaio; la via di corsa è ad unico binario e scambio al centro della tratta totale (dove è presente un doppio binario). I treni sono composti da un massimo di tre vetture e sono dotati di freni di emergenza a ganasce sulle rotaie di appoggio o su una terza rotaia centrale.

La velocità è compresa tra 2 e 8 m/s.

La potenzialità di una linea che abbia convogli da 300 posti ed intertempi di 10<sup>2</sup> min è di 1.800 pass/h.

---

<sup>2</sup> Essendo la funicolare un sistema a doppia navetta è difficile avere frequenze più elevate di un veicolo ogni 10 minuti.

### 3.2.8) M.W.T. (Moving Way Transit).

Gli M.W.T. sono sistemi di trasporto di ausilio alla circolazione pedonale. Usati in genere all'interno di grandi fabbricati, sono ora anche utilizzati per raccordare i diversi nodi terminali dei sistemi di trasporto favorendo lo scambio intermodale, o per aumentare il raggio di influenza delle stazioni delle metropolitane, o, ancora, per aumentare l'accessibilità delle aree pedonalizzate.

Possiamo distinguere:

- 1) Le **scale mobili**, che consentono il superamento di notevoli dislivelli.
- 2) I **tappeti mobili** o **nastri trasportatori**, che funzionano in piano o su piccole pendenze.

Le *scale mobili* si distinguono in impianti funzionanti solo in salita, solo in discesa o in entrambi i sensi (banalizzabili); il funzionamento può essere continuo e discontinuo. Nel caso di funzionamento discontinuo l'impianto deve funzionare solo in un senso di marcia e l'avviamento deve essere automatico e determinato dal passaggio del viaggiatore nella zona di accesso alla scala.

La portata di una scala mobile dipende dalla larghezza e dalla velocità; la portata massima effettiva, espressa in numero pass/h, in condizioni non eccezionali di traffico è indicata nella seguente tabella:

| VELOCITA'        | 1 persona per gradino | 2 persone per gradino |
|------------------|-----------------------|-----------------------|
| < 0.6 m/s        | 3.000                 | 6.000                 |
| da 0.6 a 0.8 m/s | 3.600                 | 6.000                 |
| > 0.8 m/s        | 3.000                 | 6.000                 |

Si nota che ad un andamento della velocità superiore a 0.8 m/s corrisponde una diminuzione della portata effettiva della scala mobile; ciò è dovuto alla maggiore accortezza con cui gli utenti salgono sul sistema all'aumentare della velocità. La velocità massima ammissibile è di 0.9 m/s.

Di regola la pendenza di una scala mobile è di 30° e si può arrivare ad un massimo di 35°.

La larghezza del gradino deve essere compreso tra 55 e 65 cm per scale ad un solo posto per gradino e tra 60 e 110 cm per scale a due posti per gradino.

I *tappeti mobili* sono un mezzo per trasferire persone ed il loro bagaglio in modo rapido e confortevole con un flusso uniforme e controllato. Oltre ad una notevole capacità di movimentazione orizzontale, questi impianti possono essere previsti per superare dei dislivelli (la pendenza massima ammissibile è del 20%).

Come per le scale mobili, anche i tappeti mobili possono funzionare in un solo senso o in entrambi (banalizzabili).

La portata dipende dal numero di persone per modulo di larghezza, secondo le stesse norme valide per le scale mobili:

- 1 solo posto per modulo per larghezza tra 55 e 65 cm;
- 2 posti per modulo per larghezza tra 90 e 110 cm.

Il carico trasportabile è dato da:

$$M = \frac{Q \cdot V}{L} \cdot 3600 \cdot (0.75 \div 0.80) \quad (\text{persone/h})$$

dove:

$0.75 \div 0.80$  = fattore che tiene conto della percentuale di utilizzazione (75÷80%).

Q = persone per modulo.

V = velocità del nastro (m/s).

L = lunghezza del modulo: essa è determinata dallo spontaneo disporsi di una persona dietro l'altra (da 47 a 53 cm per persona se ferme; se le persone camminano sul tappeto mobile si arriva a 75 cm).

La velocità deve essere scelta in relazione alle distanze da percorrere; non può comunque essere superiore a 0.9 m/s (3.2 km/h), in quanto per velocità superiori sarebbe pericolosa la salita del passeggero sul tappeto essendo l'accelerazione ed il contraccollo troppo forti.

La potenzialità del sistema, ipotizzando una velocità di 0,7 m/s, una larghezza sufficiente ad una sola persona, distanziamento tra i passeggeri di 0,50 m, e coefficiente di occupazione di 0,80 è di circa 3.500 pass/h.

La velocità bassa è il maggiore limite all'utilizzo di questi dispositivi di trasporto, in quanto per i lunghi tempi a bordo non ne consentono l'uso su grandi distanze. Per tale motivo sono stati proposti dei modelli innovativi che consentono prestazioni superiori potendo raggiungere la velocità di 20 km/h (5.5 m/s).

Riportiamo di seguito alcuni esempi relativi a prototipi già utilizzati o in corso di sperimentazione:

- 1) **Accelerating Walkway.** La velocità del nastro varia da 3 km/h all'ingresso a 17 km/h a regime; esso è costituito da lamelle sovrapposte come pettini che si intersecano all'atto delle variazioni di velocità: il loro stendimento nel senso longitudinale determina una maggiore velocità (tratto intermedio), la loro compenetrazione provoca invece una minore velocità (tratti iniziale e finale). Sotto i piedi del passeggero rimane comunque un piano di appoggio costituito dalle cuspidi dei pettini-lamelle così da non

influenzare la posizione del passeggero stesso. La potenzialità massima di questo sistema, supponendo una larghezza del nastro per una persona (circa 70-80 cm), una percentuale di utilizzazione dell'80 % ed un distanziamento di 100 cm tra i passeggeri (nella fase di massima velocità in cui le lamelle si distendono) è di circa 13.000 pass/h.

- 2) ***Dunlop Speedway*** (vedi fig. 1.20). E' un sistema continuo a forma di S, che ha una velocità di 0.7 m/s all'inizio ed alla fine, mentre nella sezione mediana si muove con una velocità da 3 a 5 volte superiore, fino a un massimo di 3.5 m/s (12.5 km/h). L'accelerazione e la decelerazione tra il punto iniziale e la massima velocità sono gradualmente sfruttando il cambio di direzione di ogni componente del tappeto. Il piano praticabile è costituito da una serie di tavole che scorrono l'una di fianco l'altra trasversalmente nella fase a velocità variabile; esistono poi delle ringhiere ai lati con una serie di corrimano a velocità costante e capaci di avere una velocità media uguale a quella del nastro. La potenzialità del sistema, ipotizzando una larghezza di 70 cm nel tratto più stretto, un distanziamento di 100 cm ed un coefficiente di utilizzazione di 0,80 è di circa 10.000 pass/h.

FIG. 1.20

[1.14]

### 3.2.9) L.G.T. (Light Guideway Transit).

I sistemi di trasporto L.G.T. (*Light Guideway Transit*), sono dei sistemi di trasporto non convenzionali caratterizzati, fondamentalmente, dalla particolarità del materiale rotabile, dalla silenziosità e dalla posizione del veicolo rispetto al suolo (molte volte sospeso), oltre che dal servizio offerto.

I veicoli possono avere capacità compresa fra 6 e 120 posti; l'esercizio di linea del veicolo è completamente automatico ed in sede propria; i veicoli possono viaggiare isolati o in convoglio.

Vista la loro particolarità, diamo alcuni cenni sulle vie di corsa utilizzate per gli L.G.T.; le stesse vie di corsa sono utilizzate per i P.R.T., che si differenziano dagli L.G.T. per il tipo di servizio offerto.

I veicoli possono avere 4 diverse posizioni base rispetto la via di corsa (vedi fig. 1.21):

- poggiati su di essa;
- agganciati da sopra;
- agganciati da sotto (sospesi);
- sospesi lateralmente.

I veicoli del tipo b e c di fig. 1.21 sono anche conosciuti con il nome di monorotaie.

Il tipo d è l'unico che consente di avere su di un'unica via di corsa due diversi veicoli che viaggiano in senso opposto.

In fig. 1.22 sono indicati i dispositivi che "guidano" il veicolo e quelli che lo "sorreggono" e lo "muovono" nei diversi casi.

Un notevole problema è poi rappresentato dagli "scambi", che consentono il cambio di binario al veicolo; è necessario che essi siano sicuri, rapidi e confortevoli. I vari metodi utilizzati sono riportati in figura 1.23.

Gli L.G.T. hanno due tipi di applicazioni.

Per prima cosa possono essere utilizzati come mezzo di trasporto pubblico di linea di media capacità, ma di alta qualità (frequente, veloce e sicuro) e costo più basso dei modi convenzionali (la riduzione del costo è dovuto alla gestione automatica del sistema che riduce al minimo, o elimina del tutto, il personale viaggiante).

In secondo luogo possono essere impiegati come mezzo di movimentazione interna in parchi, complessi residenziali o industriali, aeroporti, complessi ospedalieri.

**FIG. 1.21**

[1.14]

**FIG. 1.22**

[1.14]

**FIG. 1.23**

[1.14]

**FIG. 1.24**

[1.14]

I veicoli in genere non richiedono la presenza del guidatore: un calcolatore guida e coordina tutti i mezzi contemporaneamente; essi, a seconda dei casi, compiono un percorso fisso o si adattano alle esigenze dei passeggeri. Il servizio comunque non è personale perché ci possono essere delle fermate prima di soddisfare la richiesta del singolo, data l'esigenza degli altri eventuali passeggeri a bordo.

La potenzialità varia notevolmente da sistema a sistema e dipende fondamentalmente dalla dimensione del veicolo; nel caso delle monorotaie la capacità può essere prossima a quelle delle metropolitane leggere.

Si riportano di seguito alcuni esempi.

- 1) **Transit Expressway.** Conosciuto anche come "*The Skybus*" è uno dei primi sistemi L.G.T. che sono stati utilizzati. Il veicolo ha il telaio di un autobus, modificato con 2 assi e 8 ruote di sostegno. La guida al veicolo è data mediante 8 ruote ad asse verticale che sono a contatto con una trave centrale (vedi fig. 1.24). I convogli sono formati, in genere, da 1 o 2 veicoli, anche se il sistema è stato progettato per avere anche convogli costituiti da 10 vetture.
- 2) **Airtrans.** E' stato il primo sistema di trasporto su guide completamente automatico a funzionare su una rete; è utilizzato nell'aeroporto di Dallas dal 1973. Il convoglio è formato da 1 o 2 vetture con 40 posti l'una; le stazioni sono fuori linea. Data la bassa velocità (27 km/h) e la limitata capacità delle vetture, questo sistema è adatto più per movimentazione interna, che per un regolare servizio di linea.

### 3.2.10) P.R.T. (Personal Rapid Transit).

E' un sistema che più degli L.G.T. tende ad imitare il servizio reso dall'auto privata, soprattutto per quanto riguarda l'abitacolo e per i percorsi quasi diretti fra l'origine e la destinazione richiesta dall'utente: la sigla indica "*trasporto personale rapido*".

Un sistema automatico di controllo provvede a smistare le vetturette, come taxi, tra i punti in cui è richiesta la partenza e il rispettivo arrivo, ammettendo eventualmente solo piccole deviazioni e brevi soste per accogliere altri passeggeri su percorsi molto simili. Non esistono linee fisse e i veicoli hanno a loro disposizione una rete piuttosto fitta.

Tutto ciò, offrendo un servizio qualitativamente migliore, finisce per costare di più dato il minor numero di passeggeri trasportato da ogni veicolo (da 2 a 6) e la maggiore particolarizzazione del percorso rispetto agli L.G.T.

La potenzialità di tali sistemi è variabile a seconda del tipo di servizio reso, ma è comunque molto limitata: il servizio reso è simile a quello dei taxi.

Riportiamo di seguito alcuni esempi in fase di studio.

- 1) **Aerial Transit System.** E' un sistema a bassa capacità espletato da piccoli veicoli (6 posti); il servizio è completamente automatizzato per la guida e la gestione. I veicoli

scorrono su apposite guide in acciaio. Il servizio ha carattere personale nel senso che il passeggero usufruisce personalmente del veicolo dall'inizio alla fine dello spostamento. Tale sistema si integra bene con quelli tradizionali a più elevata capacità come le metropolitane.

- 2) **Aramis.** E' un sistema di trasporto composto da vetture con ruote gommate e viaggianti in sede propria. Le vetture sono gestite in convoglio ma non sono fisicamente collegate tra loro: in tal modo ogni vettura si ferma solo alla fermata di destinazione scelta dall'utente alla partenza. In corrispondenza delle stazioni si distaccano dal convoglio solo le vetture interessate alla sosta.
- 3) **Monocab.** Il veicolo di piccole dimensioni (6 posti) scorre sospeso ad una trave metallica. Ogni veicolo è autonomo e le stazioni sono fuori linea. La destinazione viene programmata dal passeggero alla partenza e la sosta dura 20 secondi. Il servizio può svolgersi in due modi: totalmente personale tramite prenotazione di tutta la cabina, o parzialmente tramite occupazione di un solo posto: in questo secondo caso il percorso compiuto dal veicolo tiene conto delle esigenze di tutti gli occupanti. Il sistema è alimentato elettricamente e ogni cabina è equipaggiata da un motore a trazione convenzionale e ruote gommate; un sistema più recente sfrutta invece la levitazione magnetica e motori ad induzione lineare.

### 3.2.11) Paratransit.

Si indica con *Paratransit* un servizio di trasporto urbano per passeggeri che opera su strade pubbliche a traffico misto; esso è offerto da operatori pubblici o privati ed è a disposizione di alcuni gruppi di persone o del pubblico in generale; il servizio offerto è caratterizzato dalla possibilità di adattare i percorsi seguiti ed il numero di corse effettuate alle richieste degli utenti.

Una definizione di questo tipo comprende in realtà un gran numero di sistemi di trasporto, quali i taxi (da noi trattati come sistemi convenzionali dato il loro diffuso uso), gli scuolabus, i servizi di trasporto offerti da alcune ditte ai loro dipendenti, etc.

Noi trattiamo, ora, i sistemi prettamente pubblici, cioè a disposizione di tutti, quali i servizi *Dial-a-ride* (autobus a chiamata).

#### Dial-a-ride.

Nelle aree a bassa densità abitativa esiste una domanda di trasporto pubblico dispersa sul territorio; ciò comporta che un servizio regolare di autobus, anche con frequenza ridotta, non è gestibile con un rapporto accettabile tra costi e ricavi. I taxi possono far

fronte a questa domanda, ma le loro tariffe sono troppo elevate perché possano servire gli spostamenti quotidiani.

Il Dial-a-ride (D/R) è un modo di trasporto progettato per soddisfare la domanda di trasporto di queste zone e per colmare il *gap* tra la tipologia di servizio offerto dai taxi e quella offerta da un regolare servizio di autobus.

Quando la densità degli spostamenti aumenta il sistema D/R diventa più costoso e meno gestibile di un servizio a percorso fisso.

Il sistema D/R comprende un centro di controllo, degli impianti per la manutenzione ed il rimessaggio dei veicoli, e un parco macchine a servizio di uno specifico settore del territorio.

I veicoli possono essere delle semplici automobili (max. 4 posti), dei monovolume (fino a 7÷8 posti), degli autobus di piccola o media dimensione (raramente si eccedono i 20÷25 posti).

Gli utenti del sistema comunicano via telefono al centro di controllo la richiesta del servizio, indicando l'origine e la destinazione dello spostamento e l'ora in cui si vorrebbe partire.

Vi sono due distinte tipologie di servizio:

- *da molti a molti*, se il servizio offerto è effettuato tra diversi punti dispersi all'interno dell'area servita;
- *da uno o pochi a molti* (e viceversa), quando è servito in modo radiale un grande generatore di domanda (stazione di metropolitana periferica, centro affari di una piccola città, insediamenti industriali, etc.).

Il primo tipo di servizio è più diversificato ed accessibile sul territorio, ma comporta dei costi maggiori rispetto al secondo, perché ha un rapporto passeggeri·km/veicoli·km da 1.5 a 2.0 volte più basso.

Il sistema è gestito nel seguente modo: ai residenti nell'area da servire vengono fornite informazioni sul servizio offerto quali funzionamento, tariffe, ed ogni altra informazione di interesse. Le persone che vogliono usufruire del servizio (quanto prima possibile, o al più tardi entro un certo tempo) chiamano il centro di controllo e inoltrano la richiesta. Un addetto dell'azienda, il quale abbia una buona conoscenza dell'area e delle condizioni del traffico, registra queste informazioni su delle schede o altri sistemi di registrazione e stabilisce i percorsi dei veicoli da lui controllati, in modo che possano prendere a bordo e far scendere quanti più passeggeri è possibile con un singolo viaggio, senza rendere però il loro percorso troppo lungo. Se i veicoli da gestire arrivano a 5 o 6 unità è necessario l'uso di un elaboratore elettronico e di appositi programmi.

Il principale vantaggio del sistema D/R è che viene fornito un sistema quasi porta-a-porta con tariffe molto inferiori rispetto quelle di un taxi.

I problemi principali sono: incertezza sul tempo impiegato per lo spostamento, visto che il percorso viene adattato alla domanda e quindi varia da un giorno all'altro; difficoltà nel contattare via telefono il centro dei controllo nelle ore di punta (linee telefoniche occupate).

### 3.3) Prestazioni dei sistemi di trasporto pubblico.

Per ogni sistema di trasporto, sia esso continuo o discontinuo, a impianto fisso o a guida libera, è possibile esprimere le relazioni che legano tra loro le principali grandezze che ne caratterizzano le prestazioni.

Per un servizio cadenzato, la capacità della linea di un sistema di trasporto, espressa in passeggeri/h, è data da:

$$C = \frac{C_v \cdot 3600}{i} \quad (\text{pass./h})$$

dove:

$C_v$  = capacità del singolo veicolo, o convoglio di veicoli, (pass./h).

$i$  = intervallo temporale medio tra due passaggi successivi (sec).

Da questa relazione si comprende come una determinata capacità della linea può essere ottenuta sia con veicoli di ridotta capacità e ad elevata frequenza ( $i$  piccolo), che con veicoli (o convogli) di elevata capienza a più bassa frequenza.

La *capacità massima della linea*, fissata la capacità dei veicoli, sarà quindi data da:

$$C = \frac{C_v \cdot 3600}{i_{\min}} \quad (1)$$

dove:

$i_{\min}$  = minimo intervallo temporale tra due veicoli successivi che è possibile ottenere per il sistema in questione, tenuto conto del tipo di controllo adottato, della capacità delle stazioni e del tempo di salita e discesa degli utenti.

La capacità della linea,  $C$ , definita dalla (1) è il valore massimo della capacità del sistema; nella realtà il numero di passeggeri che effettivamente potrebbe essere trasportato dalla linea in un'ora è minore di  $C$ , perché un coefficiente di utilizzazione dei veicoli pari ad 1 non può essere mantenuto per lunghi periodi di tempo (ad es. 30 o 60 minuti). La *capacità massima utilizzata* della linea,  $C_p$ , è quindi nella realtà minore di  $C$ .

Un'altra capacità che viene definita è la *capacità temporizzata* della linea,  $C_0$ , che è il massimo numero di posti passeggero offerti dalla linea in base al programma di esercizio (schedulazione) previsto; è ovviamente  $C_0 < C$ .

Possiamo definire un *coefficiente di utilizzazione della capacità massima*,  $\delta$ , definito come:

$$\delta = \frac{C_0}{C}$$

ed un *coefficiente di utilizzazione della linea*,  $\alpha$ , dato da:

$$\alpha = \frac{P}{C_0}$$

dove  $P$  è il numero di passeggeri effettivamente trasportato in un'ora.

Il coefficiente  $\alpha$  è anche noto come *fattore di carico*.

Di conseguenza la relazione tra il volume di passeggeri trasportato attraverso una sezione da una linea di trasporto in un'ora e la capacità della linea è:

$$P = \alpha \cdot C_0 = \alpha \cdot \delta \cdot C$$

Con le relazioni ora viste è possibile calcolare la capacità di un determinato sistema di trasporto, note le sue caratteristiche di funzionamento e il programma di esercizio.

Nella valutazione di un sistema di trasporto non è corretto riferirsi solo al concetto di capacità, pensando, erroneamente, che il sistema migliore sia quello che offre la maggiore capacità, a prescindere da altri elementi.

Solitamente la condizione operativa più soddisfacente si ha, tenuto conto dei costi e dei livelli di servizio offerti, quando il sistema opera a regime a non più dell'80% della massima capacità.

Nelle tabelle seguenti sono riportate le capacità massime che si sono riscontrate, in situazioni particolari, per vari sistemi di trasporto sotto differenti condizioni operative. Tali esempi si riferiscono, pertanto, a condizioni limite. I modi trattati sono:

- autobus (su strade con almeno 2 corsie per senso di marcia): tab. 1.13;
- tram e L.R.T.: tab. 1.14;
- metropolitana (H.R.T.): tab. 1.15.

**TAB. 1.13**

**[1.14]**

**TAB. 1.14**

[1.14]

**TAB. 1.15**

[1.14]

Per quanto riguarda le linee di autobus, si deduce, in base ai dati rilevati in alcune città, che sono possibili frequenze fino a 90 autobus/h (con veicoli normalmente afferenti a diverse linee), su strade con fermate doppie o triple, se le operazioni di salita e discesa non sono concentrate in un'unica fermata. Ciò è possibile senza che siano previste opportune misure che consentano ad altri autobus in arrivo di oltrepassare quelli eventualmente fermi per il trasbordo dei passeggeri. A tali frequenze corrisponde una capacità offerta di  $6.000 \div 7.000$  posti/h, o dei volumi trasportati di  $4.500 \div 6.000$  passeggeri/h.

L'esperienza ha mostrato che i massimi valori di frequenza che si possono avere per le linee tranviarie sono dello stesso ordine di grandezza di quelle degli autobus: fino a 90 veicoli/h (in questo caso per veicolo intendiamo, nel caso in cui il tram sia articolato in più carrozze, l'intero convoglio). Se si prevede una supervisione e si opera la prevendita dei biglietti, si può arrivare a 120 veicoli/h.

Appare strano che i tram operano con la stessa frequenza degli autobus, che hanno una capacità minore. Ciò è dovuto al fatto che i tram hanno un più elevato rapporto tra numero di porte e capacità del veicolo, ed inoltre dispongono di un maggior volume per la movimentazione interna dei passeggeri; per questi motivi i tempi di sosta alle fermate sono minori di quelli degli autobus ed inoltre è più comune per i tram la presenza di semafori privilegiati e corsie riservate.

In base alle frequenze ora dette le capacità offerte sono di circa  $18.000 \div 20.000$  posti/h; i volumi trasportati risultano essere di circa 15.000 e 18.000 passeggeri/h.

Le condizioni operative delle metropolitane leggere (L.R.T.) sono notevolmente differenti da quelle dei tram. Essendo la velocità maggiore di quella dei tram, il distanziamento temporale minimo tra due veicoli successivi deve essere maggiore (raramente si hanno valori minori di  $60 \div 80$  sec, cioè frequenze maggiori di  $60 \div 45$  veicoli/h). La ridotta frequenza è comunque compensata da una maggiore capacità dei convogli (da 160 a 500 posti); perciò la capacità offerta è circa la stessa dei tram.

La velocità commerciale, la sicurezza, il comfort e il livello di servizio in generale sono, però, molto più elevati di quelli offerti dalle tramvie.

La tab. 1.15 mostra che i valori più elevati di capacità registrati su una linea di metropolitana (H.R.T.) sono compresi tra 55.000 e 65.000 passeggeri/h. Questi valori eccezionali di capacità, registrati a New York, Mosca e Tokio, sono seguiti da valori per le altre città compresi tra 30.000 e 50.000 passeggeri/h, assunto un fattore di carico  $\alpha=0.9$ .

Oltre alla elevata capacità, una linea di metropolitana offre un livello di servizio elevato (alte velocità commerciali, comfort, sicurezza).

Nella tab. 1.16 sono riassunti i campi di capacità dei principali sistemi di trasporto. Sono riportati per ogni modo 2 campi di capacità: quello massimo, ottenibile con speciali accorgimenti, e quello medio, che si può ottenere anche senza questi ultimi.

**TAB. 1.16**

[1.14]

### 3.4) Campi di utilizzazione in un sistema plurimodale.

Uno spostamento dall'origine  $O$  alla destinazione  $D$  può essere compiuto utilizzando uno solo o più modi di trasporto; è evidente che un qualsiasi spostamento comprenderà sempre il modo “*a piedi*”, per cui esso viene escluso dal computo dei modi utilizzati, a meno che non ci si serva di opportuni dispositivi, quali tappeti mobili o scale mobili.

Se il modo di trasporto è unico lo spostamento è detto **monomodale**; in caso contrario si parla di spostamenti **plurimodali** o **multimodali**.

Possiamo distinguere due categorie di spostamenti plurimodali:

- quelli effettuati col solo uso dei sistemi di trasporto pubblico;
- quelli effettuati utilizzando sia i sistemi di trasporto pubblico che il sistema di trasporto privato.

Il primo caso si ha quando vengono utilizzati per effettuare lo spostamento più modi di trasporto pubblico, ad esempio: autobus + metropolitana; taxi + treno; metropolitana + funicolare; etc.

Nel secondo caso viene utilizzato sia il sistema di trasporto privato (per raggiungere opportuni nodi di interscambio) che i sistemi di trasporto pubblico (per raggiungere la destinazione finale dello spostamento).

In entrambi i casi è conveniente facilitare l'interscambio modale, così da spostare utenza dal trasporto privato a quello pubblico; si devono perciò predisporre apposite strutture per lo scambio modale dette *nodi di interscambio*.

I nodi di interscambio fra sistemi di trasporto pubblico sono strutture uniche a servizio di più sistemi di trasporto; all'interno di esse si trovano i capolinea o le fermate intermedie di più sistemi di trasporto e tutta una serie di servizi per il pubblico quali:

- atrio;
- edicola;
- servizi igienici;
- biglietterie;
- cartelloni di avviso.

Muovendosi all'interno di un'unica struttura l'utente ha la sensazione di usufruire di un unico mezzo di trasporto, e percepisce solo in piccola parte il disagio connesso al cambio di sistema.

Un esempio di impianto per l'interscambio modale tra sistemi di trasporto pubblico è riportato in figura 1.25. Si tratta della stazione ferroviaria Ostbahnhof di Monaco, in cui

vi sono i terminali delle linee di autobus e della metropolitana leggera (L.R.T.), che sono collegati alla stazione mediante sottopassaggi pedonali.

**FIG. 1.25**

[1.14]

Altro esempio di impianto per l'integrazione modale è quello dell'Aia (vedi figura 1.26), che realizza, nell'ambito di un'unica struttura, un'integrazione ad alto livello tra diversi sistemi di trasporto urbano ed extraurbano: treno, tram e autobus.

Il complesso, situato nella zona periferica est della città, è disposto su due piani: al piano terra si trovano un vasto atrio (circa 4.000 mq) con tutti i servizi per il pubblico ed il piazzale ferroviario, con 12 binari di testa; al piano superiore si trovano le banchine di transito delle linee tranviarie urbane e suburbane ed un ampio piazzale (circa 15.000 mq), parzialmente coperto, destinato agli autobus di linea.

Il passaggio da un sistema di trasporto all'altro avviene speditamente mediante scale mobili ed ascensori, oltre a scale fisse ed ampi corridoi. Gli spostamenti interni dei viaggiatori sono guidati da numerosi cartelli indicatori e facilitati da quadri-orario digitali.

Nei pressi dell'impianto, all'esterno, si trovano i capolinea di tranvie secondarie, le fermate degli autobus urbani, un ampio parcheggio per auto private e la zona riservata ai taxi.

Vi è poi un edificio multipiano costruito per ospitare alberghi, negozi, uffici, etc.

In questo caso si nota che l'impianto, data la vicinanza dell'ampio parcheggio per auto, può essere utilizzato anche per l'interscambio tra il sistema di trasporto privato e i sistemi di trasporto pubblico; quando però lo scopo precipuo dell'impianto è proprio quello di favorire l'interscambio pubblico-privato, vengono previste aree di parcheggio all'interno del nodo di interscambio.

**FIG. 1.26**

[1.17]

L'interscambio tra il sistema di trasporto privato e quello pubblico può avvenire in due forme:

- 1) ***Kiss-and-ride* (K+R)**: l'utente del sistema di trasporto pubblico è accompagnato e/o venuto a prendere in auto da un'altra persona; in questo caso l'auto non sosterrà nell'impianto o lo farà per un breve lasso di tempo.
- 2) ***Park-and-ride* (P+R)**: l'utente del sistema di trasporto pubblico si reca al nodo di interscambio con la propria auto, la parcheggia all'interno dell'impianto, e prosegue lo spostamento con il mezzo pubblico; in questo caso l'auto sosterrà nell'impianto fino al ritorno del proprietario, e, quindi, per un notevole intervallo di tempo.

L'area predisposta per il K+R deve essere facilmente raggiungibile dalle strade di accesso al nodo di interscambio; deve essere collegata, mediante percorsi pedonali protetti da tettoia, con gli ingressi del nodo e deve avere un'area di parcheggio di attesa con buona visibilità dell'entrata della stazione. Vi sono in genere una zona destinata al semplice accosto, per lasciare il passeggero, ed una zona di parcheggio temporaneo, in cui attenderne l'arrivo; si ha solo la seconda nei centri di interscambio per mezzi a lunga distanza, in quanto si è soliti accompagnare al mezzo l'utente.

Nel caso di P+R l'area di parcheggio deve avere dimensioni molto maggiori (essendo le soste lunghe); in tutti i casi è sempre buona norma prevedere percorsi pedonali protetti dalle intemperie e tenere separati, per quanto possibile, i flussi pedonali da quelli veicolari.

L'utilizzo di impianti per il P+R si sta diffondendo molto in questi ultimi anni; se, infatti, essi vengono disposti in zone periferiche e sono ben collegati con il centro (ad esempio mediante una linea di metropolitana, o con altro mezzo pubblico), riescono a trasferire al trasporto collettivo una grossa aliquota del traffico pendolare (quello proveniente dalle zone esterne), contribuendo alla decongestione del centro della città.

### 3.5) Gli impianti ausiliari: depositi e officine.

Per il buon funzionamento di un'azienda di trasporto pubblico è di fondamentale importanza disporre di depositi ed officine sufficientemente dimensionati e attrezzati; è inoltre necessario predisporre un programma di manutenzione dei veicoli.

Il numero e la capacità dei depositi per autobus di una grande azienda di trasporto sono determinati sulla base dell'ampiezza della rete, della dimensione del parco macchine, del programma di manutenzione previsto per i veicoli, della disponibilità del territorio e di vari fattori locali.

Il problema base che si presenta è nella scelta tra l'utilizzo di un piccolo numero di depositi (al limite uno solo) di grandi dimensioni, che consentono di realizzare una economia di scala per la gestione, e un numero maggiore di piccoli depositi, che, invece, riducono i tempi di percorrenza da e per i capolinea. Generalmente, le grandi aziende di trasporto utilizzano depositi con capacità compresa tra 100 e 250 autobus; la scelta deve essere comunque effettuata caso per caso in base alle singole situazioni locali.

Ogni deposito dovrà essere localizzato, se possibile, in modo baricentrico rispetto ai capolinea serviti dai veicoli rimessati nel deposito stesso; ogni capolinea è "pesato" in misura direttamente proporzionale al numero di veicoli ad esso destinati dal deposito.

I depositi più grandi sono di solito dotati di un apposito reparto per la manutenzione, almeno ordinaria, dei veicoli (depositi con officina); viceversa, per i depositi piccoli la manutenzione dei veicoli è affidata a strutture esterne, tranne, ovviamente la piccola manutenzione.

Per quanto riguarda il deposito veicoli, bisogna stabilire preliminarmente se realizzare una struttura all'aperto o al chiuso. Un deposito all'aperto è, evidentemente, assai meno costoso di un garage chiuso (il risparmio di spesa può arrivare anche al 45%), ma d'altra parte aumenta il degrado dei veicoli, soprattutto nelle regioni meteorologicamente più disagiate. Se la temperatura esterna può scendere al di sotto dei 3° C bisogna prevedere un sistema di preriscaldamento del motore e dell'abitacolo.

In ogni caso, l'area complessiva dei parcheggi o dei garage deve essere tale da contenere l'intero parco previsto dei veicoli, pari al numero dei mezzi contemporaneamente in servizio nelle ore di punta più una riserva (per incidenti, guasti, manutenzione, eventuali corse-bis, etc.) che, secondo l'esperienza, si tiene intorno al 15÷20%.

Per una valutazione di massima si può assegnare ad ogni autobus un'area complessiva di 60 mq, che sale ad 80 mq includendo il reparto pulizia e manutenzione ordinaria; se poi si tiene conto anche di tutti gli edifici ausiliari per il personale, dei magazzini di pezzi di ricambio, delle officine etc., si può arrivare a 350 mq per autobus.

Secondo la forma dell'area, gli autobus possono essere disposti in file parallele, a spina di pesce, a pettine dritto o obliquo, etc.; deve essere comunque assicurata la possibilità di movimento dei veicoli secondo i turni di servizio.

Per la pulizia ordinaria (operazione più o meno frequente, secondo le condizioni ambientali) si impiegano oggi impianti automatizzati molto rapidi (durata dell'operazione 3÷4 minuti); il loro numero dipende quindi dalla potenzialità garantita dal costruttore. Indicativamente, si può preventivare un impianto ogni 100 veicoli.

Per la manutenzione ordinaria, considerate le diverse modalità, conviene tenere separati nell'officina il settore riparazioni da quello dei controlli, accoppiando eventualmente quest'ultimo con il rifornimento ed il lavaggio.

L'impianto di controllo deve comprendere la fossa o il ponte elevatore per l'ispezione, più gli apparecchi di verifica degli organi principali (freni, sterzo, etc.): una linea ogni 40÷50 veicoli è normalmente sufficiente.

La capacità dell'officina si può tenere pari ad 1/15 del parco veicoli: questo proporzionamento permette di assicurare un servizio regolare (cioè senza eccessive attese) nell'ipotesi che ogni veicolo possa aver bisogno di ricorrere all'officina, per interventi di durata media di 2 giorni, ogni 40÷50 giorni, il che, tenuto conto dell'utilizzazione intensiva e prolungata del parco, è buona regola prudenziale.

In base ai programmi di manutenzione ordinaria e a dati statistici riguardanti i guasti e gli incidenti, è necessario dimensionare opportunamente le scorte dei pezzi di ricambio e prevedere opportuni magazzini.

Lo schema funzionale dell'impianto è riportato nella seguente figura:

ins. fig. da fotocopie

#### **4) Aree di sosta e di fermata.**

In questo paragrafo si affronta lo studio delle infrastrutture che consentono la sosta ai veicoli privati e la fermata, al fine di consentire l'accesso al sistema stesso, ai mezzi pubblici in ambito urbano. Si tratteranno, pertanto, le fermate su strada e fuori strada (autostazioni) per i mezzi pubblici di superficie (autobus, tram, filobus, etc.), le stazioni delle metropolitane e le infrastrutture per sosta dei veicoli privati.

##### **4.1) Aree di fermata e di sosta per il trasporto pubblico su gomma.**

I veicoli che effettuano un servizio di trasporto pubblico su gomma si rendono accessibili ai passeggeri in specifici nodi della rete dei trasporti; tali nodi possono essere delle semplici fermate su strada o delle autostazioni.

La corretta progettazione e localizzazione dei suddetti nodi influisce notevolmente sulla qualità del servizio offerto e sulla sua funzionalità.

##### **4.1.1) Fermate su strada.**

Lo studio delle fermate di una linea di autobus coinvolge tre aspetti fondamentali: spaziatura, ubicazione e progettazione.

###### *A) Spaziatura.*

Il distanziamento tra le fermate successive di una linea deve essere scelto effettuando un compromesso tra due opposte esigenze:

- 1) rendere la linea più accessibile agli utenti del sistema di trasporto, diminuendo la distanza media da percorrere a piedi per accedere alla fermata più vicina e quella per raggiungere la destinazione finale dello spostamento;
- 2) aumentare la velocità commerciale della linea per diminuire il tempo di viaggio.

Con fermate poco distanziate si soddisfa la prima esigenza ma viene meno la seconda, e viceversa. Mediamente la distanza tra due fermate successive è compresa, in ambito urbano, tra i 200 e i 400 m; si possono ammettere distanze minori se la fermata è "a richiesta".

###### *B) Ubicazione.*

Le fermate possono essere ubicate lontano dalle intersezioni o in prossimità di esse.

La prima soluzione è preferibile per evitare che le manovre di fermata effettuate dai mezzi pubblici possano incidere sulla capacità di smaltimento dell'intersezione.

In alcuni casi non è possibile evitare che una fermata sia posta in prossimità di una intersezione, o è conveniente che ciò avvenga per facilitare l'interscambio tra diverse linee.

Le fermate in prossimità di un incrocio possono essere ubicate prima o dopo di esso; ciascun tipo di fermata può usufruire di un'ansa riservata a lato strada oppure può venire effettuata per semplice accostamento al marciapiede. In presenza di interscambi con altre linee, la fermata deve essere posizionata in modo da minimizzare il percorso a piedi degli utenti ed evitare gli attraversamenti.

### *C) Progettazione.*

Nella progettazione di una fermata ci si deve preoccupare dei problemi tecnici riguardanti il mezzo (dimensioni, altezza da terra delle entrate, raggio di sterzata, etc.) e del comfort dell'utente in attesa.

Per il primo punto le dimensioni standard della banchina (nelle autostazioni) o del marciapiede (su strada) sono le seguenti:

- Altezza: 8÷10 cm dal piano stradale.
- Larghezza minima 3.00 m (essa deve essere comunque rapportata al traffico pedonale).
- Se la lunghezza della banchina è superiore ai 60 m la larghezza deve essere di almeno 4 m.

Per quanto riguarda la forma e le dimensioni dobbiamo distinguere il caso in cui la fermata avvenga in una apposita ansa riservata a lato strada, oppure avvenga per semplice accostamento al marciapiede.

Per il primo caso, pur essendo previsto dal nuovo codice della strada, non esistono indicazioni di legge, per cui riportiamo le indicazioni del progetto finalizzato trasporti del CNR: la geometria dell'ansa è rapportata alla velocità del mezzo lungo la tratta del percorso (vedi figura e tabella seguente).

|             | 50 km/h | 60 km/h | 70 km/h |
|-------------|---------|---------|---------|
| ACCESSO     |         |         |         |
| tg $\alpha$ | 1:6     | 1:7     | 1:8     |
| $\alpha$    | 9° 28'  | 8° 05'  | 7° 07'  |
| USCITA      |         |         |         |
| tg $\gamma$ | 1:4     | 1:5     | 1:6     |
| $\gamma$    | 14° 02' | 11° 19' | 9° 28'  |

La larghezza dell'ansa è generalmente di 3.00 m; la larghezza minima perché l'autobus si possa fermare completamente all'esterno delle corsie di marcia è di 2.70 m o di 2.50 m a seconda della larghezza del mezzo. A seconda della velocità e della larghezza dell'ansa, le sue dimensioni sono riportate nella figura e nella tabella seguenti:

| VELOCITA' | 50 km/h |       | 70 km/h |
|-----------|---------|-------|---------|
| LARGHEZZA | 2.50    | 2.70  | 3.00    |
| a         | 15.00   | 16.20 | 24.00   |
| b         | 14.00   | 14.00 | 14.00   |
| c         | 10.00   | 10.80 | 18.00   |
| d         | 39.00   | 41.00 | 56.00   |

Per autobus articolati la lunghezza dell'ansa corrisponde alla lunghezza prevista per autobus normale, aumentata della differenza di lunghezza tra i due veicoli.

E' possibile, poi, arrotondare l'angolo di accesso e di uscita dall'ansa.

Per quanto riguarda la forma e le dimensioni delle fermate lungo la via di corsa con semplice accostamento al marciapiede vi sono delle precise norme del "nuovo codice della strada".

Le strisce di delimitazione della fermata sono costituite da una linea gialla discontinua posta ad una distanza minima dal marciapiede o dalla striscia di margine continua pari a 2.70 m.

La zona di fermata è suddivisa in tre parti: la prima e l'ultima di lunghezza pari a 12 m, necessarie per consentire al veicolo l'accostamento al marciapiede ed il reinserimento nel flusso di traffico; la zona centrale deve avere una lunghezza minima pari alla maggiore delle lunghezze dei veicoli che effettuano la fermata maggiorata di 2 m.

La prima e l'ultima parte possono essere evidenziate mediante tracciamento di una striscia gialla a zig zag (vedi fig. 1.27).

**FIG. 1.27**

[1.18]

Per quanto riguarda il comfort dell'utente in attesa si devono considerare due diverse problematiche:

- 1) *Comfort fisico*. Deve essere garantita una effettiva protezione dagli agenti atmosferici mediante apposite pensiline; le zone circostanti la fermata devono essere pavimentate con particolare cura e si deve evitare che si formino pozzanghere nella zona antistante. Si possono dotare le fermate e le banchine di sedie e appoggi per pacchi ingombranti.
- 2) *Comfort psicologico*. L'utente deve avere a sua disposizione attrezzature e servizi che rendano meno noiosa l'attesa (informazioni, telefoni, etc.). La zona di attesa deve essere dotata di buona illuminazione e l'utente deve poter conoscere il tempo di attesa (tabelle orarie e orologi) e vedere arrivare il mezzo.

#### 4.1.2) Autostazioni.

Le autostazioni sono delle strutture che possono essere realizzate per permettere l'accesso al sistema dei trasporti pubblici urbani ed interurbani, e per consentire, nell'ambito di una rete integrata, l'interscambio con altri sistemi di trasporto (trasporto privato, ferroviario, etc.).

Dati gli elevati costi di costruzione è fondamentale stabilire, per prima cosa, se la costruzione dell'impianto è effettivamente necessaria o meno; vi sono argomenti a favore della sua realizzazione ed altri contro.

I fattori favorevoli all'adozione sono:

- innalzamento del livello del servizio;
- razionalizzazione del traffico viaggiatori;
- disciplinamento e controllo delle autolinee;
- facilità di accesso ai servizi pubblici;
- miglioramento della viabilità urbana.

I fattori sfavorevoli sono:

- costo di impianto e di esercizio delle autostazioni;
- difficoltà di trovare una ubicazione opportuna;
- minore flessibilità del servizio (l'autostazione diventa capolinea della quasi totalità delle linee urbane);
- necessità in molti casi di prevedere più di un impianto.

In base a queste considerazioni si può ritenere necessaria l'adozione di un impianto fisso (o anche più di uno, nelle grandi città) quando in un agglomerato urbano il numero delle autolinee ed il relativo movimento dei viaggiatori non sono più compatibili per motivi sociali (disagio per il pubblico) ed urbanistici (intralcio al traffico e disturbo all'ambiente) con la semplice sosta degli autobus in una piazza o lungo una strada.

L'autostazione nasce anche da motivazioni economiche (incanalamento di una notevole massa di popolazione attiva verso determinate zone urbane) e di politica dei trasporti (miglioramento della competitività del servizio pubblico rispetto al privato); essa è inoltre di fondamentale importanza per la realizzazione di un sistema intermodale, se strettamente collegata o conglobata con altri impianti di trasporto.

*A) Ubicazione dell'impianto.*

Di importanza fondamentale è la scelta dell'ubicazione dell'impianto. Essa deve essere effettuata tenendo conto dei seguenti fattori:

- a) La costruzione di una autostazione comporta il concentramento di tutti i capolinea in un unico punto; da ciò consegue, in generale, un allungamento di percorso per un certo numero di autolinee, che incidono sui tempi di percorrenza e sui costi di esercizio. L'ubicazione deve essere tale da minimizzare e, se possibile, equipartire gli aggravii per le diverse linee.
- b) Si può prevedere, ai fini dell'interscambio modale, un collegamento con altri sistemi di trasporto, pubblico o privato; l'ubicazione deve, allora, tener conto di questi fattori, favorendo, ad esempio, un sito posto nelle vicinanze di una stazione ferroviaria, di una metropolitana o di un parcheggio per auto private.
- c) Occorre, inoltre, che l'immissione dei veicoli di linea nella viabilità ordinaria avvenga in modo agevole e che essa non arrechi gravi disturbi alla circolazione stradale; sono preferibili, quindi, immissioni su strade a flusso non elevato.

*B) Aspetti funzionali dell'impianto.*

Lo schema funzionale dell'autostazione è riportato in figura 1.28; esso descrive la circolazione delle due entità interessate all'impianto: i veicoli e le persone.

**FIG. 1.28**

[1.17]

Nello schema sono individuabili i tre elementi base costituenti l'impianto:

- edificio viaggiatori (attesa e servizi);
- piazzale (banchine per la salita, la discesa e la circolazione delle persone; corsie per la circolazione dei veicoli);
- edifici per i veicoli (rimessa, manutenzione e riparazione).

Dei tre componenti il più importante e l'unico veramente essenziale per il servizio è il piazzale, in cui confluiscono le due circolazioni, veicolare e passeggeri, realizzando appunto l'interscambio modale.

Le altre due parti non sono strettamente necessarie e possono ridursi al minimo o persino mancare; ad esempio gli edifici per i veicoli molto spesso, per ragioni di spazio, mancano del tutto e sono situati altrove.

I due sottosistemi circolatori, delle persone e dei veicoli, devono essere tenuti ben distinti e possono essere esaminati separatamente: i loro schemi sono riportati rispettivamente nelle figure 1.29 e 1.30.

Nello svolgimento delle operazioni di servizio i due schemi tengono conto dei seguenti criteri fondamentali:

- tenere separate le circolazioni in arrivo e in partenza sia dei veicoli che delle persone;
- evitare percorsi inutili ai veicoli ed alle persone;
- evitare interferenze tra la circolazione dei veicoli e quella delle persone.

L'esame degli aspetti funzionali dell'autostazione si completa con lo studio delle relazioni con l'esterno, che riguardano fondamentalmente la collocazione degli accessi (entrate ed uscite) e la conseguente sistemazione della viabilità esterna. Lo studio sarà condotto caso per caso su una adeguata planimetria della zona e dovrà tendere ad ottenere:

- comoda entrata ed uscita dei veicoli;
- agevole immissione dei veicoli e delle persone nella viabilità ordinaria;
- minore possibile turbativa alla circolazione urbana.

**FIG. 1.29**

[1.17]

**FIG. 1.30**

[1.17]

*C) Progetto di massima del piazzale.*

Il punto nevralgico dell'intero sistema è il piazzale; esso comprende:

- le corsie per la circolazione e le manovre dei veicoli;
- le banchine per la salita, la discesa e la circolazione delle persone;
- la cabina di controllo del movimento veicoli.

Esso deve essere progettato in modo da:

- differenziare il più possibile le varie correnti di traffico;
- limitare i percorsi a piedi delle persone;
- permettere l'agevole circolazione dei veicoli;
- facilitare le fasi di salita e discesa dei passeggeri e le manovre di arrivo e partenza degli autobus;
- contenere in tempi ragionevoli le attese dei viaggiatori e dei veicoli.

La circolazione dei veicoli nel piazzale deve avvenire possibilmente a senso unico e senza retromarcia; per soddisfare quest'ultimo requisito lo spazio a disposizione dei veicoli per le manovre di svolta e di conversione dovrebbe essere almeno uguale a quello che verrebbe impiegato dai veicoli più ingombranti; conviene, allora, riferirsi alla fascia di ingombro regolamentare prevista dalle norme sugli autoveicoli: corona circolare avente raggio esterno di 12 m e raggio interno di 5.30 m, che è anche comune a molti paesi europei.

Le banchine, in base al servizio che esplicano, si dividono in:

- banchine per sole partenze;
- banchine per soli arrivi;
- banchine per servizio promiscuo.

Ogni banchina comprende una parte riservata alla sosta del veicolo (stallo) ed una parte riservata alla sosta di persone (marciapiede). A queste bisogna aggiungere lo spazio di manovra dei veicoli per entrare ed uscire dallo stallone (da non sovrapporre alle corsie di marcia) e le eventuali corsie per la circolazione dei passeggeri.

Delle banchine bisogna determinarne il numero, la disposizione e le dimensioni.

Per il calcolo del numero di posti necessari a smaltire il traffico si può utilizzare la seguente formula empirica, valida per banchine promiscue:

$$N = 1 + \frac{a \cdot n}{b}$$

dove:

n = numero delle partenze giornaliere.

a = coefficiente che dipende dal tipo di autostazione (0.03 per stazioni terminali con sole linee extraurbane; 0.01 per stazioni di transito).

b = ha il significato di un rendimento e si pone pari a 0.5.

Altri studi più accurati possono essere condotti in base al programma di esercizio dell'impianto.

Le banchine possono assumere diverse configurazioni, riconducibili a quelle illustrate nelle figure da 1.31 a 1.37, dove per ciascuna vengono indicate le dimensioni costruttive, in metri, e l'area unitaria, in mq/veicolo, complessivamente impegnata, comprensiva cioè di spazio per i passeggeri, stallo e spazio di manovra dei veicoli. L'area minima della parte di marciapiede riservata alla sosta delle persone è stata fissata in 30 mq, supponendo (prudenzialmente) che un autobus possa contenere fino a 90 persone ed assumendo un ingombro statico del suolo pari a 3 persone/mq.

Esaminiamo le caratteristiche principali di ogni tipologia:

- 1) **Banchina rettilinea** (fig. 1.31). Questo tipo permette di usare tutte le porte del veicolo, ma richiede manovre di accostamento e partenza anche con l'uso della marcia indietro; è la più semplice dal punto di vista costruttivo, ma occupa notevole spazio in lunghezza. Le banchine rettilinee possono essere disposte in file parallele, diritte oppure oblique.

**FIG. 1.31**

[1.17]

- 2) **Banchine a gradini scalati a 45°** (fig. 1.32) e **a denti a 135°** (fig. 1.33). Questi due tipi, praticamente equivalenti dal punto di vista funzionale, sono studiati per facilitare le manovre del veicolo e consentono, ancora, l'utilizzo di tutte le porte; per contro richiedono un'area notevole.

**FIG. 1.32**

[1.17]

**FIG. 1.33**

[1.17]

- 3) **Banchine a pettine** (fig. 1.34). Questa banchina occupa il minore spazio possibile in larghezza ma il maggiore in profondità; richiede manovre laboriose. In compenso è l'unica banchina bidirezionale, cioè accessibile per veicoli provenienti sia da destra che da sinistra.

**FIG. 1.34**

[1.17]

- 4) **Banchine a denti di sega da 30° a 60°** (figg. 1.35, 1.36, 1.37). Questi tipi rappresentano la migliore soluzione di compromesso tra comodità per i passeggeri, spazio di manovra e area occupata. I veicoli raggiungono la loro posizione con una manovra naturale e ne escono con una breve retromarcia; lo spazio occupato è abbastanza compatto e contenuto. I denti possono essere disposti su un arco di cerchio per aumentare il numero di posti macchina rispetto alla disposizione in linea.

**FIG. 1.35**

[1.17]

**FIG. 1.36**

[1.17]

**FIG. 1.37****[1.17]**

Delle tipologie di banchina ora descritte, attualmente si preferiscono quella rettilinea e quelle a dente di sega: il primo per evidenti motivi di speditezza del servizio e semplicità costruttiva; i secondi per i vantaggi prima illustrati e perché si adattano bene a qualsiasi disposizione planimetrica.

#### 4.2) Parcheggi e aree di sosta per il trasporto privato.

Per il corretto funzionamento del sistema di trasporto privato e per consentire l'interscambio tra esso ed i sistemi di trasporto pubblico, è necessaria la presenza di parcheggi ed aree di sosta nelle diverse zone di un agglomerato urbano.

Il numero di spazi di stazionamento (stalli di sosta) deve essere previsto in funzione di:

- volumetria e destinazione d'uso degli edifici presenti nella zona;
- tempo medio di stazionamento;
- organizzazione della viabilità;
- capacità delle strade di accesso.

Gli stalli per la sosta possono essere:

- **su strada**, cioè a margine della carreggiata nelle fasce di pertinenza;
- **fuori strada**, in parcheggi a livello o multipiani.

La sosta a sua volta può essere:

- libera;
- a pagamento, tariffa fissa;
- a pagamento, tariffa variabile con il tempo.

##### 4.2.1) Sosta su strada.

Secondo quanto prescritto dal nuovo codice della strada un veicolo può sostare, salvo diversa segnalazione, lungo il margine destro della carreggiata, il più possibile vicino ad esso e secondo il senso di marcia; nel caso di strade a senso unico si può parcheggiare anche sul margine sinistro della carreggiata, sempre che si lasci uno spazio sufficiente al transito di almeno una fila di veicoli e comunque non inferiore ai 3 metri di larghezza.

In altri casi possono essere previsti degli stalli di sosta delimitati da opportune strisce; i conducenti, in questo caso devono parcheggiare il veicolo all'interno dello stallo. Gli stalli possono essere disposti parallelamente al marciapiede, o con diversa angolazione rispetto ad esso; se tale angolazione è di 45° si parla di stalli di sosta a "spina", mentre se è di 90° si parla di stalli di sosta "a pettine".

Le dimensioni minime degli stalli sono la seguenti:

- *stalli paralleli alla carreggiata*: 2.00 x 5.00 mq;

— *stalli non paralleli alla carreggiata*: 2.30 x 4.50 mq.

Gli stalli di sosta riservati agli invalidi (se non paralleli alla carreggiata) devono avere una larghezza minima di 3 m, di cui 1.70 m per la sosta del veicolo e 1.30 m di corridoio riservato per la salita e discesa del disabile; tale corridoio riservato porterà ad un apposito scivolo di salita sul marciapiede.

#### 4.2.2) Sosta fuori strada.

Gli impianti di parcheggio "*fuori strada*" possono essere "**a livello**" o "**multipiani**".

Nel primo caso il parcheggio è generalmente all'aperto ed è costituito da un semplice spiazzo asfaltato in cui sono presenti stalli di diverso tipo: per autovetture (la maggioranza), per mezzi pesanti e per motocicli. Si devono predisporre itinerari distinti per i veicoli e per i pedoni (questi ultimi possibilmente protetti da pensiline), e devono essere previsti più varchi di ingresso e di uscita in funzione della capacità dell'impianto. La dimensione degli stalli, la loro posizione e la dimensione delle corsie di manovra sono analoghe a quelle dettate per i parcheggi multipiani ed ad essi si rimanda.

Gli impianti di parcheggio **multipiani** possono essere di due tipi:

- 1) *impianti a rampe*;
- 2) *impianti meccanizzati*.

Nel primo caso è l'automobilista che guida il veicolo fino allo stallo di destinazione, mentre nel secondo caso un elevatore o un traslo-elevatore, automatico o pilotato da un addetto, colloca il veicolo sullo stallo.

Gli **impianti meccanizzati** sono ancora poco diffusi; essi sono costituiti, in genere, da due "*alveari*" speculari e contrapposti tra i quali può operare un traslo-elevatore in grado di sollevare un'auto ed incasellarla in un posto libero. La coppia di edifici può essere costruita fuori terra, entro terra o in seminterrato.

Il pregio di questi impianti è nella drastica riduzione di spazio necessario per parcheggiare un veicolo: essi sono, quindi, particolarmente adatti per le piccole aree al centro delle città. Il limite al loro impiego deriva dal tempo richiesto per effettuare una operazione di presa in consegna o di restituzione (dell'ordine del minuto), dai maggiori costi di gestione e dalla possibilità di guasti che ne paralizzino l'attività. La dimensione degli stalli è in genere di 2.10 x 5.00 mq.

Maggiore attenzione dedichiamo agli **impianti a rampe**, in quanto risultano essere i più diffusi soprattutto per la loro elevata capacità.

Nella progettazione di questi edifici di parcheggio i principali elementi di carattere funzionale da prendere in considerazione sono i seguenti:

— localizzazione dell'impianto;

- tipologia delle strutture;
- rampe e circolazione interna.

Altri fattori da prendere in considerazione, ma non trattati in questa sede, sono: architettura interna ed esterna dell'edificio; modalità di pagamento; controllo della gestione; prevenzione antincendio.

#### *A) Localizzazione dell'impianto.*

Stabilita la zona nella quale è necessario costruire l'impianto, per la sua precisa localizzazione bisogna tener conto di due diversi fattori. Tra i vari siti eventualmente a disposizione si dovrà scegliere quello che consenta una più economica e funzionale realizzazione dell'impianto.

Dal punto di vista economico si dovrà tener conto nel costo di costruzione, soprattutto per i parcheggi seminterrati o interrati, anche dei provvedimenti necessari per deviare eventuali canalizzazioni sotterranee; sono di facile ed economica deviazione (provvisoria o definitiva) le canalizzazioni dell'acqua, del gas e quelle elettriche, mentre problemi maggiori offrono le fognature ed i cavi telefonici.

Dal punto di vista funzionale è conveniente disporre l'ingresso del parcheggio su un'arteria molto frequentata, in modo che l'impianto possa essere facilmente individuato dai nuovi utenti; l'uscita, invece, conviene disporla su una strada che abbia un traffico modesto per facilitare l'inserimento dei veicoli in uscita nella corrente veicolare.

#### *B) Tipologia delle strutture.*

La struttura di un edificio di parcheggio e le scelte operate al suo interno circa la disposizione dei veicoli e degli spazi riservati alle manovre si influenzano vicendevolmente.

Le dimensioni standard dei principali elementi, proposte dallo “*Studio per un piano dei parcheggi nella città di Napoli, giugno 1984*”, sono le seguenti:

##### **1) Dimensioni degli stalli:**

- 2.50 x 4.50 mq, per disposizione non parallela alle corsie;
- 2.50 x 5.00 mq, per disposizione parallela alle corsie;
- uno stallo su cento va riservato ai disabili e deve avere dimensioni minime di 3.50 x 4.50 mq.

- 2) **Capacità complessiva degli accessi veicolari:** il numero e la larghezza degli accessi, nonché gli impianti di controllo, devono essere tali da consentire il defluire contemporaneo di due flussi orari, uno in ingresso e l'altro in uscita, pari, ciascuno, alla metà della capacità dell'impianto. Si può ritenere che, in media, la capacità dei vari elementi sia la seguente:

- corsia libera: 600 veic./h;
- varco di ingresso controllato da barriera ed emettitrice di biglietti: 400 veic./h;
- varco di uscita con pagamento pedaggio: 180 veic./h;
- varco di uscita con semplice barriera automatica: 300 veic./h.

- 3) **Compartimentazione:** i parcheggi devono essere suddivisi ad ogni piano in compartimenti di superfici (in mq) non eccedenti quelle indicate nella tabella 1.17. Ogni compartimento sarà organizzato con le proprie uscite pedonali e di sicurezza. Per l'uso della tabella precisiamo che un parcheggio si definisce “*aperto*” nel caso che sia fuori terra e che sia, ad ogni piano, sprovvisto di pareti perimetrali per almeno metà perimetro; negli altri casi è “*chiuso*”. Un parcheggio si definisce “*misto*” se situato nel corpo di un edificio destinato ad altri usi; è invece “*isolato*” se l'edificio è destinato solo ad autorimessa.

TAB. 1.17

[1.22]

| Piano<br>autorimesse | Fuori terra |        |         |        | Sotterranee |         |
|----------------------|-------------|--------|---------|--------|-------------|---------|
|                      | Miste       |        | Isolate |        | Miste       | Isolate |
|                      | Aperte      | Chiuse | Aperte  | Chiuse |             |         |
| Terra                | 3.500       | 3.000  | 5.500   | 4.000  | 2.000       | 2.500   |
| 1°                   | 3.000       | 2.000  | 5.000   | 3.500  | 1.500       | 2.000   |
| 2°                   | 2.500       | 1.500  | 4.000   | 3.000  |             | 1.500   |
| 3°                   | 2.000       |        | 3.500   | 3.000  |             | 1.500   |
| 4°                   | 2.000       |        | 3.500   | 3.000  |             | 1.500   |
| 5°                   |             |        | 3.000   | 2.000  |             |         |
| 6°                   |             |        | 3.000   | 2.000  |             |         |
| 7°                   |             |        | 2.500   | 1.500  |             |         |
| 8°                   |             |        | 2.500   | 1.500  |             |         |
| Oltre l'8°           |             |        | 2.000   | 1.500  |             |         |

- 4) **Larghezza delle rampe:** la larghezza minima delle rampe di accesso e di quelle interne sono riportate in tabella 1.18. Nel caso sia previsto il passaggio di pedoni,

occorre prevedere marciapiedi sopraelevati di 15 cm e larghi 0.60 m o 1.20 m a seconda se essi sono destinati ad essere percorsi in un solo senso o in entrambi.

**TAB. 1.18** [1.22]

|            | Ad un senso |          | A due sensi |          |
|------------|-------------|----------|-------------|----------|
|            | Carreggiata | Banchina | Carreggiata | Banchina |
| Rettilinee | 2.50        | 2 x 0.50 | 6.00        | 2 x 0.50 |
| Curve      | 4.00        | 2 x 0.50 | 7.00        | 2 x 0.50 |

- 5) **Aree di accumulo:** a monte di ogni corsia di accesso va prevista un'area pari ad uno stallone se la corsia è libera, a due stalli se con emettitrice di biglietti ed a otto stalli se con esazione di pedaggio.
- 6) **Pendenza massima delle rampe:**
- di accesso: 6% per un tratto di 4.00 m dall'innesto nella rete stradale e 15% altrove;
  - interne: 15% per quelle in rettilineo (in casi particolari si può arrivare al 20%) e 20% per il ciglio interno di quelle curve; il raggio di curvatura minimo del ciglio interno delle rampe curve non deve essere inferiore a 5.00 m (anche se è preferibile non scendere sotto i 6 m).
- 7) **Larghezza delle corsie:** se a senso unico, la larghezza deve essere non inferiore a 3.50 m con la possibilità di comprendere in tale larghezza un percorso zebrato per i pedoni largo 0.60 m. Se a doppio senso la larghezza non può essere inferiore a 5.00 m. La larghezza delle corsie deve, comunque, essere tale da consentire l'agevole accesso agli stalli: a seconda dell'angolatura degli stalli rispetto alla direzione della corsia, nel caso di sensi unici occorre rispettare anche i minimi riportati in tabella 1.19.

**TAB. 1.19** [1.22]

| ANGOLO | LARGHEZZA (m) |
|--------|---------------|
| 90°    | 5.00          |
| 60°    | 4.00          |
| 45°    | 3.50          |
| 0°     | 3.50          |

Esempi di disposizione stalli e relativa larghezza delle corsie sono riportati in figura 1.38 (a) e (b).

*C) Rampe e circolazione interna.*

Un fattore molto importante per la progettazione di un impianto di parcheggio è la scelta del sistema più adatto di rampe. Per svolgere con sicurezza e velocemente le operazioni di parcheggio, l'accesso e l'uscita devono avere luogo attraverso rampe ben distinte; è poi opportuno trovare soluzioni per cui la circolazione delle autovetture all'interno del parcheggio sia sempre a senso unico.

Le rampe possono classificarsi in 4 diversi gruppi (vedi fig. 1.39 a e b):

- a) *rampe rettilinee tra piani interi;*
- b) *rampe elicoidali;*
- c) *rampe tra mezzi piani sfalsati;*
- d) *piani a rampa.*

Quelli riportati nelle figure sono solo alcuni esempi delle possibili disposizioni.

All'interno del parcheggio non vi sono problemi per la circolazione interna dei pedoni data la bassa velocità dei veicoli e lo scarso traffico. Per contro per la circolazione verticale occorre introdurre nel progetto apposite scale e, per più di tre piani, ascensori.

**FIG. 1.38 (a)**

[1.22]

**FIG. 1.38 (b)**

[1.22]

**FIG. 1.39 (a)**

[1.23]

**FIG. 1.39 (b)**

[1.23]

#### 4.3) Stazioni per il trasporto pubblico su ferro.

Le stazioni sono una importante componente del sistema di trasporto su ferro, in quanto esse ne rappresentano i punti di contatto con le aree circostanti e con gli altri modi di trasporto, ed, inoltre, costituiscono l'interfaccia tra il sistema e gli utenti. Esse devono quindi essere accuratamente progettate sia dal punto di vista del comfort e della sicurezza per gli utenti, che dal punto di vista della capacità dell'impianto, in quanto, nella maggior parte dei casi, è quest'ultima a limitare la capacità della linea di trasporto.

L'accesso degli utenti ad un sistema tranviario o, più raramente, ad una metropolitana leggera, può avvenire attraverso semplici fermate a livello lungo una strada; per assicurare una buona protezione ai passeggeri, se la fermata non è adiacente al marciapiede, è necessario predisporre delle opportune "isole salvagente", che consentano una sicura salita e discesa ai passeggeri.

Tutte le metropolitane pesanti (H.R.T.) ed alcune leggere (L.R.T.) utilizzano stazioni nettamente separate dal traffico veicolare e con un controllo totale degli accessi per i passeggeri.

In genere, i biglietti vengono venduti e/o controllati all'ingresso dell'area di salita, in modo da limitare il tempo necessario all'incarozzamento dei passeggeri; ciò, inoltre, consente di poter utilizzare contemporaneamente tutte le porte del convoglio. Le banchine sono progettate in modo tale da rendere facile e rapida la salita e la discesa dei passeggeri: nel caso di lunghi convogli con molte porte si può arrivare a capacità di 40÷80 persone al secondo.

La progettazione delle stazioni deve tener conto degli interessi dei passeggeri, dell'azienda di trasporto e della collettività.

Per quanto riguarda i passeggeri si deve:

- ridurre al minimo la distanza tra l'ingresso della stazione e le banchine, e tra le diverse banchine per consentire un rapido trasbordo;
- fornire i servizi essenziali (servizi igienici, edicola, atrio per l'attesa), inclusi esaurienti cartelli di informazione riguardanti il servizio, le diverse linee e gli orari;
- predisporre adeguati percorsi per la circolazione dei passeggeri, che evitino conflitti tra i flussi in ingresso e in uscita dalla stazione;
- adeguare le strutture e i servizi alle necessità dei disabili;
- fornire un elevato grado di comfort mediante percorsi protetti dalle intemperie, scale mobili, sediolini per l'attesa;
- garantire elevata sicurezza: massima protezione da possibili incidenti, uscite di sicurezza e percorsi di fuga, buona visibilità ed illuminazione.

L'azienda di trasporto richiede i seguenti fattori:

- minimi costi di gestione;
- capacità adeguata ad assorbire le punte di domanda;

- flessibilità operativa, che include la adattabilità dell'impianto a diverse condizioni di funzionamento (variazione dei volumi di domanda o istituzione di nuove linee);
- buona visibilità delle banchine, delle biglietterie, delle macchine di convalida, e delle altre aree soggette a continuo controllo;
- buona integrazione con le aree circostanti ed utilizzo degli spazi interni per negozi, magazzini, uffici.

E' di interesse della collettività, poi, che il sistema di trasporto funzioni in modo efficiente e che gli effetti prodotti dalla presenza della stazione, sia a breve che a lungo termine, siano vantaggiosi per le aree circostanti. Gli effetti immediati riguardano l'impatto ambientale: aspetti estetici, inquinamento acustico, possibile congestione del traffico; quelli a lungo termine comprendono lo sviluppo dell'area circostante, che può essere incoraggiato o disincentivato dalla presenza della stazione.

#### **4.3.1) Banchine.**

Le banchine di una stazione di metropolitana possono essere sia laterali (fig. 1.40 (a)) che centrali (fig. 1.40 (b)). Poiché i veicoli sono dotati di porte su ambo i lati, entrambe le tipologie possono essere utilizzate per le diverse stazioni della linea; comunque, è preferibile l'uso di un'unica tipologia per tutta la linea onde evitare confusione ai passeggeri e per facilitare agli addetti il controllo della salita e discesa dei passeggeri e della chiusura delle portiere.

La figura 1.40 (c) mostra il caso di banchina tripla (due laterali ed una centrale); essa viene utilizzata quando l'interscambio dei passeggeri è intenso e la linea lavora al massimo della capacità.

Le figure 1.40 (d) ed (e) riportano schemi di stazioni a 4 binari e 2 banchine: nel caso (d) sono previsti due binari che consentono ai treni espressi di bypassare la stazione; nel caso (e) si evita che l'alta frequenza dei mezzi venga rallentata dalla presenza sulla banchina dei passeggeri del treno precedente.

Quando abbiamo due linee che convergono o si intersecano in corrispondenza di una stessa stazione, le possibili sistemazioni delle banchine sono le seguenti (vedi fig. 1.41):

- a) Due linee convergenti con interscambio a tre binari.
- b) Due linee convergenti con interscambio a quattro binari. Con questo sistema, usato quando la frequenza dei mezzi è elevata, si possono recuperare eventuali ritardi per la presenza dei 4 binari.
- c) Due linee tangenti. In questo caso l'interscambio passeggeri tra le due linee avviene mediante sottopassi o sovrappassi.
- d) Intersezione di due linee. I binari sono posizionati in modo da trasferire i passeggeri da un treno all'altro sulla stessa banchina.

**FIG. 1.40**

[1.14]

**FIG. 1.41**

[1.14]

Gli elementi che definiscono le caratteristiche geometriche delle banchine sono:

- area totale (in relazione all'affollamento);
- lunghezza;
- larghezza;
- posizionamento degli ostacoli fissi;
- altezza sul piano del ferro;
- distanza dal rotabile;
- pendenze;
- altezza libera a disposizione dei viaggiatori in banchina;
- distanza dal bordo della linea di sicurezza.

La Norma UNI 7508 “*Metropolitane-banchine di stazione*” definisce tali elementi ed a essa rimandiamo, limitandoci a riportare solo le caratteristiche principali.

La *superficie totale* della banchina deve essere proporzionale al numero di persone presenti (passeggeri in arrivo, in partenza, in attesa), cioè all’“affollamento”. Secondo la Norma UNI 7508, l’area totale utile  $A$  della banchina, esclusa la striscia di sicurezza (larga 0.60 m), deve essere tale che la densità  $N/A$  di viaggiatori su di essa sia:

$$\frac{N}{A} \leq 1.5 \quad \text{per le banchine con accessi di estremità o con accessi in uno spazio limitato;}$$

$$\frac{N}{A} \leq 2.0 \quad \text{per le banchine con accessi distribuiti.}$$

dove:

$N$  = numero totale di viaggiatori che si prevede siano contemporaneamente presenti in banchina;

$A$  = area della banchina espressa in metri quadrati.

Per valutare  $N$  in mancanza di più precisi elementi, si può far riferimento alla media dei viaggiatori che arrivano e partono nell’intervallo medio fra due treni che abbiano la stessa destinazione; detto  $H$  tale intervallo espresso in secondi, si ha:

$$N = \frac{n \cdot H}{3.600}$$

dove  $n$  è il numero di viaggiatori durante l’ora di punta serviti da ogni banchina.

La *lunghezza* della banchina deve essere almeno pari alla lunghezza del treno di massima composizione aumentata di 5 m (franco di frenatura). Se la banchina è all'aperto e si prevedono sensibili diminuzioni dell'aderenza la lunghezza della banchina deve essere ulteriormente incrementata.

La *larghezza* della banchina deve essere stabilita in relazione al previsto numero di viaggiatori ed alla sua lunghezza. Le dimensioni minime da rispettare sono:

- larghezza in corrispondenza degli accessi;
- distanza minima degli ostacoli fissi.

Nelle altre zone la larghezza può essere minore, purché sia adeguata al traffico previsto, la variazione sia graduale e vengano rispettate le distanze minime dagli ostacoli fissi.

La larghezza della banchina in vicinanza degli accessi deve essere non minore dei valori riportati nella seguente tabella:

| Somma dei viaggiatori in arrivo e in partenza durante l'ora di punta | Accessi distribuiti                         |                   |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------|
|                                                                      | banchina laterale                           | banchina centrale |
| fino a 2.000                                                         | 2.50 m                                      | 5.00 m            |
| tra 2.000 e 4.000                                                    | 2.50 m                                      | 5.00 m            |
| tra 4.000 e 8.000                                                    | 2.50 m                                      | 5.00 m            |
| tra 8.000 e 15.000                                                   | 3.00 m                                      | 6.00 m            |
| tra 15.000 e 20.000                                                  | 3.50 m                                      | 7.00 m            |
| tra 20.000 e 25.000                                                  | 4.00 m                                      | 8.00 m            |
| oltre 25.000                                                         | soluzioni particolari (banchina tripla,...) |                   |

La distanza minima degli ostacoli fissi dal bordo della banchina “d” è riportata nella seguente tabella:

|                                                                                                                                                                                                                                                | d      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| In generale                                                                                                                                                                                                                                    | 2.50 m |
| Ostacolo discontinuo o pilastro con larghezza dell'ostacolo (misurata parallelamente al bordo della banchina) <b>Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.</b> 1.4 d (max. 45 cm) e la distanza minima tra due ostacoli pari a 2.00 m | 1.80 m |
| Tra ostacolo discontinuo e parete                                                                                                                                                                                                              | 1.50 m |
| All'estremità della banchina per una lunghezza di 3.00 m                                                                                                                                                                                       | 1.50 m |
| Distanza tra 2 bordi di banchina centrale                                                                                                                                                                                                      | 5.00 m |

#### 4.3.2) Tipologia stazioni.

Le stazioni ad accessi controllati sono solitamente costituite da tre livelli; gli ingressi sono situati al livello strada; il livello intermedio, detto “mezzanino”, contiene le biglietterie e le apparecchiature per il controllo o la convalida dei biglietti (macchine obliteratrici o simili), che lo dividono in una “area libera”, parte della pubblica strada, ed una “area pagata”, che è parte della stazione vera e propria; il terzo livello contiene le banchine e i binari.

In alcuni casi condizioni geometriche e fattori gestionali possono combinare tra loro il livello intermedio con il livello strada o con il livello banchine, per cui si hanno stazioni con solo due livelli.

Il caso più comune è comunque la stazione su tre livelli, sia per stazioni sotterranee che per stazioni sopraelevate; il livello intermedio in alcuni casi viene utilizzato non solo per la vendita e la convalida dei biglietti, ma anche per ospitare negozi, telefoni, sportelli per le informazioni, etc.

Le tipologie possibili per le stazioni sono diverse, ma quelle più comuni possono essere classificate in base alle seguenti tre principali caratteristiche:

- 1) stazioni in sotterraneo o sopraelevate;
- 2) stazioni a due o tre livelli;
- 3) banchine centrali o laterali.

La scelta della tipologia più adatta deve essere effettuata caso per caso.

In alcuni casi le stazioni si trovano all'intersezione di due o, più raramente, più linee diverse; se ciò accade sono, in genere, necessari dei livelli aggiuntivi.

Le suddette stazioni sono anche dette “*stazioni di trasferimento*”.

Per favorire il trasferimento dei passeggeri si deve minimizzare la distanza da percorrere a piedi tra le linee ed, eventualmente, prevedere scale mobili, tappeti mobili ed ascensori che facilitino il passaggio da una linea all'altra. Il mezzanino deve essere disposto tra le diverse linee, in modo che esso sia attraversato dal flusso dei passeggeri; nei casi più semplici è proprio il mezzanino a fare da collegamento tra le diverse linee.

Il numero e la posizione degli ingressi delle stazioni influenza direttamente l'accessibilità e l'integrazione del sistema di trasporto con le aree e gli edifici adiacenti.

Gli utenti percepiscono di essere giunti al sistema di trasporto nel momento in cui arrivano all'ingresso della stazione, per cui, se indichiamo con  $r_a$  il raggio di influenza del sistema, cioè la distanza massima che l'utente è disposto a coprire a piedi per raggiungere la stazione o, analogamente, la destinazione finale dello spostamento, l'area di influenza della stazione è maggiore se le entrate sono due, come mostrato in figura 1.42.

**FIG. 1.42**

[1.14]

Per incrementare ulteriormente la superficie di influenza delle linee metropolitane, aumentandone l'efficacia, si possono costruire delle stazioni satelliti, collegate alle stazioni principali a mezzo di una galleria a sezione limitata (e quindi di basso costo di costruzione), nella quale un mezzo di tipo e dimensioni adatte effettui rapidamente il trasporto dei passeggeri in partenza e in arrivo.

Basandosi, infatti, sul concetto che l'utente percepisce il suo arrivo al sistema di trasporto quando varca l'ingresso della stazione, si riesce ad incrementare notevolmente la superficie di influenza della metropolitana come mostrato in figura 1.43.

I sistemi di trasporto utilizzati per il collegamento sono in genere M.W.T. (più precisamente tappeti mobili) o L.G.T.; tali sistemi di trasporto, essendo "completamente automatici", sono molto economici e graditi al pubblico.

I sistemi L.G.T. utilizzati sono in genere dei traslatori a navetta con veicoli di piccole dimensioni e senza fermate intermedie; la velocità commerciale è elevata.

**FIG. 1.43**

[1.20]

**4.3.3) Capacità.**

L'arresto di un convoglio in una data sezione incrementa sempre il minimo distanziamento temporale con il quale possono seguirsi i veicoli su una data linea in regime di sicurezza; per questo motivo, la capacità di una stazione è in genere considerevolmente minore della capacità della relativa via di corsa. La sola eccezione si ha nel caso in cui le stazioni sono progettate per accogliere più convogli contemporaneamente.

La capacità della stazione governa, quindi, la capacità della linea di trasporto nella maggioranza dei casi. Più precisamente valgono le seguenti regole:

- La stazione, tra quelle della linea, che richiede il maggior distanziamento temporale tra due convogli successivi,  $hs_{max}$ , determina la capacità della linea (in veicoli per ora e in posti offerti per ora).
- Il distanziamento temporale tra due veicoli in corrispondenza della stazione,  $hs$ , è soprattutto funzione del tempo di fermata  $t_s$ , il quale dipende dal numero di passeggeri che salgono e scendono alla stazione e dalle modalità di esercizio della linea stessa.
- Conseguentemente, assumendo per tutte le stazioni le stesse modalità costruttive e di gestione, la stazione “più impegnata” (cioè quella per la quale il volume di passeggeri che sale e scende dai convogli è maggiore) determina la capacità della linea.

I distanziamenti temporali tra due successivi convogli alla stazione sono costituiti da due gruppi di elementi:

- 1) Intervalli di tempo del veicolo in moto; cioè accelerazione del veicolo in partenza dalla stazione e decelerazione del veicolo in arrivo. Essi dipendono dalle prestazioni del veicolo, dal regime di funzionamento e dai margini di sicurezza previsti.
- 2) Tempo di sosta alla stazione; esso è dato dalla somma dei tempi per: l'apertura delle porte, salita e discesa passeggeri, preparazione alla partenza (segnale di avviso, chiusura delle porte e segnale di partenza da dare al conducente).

Per affrontare il problema del calcolo della capacità di una stazione dobbiamo dare alcune importanti definizioni; perciò facciamo riferimento alla figura 1.44.

**FIG. 1.44**

[1.14]

In essa sono riportati i diagrammi del moto (spazio-tempo) di due convogli, entrambi di lunghezza  $nl'$ , in prossimità della stazione<sup>1</sup>.

Il convoglio LTU viaggia inizialmente a velocità costante " $v$ "; ad una certa distanza " $s$ " dalla stazione gli viene dato il segnale di arresto, per cui, dopo un tempo di percezione e reazione, " $tr$ ", il veicolo rallenta con tasso di frenatura  $b < \infty$  e percorre lo spazio " $sb$ ". A questo punto il veicolo resta fermo alla stazione per un tempo " $ts$ ", dopodiché riparte con tasso di accelerazione " $a$ " e dopo un tempo " $ta$ " raggiunge nuovamente la velocità di regime.

Se durante il moto a velocità " $v$ ", per un qualche imprevisto motivo, il veicolo è costretto ad arrestarsi, per poterlo fare, esso percorre lo spazio " $s$ "; se in ogni punto del diagramma del moto, dalla testa del convoglio, noi riportiamo la distanza " $s$ ", la quale dipende dalla velocità che in quell'istante ha il veicolo e dal tasso di frenatura " $b$ ", individuiamo una cosiddetta "zona di sicurezza" (punteggiata in figura), delimitata da una linea, detta "linea d'arresto ombra" (*stopping shadow line*).

Quando il veicolo viaggia a velocità costante la sua linea d'ombra e la linea tracciata dalla testa del convoglio sono parallele; quando il convoglio si avvicina alla stazione e decelera, la linea d'ombra si estende fino alla testa della banchina e quindi diventa una linea orizzontale: la curva tracciata dalla testa del convoglio durante la fase di frenatura converge con la linea d'ombra e coincide con essa quando il veicolo è fermo, come mostrato in figura 1.44.

A questo punto si deve tener conto del veicolo che sta giungendo alla stazione (FTU) dopo che il precedente (LTU) la sta lasciando.

Affinché si sia in condizioni limite di sicurezza è necessario che la zona di sicurezza del veicolo in arrivo (FTU) non intersechi il diagramma del moto del veicolo in partenza (LTU), ed al limite che le zone si tocchino in un punto.

Il caso estremo, cui corrisponde la massima capacità della stazione e coefficiente di sicurezza unitario, si ha quando la zona di sicurezza del veicolo in arrivo tocca in un punto (in corrispondenza della testa della banchina) la linea d'ombra della coda del convoglio (*rear-end shadow line*); quest'ultima tiene conto che il veicolo in partenza prima di arrestarsi percorre un certo spazio.

Rispetto alle condizioni teoriche viste in figura 1.44, solitamente si assumono dei maggiori margini di sicurezza.

Per prima cosa non si considera la linea d'ombra della coda del veicolo in partenza, ma la sua linea del moto; in secondo luogo si considera per il veicolo in arrivo un tasso di frenatura ridotto, " $br$ ", minore di quello normale " $bn$ ", per cui la zona di sicurezza diventa maggiore; infine non si fanno toccare le curve critiche, ma si fa in modo che la linea

---

<sup>1</sup>Intendiamo con  $n$  il numero di carrozze che costituisce il convoglio e con  $l'$  la lunghezza di ogni carrozza.

d'ombra del veicolo in arrivo tocchi la coda della banchina nell'istante in cui la coda del veicolo precedente lascia la testa della banchina (vedi fig. 1.45).

**FIG. 1.45**

[1.14]

Lo spazio  $\Delta s$  di cui si incrementa la distanza di arresto con la riduzione di  $b_n$  a  $b_r$  è pari a<sup>2</sup>:

$$\Delta s = \frac{v^2 \cdot (K - 1)}{2 \cdot b_n} \quad \text{dove:} \quad K = \frac{b_n}{b_r}$$

---

<sup>2</sup>Ipotizziamo un diagramma del moto trapezio.

L'espressione del distanziamento temporale, con le condizioni di sicurezza ora esposte, è dato, come mostrato in figura 1.45, da:

$$h_{smin} = t_s + t'_a + \Delta t + t_r + t_b$$

dove:

- $t_s$  è il tempo di sosta del convoglio alla stazione;
- $t_r$  è il tempo di percezione e reazione; si può assumere pari a 1 secondo;
- $t'_a$  è il tempo che passa tra la partenza del veicolo (LTU) fino a che la sua coda non lascia la stazione; esse è dato da:

$$t'_a = \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot l'}{a}};$$

- $\Delta t$  è il tempo che impiega il veicolo in partenza a percorrere lo spazio  $n l' + \Delta s$  alla velocità  $v$ :

$$\Delta t = \frac{n \cdot l' + \Delta s}{v} = \frac{n \cdot l'}{v} + \frac{v \cdot (K - 1)}{2 \cdot b_n};$$

- $t_b$  è il tempo di frenatura del convoglio in arrivo (FTU):

$$t_b = \frac{v}{b_n}.$$

L'espressione di  $h_{smin}$  diventa quindi:

$$h_{smin} = t_s + t_r + \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot l'}{a}} + \frac{n \cdot l'}{v} + \frac{v \cdot (K - 1)}{2 \cdot b_n}$$

La capacità della stazione è quindi data da:

$$C_s = \frac{3.600 \cdot (n \cdot C_v)}{t_s + t_r + \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot l'}{a}} + \frac{n \cdot l'}{v} + \frac{v \cdot (K - 1)}{2 \cdot b_n}}$$

In questo caso la capacità del convoglio è stata espressa come prodotto del numero di carrozze (n) per la capacità di ogni carrozza (Cv).

La velocità ottimale in corrispondenza della quale la capacità è massima è pari a:

$$v_s^* = \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot l' \cdot b_n}{(K-1)}}$$

e la massima capacità, in corrispondenza di essa, ha l'espressione:

$$C_s^* = \frac{3.600 \cdot (n \cdot C_v)}{t_s + t_r + \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot l'}{a}} + \sqrt{\frac{2 \cdot n \cdot l' \cdot (K-1)}{b_n}}}$$

#### 4.4) L'offerta di sosta.

L'offerta di sosta è data dal numero di posti x ora che sono a disposizione degli utenti del sistema di trasporto privato; tale numero si ottiene come prodotto del numero di stalli per il numero di ore al giorno per cui questi stalli sono a disposizione degli utenti (la sosta può essere vietata in certe ore del giorno).

L'offerta di sosta viene computata calcolando il numero di posti x ora delle diverse opportunità di sosta legale che si ha nelle diverse zone in cui è suddivisa l'area di studio.

La capacità di sosta offerta (per categoria) e il grado di occupazione sono parametri che influenzano le funzioni di costo dei rami di sosta, nel caso in cui si vogliano assegnare i flussi alla rete di trasporto simulando esplicitamente la sosta.

L'offerta di sosta può essere classificata nelle seguenti 4 categorie:

- 1) Sosta in *impianti pubblici*. Si intendono per impianti pubblici i parcheggi multipiano (in elevazione o sotterranei) che sono accessibili a tutti; la sosta è in genere custodita e a tariffa oraria. Di questi impianti si devono rilevare le seguenti caratteristiche fondamentali:
  - numero di posti offerti;
  - orario di apertura;
  - tariffe (possibilità di abbonamenti per i residenti);
  - n. di piani;
  - se vi sono altri ingressi oltre quello sul ramo in questione e dove sono situati;
  - dove sono situate le uscite.
- 2) Sosta in *aree pubbliche*. Per sosta su aree pubbliche si intende la sosta su strada e piazze o, comunque, su aree scoperte recintate di proprietà demaniale o comunale. La sosta su strada può essere vietata dal Codice della Strada o da ordinanze comunali. Su ogni arco devono essere rilevate le seguenti caratteristiche dell'offerta di sosta:
  - n. di stalli totali lungo l'arco (offerta massima teorica);
  - n. di stalli a sosta libera (divisi tra lato destro e sinistro della strada) con relativa disposizione (paralleli alla carreggiata, a spina, a pettine);
  - n. di stalli a sosta custodita (sempre divisi tra lato destro e sinistro e con relativa disposizione); tipo di tariffazione (oraria, fissa); orario di custodia;
  - n. di stalli zona disco (idem);
  - n. di stalli riservati (taxi, forze di polizia, disabili, residenti);
  - n. di stalli in piazze o altre aree che abbiano accesso sull'arco in questione; in questo caso occorrono anche le seguenti informazioni:
    - sosta libera o a pagamento (tariffa fissa o oraria); se a pagamento indicare anche l'orario di custodia;
    - presenza di altri ingressi e/o uscite oltre quelli sul ramo in questione.

- n. di stalli in cui la sosta è vietata; in questo caso si deve indicare il motivo del divieto (divieto di sosta, fermata di autobus, attraversamenti pedonali, etc.) ed altre informazioni (zona rimozione, orario del divieto, etc.).
- 3) Sosta in *impianti o aree private aperte al pubblico*. Comprende i garage aperti al pubblico, cioè i garage e le annesse aree scoperte i cui stalli vengono fittati al mese o ad ora. Le caratteristiche da rilevare sono le stesse degli impianti pubblici; la distinzione rispetto a questi ultimi va fatta in quanto è più difficile imporre ai gestori di questi impianti una politica comune della sosta. E' necessario computare anche i posti offerti in aree private che illegalmente, cioè senza licenza, sono aperte al pubblico, in quanto se può prevedere la regolarizzazione in sede di piano.
  - 4) Sosta in *impianti o aree private utilizzate dai relativi proprietari o titolari di diritto d'uso*. Comprende i garage condominiali, i box, i cortili e la viabilità interna dei complessi residenziali. In queste aree vanno distinte due aliquote: quella utilizzata dai residenti nei pressi della propria abitazione e quella utilizzata da utenti (impiegati, clienti, etc.) nei pressi dei luoghi di destinazione. In questo caso è sufficiente rilevare il numero di posti di sosta offerti; se la rilevazione risulta difficoltosa (essendo proprietà private), si può effettuare una stima su carta per le aree scoperte, mentre per quelle coperte si può fare la differenza tra il numero di auto intestate ai residenti nella zona e quelle parcheggiate (di notte) nelle vie pubbliche e nei garage pubblici.

### 5) Le indagini sull'offerta di trasporto: schede di rilevamento.

Per poter ottenere un modello di offerta (di trasporto privato, di trasporto pubblico o di sosta) è necessario rilevare le principali caratteristiche fisiche, geometriche ed organizzative delle componenti dell'offerta stessa (situazione attuale).

Tali informazioni consentono di rappresentare graficamente il modello di offerta (grafo) e di associare ad ogni elemento (o insieme di elementi) di esso delle funzioni di costo e di prestazione, utili ai fini della simulazione degli effetti prodotti dalle diverse ipotesi di piano.

Le principali informazioni da rilevare per il modello di offerta di trasporto privato e pubblico sono di seguito riportate; per l'offerta di sosta le informazioni da rilevare sono già state esaminate al paragrafo precedente.

Le informazioni da riportare per ogni arco della **rete di trasporto privato**, in parte da rilevare su strada ed in parte dal grafo, sono:

- 1) **Caratterizzazione urbanistica.** Viene indicata per ogni arco la caratterizzazione urbanistica della zona in cui esso si trova: residenziale, commerciale, industriale, etc.
- 2) **Tipologia di strada.** Si rileva la tipologia di strada (classifica del CNR) al quale l'arco in questione attualmente può essere ascritto (primaria, di scorrimento, etc.); con la redazione del PUT l'arco può cambiare funzione e quindi categoria.
- 3) **Tipo di nodo iniziale e finale dell'arco.** Vengono individuati sul grafo la tipologia del nodo iniziale (centroide interno, centroide esterno, nodo di rete) e del nodo finale; per quest'ultimo è necessario rilevare se è semaforizzato o meno, e più in generale il "tipo di ritardo".
- 4) **Tipo di arco.** Deve essere individuata la tipologia dell'arco: connettore, di manovra, urbano, etc.
- 5) **Sensibilità all'inquinamento acustico ed atmosferico.** Per poter calcolare con opportune funzioni il grado di inquinamento è necessario rilevare l'eventuale presenza di edifici latitanti di notevole altezza.
- 6) **Geometria della strada.** Le caratteristiche geometriche principali da rilevare sono: lunghezza, larghezza (media, minima e della sezione finale), n. di corsie totali, n. di corsie per il trasporto privato, larghezza corsie per il trasporto privato, veicoli in sosta (per tipo di sosta), larghezza dei marciapiedi (se presenti), larghezza spartitraffico (se presente).
- 7) **Caratteristiche funzionali:** pendenza, tortuosità, grado di disturbo, n. intersezioni secondarie, divieti di svolta al nodo finale, divieti di circolazione, divieti di sosta, caratteristiche del ciclo semaforico, n. punti di conflitto alla intersezione del nodo finale, percentuale mezzi pesanti, presenza linee di trasporto collettivo, presenza di impianti fissi, etc.

Per poter descrivere completamente le caratteristiche del sistema di offerta di trasporto privato occorre inoltre rilevare, le caratteristiche dell'**offerta di sosta**:

- 1) **Capacità di sosta**: numero di stalli di sosta presenti, oltre che sui rami stradali, anche nelle aree fuori strada sia private che pubbliche (larghi, piazze, spazi privati all'aperto o al coperto, garage, parcheggi ecc.).
- 2) **Caratteristiche della regolazione**: divieti parziali o totali, tariffe, tipologie di gestione ecc.

Dette informazioni, come già precisato in precedenza, saranno più o meno accorpate a seconda del livello di Piano che bisogna redigere. Per esempio a livello di PGTU sono sufficienti aggregazioni per zone di traffico.

Tutte le informazioni predette devono essere in parte ricavate dalla cartografia dell'area di studio e in parte rilevate sul campo.

Per poter descrivere le caratteristiche del sistema di **offerta di trasporto pubblico** occorre rilevare, oltre quelle già viste per il trasporto privato, anche le seguenti caratteristiche:

- 1) **Tipo di nodo iniziale e finale**: centroide (interno o esterno), pedonale, fermata, etc.
- 2) **Tipologia arco**: pedonale, salita, discesa, di linea, etc.
- 3) **Geometria**: larghezza geometrica (minima, media, accesso finale), lunghezza, n. corsie totali, n. di corsie riservate, etc.
- 4) **Tipo di sede (per autobus o tram)**: promiscua, preferenziale (linea), protetta (cordolo).
- 5) **Altre caratteristiche**: frequenza linee, codice mezzo per ogni linea, nome mezzo linea, posti totali, posti a sedere, etc.

### 5.1) Schede per la rilevazione dell'offerta.

Le informazioni sull'offerta attuale di trasporto e di sosta, necessarie per la redazione dei Piani urbani di traffico, devono essere in parte ricavate dalla cartografia dell'area di studio e in parte rilevate sul campo.

E' necessario, quindi, progettare una scheda che riporti le caratteristiche suddette e che venga in parte compilata con l'analisi della cartografia e per la restante parte con rilevazioni dirette sul campo.

Riportiamo di seguito un esempio di scheda, in cui si prevede di rilevare per ogni arco le caratteristiche dell'offerta di trasporto privato e di sosta; di seguito sarà riportata un'altra scheda per rilevare le caratteristiche dell'offerta di trasporto pubblico (i rami della rete di trasporto pubblico non coincidono con quelli della rete di trasporto privato).

10 pag. bianche per incollare schede



















## 6) Gli spostamenti pedonali.

In ambito urbano, soprattutto nelle zone centrali, riveste sempre maggiore importanza il modo di trasporto pedonale, sia per problematiche sociali ed ambientali che per la sua interazione con i flussi veicolari.

In questo paragrafo ci proponiamo di esaminare le caratteristiche fondamentali degli spostamenti pedonali e di esporre le metodologie che consentono di attribuire un livello di servizio ai suddetti spostamenti.

### 6.1) Caratteristiche del flusso pedonale.

Diamo adesso alcune definizioni che saranno utilizzate nella successiva trattazione:

- **Velocità pedonale.** E' la media delle velocità di camminata, generalmente espressa in m/s.
- **Valore di flusso pedonale.** E' il numero di pedoni che transitano in una sezione nell'unità di tempo, espresso in pedoni per 15 minuti oppure in pedoni al minuto.
- **Flusso per unità di larghezza.** E' il flusso medio di pedoni per unità di larghezza del marciapiede effettivo, espresso in pedoni per minuto e per metro.
- **Densità pedonale.** E' il numero medio di pedoni per unità di area all'interno di una corrente pedonale o di un'area di attesa, espressa in pedoni per metro quadrato.
- **Spazio pedonale.** E' l'inverso della densità e misura l'area media a disposizione di ogni pedone; si esprime in mq per pedone.

I parametri che misurano il livello qualitativo del flusso pedonale sono fondamentalmente i seguenti: libertà di scegliere la velocità desiderata; possibilità di superare i pedoni più lenti; facilità di attraversamento di una corrente di traffico pedonale; capacità di camminare in direzione opposta al flusso principale; possibilità di mantenere velocità e direzione senza conflitti con altri pedoni.

Il livello di servizio, come vedremo, sarà individuato dal valore assunto dallo "spazio pedonale"; in effetti al livello di servizio percepito dall'utente dovrebbero contribuire anche altri fattori quali il comfort (presenza di pensiline per la protezione dalla pioggia) e la sicurezza (buona illuminazione e separazione dai flussi veicolari).

Le relazioni che legano tra loro flusso, densità e volume sono analoghe a quelle viste per le condizioni di deflusso ininterrotto dei veicoli; si ha anche in questo caso che ad un aumento di volume e densità diminuisce la velocità. La relazione che lega le tre grandezze suddette è, quindi, la seguente:

$$f = V \cdot D$$

dove:

f = flusso espresso in pedoni/minuto x metro.

V = velocità pedonale in metri al minuto.

D = densità in pedoni/metro quadrato.

Se invece della densità si vuole utilizzare il suo reciproco (spazio pedonale, S) tale relazione si esprime nella seguente forma:

$$f = \frac{V}{S}$$

Nelle figure da 1.46 a 1.49 è riportato graficamente l'andamento di una grandezza in funzione di un'altra, ritenendo che la terza sia costante per ogni categoria di pedoni considerata.

Le condizioni di massimo flusso sono interessanti perché rappresentano la capacità della via pedonale; si è osservato, a tal proposito, che il flusso massimo si ha in corrispondenza di un intervallo di densità molto ristretto, cioè uno spazio pedonale compreso tra 0.46 e 0.83 mq/ped. In corrispondenza di tale valore, però, la velocità pedonale e la libertà di movimento del pedone sono molto limitate.

Se lo spazio si riduce a meno di 0.46 mq/ped, il valore del flusso cade precipitosamente, fino ad arrivare ad un arresto della circolazione quando lo spazio pedonale è compreso tra 0.18 e 0.36 mq/ped.

I diagrammi Velocità-Flusso, simili a quelli dei veicoli, mostrano che quando ci sono pochi pedoni (basso livello di flusso) lo spazio a disposizione consente di poter raggiungere una maggiore velocità.

Quando viene raggiunto un livello critico di affollamento la libertà di movimento è più difficile e diminuiscono sia il flusso che la velocità.

Il diagramma Spazio-Velocità mostra che, affinché i pedoni più veloci possano raggiungere la velocità desiderata di circa 100 metri/min., lo Spazio pedonale a disposizione deve essere almeno pari a 3.7 mq/ped.

Per calcolare lo spazio pedonale bisogna riferirsi non alle dimensioni geometriche del marciapiede, ma alla superficie di esso che è effettivamente a disposizione dei pedoni; si introduce, quindi, il concetto di "larghezza netta di cammino", intesa come la larghezza del marciapiede che viene utilizzata per i movimenti pedonali.

Infatti, i pedoni si distanzieranno sia dal bordo esterno del marciapiede che dagli edifici o muri che si trovano in corrispondenza del bordo interno; tale spazio dovrà, quindi, essere sottratto alla larghezza del marciapiede quando si andrà a calcolare il livello di servizio. Inoltre dovrà essere esclusa dal calcolo la striscia di marciapiede occupata da pedoni fermi in corrispondenza di vetrine oppure le parti di marciapiede in

prossimità di ostruzioni fisiche, come in prossimità dei pali della luce, dei parchimetri, etc. In figura 1.50 è riportata la metodologia con la quale la larghezza effettiva del camminamento, tenuto conto di tutti i suddetti fattori; in tabella 1.20 è riportata la larghezza occupata (in metri) da ogni tipologia di ostacolo.

**FIG. 1.46**

[1.21]

**FIG. 1.47**

[1.21]

**FIG. 1.48**

[1.21]

**FIG. 1.49**

[1.21]

**FIG. 1.50**

[1.21]

TAB. 1.20

[1.21]

| Ostacolo                                 | Larghezza (m)   |
|------------------------------------------|-----------------|
| <b>Servizi stradali</b>                  |                 |
| Lampioni                                 | 0.7-1.0         |
| Piloni per segnaletica                   | 0.9-1.2         |
| Allarmi antincendio                      | 0.7-1.0         |
| Idranti                                  | 0.7-0.9         |
| Segnali stradali                         | 0.6-0.7         |
| Parchimetri                              | 0.6             |
| Cassette della posta                     | 0.9-1.1         |
| Cabine telefoniche                       | 1.2             |
| Cestini                                  | 0.9             |
| Panchine                                 | 1.5             |
| <b>Accessi pubblici metrò</b>            |                 |
| Scale di accesso                         | 1.6-2.1         |
| Griglie di ventilazione (sopraelevate)   | 1.8+            |
| Griglie per trasformatori (sopraelevate) | 1.5+            |
| <b>Verde pubblico</b>                    |                 |
| Alberi                                   | 0.6-1.2         |
| Protezione piante                        | 1.5             |
| <b>Attrezzature commerciali</b>          |                 |
| Supporti per locandine                   | 1.4-4.0         |
| Bancarelle                               | variabile       |
| Supporti pubblicitari                    | variabile       |
| Supporti di vendita                      | variabile       |
| Tavolini (due file)                      | variabile (2.1) |
| <b>Sporgenze degli edifici</b>           |                 |
| Colonne                                  | 0.7-0.9         |
| Verande                                  | 0.6-1.8         |
| Accessi sotterranei                      | 1.5-2.1         |
| Sostegni di pluviali                     | 0.3             |
| Telai di tende                           | 0.7             |
| Piani caricatori per camion              | variabile       |
| Entrate/uscite garage                    | variabile       |
| Passi carrabili                          | variabile       |

**Nota:** a tali valori devono essere aggiunti 0.3-0.4 m per tener conto della distanza media tra il pedone e l'ostacolo.

## 6.2) Determinazione del livello di servizio.

Il Livello di servizio ai flussi pedonali viene attribuito in funzione dei parametri, rappresentativi della qualità del flusso, di seguito riportati:

- Spazio per pedone.
- Valori di flusso.
- Velocità.

La velocità è un fattore importante del livello di servizio perché può essere facilmente osservata e misurata; al di sotto di 45 m/min la qualità del flusso è molto scadente ed il livello di servizio molto basso.

La tabella 1.21 mostra il criterio di valutazione del LdS pedonale; il parametro fondamentale utilizzato è lo Spazio pedonale (inverso della densità); in corrispondenza di esso ed a sua integrazione sono riportati anche la velocità media, il flusso pedonale ed il rapporto volume/capacità (assunta quest'ultima pari a 82 ped/min\*metro).

TAB. 1.21

[1.21]

| Flussi e velocità previste      |                 |                           |                    |                  |
|---------------------------------|-----------------|---------------------------|--------------------|------------------|
| Livello di servizio             | Spazio (mq/ped) | Veloc. media (metri/min.) | Flusso (ped/min*m) | Rapporto vol/cap |
| A                               | ≥11.7           | ≥79                       | ≤ 6.5              | ≤ 0.08           |
| B                               | ≥3.6            | ≥76                       | ≤ 23               | ≤ 0.28           |
| C                               | ≥2.2            | ≥73                       | ≤ 33               | ≤ 0.40           |
| D                               | ≥1.4            | ≥68                       | ≤ 49               | ≤ 0.60           |
| E                               | ≥0.5            | ≥46                       | ≤ 82               | ≤ 1.00           |
| F                               | <0.5            | <46                       | variabile          | variabile        |
| Condizioni medie per 15 minuti. |                 |                           |                    |                  |

La descrizione dei livelli di servizio è la seguente:

- **Livello di servizio A.** I pedoni si muovono nella direzione desiderata senza modificare i propri movimenti a causa di altri pedoni.; le velocità di camminata sono scelte liberamente e i conflitti con gli altri pedoni sono improbabili.
- **Livello di servizio B.** Lo spazio è sufficiente per permettere la velocità scelta, il sorpasso e per evitare conflitti; si incomincia a prestare attenzione agli altri pedoni e c'è influenza reciproca nella scelta della direzione.

- **Livello di servizio C.** Lo spazio permette una velocità normale e il sorpasso in un flusso unidirezionale; dove esistono flussi bidirezionali o movimenti di incrocio ci sono piccoli conflitti e le velocità ed i volumi sono più bassi.
- **Livello di servizio D.** E' limitata la libertà di scegliere la velocità di camminata e la possibilità di sorpasso; dove esistono flussi bidirezionali o che si incrociano la probabilità di conflitto è alta comportando frequenti variazioni di velocità e di traiettoria; il flusso è ancora abbastanza fluido però sono molto probabili le frizioni e le interazioni tra pedoni.
- **Livello di servizio E.** Teoricamente tutte le persone sono vincolate nella velocità e sono obbligate a frequenti cambi di traiettoria; non c'è spazio per superare i pedoni più lenti e si cammina quasi in fila; i movimenti di attraversamento o di inversione del flusso sono possibili solo con enormi difficoltà; i volumi sono prossimi alla capacità con conseguenti rallentamenti ed interruzioni.
- **Livello di servizio F.** Tutte le velocità di camminata sono molto impedita e l'avanzamento è possibile solo "infilandosi"; ci sono inevitabili contatti tra pedoni ed è impossibile attraversare il flusso o invertire la direzione; il flusso è intermittente e instabile; questa situazione è più caratteristica di un accodamento che di un flusso pedonale in movimento.

## **CAPITOLO 2**

### **LA DOMANDA DI TRASPORTO**

#### **1) Richiami relativi alle caratteristiche della domanda di trasporto, con particolare riferimento all'evoluzione di essa nel corso della giornata, della settimana e dei mesi.**

La domanda di trasporto può essere definita come il numero di spostamenti che si ha su di un determinato sistema di trasporto in un prefissato periodo di tempo (flusso di spostamenti).

Essa viene studiata a seconda dei casi e degli scopi in funzione di diversi parametri: spaziali, socioeconomici, temporali.

Notevole importanza assume la domanda di trasporto dal punto di vista temporale, in quanto essa varia non solo nelle diverse ore della giornata ma anche nel corso della settimana, dei mesi e degli anni.

Riferendosi allo studio di una infrastruttura viaria si può definire il “*volume di traffico*” come il numero di veicoli che attraversa una sezione stradale in un determinato intervallo di tempo (che rappresenta, in pratica, la domanda di trasporto su quella infrastruttura espressa in veicoli invece che in spostamenti); l'intervallo di tempo da considerare è diverso a seconda degli scopi prefissi (progettazione, verifica economica o finanziaria etc.).

#### **1.1) Volume giornaliero.**

Un intervallo comunemente usato è il giorno; si definiscono allora 4 parametri:

- 1) *Traffico giornaliero medio* (TGM): è dato dal numero di veicoli che passa per la sezione in un anno diviso 365 (n. giorni dell'anno).
- 2) *Traffico feriale medio* (TFM): è dato dal numero di veicoli che attraversa la sezione nei giorni feriali dell'anno diviso il numero dei suddetti (260).
- 3) *Traffico giornaliero parziale medio* (TGPM): è la media del volume di traffico delle 24 ore misurato su un periodo più piccolo di un anno (6 mesi, 4 mesi, un mese, una settimana o anche 2 giorni).
- 4) *Traffico feriale parziale medio* (TFPM): è simile al TGPM considerando però nei periodi suddetti solo i giorni feriali.

L'unità di misura con la quale questi volumi sono misurati è “*veicoli al giorno*” (veic./g.). La tabella 2.1 mostra le relazioni che intercorrono tra i suddetti parametri riportando l'esempio di una strada a servizio di località di villeggiatura; si nota infatti un

TGM maggiore del TFM ed inoltre dei valori dei TFPM e TGPM (misurati mensilmente) maggiori nei mesi estivi.

Il volume giornaliero può essere usato per pianificare un sistema di trasporto o per valutarne la convenienza economica ma non per progettare una singola arteria. Per quest'ultimo problema ci si deve riferire a più brevi intervalli di tempo.

TAB. 2.1

| 1<br>Mese                             | 2<br>N. di giorni<br>feriali<br>(giorni) | 3<br>N. totale<br>di giorni<br>(giorni) | 4<br>Volume di<br>traffico mensile<br>(veic.) | 5<br>Volume di traffico<br>mensile feriale<br>(veic.) | 6<br>TFPM<br>5/2<br>(veic./g.) | 7<br>TGPM<br>4/3<br>(veic./g.) |
|---------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Gennaio                               | 22                                       | 31                                      | 425.000                                       | 208.000                                               | 9.455                          | 13.710                         |
| Febbraio                              | 20                                       | 28                                      | 410.000                                       | 220.000                                               | 11.000                         | 14.643                         |
| Marzo                                 | 22                                       | 31                                      | 385.000                                       | 185.000                                               | 8.409                          | 12.419                         |
| Aprile                                | 22                                       | 30                                      | 400.000                                       | 200.000                                               | 9.091                          | 13.333                         |
| Maggio                                | 21                                       | 31                                      | 450.000                                       | 215.000                                               | 10.238                         | 14.516                         |
| Giugno                                | 22                                       | 30                                      | 500.000                                       | 230.000                                               | 10.455                         | 16.667                         |
| Luglio                                | 23                                       | 31                                      | 580.000                                       | 260.000                                               | 11.304                         | 18.710                         |
| Agosto                                | 21                                       | 31                                      | 570.000                                       | 260.000                                               | 12.381                         | 18.387                         |
| Settembre                             | 22                                       | 30                                      | 490.000                                       | 205.000                                               | 9.318                          | 16.333                         |
| Ottobre                               | 22                                       | 31                                      | 420.000                                       | 190.000                                               | 8.636                          | 13.548                         |
| Novembre                              | 21                                       | 30                                      | 415.000                                       | 200.000                                               | 9.523                          | 13.833                         |
| Dicembre                              | 22                                       | 31                                      | 400.000                                       | 210.000                                               | 9.545                          | 12.903                         |
| Anno                                  | 260                                      | 365                                     | 5.445.000                                     | 2.583.000                                             | -                              | -                              |
| TFM = 2.583.000/260 = 9.935 veic./g.  |                                          |                                         |                                               |                                                       |                                |                                |
| TGM = 5.445.000/365 = 14.918 veic./g. |                                          |                                         |                                               |                                                       |                                |                                |

### 1.2) Volume orario.

Il “*volume orario*” è dato dal numero di veicoli che attraversano la sezione in un’ora.

Il volume di traffico varia considerevolmente nel corso delle 24 ore raggiungendo valori massimi durante le ore del mattino e della sera in cui si ha il traffico pendolare.

L’ora del giorno in cui si ha il massimo volume orario è detta “**ora di punta**” ed il corrispondente volume “**volume dell’ora di punta**”. Quest’ultimo assume una rilevanza notevole per la progettazione della strada: le strade principali devono essere progettate, nella maggior parte dei casi, in funzione di questo valore.

In fase di progettazione i volumi dell'ora di punta possono essere calcolati dal valore del traffico giornaliero medio con la seguente relazione:

$$VDOP = TGM \cdot K \cdot D$$

dove:

VDOP= volume direzionale orario di progetto

K= percentuale di traffico giornaliero che si ha nell'ora di punta espressa come decimale

D= percentuale di traffico che viaggia nella direzione di punta espressa come decimale

**TAB. 2.2**

| Tipologia di strada     | K           | D           |
|-------------------------|-------------|-------------|
| Extraurbana             | 0.15 - 0.25 | 0.65 - 0.80 |
| Periferica              | 0.12 - 0.15 | 0.55 - 0.65 |
| Urbana radiale          | 0.07 - 0.12 | 0.55 - 0.65 |
| Urbana circonvallazione | 0.07 - 0.12 | 0.50 - 0.55 |

I valori di K e D sono riportati in tabella 2.2; il flusso di traffico utilizzato per la progettazione della strada (e per il quale è stato calcolato K) è la trentesima ora di punta dell'anno. I fattori D e K vengono ricavati sperimentalmente, essendo essi funzione delle caratteristiche territoriali. E' importante far rilevare che *il fattore K decresce con l'aumento della densità' abitativa lungo la strada*: in aree più dense la differenza tra il traffico nelle ore di punta e quello nelle altre ore della giornata è meno marcata. Il fattore D è più variabile e dipende sia dalla densità abitativa che dalle correlazioni tra la strada in questione e i maggiori nodi generatori e attrattori di traffico.

### 1.3) Volume sub-orario.

Sul volume orario di punta si basa la progettazione della strada ma, specie per le strade urbane, è di considerevole interesse anche la variazione all'interno dell'ora.

La qualità del traffico e quindi il livello di servizio che si ottiene è spesso correlato alle oscillazioni di domanda all'interno dell'ora; infatti una strada può avere una capacità adeguata a soddisfare la domanda dell'ora di punta, ma tale capacità può essere superata,

in periodi di tempo brevi all'interno dell'ora, da punte di flusso creando così un fenomeno di saturazione.

I volumi osservati in periodi di tempo inferiori ad un'ora sono espressi come equivalenti tassi di flusso orari; ad es. 1.100 veicoli osservati in 15 minuti possono essere espressi come:

$$1.100/0,25=4.400 \quad (\text{veic./h})$$

Il “**tasso di flusso**”,  $F$ , è di 4.400 veic./h per l'intervallo di tempo di 15 minuti nel quale i veicoli sono stati misurati; il volume di traffico misurato nell'intera ora di punta è generalmente diverso dal tasso di flusso; un esempio è riportato in tabella 2.3.

**TAB. 2.3**

| Intervallo di tempo | Volume nell'intervallo di tempo (veic.) | Tasso di flusso nell'intervallo di tempo (veic./h) |
|---------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 16:00 - 16:15       | 1.100                                   | 4.400                                              |
| 16:15 - 16:30       | 1.000                                   | 4.000                                              |
| 16:30 - 16:45       | 1.200                                   | 4.800                                              |
| 16:45 - 17:00       | 900                                     | 3.600                                              |
| 16:00 - 17:00       | 4200 veic./h (volume orario)            |                                                    |

Le fluttuazioni di breve periodo sono significative ai fini operativi: se la strada è progettata in base al volume dell'ora di punta, ad es. 1200 veic./h, e si ha in un periodo di 15 minuti all'interno dell'ora di punta un tasso di flusso di 4800 veic./h, in tale intervallo di tempo la capacità della strada viene ampiamente superata e si generano dei fenomeni di congestione. Pertanto è necessario in molti casi utilizzare in fase di progettazione il massimo tasso di flusso all'interno dell'ora di punta.

Il “**tasso di flusso**” dipende anche dall'ampiezza dei singoli intervalli in cui è suddivisa l'ora; per ragioni di stabilità statistica il Manuale della Capacità consiglia di usare sottoperiodi di 15 minuti (vedi fig.2.1).

**FIG. 2.1**

[2.1]

La relazione che lega il volume orario al massimo tasso di flusso all'interno dell'ora di punta è definita dal **“fattore dell'ora di punta” (PHF)**:

$$PHF = \frac{\text{volume orario}}{\text{massimo tasso di flusso}} (\leq 1)$$

Il campo di valori all'interno del quale è contenuto il **PHF** è 0.70-0.98, dove valori bassi indicano un forte grado di variazione del flusso durante l'ora di punta.

Quando noto il valore del PHF può essere usato per convertire il volume dell'ora di punta in una stima del tasso di flusso massimo nell'ora:

$$F = \frac{V}{PHF}$$

dove V è il volume orario.

#### 1.4) Variazioni mensili e stagionali.

La variazione di domanda mensile o stagionale è funzione soprattutto del tipo di strada e del tipo di attività presenti nell'area servita. La fig. 2.2 mostra un esempio.

Le strade extraurbane (rural), soprattutto se servono zone turistiche, mostrano una maggiore variazione del volume di traffico durante i mesi dell'anno; ad es. si hanno periodi di punta nei mesi di luglio ed agosto per le strade a servizio di centri estivi, mentre il volume di traffico sarà maggiore nei mesi invernali (soprattutto nei periodi in cui le scuole sono chiuse) per strade a servizio di stazioni invernali.

Le strade urbane con una forte componente di traffico pendolare subiscono delle variazioni stagionali minori; la strada urbana di fig. 2.2 presenta delle punte in giugno e ottobre, periodi che precedono e seguono quelli di vacanza. La strada extraurbana riportata nella stessa figura mostra una punta estiva più che doppia rispetto al valore che si ha nel mese meno carico; essa dovrà essere progettata per assorbire tale punta, in modo da assicurare una economica viabilità nelle regioni servite, anche se sarà sottoutilizzata negli altri mesi dell'anno.

**FIG. 2.2**

[2.1]

**1.5) Variazioni settimanali.**

Di notevole importanza è la variazione della domanda nel corso dei giorni della settimana. La fig. 2.3 mostra un esempio.

Le strade di accesso a zone di svago sopportano, nel giorno di punta, quasi 1.5 volte il traffico giornaliero medio; tale valore scende a 1.2 per altri tipi di strade.

**FIG. 2.3**

[2.1]

Le variazioni stagionali e giornaliere si sovrappongono, per cui si ha che le strade a servizio di luoghi di svago presentano nel corso dell'anno 5 o 6 finesettimana nei quali la domanda è molto più elevata rispetto agli altri periodi dell'anno.

### 1.6) Variazioni giornaliere.

La più complessa variazione della domanda di trasporto si ha nelle diverse ore del giorno; essa è anche la più importante dal punto di vista dell'ingegneria del traffico.

In genere ogni analisi che coinvolga la progettazione di una **“facility”**<sup>1</sup>, la gestione o il controllo del traffico si basa sul **“volume dell'ora di punta”**.

L'ora di punta è la singola ora del giorno durante la quale si ha il massimo volume di traffico; essa varia da luogo a luogo.

La fig. 2.4 mostra schemi di variazione giornaliera per varie tipologie di strade.

Si può notare che le strade a servizio di spostamenti pendolari presentano nei giorni feriali una punta di domanda la mattina ed un'altra la sera; entrambe sono ben evidenti.

Per le altre strade si ha solo la punta serale ed essa non è particolarmente evidente.

Mentre l'ora di punta si presenta più o meno nello stesso periodo della giornata, il **“volume dell'ora di punta”** può variare molto da giorno a giorno dell'anno; siccome tale volume è utilizzato in fase di progettazione, è importante capire quale ora di punta deve essere usata.

FIG. 2.4

[2.2]

---

<sup>1</sup>Termine inglese non traducibile che indica un qualsiasi dispositivo atto a favorire il trasporto: una strada, un parcheggio, un semaforo etc.

La fig. 2.5 riporta un grafico dei volumi dell'ora di punta giornaliera, espressa come % del TGM, per vari tipi di strade. I volumi orari sono ordinati in ordine decrescente, cominciando dal "1° volume di punta più elevato dell'anno".

Si nota come per le strade urbane la differenza tra il volume della prima ora di punta dell'anno e gli altri siano minori rispetto alle strade a servizio di centri turistici, per le quali in alcune ore dell'anno si hanno delle punte estreme.

Tradizionalmente la **"trentesima ora di punta"** è utilizzata per la progettazione delle strade extraurbane; per queste, infatti, la trentesima ora di punta si trova nei pressi del ginocchio della curva, cioè dove la curva cambia la sua pendenza da ripida a lieve. Ciò dimostra come sia diseconomico fornire una capacità aggiuntiva per coprire la domanda nella zona di ripida pendenza, dove una gran quantità di capacità (e quindi di spesa) aggiuntiva è necessaria per coprire una domanda che si ha in poche ore in un anno.

Per le strade urbane e periferiche, invece, le differenze tra i volumi non sono eccessive; per molte strade urbane conviene utilizzare la decima o la ventesima ora di punta.

**FIG. 2.5**

[2.3]

## 2) Richiami sui modelli di domanda di trasporto.

In questo paragrafo si forniscono dei richiami sui principali modelli di domanda utilizzati nel settore della pianificazione dei trasporti.

Un modello di domanda è una funzione matematica che pone in relazione la distribuzione delle attività sul territorio (residenze, luoghi di lavoro, etc.) e il sistema di offerta di trasporto con il valore medio della domanda, riferita ad un determinato periodo di tempo.

Nei modelli di domanda si considera che ogni spostamento sia il risultato di una serie di scelte effettuate dall'utente del sistema di trasporto; si considerano in genere 4 "dimensioni" di scelta, cui corrispondono 4 sottomodelli tra loro interconnessi (**modello a quattro stadi**):

- 1) "*Effettuare o meno lo spostamento*": **modello di emissione o generazione**.
- 2) "*Scelta della destinazione*": **modello di distribuzione**.
- 3) "*Scelta del modo di trasporto*": **modello di scelta o ripartizione modale**.
- 4) "*Quale percorso utilizzare*": **modello di scelta del percorso o assegnazione**.

La suddivisione in sottomodelli è dettata da motivi di trattabilità analitica e statistica: un modello unico porterebbe a considerare troppe alternative di scelta; la formulazione analitica del modello a quattro stadi è la seguente:

$$d_{od}(s,m,k)=d_o \cdot p(s/o) \cdot p(d/os) \cdot p(m/ods) \cdot p(k/mods)$$

In essa il numero di spostamenti dall'origine "o" alla destinazione "d" per il motivo "s", con il modo "m" e sul percorso "k", è espresso come prodotto del numero di spostamenti emessi dall'origine "o" per lo scopo "s", per la frazione di tali spostamenti che si reca alla destinazione "d" per il motivo "s", per la frazione di spostamenti che usa il modo "m" per recarsi in "d" per il motivo "s", per la frazione che utilizza il percorso "k" relativo al modo "m" per recarsi in "d" per il motivo "s". Le suddette frazioni nei modelli stocastici sono le probabilità di scelta delle diverse alternative, condizionate dalle scelte effettuate in precedenza.

I modelli di domanda, in base alle ipotesi comportamentali dalle quali derivano, possono essere suddivisi in:

- 1) *Comportamentali*, se derivano da esplicite ipotesi sul comportamento degli utenti.
- 2) *Descrittivi*, se descrivono le relazioni tra la domanda di trasporto e le variabili, socioeconomiche e di livello di servizio, senza formulare ipotesi specifiche sul comportamento dei decisori (utenti del sistema).

In genere nel modello a quattro stadi i sottomodelli di emissione e distribuzione risultano di tipo descrittivo, mentre i sottomodelli di scelta modale e scelta del percorso sono comportamentali.

I modelli comportamentali maggiormente utilizzati per modellizzare la domanda di trasporto sono del tipo di **utilità casuale**.

I modelli di utilità casuale si basano sulla ipotesi che ogni utente sia un *decisore razionale* ovvero un massimizzatore di utilità e che, per una serie di cause di diverso tipo, non sia possibile prevedere con certezza la scelta che egli effettuerà, ma soltanto calcolare le probabilità che egli faccia una determinata scelta.

Più in particolare i modelli di utilità casuale si basano sulle seguenti ipotesi:

a) Il generico utente “i” considera nell’effettuare la scelta tutte le  $m_i$  alternative disponibili che costituiscono il suo *insieme di scelta*  $I_i$ .

b) L’utente “i” associa a ciascuna alternativa j del suo insieme di scelta una utilità percepita  $U_j^i$  e sceglie l’alternativa che massimizza tale utilità. L’utilità associata a ciascuna alternativa dipende dai valori che alcune variabili, o attributi, assumono per tale alternativa:

$$U_j^i = U_j^i(\bar{X}_j^i)$$

dove  $\bar{X}_j^i$  è il vettore dei valori che gli attributi relativi all’alternativa j assumono per l’utente “i”.

c) L’utilità associata dal generico utente i all’alternativa j è una variabile aleatoria in quanto essa non è nota con certezza all’osservatore esterno.

Di solito, si assume che l’utilità  $U_j^i$  possa essere espressa dalla somma dell’*utilità sistematica*  $V_j$ , che rappresenta il valore medio o atteso dell’utilità percepita, costante per tutti gli utenti con lo stesso contesto di scelta (alternative e relativi attributi), e di un *residuo aleatorio*  $\varepsilon_j^i$ , che rappresenta gli scostamenti da tale valore:

$$U_j^i = V_j + \varepsilon_j^i \quad \forall j \in I_i$$

Per ragioni di convenienza analitica di solito si assume che la utilità sistematica  $V_j$  sia una funzione lineare degli attributi:

$$V_j(\bar{X}_j^i) = \sum_k \beta_k X_{kj}^i$$

dove  $X_{kj}^i$  è il valore del k-esimo attributo e i  $\beta_k$  sono coefficienti numerici da stimare.

In base alle ipotesi fatte non è possibile prevedere con certezza quale alternativa sceglierà il generico utente; è invece possibile calcolare la probabilità che l’utente i scelga

l'alternativa  $j$ . Essa sarà pari alla probabilità che l'utilità percepita dell'alternativa  $j$  sia la maggiore tra le utilità percepite associate alle altre alternative diverse da  $j$ , cioè:

$$p^i(j) = \text{Pr ob} [U_j^i > U_k^i] \quad \forall k \neq j \quad j, k \in I_i$$

cioè

$$p^i(j) = \text{Pr ob} [V_j - V_k > \varepsilon_k^i - \varepsilon_j^i] \quad \forall k \neq j \quad j, k \in I_i$$

Dalla relazione precedente si evince che la probabilità di scelta di una alternativa è una funzione dei valori delle utilità sistematiche di tutte le alternative concorrenti, la cui espressione dipende dalla legge di distribuzione dei residui aleatori: al variare delle ipotesi che si fanno sulla distribuzione congiunta dei residui aleatori  $\varepsilon$  si ottengono diversi modelli di utilità casuale.

*A) Il modello Logit multinomiale.*

E' il modello di utilità casuale più "semplice", esso si basa sull'ipotesi che i residui aleatori  $\varepsilon_j$  relativi alle diverse alternative siano indipendentemente ed identicamente distribuiti secondo una v.a. di Weibull/Gumble (WG) con funzione di distribuzione di probabilità data da:

$$F_\varepsilon(\bar{\varepsilon}) = \text{Pr ob}(\varepsilon \leq \bar{\varepsilon}) = \exp[-\exp(-\alpha\bar{\varepsilon} - \Phi)]$$

dove  $\alpha$  è un parametro e  $\Phi$  è la costante di Eulero ( $\Phi \approx 0.577$ ). La funzione densità di probabilità, che viene ricavata differenziando la precedente, è data da:

$$f_\varepsilon(\varepsilon) = \exp[-\alpha(\varepsilon + \Phi/\alpha)] \cdot \exp[-\exp(-\alpha(\varepsilon + \Phi/\alpha))]$$

Media e varianza dei residui WG sono pari a:

$$E(\varepsilon) = 0 \quad \text{Var}(\varepsilon) = \frac{\pi^2}{6\alpha^2}$$

Inoltre la indipendenza dei residui implica che la covarianza fra qualunque coppia di residui sia nulla:

$$\text{Cov}(\varepsilon_j, \varepsilon_h) = 0 \quad \forall j, h$$

Le utilità  $U_j$  sono anch'esse variabili aleatorie WG con media, varianza e funzione distribuzione di probabilità fornite da

$$E(U_j) = V_j$$

$$\text{Var}(U_j) = \frac{\pi^2}{6\alpha^2}$$

$$F_{U_j}(\bar{U}) = \text{Pr ob}[V_j + \varepsilon_j \leq \bar{U}] = \text{Pr ob}[\varepsilon_j \leq \bar{U} - V_j] = \exp[-\exp(-\alpha(\bar{U} - V_j + \Phi/\alpha))]$$

La variabile di WG gode di una importante proprietà detta di *stabilità rispetto alla massimizzazione* ovvero il massimo di variabili WG indipendenti e di uguale parametro  $\alpha$  è ancora una variabile di WG. In altri termini se le  $U_j$  sono variabili di WG di parametro  $\alpha$  e con medie  $V_j$ , la variabile  $U_M$ :

$$U_M = \max_j \{U_j\}$$

è ancora una variabile di WG con parametro  $\alpha$  e media  $V_M$  fornita da:

$$V_M = \frac{1}{\alpha} \ln \sum_j \exp(\alpha V_j)$$

La variabile  $Y$  a questa proporzionale:

$$Y = \ln \sum_j \exp(\alpha V_j)$$

è denominata, per la sua struttura analitica, variabile “log-sum”.

La stabilità rispetto alla massimizzazione rende la legge di WG particolarmente conveniente come distribuzione dei residui nei modelli di utilità casuale. Infatti, nelle ipotesi fatte, la probabilità di scegliere l'alternativa  $j$  fra quelle disponibili  $(1,2,...,N) \in I_i$  può essere espressa in forma chiusa come:

$$p^i(j) = \frac{\exp(\alpha V_j)}{\sum_{k=1,...,N} \exp(\alpha V_k)}$$

Questa relazione prende il nome di modello *Logit multinomiale*; nel caso di due sole alternative ( $N=2$ ) si parla di modello Logit binomiale.

Il modello Logit risulta essere particolarmente conveniente per la semplicità della sua trattazione analitica, ma, in alcuni casi, può dar luogo a risultati non realistici. In particolare l'ipotesi di covarianza nulla può non essere accettabile nel caso in cui due o più alternative sono percepite in modo simile dall'utente.

#### *B) Il modello Probit.*

Il modello Probit supera gli inconvenienti del modello Logit, ma presenta una minore trattabilità analitica. Esso si basa sull'ipotesi che i residui  $\varepsilon_j$  siano distribuiti secondo una variabile aleatoria normale multivariata con medie, varianze e covarianze indicate con:

$$E(\varepsilon_j) = 0$$

$$\text{Var}(\varepsilon_j) = \sigma_j^2$$

$$\text{Cov}(\varepsilon_j \varepsilon_h) = \sigma_{jh}$$

Non si ritiene necessario trattare in questa sede gli sviluppi analitici del modello, per cui si rimanda a testi specialistici; ci si limita a precisare che, a differenza di come avviene per il modello Logit, per il modello Probit non è possibile esprimere in forma chiusa le probabilità di scelta  $p(j)$ . Tali probabilità vengono calcolate con metodi approssimati basati sulla simulazione.

### C) Il modello C-Logit.

Il Modello C-Logit [2.11], utilizzabile per la scelta del percorso, consente di superare i problemi che il modello Logit presenta nel caso vi siano due o più alternative percepite in modo simile dall'utente; esso ha il vantaggio di avere una formulazione analitica computazionalmente agevole.

Tale modello, basato sulle ipotesi del Logit multinomiale, va a sostituire al costo generalizzato associato ad un percorso la somma dello stesso e di un fattore di sovrapposizione, che è una misura inversa del grado di indipendenza di un percorso: tale extracosto sarà tanto maggiore quanti più numerosi sono i percorsi che hanno archi in comune con il percorso in questione.

Il modello C-Logit, in definitiva, riduce la probabilità di scegliere percorsi con forti sovrapposizioni e fa aumentare quella di scegliere percorsi poco sovrapposti, a parità di costo generalizzato.

## 2.1) I modelli di generazione e distribuzione.

I modelli di generazione (o emissione) più utilizzati nella pratica sono “descrittivi”, sia perché l'utente non compie una scelta ad ogni viaggio per gli spostamenti sistematici (casa-lavoro, casa-scuola ed i loro inversi), sia perché le variabili che influenzano la scelta non sono facilmente quantizzabili. Di essi ricordiamo i modelli “indice per categoria”, nei quali gli utenti del sistema di trasporto sono suddivisi per categorie omogenee (rispetto al motivo in esame); viene valutato il numero medio di spostamenti effettuati dall'utente medio di ogni categoria per il motivo in esame; il numero totale di spostamenti emessi da ogni zona per il motivo “s” ( $d_{o\#\#\#}(s)$ ) si ottiene come sommatoria estesa a tutte le categorie dei prodotti del numero di utenti di ogni categoria che si trovano nella zona “o” ( $n_o(c)$ ) per il numero medio di spostamenti effettuati dall'utente medio della categoria per il motivo “s” ( $m_c(s)$ ):

$$d_{o\#\#\#}(s) = \sum_c n_o(c) \cdot m_c(s)$$

Come esempio di modelli “indice per categoria” nella tab. 2.4 sono riportati gli indici degli spostamenti giornalieri casa-lavoro, casa-scuola e casa-altri motivi ottenuti come valori medi degli indici stimati in cinque città italiane di medie dimensioni.

TAB. 2.4

[2.5]

|        | UTENTE TIPO                     |       |
|--------|---------------------------------|-------|
| C - L  | Attivo settore Industrie        | 1.024 |
|        | Attivo settore Servizi          | 1.084 |
|        | Attivo settore Servizi Privati  | 0.931 |
|        | Attivo settore Servizi Pubblici | 1.245 |
| C - Sc | Alunni scuole Elementari        | 0.84  |
|        | Studenti scuole Medie Inferiori | 0.87  |
|        | Studenti scuole Superiori       | 0.86  |
|        | Studenti Istituti Professionali | 0.88  |
| C-ABn  | Famiglia                        | 0.25  |
| C-ABd  | Famiglia                        | 0.11  |
| C-SP   | Famiglia                        | 0.16  |
| C-Sv   | Famiglia                        | 0.27  |
| C-AP   | Famiglia                        | 0.11  |
| C-AI   | Famiglia                        | 0.13  |

Identificazione degli spostamenti:

C-L Casa-Lavoro

C-Sc Casa-Scuola

C-AM Casa-Altri Motivi

C-ABn Acquisto beni non durevoli

C-ABd Acquisto beni durevoli

C-SP Servizi personali

C-Sv Svago

C-AP Accompagnamento persone

C-AI Altro

Il *modello di distribuzione* fornisce l'aliquota  $p(d/os)$  di spostamenti che, partendo dalla zona "o" per il motivo "s", si reca alla destinazione "d".

I modelli di distribuzione maggiormente usati nella pratica sono i modelli di "utilità casuale"; tra essi il più usato è il modello *Logit*:

$$p(d / os) = \frac{\exp(\alpha V_d)}{\sum_{d'} \exp(\alpha V_{d'})}$$

dove :

### = è il parametro della distribuzione Weibull/Gumble (WG), con cui sono distribuiti i residui aleatori (errori di percezione) delle utilità connesse alle diverse alternative di scelta.

$V_d$  = è l'utilità sistematica connessa alla destinazione "d".

L'utilità sistematica viene espressa come combinazione lineare, mediante opportuni coefficienti ###k, degli "attributi di attrattività" (ad es. numero di addetti della zona per gli spostamenti Casa-Lavoro) e degli "attributi di costo" (ad es. la distanza in linea d'aria tra le zone) riferiti alla zona di destinazione "d":

$$V_d = \sum_k \beta_k \cdot X_{kd}$$

La scelta degli attributi  $X_{kd}$  deve essere effettuata caso per caso; i coefficienti ###k devono essere tarati con l'ausilio dei risultati di indagini sulla mobilità<sup>1</sup>.

Gli attributi utilizzati per la definizione del modello possono essere distinti in due gruppi:

- 1) *Attributi di attrattività*: sono variabili, o loro funzioni, in grado di misurare la "capacità attrattiva" di una zona come destinazione, ad es.: il numero di addetti della zona per gli spostamenti Casa-Lavoro, il numero di iscritti nelle scuole per gli spostamenti Casa-Scuola, etc.
- 2) *Attributi di costo*: sono variabili che misurano il costo generalizzato (i coefficienti ###k saranno negativi) connesso allo spostamento da o a d: ad es. la distanza in linea d'aria tra i centroidi delle zone, variabili di costo generalizzato del trasporto (tempo a piedi, tempo a bordo, costo monetario), etc.

Se indichiamo con  $A_d$  e  $C_{o d}$  le variabili di attrazione e di costo, il modello di distribuzione più elementare assume la forma:

$$p(d / os) = \frac{\exp[\beta_1 A_d - \beta_2 C_{o d}]}{\sum_{d'} \exp[\beta_1 A_{d'} - \beta_2 C_{o d'}]}$$

Nelle applicazioni sono talvolta utilizzate delle forme particolari del modello note anche come *modelli gravitazionali semplicemente vincolati*. Uno di questi modelli si ottiene considerando come variabile di attrazione il logaritmo naturale di  $A_d$ , e come variabile di costo il logaritmo naturale di  $C_{o d}$ ; il modello ottenuto è il seguente:

<sup>1</sup> In generale vengono tarati i prodotti  $\alpha\beta_k$  considerando il parametro  $\alpha$  incluso nei coefficienti; si supera in questo modo il problema di fissare a priori un parametro  $\alpha$  per la distribuzione.

$$p(d / osh) = \frac{A_d^{\beta_1} C_{od}^{-\beta_2}}{\sum_{d'} A_{d'}^{\beta_1} C_{od'}^{-\beta_2}}$$

A titolo di esempio nella tabella 2.5 sono riportati i coefficienti  $\beta_1$  e  $\beta_2$  del suddetto modello per varie categorie di utenti relative ai motivi Casa-Lavoro, Casa-Scuola e Casa-Altri motivi sull'intera giornata. I valori riportati sono delle medie dei coefficienti ottenuti in diverse città campione di medie dimensioni; come variabile di separazione  $C_{od}$  è stata assunta la distanza in linea d'aria fra i centroidi.

TAB. 2.5

[2.5]

|      | $A_d$                           | $\beta_1$ | $\beta_2$ |
|------|---------------------------------|-----------|-----------|
| C-L  | Add. settore Industria          | 1.10      | 0.70      |
|      | Add. settore Servizi            | 0.93      | 0.70      |
|      | Add. settore Servizi Privati    | 0.93      | 0.83      |
|      | Add. Settore Servizi Pubblici   | 0.93      | 0.58      |
| C-Sc | Alunni scuole Elementari        | 0.90      | 2.52      |
|      | Studenti scuole Medie Inferiori | 0.95      | 2.24      |
|      | Studenti scuole Superiori       | 1.00      | 0.35      |
| C-SP | Addetti servizi                 | 0.91      | 0.78      |
| C-AP | Stud. scuole Elem. e Medie Sup. | 0.20      | 1.35      |
| C-AB | Addetti Commercio               | 1.61      | 2.54      |

## 2.2) Il modello di scelta modale.

Il modello di scelta modale fornisce l'aliquota  $p$  (m/ods) di spostamenti che, recandosi dalla zona  $o$  alla zona  $d$  per il motivo  $s$ , usa il modo  $m$ .

I modelli di scelta modale utilizzati nella pratica hanno quasi sempre una interpretazione comportamentale, in quanto la scelta del modo è un tipico esempio di scelta di viaggio, modificabile in viaggi diversi, in cui si ha una influenza predominante delle caratteristiche dell'offerta di trasporto.

Gli attributi che compaiono nella funzione di utilità sono in generale *attributi di livello di servizio* e *attributi socio-economici*.

Gli *attributi di livello di servizio* sono relativi alle caratteristiche del servizio offerto dal singolo modo, ad esempio il tempo di viaggio, (eventualmente scomposto in tempo a piedi, di attesa, a bordo etc.) il costo monetario, la regolarità del servizio, la necessità di effettuare trasbordi e così via. Questi attributi hanno di solito coefficienti negativi in quanto rappresentano per l'utente delle disutilità. Fra gli attributi di livello di servizio vi sono di solito degli attributi specifici dell'alternativa o di *preferenza modale* i quali valgono uno per un modo e zero per gli altri e tengono conto di quelle caratteristiche proprie di ciascun modo non valutabili quantitativamente.

Gli *attributi socio-economici* sono solitamente relativi a caratteristiche del decisore o del nucleo familiare di appartenenza che influenzano la scelta del modo; esempi tipici sono variabili di reddito familiare, di dotazione automobilistica (il numero di auto possedute in famiglia o il rapporto fra le automobili possedute in famiglia e il numero di patentati), il sesso, l'età etc.

La forma funzionale dei modelli di scelta modale utilizzata più frequentemente è il modello Logit Multinomiale:

$$p(m / ods) = \frac{\exp[V_m]}{\sum_{m'} \exp[V_{m'}]}$$

dove  $V_m$  è l'utilità sistematica associata al modo  $m$ .

Ad esempio una specificazione molto semplice delle utilità sistematiche per la scelta modale tra l'automobile (a), l'autobus (b) e la metropolitana (m) può essere la seguente:

$$\begin{aligned} V_a &= \beta_1 \text{ AUTO} + \beta_3 C_a + \beta_4 T_a + \beta_5 \text{ NA} \\ V_b &= \beta_1 \text{ BUS} + \beta_3 C_b + \beta_4 T_b \\ V_m &= \beta_3 C_m + \beta_4 T_m \end{aligned}$$

dove AUTO e BUS sono variabili di preferenza modale, C e T sono i costi ed i tempi relativi a ciascun modo per recarsi dall'origine alla destinazione e NA è il numero di auto possedute in famiglia; AUTO, BUS ed NA sono variabili specifiche della alternativa.

Nella tabella 2.6 sono riportate le alternative, gli attributi e i coefficienti di un modello Logit di scelta modale per gli spostamenti Casa-Lavoro in area urbana (città di Parma).

TAB. 2.6

[2.5]

|                           |                                              |         |
|---------------------------|----------------------------------------------|---------|
| <b>PIEDI</b>              |                                              |         |
| TWL                       | Tempo (h)                                    | -6.8237 |
| <b>BICI</b>               |                                              |         |
| TB                        | Tempo (h)                                    | -8.2718 |
| NB/NAD N:                 | bici possedute in famiglia per adulto        | 0.6646  |
| BIC                       | Var. specifica dell'alternativa              | -1.5818 |
| <b>CICLOMOTORE E MOTO</b> |                                              |         |
| TC                        | Tempo (h)                                    | -8.2718 |
| GC                        | Var. ombra ( $1 \leq$ anni 0 altrimenti)     | 0.6863  |
| NC/NAD N:                 | cicl. posseduti in famiglia per adulto       | 1.8572  |
| CICLO                     | Var. specifica dell'alternativa              | -2.3789 |
| <b>AUTO</b>               |                                              |         |
| TA                        | Tempo (h)                                    | -1.6142 |
| CA                        | Costo monetario (in £. x 1000)               | -0.1669 |
| CENTRO                    | Var. ombra (1 se dest. centro 0 altrimenti.) | -1.1469 |
| CFAM                      | Var. ombra (1 se capofamiglia 0 altrimenti.) | 0.4931  |
| NA                        | N. auto in famiglia                          | 6.4014  |
| AUTO                      | Var. specifica dell'alternativa              | -1.7103 |
| <b>BUS</b>                |                                              |         |
| TB                        | Tempo totale (h) piedi + attesa + bordo      | -1.6142 |
| CB                        | Costo monetario (in £. x 1000)               | -0.1669 |
| NINT                      | Numeri cambi linea                           | -0.1772 |
| BUS                       | Var. specifica dell'alternativa              | -1.7827 |
| $\ln L (\beta_{ott.})$    |                                              | -475    |
| $\ln L(O)$                |                                              | -697    |
| $ro^2$                    |                                              | 0.317   |
| % right                   |                                              | 0.651   |

### 2.3) La modellizzazione della scelta del percorso e calcolo dei flussi su una rete di trasporto privato.

Il modello di scelta del percorso fornisce l'aliquota  $p(k/mods)$  di spostamenti che utilizzano il percorso  $k$ , relativo al modo  $m$ , per andare da  $o$  a  $d$  per lo scopo  $s$ .

I modelli di scelta del percorso utilizzati sono tutti di tipo comportamentale; in questo caso si è soliti assumere che le variabili influenzanti la scelta del percorso siano sostanzialmente degli attributi di livello di servizio di segno negativo, ovvero dei costi (tempo di percorrenza, costo monetario). Per tale motivo nel seguito si farà riferimento non più ad una utilità percepita  $U_k$  ma ad un costo percepito  $\hat{C}_k$  relativo al percorso  $k$ . Tale costo percepito può essere espresso come:

$$\hat{C}_k = C_k + \varepsilon_k \quad \forall k \in I_{odm}$$

dove  $C_k$  è il costo percepito medio del percorso  $k$  (sostitutivo di  $V_k$ ),  $\varepsilon$  è il residuo aleatorio e  $I_{odm}$  è l'insieme dei percorsi che collegano la coppia  $od$  con il modo  $m$ .

Diversi modelli comportamentali possono essere usati per ottenere le probabilità di scelta del percorso.

Il più elementare è il modello di *utilità deterministica*, che può essere considerato come un caso particolare di un modello di utilità casuale nel quale la varianza dei residui  $\varepsilon_k$  è assunta pari a 0, cioè:

$$\hat{C} \equiv C_k$$

In questo caso il percorso  $k$  può essere utilizzato solo se il suo costo  $C_k$  è il minimo fra quelli dei percorsi alternativi; se esistono più percorsi di costo minimo, in base a questo modello, è possibile che uno di essi non sia usato da alcun utente.

Da ciò consegue che il modello di utilità deterministica non fornisce in modo esplicito le probabilità di uso dei percorsi alternativi se non nel caso elementare in cui esista un unico percorso di costo minimo per cui si ha:

$$p(k / mod s) = 1 \text{ se } C_k < C_h \quad \forall h \neq k \quad h, k \in I_{odm} \\ = 0 \text{ altrimenti}$$

Questo modello è anche noto come modello di scelta *tutto o niente*; i risultati ottenuti con questo modello molto semplice si discostano notevolmente da quelli reali.

I modelli di utilità casuale utilizzati per calcolare la probabilità di scelta del percorso sono Logit e Probit.

Il modello Logit è del tipo

$$p(k / \text{mod } s) = \frac{\exp[-\alpha C_k]}{\sum_{h \in I_{odm}} \exp[-\alpha C_h]}$$

La ipotesi di residui aleatori identicamente ed indipendentemente distribuiti che soggiace al modello Logit è teoricamente poco accettabile quando i percorsi alternativi possono avere in comune alcuni rami.

In alternativa si può utilizzare un modello Probit dove si assume che la varianza dell'errore di percezione sia proporzionale al costo del percorso e la covarianza dell'errore per due percorsi sia proporzionale, secondo lo stesso

La applicazione diretta dei modelli Logit e Probit richiederebbe la enumerazione esplicita di tutti i percorsi esistenti fra ogni coppia O-D. Questa operazione è proibitiva per reti delle dimensioni di quelle utilizzate nella pratica. Per questo motivo si utilizzano degli algoritmi che consentono di calcolare implicitamente, durante la fase di assegnazione, le probabilità di scelta associate ai diversi percorsi.

Le probabilità di scelta del percorso, comunque calcolate, giocano un ruolo centrale nel modello complessivo di simulazione del sistema, in quanto consentono di collegare le matrici OD dei singoli modi ai flussi sui percorsi e gli archi delle reti modali.

Il modello che consente questa associazione prende il nome di *modello di assegnazione*.

Il flusso medio sul percorso  $k$  relativo al modo  $m$  che collega la coppia di nodi centroidi  $od$  ( $k \in I_{odm}$ ) può essere ottenuto come prodotto del flusso di domanda sul modo  $m$ ,  $d_{od}(m)$ , per la probabilità di scelta del percorso:

$$F_k = d_{od}(m) p(k/\text{mod}) \quad (1)$$

Si osservi che la probabilità di scelta del percorso  $p(k/\text{mod})$  è stata assunta indipendente dal motivo  $s$  sia per semplicità di notazione sia perché nella pratica questa ipotesi viene usualmente fatta. Il flusso di spostamenti  $d_{od}(m)$  è un elemento della matrice O-D relativo al modo  $m$  e, nell'ambito del modello di assegnazione, viene assunto come noto e pari alla somma dei flussi O-D per i diversi motivi:

$$d_{od}(m) = \sum_s d_{od}(m/s)$$

La espressione (1) può essere posta in una forma matriciale molto compatta introducendo alcuni nuovi simboli.

Sia  $\bar{d}_m$  il *vettore di domanda* ottenuto ordinando gli elementi della matrice O/D relativa al modo  $m$  in un vettore, a ciascuna coppia di zone (od) corrisponderà l'indice  $i$  della componente nella quale si trova  $d_{od}(m)$ .

Sia  $\bar{P}_m$  una *matrice di percentuali di scelta* di dimensioni (numero percorsi nel sotto-grafo del modo  $m$ )  $\times$  (numero coppie O-D), l'elemento  $p_{ki}^m$  è la percentuale di spostamenti fra la coppia di zone corrispondente all' $i$ -esima componente di  $\bar{d}_m$  (sia la coppia od) che utilizza il percorso  $k$ . Gli elementi  $p_{ki}^m$  sono le percentuali (probabilità) di uso del percorso  $p(k/odm)$  se  $k$  collega la coppia od, valgono invece zero se il percorso  $k$  collega una diversa coppia di centroidi.

Le probabilità di scelta del percorso  $p(k/odm)$  sono funzioni dei costi del percorso stesso  $C_k$  e dei percorsi alternativi  $C_h$  come risulta dalla formulazione del modello Logit. Si può quindi affermare che gli elementi  $p_{ki}^m$  della matrice  $\bar{P}_m$  sono funzioni dell'intero vettore dei costi di percorso  $\bar{C}_m$ <sup>2</sup>:  $p_{ki}^m(\bar{C}_m)$ .

Questo risultato può essere espresso sinteticamente dicendo che la matrice di percentuali di percorso è funzione del vettore di costi di percorso:

$$\bar{P}_m = \bar{P}_m(\bar{C}_m)$$

In definitiva il vettore dei flussi di percorso  $\bar{F}_m$  sulla rete modale  $m$  le cui componenti sono fornite dalla (1) può essere espresso come:

$$\bar{F}_m = \bar{P}_m(\bar{C}_m) \bar{d}_m \quad (2)$$

Ricordando la definizione di matrice di incidenza archi-percorsi  $\bar{A}_m$ , per la quale il vettore di flussi di arco  $\bar{f}$  è legato al vettore dei flussi di percorso dalla relazione:

$$\bar{f} = \bar{A} \bar{F}$$

si ottiene in forma matriciale:

$$\bar{f}_m = \bar{A}_m \bar{P}_m(\bar{C}_m) \bar{d}_m \quad (3)$$

---

<sup>2</sup> Il vettore flussi di percorso ha per componenti i costi associati ai diversi percorsi che collegano le coppie OD.

Le relazioni (2) e (3) consentono di associare ad una domanda origine-destinazione i vettori dei flussi di percorso e di arco in funzione dei costi sulla rete; esse costituiscono la rappresentazione formale del *modello di assegnazione ad una rete*.

Nel seguito si tralascerà di indicare il pedice “m”, il quale indica il modo di trasporto cui si fa riferimento; inoltre, nel caso generale, è da tener presente che anche la domanda di trasporto (vettore  $\bar{d}$ ) è influenzata, nelle diverse dimensioni di scelta, dai costi associati ai percorsi attrattivi per l’utente; per semplicità di trattazione si ipotizzerà che ciò non avvenga, considerando la domanda di trasporto rigida per ciò che riguarda le prime tre dimensioni di scelta (generazione, distribuzione e scelta modale).

Nella relazione (3) compare il vettore dei costi di percorso  $\bar{C}$ , il quale è legato al vettore costi di arco  $\bar{c}$ <sup>3</sup> dalla seguente relazione:

$$\bar{C} = \bar{A}^T \bar{c}$$

dove  $\bar{A}^T$  è la trasposta della matrice di incidenza archi-percorsi. La relazione (3) diventa allora:

$$\bar{f} = \bar{A} \bar{P} (\bar{A}^T \bar{c}) \bar{d}$$

Nel caso di reti congestionate, come sono quelle di trasporto privato, per le quali i costi associati agli archi dipendono dai flussi che percorrono gli archi stessi, sussiste la ulteriore relazione:

$$\bar{c} = \bar{c}(\bar{f})$$

per cui si ha:

$$\bar{f} = \bar{A} \bar{P} (\bar{A}^T \bar{c}(\bar{f})) \bar{d} \quad (4)$$

ed in modo analogo per i flussi di percorso:

$$\bar{F} = \bar{P} (\bar{C}(\bar{F})) \bar{d} \quad (5)$$

Le (4) e (5) mostrano che esiste, nel caso di reti congestionate, una dipendenza circolare tra flussi e costi: i flussi dipendono dai costi, i quali, a loro volta, dipendono dai

---

<sup>3</sup> Il vettore flussi di arco ha per componenti i costi associati ai diversi archi della rete.

flussi che i costi stessi hanno generato. Il problema che si pone è, quindi, quello di trovare il vettore di flussi di arco (o analogamente di percorso) che riproduca se stesso nella relazione (4) (o analogamente nella relazione (5)). I vettori corrispondenti all'equilibrio vengono contrassegnati con un asterisco per cui, riferendosi per semplicità ai soli flussi di arco, in situazione di equilibrio si ha:

$$\bar{f}^* = \bar{A} \bar{P} (\bar{A}^T \bar{c}(\bar{f}^*)) \bar{d} \quad (6)$$

In generale, per arrivare a calcolare il vettore  $\bar{f}^*$  dei flussi di arco all'equilibrio si utilizzano degli algoritmi risolutivi; essi effettuano una successione di assegnazioni a costi costanti (carico della rete), aggiornando ad ogni iterazione il vettore dei costi di arco. L'algoritmo si arresta quando il vettore dei costi di arco ottenuto all'iterazione  $n$  (calcolato in base al vettore dei flussi di arco ottenuto all'iterazione precedente) produce un vettore dei flussi di arco molto prossimo (in teoria uguale) a quello dell'iterazione  $n-1$ .

Ad ogni iterazione l'algoritmo effettua, quindi, una assegnazione dei flussi ai percorsi minimi; a seconda del modello di scelta del percorso utilizzato ad ogni iterazione si ottengono due tipologie di algoritmi di assegnazione all'equilibrio:

- a) *DUE (Deterministic User Equilibrium)*: algoritmo di assegnazione deterministica di equilibrio, che esegue ad ogni iterazione una assegnazione “tutto o niente” (A o N) alla rete di trasporto con i costi aggiornati in funzione dei flussi ottenuti dall'iterazione precedente.
- b) *SUE (Stochastic User Equilibrium)*: algoritmo di assegnazione stocastica di equilibrio, che esegue ad ogni iterazione una assegnazione stocastica (carico stocastico della rete SNL) come nel caso precedente; il modello stocastico alla base delle assegnazioni SNL può essere sia un modello Logit che un modello Probit.

In entrambi i casi ad ogni iterazione, come detto, è necessario effettuare una assegnazione dei flussi alla rete di trasporto; il nucleo di tutti gli algoritmi di assegnazione, stocastica o deterministica, è costituito dalla ricerca dei percorsi di costo minimo tra tutte le coppie di nodi O-D della rete.

L'utilizzo di algoritmi di ricerca dei percorsi minimi è dettato dalla necessità di evitare la enumerazione di tutti i minimi percorsi (ed il calcolo dei relativi costi) che collegano ogni coppia O-D: ciò, infatti, sarebbe eccessivamente oneroso per reti di dimensioni reali.

Gli algoritmi più utilizzati consentono di calcolare gli *alberi di minimo costo*<sup>4</sup> con radice in ciascun nodo origine; da questi è possibile ricavare il percorso minimo che collega ogni nodo destinazione al nodo radice. Tali algoritmi partono da un albero iniziale ottenuto collegando il nodo radice a tutti gli altri nodi della rete con un arco di costo

<sup>4</sup> Si definisce albero di radice  $i$  un sottografo del grafo dato in cui esiste, per ogni nodo  $j$ , un unico percorso che colleghi  $i$  a  $j$ . L'albero di costo minimo è quello in cui i percorsi che collegano la radice  $i$  ai nodi  $j$  sono i percorsi di minimo costo sulla rete.

infinito e migliorano, ad ogni iterazione, l'albero corrente fino a giungere a quello di costo minimo.

Sulla ricerca dei minimi percorsi si fondano gli algoritmi di assegnazione deterministica (tutto o niente) e stocastica (SNL).

L'assegnazione "tutto o niente" o "A o N" dall'inglese "*All or Nothing*" assegna tutta la domanda relativa ad una coppia OD ( $d_{od}$ ) al percorso minimo che collega la suddetta coppia.

I flussi di arco possono quindi essere calcolati "caricando" la domanda  $d_{od}$  su tutti gli archi del percorso minimo che la collega e sommando su tutte le coppie O-D:

$$f_{ij} = \sum_o d \sum_h a_{(ij)h} p_{h,o} d_{od}$$

dove  $a_{(ij)h}$  è l'elemento della matrice d'incidenza archi-percorsi che vale 1 se il ramo (ij) appartiene al percorso h, zero altrimenti;  $p_{h,o}$  è l'elemento della matrice di probabilità di scelta del percorso che vale 1 se h è il percorso di minimo costo fra O e D, zero altrimenti.

L'assegnazione stocastica dei flussi alle reti di trasporto si basa sul concetto che ogni utente associa un costo percepito ad ogni percorso che collega la sua coppia O-D; ogni percorso ha, quindi, una probabilità positiva di essere scelto. I modelli stocastici di carico della rete o SNL dall'inglese "*Stochastic Network Loading*" in teoria dovrebbero calcolare i flussi di arco utilizzando le probabilità di scelta dei percorsi alternativi; ciò nella pratica non è fattibile, anche nel caso in cui tali probabilità siano esprimibili in forma chiusa (modello Logit), perché sarebbe necessario elencare esplicitamente tutti i percorsi congiungenti ciascuna coppia O-D.

Per evitare l'elencazione dei percorsi si utilizzano degli algoritmi basati sui modelli Logit (algoritmo di Dial) e Probit (algoritmo Monte Carlo), per i quali rimandiamo a testi specialistici (ad es. [2.5]).

## 2.4) La modellizzazione della scelta del percorso e calcolo dei flussi su una rete di trasporto pubblico urbano.

I modelli di scelta del percorso costituiscono, come visto, il nucleo centrale delle procedure di assegnazione degli spostamenti alle reti di trasporto. Nel caso delle reti per il trasporto privato, nell'ambito di uno schema di comportamento razionale, si ipotizza che l'utente scelga tra i vari percorsi a sua disposizione quello che lui ritiene di costo minimo, e segua il percorso scelto durante il viaggio indipendentemente dalle situazioni incontrate durante il tragitto.

Nel caso delle reti urbane di trasporto pubblico il comportamento dell'utente è alquanto diverso dato che, per il particolare tipo di servizio offerto, egli effettua le sue scelte anche a seconda delle situazioni che incontra durante il tragitto, ad es. alle fermate. Infatti, il servizio di trasporto pubblico non offre un servizio *continuo e contemporaneo* come quello offerto dal servizio privato; i modelli di assegnazione sviluppati per una rete di trasporto privato non sono quindi trasferibili ad una rete di trasporto pubblico ma è necessario formulare dei modelli specifici.

### 2.4.1) Schema generale di comportamento degli utenti.

Si ipotizza che l'utente di un sistema di trasporto pubblico, per effettuare la scelta del percorso da seguire, effettua una serie di scelte di diverso tipo, alcune prima altre durante lo spostamento stesso.

I tipi di scelta che l'utente può effettuare sono le seguenti:

- 1) scelta di tipo **preventivo** o **consuntivo**: è ogni scelta che utilizza prima di iniziare lo spostamento le informazioni disponibili relative ai diversi percorsi, ad es. tutte le informazioni ricavate da precedenti viaggi;
- 2) scelta di tipo **adattivo**: è ogni scelta che, oltre alle informazioni di cui sopra, tiene conto (*adattandosi*) anche delle situazioni contingenti che si presentano durante il viaggio, come ad es. l'arrivo ad una fermata di un autobus prima di un altro.

Esaminiamo come l'utente effettua queste scelte. Si indichi con "r" l'origine e "s" la destinazione dello spostamento; sia  $I_r$  l'insieme di tutti i percorsi alternativi che consentono di spostarsi tra i due punti usando il mezzo pubblico.

Lo schema generale ipotizza che il percorso effettivamente seguito dall'utente sia il risultato di una serie di scelte di entrambi i tipi; più precisamente si assume che l'utente prima di iniziare lo spostamento scelga in modo *preventivo* un sottoinsieme di percorsi  $I_r^c$  (denominato insieme dei percorsi *attrattivi* per l'utente) incluso in  $I_r$ , e successivamente scelga tra essi in modo *adattivo* l'effettivo percorso seguito. Poiché la scelta adattiva è influenzata da situazioni casuali cui l'utente si adegua, il percorso seguito in un

particolare spostamento è, in generale, una “variabile aleatoria”, cioè il modello proposto è di tipo probabilistico qualunque sia il modello di scelta consuntiva adottato.

Si assume, in genere, che l’arrivo degli utenti alla prima fermata del percorso sia casuale, ipotesi questa pienamente accettabile quando il distanziamento medio (cumulato) delle linee utili è inferiore ai 12-15 minuti.

Indichiamo con  $I_{rs}^c$  il sottoinsieme di percorsi, scelto in modo consuntivo dall’utente, che collega l’origine “r” alla destinazione “s”; si suppone che nelle scelte adattive vengono considerati solo fattori aleatori relativi all’arrivo dei veicoli alle fermate, cioè che tali scelte riguardino solo se salire o meno su una linea che appartiene all’insieme  $I_{rs}^c$ ; ciò implica che non possono far parte dell’insieme  $I_{rs}^c$  percorsi che richiedono scelte di tipo preventivo, per cui fanno parte dello stesso insieme di percorsi solo quelli che hanno in comune la prima fermata e che, in caso di trasbordo, non comportano scelte del tipo “rimanere alla stessa fermata di discesa o recarsi ad un’altra fermata”, ovvero “rimanere sull’autobus o scendere ad una fermata per prendere l’autobus di un’altra linea”: scelte di questo tipo sarebbero infatti preventive e non adattive.

I sottomodelli di scelta di tipo adattivo possono essere di due tipi:

- a) All’arrivo di un veicolo di una linea compresa nell’insieme scelto l’utente sale sul veicolo se il “costo percepito” del viaggio connesso all’utilizzo di quella linea è inferiore al costo del viaggio, comprensivo dell’attesa, conseguente all’uso delle altre linee, i cui veicoli non sono ancora giunti alle fermate; tale comportamento è del tipo **“confronto dei costi”**.
- b) L’utente sale sul primo veicolo che arriva alla fermata tra tutti i veicoli delle linee facenti parte dell’insieme scelto; tale comportamento è del tipo **“indifferente”**.

Nella realtà vi saranno alcuni utenti che usano la regola a) ed altri che usano quella b); si può però ritenere che prevale il *confronto dei costi* quando il servizio è più regolare, mentre prevale una scelta di tipo *indifferente* quando il servizio non è regolare.

Anche per quanto riguarda la scelta *preventiva*, in base alla quale l’utente sceglie l’insieme  $I_{rs}^c$ , possiamo ipotizzare due comportamenti di tipo diverso:

- A) Comportamento **“compensatorio”**: l’utente sceglie tra tutti i percorsi alternativi a sua disposizione compensando eventuali elevati valori di *disutilità* (svantaggi) connessi con un attributo di un percorso con degli opportuni valori di altri attributi che compensino i precedenti. Così ad es. un elevato tempo medio di attesa può essere “compensato” da un basso tempo di viaggio.
- B) Comportamento **“non compensatorio”**: l’utente non considera tutti i percorsi alternativi a sua disposizione, ma scarta quelli che presentano valori di *disutilità* superiori ad un certo limite a prescindere dai valori degli altri attributi: ad es. l’utente può scartare quelle alternative che richiedono percorsi a piedi che superano una certa soglia, indipendentemente dal valore di altri attributi, quali il tempo di viaggio. In questo caso gli attributi non sono compensabili tra loro e, quindi, se eccedono determinati valori funzionano da vincoli.

Nello schema generale in esame, nel caso di scelta preventiva di tipo compensatorio, l'utente considera tutti gli insiemi che possono essere ottenuti combinando i percorsi che congiungono l'origine con la destinazione, associa ad ogni insieme un costo percepito (dipendente dalla regola adattiva utilizzata e dalle caratteristiche del servizio), scegliendo l'insieme di percorsi di costo minimo.

Nel caso invece di scelta preventiva di tipo non compensatorio, l'utente raggruppa i percorsi disponibili in insiemi omogenei dal punto di vista di uno o più attributi e sceglie in modo compensatorio tra i diversi sottoinsiemi quello di costo percepito minimo; in questo caso vengono scartati a priori tutti i percorsi che presentano valori di *disutilità* superiori a dei limiti fissati. Ad es. l'utente può effettuare il raggruppamento dei percorsi per ranghi di distanza da percorrere a piedi, di tempo di attesa, di tempi a bordo e di numero di interscambi da effettuare; il comportamento è non compensatorio in quanto non tutte le possibili combinazioni di percorsi sono disponibili come alternative di scelta.

Riepilogando possiamo dire che l'utente sceglie in modo preventivo (compensatorio o non compensatorio) un sottoinsieme di percorsi che lui reputa di costo minimo; tra questi egli sceglie in modo adattivo (indifferente o con confronto dei costi) il percorso da seguire. Bisogna però dire che, affinché sia assegnato un costo ad ogni sottoinsieme di percorsi, è necessario scegliere preventivamente il modello di scelta adattiva previsto.

#### **2.4.2) Formulazione di un modello di scelta.**

In questo paragrafo lo schema di *scelta del percorso* descritto precedentemente viene espresso in termini formali. Per prima cosa ad ogni insieme di percorsi si associa un particolare sottografo del grafo dell'intera rete detto "**ipercammino**". L'utente sceglierà (in modo preventivo) tra tutti gli ipercammini a sua disposizione quello di minimo costo percepito; tra i percorsi facenti parte dell'insieme rappresentato dall'ipercammino di costo minimo sceglie (in modo adattivo) l'effettivo percorso seguito. Le proprietà dell'ipercammino, che dipendono dal modello di scelta adattivo ipotizzato e dal tipo di servizio offerto, verranno particolarizzate a diverse combinazioni dei due fattori.

Successivamente si analizza il sub-modello di scelta preventiva ed in particolare si fa riferimento a modelli di utilità casuale per la scelta fra le alternative (ipercammini) disponibili.

#### **2.4.3) Definizione di ipercammino.**

Un sistema di trasporto pubblico urbano, come già accennato, viene schematizzato mediante un grafo multimodale costituito da nodi origine e destinazione, da archi pedonali, nodi ed archi di linea, nodi ed archi di salita e di discesa; più precisamente

ciascuna linea è rappresentata da una sequenza di archi e ciascuna fermata da un sottografo nel quale ogni linea è connessa ad un nodo artificiale (detto nodo fermata) tramite un arco di salita ed uno di discesa; i nodi fermata sono connessi tra di loro e con i centroidi di zona tramite archi della rete pedonale. (vedi fig. 2.6).

**FIG. 2.6**

[2.5]

Sia  $G=(N,R)$  il grafo in questione, con “ $N$ ” insieme dei nodi ed “ $R$ ” insieme dei rami; ciascuna linea abbia una frequenza fissa associata all’arco di salita e a ciascun arco sia associato un costo generalizzato connesso all’uso dell’arco stesso: per semplicità si suppone che il costo associato all’arco sia indipendente dal flusso su di esso presente.

Data una coppia di centroidi “ $r$ ” ed “ $s$ ”, è possibile associare all’insieme di percorsi  $I_{rs}^c$ , all’interno dei quali l’utente applica una regola adattiva, un sottografo con delle particolari caratteristiche: tale sottografo è detto *ipercammino*, e lo si indichi con  $H(X,E)$ , con  $X \subseteq N$  ed  $E \subseteq R$ .

Si definisce tale sottografo  $H$  “ipercammino” connettente  $r$  ed  $s$  quando sono soddisfatte le seguenti proprietà:

- a)  $H$  è aciclico ed i nodi  $r$  ed  $s$  appartengono a  $X$ ;
- b) il nodo  $r$  non ha predecessori ed  $s$  non ha successori o equivalentemente il nodo  $r$  non ha archi in ingresso ed il nodo  $s$  non ha archi in uscita;
- c) per ogni nodo “ $i$ ” appartenente ad  $X-(r,s)$  c’è un percorso da  $r$  ad  $s$  passante per “ $i$ ”; ciò equivale a dire che ogni nodo “ $i$ ” ha almeno un predecessore e almeno un successore;
- d) tutti i percorsi hanno lo stesso primo nodo fermata, che indichiamo con  $f1$ ; esso ha la proprietà di essere raggiungibile dal centroide  $r$  esclusivamente tramite un percorso pedonale;
- e) non può esistere un nodo di linea che ha in uscita contemporaneamente un arco di linea ed un arco di discesa; ciò vuol dire che ogni nodo di linea ha un solo successore, che può essere o un altro nodo di linea o un nodo di fermata;
- f) non può esistere un nodo fermata che ha in uscita contemporaneamente un arco di salita ed un arco pedonale.

In fig. 2.7 è riportato un esempio di ipercammino.

Dalle condizioni “d” ed “f” scaturisce che, ad eccezione dei nodi fermata, ogni altro nodo dell’ipercammino ha solo un arco in uscita. Le condizioni “d”, “e”, ed “f” derivano dalla caratteristica che le scelte effettuate dall’utente all’interno dell’ipercammino possono essere solo di tipo adattivo: pertanto all’interno di un ipercammino non vi sono percorsi alternativi che hanno un diverso primo nodo fermata, né vengono consentite altre scelte di tipo preventivo quali “scendere dall’autobus o continuare a bordo”, oppure “attendere l’autobus ad una fermata o recarsi ad un’altra fermata”. Infine non è possibile porsi una alternativa di scelta tra percorsi pedonali.

**FIG. 2.7**

Data una coppia di centroidi  $(r,s)$ , esistono numerosi ipercammini connettenti la suddetta coppia di nodi; tra essi l'utente sceglierà quello di minimo costo percepito. Per poter definire un modello di scelta tra ipercammini che consenta di ricavare quello di minimo costo è necessario attribuire un costo ad ogni ipercammino connettente  $r$  ed  $s$ .

Per fare ciò andiamo ad attribuire agli archi di un ipercammino delle probabilità di essere percorsi, che dipendono dal tipo di comportamento adattivo (indifferente o con confronto dei costi) e dalle caratteristiche del servizio (arrivi casuali o arrivi puntuali). Indichiamo con  $P_{ij}$  la probabilità che un utente usi l'arco  $(i,j)$  una volta arrivato al nodo "i".

Va osservato che in generale la probabilità  $P_{ij}$  di utilizzare l'arco di salita  $(i,j)$  può dipendere dal percorso effettuato per raggiungere il nodo "i" ed in particolare dall'arco di salita  $(l,k)$  immediatamente precedente; la probabilità è pertanto condizionata all'uso dell'arco  $(l,k)$ : essa la indichiamo con  $P_{ij/lk}$ . Inoltre la probabilità di utilizzare un determinato arco di salita dipende dall'ipercammino in esame (H); tale dipendenza verrà in seguito indicata con  $P_{ij/lk}^H$ .

La probabilità di usare il ramo  $(i,j)$  nell'ipercammino H condizionato all'essere arrivato in "i" vale:

$$P_{ij}^H = \sum_{(l,k)} P_{ij/lk}^H \cdot P_{lk}^H$$

dove i rami  $(l,k)$  sono tutti quelli che precedono  $(i,j)$  nei percorsi che portano ad "i" in H.

Le probabilità  $P_{ij/lk}^H$  possono essere utilizzate per calcolare la probabilità di uso di ciascun percorso che fa parte dell'ipercammino  $H$ ; dato ad es. il percorso “ $q$ ” individuato dai rami di salita  $(f_1, n)$ ,  $(l, k)$  e  $(g, h)$ :

$$q = \{(f_1, n), (l, k), (g, h)\}$$

con  $(f_1, n)$  arco di salita del primo nodo fermata  $f_1$ , la probabilità  $P_q^H$  di utilizzare tale percorso vale:

$$P_q^H = P_{gh/lk} \cdot P_{lk/f_1n} \cdot P_{f_1n}$$

Vediamo adesso come si calcola la probabilità  $P_{ij}$  nei diversi casi:

1) *ARRIVI CASUALI*. Nel caso di arrivo dei veicoli di tipo *casuale* la probabilità  $P_{ij/lk}$  non dipende dal ramo  $(l, k)$ , in quanto non c'è alcuna correlazione tra linee diverse; si ha quindi che: nel caso di comportamento adattivo di tipo *indifferente* si ha:

$$P_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_j f_{ij}}$$

dove  $f_{ij}$  è la frequenza della linea associata all'arco di salita  $(i, j)$ , e la sommatoria è estesa a tutti gli archi di salita con nodo origine “ $i$ ”.

Nel caso invece di scelte adattive del tipo *confronto dei costi*, detti  $C_m$  il minimo dei costi generalizzati medi ( $C_j$ ) del tempo di viaggio sulla linea associata al  $j$ -esimo ramo di salita, e  $C_{mw}$  il costo generalizzato medio del tempo di attesa della linea cui corrisponde  $C_m$ , la probabilità di servirsi del ramo  $(i, j)$  è data da:

$$P_{ij} = 0 \quad \text{se } C_j > C_{mw} + C_m$$

mentre per i rimanenti archi di salita si ha:

$$P_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_j f_{ij}}$$

dove la sommatoria è estesa a tutti gli archi per i quali:

$$C_j \leq C_{mw} + C_m$$

2) *ARRIVI PUNTUALI*. Nel caso di arrivi puntuali va osservato che, una volta che l'utente ha scelto la linea alla prima fermata, risulta univocamente determinato l'istante di arrivo alla fermata successiva e, quindi, ne scaturisce automaticamente la seconda linea usata: essa sarà la prima programmata dopo l'istante di arrivo se la scelta adattiva è di tipo “*indifferente*”; sarà quella che minimizza il costo globale di viaggio per un comportamento adattivo del tipo “*confronto dei costi*”.

Risulterà pertanto  $P_{ij/lk} = 0$  per quegli archi di salita  $(i,j)$  per i quali l'arco precedente  $(l,k)$  non è concepibile come ramo dello stesso percorso, mentre  $P_{ij/lk} = 0$  per il ramo  $(i,j)$  di salita compatibile con il ramo  $(l,k)$ . Pertanto l'ipercammino si decompone in un insieme di cammini individuati automaticamente dal primo ramo di salita e per ciascuno di tali cammini la probabilità  $P_q$  di essere usato vale:

$$P_q = P_{f_1, n}$$

dove  $P_{f_1, n}$  è la probabilità di uso del primo arco di salita del percorso; essa può essere facilmente calcolata conoscendo l'orario programmato.

#### 2.4.4) I modelli di scelta tra ipercammini.

Si può definire costo generalizzato  $C^H$  di un ipercammino  $H$  la media nel tempo dei costi sopportati da un utente che utilizza quell'ipercammino ripetutamente; pertanto, se  $C_q^H$  è il costo relativo al generico cammino  $q$  dell'ipercammino  $H$  e  $p_q^H$  è la probabilità di uso di quel percorso, si ha:

$$C^H = \sum_{q \in H} p_q^H \cdot C_q^H$$

Si ricordi che:  $\sum_q p_q^H = 1$

Il costo medio di ciascun ipercammino così calcolato può essere utilizzato come base per il modello di scelta consuntiva tra ipercammini.

Se si utilizza un modello di “utilità casuale”, le ipotesi che si fanno sono analoghe a quelle viste per il trasporto private:

- ciascun utente associa a ciascun ipercammino  $H$  un costo percepito  $C^{\wedge H}$ ;

- il costo percepito è una variabile aleatoria che varia fra gli utenti della popolazione e, per lo stesso utente, nel tempo con media pari al costo medio oggettivo, cioè:

$$\hat{C}^H = C^H + \varepsilon_H \quad \text{con} \quad E[\varepsilon_H] = 0$$

dove  $\varepsilon_H$  è l'errore di percezione;

- ciascun utente sceglie tra gli ipercammini alternativi quello di minimo costo percepito. Per cui la probabilità che un utente scelga l'ipercammino H vale:

$$P_H = \text{Prob}\left(\hat{C}^H < \hat{C}^K\right) \quad \forall K \neq H$$

cioè:

$$P_H = \text{Prob}(C^H - C^K < \varepsilon_K - \varepsilon_H) \quad \forall K \neq H$$

Diversi modelli di scelta derivano dalle ipotesi fatte sulla distribuzione dell'errore di percezione. Come caso limite si può assumere che tale errore sia nullo; si ottiene così un modello di scelta *deterministico* fra ipercammini.

Se invece si assume che l'errore di percezione sia diverso da zero, la probabilità  $P_H$  dipende dalla legge di distribuzione congiunta di tali errori.

Se gli errori di percezione si considerano indipendentemente ed identicamente secondo una legge di Weibull/Gumble (WG) si ottiene, analogamente a come avviene per il trasporto privato, il *modello Logit multinomiale*:

$$P_H = \frac{\exp(-\alpha C^H)}{\sum_{K=1}^m \exp(-\alpha C^K)}$$

dove  $K=1,2,\dots,m$  sono gli ipercammini che fanno parte dell'insieme di scelta dell'utente.

Nonostante i limiti teorici questo modello è largamente usato soprattutto per la sua trattabilità analitica.

Dall'ipotesi che gli errori di percezione siano distribuiti secondo una *normale multivariata* deriva il modello *Probit*. Sebbene teoricamente più soddisfacente, il modello Probit non consente di calcolare in forma chiusa le probabilità di scelta degli ipercammini

quando il numero di alternative è maggiore di due, per cui, per la sua applicazione, si deve ricorrere a metodi numerici.

#### **2.4.5) L'utilizzazione dei modelli di scelta nelle procedure di assegnazione.**

La utilizzazione dei modelli di scelta considerati, all'interno di una procedura di assegnazione della domanda alle reti di trasporto pubblico di dimensioni realistiche, impone ovviamente delle condizioni di trattabilità computazionale.

I modelli di assegnazione proposti in letteratura utilizzano sub-modelli di scelta adattiva del tipo "indifferente", congiuntamente all'ipotesi di servizio con "arrivi casuali". Le suddette ipotesi consentono, come si è visto, di calcolare le probabilità  $P_{ij}$  e i costi  $C_{ij}$  in termini "locali" e sono disponibili degli algoritmi efficienti per il calcolo degli ipercammini minimi che non richiedono la enumerazione dei percorsi. L'adattamento di tali algoritmi a modelli di scelta adattiva e/o di servizio alternativi è ancora allo stato di ricerca.

I modelli consuntivi di scelta tra ipercammini che sono utilizzati sono quelli di tipo compensatorio e, più in particolare, di comportamento razionale con utilità deterministica o stocastica.

### 2.4.6) Il calcolo dei flussi.

Abbiamo visto come, nel caso di un modello Logit, la probabilità che l'utente scelga l'ipercammino  $H$  è data da:

$$P^H = \frac{\exp(-\alpha C^H)}{\sum_{K=1}^m \exp(-\alpha C^K)}$$

L'applicazione di questa relazione comporta la enumerazione esplicita di tutti gli ipercammini che congiungono l'origine "r" con la destinazione "s" dello spostamento, e per ognuno di essi il calcolo del costo generalizzato.

Questa operazione è proibitiva per reti di dimensioni reali; si utilizzano allora degli algoritmi che consentono di calcolare "implicitamente" le probabilità di scelta in modo efficiente.

Nel caso deterministico, che è quello che adesso andiamo ad analizzare, l'ipercammino di costo minimo ha probabilità 1 di essere scelto, mentre gli altri hanno probabilità nulla; il problema si riconduce quindi a determinare l'ipercammino di costo minimo.

La ricerca degli ipercammini di costo minimo presenta alcune analogie con quella dei percorsi di costo minimo. Per ogni nodo destinazione "s", si ricerca l'*iperalbero*  $\bar{H}_s$  di costo minimo, ossia l'iperalbero formato da tutti gli ipercammini di costo minimo che connettono "s" ai vari nodi origine del grafo del sistema di trasporto pubblico.

La determinazione di  $\bar{H}_s$  è iterativa ed in ciascuna iterazione viene migliorato un iperalbero  $H_s$  soluzione corrente. Questo miglioramento avviene secondo le condizioni stabilite dal **Teorema di Bellman generalizzato**:

*"Un iperalbero  $H_s$  coincide con  $\bar{H}_s$  se e solo se per tutti i nodi  $i \in N$  il costo  $C_i$  dell'ipercammino di origine "i" in  $H_s$  soddisfa le seguenti condizioni:*

$$\begin{cases} c_i \leq c_j + c_{ij} & \forall j \in N_i^+ \text{ se } i \notin N_B \\ c_i \leq c(F_i) & \forall F_i \subseteq N_i^+ \text{ se } i \in N_B \\ c_s = 0 \end{cases}$$

( $N$  è l'insieme dei nodi;  $N_B$  è l'insieme dei nodi di salita;  $N_i^+$  è l'insieme dei nodi estremi della stella di archi entrante nel nodo "i";  $F_i$  è l'insieme dei nodi estremi della stella di archi che nell'ipercammino da "i" verso "s" si diparte dal nodo "i" stesso).

Un iperalbero di radice “s” è individuato indicando: per ogni nodo “i” non di salita, il nodo “j” che lo segue lungo l’ipercammino che da “i” porta alla destinazione “s”; se invece “i” è nodo di salita, indicando l’insieme  $F_i$  composto dai nodi estremi della stella di archi che nell’ipercammino da “i” verso “s” si diparte dal nodo “i” stesso.

Per il calcolo dell’iperalbero di costo minimo  $\overline{H}_s$  si impiega l’algoritmo di **Dijkstra** generalizzato. All’inizio di ogni passo del procedimento è noto un iperalbero  $H_s$ ; nel passo iterativo viene preso in esame un nodo  $j$  e verificato se i nodi estremi della stella di archi convergente in  $j$  soddisfano le condizioni del Teorema di Bellman generalizzato. Se ciò non avviene si migliora  $H_s$  correggendo il costo dei nodi in esame e questi entrano in un vettore serbatoio per essere successivamente esaminati. Si procede così finché non è più possibile ottenere miglioramenti della soluzione corrente: a questo punto  $H_s \equiv \overline{H}_s$  ed il procedimento termina. E’ opportuno seguire ciascun nodo nei passi del procedimento attraverso un indice che ne individua la condizione: ad esempio, 0 se il costo è quello iniziale, 2 se il nodo è nel serbatoio, 1 se il nodo è stato estratto e perciò il suo costo è definitivo.

Più in dettaglio, la matrice a quattro colonne che segue passo per passo l’avanzamento della procedura algoritmica ha tante righe quanti sono i nodi del grafo. Nelle prime tre colonne si riportano, alla riga  $i$ -esima, gli elementi relativi al nodo  $i$ . Nella prima colonna si riporta il costo dell’ipercammino sino a quel punto individuato. Nella seconda colonna c’è il numero indice caratterizzante lo stato del nodo (0,1 o 2). Nella terza colonna, se “i” non è di salita si legge il nodo che segue “i” nell’ipercammino fino a quel passo determinato; se invece “i” è nodo di salita si trova un numero indice (es.:888) che rimanda alla lettura dei nodi di  $F_i$  mediante due opportuni vettori, che diciamo IP e IV. Nel vettore IV si trovano in blocchi successivi i nodi dei vari  $F_i$ ; IP ha tante componenti quanti sono i nodi di salita ed esse sono i numeri corrispondenti alle posizioni occupate in IV dagli ultimi nodi dei successivi blocchi. La quarta colonna è il serbatoio ed i nodi che vi figurano sono ordinati in ordine crescente di costo rispetto al nodo destinazione “s”.

Il procedimento sarà illustrato in appendice con un esempio.

Una volta noti gli ipercammini di costo minimo si può effettuare l’assegnazione della domanda di trasporto agli archi che compongono gli ipercammini stessi.

Il procedimento di assegnazione prende in esame un iperalbero  $\overline{H}_s$  per volta ripartendovi tutta la domanda destinata al nodo destinazione “s”. In altre parole, di volta in volta si assegna una colonna (quella relativa al nodo “s” in esame) della matrice di domanda. Infine, il flusso su ognuno degli archi della rete è dato dalla somma dei relativi flussi trovati nell’esame di ciascun nodo destinazione della rete, ossia dei rispettivi iperalberi di minimo costo. Per ogni nodo destinazione “s” della rete, l’algoritmo di assegnazione ad  $\overline{H}_s$  si articola quindi secondo i seguenti passi:

- *passo 1)* Si ordinano tutti i nodi del grafo in ordine decrescente di costo rispetto alla destinazione in esame;
  - *passo 2)* Si estrae il primo nodo dell'ordinamento fatto al passo 1);
  - *passo 3)* Si calcola il flusso che attraversa il nodo estratto: esso è dato dalla somma dei flussi sugli archi entranti nel nodo più l'eventuale aliquota di domanda in origine dal nodo stesso e diretta al nodo "s". Se durante l'operazione di somma non risulta ancora noto il flusso su qualcuno degli archi entranti allora tale flusso è nullo. Ciò discende dal modo adottato per l'estrazione successiva dei nodi (passo 2) che, al verificarsi della situazione anzidetta, implica la non soddisfazione delle proprietà degli ipercammini di costo minimo;
  - *passo 4)* Si ripartisce il flusso sugli archi uscenti dal nodo estratto: se il nodo non è di salita si ha un solo arco uscente su cui va tutto il flusso; se il nodo è di salita il flusso va ripartito secondo il coefficiente  $\varphi_{ij} / \Phi_i$  di ciascun arco di salita  $(i,j)$  uscente;  $\varphi_{ij}$  è la frequenza associata all'arco  $(i,j)$ , mentre  $\Phi_i$  è la somma delle frequenze degli archi con origine "i";
  - *passo 5)* Se non vi sono più nodi da esaminare, *stop* e si passa ad una nuova destinazione altrimenti si va al passo 2).
- Anche per la procedura di assegnazione dei flussi sarà illustrato un esempio, riportato in appendice.

### 3) Un modello di simulazione delle scelte di sosta.

La domanda di sosta che si ha in una certa zona ed in un certo intervallo di tempo può essere presa pari al numero totale di spostamenti effettuati su mezzo privato che, nello stesso periodo di tempo, hanno per destinazione la zona in questione.

Nota la matrice O/D, riferita a quell'intervallo di tempo e al modo di trasporto auto, è sufficiente sommare tutti gli elementi  $d_{ij}$  della  $j$ -esima colonna per ottenere la domanda  $D_j$  che ha per destinazione la zona  $j$ ; essa può essere presa coincidente con la domanda di sosta nella zona  $j$ .

Un approccio di questo tipo è, però, alquanto approssimato, dato che non tiene conto dell'influenza che il costo generalizzato associato alla sosta può avere nel determinare la scelta del modo di trasporto o la distribuzione degli spostamenti.

La matrice O/D, soprattutto per quanto riguarda la scelta modale, dovrebbe essere costruita tenendo conto anche del costo generalizzato della sosta (tempo per trovare un parcheggio, eventuale tariffa da pagare, tratto a piedi da compiere per raggiungere la destinazione dello spostamento etc.) che, se elevato, può far spostare su altri modi di trasporto una aliquota della domanda.

Inoltre, anche in questo caso si deve risolvere un problema di equilibrio, dato che il costo generalizzato della sosta è influenzato dalla domanda di sosta (maggiore è la domanda di sosta, minore è la probabilità di trovare un sito dove parcheggiare e maggiore è il tempo e, quindi, il costo generalizzato della sosta), la quale è a sua volta influenzata dal costo.

Nota la domanda di sosta, si vuole specificare un modello di scelta di sosta che ripartisca la suddetta domanda tra le diverse alternative a disposizione dell'utente nelle varie zone; in ciò si deve tener conto che un utente destinato in una zona può parcheggiare il veicolo in una zona adiacente.

In primo luogo devono essere definite le alternative elementari di sosta a disposizione dell'utente; una alternativa elementare di sosta viene definita come la dotazione complessiva di sosta (numero di stalli) di una determinata tipologia (libera, a pagamento, disco orario, vietata, etc.) in una data zona di traffico dell'area di intervento. L'insieme attrattivo è formato da tutte le tipologie di sosta presenti nella zona di destinazione e nelle zone a distanza non superiore ad un valore prefissato (ad es. m. 1000); è evidente che occorre scartare dall'insieme attrattivo dell'utente tipologie di sosta afferenti a zone separate da notevoli discontinuità fisiche.

Per simulare le scelte di sosta possono essere utilizzati modelli di utilità casuale (Logit o Probit), in grado di simulare sotto determinate ipotesi il comportamento dell'utente. In base a questi modelli ogni utente associa a ciascuna alternativa di sosta del suo insieme di scelta un costo (utilità negativa) percepito; il costo percepito varia, in generale, da utente

ad utente, per cui risulta essere una variabile aleatoria; ogni utente sceglie l'alternativa di minimo costo percepito.

La variabile aleatoria costo percepito per l'alternativa  $k$ ,  $\hat{C}_k$ , può essere espresso come somma della sua media,  $C_k$ , e del residuo aleatorio  $\varepsilon_k$ :

$$\hat{C}_k = C_k + \varepsilon_k$$

Se si ipotizza che i residui aleatori siano distribuiti identicamente ed indipendentemente secondo la legge di Weibull/Gumble (WG) si ottiene il modello Logit Multinomiale:

$$p(k / o d m_{\text{auto}} s) = \frac{\exp(-\alpha C_k)}{\sum_{h \in I_d} \exp(-\alpha C_h)}$$

dove  $\alpha$  è il parametro della WG e  $I_d$  è l'insieme attrattivo connesso alla zona di destinazione  $d$ . Si nota che la probabilità di scelta dell'alternativa di sosta è condizionata dalla destinazione  $d$ , dall'aver scelto il modo di trasporto auto e dallo scopo  $s$ ; la dipendenza dallo scopo  $s$  non è indispensabile, ma dovrebbe essere sempre considerata, effettuando quindi un'analisi per categoria, dato che, la maggior parte degli utenti possono valutare in modo diverso alcuni attributi dell'alternativa al variare dello scopo dello spostamento<sup>1</sup>.

Il costo generalizzato è una combinazione lineare secondo dei parametri  $\beta$  degli attributi delle possibili alternative di sosta:

$$C_k = \sum_s \beta_s \cdot X_{sk}$$

Gli attributi  $X_{sk}$  utilizzabili nel modello di scelta di sosta possono essere esplicitati come di seguito:

- SP = soddisfazione negativa connessa alle scelte di percorso effettuate in precedenza dall'utente; può essere posto pari a 0 se si vuole trascurare la sua influenza sulla scelta dell'alternativa di sosta oppure pari al costo connesso al minimo percorso che collega la coppia OD.
- dped = distanza da percorrere a piedi per la destinazione finale, espressa in m.

---

<sup>1</sup> Un utente è in genere disposto a pagare una tariffa di sosta maggiore se lo spostamento è per motivi di svago o comunque occasionale rispetto agli spostamenti casa-lavoro.

- $TAR^i = (Td^i - 1)_s \text{ tar\_h} + \text{tar\_1}$ , se  $Td^i$  è maggiore di un'ora;  
 $= \text{tar\_1}$  se  $Td^i$  è minore di un'ora.  
 dove  $Td^i$  è la durata desiderata della sosta al termine dello spostamento (espressa in ore) per gli utenti del segmento di domanda  $i$  (la differenza  $Td^i - 1$  è approssimata all'intero superiore),  $\text{tar\_h}$  è la tariffa di sosta per ogni ora successiva alla prima, espressa in lire/ora,  $\text{tar\_1}$  è la tariffa oraria per la prima ora di sosta, espressa in lire.
- $MUL^i = (Td^i - T_{max}) \times Multa \times r$ , se  $Td^i$  è maggiore di  $T_{max}$   
 $= 0$  se  $Td^i$  è minore od eguale a  $T_{max}$   
 dove  $Td^i$  è la durata desiderata della sosta al termine dello spostamento (espressa in ore) per gli utenti del segmento di domanda  $i$ ,  $T_{max}$  è la durata massima, in ore, della sosta consentita,  $Multa$  è il valore della contravvenzione in caso di durata della sosta eccedente la massima consentita ed  $r$  è la probabilità di incorrere in contravvenzione per durate di sosta maggiori della massima consentita, espressa in prob./ora.
- $TR(F) = 30 \cdot \left[ \frac{2 \cdot n\_park + 2 - occ(F)}{n\_park + 1 - occ(F)} \right]$  se  $occ(F) \leq n\_park - 1$   
 $= 52.5 + 15 n\_park + 7.5 occ(F) [n\_park + 1] - 7.5 n\_park^2$  altrimenti  
 dove si è indicato con  $n\_park$  la capienza dell'infrastruttura di sosta e con  $occ(F)$  l'occupazione della stessa. Dove  $F$  indica formalmente i flussi rappresentativi delle scelte si sosta.

La dipendenza del costo  $TR$  dai flussi rappresentativi delle scelte di sosta determina un “problema di equilibrio” nelle scelte di sosta. I costi sistematici associati alle alternative dipendono infatti, in questo caso, dal valore dei flussi rappresentativi delle scelte. D'altra parte le scelte effettuate dagli utenti dipendono dai costi percepiti, di cui il costo sistematico è la media, e quindi i flussi rappresentativi delle scelte si autodeterminano, inducendo un problema di equilibrio, detto anche “problema di punto fisso”.

È possibile dimostrare in sede di analisi teorica che l'utilizzo di un modello di utilità casuale e l'utilizzo di costi quali quelli precedentemente descritti assicurano le proprietà matematiche di esistenza ed unicità dell'equilibrio.

#### 4) Metodologie di stima della domanda.

In questo paragrafo si affrontano le problematiche relative alle metodologie di stima della domanda di trasporto; si forniscono, pertanto, delle nozioni sulla teoria del campionamento che consente di estendere all'universo le informazioni ottenute per un campione limitato di elementi estratti a caso da esso.

Si effettuano, poi, delle considerazioni sulle stime ottenute con i modelli di domanda e si esaminano delle metodologie che consentono di correggere le matrici O/D con i flussi di traffico rilevati su alcuni rami della rete stradale.

Infine, si tratteranno metodologie che consentono la stima della domanda di sosta.

##### 4.1) Stima diretta.

E' possibile stimare la domanda di trasporto attuale e tutte le sue caratteristiche utilizzando delle indagini campionarie, le quali, esaminando in modo diretto le caratteristiche - qualitative e quantitative - di un campione di spostamenti, siano in grado di dare delle informazioni sull'intera domanda di trasporto con una precisione più o meno accurata.

Trattando successivamente le tipologie di indagine, ci si limita ora a fornire dei cenni della teoria del campionamento, che consente di estendere i risultati dell'indagine dal campione all'universo.

Si pone spesso l'esigenza di stimare la **“media”** dei valori di un dato parametro caratterizzante gli elementi di una data popolazione (ad es.: la media del parametro “spostamenti effettuati da una persona in un giorno” riferito alla popolazione “abitanti di una certa zona”) o quella di stimare la **“frequenza”** degli elementi dotati di una certa caratteristica (ad es.: il numero di spostamenti effettuati tra le 7:00 e le 8:00 nell'insieme di tutti gli spostamenti).

La **“teoria del campionamento”** ha per obiettivo la valutazione della precisione e dell'attendibilità delle stime relative all'universo ottenute utilizzando un campione estratto secondo prefissate regole. Nello stesso tempo la teoria del campionamento indica il modo secondo cui va estratto un campione da una data popolazione per ottenere una prefissata precisione ed attendibilità.

La **“stima campionaria”** di un parametro consiste sempre in un intervallo che, con la probabilità dell'#####, comprende il valore di quel parametro. L'ampiezza dell'intervallo di stima è detta **“precisione”** della stima, mentre la probabilità ### misura il **“livello di attendibilità”** della stima.

Non è possibile quindi dall'esame degli elementi di un campione dedurre il vero valore medio del parametro o il numero esatto di elementi della popolazione che possiede

una data caratteristica, ma si ottiene un intervallo che, con la probabilità dell'##### (in genere si vuole ###=95), contiene la media vera o la frequenza vera.

La teoria del campionamento si applica ai **“campioni casuali”**, cioè a quei campioni i cui elementi sono stati estratti a caso dall'universo; la metodologia di estrazione del campione può essere diversa a seconda dello scopo del campionamento e determina diversi tipi di campioni.

Il tipo di campione più diffuso è il **“campione casuale semplice”**; in esso ogni elemento ha la stessa probabilità degli altri di essere estratto. Ad es. se i cittadini da intervistare per una indagine a domicilio sono estratti a caso dall'anagrafe del comune, con un programma di generazione di numeri casuali, il campione ottenuto è un campione casuale semplice.

Esistono altri tipi di campioni che consentono stime più precise a parità di dimensione del campione, o che sono più adatti per popolazioni che si presentano all'osservatore con aggregazioni nel loro interno tali da rendere possibile o più semplice l'estrazione degli elementi da esse.

Se la popolazione di partenza è costituita da più sottoinsiemi di elementi omogenei (rispetto al parametro da stimare) nel loro interno ma notevolmente disomogenei tra loro, conviene estrarre a caso da ogni sottoinsieme un certo numero di elementi, ottenendo così un **“campione stratificato”**. Dal campione ottenuto si possono trarre stime più precise, a parità di attendibilità e di dimensione del campione, di quelle che si otterrebbero con un campionamento semplice. Il campionamento stratificato viene frequentemente adottato nelle indagini sulla mobilità, dividendo l'universo in strati, ognuno dei quali rappresenta una categoria sociale abbastanza omogenea (studenti, casalinghe, impiegati, liberi professionisti etc.) e con diverse esigenze di mobilità; da ognuno di questi strati si estrae un numero di elementi in un rapporto reciproco che è quello dell'universo.

In alcuni casi gli elementi della popolazione si presentano suddivisi in gruppi o **“grappoli”**, ed è conveniente o necessario che il campione sia costituito da un numero di tali grappoli estratti a caso: si parla, allora, di **“campione a grappolo”**. Questo caso si presenta nelle indagini a domicilio quando conviene (dal punto di vista economico) intervistare tutte le persone che abitano in un dato edificio, estratto a caso da tutti gli edifici facenti parte dell'universo considerato.

Si ha un **“campione a due stadi”** quando, estratto a caso il grappolo, da esso si estraggono a caso gli elementi che costituiranno il campione; questo tipo di campionamento è comunissimo per le indagini a bordo di mezzi pubblici allorché, per questioni di tempo, si intervista solo una parte estratta a caso degli utenti di un determinato veicolo (grappolo), a sua volta estratto a caso.

#### 4.1.1) Stima della media di un valore.

Sia “ $N$ ” il numero di elementi dell’universo ed “ $n$ ” il numero di elementi del campione estratto da esso; indichiamo con  $y_i$  il valore assunto dalla grandezza  $Y$  per l’elemento  $i$ -esimo ed  $\bar{Y}$  il suo valor medio calcolato tra tutti gli elementi dell’universo, cioè:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}$$

La media  $\bar{y}$  e la varianza  $s^2$  relative al campione sono date da:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n - 1}$$

Il valore  $\bar{y}$  è una stima del valore vero  $\bar{Y}$  e il suo intervallo di stima è dato da:

$$\bar{y} \pm t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \sqrt{1 - \frac{n}{N}} = \bar{y} \pm d$$

La semiampiezza dell’intervallo di stima “ $d$ ” è detta “**precisione**”; la quantità  $t_{\alpha}$  è il valore della variabile normale ridotta che non è superato (in valore assoluto) nell’##### dei casi; cioè, l’intervallo di stima comprende la media vera  $\bar{Y}$  con una probabilità dell’#####.

Si ha:

|                  |                        |
|------------------|------------------------|
| $t_{\alpha} = 1$ | per $\alpha = 68 \%$   |
| $t_{\alpha} = 2$ | per $\alpha = 95,5 \%$ |
| $t_{\alpha} = 3$ | per $\alpha = 99,8 \%$ |

### è anche detto “**livello di attendibilità**”.

La precisione della stima dipende anche dalla dimensione “ $n$ ” del campione: all’aumentare di “ $n$ ” migliora la precisione. La dimensione del campione va fissata in sede di progettazione dell’indagine in modo da avere una certa precisione al livello di attendibilità ###; dall’espressione dell’intervallo di stima, detto “ $d$ ” il semi-intervallo (precisione) desiderato, si ha:

$$n = \frac{\left(\frac{t_{\alpha} \cdot s}{d}\right)^2}{1 + \frac{1}{N} \cdot \left(\frac{t_{\alpha} \cdot s}{d}\right)^2} = \frac{n_0}{1 + \frac{1}{N} \cdot n_0}$$

che consente il calcolo della dimensione del campione. Se la popolazione è molto grande rispetto la dimensione del campione (teoricamente  $N$  infinito) si ha  $n=n_0$ .

Per poter dimensionare il campione (definizione di “ $n$ ”) bisogna conoscere lo scarto quadratico medio “ $s$ ”; esso può essere desunto dall’analisi di un campione pilota di dimensioni ridotte.

#### 4.1.2) Stima della frazione di elementi della popolazione che posseggono una data caratteristica.

Se oggetto della stima è la frazione  $P$  di elementi dell’universo che posseggono una data caratteristica dall’esame del campione si desume l’analoga frazione  $p$ .

L’intervallo di stima che con la probabilità dell’##### comprende  $P$  è dato da:

$$p \pm t_{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{N-n}{N}} \cdot \sqrt{\frac{p \cdot q}{n-1}}$$

dove  $q=1-p$  e  $t_{\alpha}$ ,  $N$  ed  $n$  hanno gli stessi significati già visti.

In questo caso la precisione della stima dipende anche da  $p$ , in quanto al variare di  $p$  varia il prodotto  $p \cdot q = p(1-p)$ ; al variare di  $p$  tale prodotto passa da 0 (per  $p=0$ ) a 0##### (per  $p=0#####$ ) e ritorna a 0 per  $p$  che tende ad 1; la precisione risulta allora peggiore se la stima della frazione è prossima a 0,5.

La dimensione del campione può essere stabilita analogamente a quanto visto per la stima della media; si ottiene allora:

$$n = \frac{\frac{t_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{d^2}}{1 + \frac{1}{N} \cdot \frac{t_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{d^2}}$$

Per  $N \rightarrow \infty$  si ottiene :  $n = \frac{t_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{d^2}$

Poiché  $p \cdot q$  è massimo per  $p=0,5$ , la dimensione del campione può essere definita in via preliminare senza analizzare un campione pilota e ponendo  $p=0,5$ .

#### 4.2) Stima da modello.

Nello studio dei modelli di domanda di trasporto e precisamente per il modello a quattro stadi, si è visto che la domanda di trasporto si ottiene come prodotto del numero totale di spostamenti emessi da ciascuna zona, moltiplicato per dei modelli che forniscono la probabilità che gli spostamenti abbiano determinate caratteristiche (destinazione, modo, percorso).

Per come è definito il problema è evidente che la domanda “vera” è una variabile aleatoria, qualunque sia il numero di fattori considerati, di cui i modelli di domanda forniscono il valore medio.

Ad esempio, considerando le sole prime due dimensioni di scelta, la domanda di trasporto che per il motivo  $s$  va da  $o$  a  $d$  è data da:

$$d_{od}(s) = d_o \cdot p(d/os)$$

Il risultato così ottenuto rappresenta in realtà il valore medio della domanda di trasporto; le stime di domanda ottenute con un modello di aliquote parziali sono quindi il valore atteso di una variabile aleatoria di cui è possibile calcolare anche varianze e covarianze:

$$E[d_{od}(s)] = d_o(s) \cdot p(d/os)$$

$$\text{Var}[d_{od}(s)] = d_o(s) \cdot p(d/os) \cdot [1 - p(d/os)]$$

$$\text{Cov}[d_{od}(s), d_{od'}(s)] = - d_o(s) \cdot p(d/os) \cdot p(d'/os)$$

#### 4.3) Stima con i flussi di traffico.

I flussi di traffico misurati su alcuni archi della rete costituiscono una fonte di informazione, di semplice ed economica rilevazione, sulla domanda di trasporto; essi possono essere utilizzati, ai fini della stima della domanda di trasporto, in due modi diversi: per stimare la matrice O/D attuale relativa al sistema in esame, correggendone una esistente, ovvero per stimare i parametri di un sistema di modelli. Nel seguito ci si riferirà al primo dei due possibili utilizzi.

Bisogna a tal proposito andare ad esaminare quale relazione intercorre tra il vettore dei flussi osservati e la domanda incognita che ha generato gli stessi flussi.

In generale, come detto quando si è parlato dell'assegnazione, il flusso di domanda su un arco  $l$  della rete di trasporto è dato da:

$$f_l = \sum_k a_{lk} \sum_{od} p_{kod}(\bar{C}) d_{od}$$

dove:

$k$  indica il generico percorso che collega la coppia  $od$  (la sommatoria è estesa a tutti i percorsi che connettono la coppia  $od$ );

$a_{lk}$  è l'elemento della matrice di incidenza archi percorsi che, ricordiamo, vale 1 se l'arco  $l$  appartiene al percorso  $k$  e zero altrimenti;

$p_{kod}$  rappresenta la percentuale della domanda  $od$  che utilizza il percorso  $k$  (essa è funzione del vettore dei costi di percorso);

$d_{od}$  è la domanda  $od$  (generico elemento della matrice O/D).

Questa relazione può essere scritta, in termini matriciali e sottintendendo la dipendenza dai costi, come:

$$\bar{f} = \bar{A} \bar{P} \bar{d}$$

Se indichiamo con  $h_{lod}$  la percentuale del flusso di domanda  $od$  che usa il ramo  $l$ , possiamo scrivere:

$$f_l = \sum_{od} d_{od} h_{lod}$$

Gli elementi  $h_{lod}$  formano una matrice  $\bar{H}$  di dimensione  $n$ . di flussi rilevati  $\times$  numero di coppie  $od$  che viene detta *matrice di assegnazione*; in forma matriciale si può, allora, scrivere:

$$\bar{f} = \bar{H} \bar{d}$$

Questa relazione mostra che a parità di domanda il valore del flusso su un arco dipende dal modello di assegnazione rappresentato sinteticamente dalla matrice  $\bar{H}$ .

A causa delle approssimazioni che si fanno nelle diverse fasi che portano alla modellizzazione dei sistemi di offerta e di domanda, della aleatorietà propria del fenomeno, degli errori di misura e delle fluttuazioni temporali dei flussi, si ha che il flusso misurato sull'arco  $l$  ( $f_l^{\wedge}$ ) e quello predetto ( $f_l$ ) differiscono di una quantità  $\varepsilon_l$  non prevedibile a priori, detta *errore di assegnazione*:

$$f_l^{\wedge} = f_l + \varepsilon_l$$

cioè, in termini matriciali:

$$\bar{f}^{\wedge} = \bar{H} \bar{d} + \bar{\varepsilon}$$

avendo indicato con  $\bar{f}^{\wedge}$  il vettore dei flussi di arco misurati e con  $\bar{\varepsilon}$  il vettore dei residui aleatori.

Spesse volte, nelle pratiche applicazioni, si dispone di una matrice O/D, ottenuta ad es. da una indagine campionaria o da modelli di domanda, che risulta essere una stima della matrice O/D reale, ma che si discosta da quest'ultima in maniera significativa. Gli elementi  $d_{od}^{\wedge}$  della suddetta matrice, comunque ottenuti, si discostano da quelli veri  $d_{od}$  di una quantità incognita  $\delta_{od}$ :

$$d_{od}^{\wedge} = d_{od} + \delta_{od}$$

cioè in termini matriciali:

$$\bar{d}^{\wedge} = \bar{d} + \bar{\delta}$$

Le variabili  $\delta_{od}$  risultano essere gli errori di campionamento, se è stata effettuata una stima diretta della domanda, o gli errori derivanti dalle semplificazioni introdotte dal modello di domanda, se è stata effettuata una stima da modello.

Qualunque sia la natura della stima iniziale della domanda è possibile ottenere una stima statisticamente migliore utilizzando i flussi di traffico rilevati su alcuni rami della

rete di trasporto. Il vettore di domanda  $\bar{d}^*$  che risulta essere più prossimo al vettore di domanda vero  $\bar{d}$  si può ottenere risolvendo il seguente problema di ottimo vincolato:

$$\bar{d}^* = \arg \min \left[ \sum_{od} \frac{(d_{od} - \hat{d}_{od})^2}{\text{var}(\delta_{od})} + \sum_l \frac{(f_l^* - \sum_{od} h_{odl} d_{od})^2}{\text{var}(\epsilon_l)} \right]$$

$$\bar{d} \geq \bar{0}$$

dove  $d_{od}$  sono le componenti del vettore  $\bar{d}^*$  che minimizzano la somma degli scarti quadratici medi rispetto alla stima iniziale e, una volta assegnato alla rete, rispetto ai flussi osservati, pesando tali scarti in modo inversamente proporzionale alle varianze dei rispettivi errori.

Per risolvere il problema di ottimizzazione suddetto si può utilizzare un algoritmo di gradiente o algoritmi analoghi.

#### 4.4) Stima della domanda di sosta.

Si è visto nel paragrafo 3 di questo capitolo come, in modo molto semplificato, la domanda di sosta per zona può essere calcolata, nota la matrice O/D relativa alle autovetture, sommando gli spostamenti che hanno per destinazione una determinata zona.

A volte, però, si può voler valutare la domanda di sosta senza avere a disposizione la matrice O/D su autovetture o a prescindere da essa; ciò può accadere se, ad esempio, si vuole valutare la domanda di sosta latente degli utenti che, spinti da altri fattori (mancanza di offerta sufficiente, costi troppo elevati della sosta, etc.), scelgono modi di trasporto diversi dall'automobile.

Una analisi di questo tipo può essere effettuata utilizzando un modello di attrazione di domanda di sosta, analogo al modello di emissione di spostamenti da una zona, che, in base a dei tassi medi di attrazione di domanda di sosta, i quali forniscono il numero di posti di sosta necessari per unità di misura dell'attività presente nella zona, consenta di calcolare il numero totale di stalli necessari per assorbire in toto la domanda di sosta di ogni zona.

La domanda di sosta per zona può essere ottenuta nel seguente modo:

$$DS(z) = \sum_{LU} QU_{LU}(z) \cdot T_s(LU)$$

dove:

$DS(z)$  è la domanda di sosta che si ha nella zona  $z$ ;  
 $QU_{LU}(z)$  è la quantità, nell'unità di misura relativa, del *land use* LU nella zona  $z$ ;  
 $T_s(LU)$  è il tasso medio di attrazione di domanda di sosta relativo al *land use* LU;  
 la sommatoria è estesa a tutti i *land use* LU presenti nella zona.

In tabella 2.7 sono riportati dei valori medi dei tassi di attrazione della domanda di sosta; è da tener presente che la suddetta tabella è stata ricavata per la situazione americana ed in assenza di veicoli di trasporto pubblico, e non può essere considerata valida in contesti diversi. E' quindi sempre buona norma stimare di volta in volta i tassi di attrazione  $T_s$ .

TAB. 2.7

[2.6]

| LAND USE                              | Unità di misura    | Tasso medio per unità di misura |        |          |
|---------------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------|----------|
|                                       |                    | Giorno<br>feriale               | Sabato | Domenica |
| <b>Residenze</b>                      | Unità abitativa    |                                 |        |          |
| Appartamenti di bassa e media qualità |                    | 1.00                            | 0.80   | 1.00     |
| Appartamenti di lusso                 |                    | 0.55                            | -      | -        |
| Condominio                            |                    | 0.95                            | 0.50   | -        |
| Per pensionati                        |                    | 0.30                            | 0.30   | 1.00     |
| Hotel/Motel                           |                    | 0.84                            | 0.79   | -        |
| <b>Uffici</b>                         | 100 mq di edificio |                                 |        |          |
| <5.000 mq                             |                    | 2.60                            | -      | -        |
| 5.000-9.999 mq                        |                    | 2.50                            | -      | -        |
| 10.000-19.999 mq                      |                    | 2.70                            | -      | -        |
| 20.000-29.999 mq                      |                    | 2.50                            | -      | -        |
| 30.000-39.999 mq                      |                    | 2.30                            | -      | -        |
| 40.000-49.999 mq                      |                    | 2.40                            | -      | -        |
| 50.000-59.999 mq                      |                    | 3.10                            | -      | -        |
| 60.000-99.999 mq                      |                    | 2.60                            | -      | -        |
| >100.000 mq                           |                    | 2.60                            | -      | -        |
| <b>Vendita al dettaglio</b>           | 100 mq di edificio |                                 |        |          |
| Centro commerciale <5.000 mq          |                    | *1.80                           | *3.00  | -        |
| 5.000-9.999 mq                        |                    | *2.40                           | *4.90  | -        |
| 10.000-19.999 mq                      |                    | *3.25                           | *3.70  | -        |
| 20.000-29.999 mq                      |                    | -                               | *4.45  | -        |
| 30.000-39.999 mq                      |                    | 3.10                            | *5.10  | -        |
| 40.000-49.999 mq                      |                    | 3.00                            | 4.85   | -        |
| 50.000-59.999 mq                      |                    | *3.70                           | *4.20  | -        |
| 60.000-69.999 mq                      |                    | *4.30                           | *4.80  | -        |
| 70.000-79.999 mq                      |                    | *3.20                           | *5.20  | -        |
| 80.000-89.999 mq                      |                    | *3.80                           | *4.30  | -        |
| 90.000-99.999 mq                      |                    | *4.30                           | *4.40  | -        |

|                         |                                      |       |       |      |
|-------------------------|--------------------------------------|-------|-------|------|
| 100.000-125.000 mq      |                                      | *4.20 | *4.40 | -    |
| >125.000 mq             |                                      | *4.50 | *4.60 | -    |
| Supermercato            |                                      | -     | 3.44  | -    |
| Mobilificio             |                                      | 1.29  | 1.08  | -    |
| Ristorante di lusso     |                                      | 15.18 | 18.94 | -    |
| Ristorante medio        |                                      | 13.35 | 8.07  | -    |
| Fast-Food               |                                      | 15.39 | -     | -    |
| <b>Ospedali</b>         |                                      |       |       |      |
| Ospedale                | Posto letto                          | 1.83  | -     | -    |
| Casa di cura            | Stanza                               | 0.30  | 0.30  | 0.30 |
| Clinica/uffici          | 100 mq di edifici                    | 3.34  | -     | -    |
| <b>Edifici pubblici</b> |                                      |       |       |      |
| Scuole superiori        | Studente                             | 0.23  | -     | -    |
| Università              | Studente per tempo pieno equivalente | 0.82  | -     | -    |
| Chiesa/sinagoga         | Fedeles                              | -     | 0.37  | 0.45 |
| <b>Centri di svago</b>  |                                      |       |       |      |
| Cinema                  | Posto a sedere                       | 0.21  | 0.25  | 0.11 |
| Bowling                 | Pista                                | 4.80  | 3.50  | -    |
| Circoli sportivi        | 100 mq di edificio                   | 5.00  | -     | -    |
| Piste di pattinaggio    | 100 mq di edificio                   | 4.80  | -     | -    |

\* Misurati durante i periodi di punta per acquisti nel periodo tra l'uno Dicembre e Natale.

## 5) Indagini e metodologie per la rilevazione delle caratteristiche della domanda di trasporto.

La domanda di mobilità attuale può essere valutata effettuando delle indagini atte a rilevare le caratteristiche degli spostamenti che si manifestano nell'area di studio; le stesse indagini vengono utilizzate per calibrare e verificare i modelli di domanda di trasporto.

In tutti i casi ci si avvale dei risultati della teoria del campionamento che, come visto, consente di estendere all'universo le caratteristiche rilevate in un campione limitato di individui estratti a caso da esso.

Le indagini sulla mobilità possono essere così classificate:

- **indagini sui flussi:** sono quelle tese a rilevare le caratteristiche dei flussi di veicoli o di persone attraverso una sezione della rete dei trasporti o su una rete di piccole dimensioni (ad es. rappresentanti il centro storico di una città);
- **indagini su aree ristrette:** sono indagini utilizzate per analizzare il traffico in transito attraverso un nodo della rete dei trasporti (un incrocio, una piazza, una stazione) o il traffico interessato generato e/o attratto da un insediamento puntuale (una fabbrica, una università, etc.);
- **indagini lungo linee di valico:** analizzano il traffico che attraversa una linea ideale che divide in due parti un'area abitata (*screen line*) o ne delimita i confini (*cordone*);
- **indagini su aree vaste:** sono le indagini più complesse, finalizzate alla rilevazione di tutto il traffico che interessa un territorio urbanizzato; vengono anche dette *indagini O/D*;
- **indagini sulla domanda di sosta:** vengono eseguite per conoscere le caratteristiche della domanda di sosta dei veicoli.

A seconda dei casi le indagini vengono effettuate a domicilio, a destinazione, su strada o a bordo di veicoli.

### 5.1) Indagini sui flussi di traffico.

Il rilevamento dei flussi che attraversano una sezione stradale è la più agevole delle possibili indagini sulla mobilità; essa consiste nel contare il numero di veicoli che attraversano la sezione in questione e, se necessario, classificarli a seconda del tipo di veicolo, della corsia utilizzata, del senso di marcia, o di altri parametri.

I problemi che l'indagine presenta sono:

- 1) Stabilire le sezioni e i periodi di tempo nei quali effettuare l'indagine.
- 2) Scegliere le metodologie da usare per i conteggi.
- 3) Ideare appropriati metodi per registrare i dati.
- 4) Sviluppare delle tecniche di analisi ed elaborazione per ottenere dai dati raccolti appropriate conclusioni.
- 5) Presentare i dati in modo tale che si possano evidenziare i risultati chiave dell'indagine.

Il volume del flusso viene rilevato manualmente o con apparecchiature automatiche.

#### *A) Conteggi manuali.*

La maggior parte delle indagini tese al conteggio dei flussi sono effettuate manualmente; ciò avviene sia perché questi conteggi, che vengono effettuati in una sezione stradale anche per solo 8 o 10 ore, non giustificano lo sforzo richiesto per approntare una postazione automatica, sia perché in molti casi l'indagine è svolta solo in periodi di durata modesta (ore di punta). Inoltre, alcune informazioni importanti, quali la classificazione dei veicoli, la corsia usata, il numero di pedoni in transito ed il grado di occupazione, si possono ottenere solo usando tecniche manuali.

Pur essendovi dei detector in grado di stabilire il tipo di veicolo che attraversa la sezione stradale, essi non sono certo in grado di distinguere la funzione del veicolo stesso, separando i taxi dalle auto private o gli autobus dai mezzi pesanti per trasporto merci.

I conteggi manuali possono essere organizzati in modo abbastanza rapido ed economico (richiedono un equipaggiamento modesto); gli unici costi rilevanti riguardano gli oneri salariali di chi conduce l'indagine. Essi possono essere eseguiti usando una semplice scheda sulla quale barrare una casella per ogni veicolo che attraversa la sezione stradale; più spesso ci si serve di contacolpi manuali montati, in numero pari alle categorie di veicoli, su di un unico supporto. Il contatore è poi periodicamente letto e il numero progressivo è riportato su di un'apposita scheda. Generalmente un singolo operatore non riesce a gestire agevolmente più di 4 contatori.

#### *Procedure di conteggio.*

Quando i conteggi sono manuali ci sono alcuni fattori pratici da considerare. L'osservazione del flusso deve essere periodicamente interrotta per registrare il numero del contacolpi sulla scheda: i veicoli che passano attraverso la sezione stradale in questo periodo di tempo non possono essere registrati, per cui il numero di questi veicoli deve essere opportunamente stimato.

Il “**periodo di conteggio**” è l’intervallo di tempo alla fine del quale i conteggi sono registrati; tali periodi hanno di solito una durata di 5 o 15 minuti. Quando non interessa conoscere le variazioni di flusso all’interno dell’ora si usano periodi di un’ora.

Due sono le procedure utilizzate, a volte separatamente a volte contemporaneamente, per registrare i flussi contati manualmente:

- la procedura “**short-break**” (breve interruzione);
- la procedura “**alternata**”.

Nel primo caso, alla fine di ogni periodo viene fatta una interruzione di durata variabile tra 1 e 3 minuti, durante la quale tutti gli operatori registrano i loro conteggi. La *breve interruzione* è fatta all’interno del periodo stesso, e non al di fuori di esso. Così una procedura può richiedere di contare i flussi solo per 4 dei 5 minuti del periodo di conteggio, o per 12 dei 15 minuti usando il restante tempo per registrare i dati.

Il volume dell’intero periodo si ottiene per estrapolazione dai dati registrati, nel seguente modo:

$$FE = \frac{PC}{PC - BI} \quad V_a = V \cdot FE$$

dove:

FE= fattore di espansione dei conteggi

PC= periodo di conteggio (min.)

BI= breve interruzione (min.)

$V_a$  = conteggio giusto

V= conteggio attuale.

Ad esempio se il periodo di conteggio è di 5 minuti e la breve interruzione di 1 minuto, il fattore di espansione è dato da :  $5/4=1.25$ . La tabella 2.8 mostra un esempio.

**TAB. 2.8**

| <b>Periodo di conteggio</b> | <b>Conteggio di 4 minuti (veic.)</b> | <b>Fattore di espansione (FE)</b> | <b>Conteggio finale (veic.)</b> |
|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 17:00-17:05                 | 52                                   | 5/4                               | 65                              |
| 17:05-17:10                 | 55                                   | 5/4                               | 69                              |
| 17:10-17:15                 | 50                                   | 5/4                               | 63                              |
| 17:15-17:20                 | 51                                   | 5/4                               | 64                              |
| 17:20-17:25                 | 46                                   | 5/4                               | 58                              |
| 17:25-17:30                 | 50                                   | 5/4                               | 63                              |

La procedura alternata consiste nel contare i flussi per un intero periodo di conteggio e saltare il periodo successivo per registrare i dati sulla scheda. Il volume che transita nel periodo saltato viene ricavato per interpolazione lineare. In tab. 2.9 è riportato un esempio.

Spesso i due procedimenti sono combinati. Ad esempio un solo operatore può contare i flussi per 4 minuti di un periodo di 5, alternandosi tra due diverse corsie. Il conteggio così ottenuto per ogni corsia viene prima esteso e poi interpolato.

La procedura short-break è più precisa della procedura alternata, soprattutto se quest'ultima è eseguita con periodi di conteggio di 15 minuti.

TAB. 2.9

| Periodo di conteggio | Conteggio alternato | Conteggio interpolato |
|----------------------|---------------------|-----------------------|
| 17:00-17:05          | 50                  | 50                    |
| 17:05-17:10          | -                   | 52                    |
| 17:10-17:15          | 54                  | 54                    |
| 17:15-17:20          | -                   | 57                    |
| 17:20-17:25          | 60                  | 60                    |
| 17:25-17:30          |                     | 59                    |
| 17:30-17:35          | 58                  | 58                    |
| 17:35-17:40          |                     | 56                    |
| 17:40-17:45          | 54                  | 54                    |

#### *Registrazione dei dati sulle schede.*

Di fondamentale importanza per la riuscita dell'indagine è che i dati registrati dall'operatore siano riportati accuratamente ed ordinatamente nella scheda. Alcune indagini possono coinvolgere più sezioni stradali, numerosi operatori, diversi tipi di veicoli etc; alla fine dell'indagine ci si ritrova con migliaia di schede compilate. Se queste non sono organizzate in modo tale da poter facilmente trasferire i dati ad un elaboratore elettronico, che analizzi e sintetizzi i dati rilevati, l'intera indagine è difficilmente utilizzabile.

Le schede devono essere progettate di volta in volta a seconda delle informazioni che si vogliono dall'indagine; tutte le schede devono almeno includere le seguenti informazioni:

- sezione di rilevazione;
- specifiche manovre incluse sulla scheda;
- condizioni atmosferiche, della superficie stradale, etc.;

- nome dell'operatore;
- data del rilevamento;
- periodi di conteggio chiaramente indicati per ogni conteggio;
- pagina  $X$  di  $Y$  pagine che compongono la scheda;
- sufficiente spazio per riportare in modo chiaro i dati.

Un esempio di scheda è riportato nelle fig. 2.9 e 2.10; in questo caso la scheda è formata di due parti: nella prima è riportato il numero totale di veicoli che attraversano la sezione (misurato con il contacolpi); con la seconda si contano manualmente i veicoli diversi dalle automobili, in modo da poter classificare il flusso.

**FIG. 2.9**

[2.7]

**FIG. 2.10**

[2.7]

*B) Contatori meccanici portatili.*

Il secondo più comune modo di contare i veicoli è attraverso l'uso di contatori meccanici portatili. Questi contatori sono costituiti da tubi di gomma chiusi ad una estremità e collegati ad una membrana all'altra: la sovrappressione nel tubo provocata dal transito delle ruote di ciascun asse di un veicolo provoca lo spostamento della membrana e quindi, per la chiusura di un circuito elettrico, l'avanzamento del contatore della centralina.

Questo tipo di contatore è di uso comune, perché è facile da sistemare e da spostare da una sezione all'altra. L'uso del contatore meccanico è giustificato quando i conteggi durano più di 8-10 ore; in alcuni casi è necessario contare i flussi per alcuni giorni o per una settimana.

Il contatore automatico è economico ed efficiente per conteggi di lunga durata, ma non è in grado di fornire una classificazione del flusso veicolare o altre informazioni; per ottenere queste è necessario eseguire periodicamente dei conteggi manuali.

I tubi di gomma sono solitamente usati accoppiati a due tipi di contatori:

- a) contatori ad accumulazione, che registrano solo il numero totale di passaggi sul tubo nel tempo;
- b) contatori *printed-tape*, i quali stampano il numero di passaggi automaticamente ogni  $x$  minuti; questo secondo tipo è più usato, in quanto non è necessario leggere periodicamente il contatore.

La difficoltà nell'interpretazione dei dati forniti da questi contatori è che essi non registrano il numero di veicoli che attraversano la sezione stradale ma, come detto, il numero di assi: ogni asse crea una sovrappressione nel tubo che è registrata dal contatore. Non tutti i veicoli hanno però 2 assi, per cui è necessario un conteggio manuale su di un campione di veicoli, classificati in base al numero di assi, per commutare il n. di assi in n. di veicoli.

Il numero medio di assi per veicolo calcolato sul campione è assunto pari a quello dell'intero flusso. Un esempio è riportato in tab. 2.10.

I tubi stradali devono essere periodicamente controllati durante l'indagine, in quanto possono rompersi e quindi non registrare i dati. Se il tubo attraversa più corsie può capitare che una simultanea attivazione del tubo da più veicoli affiancati infici i risultati; l'errore può arrivare al 15### per una strada a 4 corsie.

TAB. 2.10

| Risultati di un conteggio manuale di due ore                          |                 |                 |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| N. di assi per veicolo                                                | N. di veicoli   |                 |
| 2-assi                                                                | 80              |                 |
| 3-assi                                                                | 10              |                 |
| 4-assi                                                                | 5               |                 |
| 5-assi                                                                | 5               |                 |
| Conversione in veicoli degli 8.500 assi misurati nel corso delle 24 h |                 |                 |
| N. di assi per veicolo                                                | N. di veicoli   | N. di assi      |
| 2-assi                                                                | 80              | 160             |
| 3-assi                                                                | 10              | 30              |
| 4-assi                                                                | 5               | 20              |
| 5-assi                                                                | 5               | 25              |
|                                                                       | <b>tot. 100</b> | <b>tot. 235</b> |
| N. medio di assi per veicolo: $235/100 = 2,35$                        |                 |                 |
| N. di veicoli transitati nelle 24 h: $8.500/2,35 = 3617$ veic.        |                 |                 |

*C) Altre tecniche portatili.*

Altri detector usati per i conteggi dei flussi sono costituiti da spire metalliche inserite nella pavimentazione ed attraversate da una corrente elettrica che genera un campo magnetico: il transito di un veicolo provoca una alterazione di questo campo e quindi dell'induttanza nella spira percepita dalla centralina e registrata dal contatore. Alcuni di questi detector riescono anche a stimare la dimensione del veicolo e quindi a distinguere tra mezzi leggeri e pesanti.

Metodologia molto usata è anche la videoregistrazione del flusso di traffico con apposite telecamere; essa è impiegata quando si vogliono osservare più parametri contemporaneamente. Il nastro ottenuto viene rivisto in laboratorio e i dati rilevabili sono inseriti direttamente nel computer. Questa metodologia si va diffondendo sempre più perché richiede una minore spesa di personale ed inoltre i dati osservati in laboratorio sono più precisi di quelli raccolti direttamente su strada.

*D) Contatori permanenti.*

In alcuni casi è richiesto un continuo conteggio dei flussi per 24 ore al giorno e per 365 giorni all'anno; ciò ad esempio accade per programmi di monitoraggio a livello nazionale o cittadino, per un controllo continuo del traffico o per misurare il *trend* generale.

I contatori permanenti sono azionati da uno o più detector permanentemente collegati via telefono o via cavo a terminali computerizzati di registrazione.

I detector più comunemente usati sono di tre tipi diversi:

1. *Pressure-plate detector*. Consiste in una piastra d'acciaio inserita nella pavimentazione e separata con molle e distanziatori da un'altra piastra posta al di sotto di essa. Al passaggio del veicolo la piastra superiore è premuta su quella inferiore, si chiude un circuito elettrico e un impulso viene trasmesso al contatore.
2. *Magnetic-loop detector*. Il funzionamento è lo stesso di quello visto per i detector portatili a spira magnetica, solo che in questo caso la spira è permanentemente inserita nella pavimentazione.
3. *Sonic-detector*. Una sonda posta a lato della strada o sospesa sopra una corsia emette onde sonore che sono riflesse dai veicoli; la sonda stessa capta il ritorno delle onde. Il primo di questi 3 misura il numero di assi, gli altri due il numero di veicoli.

#### *E) Misura della velocità del flusso.*

In alcuni casi occorre conoscere la velocità media di un flusso di veicoli. Essa può essere misurata in 3 modi diversi:

- osservando il traffico dall'alto e registrando tempi e spazi: a seconda dei casi può bastare impiantare il posto di osservazione sul tetto di un edificio o ricorrere a soluzioni più complesse fino a giungere all'aereofotografia;
- registrando le targhe delle auto in entrata ed in uscita dall'area di studio e misurando con cronometri sincronizzati il tempo impiegato per l'attraversamento;
- seguendo su di un'auto il flusso in movimento registrando tempi e spazi (per essere sicuri di marciare a velocità prossima a quella del flusso, occorre sorpassare tante auto quante sono quelle che hanno sorpassato la propria).

Le informazioni così desunte sono utilizzate per verificare le prestazioni di una strada.

#### *F) Indagini per piccole reti di trasporto.*

Una difficoltà maggiore, rispetto alla misura del flusso in una singola sezione, si presenta quando si voglia studiare i volumi di traffico che interessano una piccola rete di trasporto (ad es. rappresentante un quartiere cittadino o parte di esso). L'indagine è tesa a valutare l'entità e la distribuzione dei flussi di traffico su una limitata rete di rami ed intersezioni stradali, durante un fissato intervallo di tempo. La dimensione della rete può variare da 6-10 rami fino a centinaia di rami; generalmente questi studi sono condotti per

il centro della città o comunque in quei casi in cui c'è un grande polo attrattore o generatore di traffico nelle vicinanze, quale un aeroporto o uno stadio. L'indagine in questione fornisce preziose informazioni per la pianificazione ed il controllo del traffico e può essere di aiuto per localizzare nel modo migliore impianti di parcheggio.

I flussi di traffico su tutti rami della rete dovrebbero essere rilevati contemporaneamente, ma ciò non si può fare quasi mai, per mancanza di personale e/o di apparecchiature. Per questo motivo si utilizza una tecnica campionaria nella quale i flussi sono misurati sui rami della rete in tempi diversi: in alcune sezioni il flusso è misurato per l'intera durata dell'indagine mentre nelle altre i flussi vengono rilevati alternativamente per periodi più limitati.

Si distinguono quindi 2 tipi di conteggi del flusso:

1. *conteggi di controllo;*
2. *conteggi di copertura.*

I conteggi di controllo sono utilizzati per monitorare le variazioni di volume subite dai flussi della rete. Questi dati vengono utilizzati, poi, per correggere i risultati dei conteggi campionari (conteggi di copertura) effettuati in un qualsiasi altro punto della rete; è di fondamentale importanza che i conteggi di controllo siano effettuati per l'intera durata dell'indagine.

La scelta delle postazioni per i conteggi di controllo è di particolare importanza; esse dovranno essere poste in punti della rete che siano rappresentativi dal punto di vista delle oscillazioni orarie e giornaliere del flusso. Alcuni consigli per la scelta della loro posizione sono:

- 1) Vi deve essere almeno una postazione di controllo ogni 10 o 20 postazioni di conteggio.
- 2) Differenti postazioni di controllo devono essere previste per ogni categoria di strada della rete (strade locali, di quartiere, di scorrimento, primarie), in quanto esse hanno diverse funzioni e quindi presentano delle diverse variazioni di flusso nel tempo.
- 3) Diverse postazioni di controllo devono essere previste nelle diverse zone della rete in cui la destinazione d'uso del territorio è differente.

La scelta della posizione delle postazioni di controllo va comunque effettuata caso per caso.

Tutte le postazioni in cui vengono effettuati i conteggi del flusso sono dette *postazioni di copertura*. Tutti i conteggi di copertura, come del resto quelli di controllo, sono effettuati in sezioni intermedie tra due intersezioni, in modo da evitare la difficoltà di dover registrare le diverse manovre. I flussi che interessano le intersezioni, divisi per manovra, possono essere desunti dai flussi rilevati sui rami della rete, o, se necessario, rilevati con apposite indagini supplementari.

In genere vengono utilizzati per i conteggi dei contatori automatici portatili, anche se in alcuni casi la breve durata del conteggio non ne giustifica l'uso.

### 5.2) Indagini lungo linee di valico.

Le indagini lungo linee di valico servono a rilevare le caratteristiche della mobilità in transito attraverso una ideale frontiera che delimita una parte dell'area di studio o ne segna i confini; in quest'ultimo caso si parla di *indagini al cordone*; queste ultime sono finalizzate alla valutazione della mobilità di scambio tra l'area definita dal cordone e l'area esterna ad esso.

La linea di valico interseca un certo numero di sezioni stradali e/o ferroviarie: in corrispondenza di ognuna occorre stimare la media del flusso in transito ed intervistare un campione di persone chiedendo loro i luoghi di origine, di destinazione, il motivo dello spostamento ed ogni altra informazione di interesse per gli scopi dell'indagine.

Il cordone deve essere definito in modo da minimizzare il numero di sezioni in cui bisogna condurre le indagini; per cui vengono seguite per la scelta del cordone barriere naturali quali fiumi, ferrovie etc., in cui i punti di attraversamento sono limitati.

In linea di principio si dovrebbe operare in tutte le sezioni contemporaneamente ma, per contenere i costi, si preferisce tenere sotto controllo 2 o 3 sezioni per volta.

Il numero di persone da intervistare (elementi del campione) non è noto a priori, non essendo noto il numero di elementi dell'universo (flusso); se ne può però valutare l'entità sulla base di statistiche disponibili o su di un calcolo di massima della capacità stradale. Inoltre durante l'esecuzione dell'indagine è possibile adeguare il numero di interviste ai flussi in modo da avere il campione desiderato.

Per fermare i veicoli i cui occupanti si vuole intervistare è necessaria l'assistenza di pattuglie di Polizia, Carabinieri o Vigili Urbani. Inoltre, al fine di ridurre al minimo i pericoli di incidente, molta attenzione va dedicata alla scelta del luogo dove fermare i veicoli (in base allo spazio, alla illuminazione, alla visibilità etc.).

Il campione generalmente va stratificato per quarto d'ora e può essere estratto in 2 modi diversi:

- intervistando tutti gli occupanti di un veicolo ogni X veicoli che attraversano la sezione;
- intervistando tutti gli occupanti del primo veicolo che passa dopo la fine della precedente intervista.

Viene in genere utilizzato questo secondo metodo, per evitare veicoli in attesa (nei periodi troppo carichi) o un sottoutilizzo degli intervistatori (nei periodi meno carichi). Esempi di schede utilizzate per l'intervista sono riportati in appendice.

Alcune informazioni di notevole importanza possono essere ottenute senza eseguire le interviste, ma col solo conteggio dei flussi. Ciò si fa soprattutto se l'area delimitata dal cordone è poco estesa.

Il numero di veicoli che si trova all'interno del cordone, in un certo periodo di tempo, è calcolato considerando la differenza tra il numero di veicoli che entra e quello che esce dall'area di studio. La tab. 2.11 mostra la procedura utilizzata. L'indagine comincia generalmente ad un'ora in cui le strade sono virtualmente vuote. Se ciò non è possibile, allora si stima il numero di veicoli presenti all'interno del cordone all'inizio dell'indagine controllando le auto parcheggiate e con indagini campionarie sui flussi.

TAB. 2.11

| Interv. di tempo | Veicoli in ingresso | Veicoli in uscita | Accumulazione |
|------------------|---------------------|-------------------|---------------|
| 4:00-5:00        | -                   | -                 | 250           |
| 5:00-6:00        | 100                 | 20                | 330           |
| 6:00-7:00        | 150                 | 40                | 440           |
| 7:00-8:00        | 200                 | 40                | 600           |
| 8:00-9:00        | 290                 | 80                | 810           |
| 9:00-10:00       | 350                 | 120               | 1040          |
| 10:00-11:00      | 340                 | 200               | 1180          |
| 11:00-12:00      | 350                 | 350               | 1180          |
| 12:00-13:00      | 260                 | 300               | 1140          |
| 13:00-14:00      | 200                 | 380               | 960           |
| 14:00-15:00      | 180                 | 420               | 720           |
| 15:00-16:00      | 100                 | 350               | 470           |
| 16:00-17:00      | 120                 | 320               | 270           |

Lo studio riportato nella tabella comincia alle 4:00 con una stima di 250 veicoli nell'area di studio. Il numero di veicoli (*accumulazione*) nei successivi intervalli di tempo è calcolato come:

$$A_i = A_{i-1} + I_i - O_i$$

dove:

$A_i$  = n. di veicoli presenti nel periodo  $i$ .

$A_{i-1}$  = #### nel periodo prec.  $i-1$ .

$I_i$  = #### in ingresso nel periodo  $i$ .

$O_i$  = #### in uscita nel periodo  $i$ .

Tali dati possono essere rappresentati con grafici o istogrammi. In genere si separa il numero di veicoli leggeri da quelli pesanti (vedi fig. 2.11).

Inoltre è possibile rappresentare i veicoli in ingresso e in uscita dall'area di studio (vedi fig. 2.12).

Le indagini su linee di valico a bordo di mezzi collettivi devono essere effettuate preferibilmente a bordo del veicolo; se ciò non si può fare perchè la distanza tra le due fermate a cavallo del cordone è breve si può effettuare l'indagine a terra, cioè alle fermate di partenza e di arrivo. Esempi di entrambi i tipi di schede sono riportati in appendice.

Il campione dell'indagine è generalmente a due stadi: viene scelto un veicolo a caso e si intervista a bordo di esso un campione di passeggeri.

**FIG. 2.11**

[2.8]

**FIG. 2.12**

[2.8]

### **5.3) Indagini alle intersezioni.**

Tali indagini vengono, in genere, effettuate quando occorre intervenire su un incrocio stradale; dai risultati delle indagini si ottengono le informazioni necessarie per poter adeguare la capacità del nodo ai flussi di traffico: si interviene ad es. con una diversa sistemazione degli accessi, con la costruzione di sottopassi e sovrappassi o con una migliore regolazione del ciclo semaforico.

Una indagine sui flussi che interessano una intersezione stradale risulta essere molto complessa; infatti le manovre possibili per un semplice incrocio a 4 rami sono ben 12, e se poi si vuole classificare il flusso in auto private, mezzi pesanti, autobus e taxi, si hanno  $4 \times 12 = 48$  gruppi di dati separati.

Per la complessità del problema i flussi sono contati manualmente. Il personale dovrà essere posizionato in modo tale da poter osservare facilmente le manovre a lui affidate; un osservatore inesperto non potrà badare a più di 2 manovre contemporaneamente,

considerato che oltre a contare i flussi deve classificarli. In genere un osservatore si occupa solo di una corsia.

La procedura più usata è la *short-break* (breve interruzione) che, se combinata con quella alternata, consente ad un solo osservatore di registrare i flussi di 2 corsie; si ottiene così un risparmio sul costo della manodopera. Raramente, comunque, si possono impiegare meno di 4 operatori per una intersezione. Si deve poi prevedere la presenza di un supervisore, che misuri il tempo ed avverta quando termina il periodo di conteggio.

*A) Speciali procedure per le intersezioni semaforizzate.*

Nel caso di intersezioni semaforizzate il problema si presenta da un lato più semplice e dall'altro più complicato: è semplificato perché non tutte le manovre sono permesse contemporaneamente. Allora un singolo operatore può raddoppiare il numero di manovre o corsie osservate, cambiando con il ciclo semaforico la sua osservazione; i conteggi sono registrati separatamente su due differenti schede o contatori.

Il conteggio è però complicato dal fatto che sia il periodo di conteggio che la breve-interruzione devono essere multipli della lunghezza del ciclo semaforico. Perciò, per un ciclo di 60 secondi, uno schema di conteggio di 4 minuti su 5 può essere utilizzato; mentre per un ciclo di 90 secondi ciò non è possibile, non essendo né 4 né 5 minuti un multiplo di 90 secondi.

*B) Schede di indagine.*

La complessità delle schede usate per registrare i dati riflette la complessità dell'indagine. Ogni osservatore deve avere un set di schede le quali possono essere correlate con le altre per dare una visione globale dei flussi all'intersezione.

Le figure 2.13 e 2.14 mostrano due tipi di schede comunemente usate per lo studio delle intersezioni.

Nella scheda di fig. 2.13 sono riportati i dati di un solo periodo di conteggio; la scheda di fig. 2.14 è usata per più periodi, ma solo per le manovre registrate da un solo osservatore.

*C) Volumi in arrivo e in partenza.*

Nella maggior parte dei casi i veicoli sono contati quando lasciano l'intersezione. Ciò si fa sia perché è più semplice, sia perché le manovre di svolta non possono essere individuate fino a che il veicolo non lascia l'intersezione.

Quando la capacità di una intersezione non è sufficiente a soddisfare la domanda, si formano delle code, che non saranno smaltite in un singolo ciclo semaforico. In questi casi, i veicoli che lasciano l'intersezione non riflettono la domanda, per cui dovrebbero essere osservati i veicoli in arrivo; l'osservazione di questi ultimi è particolarmente complessa perché la coda è in continua evoluzione.

Il volume in arrivo può essere stimato contando i volumi in partenza e misurando la lunghezza della coda ad intervalli critici durante il conteggio. La lunghezza della coda viene misurata o al termine del periodo di conteggio, che è in genere di 15 minuti, o all'inizio della fase di rosso. La tab. 2.12 mostra come i flussi in arrivo possono essere valutati usando i flussi in partenza e la lunghezza della coda; detto  $TD_i$  il volume in partenza,  $QL_i$  la lunghezza della coda e  $AV_i$  il volume in arrivo, relativi al periodo di conteggio  $i$ , si ha:

$$AV_i = TD_i + QL_i - QL_{i-1}$$

Se al termine di un periodo di conteggio la lunghezza della coda è uguale a quella che si aveva all'inizio, allora il volume in arrivo è uguale a quello in partenza. In tab. 2.12 si nota che le partenze e gli arrivi in totale sono gli stessi, però la distribuzione all'interno dell'ora è diversa; si ha infatti un flusso di punta di 65 veh/15 min. in partenza, mentre in arrivo la punta è di 70 veh/15 min. Per adeguare alla domanda la capacità dell'intersezione ci si deve riferire a quest'ultimo dato.

**TAB. 2.12**

| Periodo di tempo | Veicoli in partenza | Lunghezza della coda | Veicoli in arrivo |
|------------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| 17:00-17:15      | 50                  | 0                    | 50                |
| 17:15-17:30      | 55                  | 0                    | 55                |
| 17:30-17:45      | 62                  | 5                    | 62 + 5 = 67       |
| 17:45-18:00      | 65                  | 10                   | 65 + 10 - 5 = 70  |
| 18:00-18:15      | 60                  | 12                   | 60 + 12 - 10 = 62 |
| 18:15-18:30      | 60                  | 5                    | 60 + 5 - 12 = 53  |
| 18:30-18:45      | 62                  | 0                    | 62 - 5 = 57       |
| 18:45-19:00      | 55                  | 0                    | 55                |
|                  | <b>tot. 469</b>     |                      | <b>tot. 469</b>   |

**FIG. 2.13**

[2.9]

**FIG. 2.14**

[2.9]

*D) Analisi e presentazione dei dati.*

Generalmente i dati raccolti dall'indagine vengono presentati sotto forma di tabelle: su esse sono riportati i volumi di traffico divisi per periodo di tempo, tipo di manovra e categoria di veicolo. Si usano delle più elaborate rappresentazioni grafiche per i volumi nell'ora di punta, o per i volumi totali nelle 6 ore più cariche o in tutte le 24 ore.

Nelle fig. 2.15, 2.16, e 2.17 sono riportati 3 comuni modi di rappresentare i volumi dell'ora di punta o giornalieri per una intersezione. Il primo è una semplice tabella che illustra le manovre compiute ad ogni accesso dai veicoli (leggeri e pesanti). Il secondo riporta i dati di interesse su di uno schema predisegnato; il terzo, invece, è un diagramma di flusso in cui gli spessori delle linee che individuano il flusso sono proporzionali ai volumi.

**FIG. 2.15**

[2.4]

**FIG. 2.16**

[2.9]

**FIG. 2.17**

[2.10]

#### 5.4) Indagini O. D. a domicilio.

Quando è necessario conoscere le caratteristiche della mobilità che interessa un'area di studio sufficientemente ampia (ad es. un comune o un insieme di comuni) bisogna pianificare e realizzare una indagine su aree vaste, che viene suddivisa in una indagine al cordone, realizzata come mostrato in precedenza, per indagare sulla mobilità di scambio ed una indagine a domicilio per conoscere la mobilità dei residenti all'interno dell'area di studio.

L'indagine a domicilio consiste nel rilevare, mediante interviste dirette, tutte le caratteristiche della mobilità dei componenti di un campione di famiglie di residenti, e nel dedurre le caratteristiche per l'intera popolazione.

Il campione viene in genere stratificato per zone dell'area di studio; l'esperienza fissa nel 2-4% dell'universo una dimensione accettabile per il campione

Le informazioni principali da raccogliere in una indagine O/D a domicilio sono le seguenti:

- luoghi di origine e di destinazione degli spostamenti compiuti nel giorno;
- ora di inizio e di fine dello spostamento;
- modo dello spostamento;
- motivo dello spostamento.

Ad esse vanno aggiunte altre informazioni necessarie per l'analisi qualitativa e quantitativa della mobilità e finalizzata prevalentemente alla stima della sua evoluzione futura: costo dello spostamento, attività lavorativa degli intervistati, reddito o parametri ad esso collegati, autovetture eventualmente possedute, etc.

L'intervista può essere tesa all'esame degli spostamenti realmente effettuati dall'intervistato il giorno precedente (RP: *Revealed Preference*); in questo modo si fotografa la situazione reale, comprendente anche gli spostamenti occasionali.

Essendo impossibile intervistare l'intero campione in un solo giorno, l'indagine viene in genere protratta per più giorni; essa, quindi, raccoglierà informazioni relative a più giorni che devono poter essere considerati equivalenti tra loro.

L'intervista può altresì riferirsi al comportamento degli utenti al variare di caratteristiche del servizio di trasporto (SP: *Stated Preference*). Tale tipo di indagine tende a stimare il valore degli attributi allo stato non presenti nel sistema di trasporto (ad es. una linea di metropolitana o un nuovo servizio). Nell'effettuare tale intervista particolare attenzione va posta nella descrizione dei nuovi scenari rispetto ai quali si chiede all'intervistato il suo comportamento.

Il complesso di indagini RP ed SP dà una esatta visione degli attributi e consente di stimare i pesi relativi anche di quelli, come detto, non presenti al momento dell'intervista.

*A) Schede per le interviste.*

Le schede per le interviste dirette devono essere predisposte molto accuratamente, in quanto possono portare a degli errori gravi nella valutazione della domanda, o a carenze di informazioni.

Non è possibile consigliare una metodologia per la predisposizione della scheda, data la diversità dei problemi specifici che si possono presentare. E' però possibile elencare alcune considerazioni da tener presente:

- bisogna evitare, soprattutto all'inizio del colloquio, delle domande troppo personali o riguardanti il reddito; se occorre quest'ultima informazione si possono usare delle "domande ombra" (ad es. numero di auto possedute etc.), da cui ricavare una categoria di reddito al quale ascrivere l'intervistato;
  - le domande devono essere chiare e le risposte facilmente codificabili; è opportuno allora prevedere sulla scheda uno spazio per la codifica in modo da semplificare il caricamento dei dati per l'elaborazione. Ad ogni risposta viene accoppiato un numero di codice: ciò è semplice se sono previste già nella scheda le possibili risposte alternative, in caso contrario si deve far corrispondere un numero di codice in fase di codifica (ad es. il luogo di destinazione viene codificato con il numero relativo alla zona in cui esso si trova);
  - per le domande per le quali è prevista una serie di risposte tra le quali scegliere è opportuno prevedere la voce "*altro...*", lasciando la possibilità di registrare una risposta diversa da quelle previste; in sede di codifica si può vedere se tra queste ve ne è una più frequente e inserirla nella serie delle possibili risposte;
  - è consigliabile prevedere la possibilità della non risposta con l'eventuale specificazione del motivo;
  - ogni scheda va numerata in modo da facilitare la localizzazione dell'intervistato (prime cifre coincidenti con la zona di residenza);
  - ogni scheda va firmata dall'intervistatore sia per responsabilizzarlo, sia per sapere a chi rivolgersi per indicazioni poco chiare.
- In appendice è riportato un esempio di scheda utilizzata per interviste a domicilio.

*B) Reclutamento e istruzione degli intervistatori.*

Di fondamentale importanza per la riuscita di una indagine è la scelta e l'addestramento degli intervistatori. Infatti, anche un minuzioso lavoro di selezione del campione e di preparazione dei questionari può essere vanificato da una scarsa preparazione, o da poca onestà degli intervistatori.

Il lavoro dell'intervistatore non è semplice come potrebbe sembrare in un primo momento; egli deve per prima cosa ottenere la fiducia dell'intervistato, in modo che quest'ultimo si senta a suo agio nel rispondere alle domande e lo faccia senza reticenze.

Secondo problema è quello di far sì che la persona interrogata si impegni a fondo nell'intervista; può essere, quindi, necessario dare alcune spiegazioni sull'oggetto dell'intervista e sulla sua utilità.

Si deve poi fare in modo che ogni domanda sia compresa chiaramente, per cui in alcuni casi è necessario spiegarne il significato o fare degli esempi.

Trovare e assumere personale competente è quindi fondamentale.

Raramente, nel campo della pianificazione dei trasporti, si dispone di personale fisso per le interviste, o comunque non se ne dispone in numero sufficiente. Si deve quindi ricorrere a intervistatori temporanei o con contratti a termine, i quali dovranno essere opportunamente addestrati e controllati; essi possono essere reclutati con le offerte di impiego negli annunci economici, sui quotidiani o su determinati settimanali che si rivolgono ad un pubblico selezionato (ad es. gli studenti universitari), che è più interessato a lavori *part-time*.

E' fondamentale, poi, addestrare gli intervistatori in modo da renderli preparati ad eseguire correttamente l'indagine. L'addestramento consiste in 4 fasi:

*1) Istruzioni scritte.*

Tra il materiale da fornire per assistere gli intervistatori nel loro lavoro, la cosa più importante sono le istruzioni sul modo di condurre l'inchiesta. Nelle istruzioni la descrizione esatta dei compiti deve essere enunciata in termini chiari e distinti.

Alcuni punti da non trascurare sono:

- l'argomento dell'indagine;
- il giorno e l'ora in cui andare a visitare gli intervistati;
- il numero di persone da intervistare;
- come presentarsi e dare inizio all'intervista;
- in che modo porre ciascuna domanda e quali domande sono correlate a seconda delle risposte ad altre domande;
- come va studiato e corretto il questionario prima di inviarlo in sede;

- che fare dei questionari completati;
- quando e in che misura verrà pagato il lavoro eseguito.  
Quando gli intervistatori sono membri permanenti, o vengono utilizzati per eseguire un certo numero di indagini, è utile fornirli di:
- un manuale di addestramento con le informazioni e i procedimenti generali validi per tutte le indagini;
- istruzioni specifiche per ciascuna indagine.

### 2) *I periodi di addestramento.*

I periodi di addestramento dovrebbero coincidere con una riunione generale nel corso della quale gli intervistatori possono ricevere istruzioni, in gruppo o individualmente; quindi ciascuno di essi dovrebbe eseguire delle interviste di prova, in compagnia di un supervisore, che ne saggi la capacità.

### 3) *L'addestramento pratico.*

Consiste nel far eseguire (senza la presenza del supervisore) un certo numero di interviste nelle condizioni reali in cui ci si verrà a trovare durante l'indagine vera e propria.

In questo modo le istruzioni vengono meglio comprese, i neo-intervistatori acquistano fiducia in se stessi, se sorgono dei problemi essi non inficiano l'indagine, inoltre le interviste di prova sono utili per la selezione finale degli intervistatori.

### 4) *La valutazione delle interviste di addestramento.*

Le interviste di prova debbono essere subito valutate e classificate dal personale di supervisione. Trovati gli eventuali errori commessi da ogni intervistatore, viene compilato un elenco dei tipi di errori più frequenti, che viene incorporato in un memorandum generale inviato a tutti gli intervistatori. Nella copia inviata ad ogni intervistatore si sottolineano gli eventuali errori che lo riguardano: così si fanno notare all'intervistatore non solo i suoi errori, ma anche quelli commessi dagli altri e che lui avrebbe potuto potenzialmente commettere.

E' necessario controllare che gli intervistatori eseguano realmente le interviste che dicono di avere fatto, e che il lavoro compiuto sia qualitativamente accettabile. Una forma di controllo comporta semplicemente una telefonata alle persone identificate sui moduli rinviati in sede, per chiedere se l'intervistatore ha realmente fatto l'intervista; per le indagini a domicilio, poi, l'intervistato viene preavvisato con una lettera, alla quale è allegato un bollino adesivo che l'intervistatore dovrà applicare al modulo dell'intervista.

Ulteriori controlli sui questionari si fanno in sede di elaborazione e caricamento dei dati, come sarà detto successivamente.

*C) Programmi di caricamento, verifica, ed elaborazione dati.*

I dati raccolti con le schede vengono caricati su elaboratori elettronici, riportando i dati codificati dell'intervista. La *codifica* è affidata ai codificatori, cioè a persone distinte dagli intervistatori, che, nei giorni immediatamente successivi alle singole interviste, traducono le risposte in codice. Il loro lavoro è molto delicato perché, se da un lato rappresenta una verifica puntuale delle schede di intervista e può consentire correzioni di eventuali errori commessi dagli intervistatori, dall'altro lato può essere esso stesso fonte di ulteriori errori non facilmente rilevabili in seguito.

I risultati codificati delle interviste vanno sottoposti ad una serie di test finalizzati alla correzione degli errori o ad individuare interviste fittizie. Alcuni di questi controlli vengono effettuati direttamente in fase di elaborazione dagli elaboratori elettronici.

Gli errori più comuni da scovare in fase di codifica e/o di elaborazione sono i seguenti:

- a) *Interviste fittizie.* Alcuni, o addirittura tutti i questionari consegnati da un intervistatore potrebbero essere rapporti "ombra", compilati dall'agente stesso. I questionari falsi sono spesso riconoscibili attraverso strane contraddizioni contenute in risposte nelle quali tutto dovrebbe filare secondo logica, oppure per una eccessiva monotonia delle risposte (ad es. l'intervistatore annovera la presenza di bambini piccoli in tutte le case). Anche la presenza in tutti i questionari di errori, che, singolarmente, possono essere accidentali può far sospettare.
- b) *Informazioni errate.* In taluni rapporti di interviste autentiche si trovano dati evidentemente scorretti. Ad esempio se la zona di residenza dell'intervistato non è servita da una metropolitana, risulta errata una risposta che ne consideri l'uso per gli spostamenti primari.
- c) *Contraddizioni.* Due risposte antitetiche non possono essere entrambe esatte. Ad es. assenza di studenti in famiglia e spostamenti casa-studio non nulli.
- d) *Risposte incomplete.* L'intervistato a volte può trascurare di rispondere a qualche domanda, o può capitare che la risposta non venga annotata.

In alcuni casi si può far fronte ad alcuni errori e recuperare l'intervista, in altri casi essa deve essere scartata.

Sui dati corretti si procede all'elaborazione finale che consiste nell'ottenere stime riferite all'universo delle informazioni rilevate sul campione.

### **5.5) Altre tipologie di indagine.**

Altre tipologie di indagine, che possono essere previste per casi specifici, sono:

- 1) indagini *Lights-On* (luci accese);
- 2) indagini mediante l'osservazione della targa;
- 3) indagini mediante la distribuzione di tagliandi.

#### A) Indagini *lights-on*.

Questa indagine viene utilizzata quando, dato un tronco stradale che ha 2 ingressi e 2 o 3 uscite, si vuole conoscere il numero di veicoli proveniente da ciascuna origine che si serve di ogni uscita.

L'indagine concettualmente è molto semplice: vengono contati i flussi sia in ingresso che in uscita e ad ogni guidatore che arriva da uno dei due rami di accesso alla tratta viene chiesto di accendere le luci del veicolo. In ogni sezione di uscita i veicoli sono contati e classificati a seconda se le luci sono accese o spente, in modo tale da determinare la loro origine.

La richiesta viene effettuata con dei cartelli (almeno 2), disposti circa a 1 km e a 500 m dalla sezione di ingresso, con un messaggio del tipo: "Si prega di accendere i fari. Studi sul traffico". Su ogni ramo di uscita sarà, poi, posto un cartello, dopo, la postazione di conteggio, in cui si avverte che si possono spegnere i fari, ad es.: "Si prega di spegnere i fari, grazie per la vostra collaborazione".

La fig. 2.18 mostra un esempio. Considerato un periodo di tempo (ad es. 15 minuti), per esso si abbia:  $A=280$ ;  $B=100$ ;  $C(on)=45$ ;  $C(off)=153$ ;  $D(on)=42$ ;  $D(off)=140$ . Dai conteggi effettuati è necessario stimare i flussi A-C, A-D, B-C e B-D. Se tutti i veicoli avessero rispettato l'indicazione fornita dal cartello allora il flusso B-C sarebbe dato dal numero  $C(on)$ , e quello B-D dal numero  $D(on)$ , il flusso A-C da  $C(off)$  e il flusso A-D da  $D(off)$ . Purtroppo ciò non accade. Il conteggio alla postazione B per questo periodo è di 100 veicoli; non tutti però hanno effettivamente acceso le luci come richiesto, infatti la somma  $C(on)+D(on)$  è  $45+42=87$  veicoli, per cui 13 veicoli non hanno seguito l'indicazione richiesta. Per ricavare i flussi B-C e B-D si opera nel seguente modo:

$$B - C = C(on) \cdot \left[ \frac{B}{C(on) + D(on)} \right] = 45 \cdot \frac{100}{87} = 52 \text{ veh}$$

$$B - D = D(on) \cdot \left[ \frac{B}{C(on) + D(on)} \right] = 42 \cdot \frac{100}{87} = 48 \text{ veh}$$

FIG. 2.18

[2.4]

Il numero totale di veicoli proveniente da B è  $52+48=100$ .

Così facendo si ammette che la ### di veicoli che non segue l'indicazione richiesta sia la stessa, sia che il veicolo sia destinato in C sia che sia destinato in D.

I flussi A-C e A-D sono dati da:

$$A-C=C(\text{on})+C(\text{off})-(B-C)=45+153-52=146 \text{ veh}$$

$$A-D=D(\text{on})+D(\text{off})-(B-D)=42+140-48=134 \text{ veh}$$

#### *B) Metodo della targa.*

Questo tipo di indagine è usata quando, come ad esempio nel caso delle autostrade o dei centri storici di alcune città, le strade di accesso e di uscita per una certa rete di trasporto sono poco numerose, e quindi possono essere facilmente controllate. Fissate le sezioni di ingresso e di uscita si ricava con l'indagine una matrice O/D degli spostamenti che interessano la rete in questione.

Vista la velocità e la frequenza con la quale i veicoli attraversano i punti di osservazione, è praticamente impossibile registrare tutte le targhe, soprattutto se le corsie

sono più di una; allora in ogni postazione vengono registrate le targhe di solo un campione di veicoli, ad es. quelli la cui targa termina con due numeri prefissati, o con un numero prefissato (campione del 10###).

Per consentire una più rapida registrazione si preferisce riportare le targhe non su carta, ma dettarle a un registratore: il nastro dovrà poi essere ascoltato dallo stesso rilevatore che riporterà i dati su carta. In ogni sezione di rilevamento, si dovrà poi contare il numero totale di veicoli che attraversa la sezione (con uno dei metodi visti per il conteggio dei flussi).

A questo punto i dati raccolti dall'indagine sono:

$T_{ij}$  = n. di veicoli che è entrato attraverso la sezione "i" ed uscito dalla sezione "j", ottenuto con l'osservazione delle targhe.

$V_i$  o  $V_j$  = volume contato all'origine "i" o alla destinazione "j" (rispettivamente in ingresso e in uscita).

$$T_i = \sum_j T_{ij} \qquad T_j = \sum_i T_{ij}$$

I  $T_{ij}$  sono dei valori campionari dei flussi i-j, da essi si vogliono ottenere quelli reali  $T'_{ij}$ .

### *C) Indagini mediante la distribuzione di tagliandi.*

Una indagine alternativa a quella che si ha mediante la lettura delle targhe consiste nel distribuire ai conducenti dei veicoli, nelle sezioni di origine, dei tagliandi codificati, e raccogliarli nelle sezioni di destinazione.

Ciò è automatico nel caso delle autostrade italiane, in cui ai caselli di ingresso è distribuito un tagliando, che poi viene ritirato al casello di uscita all'atto del pagamento del pedaggio, ma un sistema simile può essere usato anche in altri casi, ed anche in ambito urbano.

I tagliandi devono riportare la sezione di origine nella quale sono stati distribuiti, ed un numero di serie che indichi il numero totale di tagliandi distribuiti in quella sezione.

Una indagine di questo tipo richiede ovviamente la collaborazione degli utenti, per cui è buona norma far precedere l'indagine da una fitta campagna pubblicitaria; in molti casi è necessaria la presenza di pattuglie di Polizia per fermare i veicoli, ai quali sarà distribuito il tagliando. Degli opportuni cartelli devono poi indicare la postazione di consegna del tagliando.

Anche in questo caso l'indagine è di tipo campionario, non essendo possibile distribuire il tagliando a tutti gli utenti; l'estensione dei dati campionari all'universo avviene come per il metodo della targa.

### 5.6) Indagini sulla sosta.

Le indagini O/D vengono spesso volte integrate da apposite indagini sulla domanda di sosta; queste sono molto utili per valutare la domanda di sosta in ogni zona e le sue caratteristiche: durata media della sosta, luogo di provenienza e di destinazione, motivo della sosta, etc.

Alcune informazioni possono essere rilevate senza intervistare gli utenti, mentre per altre l'intervista è necessaria.

Un comune tipo di indagine che consente di rilevare il numero di veicoli in sosta nel corso della giornata e la durata media della sosta è il *metodo della targa*; esso consiste nel porre sotto osservazione per l'intera giornata un campione di stalli presenti nell'area di studio e nel registrare su appositi moduli ad intervalli di tempo fissi (generalmente 30 minuti) le targhe delle auto in sosta negli stalli prescelti. Un esempio di scheda utilizzata per il metodo della targa è riportata in fig. 2.19.

La successiva elaborazione dei dati fornisce le informazioni richieste. La presenza, infatti, in un dato intervallo di tempo di una targa prima non registrata, indica l'arrivo di una nuova auto in quell'intervallo; la sua permanenza per un certo numero di intervalli di tempo consente di misurare la durata della sosta; la sua scomparsa indica l'ora di partenza; il numero di targhe riportato in ogni unità di tempo misura le auto presenti. L'espansione all'universo dei risultati dell'elaborazione avviene moltiplicandoli per il rapporto tra il numero di stalli presenti nell'area ed il numero di stalli sottoposti ad osservazione.

E' opportuno che gli stalli campione siano disposti lungo un circuito chiuso in modo da semplificare le operazioni di rilevamento; è altresì necessario che in questo circuito siano compresi stalli di tutte le possibili tipologie presenti nella zona. Bisogna poi fare attenzione a considerare come stallo non solo uno spazio legale per la sosta, ma uno spazio che viene normalmente utilizzato per essa, pur essendo vietata.

Per conoscere altre informazioni utili, quali il motivo dello spostamento, la destinazione finale, la zona di origine, etc., è necessario intervistare un campione degli utenti della sosta.

Per elaborare una scheda di intervista si deve tener conto che il tempo a disposizione è limitato (1-2 minuti) dato che l'intervista viene realizzata sul posto; conviene realizzare l'intervista quando il conducente torna al veicolo per lasciare il parcheggio: così si incontra una maggiore disponibilità a rispondere.

**FIG. 2.19**

[2.10]

## **CAPITOLO 3**

### **LA PROGETTAZIONE DELL'ESERCIZIO**

#### **1) Analisi delle direttive per la redazione, adozione ed attuazione dei Piani Urbani del Traffico.**

##### **1.1) Definizioni, obiettivi e strategie.**

##### **1.1.1) Definizione di Piano Urbano del Traffico e sua obbligatorietà.**

L'articolo 36 del nuovo Codice della Strada (D. Lgs. 30 Aprile 1992, n. 285) rende obbligatoria per tutti i comuni con popolazione residente superiore ai 30.000 abitanti l'adozione del "*Piano Urbano del Traffico veicolare*" (PUT); lo stesso obbligo è esteso anche a tutti quei comuni che, pur avendo popolazione residente inferiore al limite fissato, registrino una particolare affluenza turistica o siano interessati da elevati fenomeni di pendolarismo o, ancora, siano impegnati alla soluzione di rilevanti problematiche derivanti dalla congestione della circolazione stradale.

L'elenco dei comuni per cui il Piano Urbano del Traffico è obbligatorio viene predisposto dalle regioni e pubblicato, a cura del Ministero dei lavori pubblici, nella Gazzetta Ufficiale; è inoltre consentito a tutti gli altri comuni che lo ritengano opportuno dotarsi di un PUT.

Il Ministero dei lavori pubblici, di concerto con il Ministro dell'ambiente e la Presidenza del Consiglio dei Ministri-Dipartimento per le aree urbane e sulla base delle indicazioni CIPET riportate nella deliberazione del 7 aprile 1993, ha emanato le "*Direttive per la Redazione, Adozione ed Attuazione dei Piani Urbani del Traffico*", pubblicate sul Supplemento Ordinario alla G. U. del 24/06/1995; le direttive trattano sia la fase della redazione del PUT, per la quale hanno "*valenza di prescrizioni*", sia le fasi dell'adozione e dell'attuazione dello stesso.

Il PUT viene definito come "*un insieme coordinato di interventi per il miglioramento delle condizioni della circolazione stradale nell'area urbana, dei pedoni, dei mezzi pubblici e dei veicoli privati, realizzabili nel breve periodo - arco temporale biennale - e nell'ipotesi di dotazioni di infrastrutture e mezzi di trasporto sostanzialmente invariate*"; esso è perciò fondamentalmente teso ad una migliore gestione degli spazi stradali esistenti e, ove necessario, del sistema di trasporto pubblico collettivo stradale. In questo caso il PUT viene più propriamente denominato "*Piano della mobilità*"; nelle

direttive è precisato che la struttura dei servizi di trasporto pubblico collettivo può essere considerata invariante se difficoltà operative e finanziarie rendessero non realizzabili in tempi brevi significativi interventi di miglioramento. Bisogna comunque tener conto delle conseguenze che il Piano ha sull'offerta e sulla domanda di trasporto collettivo.

### 1.1.2) Obiettivi fondamentali e strategie generali di intervento.

Il PUT, come precisato anche nell'art. 36 del C.d.S., è finalizzato al raggiungimento dei seguenti **obiettivi fondamentali**:

- 1) il miglioramento della condizioni di circolazione (movimento e sosta);
- 2) il miglioramento della sicurezza stradale (riduzione degli incidenti);
- 3) la riduzione degli inquinamenti atmosferico ed acustico;
- 4) il risparmio energetico;

ed, inoltre, deve essere redatto in accordo con gli strumenti urbanistici ed i Piani dei trasporti vigenti e nel rispetto dei valori ambientali.

Le **strategie generali** da proporre ai fini del raggiungimento dei predetti obiettivi vengono distinte in:

- 1) interventi sull'offerta di trasporto;
- 2) interventi sulla domanda di trasporto.

Per quanto riguarda l'**offerta di trasporto**, in vista del raggiungimento diretto del primo obiettivo ed indiretto degli altri, si prevede di riorganizzare la rete stradale urbana in modo gerarchico, dando ad ogni categoria di strade una propria funzione, così da evitare promiscuità tra le diverse componenti del traffico. Nelle direttive vengono ripresi i quattro tipi fondamentali di strade urbane, come dalla classifica del CNR, e cioè: autostrade urbane (o strade primarie), strade di scorrimento, strade di quartiere e strade locali; come precisato nell'allegato alle direttive, possono essere previste altre tre tipologie di strade con funzione e caratteristiche intermedie rispetto ai tipi precedentemente indicati: strade di scorrimento veloce (intermedie tra le autostrade e le strade di scorrimento), strade interquartiere (intermedie tra quelle di scorrimento e quelle di quartiere), strade locali interzonali (intermedie tra quelle di quartiere e quelle locali).

L'insieme di strade su esposte, tranne le strade locali, formano la rete principale urbana, caratterizzata dalla preminente funzione di servire i movimenti motorizzati della popolazione attraverso l'esclusione della sosta veicolare dalle relative carreggiate; le rimanenti (strade locali) formano la rete locale urbana, con funzione preminente di soddisfare le esigenze dei pedoni e della sosta veicolare.

E' importante tener presente che le intersezioni viarie di ogni tipo di strada sono ammesse esclusivamente con strade dello stesso tipo o di tipo immediatamente precedente o seguente.

Nell'allegato alle direttive viene inoltre precisato che questa classifica funzionale delle strade urbane deve essere integrata da un apposito "*regolamento viario*" che determina le caratteristiche geometriche e di traffico e la disciplina d'uso di ogni tipo di strada; tale regolamento dovrà essere elaborato sulla base delle norme vigenti (CNR) e del nuovo C.d.S.; il regolamento determina gli standard tecnici per ogni tipo di strada in merito a:

- componenti di traffico ammesse;
- caratteristiche geometriche della sezione trasversale;
- caratteristiche geometriche di tracciato;
- organizzazione delle intersezioni stradali;
- dimensioni delle fasce di sosta laterali;
- disciplina delle altre occupazioni delle sedi stradali.

Il regolamento viario, in quanto a valori degli standard tecnici previsti, è da considerarsi cogente per le strade di nuova realizzazione, mentre è da considerarsi obiettivo da raggiungere per le strade esistenti, dove vi siano vincoli strutturali non immediatamente eliminabili. Anche in quest'ultimo caso devono essere rispettate in pieno le funzioni previste per le diverse strade e quindi le componenti del traffico ammesse o meno su ognuna di esse.

Il miglioramento dell'offerta di trasporto si raggiunge inoltre con l'incremento della capacità del sistema di trasporto; i principali interventi da attuare riguardano:

- l'eliminazione della sosta veicolare dalla viabilità principale;
- l'adeguamento della capacità delle intersezioni ai flussi veicolari in transito.

Il primo intervento comporta: il riordino della viabilità locale al fine di massimizzare su essa l'offerta di sosta; utilizzo di aree pubbliche e private, in attesa di definitiva sistemazione urbanistica, in termini di realizzazione e gestione di aree di parcheggio ad uso pubblico (eventualmente multipiano); realizzazione di parcheggi ad uso privato (parcheggi pertinenziali); potenziamento e riorganizzazione del corpo di vigilanza urbana che faccia rispettare le discipline di sosta imposte.

L'adeguamento della capacità delle intersezioni si ritiene necessaria tenuto conto che esse rappresentano i punti nevralgici della rete stradale. Gli interventi di miglioramento riguardano sia l'organizzazione che la gestione dell'intersezione e cioè: limitazione delle manovre di svolta a sinistra, istituzione di sensi unici di marcia, canalizzazioni, ridisegno geometria, utilizzo di nuovi impianti semaforici (attuati).

Il PUT per conseguire gli obiettivi prefissi opera anche sulla domanda di trasporto tendendo a favorire o meno i diversi modi di trasporto.

Più precisamente si individuano **quattro componenti fondamentali del traffico**, in base alla priorità che hanno l'una rispetto l'altra nella scala dei valori all'interno del piano; esse sono:

- 1) Circolazione pedoni.
- 2) Movimento dei veicoli collettivi con fermate di linea.
- 3) Movimento di veicoli motorizzati senza fermate di linea (autovetture, motoveicoli, veicoli commerciali, etc.).
- 4) Sosta di veicoli motorizzati, in particolare relativa alle autovetture private.

L'adozione di questa scala dei valori rappresenta una precisa strategia del piano per cui, nel caso di congestione di una strada per la presenza contemporanea delle quattro componenti, il problema viene risolto eliminando in primo luogo la sosta dei veicoli e successivamente, se persiste la condizione di congestione, eliminando le altre componenti di traffico nell'ordine inverso rispetto a quello sopra indicato.

Altro modo per intervenire sulla domanda di trasporto consiste nel fornire opportune alternative spaziali (individuazione di itinerari alternativi per i flussi veicolari e spazi di sosta alternativi), modali (orientando la domanda verso i modi di trasporto pubblico) e temporali (sfalsamento degli orari di inizio e fine lavoro per le attività commerciali, per gli uffici pubblici, per le scuole, etc.).

Per quanto riguarda le alternative modali si tende ad incentivare l'uso dei mezzi di trasporto collettivo, da un lato con il miglioramento del servizio e con l'offerta di opportuni parcheggi di scambio e dall'altro con provvedimenti di tariffazione della sosta su strada e di "*road pricing*" che tendano a disincentivare l'uso dell'automobile.

In fig. 3.1 è riportato uno schema riassuntivo degli obiettivi e delle strategie previste nelle direttive.

**FIG. 3.1**

## 1.2) Articolazione, contenuti e procedure di adozione/attuazione.

### 1.2.1) Articolazione e contenuti progettuali.

Il PUT, in funzione del grado di affinamento delle proposte di intervento e dei livelli approvati, viene suddiviso in tre livelli di progettazione, rappresentativi anche del suo specifico iter di approvazione da parte degli organi istituzionali competenti.

Il **primo livello** di progettazione è il **Piano generale del traffico urbano (PGTU)**, inteso come progetto preliminare relativo all'intero centro abitato (scelte complessive di gestione della rete stradale e in generale della mobilità).

Esso deve indicare la politica intermodale adottata, la qualificazione funzionale dei singoli elementi della viabilità principale e degli eventuali elementi della viabilità locale destinata esclusivamente ai pedoni, il dimensionamento preliminare degli interventi previsti ed il loro programma generale di esecuzione (priorità di interventi).

Con riferimento alla domanda di mobilità delle quattro componenti fondamentali del traffico prima definite il PGTU deve proporre contestualmente:

- 1) Il *progetto di miglioramento della mobilità pedonale*, con eventuale definizione di piazze, strade, itinerari od aree pedonali (AP) e delle zone a traffico limitato (ZTL) o comunque a traffico pedonalmente privilegiato.
- 2) Il *progetto di miglioramento della mobilità dei mezzi collettivi pubblici*, con definizione delle eventuali corsie e/o carreggiate stradali ad essi riservate, dei principali nodi di interscambio, degli eventuali parcheggi di scambio con il trasporto privato e dell'eventuale piano di riorganizzazione delle linee esistenti e delle loro frequenze.
- 3) Il *progetto di riorganizzazione dei movimenti dei veicoli motorizzati privati*, con la definizione dello schema generale di circolazione veicolare (per la viabilità principale) e della viabilità tangenziale per il traffico di attraversamento.
- 4) Il *progetto di riorganizzazione della sosta delle autovetture*, con la definizione delle strade di parcheggio, delle aree di sosta a raso (fuori strada) e delle possibili aree per i parcheggi multipiano.

Gli elaborati progettuali del PGTU devono essere redatti in scala da 1:25.000 fino a 1:5.000 (ed eccezionalmente valori inferiori), in funzione delle dimensioni del centro abitato, e devono essere accompagnati da una relazione tecnica contenente gli effetti previsti dall'attuazione del piano sulla domanda di mobilità e la descrizione dei dati e dei metodi di calcolo utilizzati.

Qualora tra gli interventi del PGTU sono previste opere di rilevante onere sia finanziario che economico, la relazione anzidetta deve essere integrata con le specifiche analisi di convenienza economica (benefici/costi) e di fattibilità finanziaria delle opere medesime.

Il **secondo livello** di progettazione è quello dei **Piani particolareggiati del traffico urbano**, intesi quali progetti di massima per l'attuazione del PGTU; essi riguardano ambiti territoriali più ristretti di quelli dell'intero centro abitato (circoscrizioni, settori urbani, quartieri, etc.).

Gli interventi previsti devono costituire dei *lotti funzionali*, nel senso che con la loro attuazione non deve peggiorare la situazione del traffico nelle aree circostanti a quella di intervento.

I piani particolareggiati devono indicare il dimensionamento di massima degli interventi previsti per tutta la viabilità, principale e locale, all'interno del rispettivo ambito territoriale di studio con i rispettivi schemi di circolazione.

I piani particolareggiati riguardano:

- i progetti per le strutture pedonali (marciapiedi, attraversamenti, aree pedonali, aree a traffico limitato, etc.);
- il tipo di organizzazione delle fermate, dei capilinea e dei punti di interscambio tra i mezzi collettivi e quelli privati (eventuali corsie riservate, progetto di massima dei parcheggi di interscambio, etc.); inoltre il piano di dettaglio per la riorganizzazione delle linee esistenti e delle loro frequenze (piano della mobilità);
- gli schemi dettagliati di circolazione per i diversi itinerari della viabilità principale e della viabilità di servizio, il tipo di organizzazione delle intersezioni stradali della viabilità principale ed il piano generale della segnaletica verticale;
- il tipo di organizzazione della sosta: spazi laterali della viabilità principale; strade-parcheggio; aree di sosta esterne alle aree stradali; eventuali parcheggi multipiano; eventuale organizzazione della tariffazione e/o limitazione della sosta di superficie.

Gli elaborati progettuali del secondo livello devono essere redatti in scala da 1:5.000 a 1:1.000 (o eccezionalmente più dettagliata) e devono essere accompagnati da una relazione tecnica comprendente il proporzionamento degli interventi proposti, i dati, le analisi ed i metodi di calcolo utilizzati; inoltre deve essere data una stima sommaria dei costi di intervento e, se sono previsti interventi strutturali di rilevante impegno economico, una analisi di convenienza economica e di fattibilità finanziaria.

Il **terzo livello** di progettazione è quello dei **Piani esecutivi del traffico urbano**, intesi come progetti esecutivi dei Piani particolareggiati del traffico urbano.

La progettazione esecutiva può riguardare l'intero complesso degli interventi previsti da un singolo piano particolareggiato, ovvero singoli lotti funzionali all'interno di esso.

Detti piani esecutivi definiscono completamente gli interventi proposti nei rispettivi piani particolareggiati (sistemazioni sedi viarie, canalizzazione delle intersezioni, protezione delle corsie e delle sedi riservate, segnaletica, etc.); in essi devono essere compresi il piano di "potenziamento e/o ristrutturazione del servizio di vigilanza urbana" e le "campagne di informazione e di sicurezza stradale".

Gli elaborati progettuali del terzo livello devono essere redatti in scala da 1:500 fino a 1:200 o valori inferiori, e devono essere accompagnati da una relazione tecnica comprendente anche la valutazione dettagliata dei computi metrici estimativi necessari per la determinazione dei costi di intervento, nonché la redazione del piano finanziario per la realizzazione e la gestione degli interventi stessi.

Per i centri urbani di modesta dimensione, soprattutto se interessati da fenomeni stagionali di affluenza turistica, il secondo e terzo livello possono essere riuniti in un'unica fase (**Piani di dettaglio**).

Nel PUT, dopo la redazione del PGTU ed a sua integrazione, possono essere redatti dei **Piani di settore**, riguardanti specifici componenti del traffico (portatori di handicap, velocipedi, etc.), altri argomenti di studio (ad es. l'arredo urbano) o specifici strumenti di attuazione (regolazione semaforica, segnaletica di indicazione, vigilanza urbana, etc.).

Nelle figg. 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 sono riportati degli schemi relativi all'articolazione ed ai contenuti progettuali dei PUT.

**FIG. 3.2**

**FIG. 3.3**

**FIG. 3.4**

**FIG. 3.5**

### 1.2.2) Procedure di adozione.

L'obbligo di adozione del PUT entro un anno dall'emanazione delle direttive si riferisce alla redazione ed approvazione del PGTU; è da precisare che qualora le regioni non abbiano ancora emanato gli elenchi dei comuni tenuti all'adozione del PUT, il termine di un anno parte dalla data di predisposizione dei suddetti elenchi che comunque deve avvenire entro due mesi dalla data di pubblicazione delle direttive stesse.

I comuni interessati all'attuazione del PUT hanno quindi l'obbligo di:

- adottare entro un anno il Piano generale del traffico urbano (PGTU);
- portarlo completamente in attuazione nei due anni successivi attraverso la redazione dei relativi Piani particolareggiati e Piani esecutivi (per i comuni tra 300.000 ed 1.000.000 di abitanti questo limite è esteso a tre anni; per i comuni al di sopra del milione di abitanti il limite è esteso a quattro anni);
- provvedere all'aggiornamento del PUT per ciascuno dei bienni successivi, con un anno di tempo per l'adozione delle sue varianti e l'anno susseguente per l'attuazione dei relativi interventi.

L'incarico della redazione del PGTU dovrà essere affidato a tecnici specializzati del personale del comune e/o ad esperti specializzati esterni, inclusi in un apposito albo di esperti in materia di Piani del traffico in corso di predisposizione presso il Ministero dei lavori pubblici. Ove necessario l'incarico di redazione del Piano viene affidato tramite un "sistema concorsuale per titoli".

Una volta redatto, il PGTU viene adottato dalla giunta comunale e depositato per trenta giorni in visione del pubblico (con possibilità di presentare osservazioni e suggerimenti); successivamente il consiglio comunale delibera sulle proposte di Piano e sulle eventuali osservazioni (con la possibilità di apportare modifiche) e procede infine alla sua adozione definitiva. Lo stesso iter di adozione si deve seguire nel caso di varianti al PGTU di notevole importanza; varianti modeste sono direttamente oggetto di ordinanze del sindaco.

In fig. 3.6 è riportato uno schema relativo alle procedure di adozione del PUT.

**FIG. 3.6**

### 1.3) La gestione ed il controllo dei Piani urbani del traffico.

Il PUT è un piano di breve periodo che prevede un aggiornamento biennale; nel periodo di tempo che intercorre tra l'adozione di un PUT e l'approvazione di quello successivo bisogna verificare le previsioni di funzionamento effettuate in fase di progettazione e monitorare il grado di raggiungimento degli obiettivi prefissati.

A tal proposito nelle “*direttive per la redazione, adozione ed attuazione dei Piani urbani del traffico*” sono riportate delle indicazioni riguardanti la gestione ordinaria e la gestione dell'emergenza dei PUT.

#### 1.3.1) Gestione ordinaria.

Per *gestione ordinaria* del PUT si intende l'attività di rispetto, controllo e aggiornamento delle discipline di traffico imposte in seguito all'attuazione del PUT.

Affinché il PUT dia dei risultati soddisfacenti è necessario far rispettare le discipline imposte dal piano riguardanti la fluidità della circolazione e la sicurezza stradale; ciò comporta l'attuazione dei piani settoriali relativi al “potenziamento e/o ristrutturazione del servizio di vigilanza urbana” e alle “campagne di informazione e sicurezza stradale”.

E' poi fondamentale una attività di controllo su strada dell'efficacia degli interventi previsti dal PUT, che si basa essenzialmente sul **monitoraggio del traffico** e sul confronto tra i dati “prima e dopo” l'attuazione delle nuove discipline di circolazione stradale.

I dati da raccogliere in fase di monitoraggio riguardano i cinque parametri di seguito elencati:

- i *flussi veicolari* alle intersezioni e in alcune sezioni tipo della viabilità principale, col fine di controllare e verificare la validità della regolazione semaforica e dei metodi previsionali e di simulazione adottati in fase di redazione del PUT;
- le *velocità di percorrenza* veicolare per i mezzi pubblici e privati sui diversi itinerari della viabilità principale, così da controllare il raggiungimento ed il mantenimento dei livelli di fluidità della circolazione previsti dal Piano ed individuare i punti critici del sistema;
- la presenza di *sosta veicolare* nelle diverse zone urbane, in modo da verificare che la politica adottata abbia condotto al *modal split* di progetto; inoltre si deve evitare che veicoli in sosta vietata sulla viabilità principale creino nuovi punti di congestione del traffico;
- il numero di *passeggeri sulle tratte significative della rete di trasporto pubblico* (dove esistente);

- tipologia e numero degli *incidenti stradali*, così da verificare il raggiungimento dell'obiettivo sicurezza ed individuare gli argomenti da trattare nelle campagne di sicurezza stradale.

Oltre a questi è necessario raccogliere dati sul grado di inquinamento acustico ed atmosferico delle diverse zone, così da poter intervenire là dove è necessario.

La raccolta di questi dati ed il loro confronto con quelli della situazione precedente consentono di controllare l'esercizio della rete stradale, delle aree di sosta e del sistema di trasporto collettivo, di individuare dei miglioramenti da apportare al PUT durante la sua attuazione ed infine di avere un'ampia base-dati su cui fondare l'aggiornamento biennale del Piano.

Più precisamente l'allegato alle direttive affida alla 1<sup>a</sup> sezione dell'Ufficio tecnico del traffico (*indagini, statistiche e programmi*) il compito di organizzare le indagini per la raccolta dei suddetti dati, di archivarli in una propria "banca dati e modelli" e di elaborarli al fine di un utilizzo in fase di aggiornamento biennale del PUT; i dati cui si fa riferimento riguardano le statistiche di traffico (popolazione, parco circolante auto private - persone e merci -, passeggeri dei mezzi pubblici, etc.), le statistiche degli incidenti stradali e delle contravvenzioni (con relative mappe dei punti neri), i dati rilevati dalle indagini O/D, il catasto degli spazi pubblici stradali ed il monitoraggio continuo del traffico.

### 1.3.2) Gestione dell'emergenza.

La *gestione dell'emergenza* dei PUT concerne interventi particolari da adottare nel caso in cui, per condizioni eccezionali atmosferiche o di traffico, i limiti di inquinamento acustico o atmosferico siano superati; si possono prevedere in questi casi delle restrizioni alla circolazione dei movimenti motorizzati individuali, almeno per i veicoli che non ottemperano le più recenti norme per il contenimento delle emissioni inquinanti; è sconsigliato dalle direttive il ricorso alle targhe alterne.

Le metodologie suggerite sono:

- fluidificazione degli itinerari esterni al sistema viario tangenziale urbano, su cui deviare il traffico di attraversamento;
- parziale blocco della mobilità motorizzata individuale e contestuale aumento eccezionale della capacità della rete di trasporto collettivo, con l'istituzione temporanea di corse aggiuntive ed eventuali linee integrative.

I dati richiesti in fase di gestione devono essere raccolti sul campo con specifiche indagini riguardanti i vari aspetti trattati. Ricordiamo a tal proposito la disposizione nei punti critici della rete urbana di centraline automatiche per la misura in tempo reale della concentrazione di agenti inquinanti nell'aria.

In fig. 3.7 è riportato uno schema che riassume le principali fasi di gestione e controllo dei PUT.

**FIG. 3.7**

#### 1.4) Indagini e rilevazioni.

Per poter procedere alla redazione e gestione di un PUT è necessario rilevare i dati riguardanti i sistemi di domanda ed offerta di trasporto; sia la domanda che l'offerta devono essere esaminate in termini di movimento e sosta almeno con riferimento alle principali componenti del traffico.

In fig. 3.8 sono riportate in modo schematico le principali tipologie di indagine previste dalle direttive.

##### 1.4.1) Indagini sulla domanda di trasporto.

Le indagini relative alla domanda di trasporto vengono suddivise in:

- indagini sulla domanda di mobilità;
- indagini sulla domanda di sosta veicolare.

La **domanda di mobilità** urbana stradale, afferente ai diversi modi di trasporto, può essere descritta attraverso i flussi veicolari rilevabili sui rami della rete: in questo modo si giunge alla descrizione della domanda di trasporto relativa all'assetto attuale dell'offerta. Una simile rappresentazione è valida solo se non si prevedono variazioni sostanziali agli schemi di circolazione esistenti.

Se viceversa si ritiene di dover intervenire in modo ampio sulla configurazione attuale dell'offerta è necessario conoscere la domanda di mobilità in termini di matrice O/D degli spostamenti veicolari e/o di persone.

Le direttive precisano a riguardo che si possono utilizzare, ai fini della ricostruzione delle matrici O/D, i dati ISTAT sulla mobilità. Nel caso di utilizzazione di matrici O/D non derivanti da indagini specifiche, occorre che esse vengano tarate sulla base di rilevazioni dei flussi di traffico su strada.

Le indagini sulla **domanda di sosta** sono necessarie per descrivere la domanda stessa in termini quantitativi (n. di autovetture in sosta) e qualitativi (residenti, addetti, visitatori, etc.).

##### 1.4.2) Indagini sull'offerta di trasporto.

Le indagini necessarie alla descrizione del sistema di offerta di trasporto vengono suddivise in:

- indagini sull'offerta di trasporto: inventario della rete e mobilità;
- indagini sull'offerta di sosta.

L'inventario della rete di trasporto ha come fine quello di avviare le necessarie operazioni del catasto stradale (Art. 13 del C.d.S.); le informazioni minime da rilevare per ogni ramo stradale sono:

- caratterizzazione urbanistica;
- geometria della sede stradale;
- sensi e divieti di circolazione, divieti di svolta;
- presenza di linee di trasporto collettivo e relativi impianti fissi in sede propria;
- esistenza di impedimenti fisici condizionanti il deflusso veicolare e di fattori coadiuvanti l'inquinamento acustico ed atmosferico;
- tipologia della capacità legale di sosta e dei divieti di sosta;
- disponibilità di aree al di fuori della sede stradale utilizzabili per la sosta dei veicoli.

Le prestazioni di un ramo stradale dipendono dal numero di veicoli che lo percorrono; per questo motivo è necessario rappresentare l'offerta di mobilità di ogni ramo con una opportuna funzione denominata "curva di deflusso": essa fornisce per ciascun tronco stradale omogeneo l'andamento della velocità della corrente veicolare in funzione del flusso di traffico. E' necessario pertanto con opportune indagini tarare le curve di deflusso dei diversi rami stradali, così da poter simulare il funzionamento della rete di trasporto assegnando ad essa la domanda di trasporto.

L'offerta di sosta deve essere quantificata in termini di posti sosta consentiti dalle disposizioni vigenti (posti legali); è opportuno rilevare anche i posti disponibili in divieto di sosta e le relative motivazioni. Bisogna poi provvedere all'inventario delle aree in cui sia possibile realizzare aree di parcheggio a raso.

#### **1.4.3) Altre indagini particolari.**

Nell'allegato alle direttive sono riportate anche indicazioni relative ad altre tipologie di indagine utili o necessarie in particolari situazioni.

La prima di queste indagini è tesa al rilevamento dei flussi alle intersezioni, intesa come rilievo delle correnti veicolari distinte per categoria di veicoli e per tipo di manovra effettuata; essa è utile per progettare una razionale organizzazione della circolazione alle intersezioni.

Altra indagine prevista è quella relativa al sistema di trasporto collettivo; essa è tesa al rilevamento sia dell'offerta (percorso delle linee, ubicazione fermate, frequenze, velocità, etc.) che della domanda (numero di passeggeri sulle diverse tratte, etc.) di trasporto collettivo.

Inoltre sono previste le indagini sugli incidenti e delle analisi tese ad individuarne la causa.

Infine vi sono le indagini di controllo che rappresentano il monitoraggio del traffico di cui si è parlato in precedenza; esse servono ai seguenti scopi:

- per valutare lo stato di esercizio della rete;
- per la taratura di eventuali modelli di assegnazione del traffico;

- per quantificare l'efficacia degli interventi adottati;
- per consentire ulteriori affinamenti progettuali.

**FIG. 3.8**

## 2) Metodologie di progettazione delle reti di trasporto privato.

Le metodologie di progettazione delle reti di trasporto privato, e come si vedrà anche delle reti di trasporto pubblico, possono essere suddivise secondo tre diversi approcci: ottimizzazione, simulazione e metodi empirici (vedi fig. 3.9).

I metodi di **ottimizzazione** ricercano il valore ottimo (massimo o minimo) di una *funzione obiettivo* (f.o.) definite le variabili che in essa compaiono (*variabili del problema*) ed i *vincoli* cui esse devono soddisfare: il punto di ottimo del problema è individuato dalla n-pla di valori assunti dalle n variabili che ottimizza (massimizza o minimizza) il valore della funzione obiettivo.

I metodi di **simulazione** consistono, fondamentalmente, nel valutare le prestazioni di diverse reti di trasporto mediante degli appositi *indicatori*, che consentono di confrontare diverse ipotesi progettuali e scegliere tra esse la migliore.

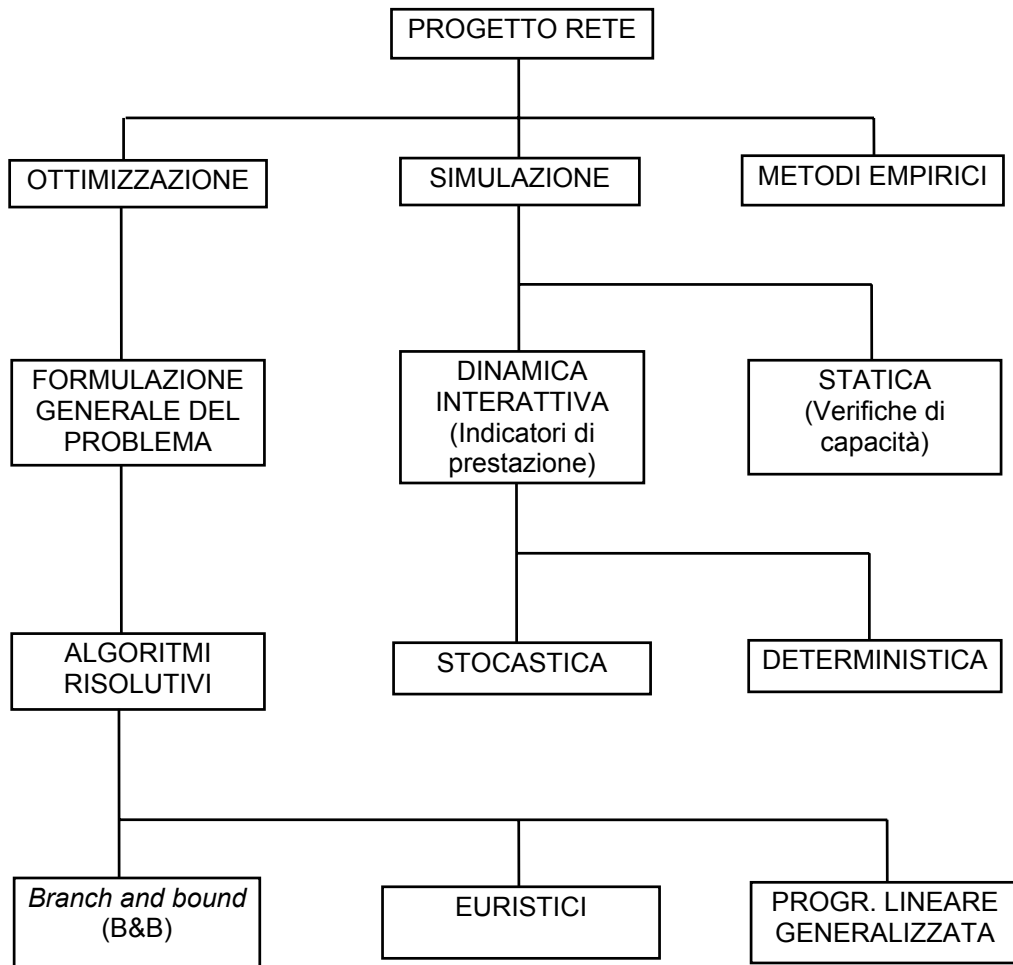
I **metodi empirici**, non trattati in questa sede perché desueti, si basano su regole empiriche più o meno generalizzate e rese rigorose da diversi autori.

Ai fini della redazione dei PUT si ritiene che le metodologie preferibili siano quelle basate sulla *simulazione*, in quanto sono le uniche che tengono conto sia dei fattori esogeni al sistema di trasporto, quali i fattori ambientali, sia della presenza di più sistemi di trasporto (pubblico, privato, pedonale) strettamente connessi tra loro. Inoltre, le stesse direttive emanate dal ministero fissano gli obiettivi da perseguire nella redazione dei PUT, obiettivi il cui grado di raggiungimento non può essere misurato col valore numerico assunto da una funzione obiettivo.

E' necessario, quindi, formulare una metodologia, che consenta di generare una serie di reti alternative di trasporto e scegliere tra esse la migliore.

Nel caso in cui il PUT debba riguardare anche il sistema di trasporto collettivo (Piano della mobilità), con la simulazione è possibile esaminare il funzionamento della rete integrata, che tenga conto sia del sistema di trasporto privato che di quello pubblico, anche se, allo stato attuale, una progettazione contemporanea delle due è improponibile.

FIG. 3.9



### 2.1) Il progetto della rete di trasporto privato mediante simulazione.

Le tecniche di simulazione per la progettazione della rete di trasporto privato possono essere suddivise in simulazione *statica*, quando si simula il funzionamento della rete per verificarne la capacità, e simulazione *dinamica interattiva*, quando si simulano e si confrontano tra loro diverse ipotesi progettuali.

La simulazione dinamica interattiva può essere, poi, *deterministica* o *stocastica*. Nel primo caso tutte le variabili che compaiono nel processo di simulazione sono considerate deterministiche, per cui non si tiene conto della aleatorietà di alcune di esse (ad es. i tempi di percorrenza dei rami); nel secondo caso, invece, si tiene conto della aleatorietà di alcuni parametri che vengono quindi considerati *variabili aleatorie*.

Le tecniche di simulazione dinamica interattiva (generalmente stocastiche, in quanto interpretano meglio la realtà del problema) consentono di confrontare tra loro diverse alternative progettuali e, cosa fondamentale, di tener conto nella loro valutazione anche di parametri esterni al sistema, quali i costi per la collettività (ad es. l'inquinamento atmosferico).

Il confronto tra le diverse alternative viene effettuato con una *analisi multiobiettivo*.

Lo sviluppo della metodologia di simulazione è riportata in figura 3.10; di essa ne esaminiamo le singole fasi.

#### A) Definizione ambito del problema.

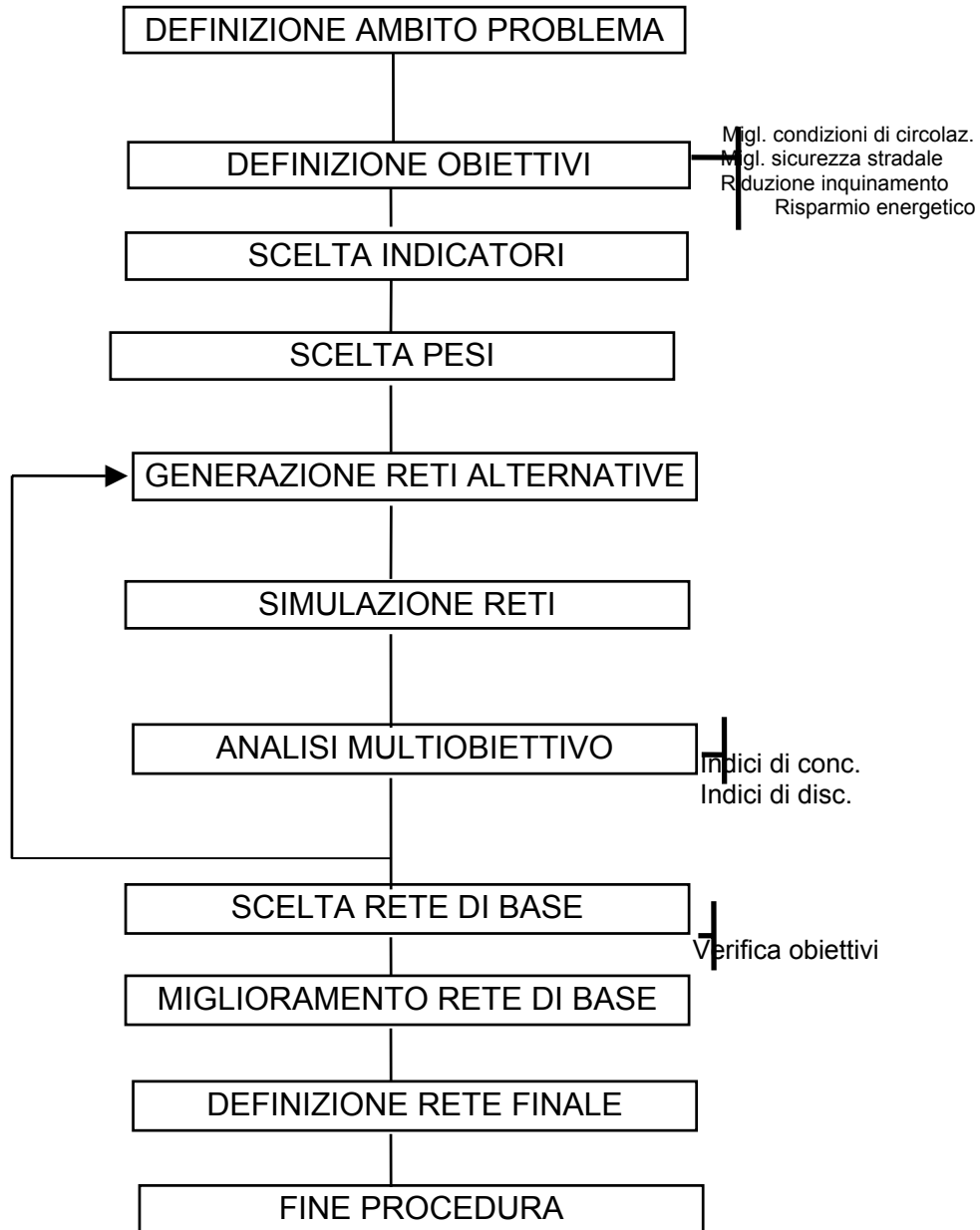
La definizione dell'ambito del problema deve essere fatta dal punto di vista spaziale, temporale e funzionale.

Dal punto di vista spaziale si intende la definizione dell'area di studio e la relativa zonizzazione.

Dal punto di vista temporale, si definisce un orizzonte temporale di due anni, corrispondente al periodo di aggiornamento del Piano urbano di traffico. I periodi di simulazione devono essere non solo quelli relativi alle ore di punta della mattina e del pomeriggio di un giorno medio della settimana nel mese di maggior carico, ma, spesso volte, anche quelli relativi a situazioni particolari, quali afflussi turistici nel finesettimana, fenomeni di pendolarismo, etc.

Con ambito funzionale si intende l'insieme delle "esternalità" che possono essere influenzate, sia in senso positivo che in senso negativo, dalla realizzazione del progetto; tra esse si deve sicuramente tener conto dell'influenza sugli altri sistemi di trasporto (variazioni nel *modal split*) e degli effetti socio-economici ed ambientali.

FIG. 3.10



*B) Definizione degli obiettivi e vincoli.*

Gli obiettivi da perseguire nella progettazione di una rete di trasporto privato tesa alla redazione dei PUT sono, come specificato nelle direttive, i seguenti:

- 1) Il miglioramento delle condizioni di circolazione (movimento e sosta).
- 2) Il miglioramento della sicurezza stradale (riduzione degli incidenti).
- 3) La riduzione degli inquinamenti acustico ed atmosferico.
- 4) Il risparmio energetico.

Inoltre è auspicabile che, nella scelta tra le diverse soluzioni alternative, si consideri anche l'obiettivo di ridurre i costi dovuti alla realizzazione ed esercizio delle stesse.

Del raggiungimento di questi obiettivi se ne terrà conto nella fase di analisi multicriteria, nella quale si effettuerà una simulazione di tutti gli effetti prodotti dalle reti da confrontare: esse saranno non soltanto quelle generate dalla procedura ma anche la soluzione attuale ed eventuali altre reti proposte. La procedura, infatti, ha anche lo scopo di valutare eventuali miglioramenti apportabili anche a tali due ultime reti.

Eventuali vincoli possono essere indicati dal decisore, o nel corso della procedura o nella fase di analisi multicriteria, fissando dei limiti ai valori assunti da alcuni indicatori di prestazione; ad esempio vengono scartate tutte le soluzioni che provocano il superamento della soglia di inquinamento atmosferico.

*C) Scelta degli indicatori.*

Gli indicatori di prestazione adottabili, per effettuare un confronto tra le diverse alternative progettuali per la rete di trasporto privato, possono essere suddivisi in base agli obiettivi cui essi si riferiscono ed alla loro utilizzazione globale o puntuale. Qui di seguito si riportano gli obiettivi ed i connessi indicatori.

*Miglioramento delle condizioni di circolazione (movimento e sosta).*

Modo privato e pedonale

- globali
  - velocità commerciale media per l'intera rete, pesata sui flussi;
  - coefficiente di saturazione medio (flusso equivalente su capacità) sull'intera rete, pesato sui flussi (affidabilità tempo di running);
  - numero di punti di conflitto alle intersezioni, pesato sui flussi (affidabilità ritardo intersezioni);

- superficie viaria riservata ai pedoni (vie ed aree pedonali) nelle AP e ZTL;
- capacità di sosta globale in posti x ora.
- puntuali
  - velocità commerciale media del ramo, pesata sui flussi;
  - coefficiente di saturazione medio (flusso equivalente su capacità) del ramo, pesato sui flussi (affidabilità tempo di running);
  - numero di punti di conflitto alla intersezione finale del ramo, pesato sui flussi (affidabilità ritardo intersezioni).

#### Rete ciclabile (ove presente)

- globali
  - estensione della rete ciclabile.

#### Indicatori di domanda

- globali
  - numero di spostamenti motorizzati per modo di trasporto (auto, modi collettivi ove presenti);
  - passeggeri \* km per modo di trasporto (ove presenti più modi collettivi).

#### *Miglioramento della sicurezza stradale.*

- globali
  - km di strade a doppio senso con una corsia per senso di marcia pesato sui flussi e sulle velocità.
- puntuali
  - numero di punti di conflitto alla intersezione finale del ramo, pesato sui flussi e sulle velocità.

#### *Riduzione degli inquinamenti atmosferico ed acustico.*

- globali

- livelli di pressione sonora equivalente in db(A) (in funzione del flusso sull'intera rete);
  - emissioni agenti inquinanti (in funzione del flusso e della velocità sull'intera rete).
- puntuali
  - livelli di pressione sonora equivalente in db(A) (in funzione del flusso sul ramo);
  - emissioni agenti inquinanti (in funzione del flusso e della velocità sul ramo).

*Risparmio energetico.*

- globali
  - consumo, specifico e complessivo, del carburante dei veicoli pubblici e privati (funzione del tempo di percorrenza e della velocità sull'intera rete).

*D) Generazione reti alternative.*

Si vuole nel seguito fornire una procedura, implementabile su calcolatori elettronici, che consenta di pervenire ad una o più reti alternative da valutare e confrontare tra di loro, con la soluzione di non progetto o con altre soluzioni, mediante analisi multicriterio [3.4]. Pertanto essa si configura come un agile Sistema di Supporto alle Decisioni (DSS) e consente, inoltre, di determinare:

- l'insieme di strade che faranno parte della rete principale urbana e la loro categorizzazione (strade primarie, di scorrimento e di quartiere);
- il loro verso di percorrenza;
- l'eventuale capacità di sosta su di esse consentita;
- un funzionamento degli incroci (semaforizzati e non) compatibile con i vincoli di normativa.

Ai fini dell'utilizzo della procedura proposta è necessario modificare la schematizzazione "classica" dell'offerta di trasporto, come descritto nel seguito.

In ogni zona si introduce un nodo di sosta, rappresentativo delle opportunità di sosta (su strada e fuori strada) presenti nella zona; tale nodo viene connesso mediante un arco connettore al centroide di zona.

Il nodo di sosta è collegato con alcuni nodi reali della rete mediante degli archi di sosta; tali archi sono orientati esclusivamente dal nodo reale verso il nodo di sosta.

Ogni nodo di sosta è collegato ad i nodi centroidi di alcune delle zone adiacenti mediante degli archi di collegamento, rappresentativi della “disutilità” che l'utente percepisce nel parcheggiare in una zona diversa da quella di destinazione. E' evidente che gli archi di collegamento conetteranno il nodo di sosta solo ai nodi centroidi delle zone che si ritengono raggiungibili pedonalmente, o su linee di trasporto collettivo (Park and Ride) dall'utente.

I nodi centroidi, inoltre, sono collegati ai nodi iniziali degli archi di sosta con archi connettori orientati dal centroide verso il nodo reale.

In figura 3.11 è riportata la schematizzazione “classica” e quella “utilizzata” per una piccola rete di trasporto.

Le funzioni di costo utilizzate per gli archi di sosta e per gli archi di collegamento sono le seguenti:

- *archi di sosta*: per gli archi di sosta il costo viene espresso, così come per gli archi connettori e per gli archi reali, in termini di tempo di percorrenza; tali archi vengono considerati congestionati e la funzione di costo utilizzata assume la seguente forma:

$$t_i = \psi \cdot t_{0i} \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot \left( \frac{f_i}{k_i} \right)^\beta \right]$$

dove:

$t_i$  = costo, espresso in forma di tempo di percorrenza, dell'arco di sosta  $i$

$t_{0i}$  = costo, espresso in forma di tempo di percorrenza, a flusso nullo dell'arco di sosta  $i$

$f_i$  = flusso sull'arco di sosta  $i$

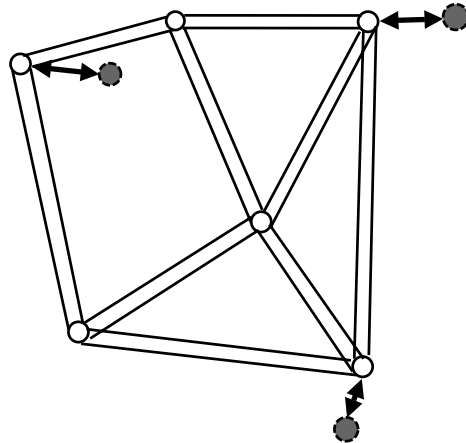
$k_i$  = capacità dell'arco di sosta  $i$

$\alpha$  e  $\beta$  = coefficienti da calibrare

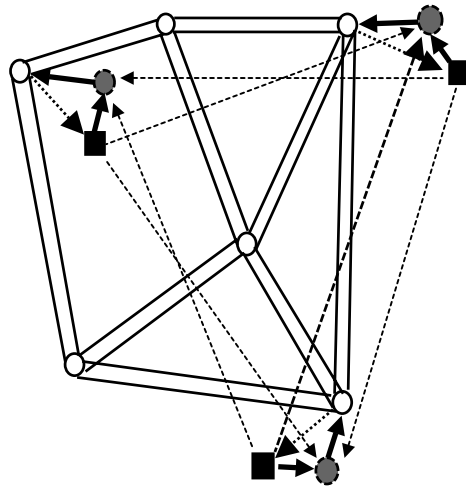
$\psi$  = peso del tempo associato all'arco di sosta rispetto al tempo di viaggio (ad es. 1,5)

Tale funzione di costo esprime in termini temporali la disutilità connessa alla ricerca del posto di sosta e all'eventuale tariffa da pagare per sostare. A tale proposito si deve precisare che si deve prevedere un arco di sosta diverso per ogni tipologia presente nella zona (libera, a pagamento, oraria, etc.); le funzioni di costo per le diverse tipologie devono essere differenti (ad es.  $t_{0i}$  diverso).

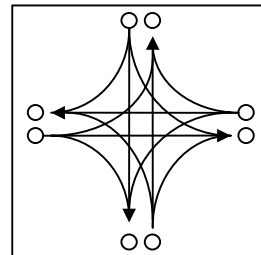
**FIG. 3.11** [3.4]  
SCHEMATIZZAZIONE CLASSICA



SCHEMATIZZAZIONE PROPOSTA



NODO ESPLOSO



La capacità di sosta  $k_i$  viene posta pari al numero di posti di sosta disponibili nella zona diviso il numero di archi di sosta presenti nella zona stessa:

$$k_i = \frac{cs_z}{nas_z}$$

dove:

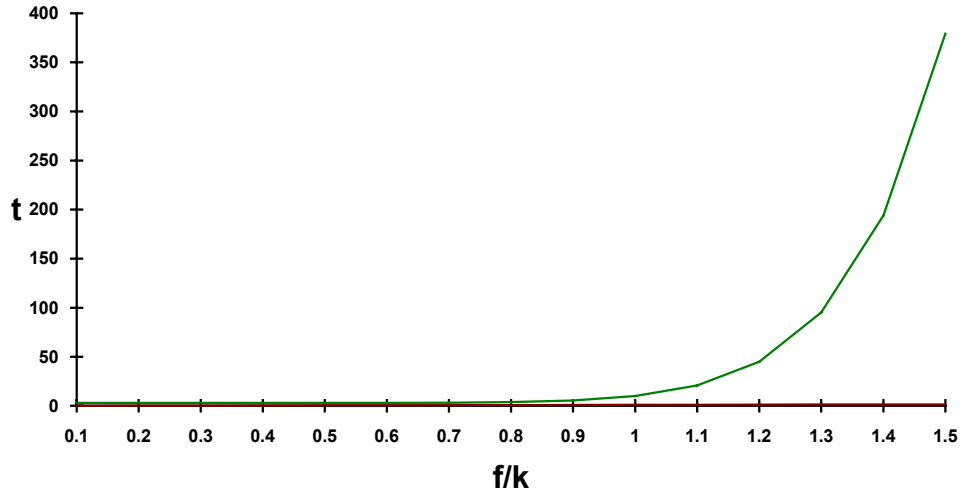
$cs_z$  = capacità di sosta della zona  $z$  cui appartiene l'arco di sosta  $i$

$nas_z$  = numero di archi di sosta presenti nella zona  $z$

I coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  dovranno essere opportunamente calibrati; ci si aspetta una funzione che abbia un andamento quasi costante fino a che  $f/k$  è minore di 1 e con un gradiente molto elevato per  $f/k > 1$  (fig. 3.12). Infatti, un grado di saturazione  $> 1$  per gli archi di sosta è indice di autovetture parcheggiate in divieto di sosta nella zona, che viene percepito dagli utenti come un notevole costo (probabilità di multa).

FIG. 3.12

[3.4]



- *archi di collegamento*: agli archi di collegamento si attribuisce una funzione di costo, sempre espresso in forma di tempo di percorrenza, indipendente dai flussi e funzione lineare della sola lunghezza degli archi:

$$t_i = \gamma \cdot L_i$$

dove:

$t_i$  = tempo di percorrenza associato all'arco di collegamento  $i$

$L_i$  = lunghezza dell'arco di collegamento  $i$

$\gamma$  = coefficiente da calibrare ( $> 0$ ).

Per il costo dell'arco di collegamento si può utilizzare un coefficiente  $\gamma$  che sia rappresentativo di uno spostamento puramente "pedonale" oppure una funzione del tipo "pedone veloce", che tenga conto dell'eventuale presenza di linee di trasporto collettivo (Park and Ride).

Ai fini dell'utilizzo della procedura è, inoltre, necessario esplodere tutti i nodi rappresentativi di intersezioni (fig. 3.11), così da esplicitare tutte le possibili manovre con appositi archi (*archi di manovra*). Agli archi di manovra saranno attribuite delle penalità di svolta funzioni del tipo di manovra effettuata (attraversamento, svolta a destra protetta, svolta a sinistra protetta, svolta a destra permessa, svolta a sinistra permessa).

La procedura proposta, di carattere euristico, ricerca, partendo da una rete iniziale, la configurazione ottima (dal punto di vista della circolazione e della sosta) della rete stradale, generando ad ogni iterazione una configurazione migliore di quella precedente. Essa conduce, come appare evidente, a determinare un punto di ottimo locale.

*Funzione obiettivo, vincoli e filtri.*

La funzione obiettivo da minimizzare è il tempo di percorrenza tra coppie OD pesato sulla domanda per coppia OD:

$$F(A) = \min_A \frac{\sum_{od} d_{od} \cdot t_{od}(A)}{\sum_{od} d_{od}}$$

dove:

$A = A(s, c, p)$  indica una configurazione della rete funzione dei sensi di marcia ( $s$ ), dei cicli semaforici ( $c$ ) e della sosta ( $s$ )

$d_{od}$  = flusso di domanda tra la zona  $o$  e la zona  $d$

$t_{od} = t_{od}(f, s, c, p)$  tempo medio di percorrenza all'equilibrio per recarsi da  $o$  a  $d$  in corrispondenza della configurazione di rete  $A$ , funzione, tra le altre cose, dei flussi ( $f$ )

I tempi medi di percorrenza tra coppie  $od$ , per ogni configurazione di rete, vengono calcolati con una assegnazione (di equilibrio stocastico o deterministico) della domanda origine-destinazione alla configurazione stessa.

E' da specificare che il tempo di percorrenza che compare nella f.o. rappresenta il costo generalizzato che l'utente percepisce per recarsi da  $o$  a  $d$  e non l'effettivo tempo di percorrenza: esso tiene conto, infatti, anche di eventuali tariffe di sosta e della differente percezione che l'utente ha dei tempi di percorrenza dei vari archi (reali, di sosta, di collegamento).

L'utilizzo di una funzione obiettivo così costruita si giustifica sia per la semplicità di calcolo, indispensabile in un algoritmo che necessita ad ogni iterazione di calcolare più volte il valore della f.o., sia perché una riduzione del tempo medio di percorrenza implica anche altri fattori positivi, quali un basso grado di saturazione del sistema, un minore consumo energetico ed inquinamento atmosferico essendo, ovviamente, tutti legati all' "uso specifico" dell'auto. Inoltre questo tipo di funzione obiettivo, accoppiata ad una schematizzazione dell'offerta di trasporto come quella proposta, consente di poter considerare all'interno del problema il fattore "sosta", generando configurazioni di rete in cui varia l'offerta di sosta per zona.

Ad ogni iterazione la procedura, come detto, genera una configurazione di rete; tale configurazione dovrà essere una soluzione ammissibile del problema, quindi dovrà rispettare dei vincoli imposti dall'esterno: se ad una iterazione la variazione apportata alla configurazione rispetto al passo precedente provoca il non soddisfacimento di uno dei vincoli, si annulla tale variazione e, se possibile, se ne effettua un'altra.

Alcuni vincoli da imporre sono comuni a tutti i problemi di rete, quali il vincolo di connessione della rete e il vincolo di non attraversabilità dei centroidi, altri, invece, devono essere imposti per evitare di generare configurazioni di rete che siano "illogiche": ad esempio nodi reali che hanno solo archi in ingresso.

Ai vincoli propriamente detti conviene aggiungere anche dei "vincoli esterni" che tengano conto di situazioni cui potrebbe condurre la procedura e che vogliono essere evitate:

- aumento del tempo medio di percorrenza relativo ad una singola coppia O/D rispetto alla situazione attuale (o alla rete iniziale) non sopportabile dagli utenti di quella relazione:

$$t_{od}(A) \leq \eta \cdot \bar{t}_{od} \quad \forall od$$

dove:

$t_{od}(A)$  = tempo medio di percorrenza all'equilibrio per la coppia  $od$  in corrispondenza della configurazione  $A$  della rete

$\bar{t}_{od}$  = tempo medio di percorrenza all'equilibrio relativo alla coppia  $od$  nella situazione iniziale (per esempio quella di non progetto)

$\eta$  = coefficiente maggiore di 1 (ad es.:  $\eta = 1,3$ )

- generazione di “extra-traffico” (in termini di veicoli-km) sull'intera rete rispetto alla situazione attuale (o alla rete iniziale) dovute a variazioni del sistema di offerta (ad esempio l'introduzione di sensi unici) non sopportabile dal sistema (ad esempio aumento dei consumi energetici):

$$VKM(A) \leq \vartheta \cdot VKM_0$$

dove:

$VKM(A)$  = veicoli-km sull'intera rete per la configurazione  $A$

$VKM_0$  = veicoli-km sull'intera rete nella situazione iniziale

$\vartheta$  = coefficiente maggiore di 1 (ad es.:  $\vartheta = 1,3$ )

- vincoli fisici locali quali ad esempio: situazioni per le quali archi successivi costituenti una stessa direttrice abbiano verso contrario; presenza di corsie preferenziali che limitano la larghezza della strada, etc.

#### *Costruzione e definizione della configurazione iniziale.*

La configurazione di partenza della procedura può essere qualunque; da ogni configurazione di partenza si genereranno una o più soluzioni alternative da poter confrontare, tra loro e con altre soluzioni, mediante una analisi multicriteria.

In generale si possono ipotizzare tre possibili punti di partenza (tab. 3.1):

- la situazione attuale;
- una (o più) ipotesi di diversa configurazione della circolazione (situazione di “progetto”);

- la situazione di “non progetto” ossia in assenza di qualunque vincolo normativo ma con la presenza dei soli vincoli fisici della struttura stradale e di ambito di possibile intervento (autostrade, tangenziali o altro).

Tralasciando in questa sede le prime due possibilità che variano caso per caso, ci si sofferma solo sulla terza che è, peraltro, la più generale.

La configurazione iniziale di “non progetto” viene costruita considerando tutte le strade del centro abitato, tranne quelle sicuramente a servizio locale (strade con un solo ingresso, strade con larghezza totale inferiore a 2,5 m, strade con elevato grado di tortuosità o forte pendenza, etc.), le strade riservate ai veicoli di trasporto collettivo, e quelle che, attualmente o per volere dell'amministrazione, risultano essere strade pedonali.

Si individua, così, un insieme di strade che possono entrare a far parte della rete principale urbana (strade primarie, strade di scorrimento e strade di quartiere): tale insieme viene indicato con SRPU.

Successivamente si individuano tra esse quelle per le quali esistono vincoli fisici o gestionali di utilizzazione.

Pertanto si partiziona l'insieme SRPU in tre sottoinsiemi:

- $SRPU_1$  strade che devono essere necessariamente a senso unico in uno dei due versi (vincolo fisico);
- $SRPU_0$  autostrade urbane, le quali non possono essere modificate dalla procedura (vincolo gestionale);
- $SRPU_{NV}$  strade non vincolate.

Risulterà quindi  $SRPU = SRPU_1 \cup SRPU_0 \cup SRPU_{NV}$  mentre l'intersezione a due a due dei vari sottoinsiemi è l'insieme vuoto; gli insiemi su cui opera la procedura sono  $SRPU_1$  e  $SRPU_{NV}$ .

Nella configurazione iniziale tutte le strade vengono considerate a doppio senso di marcia e senza auto in sosta (la normativa pone la sosta all'ultimo livello gerarchico tra le componenti del traffico urbano): le strade dell'insieme  $SRPU_{NV}$  vengono, allora, schematizzate mediante due archi, rappresentanti i due versi di percorrenza, ognuno con larghezza pari alla metà della larghezza totale della strada; le strade dell'insieme  $SRPU_1$  vengono, fittiziamente, considerate a doppio senso rappresentandole con due archi, ancora uno per ogni verso di percorrenza, ciascuno con larghezza pari all'intera larghezza della strada.

I nodi reali vengono “esplosi” rappresentando in modo esplicito tutte le possibili manovre all'intersezione.

Vengono, inoltre, rappresentati gli archi di sosta, quelli di collegamento ed i nodi di sosta; la procedura non agisce su tali elementi tranne che per il calcolo della capacità degli archi di sosta, che può variare da configurazione a configurazione. Nella configurazione iniziale si pone la capacità di sosta di ogni zona, pari alla capacità di sosta

nella stessa zona dovuta alla presenza di parcheggi fuori strada e di strade locali (non riportate nel grafo):

$$CS_z = OS_{zfs} + OS_{zsl}$$

dove:

$CS_z$  = capacità di sosta della zona  $z$

$OS_{zfs}$  = offerta di sosta della zona  $z$  dovuta alle aree fuori strada

$OS_{zsl}$  = offerta di sosta della zona  $z$  dovuta alle strade locali

**TAB. 3.1** [3.4]

| <b>CONFIGURAZIONE →</b>                                  | <b>ATTUALE</b> | <b>PROGETTO</b> | <b>NON PROGETTO</b> |
|----------------------------------------------------------|----------------|-----------------|---------------------|
| Presenza strade < 2,5 m                                  | NO             | NO              | NO                  |
| Presenza strade riserv. al trasp. coll.                  | NO             | SI              | NO                  |
| Presenza strade pedonali                                 | NO             | SI              | NO                  |
| Possibilità interventi su autostrade                     | NO             | NO              | NO                  |
| Presenza autostr. nello schema di rete                   | SI             | SI              | SI                  |
| Presenza sosta su archi reali                            | NO             | NO              | NO                  |
| Calcolo offerta di sosta su strade locali o fuori strada | SI             | SI              | SI                  |
| Nodi esplosi                                             | SI             | SI              | SI                  |
| Rappresentazione esplicita della sosta                   | SI             | SI              | SI                  |
| Alcuni sensi unici predefiniti                           | SI             | SI              | NO                  |

#### *Metodologia di ricerca di ottimo locale.*

Partendo dalla configurazione iniziale prescelta, la procedura si sviluppa in due parti successive:

- 1) definizione versi di marcia per le strade a senso unico (insieme  $SRPU_1$ ), nel solo caso in cui la configurazione iniziale è quella di “non progetto”;
- 2) ricerca di un ottimo locale per la configurazione della rete (sensi unici, doppi sensi, divieti di svolta, sosta).

Inizialmente si opera solo sugli archi rappresentativi del sottoinsieme di strade  $SRPU_1$ . Una prima soluzione consiste nell'utilizzare i sensi unici previsti nella situazione attuale

specie se essi rappresentano già una maglia con alternanze di sensi unici in una direzione e nella direzione opposta. Qualora ciò non esistesse, ovvero si volesse rivedere l'orientamento di tutti o alcuni di essi si può procedere come segue. Effettuata una assegnazione dei flussi di traffico alla rete, si calcola, per ogni arco del suddetto insieme, il grado di saturazione pesato sui flussi e sulla lunghezza dei rami  $gs_p$  dato da:

$$gs_p = \frac{f}{C} \cdot f \cdot l \quad (1)$$

dove:

$gs_p$  = grado di saturazione pesato sui flussi e sulla lunghezza dei rami

$C$  = capacità dell'arco

$f$  = flusso sull'arco

$l$  = lunghezza dell'arco

Si crea una lista di archi dell'insieme  $SRPU_1$  in ordine decrescente di  $gs_p$ . Si estrae il primo ramo della lista, si "conserva" l'arco estratto e si elimina l'inverso, scegliendo così per ogni strada il verso di percorrenza. Ogni volta che si elimina un arco si effettua la verifica di connessione; se la verifica è negativa si sceglie il verso di percorrenza opposto. Lo schema della prima parte della procedura è riportato in fig. 3.13.

Una volta decise le strade che non possono che essere a senso unico per vincoli fisici, si passa alla seconda parte della procedura. In essa si effettua in primo luogo una assegnazione dei flussi di traffico alla rete di trasporto e si calcola il valore assunto dalla f.o. in corrispondenza della situazione iniziale; si calcola, inoltre, per ogni intersezione, la durata minima del ciclo semaforico utilizzando, ad esempio, le formule semplificate proposte dalle norme CNR.

Si individuano gli archi per i quali il rapporto  $f/c$  supera un prefissato valore limite; si tenga presente che fissare un valore limite basso del rapporto  $f/c$  orienta la procedura verso una soluzione con un maggior numero di strade a senso unico; viceversa, un elevato valore limite del rapporto  $f/c$  conduce a configurazioni con un maggior numero di strade a doppio senso di marcia. Gli archi così individuati sono detti "archi critici".

Si consideri che, per l'andamento che hanno le funzioni di costo, non conviene abbassare il valore  $f/c$  al di sotto di 0,7.

Analogamente si individuano tutte le intersezioni per le quali la durata minima del ciclo semaforico eccede il limite di normativa [3.3] di 120 sec, dette "intersezioni critiche".

E' da precisare che anche nel caso delle intersezioni ci si trova alle prese con un problema di equilibrio: le durate dei cicli semaforici dipendono dai flussi che impegnano le intersezioni, i quali, a loro volta, dipendono, tra gli altri, dai tempi di attesa alle intersezioni stesse che, per intersezioni semaforizzate sono funzione della durata del ciclo. Per superare questo problema si considerano, in prima istanza, tutte le intersezioni come non semaforizzate; in funzione dei flussi assegnati alla rete così ottenuta vengono calcolati i cicli semaforici laddove, secondo normativa, è necessario disporre un impianto semaforico ( $C_{\min} > 30$  sec). Si effettua, quindi, una nuova assegnazione ed un ricalcolo dei cicli e si procede con successive iterazioni fino a che la differenza tra i flussi calcolati in due iterazioni successive non è minore di un valore soglia prefissato. Non è dimostrata la convergenza all'equilibrio, essendo le funzioni di costo alle intersezioni non separabili (il costo su un arco dipende anche dai flussi su altri archi della rete); per tale motivo si prevede comunque di arrestarsi alla terza iterazione.

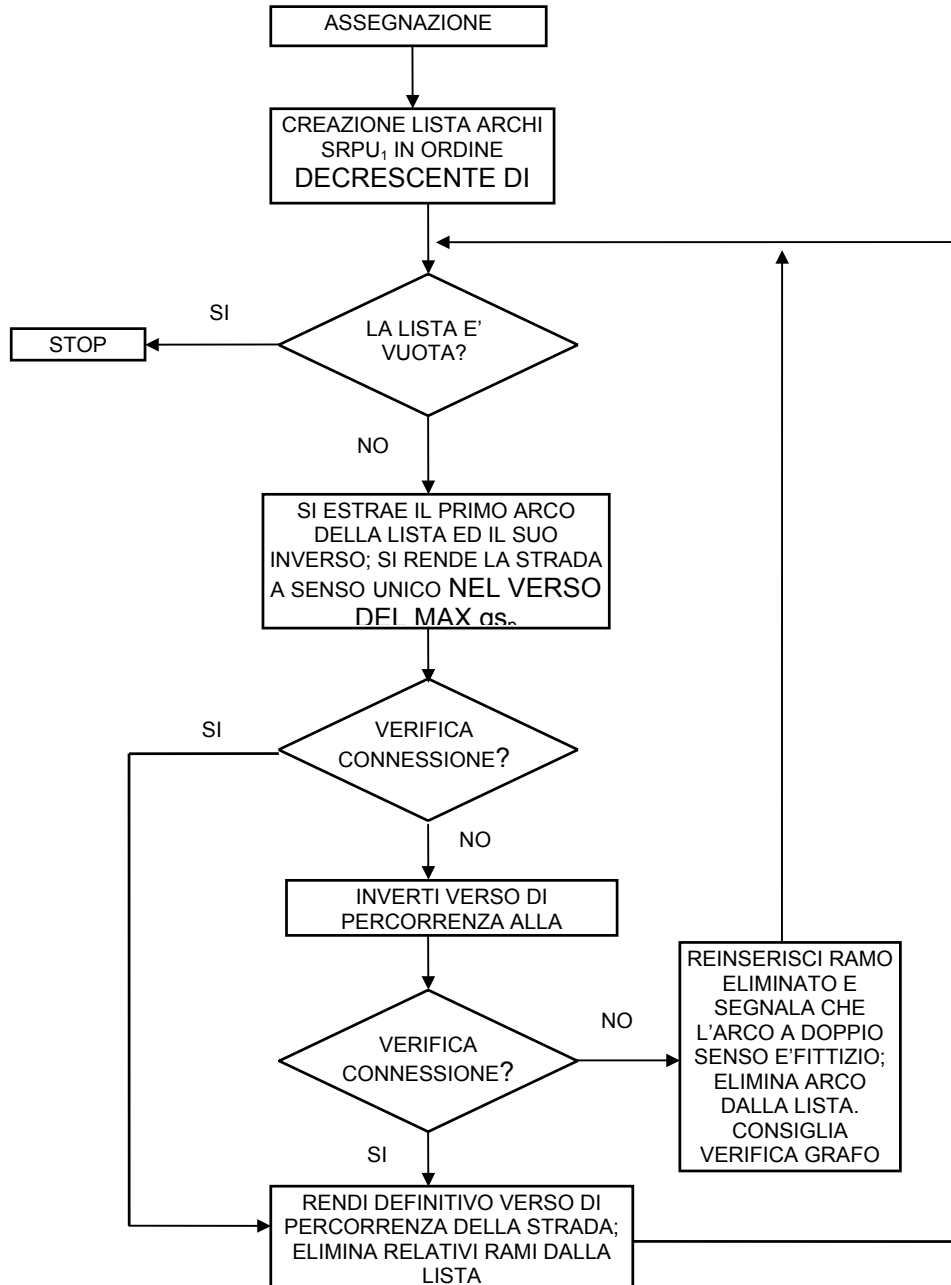
In ogni zona si calcola, poi, il grado di saturazione medio degli archi di sosta della zona e per ogni zona si individuano gli archi reali con un grado di saturazione minore di un limite prefissato (ad es. 0,2); essi costituiscono l'insieme dei rami "utili per la sosta".

Ottenuti i due insiemi di elementi critici e l'insieme di elementi "utili per la sosta" del sistema, la procedura effettua, per ciascun elemento e indipendentemente dagli altri, un intervento che tenda a diminuire il valore della f.o.:

- *archi critici*: si rende a senso unico la strada corrispondente all'arco critico, eliminando dal grafo l'arco opposto ed aggiornando larghezza e funzioni di costo del primo; in contemporanea si aggiornano le configurazioni delle manovre di svolta ed i tempi di verde alle intersezioni iniziali e finali dell'arco in questione;
- *intersezioni critiche*: per tutte le manovre di svolta a sinistra all'intersezione si calcola il volume di conflitto con il flusso di attraversamento dall'accesso opposto; si vieta la svolta a sinistra corrispondente al massimo di questi volumi di conflitto;
- *elementi utili per la sosta*: se anche l'arco inverso ha un grado di saturazione minore del limite prefissato, si elimina l'arco ed il suo inverso dal grafo, declassando quindi la strada a strada locale; se invece ciò non accade si elimina solo l'arco in questione (rendendo perciò la strada a senso unico nel verso più carico) e si declassa la strada a locale interzonale. In entrambi i casi si incrementano le capacità degli archi di sosta della zona in funzione del numero di posti di sosta ricavabili sull'arco stesso; se l'eliminazione dell'arco non verifica filtri e vincoli si vede se è possibile disporre su di esso la sosta lasciando la strada a doppio senso, diminuendo la larghezza utile per la circolazione; anche in questo caso la strada è declassata a locale interzonale.

FIG. 3.13

[3.4]



Ogni volta che si effettua una variazione si verificano i vincoli: se la verifica non ha successo la variazione viene annullata e si passa alla successiva.

Per ogni configurazione ottenuta a seguito dell'intervento si calcola il valore della funzione obiettivo e la differenza dello stesso rispetto al valore iniziale; se tra queste configurazioni ne esistono una o più che hanno migliorato il valore della funzione obiettivo rispetto al precedente, si assume come nuova configurazione quella corrispondente al miglioramento massimo e si effettua una nuova iterazione.

Si prosegue fino a giungere ad una configurazione di rete per la quale una qualsiasi variazione effettuata sugli elementi dei tre insiemi sopra definiti non provoca più un miglioramento al valore della f.o.

Lo schema generale della procedura è riportato in fig. 3.14.

La convergenza dell'algoritmo è assicurata dalla struttura dello stesso algoritmo e dal fatto che il numero di soluzioni è finito; infatti, essendo il numero di soluzioni finito e generandosi in ogni passo una soluzione diversa, cui corrisponde un miglioramento della funzione obiettivo, nella peggiore delle ipotesi si esploreranno tutte le soluzioni, ma comunque si effettuerà un numero finito di iterazioni.

#### *Possibili semplificazioni della procedura.*

La procedura sopra esposta richiede, così come è stata descritta, dei tempi operativi abbastanza elevati; basti, infatti, pensare che ad ogni iterazione è necessario effettuare una assegnazione per ognuno degli  $n$  "archi critici", delle  $m$  "intersezioni critiche" e degli  $p$  "archi utili per la sosta", il che può risultare molto oneroso per reti reali. L'applicazione in "forma completa" è sicuramente possibile se si implementa in automatico l'intera procedura e se si dispone di apparecchiature hardware sufficientemente sofisticate e veloci.

E' possibile, però, proporre delle semplificazioni che consentono di operare anche in modo "interattivo" e su elaboratori elettronici di capacità più limitate, riducendo il numero di assegnazioni da effettuare ad ogni iterazione.

Si può, pertanto, calcolare per tutti gli archi critici il grado di saturazione medio pesato sui flussi e sulla lunghezza dei rami ( $g_{sp}$ ) come dato dalla (1) ed ordinarli per  $g_{sp}$  decrescente ed operare solo sui primi  $n' < n$  (ad es.  $n'=5$ ); analogamente si ordinano le intersezioni critiche per durata del ciclo minimo decrescente e si opera sulle prime  $m' < m$  (ad es.  $m'=5$ ); inoltre, per ogni arco "utile per la sosta" si calcola il rapporto tra il grado di saturazione dell'arco stesso e il grado di saturazione medio degli archi di sosta della zona:

$$G_{sm} = \frac{f / C}{g_{ss}}$$

dove, oltre ai termini già definiti,  $g_{ss}$  è il grado di saturazione medio degli archi di sosta presenti nella zona

Si ordinano quindi gli archi utili per la sosta per  $G_{sm}$  crescenti e si opera solo sui primi  $p' < p$  archi.

Altre forme di semplificazione sono:

- A) porre  $m' = 0$ , cioè operare senza intervenire sulle intersezioni;
- B) porre  $m' = n' = p' = 1$  calcolando, così, il valore della f.o. solo tre volte ogni iterazione;
- C) porre alternativamente in ogni iterazione uno dei tre indici  $m$ ,  $n$  e  $p = 1$  e gli altri uguali a zero; in questo caso l'elemento su cui intervenire è unico in ogni iterazione;
- D) operare prima solo sulle intersezioni, poi solo sulle strade ed infine solo sulla sosta;

Allo stato attuale si stanno analizzando se tali approssimazioni conducono comunque ad una procedura utilizzabile e quali approssimazioni si compiono in questi casi.

#### *E) Simulazione del funzionamento delle reti.*

La fase della simulazione consiste fondamentalmente nell'assegnare la domanda di trasporto alla rete ricavando così i flussi sugli archi e calcolando i relativi indicatori di prestazione.

Nell'ipotesi in cui non è presente un sistema di trasporto pubblico, ipotesi di seguito rimossa, si può ritenere che la domanda di trasporto sulla rete privata tra ogni coppia O/D sia rigida; in questo caso la domanda di trasporto tra ogni coppia OD sarà la stessa per tutte le reti alternative.

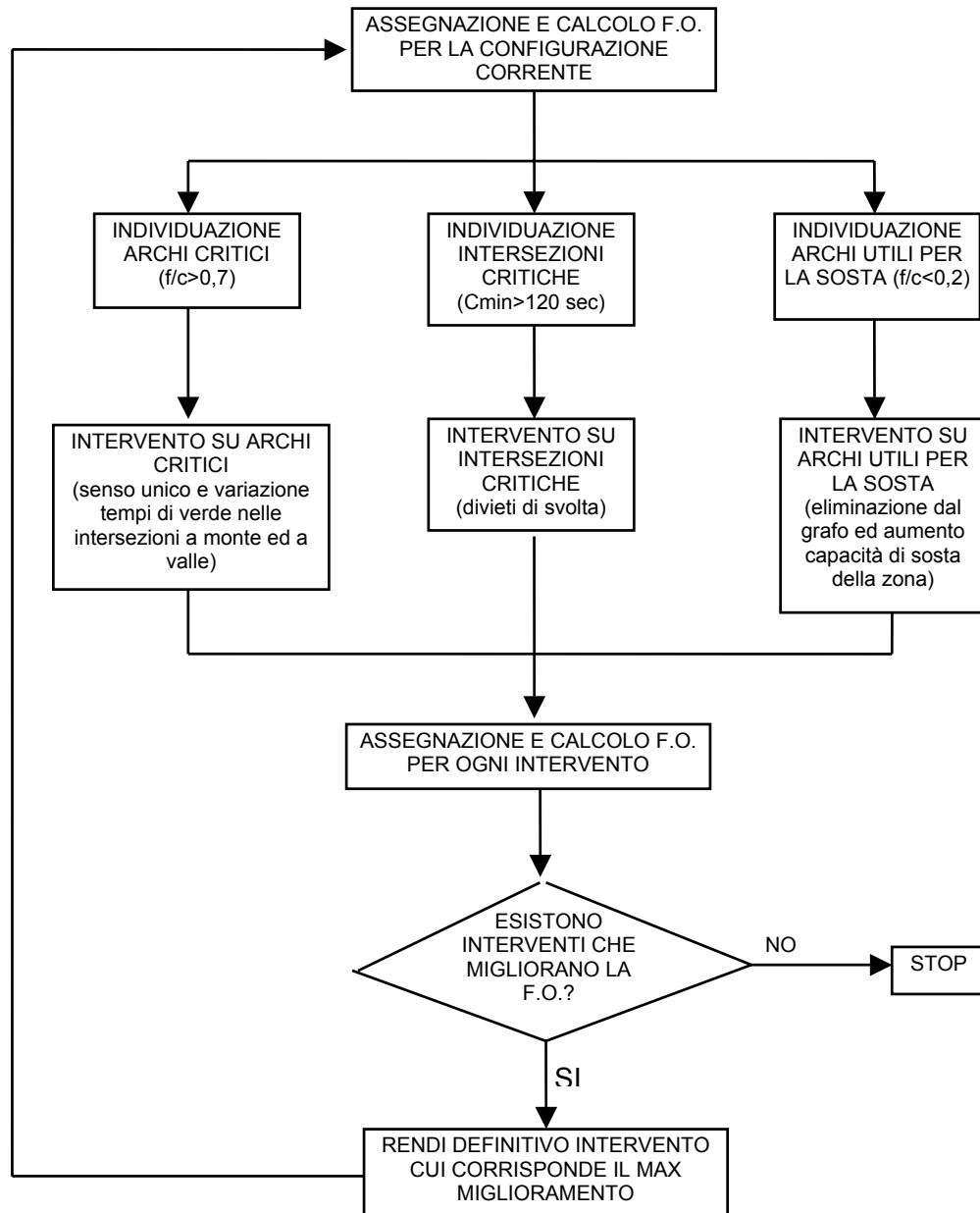
L'assegnazione può essere effettuata con una delle metodologie in genere utilizzate per il calcolo dei flussi su reti congestionate (DUE o SUE).

#### *F) Valutazione delle alternative.*

Il confronto tra le varie alternative avviene, con una procedura di valutazione multiobiettivo; essa sarà trattata in un prossimo paragrafo.

FIG. 3.14

[3.4]



### 3) Le metodologie di progettazione dell'esercizio del trasporto pubblico.

La progettazione di una rete di trasporto collettivo, ove il veicolo non risulti vincolato alla sede, consiste nel definire, in base alla rete stradale esistente e alla domanda di trasporto sul territorio, i percorsi delle linee, la frequenza dei convogli, la dimensione dei veicoli, l'ubicazione delle fermate e dei capilinea.

Le metodologie proposte per affrontare e risolvere tale problema, analogamente a quanto visto per il trasporto privato, possono essere suddivise secondo tre diversi approcci: ottimizzazione, simulazione e metodi empirici.

Per il trasporto pubblico sono usualmente impiegati sia i metodi di ottimizzazione che di simulazione, mentre sono poco utilizzati i metodi empirici.

#### 3.1) Metodi di ottimizzazione per il progetto di una rete di trasporto pubblico.

Le tecniche di ottimizzazione, sviluppatesi a partire dagli anni '70, si basano sulla minimizzazione di una funzione obiettivo che contenga i costi per gli utenti e i costi per l'azienda; le variabili del problema dovranno essere soggette ad una serie di vincoli (di continuità nei nodi, di capacità degli archi ed, eventualmente, di budget oltre ai vincoli di non negatività).

Detto  $A$  l'insieme degli archi ed  $N$  l'insieme dei nodi, il problema generale di ottimo, nel caso *multicommodity* (cioè su uno stesso ramo distinguiamo diversi tipi di flusso), può essere così formalizzato:

funzione obiettivo

$$\text{Min } \Phi(f, y) = \sum_k \sum_{ij} C_{ij}^k \cdot f_{ij}^k + \sum_{ij} F_{ij} \cdot Y_{ij}$$

variabili

$f_{ij}^k$  = flusso sull'arco  $ij$  della *commodity*  $k$ ;

$Y_{ij}$  = variabile binaria che vale 1 se l'arco  $ij$  appartiene alla rete (arco aperto), vale 0 se l'arco  $ij$  non appartiene alla rete (arco chiuso).

Inoltre:

$C_{ij}^k$  = costo di percorrenza dell'arco  $ij$  per la *commodity*  $k$  (per i sistemi di trasporto collettivo può essere considerato indipendente dai flussi);

$F_{ij}$  = costo di esercizio dell'arco  $ij$  (rappresenta i costi per l'azienda).

vincoli di continuità nei nodi

$$\sum_i f_{ij}^k - \sum_j f_{ij}^k = \begin{cases} G_j & \text{se } j \text{ origine (k)} \\ -A_j & \text{se } j \text{ destinazione (k)} \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \forall j \in N$$

Esprimono la condizione che la differenza tra il flusso che esce da ogni nodo e quello che entra è pari a 0 se il nodo non è né attrattore né generatore di flusso, mentre è pari al flusso generato ( $G_j$ ) se è generatore ed al flusso attratto ( $-A_j$ ) se è attrattore; è evidente che se un nodo è sia generatore che attrattore di flusso al secondo membro del vincolo sarà posta la differenza  $G_j - A_j$ .

vincoli di capacità dei rami

$$f_{ij} = \sum_k f_{ij}^k \leq K_{ij} \cdot Y_{ij} \quad \forall ij \in A$$

Esprimono la condizione che il flusso totale su ogni arco non può superare la capacità dell'arco stesso, la quale varrà 0 se l'arco  $ij$  è chiuso, mentre varrà  $K_{ij}$  se l'arco è aperto.

vincoli sulle variabili

$$f_{ij}^k \geq 0 \quad Y_{ij} = 0 / 1 \quad \forall ij \in A$$

Questi vincoli esprimono la condizione che il flusso non può mai essere negativo e che la variabile  $Y_{ij}$  è binaria.

Oltre ai suddetti vincoli può essere previsto anche un vincolo di *budget*:

vincolo di budget

$$\sum_{ij} e_{ij} \cdot Y_{ij} \leq B$$

dove  $e_{ij}$  è il costo di costruzione (o di esercizio) dell'arco  $ij$  e  $B$  è il *budget* totale disponibile.

Definito così il problema, per la sua soluzione sono stati proposti da diversi autori una serie di *algoritmi*, che possono essere raggruppati in tre filoni principali:

- 1) algoritmi di *branch and bound*;
- 2) algoritmi euristici;
- 3) programmazione lineare generalizzata.

Le tipologie più utilizzate sono le prime due; esse presentano, però, per reti di dimensioni reali dei problemi computazionali non indifferenti. Inoltre non riescono a simulare variabili esterne al sistema quali i riflessi sugli altri sistemi di trasporto e i costi per i non utenti (ad es. l'inquinamento acustico ed atmosferico); per questi ultimi motivi le metodologie di simulazione, trattate nel prossimo paragrafo, sono ritenute attualmente le più adatte nel campo della progettazione.

Si forniscono di seguito delle informazioni di carattere generale sugli algoritmi *branch and bound* e sugli algoritmi euristici; tra questi ultimi si esaminerà un algoritmo, che è stato spesso volte utilizzato per la progettazione delle reti di trasporto pubblico.

#### *A) Algoritmi di branch and bound.*

Gli algoritmi di *branch and bound* (B&B) sono dei metodi di soluzione di problemi di ottimizzazione discreta (variabili intere).

Nel caso di progetto di rete il problema di ottimizzazione è discreto, più precisamente binario, in quanto le variabili che individuano la presenza o meno di un arco nello schema di rete ( $Y_{ij}$ ) possono assumere valore 0 o valore 1; sulle altre variabili che compaiono nella funzione obiettivo, cioè i flussi  $f_{ij}$ , non possiamo intervenire, in quanto i valori da esse assunti dipendono dalla configurazione di rete individuata dai valori degli  $Y_{ij}$  (ipotesi di domanda rigida).

Se il numero totale di soluzioni ammissibili del problema fosse piccolo si potrebbe procedere ad una "*enumerazione totale*" delle soluzioni e scegliere tra esse quella che minimizza la funzione obiettivo; è evidente che tale via non è perseguibile per le reti reali, in cui il numero di rami è molto elevato.

La metodologia B&B effettua, invece, la ricerca della soluzione ammissibile ottima attraverso una "*enumerazione parziale*". Più precisamente essa opera nel seguente modo:

- l'insieme delle soluzioni ammissibili viene partizionato in due sottoinsiemi<sup>1</sup> la cui intersezione sia nulla e la cui unione costituisca l'insieme di partenza; questi sottoinsiemi costituiscono la lista degli insiemi candidati a contenere la soluzione ottima;
- in ciascuno stadio della procedura viene scelto un sottoinsieme dalla lista degli insiemi candidati e lo si esamina per ricercare la migliore soluzione in esso contenuto o per provare che in esso non sono contenute soluzioni ammissibili; se si verifica una di queste eventualità il sottoinsieme non deve essere più esplorato e viene eliminato dalla lista, in caso contrario esso viene partizionato ulteriormente in due sottoinsiemi, che entrano a far parte della lista di insiemi candidati a contenere la soluzione ottima;
- la procedura si itera fino a ottenere la soluzione ottima; ci si ferma perciò quando la lista diventa vuota e la soluzione ottima sarà la soluzione corrente del problema.

La procedura si basa poi sul calcolo di un limite inferiore al valore della funzione obiettivo per ogni insieme candidato.

Le componenti fondamentali di un approccio B&B sono fondamentalmente quattro:

- 1) un criterio per la partizione di un insieme candidato;
- 2) un metodo per la determinazione di un limite inferiore al valore della funzione obiettivo per un generico insieme candidato;
- 3) una strategia di eliminazione di un insieme candidato che non è necessario partizionare ulteriormente;
- 4) una strategia di ricerca per la determinazione all'interno della lista dell'insieme candidato da esplorare.

Esaminiamo queste quattro componenti con riferimento al progetto di rete.

#### *Il criterio di partizione.*

Il criterio di partizione suddivide un insieme candidato in due sottoinsiemi disgiunti la cui unione costituisca l'insieme candidato padre; in genere questi sottoinsiemi si ottengono imponendo dei vincoli aggiuntivi al problema di partenza.

Nel caso del progetto di rete, essendo le variabili binarie, si generano, da ogni insieme candidato, due sottoinsiemi imponendo al problema originario una volta il vincolo  $Y_{ij}=0$ , ottenendo così un primo sottoinsieme, e un'altra volta il vincolo  $Y_{ij}=1$ , ottenendo l'altro sottoinsieme. La variabile  $Y_{ij}$  utilizzata per la partizione dovrebbe essere quella che conduce a limiti inferiori più alti possibile.

#### *Determinazione di un limite inferiore.*

---

<sup>1</sup>Se le variabili non fossero binarie ma solo intere i sottoinsiemi in cui partizionare quello di partenza potrebbero essere anche più di due.

Il limite inferiore al valore della funzione obiettivo relativo ad ogni insieme candidato si calcola risolvendo un problema di ottimo semplificato, ottenuto rilassando dei vincoli o modificando la funzione obiettivo; in quest'ultimo caso la f.o. modificata dovrà essere tale da assumere per ogni possibile soluzione ammissibile del problema originario sempre valore  $\leq$  di quello assunto dalla funzione obiettivo originaria.

*La strategia di eliminazione.*

La strategia di eliminazione definisce i criteri per la eliminazione di insiemi dalla lista degli insiemi candidati; l'insieme candidato esaminato se non è eliminato deve essere partizionato.

Esistono fondamentalmente tre criteri di eliminazione di un problema candidato:

- 1) *Test di limite inferiore.* Sia  $\Phi_s$  una soluzione corrente del problema (inizialmente posta pari ad infinito), cioè ad un valore sicuramente maggiore del valore ottimo di  $\Phi$ ; se un problema candidato presente nella lista ha un limite inferiore LI maggiore o uguale di  $\Phi_s$  esso può essere eliminato, in quanto una eventuale soluzione ammissibile in esso contenuta avrà certamente un valore di f.o. maggiore o uguale di quello della soluzione già trovata.
- 2) *Test di ammissibilità.* Nel calcolo del limite inferiore (LI) può capitare di trovare una soluzione ammissibile del problema originario, se la soluzione corrispondente ad LI rispetta anche tutti i vincoli del problema di partenza. Anche in questo caso l'insieme non dovrà essere più partizionato in quanto la sua soluzione è ammissibile ed è un LI al valore della f.o.; la soluzione ottima ad esso corrispondente viene memorizzata come soluzione corrente  $\Phi_s$ .
- 3) *Test di inammissibilità.* Dall'esame di un problema candidato si può dedurre che esso non contiene soluzioni ammissibili del problema originario; esso può essere quindi eliminato.

*La strategia di ricerca.*

La strategia di ricerca indica la sequenza con la quale i problemi generati contenuti nella lista devono essere esaminati.

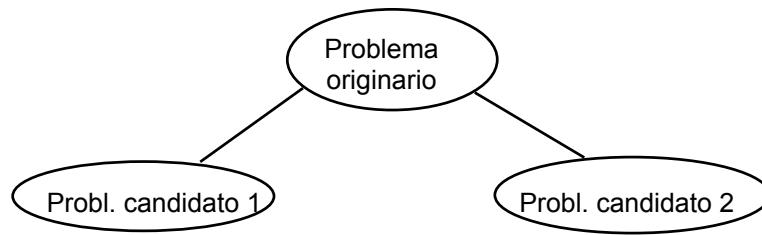
Si può costruire un "albero di ricerca" per rappresentare il processo di partizione; all'inizio si partiziona il problema iniziale in due problemi candidati, che entrano a far parte della lista (vedi fig. 3.15). I nodi non ancora ramificati sono detti *nodi terminali*; l'insieme dei problemi corrispondenti ai nodi terminali costituiscono la lista dei problemi candidati.

Le strategie di ricerca più utilizzate sono due: *best first* e *depth first*.

Nel primo caso si esamina ad ogni stadio della procedura il problema candidato che ha il limite inferiore migliore (cioè il più piccolo); un esempio di albero di ricerca con questa strategia è riportato in fig. 3.16.

Nel secondo caso si sceglie come problema da esaminare quello che è stato aggiunto per ultimo alla lista, per cui la ricerca avviene in profondità (vedi fig. 3.17). Nelle figure riportiamo in parentesi tonda il limite inferiore del sottoinsieme e in parentesi quadra l'ordine con il quale gli insiemi vengono generati.

**FIG. 3.15**



**FIG. 3.16**

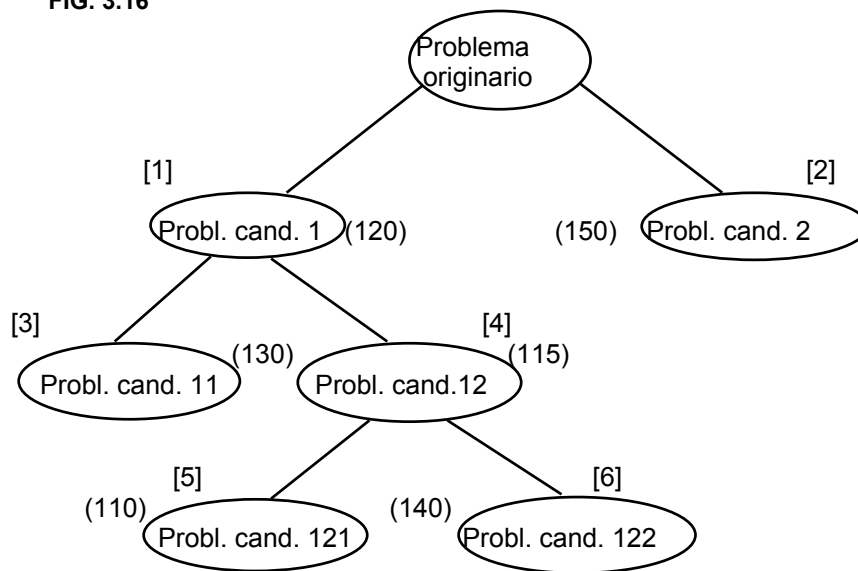
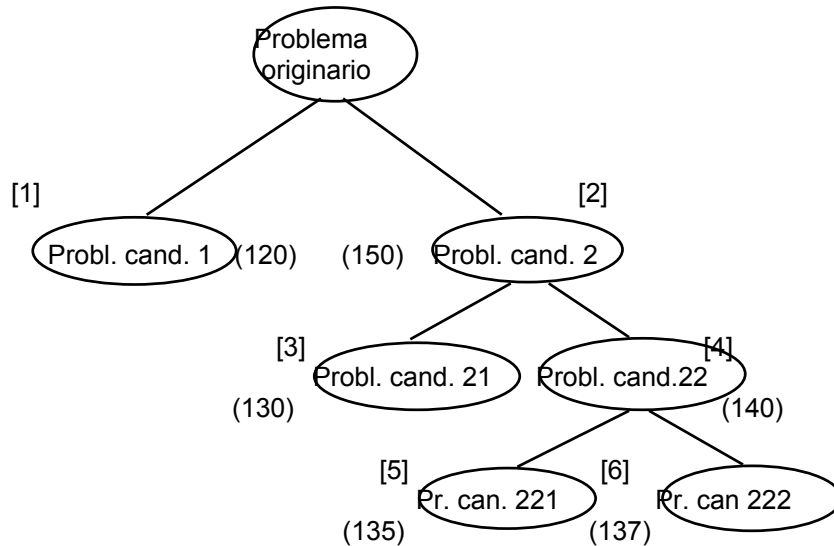


FIG. 3.17



Nel caso di strategia *depth first* se un problema esaminato non deve essere ulteriormente partizionato, si effettua una risalita sull'albero di ricerca e si sceglie tra i problemi non esaminati quello generato per ultimo.

E' stato visto, poi, sperimentalmente che la strategia di ricerca *depth first* risulta condurre ad algoritmi più efficienti.

La metodologia B&B, se il problema da risolvere ha dimensioni molto elevate, non riesce a produrre la soluzione ottima in un tempo limitato di calcolo; si riescono, però, ad ottenere delle soluzioni ammissibili molto buone nella fase iniziale dell'algoritmo, che, pur non costituendo l'ottimo, vi si avvicinano notevolmente.

Per il progetto di una rete di trasporto pubblico sono stati proposti diversi algoritmi di calcolo basati sul B&B, i quali differiscono tra loro soprattutto per i metodi di calcolo del limite inferiore; per un loro studio rimandiamo alla lettura di testi specialistici.

### B) Algoritmi euristici.

Gli algoritmi euristici ricercano la soluzione del problema di progetto di rete con delle metodologie che migliorano ad ogni passo la soluzione precedente, fino a giungere ad una soluzione che non è ulteriormente migliorabile.

La soluzione così ottenuta non è detto, però, che sia la soluzione ottima, in quanto gli algoritmi euristici effettuano una *ricerca locale* che condurrà ad un punto di minimo relativo della funzione obiettivo e non necessariamente al minimo assoluto. Si possono, allora, ottenere diverse soluzioni al variare della rete di partenza dell'algoritmo.

Dei vari algoritmi proposti in letteratura si riporta l'algoritmo seguente che appare utilizzabile nella pratica tecnica, per reti non molto estese.

#### Algoritmo di BGM.

Nell'algoritmo *BGM* il problema di ottimizzazione si formalizza come segue:

#### funzione obiettivo

$$\Phi = \sum_i \sum_j \left\{ C \cdot f_{ij}(A) \cdot Y_{ij} \cdot \left[ \frac{l_{ij}}{V_{ij}} + \frac{0.5 \cdot H}{\text{int}(f_{ij}/K)} \right] + C_0 \cdot l_{ij} \cdot Y_{ij} \cdot \left[ \text{int}\left(\frac{f_{ij}}{K} + 1\right) \cdot \frac{l_{ij}}{V_{ij}} \right] \right\}$$

Il primo termine dell'espressione rappresenta i costi per l'utente e il secondo i costi per l'azienda di trasporto; più precisamente si ha:

$C$  = costo dell'unità di tempo per l'utente (£/h).

$f_{ij}$  = utenti presenti sull'arco  $ij$  per una particolare configurazione di archi  $A$  (per semplicità di notazione questa sua dipendenza è stata espressa solo una volta nell'espressione della f.o.).

$Y_{ij}$  = variabile binaria che vale 1 se l'arco è aperto e 0 se l'arco è chiuso.

$l_{ij}$  = lunghezza dell'arco  $ij$ .

$V_{ij}$  = velocità commerciale media del mezzo sull'arco  $ij$ .

$l_{ij}/V_{ij}$  = tempo di percorrenza dell'arco  $ij$ .

$H$  = coeff. di amplificazione che tenga conto del maggior peso che l'utente dà al tempo di attesa (ad es.  $H=2$ ).

$K$  = capacità ottimale del veicolo.

$\text{int}(f_{ij}/K + 1) = n$ . di autobus da esercire sull'arco  $ij$  per poter soddisfare la domanda.

$0.5[1/\text{int}(f_{ij}/K + 1)]$  = tempo medio di attesa degli utenti alla fermata.

$C_0$  = costo del veicolo per km (comprensivo di tutti i costi, anche quelli gestionali).

vincoli

$$\sum_i \sum_j \text{int} \left( \frac{f_{ij}}{K} + 1 \right) \leq NA$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad l_{ij} \geq 0 \quad V_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in N$$

Il primo vincolo è un vincolo di *budget* che tiene conto del numero di autobus (NA) che l'azienda ha a disposizione; gli altri sono vincoli di non negatività per le variabili del problema.

La procedura di risoluzione del problema è un algoritmo facilmente computerizzabile e che consente di giungere rapidamente alla configurazione ottimale ricercata. Senza entrare nel dettaglio, i passi dell'algoritmo sono i seguenti:

*passo 1)* Routine di assegnazione.

Si comincia con l'assumere che ogni nodo sia collegato direttamente con qualunque altro (massima connettività), si calcola il percorso più breve tra tutte le coppie di nodi e si assegna, con una procedura di tipo "tutto o niente", la domanda di trasporto individuata dalle matrici O/D al percorso più breve.

*passo 2)* Routine di eliminazione.

Si calcola il valore della funzione obiettivo per la configurazione ad n rami (che è quella ottenuta dal passo 1 o quella cui si è giunti nel corso del procedimento); indichiamola con  $\Phi$ .

Si calcola per ogni possibile configurazione ad n-1 rami, ottenuta eliminando un arco ij dalla configurazione ad n rami, il valore corrispondente della funzione obiettivo  $\Phi'_{ij}$  (è evidente che vi sono n possibili configurazioni ad n-1 rami). Se il valore di  $\Phi'_{ij}$  (relativo al ramo eliminato ij) è minore di  $\Phi$  ( $\Delta\Phi_{ij} = \Phi - \Phi'_{ij} > 0$ ), il ramo ij si considera "eliminabile" e si passa ad esaminare le altre possibili configurazioni ad n-1 rami. Si individueranno, in questo modo, un certo numero di rami eliminabili; di essi si elimina quello cui corrisponde il valore di  $\Delta\Phi_{ij}$  più elevato.

A questo punto si riparte dal passo 2 con una rete ad n-1 rami cui corrisponde un valore di funzione obiettivo dato da  $\Phi' = \min \Phi'_{ij}$  e si ricerca tra tutte le possibili

configurazioni ad  $n-2$  rami quelle per le quali il valore assunto dalla funzione obiettivo,  $\Phi''_{ij}$ , sia minore di  $\Phi'$  ( $\Delta\Phi_{ij} = \Phi' - \Phi''_{ij} > 0$ ); si individuano così i rami eliminabili e si elimina il ramo corrispondente al  $\Delta\Phi_{ij}$  più elevato e così via.

La routine termina quando non esisteranno più configurazioni ad  $n-m$  rami (con  $n > m$ ) tali da avere un  $\Delta\Phi_{ij}$  positivo.

*passo 3) Routine di reinserimento.*

A questo punto i rami precedentemente eliminati possono essere reinseriti. Ciò può essere conveniente perché la decisione di eliminazione o meno del ramo  $ij$  può essere stata influenzata dalle eliminazioni precedenti. Pertanto viene utilizzata questa routine che, sulla base di un ragionamento perfettamente analogo a quello fatto in precedenza, calcola se il reinserimento del ramo provoca un miglioramento del valore della funzione obiettivo, rispetto al valore raggiunto al termine della routine di eliminazione.

Nel caso in cui ciò accade, il ramo  $ij$  cui corrisponde il massimo miglioramento del valore della funzione obiettivo viene reinserito; si esamina, poi, se sono possibili altri reinserimenti.

A questo punto si ritorna alla routine di eliminazione per vedere se dalla nuova configurazione conviene eliminare uno o più rami.

*passo 4) Test di arresto.*

L'algoritmo termina quando nella configurazione di rete cui si è giunti non vi sono rami "eliminabili" o "reinscrivibili", cioè una qualsiasi modifica della rete non apporta miglioramenti al valore assunto dalla funzione obiettivo.

E' da notare che nella pratica il ramo viene considerato "eliminabile" o "reinscrivibile" solo quando il valore di  $\Delta\Phi_{ij}$  oltre ad essere positivo è anche maggiore di un certo valore (beneficio minimo prefissato). Questa accortezza evita di considerare anche quei rami la cui eliminazione o il cui reinserimento modifica di poco il valore della funzione obiettivo.

### 3.2) Il progetto della rete di trasporto collettivo mediante simulazione.

Le tecniche di simulazione per la progettazione della rete di trasporto pubblico sono analoghe a quelle viste per il trasporto privato; lo sviluppo della metodologia di simulazione è la stessa di quella riportata in fig. 3.10, solo che gli obiettivi da perseguire sono diversi (efficienza, efficacia e qualità), come sarà precisato nei punti successivi.

Si riportano di seguito le varie fasi della procedura.

*A) Definizione ambito del problema.*

La definizione dell'ambito del problema deve essere fatta, come anche visto per il trasporto perivato, dal punto di vista spaziale, temporale e funzionale.

Per il problema del progetto della rete di trasporto collettivo, l'ambito spaziale viene definito con l'area di studio e la relativa zonizzazione. A tal proposito si ricorda che la zonizzazione dell'area di studio, quando si vuole rappresentare l'offerta di trasporto collettivo, deve essere piuttosto fitta, dato che i centroidi sono collegati con gli altri nodi direttamente da rami pedonali.

La definizione dell'ambito temporale consiste nell'individuare l'orizzonte temporale della realizzazione del progetto e il periodo di simulazione; nel nostro caso si può assumere un orizzonte temporale di breve periodo, non essendo necessarie opere strutturali di rilievo. Il periodo di simulazione deve essere quello relativo all'ora di punta di un giorno medio della settimana nel mese di maggior carico; in alcuni casi si possono prevedere delle simulazioni anche nelle ore di morbida, in modo da poter definire due diversi programmi di esercizio.

Con ambito funzionale si intende l'insieme delle "esternalità" che possono essere influenzate, sia in senso positivo che in senso negativo, dalla realizzazione del progetto; tra esse si deve sicuramente tener conto dell'influenza sugli altri sistemi di trasporto (variazioni nel *modal split*) e degli effetti socio-economici ed ambientali.

*B) Definizione degli obiettivi.*

Di fondamentale importanza è, evidentemente, la definizione degli obiettivi che si perseguono con la realizzazione del progetto.

Per quanto riguarda la rete di trasporto collettivo, gli obiettivi fondamentali da perseguire sono tre:

- 1) *Massimizzazione dell'efficienza*, dove per efficienza si intende il rapporto tra il prodotto realizzato e le risorse impiegate nell'unità di tempo; è il classico obiettivo della direzione dell'azienda di trasporto collettivo.
- 2) *Massimizzazione dell'efficacia*, dove per efficacia si intende la rispondenza del progetto al raggiungimento di obiettivi anche, e soprattutto, esterni all'azienda, quali ad esempio la quantità di popolazione servita, il *modal split*, l'inquinamento, etc.
- 3) *Massimizzazione della qualità*, dove per qualità si intende la rispondenza del progetto ai desideri degli utenti del servizio, quali ad esempio la minimizzazione del costo generalizzato del trasporto.

I suddetti obiettivi dovranno essere perseguiti sia per l'intero progetto che per ogni parte di esso (singole linee).

*C) Scelta degli indicatori e relativi pesi.*

Una volta fissati gli obiettivi occorre scegliere una serie di parametri (*indicatori di prestazione*) atti a misurare il raggiungimento degli stessi.

Gli indicatori di prestazione per una rete di trasporto pubblico possono essere suddivisi in base all'obiettivo di cui ne misurano il grado di raggiungimento, per cui possiamo distinguere indicatori di efficienza, indicatori di efficacia ed indicatori di qualità.

Un elenco dei possibili indicatori globali e puntuali (là dove non specificato è sufficiente riferirlo all'intera rete o alla singola linea) è il seguente:

**Efficienza (globali e puntuali):**

- Numero minimo di autobus per esercire il servizio sull'intera rete (NA).
- Veicoli \* km/Numero minimo di autobus (VKM/NA).
- Numero relazioni OD servite/Num. min. di autobus (Nod/NA).

**Efficacia (globali e puntuali):**

- Numero utenti trasportato (U).
- Utenti \* km (UKM).
- Utenti/Numero minimo bus (U/NA).
- Utenti/Posti \* km (U/PKM).

**Qualità:**

- globali
  - N. max trasbordi pesato sui flussi.
  - N. medio trasbordi pesato sui flussi.
  - Tempo medio di attesa pesato sui flussi.
  - Tempo medio a bordo pesato sui flussi.
- puntuali
  - Tempo medio di attesa pesato sul flusso.
  - Tempo medio a bordo pesato sul flusso.

Per quanto riguarda gli *indicatori di efficienza* sono stati scelti come unità di prodotto dell'azienda di trasporto collettivo i veicoli per km o i posti per km offerti nell'unità di tempo e come risorse impiegate, essenzialmente, il numero minimo di veicoli necessario per l'esercizio, la frequenza e la lunghezza delle linee.

Bisogna precisare che il calcolo del numero di autobus necessario per ogni linea e per l'intera rete deve essere effettuato tenendo conto che il tempo di marcia ed il tempo di sosta alle fermate sono due variabili aleatorie, dalle quali dipende il tempo di recupero necessario ai capilinea per ripianare l'esercizio e far partire i veicoli secondo l'orario programmato. Perciò il calcolo del numero di autobus può essere così effettuato:

$$NA = \sum_k NA^k$$

con:

$$NA^k = \text{INT} \left| TG^k / I^k \right| + 1$$

$$TG^k = TM^k + TS^k + TR^k$$

$$TM^k = \sum_{ij} t_{ij} \quad \forall (i, j) \in R^k$$

$$TS^k = \sum_i TS_i^k = \sum_i (a + b \cdot d_i^k)$$

$$TR^k = f(\text{var}[TM^k + TS^k])$$

dove:

- K linee di bus previste sulla rete;
- NA numero minimo totale di bus necessari;
- $NA^k$  numero minimo totale di bus necessari per la linea k;
- $TG^k$  tempo di giro della linea k;
- $I^k$  intertempo medio della linea k;
- $TM^k$  tempo di marcia della linea k;
- $TR^k$  tempo di recupero al capolinea della linea k;
- $TS^k$  tempo di sosta totale sulla linea k;

|              |                                                                  |
|--------------|------------------------------------------------------------------|
| $TS_i^{k_i}$ | tempo di sosta alla fermata i-esima della linea k;               |
| $t_{ij}$     | tempo medio di percorrenza dell'arco (i - j);                    |
| $R^k$        | insieme dei rami appartenenti alla linea k;                      |
| a, b         | coefficienti;                                                    |
| $d_i^{k_i}$  | tasso di arrivo utenti nell'unità di tempo di $I^k$ alla fermata |

Quali *indicatori di efficacia*, relativamente ai soli impatti sul trasporto collettivo, si possono scegliere come unità di rispondenza il numero di utenti trasportati, gli utenti per km trasportati e, per l'intera rete, gli utenti per km rispetto alla popolazione da servire, il numero di relazioni pedonali residue e il numero di utenti non serviti.

Quali *indicatori di qualità* si utilizzano, essenzialmente, i parametri del costo generalizzato di trasporto. In particolare per ogni linea il tempo a bordo, di attesa, e di accesso alla rete e per l'intera rete il numero di trasbordi, il tempo medio di attesa, di viaggio (attesa + a bordo), e di spostamento (attesa + a bordo + a piedi).

In dettaglio gli indicatori possibili sono i seguenti:

- $TT_{ij}$       Trasbordi effettuati sulla coppia i-j;
- $t_{ij}$       Tempi a bordo;
- $T_{ij}$       Tempi di viaggio;
- $\tau_{ij}$       Tempi di spostamento;
- $W_{ij}$       Tempi di attesa;

dove:

$$t_{ij} = l_{ij} / S_{ij}$$

$$T_{ij} = t_{ij} + k \cdot W_{ij}$$

$$\tau_{ij} = T_{ij} + k \cdot W_{ij} + A \cdot L_{ij}$$

con:

|          |                                                                                                                     |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| k        | Coefficiente di omogeneizzazione;                                                                                   |
| A        | Velocità pedonale;                                                                                                  |
| $l_{ij}$ | Lunghezza della linea tra la fermata di salita relativa al centroide i e quella di discesa relativa al centroide j; |
| $L_i$    | Somma della distanza pedonale di accesso alla fermata i e quella di egresso dalla fermata j;                        |
| $S_{ij}$ | Velocità commerciale della linea tra le fermate di salita e di discesa della coppia i/j.                            |

Gli indicatori di qualità riferiti all'intera rete sono i seguenti:

- $TT_{\max}$  Numero massimo di trasbordi;
- $TT^*$  Numero medio di trasbordi;
- $W^*$  Tempo medio di attesa alle fermate;
- $t^*$  Tempo medio a bordo;
- $T^*$  Tempo medio di viaggio;
- $\tau^*$  Tempo medio di spostamento;

dove le medie sono state valutate pesando i valori ottenuti per ogni coppia O/D con il numero di utenti.

Ad essi si possono poi aggiungere ancora due indicatori contrassegnati con  $A_1$  ed  $A_2$  che tengono conto che i tempi considerati, ed in particolare quello a bordo e quello di attesa, sono variabili aleatorie dalle cui varianze dipende fortemente la qualità.

Tali indicatori sono così definiti:

$$A_1 = \frac{\sum_{ij} (\text{var } t_{ij} \cdot \sum_k P_{ij}^k)}{\sum_{ijk} P_{ij}^k} \quad \forall k \in K \quad \forall (i, j) \in R^k$$

$$A_2 = \frac{\sum_k \sum_i \text{var } t_{0,i}^k D_i^k}{\sum_i D_i^k} \quad \forall (i - j) \in R^k \quad i \neq j$$

dove:

$$t_{0,n}^k = \sum_{i=i,n-1} \text{var}[t_{i,i+1}] + 2 \sum_{i=1,n-1} \sum_{j=1,i-1} \text{cov}[t_i, t_j]$$

$$D_i^k = d_i^k I_i^k$$

con:

$d_i^k$  tasso di arrivo utenti nell'unità di tempo di  $I$  (secondi) alla fermata  $i$ ;

$P_{ij}^k$  utenti della linea  $k$  sul ramo  $(i, j)$ ;

$\text{var}[t_{ij}^k]$  varianza del tempo di percorrenza sul ramo  $(i, j)$ ;

$K$  insieme delle linee;

- A<sub>1</sub>     indicatore varianza tempi percorrenza;
- A<sub>2</sub>     indicatore varianza tempi attesa.

Il campo di indicatori possibili è molto ampio e non tutti gli indicatori rivestono la stessa importanza; per questo motivo è opportuno assegnare ad ogni indicatore un peso che sia in grado di rappresentare l'importanza relativa tra i vari indicatori.

Il valore dato al peso di ogni indicatore riveste una notevole importanza in quanto una analisi multiobiettivo può condurre a risultati nettamente diversi al variare del vettore di pesi **P**; è necessario, pertanto, concordare, prima di iniziare l'analisi, il vettore dei pesi con i destinatari degli obiettivi cioè l'azienda, il decisore politico (in rappresentanza della collettività) e gli utenti (mediante dei loro rappresentanti).

E' evidente che ognuno di essi assegnerà i massimi pesi agli indicatori di specifica rilevanza; combinando tra loro i pesi così assegnati si deve giungere ad un vettore **P** il più significativo possibile.

I metodi per giungere ad un vettore **P** sufficientemente significativo sono riportati in seguito, quando si tratterà l'analisi multiobiettivo.

#### *D) Generazione reti alternative.*

In questa fase della procedura bisogna individuare le reti di trasporto alternative da sottoporre all'analisi multicriteria; è evidente come questa fase, di fondamentale importanza, sia quella in cui le capacità e l'esperienza del progettista hanno il massimo peso.

Non è possibile effettuare una generalizzazione sulla costruzione delle reti da testare in quanto esse dipendono, fondamentalmente, dalle caratteristiche delle infrastrutture esistenti (reticolo stradale urbano) e dalla distribuzione della domanda di trasporto sul territorio.

Si possono, però, suggerire degli schemi di rete, evidentemente da adattare di volta in volta alla situazione contingente, che possono essere utilizzati come base di partenza per lo sviluppo della procedura.

#### *Reti orientate sulla minimizzazione dei costi per l'utenza.*

Le reti di questa tipologia, dette anche *orientate sulla domanda di trasporto*, tendono a minimizzare i costi generalizzati di trasporto per gli utenti; una rete teorica di questo tipo dovrebbe collegare nel modo più diretto possibile ogni coppia di nodi centroidi senza alcun trasbordo.

Per tracciare uno schema di rete orientata sulla domanda si parte dalla matrice O/D relativa al trasporto pubblico su gomma nell'ora di punta; si ordinano gli elementi della matrice per valori decrescenti di domanda di trasporto e si collegano i centroidi del primo elemento con una linea che li colleghi in modo diretto.

A questo punto si vanno a considerare tutte le coppie di centroidi che possono utilizzare, per collegarsi tra loro, la linea tracciata; se si ipotizza un comportamento di scelta consuntiva non compensatorio, tali saranno quei centroidi che sono collegati alla linea in questione con archi pedonali di lunghezza minore di un valore prefissato. Gli elementi della matrice O/D relativi a tali coppie vengono eliminati dalla lista, in quanto si può ritenere che la relativa domanda di trasporto sia soddisfatta.

Si ripete, poi, la stessa operazione per un altro elemento della matrice O/D ottenendo un'altra linea e depennando dalla lista altre coppie OD.

Il procedimento si ferma quando tutti gli elementi della matrice O/D sono stati esaminati.

Si ottiene, così, una rete di cui si deve verificare la connessione e sulla quale si possono apportare delle modifiche; ad esempio si possono eliminare, sulla base di diagrammi di carico, i tratti terminali a bassa domanda o cucire tra loro quei collegamenti la cui domanda, presa singolarmente, condurrebbe ad una frequenza troppo bassa.

#### *Reti orientate sulla massimizzazione delle prestazioni del sistema.*

Le reti orientate sulla massimizzazione delle prestazioni del sistema sono delle reti che, non considerando il costo generalizzato del trasporto per gli utenti, tendono a migliorare le prestazioni del sistema di trasporto in termini di efficienza (veicoli per km o posti per km offerti).

Ad uno schema di rete di questo tipo ci si può giungere cominciando a considerare, sulla base della disponibilità infrastrutturale, le linee per le quali si possono prevedere delle corsie preferenziali protette.

Si va, in pratica, a tracciare una sorta di *rete primaria* in cui le prestazioni dei mezzi sono molto elevate (alta velocità commerciale); ovviamente una parte della domanda si servirà direttamente di esse, mentre la restante parte sarà collegata a queste con delle linee secondarie (linee *feeder*).

Con una rete così costruita si avrà che una parte dell'utenza (quella collegata direttamente dalla rete primaria) avrà un basso costo generalizzato dello spostamento, mentre per la restante parte il costo dello spostamento sarà molto più elevato, data la ridotta velocità commerciale delle linee secondarie e l'elevato numero di trasbordi. Da ciò discende che, se possibile, la scelta della rete primaria deve essere fatta in modo da collegare le direttrici a più forte domanda.

*Reti tipo.*

A seconda della conformazione del tessuto urbano possono essere proposte delle reti tipo, che ad essa si adattano.

Se la struttura urbana è monocentrica, cioè vi è un unico grande polo attrattore, si può proporre uno schema di rete *“a stella”*, caratterizzato da una serie di linee, provenienti dai capilinea periferici, che conducono al centro cittadino; le suddette linee saranno collegate tra loro con una serie di linee circolari concentriche, in modo da ottenere una maglia sufficientemente fitta. Con uno schema di questo tipo si può immaginare che il numero massimo di trasbordi sia pari a due, o al massimo tre per gli spostamenti più lunghi.

Sempre nel caso monocentrico si può ipotizzare uno schema *“a semianelli e radiali”* in cui si prevedono delle linee che, partendo da un capolinea periferico, vanno verso il centro, lo contornano per un tratto più o meno esteso e poi se ne allontanano raggiungendo un altro capolinea periferico; tali linee sono integrate da altre radiali che le connettono tra loro e da linee di attraversamento del centro.

Se la connotazione urbana presenta più poli attrattori di notevole rilevanza si può proporre uno schema di rete *“policentrica”*, in cui si considerano per prima cosa delle linee che colleghino i singoli centri tra loro, poi delle altre linee che collegano la periferia con il centro più vicino ed, infine, delle linee che colleghino, se necessario, le prime tra loro fino ad avere una maglia sufficientemente fitta.

Se la conformazione del tessuto urbano si presenta con uno schema a maglie quadre, la rete tipo che ne discende è una rete *“a griglia”*; in questo caso il progetto delle singole linee dovrebbe essere tale da limitare a due il numero massimo di trasbordi.

In fig. 3.18 e 3.19 sono riportati esempi dei suddetti schemi.

*E) Simulazione del funzionamento delle reti.*

La metodologia da seguire per simulare il funzionamento delle diverse reti ipotizzate, nota la matrice O/D interessante il trasporto collettivo ed i tempi di percorrenza sui rami della rete, può essere articolata, per ogni singola ipotesi progettuale, nelle seguenti fasi:

- *Schematizzazione della rete.* In questa fase si deve schematizzare la rete di cui viene simulato il funzionamento. La sua rappresentazione avviene, come già detto, mediante l'uso di un grafo pesato costituito da diverse tipologie di rami (pedonali, di salita, di linea, di discesa). Le funzioni di costo vengono associate ai vari rami della rete in base alle caratteristiche funzionali del ramo stesso.
- *Scelta del percorso e assegnazione.* Il modello di scelta del percorso e assegnazione si basa sul concetto di *ipercammino*; per un suo studio rimandiamo a quanto detto nel

capitolo 2. Precisiamo solo che, non essendo note le frequenze, esse vengono assegnate come valore di primo tentativo, da migliorare nelle fasi successive.

- *Calcolo della frequenza.* Una volta determinati i carichi su ogni ramo di ogni singola linea, come al punto precedente, si calcolano le frequenze reali e le si confrontano con quelle di primo tentativo; eventualmente si modificano o si eliminano quelle linee la cui frequenza è risultata inferiore ad un valore minimo predeterminato, e si procede a riassegnare la domanda alla rete così modificata. Tale procedura, che può essere più volte iterata, è indispensabile per ottenere due risultati: uno di calibrazione del sistema (durante tale fase potranno meglio adattarsi ai carichi gli schemi di rete) ed uno di congruità del sistema alle ipotesi di domanda fissa ritenendosi che intertempi superiori a 20-30 minuti siano inaccettabili per l'utente.
- *Calcolo degli indicatori.* Una volta calibrata l'ipotesi di rete in studio si passa a calcolare i valori assunti dagli indicatori di prestazione. In questa fase, a seguito dei risultati ottenuti, si può ulteriormente migliorare la rete testata, eliminando eventuali difetti posti in luce dall'esame degli indicatori.

**FIG. 3.18**

A stella

A griglia

**FIG. 3.19**

A semianelli e radiali

Policentrica

#### F) Valutazione delle alternative.

La valutazione delle alternative progettuali, come premesso, viene condotta tramite una *analisi multiobiettivo*; essa è utilizzata nei casi in cui gli obiettivi da raggiungere sono molteplici e non combinabili tra loro.

Nel caso della rete di trasporto pubblico gli obiettivi da raggiungere sono, come detto, la massimizzazione dell'efficienza, dell'efficacia e della qualità del servizio offerto; gli indicatori di prestazione rappresentano i criteri di valutazione del raggiungimento dell'obiettivo da parte dell'alternativa esaminata.

Lo studio dell'analisi multicriteria sarà trattata in un paragrafo successivo.

### 3.3) Metodo di ottimizzazione della frequenza e della dimensione dei veicoli.

Per la soluzione di problemi di esercizio quali la frequenza da assegnare ad una linea ovvero la capacità dei veicoli da impiegare per la stessa, vi sono in bibliografia numerosi approcci possibili, tra i quali si ricorda qui quello di Mahamassani (33) che appare il più completo. La relazione che lega i parametri di costo totale di trasporto con la frequenza e la capacità del veicolo può essere così formalmente espressa:

$$C_k = \frac{a(1+bS_k)RTM_k(Q_k)_{\max}}{LF_{\max}S_k} + \frac{wTPT_k}{2f_k} + AC_k + IVTTC_k$$

in cui:

$$f_k = \frac{(Q_k)_{\max}}{LF_{\max}S_k}$$

con:

$C_k$  = costo generalizzato della linea k somma del costo all'azienda ed agli utenti

$a$  = coefficiente di costo per veicolo chilometro

$b$  = gradiente relativo della funzione di costo per veicolo chilometro

$S_k$  = dimensione del veicolo per la linea k

$RTM_k$  = lunghezza di giro della linea k

$(Q_k)_{\max}$  = massimo carico lungo la linea k nell'ora di punta

$w$  = valore del tempo di attesa

$TPT_k$  = numero totale di passeggeri che usano la linea k nell'ora di punta

$AC_k$  = costo totale di accesso dei passeggeri alla linea k

$IVTTC_k$  = costo totale del tempo di viaggio a bordo del veicolo della linea k

$LF_{\max}$  = massimo fattore di carico consentito

$f_k$  = frequenza della linea k

dove il primo termine è il costo per l'azienda e gli altri i costi per l'utente.

Notando che terzo ed i quarto addendo sono indipendenti ad  $S$ , si può ricavare la dimensione ottima del veicolo minimizzando il costo complessivo ovvero ponendo a zero la derivata del costo rispetto a  $S$ :

$$S_k(\text{ottimo}) = \frac{(Q_k)_{\max}}{Lf_{\max}} \frac{[2aRTM_k]^{1/2}}{[wTPT_k]^{1/2}}$$

### 3.4) La simulazione della rete integrata trasporto privato/trasporto collettivo.

Nei paragrafi precedenti si è trattato il progetto della rete di trasporto pubblico e della rete di trasporto privato indipendentemente tra loro; più precisamente le due reti sono state simulate con l'ipotesi di domanda rigida, nel senso che il *modal split* risultava indipendente dagli effettivi costi di trasporto sui due sistemi.

Infatti, per la rete di trasporto collettivo si assegnava la matrice O/D ad esso relativa, supponendola indipendente dai valori che le funzioni di costo assumono in corrispondenza dei relativi flussi e dalle funzioni di costo sulla rete di trasporto privato. Lo stesso si è sfatto per la rete di trasporto privato.

E' evidente che un simile ragionamento è valido solo per quei comuni in cui non è presente né si prevede una rete di trasporto collettivo; viceversa, a seguito di una riorganizzazione delle condizioni di circolazione, la ripartizione modale degli spostamenti varia al variare dei costi sugli archi della rete.

Ci troviamo, in pratica, dinanzi ad un problema di equilibrio: i flussi sugli archi della rete dipendono dal *modal split*, il *modal split* dipende dai costi ed i costi dipendono dai flussi.

Per risolvere il problema si può operare con due diverse metodologie: per successive iterazioni o con una assegnazione dei flussi su una rete multimodale.

Con la prima metodologia si parte da una ripartizione modale fissata per tutta la rete di trasporto, essa può essere ad esempio un *modal split* obiettivo che si vorrebbe raggiungere.

Si assegna una ripartizione di tentativo tra trasporto pubblico e trasporto privato (il primo valore di ripartizione modale può essere scelto in base ad eventuali informazioni che si posseggono relativamente al centro abitato in esame).

Con questo valore si ripartisce la matrice O/D degli spostamenti su tutti i modi motorizzati di trasporto in una matrice relativa al trasporto privato ed una relativa al trasporto pubblico; i flussi di domanda relativi alla prima vengono assegnati alla rete di trasporto privato e quelli relativi alla seconda vengono assegnati alla rete di trasporto pubblico. Si calcolano, quindi, su entrambe le reti i flussi sugli archi e di conseguenza i relativi costi.

In base ai costi così ottenuti si calcola per le singole coppie OD un nuovo *modal split*, ottenendo altre matrici O/D relative ai due modi di trasporto.

Si confrontano le nuove matrici con quelle precedenti: se le differenze sono modeste ci si ferma e si considera accettabile la simulazione effettuata; in caso contrario si parte dalle ultime matrici ottenute o da matrici costruite mediando per ogni cella i valori di *modal split* relativi all'ultima matrice e a quella precedente.

Si itera il procedimento fino a che la media delle differenze tra i flussi di domanda relativi, per ogni modo, alle due ultime matrici ottenute sia inferiore ad un valore percentuale prefissato (ad esempio 10%).

La seconda metodologia assegna i flussi di domanda della matrice O/D relativa a tutti i modi di trasporto ad una rete multimodale, cioè rappresentativa dei diversi modi di trasporto (pubblico, privato, pedonale), calcolando in modo implicito, durante l'assegnazione dei flussi, il *modal split*.

#### 4) L'analisi multiobiettivo per la valutazione delle reti di trasporto pubblico e privato.

Nel progetto delle reti di trasporto pubblico e privato riveste fondamentale importanza la fase di scelta tra le diverse alternative progettuali.

La metodologia che deve essere utilizzata per valutare e confrontare le diverse alternative proposte è l'**analisi multiobiettivo** (o multicriteria); essa, infatti, è l'unica che, nella valutazione delle alternative, consente di tener conto di diversi obiettivi non riconducibili ad un unico parametro.

Le fasi di un'analisi multiobiettivo sono le seguenti:

- 1) descrizione delle alternative;
- 2) definizione dei criteri;
- 3) analisi delle alternative;
- 4) valutazione delle alternative in base ai criteri prestabiliti;
- 5) selezione delle alternative in base alle valutazioni effettuate;
- 6) conclusione e presentazione dei risultati.

La prima fase coincide con la definizione delle reti di trasporto che devono essere valutate; i possibili schemi di rete sono stati descritti nei paragrafi precedenti.

La seconda fase deve definire, in base agli obiettivi perseguiti, i criteri di valutazione delle alternative, con i quali si misura il grado di rispondenza di un'alternativa ad un dato obiettivo. Questa fase è quella relativa alla definizione ed alla scelta degli indicatori di prestazione; ogni indicatore rappresenta, infatti, un criterio per misurare il grado di raggiungimento di un obiettivo.

La terza fase consiste nella simulazione delle reti alternative proposte e, quindi, nel calcolo degli indicatori di prestazione relativi ad ognuna di esse; anche essa è stata esaminata nei paragrafi precedenti.

La quarta e la quinta fase sono quelle in cui vengono applicate le metodologie dell'analisi multiobiettivo e che ora si esporranno.

L'ultima fase di presentazione dei risultati è di fondamentale importanza, in quanto l'analisi multiobiettivo deve essere uno strumento di supporto al decisore.

##### 4.1) Tipologia delle tecniche di valutazione.

L'analisi multiobiettivo può essere classificata in funzione di diversi fattori; le classificazioni più comuni si basano sul tipo di alternative da esaminare e sul genere di informazioni disponibili.

Secondo la prima classificazione i metodi si dividono in *metodi discreti* e *metodi continui*. Nel primo caso esiste un numero finito di possibili alternative da esaminare; nel secondo, invece, si prende in esame un numero infinito di alternative, nel senso che si

possono variare in maniera continua le diverse variabili decisionali. Nel nostro caso è evidente che l'analisi multiobiettivo deve essere discreta.

La seconda classificazione riguarda il carattere quantitativo o qualitativo delle informazioni disponibili. Si parla allora di metodi *quantitativi* quando la scala di misurazione è numerica (anche se le unità di misura sono diverse). I metodi multiobiettivo sono invece *qualitativi* quando i dati sono espressi in modo ordinale o quando la misura di rispondenza di un criterio di valutazione al relativo obiettivo è espresso con un aggettivo. Infine, esistono metodi che consentono di trattare contemporaneamente dati quantitativi e dati qualitativi; si parla in questo caso di metodi *misti*.

Siccome gli indicatori di prestazione proposti per la valutazione dei progetti di rete sono quasi tutti esprimibili con una unità di misura, ci si può indirizzare verso una *analisi multiobiettivo discreta quantitativa*.

#### 4.2) La stima dei pesi.

La scelta dei pesi da attribuire ai vari criteri considerati in un'analisi multiobiettivo è di fondamentale importanza; i risultati dell'analisi possono, infatti, risultare notevolmente differenti a seconda del valore che viene dato al peso di ogni criterio, cioè, nel nostro caso, al peso di ogni indicatore di prestazione.

La scelta dei pesi è una decisione fondamentalmente politica, in quanto essi esprimono la maggiore o minore importanza di determinati obiettivi.

La scelta dei pesi deve essere implicitamente o esplicitamente presa dai soggetti interessati alla realizzazione del progetto, che, relativamente alla redazione dei PUT, sono: i decisori politici ed i rappresentanti dei cittadini o di loro associazioni.

La scelta dei pesi può avvenire esplicitamente se i pesi sono fissati direttamente dai decisori per i diversi criteri o implicitamente se i decisori ordinano diverse alternative di progetto realizzate nel passato: dall'esame di queste si ricavano i pesi che avrebbero condotto alla scelta effettuata.

Tralasciando i metodi impliciti (o indiretti) si danno alcuni cenni sui metodi di scelta diretta dei pesi.

Quando si ha a che fare con più decisori, i quali hanno spesso volte anche interessi contrastanti, un metodo per giungere alla determinazione del vettore dei pesi è il metodo *Delphi*.

Il metodo *Delphi* consiste in una serie di colloqui effettuati a turno con i vari decisori presi singolarmente; ad ognuno si chiede di fissare un vettore di pesi.

Si confrontano i vettori tra loro e si riportano, in un successivo giro di colloqui, le idee degli altri decisori ad ogni interlocutore, cercando di giungere ad un accordo che conduca ad un vettore di pesi che sia accettato da tutti.

Un metodo per aiutare il decisore nella scelta dei pesi consiste nel compilare una matrice  $n \times n$  con  $n$  numero di criteri; all'elemento  $ij$  della matrice viene dato valore  $+1$  se il criterio  $i$ -esimo è ritenuto più importante del  $j$ -esimo,  $-1$  nel caso opposto e  $0$  se i criteri sono ritenuti equivalenti. La somma degli elementi di ogni riga  $i$  dà una misura dell'importanza del criterio  $i$ -esimo; da tali valori si può ricavare un vettore dei pesi.

#### 4.3) I metodi di analisi multiobiettivo discreti quantitativi.

L'analisi multiobiettivo inizia con la costruzione di una **matrice di decisione** (o di valutazione)  $P$ , avente tante righe quanti sono i criteri di valutazione considerati, e tante colonne quante sono le alternative da valutare. Nel nostro caso la matrice avrà, allora, un numero di righe  $n$  pari al numero di indicatori di prestazione scelti per la valutazione, ed un numero di colonne  $m$  pari al numero di reti alternative da confrontare.

In corrispondenza di ogni riga viene riportato anche il peso che si è attribuito ad ogni criterio di valutazione.

Lo schema della matrice di decisione è il seguente:

| INDICATORI | PESI       | RETI ALTERNATIVE |          |          |          |
|------------|------------|------------------|----------|----------|----------|
|            |            | 1                | 2        | j        | m        |
| 1          | $\delta_1$ | $p_{11}$         | $p_{12}$ | $p_{1j}$ | $p_{1m}$ |
| 2          | $\delta_2$ | $p_{21}$         | $p_{22}$ | $p_{2j}$ | $p_{2m}$ |
| i          | $\delta_i$ | $p_{i1}$         | $p_{i2}$ | $p_{ij}$ | $p_{im}$ |
| n          | $\delta_n$ | $p_{n1}$         | $p_{n2}$ | $p_{nj}$ | $p_{nm}$ |

Il generico elemento  $p_{ij}$  rappresenta il valore che l'indicatore  $i$  assume in corrispondenza dell'alternativa  $j$ , esso è anche detto misura di rispondenza dell'alternativa  $j$  al criterio  $i$ .

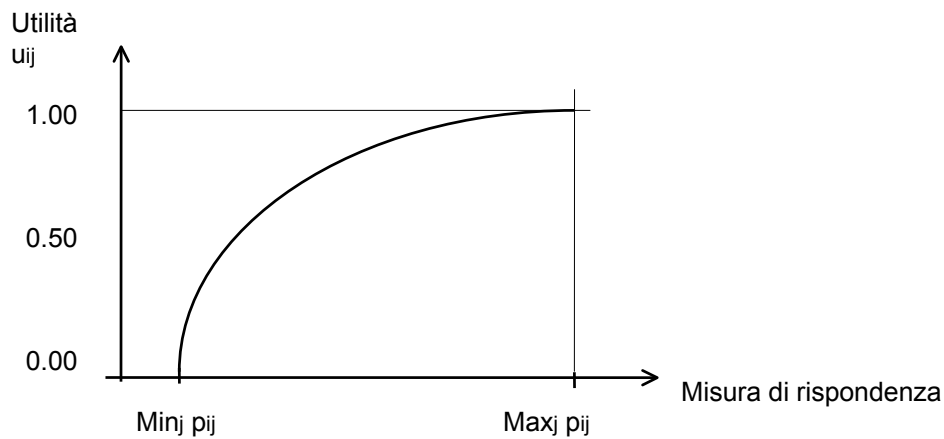
Risulta utile trasformare le misure di rispondenza  $p_{ij}$  in termini di utilità percepita, tenendo però presente che essa non è in genere direttamente proporzionale alla misura di rispondenza: nella maggior parte dei casi ad un incremento della misura di rispondenza corrisponde un incremento meno che proporzionale dell'utilità. Si devono quindi costruire delle funzioni dette *funzioni di utilità* che esprimano il legame tra livello di rispondenza e livello di utilità; la loro costruzione avviene mediante interviste dirette ad un campione di soggetti estratti tra quelli appartenenti alla componente sociale cui è destinato il progetto.

Le funzioni di utilità sono molto importanti soprattutto perché consentono una omogeneizzazione delle unità di misura adoperate nella costruzione della matrice di

decisione; ne occorre una per ogni criterio di valutazione, cioè, nel nostro caso, per ogni indicatore di prestazione.

La scala delle utilità varia da 0 a 1: ha utilità 0 rispetto al criterio  $i$  l'alternativa  $j$  per la quale la misura di rispondenza  $p_{ij}$  è il minimo valore tra quelli assunti, in corrispondenza del criterio  $i$ , da tutte le alternative; viceversa ha utilità 1 rispetto al criterio  $i$  l'alternativa  $j$  per la quale il valore di  $p_{ij}$  è il massimo. Un esempio di funzione di utilità è riportato in fig. 3.20.

**FIG. 3.20**



Se non si dispone delle funzioni di utilità, esse possono essere considerate lineari; tale approssimazione è tanto più accettabile quanto minore è la differenza tra i valori estremi degli indicatori.

Si passa quindi da una matrice di decisione espressa tramite misure di rispondenza ad una matrice di decisione espressa tramite misure di utilità.

In questa fase conviene anche normalizzare i pesi, cioè esprimerli in valore relativo, dividendo ciascun peso per la somma di tutti i pesi:

$$g_i = \frac{\delta_i}{\sum_{i=1}^n \delta_i}$$

La matrice di decisione espressa in termini di utilità percepita e con i pesi relativi è la seguente:

| INDICATORI | PESI          | RETI ALTERNATIVE |          |          |          |
|------------|---------------|------------------|----------|----------|----------|
|            |               | 1                | 2        | j        | m        |
| 1          | $\vartheta_1$ | $u_{11}$         | $u_{12}$ | $u_{1j}$ | $u_{1m}$ |
| 2          | $\vartheta_2$ | $u_{21}$         | $u_{22}$ | $u_{2j}$ | $u_{2m}$ |
| i          | $\vartheta_i$ | $u_{i1}$         | $u_{i2}$ | $u_{ij}$ | $u_{im}$ |
| n          | $\vartheta_n$ | $u_{n1}$         | $u_{n2}$ | $u_{nj}$ | $u_{nm}$ |

Per giungere ad una valutazione delle diverse alternative esistono diverse metodologie; alcune di esse si basano sulla matrice di decisione espressa in termini di misura di rispondenza, altre si basano su quella espressa in termini di utilità. Esaminiamo nel seguito le più importanti.

*A) Metodo della funzione di utilità.*

Il metodo più semplice per poter confrontare le diverse alternative consiste nell'associare ad ognuna di esse una utilità complessiva ponderata data da:

$$U_j = \sum_{i=1}^n \vartheta_i \cdot u_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, m$$

A seconda dei valori di  $U_j$  si può redigere una classifica di preferenza tra le varie alternative.

Tale metodo si basa, però, su un'ipotesi alquanto restrittiva, cioè che le preferenze del decisore siano rappresentabili da una funzione di utilità lineare; ciò implica che ad un risultato negativo rispetto ad uno dei criteri si possa rimediare con un risultato positivo rispetto ad un altro dei criteri, per cui si ha una sostituibilità tra criteri molto alta.

Ciò può portare a scegliere come preferibile una alternativa che sia molto scadente per un certo criterio e abbastanza buona per gli altri, rispetto ad una alternativa che, pur avendo un valore di  $U_j$  minore della precedente, presenta valori accettabili di utilità rispetto a tutti gli indicatori.

*B) Metodo MULTIPOL.*

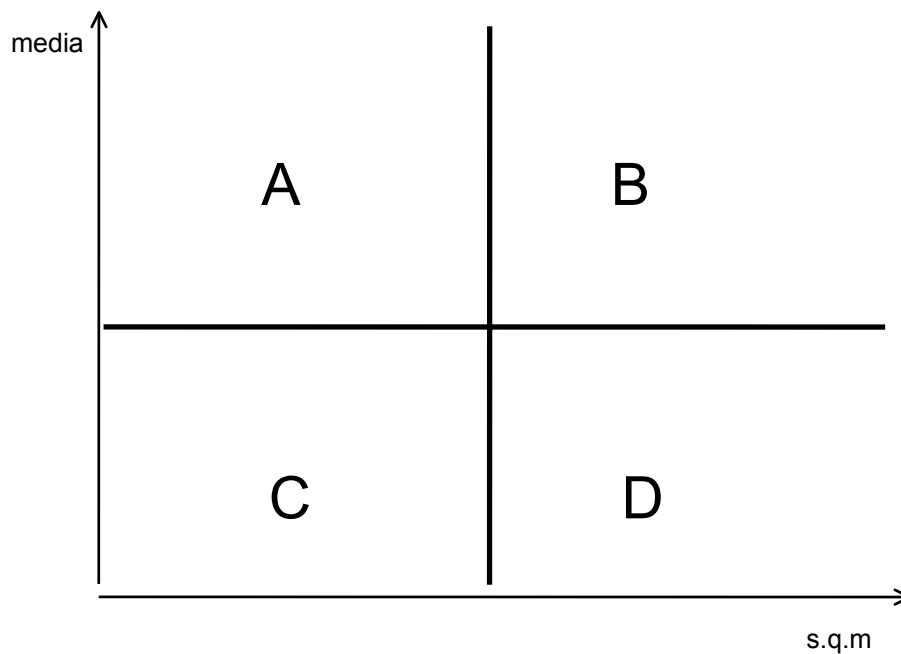
Il metodo MULTIPOL non solo effettua una classifica delle alternative in base ad una utilità complessiva ponderata come il metodo precedente, ma esegue anche una analisi di sensibilità del risultato rispetto al vettore dei pesi.

Oltre al vettore dei pesi fissato ne considera degli altri, che rappresentano degli indirizzi politici di tipo diverso; per ogni vettore dei pesi  $\mathfrak{g}$  e per ogni alternativa  $j$  calcola l'utilità complessiva ponderata  $U_j^{\mathfrak{g}}$ ; dei valori ottenuti, per ogni alternativa al variare del vettore dei pesi, si calcola la media e lo scarto quadratico medio.

Ciascuna alternativa, caratterizzata da una coppia di valori (media e s.q.m.), viene individuata da un punto sul diagramma di figura 3.21: le alternative da preferire sono quelle situate nel quadrante A della figura, in quanto esse presentano non solo una utilità ponderata media elevata, ma anche uno s.q.m. ridotto.

FIG. 3.21

[3.2]



C) Metodo ELECTRE.

Il metodo ELECTRE si basa sul confronto delle alternative prese a due a due; anche esso opera con la matrice espressa in termini di utilità percepita.

Si considerino ad esempio le alternative  $j$  e  $j'$ ; si definisce *insieme di concordanza* relativo alle alternative  $j$  e  $j'$ , e si indica con  $C_{jj'}$ , l'insieme dei criteri rispetto ai quali l'alternativa  $j$  è preferibile all'alternativa  $j'$ .

Si definisce *indice di concordanza* delle alternative  $j$  e  $j'$ ,  $c_{jj'}$ , la somma dei pesi dei criteri appartenenti all'insieme di concordanza:

$$c_{jj'} = \sum_{i \in C_{jj'}} g_i$$

Si definisce, analogamente, *insieme di discordanza*  $D_{jj'}$ , l'insieme di tutti i criteri rispetto ai quali l'alternativa  $j$  risulta peggiore della  $j'$ ; si definisce poi un *indice di discordanza*,  $d_{jj'}$ , nel seguente modo:

$$d_{jj'} = \max_{i \in D_{jj'}} (u_{ij'} - u_{ij})$$

Esso rappresenta quindi il valore massimo tra le differenze, calcolate per ogni criterio appartenente all'insieme di discordanza, delle utilità relative all'alternativa  $j'$  e all'alternativa  $j$ .

Si può allora costruire una tabella di tre colonne, in cui sono riportati per ogni coppia di alternative  $j$  e  $j'$ , per le quali  $j$  è preferibile a  $j'$ , l'indice di concordanza e l'indice di discordanza:

| ALTERNATIVE | Indice di concordanza | Indice di discordanza |
|-------------|-----------------------|-----------------------|
| $(j, j')$   | $c_{jj'}$             | $d_{jj'}$             |

E' evidente che sono preferibili le alternative con alti indici di concordanza e bassi indici di discordanza.

Il metodo ELECTRE I definisce una relazione di preferenza globale nel modo seguente: l'alternativa  $j$  è preferibile globalmente all'alternativa  $j'$  se valgono le due seguenti condizioni:

- la somma dei pesi dei criteri secondo i quali  $j$  è migliore di  $j'$  supera una valore soglia  $c$  (*condizione di concordanza*);
- per ogni criterio secondo il quale  $j'$  è migliore di  $j$ , la differenza di valore (tra i corrispondenti elementi della matrice di valutazione) è inferiore ad un certo valore  $d$  (*condizione di non discordanza*).

Per definire le soglie alcuni autori consigliano di utilizzare la media dei relativi indici.

Fissati i valori soglia si esaminano le coppie di alternative per le quali una delle due è globalmente preferibile all'altra, in base alle condizioni di concordanza e di non discordanza; tali relazioni di preferenza vengono riportate in un grafo in cui le alternative sono rappresentate da nodi e le relazioni di preferenza da archi diretti dall'alternativa migliore a quella peggiore.

Dall'esame del grafo si può ottenere una classificazione delle alternative misurando la lunghezza dei percorsi che conducono ai vari nodi-alternativa, misurata come numero di nodi incontrati sul cammino; se i percorsi per giungere ad una alternativa sono più di uno si sceglie il più lungo (a meno di *loop*). L'alternativa che si trova al termine del percorso più breve (eventualmente di lunghezza zero) si classifica in testa, e così via di seguito. Se vi sono degli ex aequo si possono variare i valori soglia restringendo il campo delle relazioni di preferenza per giungere ad un'unica alternativa preferibile alle altre.

Del metodo ELECTRE sono state proposte più versioni oltre a quella descritta, che migliorano e particolarizzano per certi versi la metodologia di valutazione; tra esse il metodo ELECTRE IV, che sarà trattato in un paragrafo a parte, è ritenuto tra i più adatti per la valutazione delle reti di trasporto.

#### D) Metodo della distanza.

Il *metodo della distanza* è, probabilmente, il più semplice dei metodi utilizzati per l'interpretazione della matrice di decisione.

Da ogni riga della matrice viene estratto il valore migliore della misura di utilità; tale componente rappresenta la prestazione migliore ottenuta dalle varie alternative relativamente ai diversi criteri. I valori così ottenuti danno luogo ad un vettore  $\mathbf{A}^*$  che viene a volte indicato come "alternativa ideale".

La *soluzione ideale* sarebbe quell'alternativa, di solito non realizzabile (altrimenti non sarebbe necessario procedere all'analisi multiobiettivo in quanto vi sarebbe una soluzione dominante sotto tutti i profili), che raggiunge le massime prestazioni relativamente a tutti i criteri.

Costruito il vettore  $\mathbf{A}^*$ , di componenti  $u_i^A = \max_j u_{ij}$ , si calcola, per ogni alternativa  $j$ , la distanza ponderata dalla soluzione ideale nel seguente modo:

$$\xi_j = \sqrt[q]{\sum_{i=1}^n \vartheta_i \cdot |u_{ij} - u_i^A|^q} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad q \geq 1$$

L'ordine di preferenza delle alternative può essere stabilito sulla base della distanza dalla soluzione ideale: l'alternativa migliore è quella per la quale il valore di  $\xi_j$  è minore.

E' opportuno effettuare in contemporanea anche una analisi di sensibilità dei pesi; all'aumentare di  $q$  l'effetto della diversità dei pesi si attenua, per cui conviene riportare su di un grafico l'andamento dei valori di  $\xi_j$  al variare di  $q$  (vedi fig. 3.22): se c'è una alternativa per cui la distanza è sempre minore di tutte le altre, allora essa sarà sicuramente la migliore, in caso contrario vi possono essere dei campi di  $q$  per cui l'alternativa migliore è un'altra. Si possono, quindi, costruire diversi grafici al variare del vettore dei pesi per avere maggiori informazioni sulla preferenza tra le diverse alternative.

**FIG. 3.22**

[3.2]

*E) Osservazioni conclusive.*

Diversi studi sulle analisi multiobiettivo hanno posto in luce che, nella maggior parte dei casi, qualsiasi sia la tecnica di analisi utilizzata il risultato ottenuto è lo stesso; ciò conferma la validità delle analisi multiobiettivo e spinge ad utilizzare, tra le varie metodologie, quelle più semplici e immediate, soprattutto in vista della presentazioni dei risultati agli organi competenti.

Per la progettazione delle reti di trasporto riteniamo applicabili tutte le metodologie ora esposte; tra esse si consigliano il metodo ELECTRE, perché più rigoroso, ed il

metodo della distanza e il metodo MULTIPOL in quanto consentono una rapida analisi di sensibilità; meno rigoroso è, invece, il metodo della funzione di utilità che, per i motivi già esposti, può condurre a valutazioni non sempre valide.

#### 4.4) Il metodo ELECTRE IV.

Il metodo ELECTRE IV è una particolarizzazione del metodo ELECTRE I di cui si è parlato in precedenza. Questo metodo consiste nel confrontare due alternative (X e Y) per volta, ritenendo la prima preferibile alla seconda se vengono soddisfatte le due seguenti condizioni:

- il numero dei criteri di valutazione, ponderati sui pesi relativi loro attribuiti, indicanti X preferibile ad Y è maggiore di un valore minimo prestabilito;
- la massima delle differenze tra le utilità relative ai criteri che indicano Y preferibile ad X è inferiore ad un certo valore di soglia prefissato.

A partire dalla matrice delle prestazioni espresse in termini relativi, che sopperisce alla mancanza degli indici di utilità, una volta espressi anche i pesi in termini relativi, vanno calcolati gli indici di concordanza e discordanza.

Per i primi si esaminano tutte le possibili disposizioni senza ripetizioni delle alternative prese a due a due, per ognuna si individuano i criteri in base ai quali la prima delle due alternative risulta preferibile alla seconda.

Si calcolano poi le somme dei pesi relativi assegnati a tali criteri che rappresentano gli indici di concordanza:

$$C_{ii'} = \left\{ j / r_{ij} \geq r_{i'j} \right\}$$

La valutazione degli indici di discordanza va poi condotta individuando, per ogni coppia di alternative X e Y, i criteri per i quali Y risulta migliore di X e si calcolano le differenze tra gli indici di utilità.

Gli indici di discordanza sono dati, per ogni criterio, dal rapporto tra la suddetta differenza e la massima differenza riscontrata tra gli indici di utilità di ogni alternativa relativa a quel criterio:

$$d_{ii'} = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j \in D_{ii'}} \frac{w_j \cdot |r_{ij} - r_{i'j}|}{d^{\max}} \quad 0 \leq d_{ii'} \leq 1$$

dove:

- $r_{ij} = z_{ij} / \text{MAX}_k [z_{ik}]$
- $d^{\max} = \text{MAX}_{i,i',j} [|r_{ij} - r_{i'j}|]$

- $m = \text{MAX} \{ \text{numero di elementi in } D_{ii'} \}$
- $D_{ii'} = \{ j / r_{ij} \geq r_{i'j} \}$
- $Z_{ij}$  = valore dell'obiettivo  $j$  per l'alternativa  $i$ .

La scelta delle alternative va fatta quindi discendere dalla analisi contestuale degli indici di concordanza e discordanza. Fissati dei valori limite per i due indici, si individuano le coppie di alternative che rispettano ambedue i limiti fissati; per tali coppie è possibile formulare un giudizio di preferenza della prima alternativa rispetto alla seconda, come visto al paragrafo precedente.

Si variano quindi i valori limite fino a riuscire ad individuare l'alternativa preferibile. Siccome la scelta dei valori limite per gli indici è in certo modo arbitraria è opportuno costruire degli indici globali relativi a ciascuna alternativa:

$$C_i = \sum_{i \neq i'} C_{ii'} - \sum_{i \neq i'} C_{i'i}$$

$$d_i = \sum_{i \neq i'} d_{ii'} - \sum_{i \neq i'} d_{i'i}$$

Come si può vedere, per l'alternativa  $i$ -esima, l'indice globale di concordanza è tanto maggiore quanto più sono e più pesano i criteri che fanno preferire l'alternativa  $i$ -esima alla  $i'$ -esima e quanto meno sono e meno pesano quelli che fanno preferire la  $i'$ -esima alla  $i$ -esima, mentre l'indice globale di discordanza dell'alternativa  $i$ -esima è tanto maggiore quanto maggiori sono le differenze massime delle utilità tra l'alternativa  $i'$ -esima e quella  $i$ -esima, ed è tanto minore quanto minori sono le differenze massime delle utilità tra la  $i$ -esima e la  $i'$ -esima.

Risulta evidente quindi che l' $i$ -esima alternativa è tanto più preferibile quanto maggiore è  $C_i$  e quanto minore è  $d_i$ . Vanno escluse le alternative che hanno valori negativi di  $C$  e di  $d$ .

## **CAPITOLO 4**

### **IL CONTROLLO DELL'ESERCIZIO**

### **E DELLA GESTIONE**

#### **1) Il controllo della gestione dei sistemi di trasporto pubblico e privato.**

Dopo la fase di progettazione dell'esercizio di un sistema di trasporto, sia pubblico che privato, è necessario organizzare un programma di gestione che consenta di verificare il funzionamento ottimale dello stesso e correggerne i difetti. In questa fase si verificano, quindi, le prestazioni del sistema di trasporto e le si confrontano con quelle previste in fase di progetto; in questo modo si possono individuare le cause di un cattivo funzionamento del sistema e proporre opportuni rimedi.

Si studierà separatamente il controllo della gestione di un'azienda di trasporto pubblico e la gestione, ordinaria e dell'emergenza, dei Piani urbani di traffico. In effetti nella gestione dei PUT è anche compreso il controllo della gestione dei sistemi di trasporto pubblico, se presenti nel comune interessato; è ovvio, però, che le finalità gestionali nei due casi, pur avendo molti punti in comune, sono alquanto diverse: per l'azienda di trasporto è molto importante l'efficienza del sistema, mentre per gli obiettivi che si propone un PUT assume maggiore rilevanza l'efficacia e, seppure in minor misura, la qualità del servizio offerto.

#### **1.1) Il controllo della gestione di un'azienda di trasporto pubblico.**

Il controllo della gestione di un'azienda di trasporto pubblico viene realizzato con l'utilizzo di *indicatori di prestazione*.

Il concetto di indicatore di prestazione è già stato trattato nel capitolo terzo per ciò che riguarda la progettazione delle reti di trasporto; gli indicatori che si utilizzano per la gestione sono in parte gli stessi utilizzati per il progetto, in parte altri, che tengono conto di fattori riguardanti specificamente la gestione dell'azienda.

La differenza fondamentale tra gli indicatori di progetto e quelli di gestione è che i primi vengono *calcolati* in base a previsioni di funzionamento (simulazione), mentre i secondi sono *misurati* o calcolati in relazione all'effettivo funzionamento del sistema, cioè durante l'esercizio dello stesso. Dal confronto tra i primi ed i secondi si può verificare la bontà delle previsioni effettuate e, in caso di errore, individuarne le cause e i possibili rimedi.

Anche in fase di gestione, gli indicatori possono essere suddivisi in indicatori di efficienza, efficacia e qualità.

Un indicatore di prestazione viene utilizzato per descrivere o misurare un aspetto del funzionamento dell'azienda di trasporto secondo un dato punto vista o una particolare angolazione. Esso deve possedere delle caratteristiche che ne consentano un semplice ed affidabile utilizzo; deve, poi, essere in grado di interpretare le variazioni nel tempo di determinate caratteristiche del sistema e la differenza delle stesse tra diverse condizioni di funzionamento.

In generale non è possibile definire un unico indicatore che rappresenti compiutamente un determinato aspetto del funzionamento dell'azienda o che possieda tutte le qualità sopra elencate, per cui è preferibile disporre di un *gruppo di indicatori* che, nel loro insieme, si completino a vicenda e riescano a dare tutte le informazioni necessarie.

Gli *indicatori per la pianificazione del servizio*, utilizzati per la progettazione dell'esercizio del sistema di trasporto, sono stati già trattati nel capitolo 3, in funzione anche dei tre obiettivi che devono essere perseguiti: efficienza, efficacia e qualità. Oltre ai suddetti si possono aggiungere i seguenti:

— *Costo:*

- costo medio per veicolo\*ora;
- costo medio per veicolo\*km;
- costo operativo (carburante, olio, etc.) per veic.\*ora.

— *Produzione del servizio:*

- reddito veicolo\*km/reddito veicolo\*h;
- n. autobus in servizio di punta/n. autobus in servizio fuori punta;
- veicoli di riserva/n. minimo di autobus.

Questi indicatori sono utili soprattutto per valutare le conseguenze operative di modifiche effettuate sulla rete già esistente: istituzione di nuove linee, cambiamenti di percorso di linee esistenti; dai valori forniti dagli indicatori si può riscontrare la validità delle variazioni programmate.

Oltre agli indicatori per la pianificazione del servizio, ve ne sono altri utilizzati per una *valutazione delle prestazioni interne all'azienda nel tempo*; alcuni di questi indicatori coincidono con quelli già visti per la pianificazione del servizio.

I gruppi di indicatori che si possono individuare riguardano i seguenti aspetti del funzionamento di un'azienda (vedi tab. 4.1):

- 1) **I costi.** Come nella pianificazione del servizio, alcuni indicatori di costo sono essenziali quale che sia la dimensione della rete. Per prima cosa è importante misurare *il costo della produzione di una data quantità del servizio*: “costo medio per veicolo\*km o per veicolo\*ora” (sia inteso come costo totale che come costo di esercizio). Altro importante indicatore è *la comparazione delle spese con il bilancio assegnato*, in modo da poter identificare gli eccessi o le insufficienze di spese e ricercarne le cause. A questi possono essere aggiunti degli indicatori specifici riguardanti i costi della manodopera suddivisi per settori di impiego.
- 2) **Produzione del servizio.** E' necessario valutare almeno la produzione totale di veicoli in “veicoli\*ora” o in “veicoli\*km” e gli stessi per veicolo; a volte la produzione totale del servizio è misurata in “posti\*km” o “capacità\*km” offerti.
- 3) **Affidabilità del servizio.** Una delle esigenze fondamentali è che il servizio sia affidabile; per valutare ciò deve essere almeno utilizzato come indicatore il numero di “veicoli\*km programmati non effettuati”, eventualmente suddivisi per causa dell'interruzione. Un valore elevato di tale indicatore può suggerire di adottare provvedimenti di *bus-priority* o di rimodernare il parco veicoli (per migliorare l'affidabilità del materiale mobile).
- 4) **Le entrate.** Gli indicatori riguardanti le entrate sono importanti sia per valutare la redditività del servizio che per fissare nuove politiche di tariffazione. Si calcolano, in genere, l'entrata totale (da confrontare con i costi totali) e le entrate per veicolo\*ora o per veicolo\*km, che forniscono le capacità di guadagno di ogni veicolo.
- 5) **Il traffico.** Importanti sono le informazioni sul numero di passeggeri trasportati dal sistema. Si calcolano, più precisamente, il “n. totale di passeggeri trasportati” e lo stesso per veicolo\*ora e per veicolo\*km, ed anche i “passeggeri\*km”; il rapporto “passeggeri\*km/veicoli\*km” rappresenta il tasso di occupazione, che può essere ricavato per le singole linee o per l'intera rete.

TAB. 4.1

[4.1]

| Campo di interesse        | INDICATORI                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Costo                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo medio per veic.*ora e per veic.*km</li> <li>• Comparazione del costo di esercizio e degli investimenti col bilancio</li> <li>• Costo manodopera/costo totale</li> <li>• Costo materiale/costo totale</li> </ul> |
| Produzione del servizio   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Veic.*ore o veic.*km</li> <li>• Veic.*ore/veicoli; veic.*km/veicoli</li> <li>• Veic. in servizio ore di punta/veic. fuori ore di punta</li> <li>• Posti a sedere*km</li> <li>• Posti totali*km</li> </ul>             |
| Affidabilità del servizio | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Veicoli*km programmati non effettuati (ripartiti per: mancanza personale, mancanza veicoli, congestione)</li> <li>• N. di avarie per 1.000 veic.*km.</li> </ul>                                                       |
| Entrate                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrate totali e per veic.*ora e per veic.*km</li> <li>• Rapporto entrate/costi</li> </ul>                                                                                                                            |
| Traffico                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• N. totale di passeggeri trasportati</li> <li>• N. passeggeri per veic.*ora e per veic.*km</li> <li>• Passeggeri*km</li> <li>• Passeggeri*km/veicoli*km</li> </ul>                                                     |

L'elenco di indicatori sopra riportato non è esaustivo, ma è il minimo consigliato.

### 1.2) La gestione ed il controllo dei Piani urbani di traffico.

Il PUT è, come si è detto, un piano di breve periodo che prevede un aggiornamento biennale; nel periodo di tempo che intercorre tra l'adozione di un PUT e l'approvazione di quello successivo bisogna verificare le previsioni di funzionamento effettuate in fase di progettazione e valutare il grado di raggiungimento degli obiettivi prefissati.

A tal proposito nelle “*direttive per la redazione, adozione ed attuazione dei Piani urbani del traffico*” sono riportate delle indicazioni riguardanti la gestione ordinaria e la gestione dell'emergenza dei PUT.

Per *gestione ordinaria* del PUT si intende l'attività di rispetto, controllo e aggiornamento delle discipline di traffico imposte in seguito all'attuazione del PUT.

Affinché il PUT dia dei risultati soddisfacenti è necessario far rispettare le discipline imposte dal piano riguardanti la fluidità della circolazione e la sicurezza stradale; ciò comporta l'attuazione dei piani settoriali relativi al “potenziamento e/o ristrutturazione del servizio di vigilanza urbana” e alle “campagne di informazione e sicurezza stradale”.

E' poi fondamentale una attività di controllo su strada dell'efficacia degli interventi previsti dal PUT, che si basa essenzialmente sul **monitoraggio del traffico** e sul confronto tra i dati “prima e dopo” l'attuazione delle nuove discipline di circolazione stradale.

I dati da raccogliere in fase di monitoraggio riguardano i cinque parametri di seguito elencati:

- i *flussi veicolari* alle intersezioni e in alcune sezioni tipo della viabilità principale, col fine di controllare e verificare la validità della regolazione semaforica e dei metodi previsionali e di simulazione adottati in fase di redazione del PUT;
- le *velocità di percorrenza* veicolare per i mezzi pubblici e privati sui diversi itinerari della viabilità principale, così da controllare il raggiungimento ed il mantenimento dei livelli di fluidità della circolazione previsti dal Piano ed individuare i punti critici del sistema;
- la presenza di *sosta veicolare* nelle diverse zone urbane, in modo da verificare che la politica adottata abbia condotto al *modal split* di progetto; inoltre si deve evitare che veicoli in sosta vietata sulla viabilità principale creino nuovi punti di congestione del traffico;
- il numero di *passaggeri sulle tratte significative della rete di trasporto pubblico* (dove esistente);
- tipologia e numero degli *incidenti stradali*, così da verificare il raggiungimento dell'obiettivo sicurezza ed individuare gli argomenti da trattare nelle campagne di sicurezza stradale.

La raccolta di questi dati ed il loro confronto con quelli della situazione precedente consentono di controllare l'esercizio della rete stradale, delle aree di sosta e del sistema di trasporto collettivo, di individuare dei miglioramenti da apportare al PUT durante la sua attuazione ed infine di avere un'ampia base-dati su cui fondare l'aggiornamento biennale del Piano.

Più precisamente l'allegato alle direttive affida alla 1<sup>a</sup> sezione dell'Ufficio tecnico del traffico (*indagini, statistiche e programmi*) il compito di organizzare le indagini per la raccolta dei suddetti dati, di archivarli in una propria "banca dati e modelli" e di elaborarli al fine di un utilizzo in fase di aggiornamento biennale del PUT; i dati cui si fa riferimento riguardano le statistiche di traffico (popolazione, parco circolante auto private - persone e merci -, passeggeri dei mezzi pubblici, etc.), le statistiche degli incidenti stradali e delle contravvenzioni (con relative mappe dei punti neri), i dati rilevati dalle indagini O/D, il catasto degli spazi pubblici statali ed il monitoraggio continuo del traffico.

La *gestione dell'emergenza* dei PUT concerne interventi particolari da adottare nel caso in cui, per condizioni eccezionali atmosferiche o di traffico, i limiti di inquinamento acustico o atmosferico siano superati; si possono prevedere, allora, delle restrizioni alla circolazione dei movimenti motorizzati individuali, almeno per i veicoli che non ottemperano le più recenti norme per il contenimento delle emissioni inquinanti; è sconsigliato dalle direttive il ricorso alle targhe alterne.

Le metodologie suggerite sono:

- fluidificazione degli itinerari esterni al sistema viario tangenziale urbano, su cui deviare il traffico di attraversamento;
- parziale blocco della mobilità motorizzata individuale e contestuale aumento eccezionale della capacità della rete di trasporto collettivo, con l'istituzione temporanea di corse aggiuntive ed eventuali linee integrative.

I dati richiesti in fase di gestione devono essere raccolti sul campo con specifiche indagini riguardanti i vari aspetti trattati. Ricordiamo a tal proposito la disposizione nei punti critici della rete urbana di centraline automatiche per la misura in tempo reale della concentrazione di agenti inquinanti nell'aria.

### **1.2.1) Indicatori di prestazione per la gestione ed il controllo dei Piani urbani di traffico.**

Il corretto funzionamento e la rispondenza agli obiettivi prefissati di un PUT può essere valutato, durante la sua attuazione, con l'utilizzo di indicatori di prestazione, così come avviene per il controllo della gestione delle aziende di trasporto collettivo.

Alcuni indicatori utilizzabili per tale scopo sono quelli già visti in fase di progettazione delle reti di trasporto pubblico e privato, con la solita differenza che adesso essi vengono misurati o calcolati in base ai dati raccolti durante l'attuazione del piano stesso e non sulla base di modelli di previsione.

Anche in questo caso conviene fornire dei gruppi di indicatori che nel loro insieme misurino la rispondenza del piano agli obiettivi prefissi.

*A) Indicatori per le condizioni di circolazione.*

Uno degli obiettivi che deve essere perseguito dalla redazione di un PUT è il miglioramento delle condizioni di circolazione (movimento e sosta).

Il miglioramento delle condizioni di circolazione viene individuato, fondamentalmente, dal livello di servizio offerto sui diversi rami della rete stradale e alle intersezioni, semaforizzate e non semaforizzate.

Si possono quindi suggerire una serie di *indicatori di livello di servizio* (vedi tab. 4.2) che, calcolati con le metodologie riportate nel capitolo 1, forniscono una precisa situazione delle condizioni di fluidità della circolazione<sup>1</sup>.

Visto che le procedure da adottare per il calcolo dei livelli di servizio sono alquanto laboriose, non è sempre possibile effettuare il calcolo dei suddetti indicatori per tutti i rami e tutte le intersezioni della rete; essi saranno, perciò, calcolati solo per un campione significativo di rami ed intersezioni che rappresenti mediamente la situazione dell'intera rete.

Oltre a questi se ne possono proporre degli altri che sono calcolati o misurati in modo molto più agevole; alcuni di essi vengono utilizzati anche nella fase di progetto della rete di trasporto privato per la scelta tra le diverse alternative.

---

<sup>1</sup>Ricordiamo che, in questa fase, i dati di traffico da inserire nelle procedure devono essere rilevati con apposite indagini sul campo e non calcolati con modelli di simulazione.

**TAB. 4.2**

| <b>Indicatori di livello di servizio</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• % di km di strade di scorrimento che hanno livello di servizio A, B o C.</li> <li>• idem pesato sui flussi.</li> <li>• % di km di strade di quartiere che hanno livello di servizio A, B o C.</li> <li>• idem pesato sui flussi.</li> <li>• % di intersezioni non semaforizzate che hanno livello di servizio A, B o C.</li> <li>• idem pesato sui flussi.</li> <li>• % di intersezioni semaforizzate che hanno livello di servizio A, B o C.</li> <li>• idem pesato sui flussi.</li> </ul> <p>Il calcolo dei suddetti indicatori deve essere effettuato nelle diverse fasce orarie della giornata e con particolare riferimento alle ore di punta.</p> |
| <b>Altri indicatori</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• rapporto flusso/capacità.</li> <li>• idem pesato sui flussi.</li> <li>• velocità commerciale media.</li> <li>• idem pesato sui flussi.</li> <li>• tempo complessivo di viaggio (veicoli x ora e/o viaggiatori x ora).</li> </ul> <p>I suddetti indicatori possono essere calcolati complessivamente o per singole zone o, ancora, per categorie di strade.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• % di spostamenti su mezzi collettivi totale e per singole coppie di zone.</li> <li>• % di km della rete principale con coeff. di saturazione superiore a 0.90.</li> </ul>                                                                       |

*B) Indicatori per la sicurezza.*

Il raggiungimento dell'obiettivo di una maggiore sicurezza stradale può essere misurato con degli indicatori che riportino il numero di incidenti e la loro gravità; essi servono per individuare, mediante opportune rappresentazioni grafiche (mappe dei punti neri), i punti più pericolosi della rete stradale e per pianificare la campagna di informazione sulla sicurezza stradale.

Le informazioni da raccogliere sono: n. di incidenti per zona, per categoria di strada, per gravità, per causa scatenante.

Tali indicatori sono riportati in tabella 4.3.

TAB. 4.3

| Indicatori per il miglioramento della sicurezza stradale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• numero di incidenti totali e per zona.</li> <li>• idem per tipologia di strada.</li> <li>• numero di morti.</li> <li>• numero di feriti gravi.</li> <li>• numero di incidenti per causa scatenante.</li> <li>• idem con morti.</li> <li>• idem con feriti gravi.</li> <li>• numero di incidenti che coinvolgono pedoni.</li> <li>• idem per zona, per categoria di strada e per conseguenze.</li> </ul> |

*C) Indicatori per l'inquinamento.*

Gli indicatori per l'inquinamento riguardano l'inquinamento acustico ed atmosferico. Essi, mentre in fase di progetto venivano calcolati con modelli analitici, sono adesso misurati con opportune centraline di monitoraggio poste in vicinanza di significativi punti della rete di trasporto.

Questi indicatori, riportati in tab. 4.4, devono essere quotidianamente confrontati con i limiti massimi ammessi dalla normativa; se superati sono necessari interventi di blocco parziale o totale della circolazione, come previsto nelle direttive.

TAB. 4.4

| Indicatori per l'inquinamento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><i>Inquinamento acustico:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• livello di pressione sonora equivalente in dB(A).</li> </ul> <p><i>Inquinamento atmosferico:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• concentrazione nell'aria (in µg/mc) di: biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>).<br/>biossido di azoto (NO<sub>2</sub>).<br/>ozono (O<sub>3</sub>).<br/>monossido di carbonio (CO).<br/>piombo (Pb).<br/>fluoro (F).<br/>particelle sospese.</li> </ul> |

*D) Indicatori per il risparmio energetico.*

Il risparmio energetico può essere valutato con gli stessi indicatori adoperati per il progetto della rete, con la differenza che i dati da porre nei modelli di calcolo vengono misurati direttamente e non ottenuti mediante simulazione. Essi sono riportati in tabella 4.5.

**TAB. 4.5**

| Indicatori per il risparmio energetico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• consumo, specifico e complessivo, del carburante dei veicoli pubblici e privati.</li> <li>• consumo totale equivalente di carburante delle autovetture sulla rete principale.</li> <li>• consumo totale di carburante del sistema di trasporto collettivo di superficie.</li> <li>• consumo di carburante per modo di trasporto collettivo di superficie (se presenti più modi).</li> <li>• stima dei consumi totali di carburante delle autovetture sulla rete principale.</li> </ul> |

*E) Indicatori di costi e ricavi.*

In questa fase si tiene conto solo dei costi di esercizio (quelli di investimento sono valutati in fase di progettazione) e dei ricavi provenienti dalle aree di sosta a pagamento e dalle eventuali politiche di tariffazione per l'ingresso nei centri storici.

I costi riguardano fondamentalmente:

- consumi di elettricità;
- salari per gli addetti alla vigilanza;
- risorse impegnate nelle campagne di informazione stradale;
- contributi alle aziende di trasporto collettivo.

I ricavi comprendono:

- ricavi da tariffazione sosta;
- ricavi da tariffazione ingresso centro storico;
- rilascio concessioni;
- sistemi pubblicitari ed insegne stradali.

## **2) Il controllo dell'esercizio in tempo reale.**

La progettazione di un sistema di trasporto, pubblico e/o privato, si basa su informazioni riguardanti dei valori medi, anche se spesso volte riferiti alle ore di punta, delle componenti del sistema stesso; non si può, quindi, tener conto in fase di progettazione, come anticipato nel capitolo 1, di fattori aleatori quali una diminuzione di capacità di una strada per lavori in corso, o di una imprevista punta di domanda, o, ancora, di una rottura di un veicolo in servizio di linea.

Per questi motivi è conveniente prevedere, sia per il sistema di trasporto pubblico che per quello privato, un sistema di controllo in tempo reale che consenta da un lato di informare gli utenti della situazione e consigliare loro gli itinerari migliori, e dall'altro di intervenire sul sistema per limitare o annullare i disagi prodottisi.

### **2.1) Il controllo nel sistema di trasporto pubblico.**

Le procedure trattate nel capitolo precedente per la progettazione dell'esercizio di un sistema di trasporto collettivo forniscono uno strumento essenziale per elevare l'efficienza del sistema, ma non sono in grado di garantire elevati valori di affidabilità del servizio.

Ciò dipende da svariati motivi, alcuni dei quali esterni al sistema quali la congestione determinata dal traffico veicolare, altri interni come ad esempio una concentrazione della domanda nel tempo e nello spazio non prevista dal programma di esercizio.

Quale che sia la causa, l'autobus in ritardo, aumentando l'intervallo di tempo dall'autobus che lo precede, incontra alle fermate un numero di utenti superiore a quello programmato, per cui l'affollamento del veicolo aumenta e con esso aumentano i tempi di sosta alle fermate e, quindi, i tempi di percorrenza. Contemporaneamente l'autobus successivo, partito ad un intervallo prefissato, si avvicina sempre di più a quello che lo precede; la domanda che incontra è minore di quella programmata, per cui i tempi di percorrenza si riducono fino al punto che l'intervallo esistente tra i due autobus si annulla: si ha il fenomeno del *bus-bunching*.

Il fenomeno ora descritto non è l'unica causa di irregolarità del servizio; altre cause sono: imprecisione del personale viaggiante, ritardo dell'uscita dei veicoli dai depositi, mancanza di veicoli, guasti, etc. Per la molteplicità dei motivi di disturbo l'affidabilità del servizio tende a valori sempre più bassi se non si controlla opportunamente l'esercizio e non si interviene con le necessarie correzioni.

### **2.1.1) Funzioni.**

Il controllo dell'esercizio in tempo reale consente di migliorare l'efficienza del sistema, fornendo informazioni all'azienda, la qualità del servizio, informando gli utenti e può essere utilizzato per altri scopi di traffico o di interesse generale quali avvisi di emergenza o protezione civile.

Si possono, quindi, distinguere tre diverse funzioni: verso l'azienda, verso l'utente e verso altri sistemi.

#### *A) Funzioni verso l'azienda.*

Il sistema centralizzato di controllo in tempo reale dei veicoli consente una più efficiente gestione dell'esercizio e delle funzioni di deposito e manutenzione dei mezzi.

Conoscere in tempo reale la posizione dei veicoli e del relativo personale viaggiante sulla rete, e lo stato operativo dei veicoli (in anticipo, in orario o in ritardo) consente di intervenire ripianificando, se possibile, il servizio programmato (revisione delle coincidenze), ovvero, inviando opportuni ordini, di ottimizzare le risorse disponibili, così da migliorare efficienza e qualità dello stesso.

La conoscenza in tempo reale della posizione del veicolo consente inoltre all'azienda di predisporre interventi di emergenza o di soccorso; ad esempio inviare la squadra tecnica al capolinea o lungo il percorso per riparare il guasto ad un veicolo, oppure provvedere con un veicolo di riserva qualora se ne presenti la necessità. Le funzioni di soccorso possono riferirsi anche a situazioni di emergenza sanitaria o di polizia verificatesi a bordo del veicolo con il quale la centrale operativa è costantemente in contatto.

Se il sistema è poi collegato alle obliterate di bordo e con un impianto per la conta dei passeggeri in vettura, è possibile indirizzare i controllori dei titoli di viaggio su quei mezzi dove è più probabile l'evasione.

I veicoli vengono in genere equipaggiati anche con dei sistemi di diagnostica dello stato meccanico del veicolo, che consentono di conoscere in anticipo le operazioni di manutenzione che si rendono necessarie.

#### *B) Funzioni verso l'utente.*

Le informazioni all'utente sullo stato del sistema possono essere date in due modi: statico o dinamico. Il primo consiste nel fornire all'utente la situazione dello stato del sistema "da fermo" e di consigliargli il percorso più idoneo al suo spostamento; ad

esempio si forniscono informazioni su linee, orari, percorsi, frequenze, coincidenze, tariffazione e commercializzazione dei titoli di viaggio, etc. Il secondo consiste nel fornire all'utente la situazione dello stato del sistema "in moto" relativa ad un determinato periodo di tempo antecedente o successivo alla richiesta dell'informazione, consigliandogli anche in tal caso il percorso più idoneo alle sue esigenze.

Tali informazioni possono essere richieste dall'utente prima di iniziare il viaggio (*pre-trip*) o durante lo stesso (*en route*). Se, poi, egli comunica al centro di controllo l'accettazione del percorso consigliatogli (per esempio acquistando il relativo titolo di viaggio), si possono prevedere in anticipo i carichi sulle linee e quindi fornire agli utenti informazioni sempre più attendibili.

Le informazioni all'utente possono essere fornite in cinque modi distinti:

- *A terra in corrispondenza delle fermate.* Tali informazioni riguardano: le linee passanti per la fermata, l'orario previsto di passaggio del prossimo veicolo per ogni linea, informazioni su eventuali ritardi, informazioni sulla prossima fermata.
- *A terra in corrispondenza di particolari poli informativi.* Si forniscono: tutte le informazioni previste per la singola fermata estese a tutte le principali fermate della rete; informazioni sui percorsi consigliati in base ai dati giunti al centro di controllo: si utilizzano in genere schermi del tipo "touch-screen" con informazioni basate su cartografia numerica con diversi livelli di ingrandimento e possibilità di ricerca dell'informazione secondo diverse chiavi d'accesso (punti notevoli dell'area, fermate autobus, strade, etc.).
- *A bordo del veicolo:* visualizzazione della prossima fermata, annuncio audio della prossima fermata, schema della linea con le varie fermate.
- *A casa:* mediante l'uso di VIDEOTEL o TELEVIDEO; si forniscono in questo caso tutte le possibili informazioni sugli orari, linee, frequenze, coincidenze, etc. riguardanti l'intera rete.
- *Ovunque:* mediante l'uso di tecnologie telefoniche multimedia-li; tali tecniche sono anche utili per le informazioni agli utenti del trasporto privato.

### C) Funzioni verso altri sistemi.

Le informazioni in tempo reale su una certa area sono sempre di enorme interesse e portata, ed esulano dai fenomeni strettamente legati alla mobilità. Esse, infatti, possono essere utilizzate per avvisi di emergenza, di protezione civile, o altro.

In particolare, se si è in presenza di altri sistemi di controllo in tempo reale della mobilità è possibile interfacciare i vari sistemi al fine, ad esempio, di regolare nella maniera ottimale la rete semaforica sotto controllo, potendo così, ad esempio, concedere priorità al mezzo pubblico agli incroci.

### 2.1.2) Le possibili strategie di controllo.

Gli obiettivi che si prefigge il controllo in tempo reale dell'esercizio sono fondamentalmente i seguenti:

- a) rispettare l'orario;
- b) rispettare il distanziamento temporale tra gli autobus;
- c) assicurare la presenza del personale al tempo ed al luogo in cui sono previsti cambi nel servizio;
- d) fare fronte all'eventuale emergenza (blocchi di traffico, guasti in linea).

Le tecniche che possono essere seguite per riportare i veicoli al programma di esercizio variano a seconda delle circostanze; nel seguito si riportano le più comuni, alle quali si può fare ricorso qualunque sia il sistema di controllo adoperato.

#### *A) Accelerazione o rallentamento del veicolo.*

La possibilità di aumentare o ridurre la velocità commerciale di un autobus di linea è molto limitata; in genere si preferisce effettuare in alcuni punti la deviazione dal programma di esercizio (quasi sempre ai terminali di linea). Ad esempio nei casi di punte unidirezionali, il rallentamento sulla linea che si ha in una direzione può essere recuperato aumentando la velocità di esercizio nell'altra; in questo modo l'autobus che arriva al capolinea in anticipo può essere fatto partire prima dell'orario programmato se si prevede che il viaggio successivo sia più lento; ciò deve essere fatto compatibilmente con i tempi minimi di riposo per il personale viaggiante.

Ritardare una corsa provoca fastidio all'utenza già nel veicolo, per cui questo tipo di intervento viene attuato solo ai terminali di linea. In teoria con un intervento simile si dovrebbe ottenere un vantaggio, uniformando le frequenze; in pratica si è riluttanti ad intervenire in questo modo, perché non vi sono benefici diretti per l'azienda, dato che comunque si aumenta il tempo di giro.

#### *B) Il tempo di recupero.*

In molti casi una perdita di tempo può essere recuperata solo ai terminali; per tale motivo si inserisce nel calcolo del tempo di giro un margine di sicurezza, detto "tempo di recupero", che consenta ai veicoli di ripartire in orario.

La scelta appropriata del tempo di recupero deve essere un giusto compromesso tra una inutile perdita di tempo e una eccessiva percentuale di mezzi che non possono rispettare l'orario di partenza; si riesce in questo modo ad elevare la regolarità dell'esercizio. Essa va calcolata in base alla varianza del tempo di giro.

*C) Abbreviazione delle corse.*

Quando risulta chiaro che il ritardo è talmente elevato da non poter essere recuperato, anche se si dispone di tempi di recupero, e tale ritardo si ripercuoterebbe sulle successive corse, è preferibile fare invertire la marcia prima di giungere al capolinea. Ciò comporta che i passeggeri in vettura devono trasferirsi sul veicolo successivo, per cui la manovra è possibile solo se due autobus camminano accodati o molto vicini (*bus-bunching*).

E' chiaro che ciò è praticamente impossibile per linee a bassa frequenza; inoltre bisogna scegliere oculatamente dove fare eseguire l'inversione, per evitare che si anticipi eccessivamente la corsa nella direzione opposta.

Tale intervento è utilizzabile solo se si dispone di un sistema centralizzato di controllo delle posizioni di tutti i veicoli in esercizio su una linea, su gruppi di linee o sull'intera rete.

*D) Scambio di vetture.*

La procedura precedente può essere applicata anche se viaggiano con forte ritardo due autobus che marcano in senso opposto.

Se si stabilisce la corrispondenza in un punto intermedio della linea, i due veicoli possono essere scambiati nel programma di esercizio nel senso che i passeggeri restano in vettura ma si scambia il personale. In questo modo si consente ad un equipaggio di recuperare la sua corretta posizione nel programma di esercizio, mentre l'altro equipaggio viene anticipato, per cui occorre ulteriormente intervenire su di esso per riportarlo in orario.

Tale strategia consente il rispetto dei turni previsti per il personale e quindi evita che si perdano ogni giorno, come spesso accade, le ultime corse a fine turno.

*E) Copertura di un vuoto.*

Per "vuoto" si intende la uscita dal servizio per cause non previste di un veicolo; esso può essere coperto in tre modi diversi:

- inserendo un veicolo dal parco di riserva;
- rimuovendo uno dei veicoli che opera nella direzione opposta;
- rimuovendo un veicolo da un'altra linea.

Prima queste operazioni venivano decise dagli ispettori di linea che, dislocati in opportuni punti della rete, erano collegati tra loro via telefono e controllavano le condizioni dell'esercizio; tale pratica è superata con le nuove tecnologie di controllo, per

cui le decisioni di intervento vengono prese direttamente dalla centrale operativa, in base alle informazioni che giungono in tempo reale.

### 2.1.3) Tecnologie adottate.

Il sistema di telecomunicazioni (TLC) che viene adottato nel controllo dell'esercizio dei sistemi di trasporto pubblico è costituito di tre sottosistemi principali:

- 1) **Sistema di bordo** (localizzazione del veicolo e trasmissione dati). Esso deve essere in grado di determinare la posizione del veicolo dovunque esso si trovi, in modo continuo, con buona precisione ed elevata affidabilità; deve inoltre avere componenti di basso peso ed ingombro, dovendo essere disposto sui mezzi. Per quanto riguarda la trasmissione dei dati, essa deve avvenire con minimi disturbi, elevata rapidità, elevata frequenza e deve essere prevista la possibilità di collegarsi telefonicamente col veicolo.
- 2) **Sistema di controllo elaborazione e gestione dati**. Tale sistema deve possedere elevata rapidità di calcolo, una buona interfaccia grafica (individuazione delle linee e dei veicoli su schermo) e deve essere facile da utilizzare.
- 3) **Sistema di trasmissione dati agli utilizzatori**. Questo sistema deve possedere una elevata diffusione (possibilmente in tutte le fermate) e affidabilità; inoltre deve avere una elevata frequenza di aggiornamento. Anche in questo caso conviene prevedere la possibilità di un dialogo in fonia, soprattutto per i contatti tra la centrale di controllo e la direzione dell'azienda.

Esaminiamo di seguito i tre sottosistemi, soffermandoci sulle tecnologie più adottate per i veicoli a guida libera.

#### *A) Sistema di bordo.*

I sistemi di bordo utilizzati per la localizzazione del veicolo possono essere suddivisi in: sistemi autonomi e sistemi di radio-localizzazione.

I *sistemi autonomi* sono quelli in uso da più tempo ed ormai quasi superati; essi sono composti da un "odometro", che conta il numero di giri delle ruote del veicolo, e da un "giroscopio inerziale" che fornisce la direzione del moto. I dati forniti da tali apparecchiature vengono elaborati da un algoritmo del tipo *Map Matching* mediante il quale, noto il punto di partenza del veicolo, la sua posizione viene aggiornata istante per istante. L'eventuale accumulo degli errori può essere ridotto verificando la posizione stimata con un sensore di apertura porte in corrispondenza delle fermate, che svolgono così il ruolo di punti noti.

I *sistemi di radio-localizzazione* si sono sviluppati negli ultimi anni e si vanno sempre più diffondendo; essi vengono suddivisi in:

- satellitari;
- misti.

I *sistemi satellitari* si basano sul riconoscimento della posizione del veicolo mediante una triangolazione, effettuata questa volta tramite segnali radio emessi da satelliti orbitanti. La rete di satelliti esistente, denominata GPS (*Global Position System*) permette una copertura su tutto il globo 24 ore su 24, essendo visibili da qualunque parte ed in qualunque istante almeno 4 satelliti (numero minimo necessario per conoscere la posizione di un oggetto nello spazio). Il ricevitore GPS calcola la sua posizione in base al tempo impiegato dal segnale a percorrere la distanza verso il satellite; la precisione non è però molto elevata (l'errore può arrivare ai 100 m). Tale sistema è anch'esso difficilmente utilizzabile da solo in ambiente cittadino a causa delle possibili schermature tra GPS e satelliti.

I *sistemi misti* sono una combinazione tra il sistema di radio-localizzazione satellitare e i sistemi autonomi. In essi il sistema GPS viene sostituito durante eventuali periodi di schermatura con l'odometro ed il giroscopio che, funzionando solo per brevi periodi, non comportano errori sensibili, errori che vengono corretti con la ripresa del funzionamento del GPS.

Oltre al modulo localizzazione consistente essenzialmente in antenna, ricevitore, eventuale odometro e giroscopio, sono presenti a bordo dei sistemi computerizzati di controllo e formattazione dei dati e di gestione del sistema di bordo; sono inoltre presenti dei sistemi di trasmissione dei dati per l'invio delle informazioni alla centrale di controllo, quale ad esempio un modulo modem, che consente l'accoppiamento con qualsiasi mezzo di trasmissione anche in fonia.

#### *B) Sistema di controllo elaborazione e gestione dati.*

Il sistema centrale di controllo è costituito da un elaboratore elettronico centrale con una serie di server e diverse periferiche che consentono di poter ricevere i dati (modem, ricevitore di riferimento per il GPS, etc.); l'elaborazione dei dati avviene mediante un opportuno software che consente la visualizzazione della posizione dei diversi veicoli in cartografia e che elabora, eventualmente, un programma di esercizio a seconda della situazione incontrata.

#### *C) Sistema di trasmissione dati.*

Di fondamentale importanza è il sistema di trasmissione dati dai veicoli al centro operativo (e viceversa) e dal centro operativo agli utilizzatori (e viceversa). Si possono utilizzare o una rete proprietaria su canali VHF o UHF che necessita delle concessioni PT non sempre disponibili, oppure di utilizzare una rete non proprietaria pubblica (TELECOM) o privata (EUTELTRACS - Telespazio). La scelta tra le due alternative deve essere effettuata in base alla dimensione dell'area da servire, dalla orografia del

territorio interessato, dal numero di canali necessari per la fonia e per i dati che a loro volta dipendono dalla dimensione del parco sotto osservazione e dalla frequenza d'interrogazione. Per le informazioni all'utente conviene servirsi della rete TELECOM mediante apposite linee.

## **2.2) Il controllo nel sistema di trasporto privato.**

Negli ultimi anni si sono sviluppate alcune metodologie di controllo in tempo reale del sistema di trasporto privato il cui obiettivo è quello di ottimizzare il funzionamento della rete, minimizzando i tempi di viaggio e i consumi energetici ed incrementando la sicurezza.

Il controllo del funzionamento di un qualsiasi sistema di trasporto può essere effettuato a tre diversi livelli:

- 1) A *livello di rete*, se il controllo è esteso all'intera rete di trasporto ed influenza il funzionamento del sistema nel suo insieme.
- 2) A *livello di ramo o nodo*, quando il controllo viene eseguito su uno o più rami o in particolari nodi della rete stessa.
- 3) A *livello veicolare*, se il controllo dell'esercizio riguarda i singoli veicoli.

Nel primo livello si guidano i singoli veicoli o gruppi di veicoli o, ancora, interi flussi di traffico attraverso una data rete, tenendo conto della reale situazione del traffico e di altre condizioni particolari quali lavori in corso, incidenti stradali, ecc..

Nel secondo livello si tende ad ottimizzare la circolazione di una parte di veicoli presenti su uno o più percorsi della rete e tra loro connessi.

Nel terzo livello si controlla il singolo veicolo regolandone la velocità ed il distanziamento con il veicolo che lo precede.

### **2.2.1) Principi basilari del controllo dei veicoli.**

I problemi derivanti dalla congestione del traffico veicolare su uno o più rami e/o nodi della rete e quelli dovuti agli incidenti stradali dipendono principalmente da due fattori:

- la non disponibilità di informazioni in tempo reale agli utenti sullo stato della rete (percorso più conveniente da seguire);
- la limitata capacità del guidatore di elaborare le informazioni a lui giunte al fine di scegliere la più opportuna condotta di guida.

A tal proposito bisogna precisare che ogni guidatore ha a che fare con tre livelli di informazione:

- 1) Informazioni generate e/o visualizzate all'interno del veicolo (ad es. la velocità).

- 2) Informazioni generate e/o visualizzate nelle immediate vicinanze del veicolo e quindi visibili (ad es. altri veicoli del flusso, segnali stradali, etc.).
- 3) Informazioni sulla situazione del traffico nell'ambiente circostante (non direttamente visibili).

Il terzo livello di informazioni si rende disponibile solo se viene previsto per il sistema di trasporto un controllo in tempo reale dell'esercizio.

Un problema chiave è, quindi, quello di fornire al guidatore le informazioni sullo stato della rete che non sono direttamente visibili, cioè quelle del terzo livello; esse dovranno essere opportunamente trasformate in informazioni del primo o del secondo livello. Più precisamente si possono individuare tre diversi modi con i quali trasmettere le informazioni del terzo livello:

- A) Visualizzare le informazioni sullo stato della rete e/o sui percorsi consigliati mediante opportuni pannelli a messaggio variabile; in questo caso i messaggi sono trasmessi a tutti i veicoli che percorrono una data tratta stradale o corsia e le informazioni sono discontinue sia nel tempo che nello spazio.
- B) Trasmettere e visualizzare le informazioni sullo stato del sistema all'interno del veicolo; le informazioni trasmesse riguardano in genere la velocità massima consentita ed, eventualmente, quella consigliata, eventuali pericoli quali presenza di code, percorso consigliato da seguire (più precisamente, ad ogni intersezione viene consigliata la direzione da seguire per raggiungere la propria destinazione), etc. Le informazioni in questo caso sono ancora discrete anche se più diffuse.
- C) Fornire le informazioni direttamente al veicolo che viene guidato in modo automatico senza la necessità dell'intervento dell'uomo.

Questo terzo caso rappresenta il concetto di autostrada automatizzata e non si ritiene per adesso realizzabile se non in fase puramente sperimentale e sicuramente non con veicoli di tipo convenzionale.

Nel seguito si esaminano più nel dettaglio i primi due sistemi di controllo sopra accennati.

#### *A) Sistemi di controllo con segnali a messaggio variabile.*

Il sistema di controllo che fa uso di segnali a messaggio variabile è costituito principalmente da tre sottosistemi:

- 1) Il sottosistema di raccolta dei dati, costituito da spire magnetiche o altri *detector* che, accoppiati a delle centraline elettroniche, consentono di ricavare i parametri del flusso di traffico quali: volume (in veicoli/h), velocità media (in km/h), densità in (veicoli/corsia-km) e distanziamento temporale tra le vetture (in secondi). Le spire magnetiche utilizzate, analoghe a quelle descritte nel capitolo 2 per le indagini sui

flussi, vengono poste a distanza uguale tra loro nelle diverse corsie della strada, consentendo così il calcolo dei parametri del flusso in ogni corsia.

- 2) Il sottosistema di elaborazione dei dati, costituito da un computer che elabora le informazioni raccolte e programma i segnali a messaggio variabile in modo da indirizzare i flussi di traffico sui percorsi migliori e fornire tutte le informazioni utili sulla situazione del sistema.
- 3) Il sottosistema di segnalazione, costituito da semafori e segnali a messaggio variabile che forniscono, in genere, le seguenti informazioni: percorso da seguire, velocità consigliate e/o massime, informazioni di emergenza (incidenti, congestione), condizioni climatiche, etc.

A questi vanno aggiunti i due sottosistemi di trasmissione delle informazioni dal sistema di raccolta dati a quello di elaborazione e da quello di elaborazione a quello di segnalazione.

#### *B) Sistemi di controllo con segnali inviati ai singoli veicoli.*

Con questo sistema di controllo le informazioni vengono inviate al conducente all'interno del veicolo stesso; esse vengono visualizzate su uno o più visori installati nell'abitacolo.

Sistemi di questo tipo sono stati sviluppati fino dai primi anni '70; essi consistono nel raccogliere ed elaborare le informazioni in modo analogo a ciò che è stato visto al punto precedente e trasmetterle ai veicoli. In questo caso al centro di controllo giunge anche da ogni veicolo l'indicazione della destinazione dello spostamento.

Anche in questo caso le informazioni sul traffico possono essere raccolte solo in punti discreti della rete mediante appositi *detector*; le informazioni vengono fornite non a tutti gli utenti ma solo a quelli che ne necessitano.

Il sistema di bordo trasmette al centro di controllo la destinazione dello spostamento (scelta dall'utente) e la posizione del veicolo; il centro di controllo, nota la situazione della rete, trasmette al sistema di bordo le seguenti informazioni:

- velocità massima consentita, preavviso di segnali di STOP o di intersezioni semaforizzate;
- informazioni di emergenza riguardanti incidenti lungo il percorso o altri eventi imprevisti.

Il sistema di bordo è costituito dalle seguenti unità:

- a) una tastiera che riceve i dati inseriti dal guidatore (ad esempio un codice numerico che individua la destinazione);
- b) una unità di trasmissione dati a due vie che consente di trasmettere e ricevere i dati dalle unità di comunicazione poste a lato strada;
- c) un display che visualizza i dati trasmessi al veicolo;

- d) un dispositivo di attivazione automatica che fa entrare in funzione la radio della vettura quando vengono trasmesse delle informazioni dal centro di controllo o da stazioni trasmittenti lungo il percorso.

### 2.2.2) Metodologie di controllo.

Le possibili metodologie di controllo possono essere suddivise in base ai tre livelli gerarchici esposti ad inizio paragrafo; si individuano, quindi, i tre seguenti problemi base del controllo:

- 1) *Guida al percorso* (a livello di rete).
- 2) *Controllo del flusso di traffico* (a livello di ramo o di nodo).
- 3) *Controllo del veicolo* (a livello veicolare).

#### *A) Guida al percorso.*

Possono essere individuati due diversi approcci fondamentali per la creazione di un sistema di guida al percorso:

- 1) **Esplicito**, se il sistema di controllo raccomanda ai conducenti o li forza ad utilizzare percorsi alternativi scelti dal centro di controllo.
- 2) **Implicito**, se con apposite misure, quali la chiusura di strade o con avvisi di presenza di congestione, i conducenti sono spinti a scegliere dei percorsi alternativi che vengono, in questo caso, scelti dal guidatore stesso in base alla sua conoscenza della rete.

In genere è usato soprattutto il primo approccio ed è ad esso che si farà riferimento.

Come accennato in precedenza, i sistemi di controllo possono far uso di segnali a messaggio variabile (vedi fig. 4.1) o di sistemi di bordo (vedi fig. 4.2).

Nel primo caso il sistema di controllo assiste i conducenti nell'individuazione del percorso migliore (in tutti i sensi) da una certa origine ad una certa destinazione, tenendo conto delle mutevoli condizioni del traffico nelle diverse zone della rete, che possono essere causate da incidenti, intemperie, lavori in corso, etc.

**FIG. 4.1****[4.6]**

Il sistema di controllo computerizzato è aggiornato di continuo con le informazioni sulla situazione del traffico sui percorsi alternativi; le suddette informazioni possono provenire direttamente dalle centraline di raccolta dei dati sul flusso di traffico e/o dall'inserimento dei dati da parte dei supervisori nel centro di controllo. L'elaboratore elettronico utilizza i suddetti dati per prevedere lo sviluppo della situazione del traffico su un orizzonte temporale di 5-15 minuti. In funzione delle previsioni ottenute, si prende o meno la decisione di variare il percorso consigliato. Se il percorso deve essere cambiato è necessario che il corrispondente comando venga inviato alla centralina di controllo locale, che provvede a variare l'aspetto del segnale.

I segnali a messaggio variabile e le relative centraline di controllo sono disposte in corrispondenza delle rampe autostradali o delle più importanti intersezioni della rete principale urbana.

Nel caso di controllo mediante sistema di bordo sui veicoli, il conducente inserisce nella tastiera un numero codice che individua la destinazione dello spostamento. Quando l'autoveicolo si avvicina ad un punto di scelta (rampa autostradale o intersezione urbana), il microcomputer di bordo trasmette il numero di codice attraverso una antenna presente nel veicolo ad una antenna *loop* inserita nella pavimentazione che, a sua volta, trasmette il

segnale ad un altro microcomputer presente in una centralina di controllo a lato strada. Quest'ultimo microcomputer confronta il numero di codice con la tabella dei percorsi consigliati, individua la direzione di guida opportuna e la ritrasmette attraverso l'antenna *loop* al computer di bordo; l'informazione sulla direzione da prendere viene a questo punto visualizzata su un display all'interno del veicolo.

Qualsiasi sia il sistema di controllo adottato, i criteri per la scelta dei percorsi sui quali indirizzare i guidatori sono fondamentalmente due:

- 1) Criterio di controllo indirizzato alla *minimizzazione del costo di trasporto per gli utenti*, cioè dei conducenti il veicolo. Il principale obiettivo è allora minimizzare il tempo totale di viaggio necessario per raggiungere la destinazione desiderata da una data origine. Altri obiettivi secondari sono: limitare il consumo di carburante e gli altri costi monetari (ad es. il pedaggio).
- 2) Criterio di controllo indirizzato alla *massimizzazione delle prestazioni del sistema e degli effetti prodotti dal traffico*; possono essere individuati i seguenti principali obiettivi:
  - massimizzare la capacità totale della rete; ciò si ottiene distribuendo equamente la domanda di traffico sulle risorse della rete;
  - minimizzare l'impatto ambientale, in particolar modo per ciò che riguarda l'inquinamento atmosferico;
  - minimizzare il consumo totale di carburante.

In base al criterio scelto si possono sviluppare diversi algoritmi per il calcolo del percorso migliore.

**FIG. 4.2**

[4.6]

B) Controllo del flusso di traffico.

Il metodo più utilizzato per il controllo dei flussi di traffico è la regolazione semaforica che, come si è visto nel capitolo 1, può essere normale (intersezione isolata e durata fissa delle fasi), attuata o coordinata.

A questi tipi di controllo va aggiunto il *controllo computerizzato distribuito* del traffico; esso consiste nel coordinare tra loro i semafori posti in corrispondenza delle principali intersezioni dell'intera rete di trasporto.

Il fine del coordinamento consiste nel minimizzare una combinazione lineare dei ritardi e degli arresti per unità di tempo. I dati sul traffico vengono raccolti da appositi *detector* lungo le arterie principali e in corrispondenza delle intersezioni; essi vengono trasmessi al centro di controllo che li elabora e ritrasmette alle centraline il programma di funzionamento dell'impianto semaforico relativo.

Un sistema di questo tipo venne utilizzato a Glasgow già nel 1967 (vedi fig. 4.3); esso condusse a degli importanti risultati, quali un aumento della velocità media sulla rete variabile, a seconda del periodo della giornata, dal 9 al 18%.

**FIG. 4.3**

[4.8]

*C) Controllo del veicolo.*

Le operazioni di controllo che possono essere previste direttamente sui singoli veicoli sono:

- 1) Controllo del distanziamento tra due veicoli successivi.
- 2) Controllo delle emissioni di agenti inquinanti.
- 3) Controllo degli spazi di frenatura con dispositivi *antiskid* o ABS.

Di questi tre il più importante dal punto di vista trasportistico è il primo.

Questo tipo di controllo consiste nell'aiutare i singoli guidatori a scegliere un adeguato distanziamento dagli altri veicoli.

Il principale obiettivo è quello di limitare al massimo il pericolo di collisione tra le vetture; inoltre, questo tipo di controllo può essere utilizzato per ottimizzare la capacità della strada riducendo il fenomeno della instabilità del flusso.

I metodi adoperati per questo tipo di controllo sono riportati in figura 4.4.

Nel caso (1.1) vi è un visore nel veicolo che riporta due linee verticali e l'immagine della vettura che lo precede; la larghezza tra le due linee è funzione della velocità del veicolo e va diminuendo all'aumentare di quest'ultima: se l'immagine della vettura che si ha dinanzi è contenuta all'interno delle linee la distanza di sicurezza è sufficiente; in caso contrario essa è insufficiente e si aziona un segnale acustico.

Il caso (1.2) rappresenta un sistema che individua la distanza dal veicolo che si ha dinanzi con un segnale radar; essa viene confrontata con la velocità e se la distanza di sicurezza è ritenuta insufficiente si avvisa il conducente con un segnale ottico e/o acustico.

Nel caso (2.2) viene anche attivato un dispositivo frenante di emergenza se la distanza è minore di un valore limite di sicurezza.

**FIG. 4.4**

[4.9]

## APPENDICE

### 1) “Metodo inglese” per il calcolo del flusso di saturazione di un accesso ad una intersezione semaforizzata.

Il flusso di saturazione di un accesso ad una intersezione semaforizzata può essere calcolato mediante il cosiddetto “Metodo Inglese”; il suddetto flusso, espresso in veic/h, viene calcolato con la seguente formula:

$$s = s_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$$

dove  $s_0$  è il flusso di saturazione in condizioni ideali (niente soste né svolte a destra o sinistra) e per una composizione di sole autovetture, esso è dato da:

$$s_0 = 530 \cdot l \quad \text{per } 5,5\text{m} < l < 18,5\text{m}$$

dove:  $l = lG - lS$ ; con  $lG$  larghezza geometrica dell'accesso all'intersezione (in m) e  $lS$  riduzione dovuta alla presenza di veicoli in sosta:

$$l_s = \begin{cases} 1,65 - \frac{0,015 \cdot (z - 7,50)}{g} & \text{se } z > 7,50 \\ 1,65 & \text{se } z \leq 7,50 \end{cases}$$

con “g” tempo di verde in minuti e “z” distanza (in m) del primo veicolo in sosta dalla linea di stop.

Per  $l < 5,5\text{m}$  si ha:

|                |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| I              | 3,05 | 3,35 | 3,66 | 3,97 | 4,27 | 4,57 | 4,88 | 5,18 |
| S <sub>0</sub> | 1850 | 1875 | 1900 | 1950 | 2075 | 2250 | 2475 | 2700 |

I termini  $K_1, K_2, \dots, K_n$  sono dei fattori correttivi relativi alla eterogeneità della composizione veicolare, alla presenza di diverse manovre di svolta, ad interferenza con flussi pedonali e così via.

Per la *composizione veicolare* si ha:

# Appendice

$$K_1 = \frac{1}{\sum_k \gamma_k \cdot P_k}$$

con:  $\gamma_k$  coefficiente di equivalenza e  $P_k$  frazione dei veicoli della k-esima classe. Per i coefficienti di equivalenza in autovetture vale la seguente tabella:

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| Autovetture e veicoli merci leggeri | 1,00 |
| Veicoli industriali medi e pesanti  | 1,75 |
| Autobus                             | 2,25 |
| Tram                                | 2,50 |
| Motocicli                           | 0,33 |
| Biciclette                          | 0,20 |

Il fattore correttivo relativo alle *manovre di svolta* (K2) ha una espressione del tutto analoga ma con i seguenti coeff. di equivalenza:

|                   |        |
|-------------------|--------|
| Marcia diretta    | 1      |
| Svolta a destra   | 1÷1,25 |
| Svolta a sinistra | 1÷1,75 |

Per tener conto delle *interferenze con i flussi pedonali* si usa un fattore correttivo dato da  $K_3=1-###$ , dove:

|          |                  |
|----------|------------------|
| $g=0,05$ | per 100 pedoni/h |
| $g=0,10$ | per 300 pedoni/h |
| $g=0,15$ | per 500 pedoni/h |

Per tener conto della *pendenza in corrispondenza dell'intersezione* si ha:

$$K_4 = 1 + 0,03 \cdot i$$

ove “i” è la pendenza espressa in ###: +i discesa; -i salita.

Si può introdurre inoltre un 5° fattore correttivo (K5) dovuto alla localizzazione dell'intersezione:

Appendice

|                            |      |
|----------------------------|------|
| Zona residenziale          | 1    |
| Zona commerciale suburbana | 0,98 |
| Zona industriale           | 0,93 |
| Zona centro affari         | 0,85 |

Il flusso di saturazione base, da moltiplicare per i coeff.  $K_i$ , nel caso di svolta protetta è dato da:

$$s_b = s' / [1 + (1.5/r)]$$

dove:

$s' = 1800$  veic/h verde                      per 1 corsia

$s' = 3000$  veic/h verde                      per 2 corsie

$r$  = raggio di curvatura della svolta

Nel caso in cui la svolta sia a sinistra e “permessa” a tale termine si va a sottrarre  $0,75 \cdot Q$ , dove  $Q$  è la somma delle portate orarie, diretta e svoltante a destra, provenienti dall’accesso opposto.

## 2) Determinazione del livello di servizio delle intersezioni semaforizzate.

Il livello di servizio (LdS) per le intersezioni semaforizzate è definito in termini di “ritardo di fermata medio per veicolo”. Il ritardo è infatti una misura del “discomfort”, del consumo di carburante e del tempo impiegato nello spostamento. Più precisamente, i criteri per definire il livello di servizio si basano sull’analisi del ritardo medio di fermata effettuata per periodi di 15 minuti.

In tabella A.1 è riportato il criterio con il quale si assegna il LdS all’intersezione in funzione del ritardo.

TAB. A.1

[A.2]

| Livello di servizio | Ritardo medio di fermata per veicolo (sec) |
|---------------------|--------------------------------------------|
| <b>A</b>            | ### 5,0                                    |
| <b>B</b>            | >5,0 e ≤15.0                               |
| <b>C</b>            | >15.0 e ≤25.0                              |
| <b>D</b>            | >25.0 e ≤40.0                              |
| <b>E</b>            | >40.0 e ≤60.0                              |
| <b>F</b>            | > 60.0                                     |

Il ritardo dipende da molti fattori tra i quali la qualità del flusso, la lunghezza del ciclo, il rapporto v/c etc. Esso viene valutato con la procedura di seguito descritta, proposta dall’HCM 1994 [A.2], la quale consente anche la progettazione del ciclo semaforico, se non già noto.

Il ritardo può essere anche misurato direttamente, ma, siccome i risultati ottenuti sono molto variabili e le misure molto laboriose, ciò viene fatto molto raramente.

Descriviamo ora il funzionamento dell’intersezione in corrispondenza dei vari livelli di servizio:

- **Livello di servizio A.** Il ritardo medio all’intersezione è molto basso (meno di 5.0 secondi per veicolo). Tale LdS si ha quando la progressione è molto favorevole e la maggior parte dei veicoli arrivano durante la fase di verde: la maggior parte dei veicoli non si arresta per nulla all’intersezione. Durate brevi del ciclo possono contribuire a diminuire il ritardo.
- **Livello di servizio B.** Il ritardo medio è compreso tra 5 e 15 secondi per veicolo. Ciò si ha in genere in corrispondenza di una buona progressione e/o durate brevi del ciclo. Si arrestano più veicoli rispetto al LdS A e si ha quindi un ritardo maggiore.
- **Livello di servizio C.** Il ritardo medio è compreso tra 15 e 25 secondi per veicolo. Questi ritardi più elevati possono essere dovuti ad una discreta progressione e/o durate

del ciclo maggiori. Si possono presentare casi in cui la fila non è smaltita all'interno di un solo ciclo. Il numero di veicoli che si arresta all'intersezione è significativo, tuttavia ancora molti veicoli attraversano l'intersezione senza arrestarsi.

- **Livello di servizio D.** Il ritardo medio è compreso tra 25 e 40 secondi per veicolo; l'influenza della congestione comincia a notarsi di più. Questi lunghi ritardi possono derivare dalla combinazione di una sfavorevole progressione, lunghe durate del ciclo o alti rapporti v/c. Molti veicoli si arrestano e diminuisce il numero di quelli che possono attraversare l'intersezione senza farlo. Sono frequenti i casi in cui la fila non viene smaltita all'interno dello stesso ciclo.
- **Livello di servizio E.** Il ritardo medio per veicolo è compreso tra i 40 e i 60 secondi; quest'ultimo è considerato il limite di un ritardo accettabile. Tali valori elevati del ritardo sono generalmente dovuti ad una scadente progressione, elevate durate del ciclo e alti valori del rapporto v/c. Sono molto frequenti i casi in cui i veicoli in coda non riescono ad essere smaltiti nel tempo di un ciclo.
- **Livello di servizio F.** Il ritardo medio supera i 60 secondi per veicolo; ciò viene considerato inaccettabile dalla maggior parte dei conducenti. Questa condizione si ha spesso con la sovrasaturazione dell'accesso, cioè quando il flusso in arrivo supera la capacità dell'intersezione. I valori del rapporto v/c sono elevati e sono molti i casi in cui la fila non viene smaltita nel tempo di un ciclo. Una scadente progressione e una elevata durata del ciclo contribuiscono al raggiungimento di valori così elevati del ritardo.

La procedura per valutare il livello di servizio di una intersezione semaforizzata considera i singoli accessi dell'intersezione e, all'interno di ciascuno di essi, singoli "gruppi di corsie". E' necessario, quindi, prima di iniziare la procedura, scegliere opportunamente i gruppi di corsie per ogni accesso.

Un "**gruppo di corsie**" è definito come una o più corsie di un accesso all'intersezione che servono una o più correnti di traffico. La scelta di tali gruppi deve essere effettuata caso per caso; i criteri generali sono i seguenti:

- 1) Una o più corsie esclusive per la svolta a sinistra dovrebbero essere considerate in un gruppo a parte. Lo stesso è valido anche per una o più corsie esclusive per la svolta a destra.
- 2) In un accesso in cui sono presenti corsie esclusive per la svolta a sinistra e/o per la svolta a destra, tutte le altre corsie dovrebbero far parte di un unico gruppo.
- 3) Quando un accesso con più di una corsia comprende una corsia che può essere usata sia per la svolta a sinistra che per l'attraversamento, è necessario determinare se essa è effettivamente usata per entrambe le manovre, o se ci sono così tanti veicoli che svoltano a sinistra che la corsia può essere vista come una corsia esclusiva per tale svolta.

Per stabilire questo terzo punto si può procedere come segue. Il tasso di flusso dei veicoli che svoltano a sinistra è trasformato in un flusso equivalente di attraversamento:

$$v_{LE} = v_L \cdot \frac{1800}{1400 - v_O}$$

dove:

$v_{LE}$  = è il tasso di flusso equivalente.

$v_L$  = il tasso di flusso dei veicoli che svoltano a sinistra.

$v_O$  = il tasso di flusso totale che proviene dal verso opposto.

Se  $v_O$  è #### di 1400 veic./h,  $v_{LE}$  non ha significato; in questi casi, non risultando fattibile l'attraversamento della corrente da parte dei veicoli che svoltano a sinistra, si dovrebbe prevedere una fase per la svolta "protetta" a sinistra.

Nel caso generale si assume che, in condizioni limite, il flusso equivalente di svolta a sinistra,  $v_{LE}$ , occupi completamente la corsia più a sinistra dell'accesso, e si assume che il rimanente flusso occupi le restanti corsie. Se il tasso di flusso equivalente nella corsia più a sinistra eccede il tasso di flusso medio delle altre, allora si assume che tale corsia sia riservata esclusivamente alla svolta a sinistra e la si considera in un gruppo a parte.

In figura A.1 sono riportati degli esempi che possono aiutare ad individuare i gruppi di corsie (GDC).

La procedura per la determinazione del livello di servizio è articolata in 5 fasi (o moduli), come riportato in figura A.2.

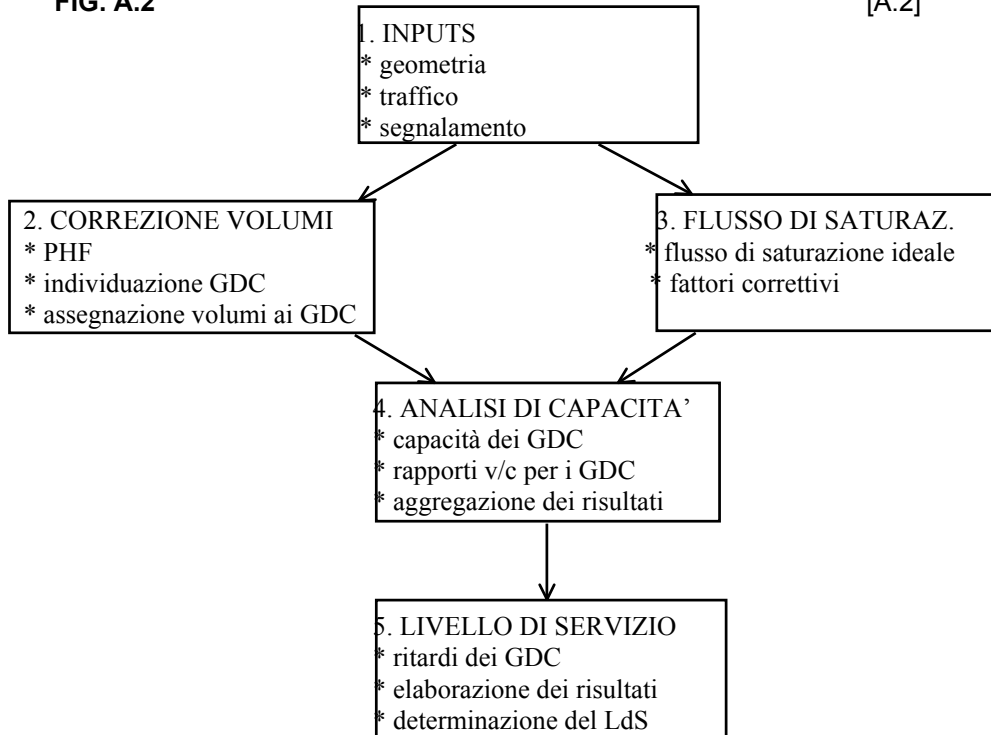
## Appendice

**FIG. A.1**

[A.2]

**FIG. A.2**

[A.2]



Esaminiamo singolarmente le varie fasi.

#### *A) Dati di input.*

In questa prima fase devono essere acquisiti i dati di ingresso necessari per l'esecuzione della procedura. Tali dati sono classificati in tre categorie:

- geometria;
- traffico;
- segnalamento.

La tabella A.2 riassume tali dati e la figura A.3 mostra la scheda su cui riportare i dati stessi.

Tra gli elementi da acquisire concernenti il traffico è da precisare che i mezzi di trasporto collettivo con fermate di linea entro 75 m dalla linea di arresto di ciascun accesso si devono rilevare a parte (*local buses*); gli altri vengono invece considerati come mezzi pesanti, anche questi da rilevare, in percentuale, per ciascuna manovra.

**TAB. A.2**

[A.2]

| CATEGORIA    | PARAMETRI CARATTERISTICI                                     | SIMBOLI   |
|--------------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| Geometria    | Ubicazione intersezione                                      | CBD/altri |
|              | Numero di corsie                                             | N         |
|              | Larghezza corsie                                             | W         |
|              | Pendenza accesso (###):                                      |           |
|              | in salita                                                    | +i        |
|              | in discesa                                                   | -i        |
|              | Corsie esclusive di svolta:                                  |           |
|              | a destra                                                     | RT        |
|              | a sinistra                                                   | LT        |
| Traffico     | Lunghezza corsie di accumulo per le svolte suddette          | Ls        |
|              | Sosta veicoli                                                | SI o NO   |
|              | Volumi per manovra (veic./h)                                 | V         |
|              | Fattore dell'ora di punta                                    | PHF       |
|              | Percentuale di veicoli pesanti                               | ### HV    |
|              | Flussi pedonali (ped/h)                                      | PEDS      |
|              | Autobus che si fermano in prossimità dell'intersezione       | NB        |
|              | Manovre di sosta per ora                                     | Nm        |
|              | Tipo di arrivo                                               | AT        |
|              | Percentuale di veicoli che arrivano durante la fase di verde | P         |
| Segnalamento | Durata del ciclo (sec)                                       | C         |
|              | Tempi di verde (sec)                                         | G         |
|              | Intervallo di cambio                                         | Y         |
|              | Tutto rosso                                                  | AR        |
|              | Tipo semaforizzazione (predeterminata o attuata)             | P o A     |
|              | Pulsante per attraversamenti pedonali                        | SI o NO   |
|              | Verde minimo pedonale                                        | Gp        |
|              | Piano di fasatura                                            |           |

I flussi pedonali richiesti in particolare sono quelli che possono interferire con le manovre di svolta a destra e sinistra di tipo “permesso”; convenzionalmente il flusso pedonale riferito ad un dato accesso è quello che interferisce con le svolte a destra dei veicoli provenienti dallo stesso accesso; se non è disponibile un conteggio dei flussi pedonali essi possono essere classificati qualitativamente come bassi, medi o alti.

Appendice

**FIG. A.3**

[A.2]

Uno dei parametri di traffico di più difficile determinazione è il “**tipo di arrivo**” dei veicoli a ciascun ramo dell’intersezione; l’introduzione di questo parametro è mirata alla quantificazione della qualità della progressione di una corrente veicolare in avvicinamento. Si distinguono 5 tipi:

- **Tipo 1.** Arrivo di un plotone denso all’inizio della fase di rosso; condizione peggiore.
- **Tipo 2.** Arrivo di un plotone moderatamente denso a metà della fase di rosso o arrivo di un plotone sparso durante tutta la fase di rosso.
- **Tipo 3.** Arrivi casuali; i veicoli arrivano durante le fasi di verde e di rosso in proporzione alla loro durata; condizione media.
- **Tipo 4.** Arrivo di un plotone moderatamente denso a metà della fase di verde o di un plotone sparso, contenente dal 40 all’80 % del volume del gruppo di corsie, durante tutta la fase di verde; condizione mediamente favorevole.
- **Tipo 5.** Arrivo di un plotone denso, contenente oltre l’80% del volume del gruppo di corsie all’inizio della fase di verde; condizione molto favorevole.
- **Tipo 6.** Questo tipo di arrivo è rappresentativo di una progressione eccezionale, su strade con progressione quasi ideali.

Il tipo di arrivo può essere stimato esaminando le condizioni sul campo o con l’analisi dei diagrammi spazio-tempo dell’accesso in esame. Ci si può, poi, aiutare con il cosiddetto “*rapporto di plotone*”,  $R_p$ , che è definito dal rapporto tra la percentuale dei veicoli che arrivano nella fase di verde e la frazione di verde efficace  $g/C$ :  $R_p = P(C/g)$ , dove  $P$  è la percentuale di veicoli che arrivano durante la fase di verde. Se  $R_p = 1.00$  siamo in condizioni di arrivi casuali (tipo III); per  $R_p > 1.00$  le condizioni sono migliori, mentre per  $R_p < 1.00$  sono peggiori. La tabella A.3 pone in relazione  $R_p$  con il tipo di arrivi.

**TAB. A.3**

[A.2]

| <b>Tipo di arrivo</b> | <b>Campo di <math>R_p</math></b> | <b>Valore medio di <math>R_p</math></b> | <b>Progressione</b> |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|
| 1                     | $\leq 0,50$                      | 0,333                                   | Molto sfavorevole   |
| 2                     | $> 0,50$ e $\leq 0,85$           | 0,667                                   | Sfavorevole         |
| 3                     | $> 0,85$ e $\leq 1,15$           | 1,000                                   | Arrivi casuali      |
| 4                     | $> 1,15$ e $\leq 1,50$           | 1,333                                   | Favorevole          |
| 5                     | $> 1,50$ e $\leq 2,00$           | 1,667                                   | Molto favorevole    |
| 6                     | $> 2,00$                         | 2,000                                   | Eccezionale         |

Un’altra variabile di interesse è il numero di manovre di parcheggio che sono effettuate in un’ora entro 75 m dall’intersezione,  $N_m$ . Ogni manovra di ingresso e di uscita da uno spazio di parcheggio è considerata come una manovra separata.

Per quanto riguarda i dati sul segnalamento è necessario conoscere il piano di fasatura e la sequenza dei segnali. Ciò è semplice per semafori il cui funzionamento sia predeterminato. Per i semafori attuati le durate del ciclo e dei tempi di verde variano con la domanda, per cui è necessaria l'osservazione diretta di questi parametri e bisogna far riferimento a dei valori medi degli stessi.

L'*HCM* del 1994 raccomanda anche una serie di valori medi che possono essere utilizzati, con una certa cautela, quando non sono disponibili tutte le informazioni. Tali valori sono riportati in tabella A.4.

**TAB. A.4**

[A.2]

| Parametro                                         | Valore consigliato                                                  |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>Traffico</b>                                   |                                                                     |
| Flusso di saturazione ideale                      | 1900 autovetture per ora di verde efficace e per corsia             |
| Flussi pedonali                                   | Nulli 0 ped/h<br>Bassi 50 ped/h<br>Medi 200 ped/h<br>Alti 400 ped/h |
| Percentuale veicoli pesanti                       | 2                                                                   |
| Pendenza dell'accesso                             | 0                                                                   |
| Numero di autobus, NB                             | 0 bus/h                                                             |
| Condizioni di parcheggio                          | Sosta vietata                                                       |
| Numero di manovre di parcheggio, Nm               | 20 manovre/h (quando esiste)                                        |
| Tipo di arrivo:                                   |                                                                     |
| Gruppi di corsie con manovre di attraversamento   | 3 se isolato; 4 se coordinato                                       |
| Gruppi di corsie senza manovre di attraversamento | 3                                                                   |
| Fattore dell'ora di punta                         | PHF=0.90                                                            |
| Fattore di utilizzazione corsie                   | vedi tab. 1.15                                                      |
| <b>Strada e segnalamento</b>                      |                                                                     |
| Tipo di semaforo                                  | Predeterminato                                                      |
| Durata del ciclo                                  | 60-120 sec                                                          |
| Tempo perso                                       | 3,0 sec/fase                                                        |
| Giallo + tutto-rosso                              | 4,0 sec/fase                                                        |
| Tipo di area                                      | Non CBD                                                             |
| Larghezza corsia                                  | 3,66 m                                                              |

*B) Correzione dei volumi.*

Questa fase comprende tre diverse calcolazioni, di cui la terza non è indispensabile:

- 1) tutti i volumi vengono corretti per tener conto delle punte di traffico nelle frazioni di ora;
- 2) vengono fissati i “gruppi di corsie”;
- 3) se si desidera, si possono correggere i flussi per tener conto di un diverso uso delle corsie all’interno dello stesso gruppo.

La correzione del volume di domanda che si ha nell’intera ora al tasso di flusso per un periodo di 15 minuti all’interno della stessa ora viene effettuata nel modo classico, utilizzando il fattore dell’ora di punta (PHF):

$$v_p = \frac{V}{PHF}$$

dove  $v_p$  è il tasso di flusso massimo all’interno dell’ora. Ciò si fa per i volumi di domanda di ogni manovra.

Della metodologia utilizzata per la individuazione dei gruppi di corsie ne abbiamo già discusso precedentemente; una volta fissati i gruppi di corsie, i tassi di flusso possono essere corretti se si prevede una differente utilizzazione delle corsie all’interno del gruppo:

$$v = v_g \cdot U$$

dove:

$v$  = tasso di flusso corretto per il gruppo di corsie (veic./h)

$v_g$  = tasso di flusso per il gruppo di corsie (veic./h)

$U$  = fattore di correzione.

Il fattore di correzione è calcolato come segue:

$$U = \frac{v_{g1} \cdot N}{v_g}$$

dove:

$v_{g1}$  = tasso di flusso, non corretto, sulla singola corsia, con il più alto volume tra quelle del gruppo.

$N$  = numero di corsie nel gruppo.

In condizioni medie il valore di U può essere ricavato dalla tabella A.5.

**TAB. A.5**

[A.2]

| <b>Manovre del gruppo di corsie</b> | <b>N. di corsie nel gruppo</b> | <b>Percentuale di traffico nella corsia più carica</b> | <b>Fattore di utilizzazione U</b> |
|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Attraversamento o corsie condivise  | 1                              | 100,0                                                  | 1,00                              |
|                                     | 2                              | 52,5                                                   | 1,05                              |
|                                     | 3                              | 36,7                                                   | 1,10                              |
| Esclusiva svolta a sinistra         | 1                              | 100,0                                                  | 1,00                              |
|                                     | 2                              | 51,5                                                   | 1,03                              |
| Esclusiva svolta a destra           | 1                              | 100,0                                                  | 1,00                              |
|                                     | 2                              | 56,5                                                   | 1,13                              |

Quando si utilizza il fattore di correzione, il livello di servizio ottenuto alla fine della procedura è quello relativo alla corsia col peggior funzionamento tra quelle del gruppo; se invece non si usa tale fattore, i risultati riflettono le condizioni di funzionamento medie delle corsie del gruppo.

La scheda che viene utilizzata per questa fase è riportata in figura A.4.

Appendice

**FIG. A.4**

[A.2]

*C) Flusso di saturazione.*

In questa fase si determina il flusso di saturazione di ciascun gruppo di corsie nelle condizioni prevalenti di geometria, traffico e segnalamento, che si hanno in ciascuno di essi.

Per calcolare il flusso di saturazione si parte da un valore ideale che viene modificato mediante una serie di fattori correttivi, i quali rispecchiano le effettive condizioni (geometriche e di traffico) del gruppo di corsie in esame:

$$s = s_0 \cdot N \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{RT} \cdot f_{LT}$$

dove:

s= flusso di saturazione di un gruppo di corsie, espresso come totale per tutte le corsie del gruppo, sotto le condizioni prevalenti, calcolato in veicoli per ora di verde effettivo (veic./hg).

s<sub>0</sub>= flusso di saturazione ideale per corsia, in genere 1900 autovetture equivalenti per ora di verde effettivo per corsia (pc/hgpl).

N= numero di corsie del gruppo.

f<sub>w</sub>= fattore correttivo per larghezza corsie non ideale.

f<sub>HV</sub>= “ “ per presenza di mezzi pesanti.

f<sub>g</sub>= “ “ per pendenza dell'accesso non nulla.

f<sub>p</sub>= “ “ per la presenza di manovre di parcheggio.

f<sub>bb</sub>= “ “ per la presenza di fermate di autobus.

f<sub>a</sub>= “ “ per la localizzazione dell'intersezione.

f<sub>RT</sub>= “ “ per svolte a destra nel gruppo di corsie.

f<sub>LT</sub>= “ “ per svolte a sinistra nel gruppo di corsie.

I valori dei fattori correttivi si leggono in apposite tabelle costruite sulla base di osservazioni sperimentali; quando non sia possibile utilizzarli, perché non si hanno informazioni sufficientemente precise sull'intersezione, o per stime di primo orientamento, si può calcolare il flusso di saturazione con la seguente relazione:

$$s = 1600 \cdot N$$

l'analisi risulterà, però, ampiamente approssimata.

I primi 6 fattori correttivi non sono correlati al tipo di manovra effettuata, e sono riportati in tabella A.6; la scheda utilizzata è riportata in fig. A.5.

TAB. A.6

[A.2]

| Fattore di correzione per larghezza corsie fw                   |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------|------------|-------|-------|-------|------------|----------|-------|-------|-------|
| Larghezza corsie (m)                                            | 2.44       | 2.74  | 3.05  | 3.35  | 3.66       | 3.96     | 4.27  | 4.57  | 4,88  |
| fw                                                              | 0.87       | 0.90  | 0.93  | 0.97  | 1.00       | 1.03     | 1.07  | 1.10  | 1.13  |
| Fattore di correzione per mezzi pesanti fhV                     |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| % HV                                                            | 0          | 2     | 4     | 6     | 8          | 10       | 15    | 20    |       |
| ↑                                                               | 1,000      | 0,980 | 0,962 | 0,943 | 0,962      | 0,909    | 0,870 | 0,833 |       |
| ↓                                                               | 0,800      | 0,769 | 0,741 | 0,714 | 0,690      | 0,667    | 0,571 | 0,500 |       |
| % HV                                                            | 25         | 30    | 35    | 40    | 45         | 50       | 75    | 100   |       |
| Fattore di correzione per la pendenza dell'accesso fg           |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| Pendenza, %                                                     | -6         | -4    | -2    | 0     | +2         | +4       | +6    | +8    | ≥+10  |
| fg                                                              | 1,030      | 1,020 | 1,010 | 1,000 | 0,990      | 0,980    | 0,970 | 0,960 | 0,950 |
| Fattore di correzione per le manovre di sosta fp                |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| Numero di manovre di parcheggio per ora                         |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| N. di corsie del Gruppo                                         | No Parking | 0     | 10    | 20    | 30         | 40 o più |       |       |       |
| 1                                                               | 1,000      | 0,900 | 0,850 | 0,800 | 0,750      | 0,700    |       |       |       |
| 2                                                               | 1,000      | 0,950 | 0,925 | 0,900 | 0,875      | 0,850    |       |       |       |
| 3 o più                                                         | 1,000      | 0,967 | 0,950 | 0,933 | 0,917      | 0,900    |       |       |       |
| Fattore di correzione per la presenza di fermate di autobus fbb |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| N. di bus che si fermano nella zona dell'intersez. per ora      |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| N. di corsie del Gruppo                                         | 0          | 10    | 20    | 30    | 40 o più   |          |       |       |       |
| 1                                                               | 1,000      | 0,960 | 0,920 | 0,880 | 0,840      |          |       |       |       |
| 2                                                               | 1,000      | 0,980 | 0,960 | 0,940 | 0,920      |          |       |       |       |
| 3 o più                                                         | 1,000      | 0,987 | 0,973 | 0,960 | 0,947      |          |       |       |       |
| Fattore di correzione per ubicazione intersezione fa            |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| Tipo di zona                                                    |            |       |       |       | Fattore fa |          |       |       |       |
| CBD (quartiere centro affari)                                   |            |       |       |       | 0.90       |          |       |       |       |
| Tutte le altre zone                                             |            |       |       |       | 1.00       |          |       |       |       |

Un esame particolare meritano le correzioni al flusso di saturazione dovute alla presenza di svolte, in quanto i valori assunti dai relativi fattori correttivi dipendono dalle modalità di effettuazione delle relative manovre: esse infatti possono avvenire in corsie esclusive o condivise, ed in una fase semaforica “protetta” o “permessa”.

Per quanto riguarda la svolta a destra essa può avvenire sotto sette diverse condizioni:

1. Corsia esclusiva per la svolta a destra; fase protetta.
2. Corsia esclusiva per la svolta a destra; fase permessa.
3. Corsia esclusiva per la svolta a destra; fase permessa + protetta.

4. Corsia condivisa per la svolta a destra; fase protetta.
5. Corsia condivisa per la svolta a destra; fase permessa.
6. Corsia condivisa per la svolta a destra; fase permessa + protetta.
7. Accesso con corsia unica.

**FIG. A.5**

[A.2]

Di queste il caso più comune è il caso 5 (svolta permessa e corsia non esclusiva), che si ha nell'80###90 % dei casi.

Il coefficiente correttivo viene calcolato come mostrato in tabella A.7; tenendo conto, anche dei flussi pedonali.

TAB. A.7

[A.2]

| Casi 1-6: corsie esclusive/condivise e fasi permesse protette |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|--------------------------------------------------|
| $f_{rt}=1,0 - P_{RT}[0,15+(PEDS/2100)(1 - P_{RTA})]$          |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
| $0,0 \leq P_{RT} \leq 1.0$                                    | Percentuale di svolta a sx. nel gruppo di corsie=<br>=1,00 per corsie esclusive (casi 1-3)<br>< 1,00 per corsie condivise (casi 4-6)               |           |        |                                                  |
| $0,0 \leq P_{RTA} \leq 1.0$                                   | Percentuale di svolta a sx che usano fase protetta=<br>=1,00 per protezione completa - no pedoni<br><1,00 per fase permessa - conflitto con pedoni |           |        |                                                  |
| $0 \leq PEDS \leq 1700$                                       | Volume in ped/h che entrano in conflitto con la svolta (se PEDS > 1700, si usi 1700)                                                               |           |        |                                                  |
| $f_{rt} \geq 0,05$                                            |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
| Caso 7: Accesso ad una sola corsia                            |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
| $f_{rt}=0,90 - P_{RT}[0,135+(PEDS/2100)]$                     |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
| $0,0 \leq P_{RT} \leq 1.0$                                    | Percentuale di svolta a sx. nel gruppo di corsie.                                                                                                  |           |        |                                                  |
| $0 \leq PEDS \leq 1700$                                       | Volume in ped/h che entrano in conflitto con la svolta (si usi 0 se la svolta è completamente protetta)                                            |           |        |                                                  |
| $f_{rt} \geq 0,05$                                            |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
| Campo dei valori                                              |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
| CASI                                                          | $P_{RT}$                                                                                                                                           | $P_{RTA}$ | PEDS   | Formule semplificate                             |
| 1                                                             | 1,0                                                                                                                                                | 1,0       | 0      | 0,85                                             |
| 2                                                             | 1,0                                                                                                                                                | 0,0       | 0-1700 | 0,85 - (PEDS/2100)                               |
| 3                                                             | 1,0                                                                                                                                                | 0-1,0     | 0-1700 | 0,85 - (PEDS/2100)(1- $P_{RTA}$ )                |
| 4                                                             | 0-1,0                                                                                                                                              | 1,0       | 0      | 1,0 - $P_{RT}$ [0,15]                            |
| 5                                                             | 0-1,0                                                                                                                                              | 0,0       | 0-1700 | 1,0 - $P_{RT}$ [0,15+(PEDS/2100)]                |
| 6                                                             | 0-1,0                                                                                                                                              | 0-1,0     | 0-1700 | 1,0 - $P_{RT}$ [0,15+(PEDS/2100)(1- $P_{RTA}$ )] |
| 7                                                             | 0-1,0                                                                                                                                              | -         | 0-1700 | 0,9 - $P_{RT}$ [0,135+(PEDS/2100)]               |

Sul manuale della capacità i valori di  $f_{rt}$  sono anche tabellati in funzione di  $P_{RT}$  e  $P_{RTA}$  ; la tabella in questione è stata, ovviamente, compilata utilizzando le suddette formule.  
Per le svolte a sinistra si considerano sei diverse condizioni, descritte in tab. A.8.

**TAB. A.8**

[A.2]

| <b>Casi</b> | <b>Tipo di gruppo di corsie</b>               | <b>Fattore di correzione svolta a sinistra, <math>f_{LT}</math></b>                                                                                                                                 |
|-------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1           | Corsia escl. di svolta a sx; fase protetta    | 0.95                                                                                                                                                                                                |
| 2           | Corsia escl. di svolta a sx; fase permessa    | Procedura speciale: vedi HCM 1994                                                                                                                                                                   |
| 3           | Corsia escl. di svolta a sx; fase prot.+perm. | Si applichi il caso 1 per la fase protetta<br>Si applichi il caso 2 per la fase permessa                                                                                                            |
| 4           | Corsia condivisa; fase protetta               | $f_{LT}=1,0/(1,0+0,05 P_{LT})$<br>$P_{LT}$ =Percentuale di svolte a sinistra                                                                                                                        |
| 5           | Corsia condivisa; fase permessa               | Procedura speciale: vedi HCM 1994                                                                                                                                                                   |
| 6           | Corsia condivisa; fase protetta+permessa      | $f_{LT}=(1400 - V_o)/[(1400 - V_o)+(235+0,435 V_o) P_{LT}]$<br>per $V_o \leq 1220$<br>$f_{LT}=1/[1+4,525 P_{LT}]$ per $V_o > 1220$<br>con $V_o$ = volume proveniente dall'accesso opposto (veic./h) |

L'analisi risulta essere molto semplice nel caso in cui si ha corsia esclusiva e svolta "protetta": il fattore correttivo è costante. Quando la svolta è ancora protetta e la corsia è "condivisa" (*shared*), il fattore correttivo dipende anche dal rapporto tra i veicoli che svoltano a sinistra e gli altri.

Il problema diventa complicato quando la svolta è "permessa"; consideriamo infatti la figura A.6. Un veicolo che vuole svoltare a sinistra dalla corsia condivisa entra in conflitto col flusso veicolare proveniente dal verso opposto. Se consideriamo la fase di verde notiamo che vi sono diverse porzioni di essa in cui le condizioni operative della svolta sono molto differenti tra loro. All'inizio della fase di verde, la coda dei veicoli proveniente dal verso opposto inizia a muoversi; sia  $gq$  il tempo che occorre a smaltire la suddetta coda. Durante questo periodo di tempo non vi sono sufficienti distanziamenti temporali (*gap*) nel flusso di traffico che proviene nel verso opposto, e quindi non possono essere effettuate le svolte a sinistra.

In caso di estrema congestione  $gq=g$  e le svolte a sinistra si possono effettuare solo alla fine della fase durante il "tutto rosso".

Se  $gq < g$ , la rimanente parte della fase non è affetta dalla presenza della coda nel verso opposto; questa parte del tempo di verde è detta “*non saturata*” ed è indicata con  $gu$ . Durante questo intervallo di tempo i veicoli che svoltano a sinistra hanno a disposizione, in genere, opportuni distanziamenti temporali per poter effettuare la manovra.

L’effetto del flusso proveniente nel verso opposto sul ritardo dei veicoli che devono svoltare a sinistra ha due componenti: la lunghezza di  $gq$ , durante il quale le svolte non possono essere effettuate, e l’intensità del flusso durante  $gu$ .

**FIG. A.6**

[A.3]

Se poi la svolta è effettuata, come nell’esempio scelto, da una corsia condivisa entra in gioco un altro fattore: la presenza della coda da smaltire proveniente nel senso opposto non influenza il flusso della corsia condivisa fino a che non arriva alla linea di arresto il primo veicolo che chiede di svoltare a sinistra. L’intervallo di tempo che trascorre dall’inizio della fase di verde fino all’arrivo del suddetto veicolo è indicato con  $g_f$ ; durante tale intervallo le svolte a sinistra non influenzano il flusso della corsia condivisa.

In questo caso (corsia “condivisa” e manovra “permessa”) dobbiamo considerare tre parti distinte della fase di verde:

$g_f$  = intervallo di tempo fino a che non arriva il primo veicolo che svolta a sinistra (sec); il fattore correttivo per questo periodo di tempo vale 1.00.

$gq-g_f$ = intervallo di tempo tra l'arrivo del primo veicolo che chiede di svoltare a sinistra e lo smaltimento della coda proveniente dal verso opposto; per questo periodo il fattore correttivo vale 0.00.

$gu$ = intervallo di tempo che si ha dopo lo smaltimento della coda proveniente dal verso opposto; il fattore correttivo dipende dal flusso che proviene dal verso opposto.

Per tenere conto di questi fattori l'HCM del 1994 presenta due procedure speciali per il calcolo del fattore correttivo, una per accessi multicorsia e l'altra per accessi singola corsia; per lo studio di tali procedure, alquanto laboriose dal punto di vista analitico, rimandiamo alla lettura del manuale.

#### *D) Analisi di capacità'.*

L'analisi di capacità è la fase più interessante dell'intera procedura, perché in essa compare il concetto di capacità dell'intersezione. Tale fase è inoltre particolare perché vi sono due diversi percorsi attraverso cui eseguirla, a seconda se sono o meno noti i tempi della semaforizzazione, cioè se essi risultano essere dei dati di *input* oppure devono essere determinati.

La figura A.7 mostra lo schema del procedimento.

I vari passi della procedura sono di seguito descritti.

*Passo 1).* Calcolo dei rapporti  $v/s$ .

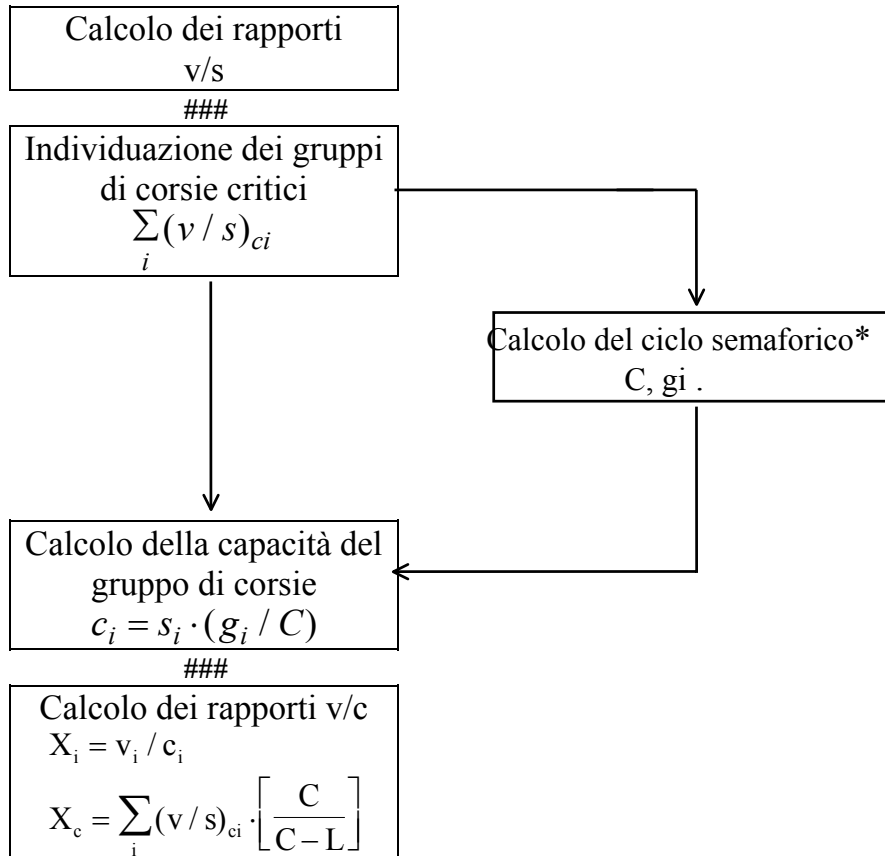
Il primo passo nell'analisi di capacità è il calcolo del “**rapporto di flusso**”,  $v/s$ , tra il volume di domanda ed il flusso di saturazione, per ogni gruppo di corsie dell'intersezione.

Ciò si fa molto semplicemente, dato che i tassi di flusso ( $v$ ) e i flussi di saturazione ( $s$ ) corretti già sono stati determinati nelle fasi precedenti. Per ogni gruppo di corsie “ $i$ ”, si ha semplicemente:

$$\left( \frac{v}{s} \right)_i = \frac{v_i}{s_i}$$

FIG. A.7

[A.3]



\* solo se non già noto.

*Passo 2).* Individuazione dei gruppi di corsie critici.

E' richiesta ora dalla procedura l'individuazione dei gruppi di corsie critici.

I “**gruppi di corsie critici**” sono quelli che presentano il flusso più intenso tra i gruppi che hanno “via libera” in una stessa fase. L'intensità del flusso è misurata dal rapporto v/s: valori più alti indicano un flusso più intenso.

La scelta dei gruppi di corsie critici è regolata da tre regole:

- 1) Ogni fase ha *uno ed un solo* gruppo di corsie critico. Perciò, in ogni istante del ciclo semaforico (esclusi i tempi persi per lo sgombero), ci sarà un unico gruppo di corsie critico che si serve dell'intersezione; in nessun istante, inoltre, ci sarà più di un gruppo di corsie critico che si serve dell'intersezione.
- 2) Quando le fasi sono separate, e non sovrapposte, il gruppo di corsie critico è l'unico che ha il rapporto  $v/s$  più alto tra tutti quelli che hanno il via libera durante la fase.
- 3) Quando le fasi sono sovrapposte (cioè uno o più gruppi di corsie hanno il verde per più fasi semaforiche), i gruppi di corsie critici sono quelli che hanno la più alta somma dei rapporti  $v/s$  e che soddisfatti la prima regola.

Individuati i gruppi di corsie critici (uno per fase) se ne sommano i rapporti  $v/s$ . Questi principi sono ben spiegati con degli esempi.

La figura A.8 mostra una intersezione con un semplice piano di fasatura a 2 fasi. In questo caso abbiamo due gruppi di corsie critici, uno per ogni fase, e sono quelli cui competono i valori più elevati del rapporto  $v/s$ , cioè il gruppo di corsie proveniente da SUD per la prima fase ( $v/s=0.35$ ) e il gruppo di corsie proveniente da OVEST per la seconda fase ( $v/s=0.45$ ). La somma dei rapporti  $v/s$  è pari a  $0.35+0.45=0.80$ .

**FIG. A.8**

[A.3]

La figura A.9 mostra un caso simile, solo che le fasi sono 3. In questo caso i gruppi di corsie critici sono 3, uno per ogni fase, e sono quelli corrispondenti rispettivamente ai valori del rapporto  $v/s = 0.15, 0.28, 0.32$ . La somma dei rapporti critici è pari a 0.75.

**FIG. A.9**

[A.3]

La figura A.10 mostra il caso di un piano di fasatura con “verde anticipato” e “verde ritardato”, che comporta fasi sovrapposte. Per semplicità indichiamo ogni gruppo di corsie riportato in figura col valore del suo rapporto  $v/s$  scritto tra parentesi.

Il gruppo (0.16) si muove solo nella fase 1a, mentre il gruppo (0.40) si muove sia nella fase 1a che 1b. Il gruppo (0.38) si muove nelle fasi 1b e 1c, mentre il gruppo (0.12) si muove solo nella fase 1c. Si noti comunque che c'è un confine netto tra le fasi 1 e 2 senza periodi di sovrapposizione.

La scelta del gruppo di corsie critico per la fase 2 è semplice, perché la fase è separata e non sovrapposta: il gruppo di corsie critico è il (0.38), per il quale il rapporto  $v/s$  è più alto.

**FIG. A.10**

**[A.3]**

Per la fase 1 il modo più semplice per determinare il gruppo di corsie critico è riferirsi al diagramma ad anello; è chiaro da questo diagramma che la durata totale della fase 1 sarà determinata dalla somma delle durate delle fasi di verde per i gruppi:  $(0.40) + (0.12)$  oppure  $(0.16) + (0.38)$ .

In effetti in questa fase il verde è dato o alla parte destra o a quella sinistra del diagramma. I rapporti  $v/s$  nei due casi sono dati da:

$$0.40 + 0.12 = 0.52 \quad 0.16 + 0.38 = 0.54$$

Il gruppo di corsie critico per la fase 1 sarà il 2° (parte destra del diagramma ad anello) perché la somma suddetta è più elevata, e sarà costituito dalle rispettive manovre.

La somma dei rapporti critici  $v/s$  è  $0.38 + 0.54 = 0.92$ .

*Passo 3).* Calcolo del ciclo semaforico (se non già fissato).

Per procedere al calcolo delle capacità dei gruppi di corsie e dei rapporti  $v/c$  è necessario specificare la durata del ciclo e dei tempi di verde assegnati ad ogni fase. Tali valori possono essere già noti oppure devono essere calcolati. Ci sono due casi in cui è necessario effettuare il calcolo:

A) Per semafori predeterminati se la temporizzazione non è nota (ci si riconduce ad un problema di progetto del ciclo semaforico).

B) Per semafori attuati per i quali i tempi medi dei vari segnali devono essere stimati.

L'algoritmo di calcolo in entrambi i casi è lo stesso, anche se la sua applicazione differisce alquanto.

La prima cosa da fare è calcolare una opportuna durata del ciclo semaforico; devono essere calcolate due durate del ciclo: la minima durata necessaria per soddisfare la domanda pedonale e la minima durata necessaria per soddisfare la domanda veicolare. La prima è già stata calcolata precedentemente quando abbiamo parlato dei flussi pedonali. Della seconda anche abbiamo parlato, ma solo in condizioni di  $v/c=1$  (durata minima del ciclo semaforico), per cui la riprendiamo.

Per un dato gruppo di corsie "i" viene detto "grado di saturazione" il rapporto:

$$X_i = (v/c)_i = \frac{v_i}{s_i \cdot (g_i / C)} = \frac{(v/s)_i}{(g_i / C)}$$

Analogamente possiamo definire lo stesso grado di saturazione per l'intera intersezione, considerando i gruppi di corsie critici:

$$X_c = \frac{\sum_i (v/s)_{ci}}{(C - L) / C}$$

$X_c$  in questo caso è anche detto rapporto critico per l'intersezione.

Posso quindi scrivere:

$$X_c = \sum_i (v/s)_{ci} \cdot \frac{C}{C-L}$$

e da questa calcolare la durata del ciclo minimo per un assegnato valore di  $X_c$ :

$$C = \frac{L \cdot X_c}{X_c - \sum_i (v/s)_{ci}}$$

il quale diventa il valore minimo assoluto per  $X_c=1$ .

Vediamo che valore assumere per  $X_c$ :

- Per semafori predeterminati in genere il ritardo risulta minimo quando  $X_c$  è compreso tra 0.80 e 0.90. Valori più bassi possono comportare tempi di verde inutilizzati nel ciclo, causando inutili ritardi ai veicoli in attesa al rosso; valori più alti possono causare attese più lunghe di un ciclo ai veicoli all'intersezione.
- Per semafori attuati, se funzionanti correttamente, è raro che vi siano tempi di verde inutilizzati, per cui il valore atteso di  $X_c$  è elevato. Può essere usato un valore di  $X_c$  compreso tra 0.90 e 0.95.
- I semafori semiattuati sono i più complicati da analizzare, in quanto il ciclo può avere lunghezza indefinita qualora non si presentino veicoli alle strade laterali. Durante i periodi di punta ci si aspetta che vi sia comunque una aliquota di verde inutilizzato per la strada principale, mentre virtualmente il verde in eccesso è nullo per quella secondaria. Si può, allora, assumere un valore di  $X_c$  compreso tra 0.80 e 0.85.

Fissata la durata del ciclo,  $C$ , i tempi di verde effettivo dati ad ogni fase o sottofase "i", si ricavano dalla:

$$X_i = \frac{(v/s)_i}{(g_i/C)}$$

cioè:

$$g_i = (v/s)_i \cdot (C/X_i)$$

Per il valore di  $X_i$  si opera come segue:

- 1) Per i semafori predeterminati si pone  $X_i = X_c$  per tutti i gruppi di corsie critici. Per le manovre secondarie si pone  $X_i = 0.95$  e il verde in eccesso lo si cede alle manovre principali.
- 2) Per i semafori attuati si pone  $X_i = X_c = 0.90$ .
- 3) Per i semafori semiattuati si pone  $X_i = 1.00$  per le strade laterali, e si assegna il verde in eccesso alla strada principale.

*Passo 4).* Calcolo della capacità del gruppo di corsie.

Fissata la durata del ciclo semaforico ed i tempi di verde effettivo assegnati ad ogni fase, la capacità di ogni gruppo di corsie “i” può essere ottenuta come:

$$c_i = s_i \cdot (g_i / C)$$

*Passo 5).* Calcolo del rapporto v/c critico per i gruppi di corsie e per l’intersezione.

Il rapporto critico per il gruppo di corsie “i” viene calcolato semplicemente come:

$$X_i = \frac{v_i}{c_i}$$

Lo stesso rapporto per l’intera intersezione è calcolato come:

$$X_c = \sum_i (v / s)_{ci} \cdot \frac{C}{C - L}$$

I risultati di questi due calcoli sono molto importanti per la progettazione dell’intera intersezione.

Quando  $X_c > 1.00$ , vuol dire che la capacità dell’intersezione non è sufficiente a smaltire la domanda; in questo caso si possono prendere i seguenti provvedimenti:

- aggiungere corsie ai gruppi critici;
- aumentare la durata del ciclo;
- prevedere fasi protette per le svolte a sinistra;
- proibire le svolte a sinistra all’intersezione.

L'aggiunta di corsie aumenta, chiaramente, la capacità del gruppo e riduce il flusso di domanda che si ha in ogni corsia; ciò richiede però l'esistenza di un sufficiente spazio, cosa rara in ambito urbano.

L'incremento della durata del ciclo incrementa la capacità, in quanto il "tempo perso" in un'ora diminuisce (le fasi restano le stesse); inoltre, con l'aumento della durata del ciclo si possono avere dei ritardi troppo elevati.

Se i flussi che chiedono di svoltare a sinistra sono elevati e la manovra è "permessa", si possono creare delle interferenze tali, tra essi e i flussi che proseguono dritti, che possono portare alla congestione dell'intersezione; con la creazione di una fase apposita per queste svolte le manovre risultano essere più efficienti e la capacità dell'intersezione aumenta. In questo modo si incrementa però sia la durata del ciclo che il tempo perso. Per tali motivi a volte si preferisce impedire la svolta a sinistra alle intersezioni, dirottando i veicoli su percorsi alternativi.

L'intera procedura per l'analisi di capacità viene supportata dalla scheda di figura A.11.

**FIG. A.11**

[A.2]

*E) Determinazione del livello di servizio.*

Il livello di servizio di una intersezione semaforizzata è connessa al ritardo medio di fermata per veicolo. La procedura proposta indica per il calcolo del ritardo il seguente metodo:

$$d = d_1 \cdot DF + d_2$$

$$d_1 = 0.38 \cdot C \cdot \frac{[1 - (g / C)]^2}{[1 - (g / C) \cdot \text{Min}(X, 1.0)]}$$

$$d_2 = 173 \cdot X^2 \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{m \cdot X}{c}} \right]$$

dove:

$d$  = ritardo medio di fermata per veicolo (sec/veic.).

$d_1$  = ritardo uniforme (sec/veic.)

$d_2$  = ritardo incrementale (sec/veic.)

$DF$  = fattore di correzione dovuto alla qualità della proreessione e al tipo di controllo.

$X$  = rapporto  $v/c$  per il gruppo di corsie.

$C$  = durata del ciclo semaforico (sec).

$c$  = capacità del gruppo di corsie (veic/h).

$g$  = verde efficace per il gruppo di corsie (sec).

$m$  = coeff. di calibrazione che tiene conto del tipo di arrivo e dell'entità dei plotoni di veicoli.

Il termine  $d_1$  rappresenta il ritardo per arrivi uniformi, mentre il termine  $d_2$  tiene conto del fatto che tali arrivi uniformi non sono.

Il coefficiente  $DF$  tiene conto dell'effetto del tipo di semaforo e della qualità della progressione; i due effetti si escludono vicendevolmente, per cui se ne può considerare uno solo ma non entrambi. Per questo motivo il termine  $DF$  sarà indicato con  $CF$  se si tiene conto solo del tipo di controllo e con  $PF$  se, invece, si tiene conto della qualità della progressione.

I metodi di calcolo dei due termini sono riportati in tabella A.9, dove è anche riportato, in funzione del tipo di arrivi, il coefficiente “ $m$ ”.

**TAB. A.9**

[A.2]

| Fattore di correzione per il tipo di controllo (CF) |       |                             |       |       |                           |       |
|-----------------------------------------------------|-------|-----------------------------|-------|-------|---------------------------|-------|
| Tipo di controllo                                   |       | Intersezioni non-coordinate |       |       | Intersezioni coordinate   |       |
| Predeterminato                                      |       | 1,0                         |       |       | Calcolare PF come segue   |       |
| Semiattuato                                         |       |                             |       |       | 1,0                       |       |
| Gruppi di corsie attuati                            |       | 0,85                        |       |       | Calcolare PF come segue   |       |
| Gruppi di corsie non attuati                        |       | 0,85                        |       |       |                           |       |
| Attuato (tutti i gruppi di corsie attuati)          |       | 0,85                        |       |       | Trattare come semiattuato |       |
| Fattore di correzione per la progressione (PF)      |       |                             |       |       |                           |       |
| PF=(1 - P)f <sub>p</sub> /(1 - g/C)*                |       |                             |       |       |                           |       |
| Tipo di arrivo                                      | 1     | 2                           | 3     | 4     | 5                         | 6     |
| f <sub>p</sub> medio                                | 1,00  | 0,93                        | 1,00  | 1,15  | 1,00                      | 1,00  |
| R <sub>p</sub> medio                                | 0,333 | 0,667                       | 1,000 | 1,333 | 1,667                     | 2,000 |
| m                                                   | 8     | 12                          | 16    | 12    | 8                         | 4     |

\* P=percentuale di veicoli che arrivano durante il verde (P=R<sub>p</sub> g/C). Non può eccedere 1.  
f<sub>p</sub> = ulteriore fattore correttivo

Calcolato il ritardo “d” per ogni gruppo di corsie si ottiene il livello di servizio di ciascun gruppo (vedi tabella A.1).

Si può poi calcolare il ritardo medio dell’accesso (media pesata dei ritardi dei gruppi di corsie che lo costituiscono) e dell’intera intersezione (media pesata dei ritardi degli accessi), come segue:

$$d_A = \frac{\sum d_i \cdot v_i}{\sum v_i} \quad d_I = \frac{\sum d_A \cdot v_A}{\sum v_A}$$

dove:

d<sub>i</sub>= ritardo per il gruppo di corsie “i”.

d<sub>A</sub>= ritardo per l’accesso “A”.

d<sub>I</sub>= ritardo per l’intersezione.

v<sub>i</sub>= flusso corretto per il gruppo di corsie “i”.

v<sub>A</sub>= flusso corretto per l’accesso “A”.

La scheda utilizzata per tali calcoli è riportata in figura A.12.

**FIG. A.12**

[A.2]

## APPENDICE

### 1) “Metodo inglese” per il calcolo del flusso di saturazione di un accesso ad una intersezione semaforizzata.

Il flusso di saturazione di un accesso ad una intersezione semaforizzata può essere calcolato mediante il cosiddetto “Metodo Inglese”; il suddetto flusso, espresso in veic/h, viene calcolato con la seguente formula:

$$s = s_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n$$

dove  $s_0$  è il flusso di saturazione in condizioni ideali (niente soste né svolte a destra o sinistra) e per una composizione di sole autovetture, esso è dato da:

$$s_0 = 530 \cdot l \quad \text{per } 5,5\text{m} < l < 18,5\text{m}$$

dove:  $l = lG - lS$ ; con  $lG$  larghezza geometrica dell'accesso all'intersezione (in m) e  $lS$  riduzione dovuta alla presenza di veicoli in sosta:

$$l_s = \begin{cases} 1,65 - \frac{0,015 \cdot (z - 7,50)}{g} & \text{se } z > 7,50 \\ 1,65 & \text{se } z \leq 7,50 \end{cases}$$

con “g” tempo di verde in minuti e “z” distanza (in m) del primo veicolo in sosta dalla linea di stop.

Per  $l < 5,5\text{m}$  si ha:

|                |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| I              | 3,05 | 3,35 | 3,66 | 3,97 | 4,27 | 4,57 | 4,88 | 5,18 |
| S <sub>0</sub> | 1850 | 1875 | 1900 | 1950 | 2075 | 2250 | 2475 | 2700 |

I termini  $K_1, K_2, \dots, K_n$  sono dei fattori correttivi relativi alla eterogeneità della composizione veicolare, alla presenza di diverse manovre di svolta, ad interferenza con flussi pedonali e così via.

Per la *composizione veicolare* si ha:

# Appendice

$$K_1 = \frac{1}{\sum_k \gamma_k \cdot P_k}$$

con:  $\gamma_k$  coefficiente di equivalenza e  $P_k$  frazione dei veicoli della k-esima classe. Per i coefficienti di equivalenza in autovetture vale la seguente tabella:

|                                     |      |
|-------------------------------------|------|
| Autovetture e veicoli merci leggeri | 1,00 |
| Veicoli industriali medi e pesanti  | 1,75 |
| Autobus                             | 2,25 |
| Tram                                | 2,50 |
| Motocicli                           | 0,33 |
| Biciclette                          | 0,20 |

Il fattore correttivo relativo alle *manovre di svolta* (K2) ha una espressione del tutto analoga ma con i seguenti coeff. di equivalenza:

|                   |        |
|-------------------|--------|
| Marcia diretta    | 1      |
| Svolta a destra   | 1÷1,25 |
| Svolta a sinistra | 1÷1,75 |

Per tener conto delle *interferenze con i flussi pedonali* si usa un fattore correttivo dato da  $K_3=1-###$ , dove:

|          |                  |
|----------|------------------|
| $g=0,05$ | per 100 pedoni/h |
| $g=0,10$ | per 300 pedoni/h |
| $g=0,15$ | per 500 pedoni/h |

Per tener conto della *pendenza in corrispondenza dell'intersezione* si ha:

$$K_4 = 1 + 0,03 \cdot i$$

ove “i” è la pendenza espressa in ###: +i discesa; -i salita.

Si può introdurre inoltre un 5° fattore correttivo (K5) dovuto alla localizzazione dell'intersezione:

Appendice

|                            |      |
|----------------------------|------|
| Zona residenziale          | 1    |
| Zona commerciale suburbana | 0,98 |
| Zona industriale           | 0,93 |
| Zona centro affari         | 0,85 |

Il flusso di saturazione base, da moltiplicare per i coeff.  $K_i$ , nel caso di svolta protetta è dato da:

$$s_b = s' / [1 + (1.5/r)]$$

dove:

$s' = 1800$  veic/h verde                      per 1 corsia

$s' = 3000$  veic/h verde                      per 2 corsie

$r$  = raggio di curvatura della svolta

Nel caso in cui la svolta sia a sinistra e “permessa” a tale termine si va a sottrarre  $0,75 \cdot Q$ , dove  $Q$  è la somma delle portate orarie, diretta e svoltante a destra, provenienti dall’accesso opposto.

## 2) Determinazione del livello di servizio delle intersezioni semaforizzate.

Il livello di servizio (LdS) per le intersezioni semaforizzate è definito in termini di “ritardo di fermata medio per veicolo”. Il ritardo è infatti una misura del “discomfort”, del consumo di carburante e del tempo impiegato nello spostamento. Più precisamente, i criteri per definire il livello di servizio si basano sull’analisi del ritardo medio di fermata effettuata per periodi di 15 minuti.

In tabella A.1 è riportato il criterio con il quale si assegna il LdS all’intersezione in funzione del ritardo.

TAB. A.1

[A.2]

| Livello di servizio | Ritardo medio di fermata per veicolo (sec) |
|---------------------|--------------------------------------------|
| <b>A</b>            | ### 5,0                                    |
| <b>B</b>            | >5,0 e ≤15.0                               |
| <b>C</b>            | >15.0 e ≤25.0                              |
| <b>D</b>            | >25.0 e ≤40.0                              |
| <b>E</b>            | >40.0 e ≤60.0                              |
| <b>F</b>            | > 60.0                                     |

Il ritardo dipende da molti fattori tra i quali la qualità del flusso, la lunghezza del ciclo, il rapporto v/c etc. Esso viene valutato con la procedura di seguito descritta, proposta dall’HCM 1994 [A.2], la quale consente anche la progettazione del ciclo semaforico, se non già noto.

Il ritardo può essere anche misurato direttamente, ma, siccome i risultati ottenuti sono molto variabili e le misure molto laboriose, ciò viene fatto molto raramente.

Descriviamo ora il funzionamento dell’intersezione in corrispondenza dei vari livelli di servizio:

- **Livello di servizio A.** Il ritardo medio all’intersezione è molto basso (meno di 5.0 secondi per veicolo). Tale LdS si ha quando la progressione è molto favorevole e la maggior parte dei veicoli arrivano durante la fase di verde: la maggior parte dei veicoli non si arresta per nulla all’intersezione. Durate brevi del ciclo possono contribuire a diminuire il ritardo.
- **Livello di servizio B.** Il ritardo medio è compreso tra 5 e 15 secondi per veicolo. Ciò si ha in genere in corrispondenza di una buona progressione e/o durate brevi del ciclo. Si arrestano più veicoli rispetto al LdS A e si ha quindi un ritardo maggiore.
- **Livello di servizio C.** Il ritardo medio è compreso tra 15 e 25 secondi per veicolo. Questi ritardi più elevati possono essere dovuti ad una discreta progressione e/o durate

del ciclo maggiori. Si possono presentare casi in cui la fila non è smaltita all'interno di un solo ciclo. Il numero di veicoli che si arresta all'intersezione è significativo, tuttavia ancora molti veicoli attraversano l'intersezione senza arrestarsi.

- **Livello di servizio D.** Il ritardo medio è compreso tra 25 e 40 secondi per veicolo; l'influenza della congestione comincia a notarsi di più. Questi lunghi ritardi possono derivare dalla combinazione di una sfavorevole progressione, lunghe durate del ciclo o alti rapporti v/c. Molti veicoli si arrestano e diminuisce il numero di quelli che possono attraversare l'intersezione senza farlo. Sono frequenti i casi in cui la fila non viene smaltita all'interno dello stesso ciclo.
- **Livello di servizio E.** Il ritardo medio per veicolo è compreso tra i 40 e i 60 secondi; quest'ultimo è considerato il limite di un ritardo accettabile. Tali valori elevati del ritardo sono generalmente dovuti ad una scadente progressione, elevate durate del ciclo e alti valori del rapporto v/c. Sono molto frequenti i casi in cui i veicoli in coda non riescono ad essere smaltiti nel tempo di un ciclo.
- **Livello di servizio F.** Il ritardo medio supera i 60 secondi per veicolo; ciò viene considerato inaccettabile dalla maggior parte dei conducenti. Questa condizione si ha spesso con la sovrasaturazione dell'accesso, cioè quando il flusso in arrivo supera la capacità dell'intersezione. I valori del rapporto v/c sono elevati e sono molti i casi in cui la fila non viene smaltita nel tempo di un ciclo. Una scadente progressione e una elevata durata del ciclo contribuiscono al raggiungimento di valori così elevati del ritardo.

La procedura per valutare il livello di servizio di una intersezione semaforizzata considera i singoli accessi dell'intersezione e, all'interno di ciascuno di essi, singoli "gruppi di corsie". E' necessario, quindi, prima di iniziare la procedura, scegliere opportunamente i gruppi di corsie per ogni accesso.

Un "**gruppo di corsie**" è definito come una o più corsie di un accesso all'intersezione che servono una o più correnti di traffico. La scelta di tali gruppi deve essere effettuata caso per caso; i criteri generali sono i seguenti:

- 1) Una o più corsie esclusive per la svolta a sinistra dovrebbero essere considerate in un gruppo a parte. Lo stesso è valido anche per una o più corsie esclusive per la svolta a destra.
- 2) In un accesso in cui sono presenti corsie esclusive per la svolta a sinistra e/o per la svolta a destra, tutte le altre corsie dovrebbero far parte di un unico gruppo.
- 3) Quando un accesso con più di una corsia comprende una corsia che può essere usata sia per la svolta a sinistra che per l'attraversamento, è necessario determinare se essa è effettivamente usata per entrambe le manovre, o se ci sono così tanti veicoli che svoltano a sinistra che la corsia può essere vista come una corsia esclusiva per tale svolta.

Per stabilire questo terzo punto si può procedere come segue. Il tasso di flusso dei veicoli che svoltano a sinistra è trasformato in un flusso equivalente di attraversamento:

$$v_{LE} = v_L \cdot \frac{1800}{1400 - v_O}$$

dove:

$v_{LE}$  = è il tasso di flusso equivalente.

$v_L$  = il tasso di flusso dei veicoli che svoltano a sinistra.

$v_O$  = il tasso di flusso totale che proviene dal verso opposto.

Se  $v_O$  è #### di 1400 veic./h,  $v_{LE}$  non ha significato; in questi casi, non risultando fattibile l'attraversamento della corrente da parte dei veicoli che svoltano a sinistra, si dovrebbe prevedere una fase per la svolta "protetta" a sinistra.

Nel caso generale si assume che, in condizioni limite, il flusso equivalente di svolta a sinistra,  $v_{LE}$ , occupi completamente la corsia più a sinistra dell'accesso, e si assume che il rimanente flusso occupi le restanti corsie. Se il tasso di flusso equivalente nella corsia più a sinistra eccede il tasso di flusso medio delle altre, allora si assume che tale corsia sia riservata esclusivamente alla svolta a sinistra e la si considera in un gruppo a parte.

In figura A.1 sono riportati degli esempi che possono aiutare ad individuare i gruppi di corsie (GDC).

La procedura per la determinazione del livello di servizio è articolata in 5 fasi (o moduli), come riportato in figura A.2.

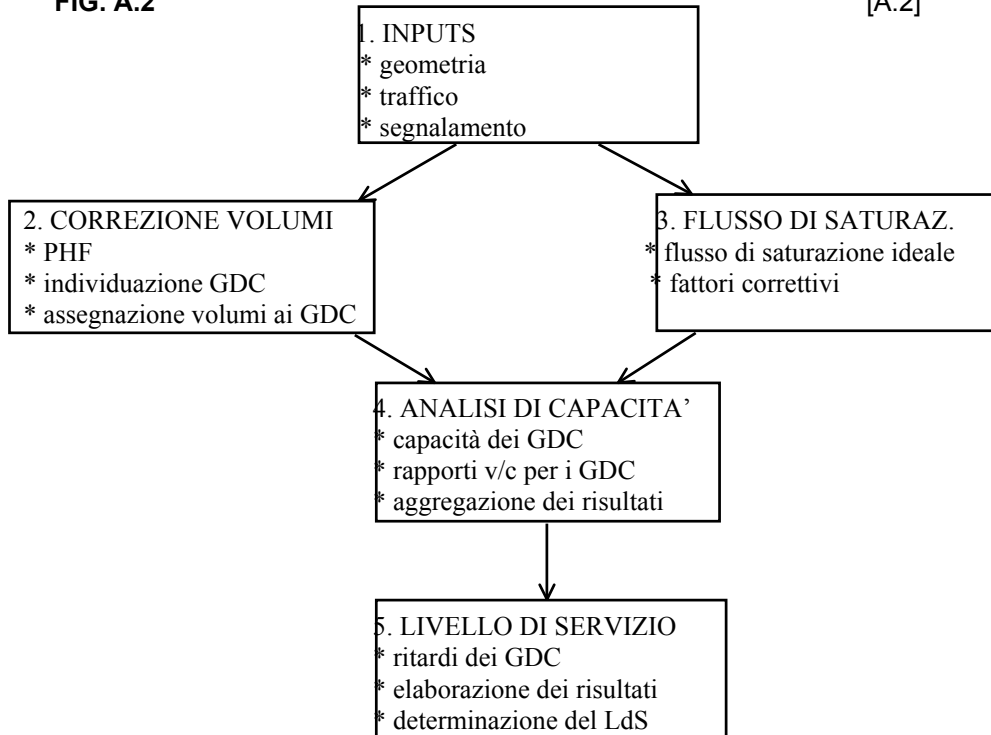
## Appendice

**FIG. A.1**

[A.2]

**FIG. A.2**

[A.2]



Esaminiamo singolarmente le varie fasi.

#### *A) Dati di input.*

In questa prima fase devono essere acquisiti i dati di ingresso necessari per l'esecuzione della procedura. Tali dati sono classificati in tre categorie:

- geometria;
- traffico;
- segnalamento.

La tabella A.2 riassume tali dati e la figura A.3 mostra la scheda su cui riportare i dati stessi.

Tra gli elementi da acquisire concernenti il traffico è da precisare che i mezzi di trasporto collettivo con fermate di linea entro 75 m dalla linea di arresto di ciascun accesso si devono rilevare a parte (*local buses*); gli altri vengono invece considerati come mezzi pesanti, anche questi da rilevare, in percentuale, per ciascuna manovra.

**TAB. A.2**

[A.2]

| CATEGORIA    | PARAMETRI CARATTERISTICI                                     | SIMBOLI   |
|--------------|--------------------------------------------------------------|-----------|
| Geometria    | Ubicazione intersezione                                      | CBD/altri |
|              | Numero di corsie                                             | N         |
|              | Larghezza corsie                                             | W         |
|              | Pendenza accesso (###):                                      |           |
|              | in salita                                                    | +i        |
|              | in discesa                                                   | -i        |
|              | Corsie esclusive di svolta:                                  |           |
|              | a destra                                                     | RT        |
|              | a sinistra                                                   | LT        |
| Traffico     | Lunghezza corsie di accumulo per le svolte suddette          | Ls        |
|              | Sosta veicoli                                                | SI o NO   |
|              | Volumi per manovra (veic./h)                                 | V         |
|              | Fattore dell'ora di punta                                    | PHF       |
|              | Percentuale di veicoli pesanti                               | ### HV    |
|              | Flussi pedonali (ped/h)                                      | PEDS      |
|              | Autobus che si fermano in prossimità dell'intersezione       | NB        |
|              | Manovre di sosta per ora                                     | Nm        |
|              | Tipo di arrivo                                               | AT        |
| Segnalamento | Percentuale di veicoli che arrivano durante la fase di verde | P         |
|              | Durata del ciclo (sec)                                       | C         |
|              | Tempi di verde (sec)                                         | G         |
|              | Intervallo di cambio                                         | Y         |
|              | Tutto rosso                                                  | AR        |
|              | Tipo semaforizzazione (predeterminata o attuata)             | P o A     |
|              | Pulsante per attraversamenti pedonali                        | SI o NO   |
|              | Verde minimo pedonale                                        | Gp        |
|              | Piano di fasatura                                            |           |

I flussi pedonali richiesti in particolare sono quelli che possono interferire con le manovre di svolta a destra e sinistra di tipo “permesso”; convenzionalmente il flusso pedonale riferito ad un dato accesso è quello che interferisce con le svolte a destra dei veicoli provenienti dallo stesso accesso; se non è disponibile un conteggio dei flussi pedonali essi possono essere classificati qualitativamente come bassi, medi o alti.

Appendice

**FIG. A.3**

[A.2]

Uno dei parametri di traffico di più difficile determinazione è il “**tipo di arrivo**” dei veicoli a ciascun ramo dell’intersezione; l’introduzione di questo parametro è mirata alla quantificazione della qualità della progressione di una corrente veicolare in avvicinamento. Si distinguono 5 tipi:

- **Tipo 1.** Arrivo di un plotone denso all’inizio della fase di rosso; condizione peggiore.
- **Tipo 2.** Arrivo di un plotone moderatamente denso a metà della fase di rosso o arrivo di un plotone sparso durante tutta la fase di rosso.
- **Tipo 3.** Arrivi casuali; i veicoli arrivano durante le fasi di verde e di rosso in proporzione alla loro durata; condizione media.
- **Tipo 4.** Arrivo di un plotone moderatamente denso a metà della fase di verde o di un plotone sparso, contenente dal 40 all’80 % del volume del gruppo di corsie, durante tutta la fase di verde; condizione mediamente favorevole.
- **Tipo 5.** Arrivo di un plotone denso, contenente oltre l’80% del volume del gruppo di corsie all’inizio della fase di verde; condizione molto favorevole.
- **Tipo 6.** Questo tipo di arrivo è rappresentativo di una progressione eccezionale, su strade con progressione quasi ideali.

Il tipo di arrivo può essere stimato esaminando le condizioni sul campo o con l’analisi dei diagrammi spazio-tempo dell’accesso in esame. Ci si può, poi, aiutare con il cosiddetto “*rapporto di plotone*”,  $R_p$ , che è definito dal rapporto tra la percentuale dei veicoli che arrivano nella fase di verde e la frazione di verde efficace  $g/C$ :  $R_p = P(C/g)$ , dove  $P$  è la percentuale di veicoli che arrivano durante la fase di verde. Se  $R_p = 1.00$  siamo in condizioni di arrivi casuali (tipo III); per  $R_p > 1.00$  le condizioni sono migliori, mentre per  $R_p < 1.00$  sono peggiori. La tabella A.3 pone in relazione  $R_p$  con il tipo di arrivi.

**TAB. A.3**

[A.2]

| <b>Tipo di arrivo</b> | <b>Campo di <math>R_p</math></b> | <b>Valore medio di <math>R_p</math></b> | <b>Progressione</b> |
|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|
| 1                     | $\leq 0,50$                      | 0,333                                   | Molto sfavorevole   |
| 2                     | $> 0,50$ e $\leq 0,85$           | 0,667                                   | Sfavorevole         |
| 3                     | $> 0,85$ e $\leq 1,15$           | 1,000                                   | Arrivi casuali      |
| 4                     | $> 1,15$ e $\leq 1,50$           | 1,333                                   | Favorevole          |
| 5                     | $> 1,50$ e $\leq 2,00$           | 1,667                                   | Molto favorevole    |
| 6                     | $> 2,00$                         | 2,000                                   | Eccezionale         |

Un’altra variabile di interesse è il numero di manovre di parcheggio che sono effettuate in un’ora entro 75 m dall’intersezione,  $N_m$ . Ogni manovra di ingresso e di uscita da uno spazio di parcheggio è considerata come una manovra separata.

Per quanto riguarda i dati sul segnalamento è necessario conoscere il piano di fasatura e la sequenza dei segnali. Ciò è semplice per semafori il cui funzionamento sia predeterminato. Per i semafori attuati le durate del ciclo e dei tempi di verde variano con la domanda, per cui è necessaria l'osservazione diretta di questi parametri e bisogna far riferimento a dei valori medi degli stessi.

L'*HCM* del 1994 raccomanda anche una serie di valori medi che possono essere utilizzati, con una certa cautela, quando non sono disponibili tutte le informazioni. Tali valori sono riportati in tabella A.4.

**TAB. A.4**

[A.2]

| Parametro                                         | Valore consigliato                                                  |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>Traffico</b>                                   |                                                                     |
| Flusso di saturazione ideale                      | 1900 autovetture per ora di verde efficace e per corsia             |
| Flussi pedonali                                   | Nulli 0 ped/h<br>Bassi 50 ped/h<br>Medi 200 ped/h<br>Alti 400 ped/h |
| Percentuale veicoli pesanti                       | 2                                                                   |
| Pendenza dell'accesso                             | 0                                                                   |
| Numero di autobus, NB                             | 0 bus/h                                                             |
| Condizioni di parcheggio                          | Sosta vietata                                                       |
| Numero di manovre di parcheggio, Nm               | 20 manovre/h (quando esiste)                                        |
| Tipo di arrivo:                                   |                                                                     |
| Gruppi di corsie con manovre di attraversamento   | 3 se isolato; 4 se coordinato                                       |
| Gruppi di corsie senza manovre di attraversamento | 3                                                                   |
| Fattore dell'ora di punta                         | PHF=0.90                                                            |
| Fattore di utilizzazione corsie                   | vedi tab. 1.15                                                      |
| <b>Strada e segnalamento</b>                      |                                                                     |
| Tipo di semaforo                                  | Predeterminato                                                      |
| Durata del ciclo                                  | 60-120 sec                                                          |
| Tempo perso                                       | 3,0 sec/fase                                                        |
| Giallo + tutto-rosso                              | 4,0 sec/fase                                                        |
| Tipo di area                                      | Non CBD                                                             |
| Larghezza corsia                                  | 3,66 m                                                              |

*B) Correzione dei volumi.*

Questa fase comprende tre diverse calcolazioni, di cui la terza non è indispensabile:

- 1) tutti i volumi vengono corretti per tener conto delle punte di traffico nelle frazioni di ora;
- 2) vengono fissati i “gruppi di corsie”;
- 3) se si desidera, si possono correggere i flussi per tener conto di un diverso uso delle corsie all’interno dello stesso gruppo.

La correzione del volume di domanda che si ha nell’intera ora al tasso di flusso per un periodo di 15 minuti all’interno della stessa ora viene effettuata nel modo classico, utilizzando il fattore dell’ora di punta (PHF):

$$v_p = \frac{V}{PHF}$$

dove  $v_p$  è il tasso di flusso massimo all’interno dell’ora. Ciò si fa per i volumi di domanda di ogni manovra.

Della metodologia utilizzata per la individuazione dei gruppi di corsie ne abbiamo già discusso precedentemente; una volta fissati i gruppi di corsie, i tassi di flusso possono essere corretti se si prevede una differente utilizzazione delle corsie all’interno del gruppo:

$$v = v_g \cdot U$$

dove:

$v$  = tasso di flusso corretto per il gruppo di corsie (veic./h)

$v_g$  = tasso di flusso per il gruppo di corsie (veic./h)

$U$  = fattore di correzione.

Il fattore di correzione è calcolato come segue:

$$U = \frac{v_{g1} \cdot N}{v_g}$$

dove:

$v_{g1}$  = tasso di flusso, non corretto, sulla singola corsia, con il più alto volume tra quelle del gruppo.

$N$  = numero di corsie nel gruppo.

In condizioni medie il valore di U può essere ricavato dalla tabella A.5.

**TAB. A.5** [A.2]

| <b>Manovre del gruppo di corsie</b> | <b>N. di corsie nel gruppo</b> | <b>Percentuale di traffico nella corsia più carica</b> | <b>Fattore di utilizzazione U</b> |
|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Attraversamento o corsie condivise  | 1                              | 100,0                                                  | 1,00                              |
|                                     | 2                              | 52,5                                                   | 1,05                              |
|                                     | 3                              | 36,7                                                   | 1,10                              |
| Esclusiva svolta a sinistra         | 1                              | 100,0                                                  | 1,00                              |
|                                     | 2                              | 51,5                                                   | 1,03                              |
| Esclusiva svolta a destra           | 1                              | 100,0                                                  | 1,00                              |
|                                     | 2                              | 56,5                                                   | 1,13                              |

Quando si utilizza il fattore di correzione, il livello di servizio ottenuto alla fine della procedura è quello relativo alla corsia col peggior funzionamento tra quelle del gruppo; se invece non si usa tale fattore, i risultati riflettono le condizioni di funzionamento medie delle corsie del gruppo.

La scheda che viene utilizzata per questa fase è riportata in figura A.4.

Appendice

**FIG. A.4**

[A.2]

*C) Flusso di saturazione.*

In questa fase si determina il flusso di saturazione di ciascun gruppo di corsie nelle condizioni prevalenti di geometria, traffico e segnalamento, che si hanno in ciascuno di essi.

Per calcolare il flusso di saturazione si parte da un valore ideale che viene modificato mediante una serie di fattori correttivi, i quali rispecchiano le effettive condizioni (geometriche e di traffico) del gruppo di corsie in esame:

$$s = s_0 \cdot N \cdot f_w \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{RT} \cdot f_{LT}$$

dove:

s= flusso di saturazione di un gruppo di corsie, espresso come totale per tutte le corsie del gruppo, sotto le condizioni prevalenti, calcolato in veicoli per ora di verde effettivo (veic./hg).

s<sub>0</sub>= flusso di saturazione ideale per corsia, in genere 1900 autovetture equivalenti per ora di verde effettivo per corsia (pc/hgpl).

N= numero di corsie del gruppo.

f<sub>w</sub>= fattore correttivo per larghezza corsie non ideale.

f<sub>HV</sub>= “ “ per presenza di mezzi pesanti.

f<sub>g</sub>= “ “ per pendenza dell’accesso non nulla.

f<sub>p</sub>= “ “ per la presenza di manovre di parcheggio.

f<sub>bb</sub>= “ “ per la presenza di fermate di autobus.

f<sub>a</sub>= “ “ per la localizzazione dell’intersezione.

f<sub>RT</sub>= “ “ per svolte a destra nel gruppo di corsie.

f<sub>LT</sub>= “ “ per svolte a sinistra nel gruppo di corsie.

I valori dei fattori correttivi si leggono in apposite tabelle costruite sulla base di osservazioni sperimentali; quando non sia possibile utilizzarli, perché non si hanno informazioni sufficientemente precise sull’intersezione, o per stime di primo orientamento, si può calcolare il flusso di saturazione con la seguente relazione:

$$s = 1600 \cdot N$$

l’analisi risulterà, però, ampiamente approssimata.

I primi 6 fattori correttivi non sono correlati al tipo di manovra effettuata, e sono riportati in tabella A.6; la scheda utilizzata è riportata in fig. A.5.

TAB. A.6

[A.2]

| Fattore di correzione per larghezza corsie fw                   |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
|-----------------------------------------------------------------|------------|-------|-------|-------|------------|----------|-------|-------|-------|
| Larghezza corsie (m)                                            | 2.44       | 2.74  | 3.05  | 3.35  | 3.66       | 3.96     | 4.27  | 4.57  | 4,88  |
| fw                                                              | 0.87       | 0.90  | 0.93  | 0.97  | 1.00       | 1.03     | 1.07  | 1.10  | 1.13  |
| Fattore di correzione per mezzi pesanti fhV                     |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| % HV                                                            | 0          | 2     | 4     | 6     | 8          | 10       | 15    | 20    |       |
| ↑                                                               | 1,000      | 0,980 | 0,962 | 0,943 | 0,962      | 0,909    | 0,870 | 0,833 |       |
| ↓                                                               | 0,800      | 0,769 | 0,741 | 0,714 | 0,690      | 0,667    | 0,571 | 0,500 |       |
| % HV                                                            | 25         | 30    | 35    | 40    | 45         | 50       | 75    | 100   |       |
| Fattore di correzione per la pendenza dell'accesso fg           |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| Pendenza, %                                                     | -6         | -4    | -2    | 0     | +2         | +4       | +6    | +8    | ≥+10  |
| fg                                                              | 1,030      | 1,020 | 1,010 | 1,000 | 0,990      | 0,980    | 0,970 | 0,960 | 0,950 |
| Fattore di correzione per le manovre di sosta fp                |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| Numero di manovre di parcheggio per ora                         |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| N. di corsie del Gruppo                                         | No Parking | 0     | 10    | 20    | 30         | 40 o più |       |       |       |
| 1                                                               | 1,000      | 0,900 | 0,850 | 0,800 | 0,750      | 0,700    |       |       |       |
| 2                                                               | 1,000      | 0,950 | 0,925 | 0,900 | 0,875      | 0,850    |       |       |       |
| 3 o più                                                         | 1,000      | 0,967 | 0,950 | 0,933 | 0,917      | 0,900    |       |       |       |
| Fattore di correzione per la presenza di fermate di autobus fbb |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| N. di bus che si fermano nella zona dell'intersez. per ora      |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| N. di corsie del Gruppo                                         | 0          | 10    | 20    | 30    | 40 o più   |          |       |       |       |
| 1                                                               | 1,000      | 0,960 | 0,920 | 0,880 | 0,840      |          |       |       |       |
| 2                                                               | 1,000      | 0,980 | 0,960 | 0,940 | 0,920      |          |       |       |       |
| 3 o più                                                         | 1,000      | 0,987 | 0,973 | 0,960 | 0,947      |          |       |       |       |
| Fattore di correzione per ubicazione intersezione fa            |            |       |       |       |            |          |       |       |       |
| Tipo di zona                                                    |            |       |       |       | Fattore fa |          |       |       |       |
| CBD (quartiere centro affari)                                   |            |       |       |       | 0.90       |          |       |       |       |
| Tutte le altre zone                                             |            |       |       |       | 1.00       |          |       |       |       |

Un esame particolare meritano le correzioni al flusso di saturazione dovute alla presenza di svolte, in quanto i valori assunti dai relativi fattori correttivi dipendono dalle modalità di effettuazione delle relative manovre: esse infatti possono avvenire in corsie esclusive o condivise, ed in una fase semaforica “protetta” o “permessa”.

Per quanto riguarda la svolta a destra essa può avvenire sotto sette diverse condizioni:

1. Corsia esclusiva per la svolta a destra; fase protetta.
2. Corsia esclusiva per la svolta a destra; fase permessa.
3. Corsia esclusiva per la svolta a destra; fase permessa + protetta.

4. Corsia condivisa per la svolta a destra; fase protetta.
5. Corsia condivisa per la svolta a destra; fase permessa.
6. Corsia condivisa per la svolta a destra; fase permessa + protetta.
7. Accesso con corsia unica.

**FIG. A.5**

[A.2]

Di queste il caso più comune è il caso 5 (svolta permessa e corsia non esclusiva), che si ha nell'80###90 % dei casi.

Il coefficiente correttivo viene calcolato come mostrato in tabella A.7; tenendo conto, anche dei flussi pedonali.

**TAB. A.7**

[A.2]

| Casi 1-6: corsie esclusive/condivise e fasi permesse protette |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------|--------------------------------------------------|
| $f_{it}=1,0 - P_{RT}[0,15+(PEDS/2100)(1 - P_{RTA})]$          |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
| $0,0 \leq P_{RT} \leq 1.0$                                    | Percentuale di svolta a sx. nel gruppo di corsie=<br>=1,00 per corsie esclusive (casi 1-3)<br>< 1,00 per corsie condivise (casi 4-6)               |           |        |                                                  |
| $0,0 \leq P_{RTA} \leq 1.0$                                   | Percentuale di svolta a sx che usano fase protetta=<br>=1,00 per protezione completa - no pedoni<br><1,00 per fase permessa - conflitto con pedoni |           |        |                                                  |
| $0 \leq PEDS \leq 1700$                                       | Volume in ped/h che entrano in conflitto con la svolta (se PEDS > 1700, si usi 1700)                                                               |           |        |                                                  |
| $f_{it} \geq 0,05$                                            |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
| Caso 7: Accesso ad una sola corsia                            |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
| $f_{it}=0,90 - P_{RT}[0,135+(PEDS/2100)]$                     |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
| $0,0 \leq P_{RT} \leq 1.0$                                    | Percentuale di svolta a sx. nel gruppo di corsie.                                                                                                  |           |        |                                                  |
| $0 \leq PEDS \leq 1700$                                       | Volume in ped/h che entrano in conflitto con la svolta (si usi 0 se la svolta è completamente protetta)                                            |           |        |                                                  |
| $f_{it} \geq 0,05$                                            |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
| Campo dei valori                                              |                                                                                                                                                    |           |        |                                                  |
| CASI                                                          | $P_{RT}$                                                                                                                                           | $P_{RTA}$ | PEDS   | Formule semplificate                             |
| 1                                                             | 1,0                                                                                                                                                | 1,0       | 0      | 0,85                                             |
| 2                                                             | 1,0                                                                                                                                                | 0,0       | 0-1700 | 0,85 - (PEDS/2100)                               |
| 3                                                             | 1,0                                                                                                                                                | 0-1,0     | 0-1700 | 0,85 - (PEDS/2100)(1- $P_{RTA}$ )                |
| 4                                                             | 0-1,0                                                                                                                                              | 1,0       | 0      | 1,0 - $P_{RT}$ [0,15]                            |
| 5                                                             | 0-1,0                                                                                                                                              | 0,0       | 0-1700 | 1,0 - $P_{RT}$ [0,15+(PEDS/2100)]                |
| 6                                                             | 0-1,0                                                                                                                                              | 0-1,0     | 0-1700 | 1,0 - $P_{RT}$ [0,15+(PEDS/2100)(1- $P_{RTA}$ )] |
| 7                                                             | 0-1,0                                                                                                                                              | -         | 0-1700 | 0,9 - $P_{RT}$ [0,135+(PEDS/2100)]               |

Sul manuale della capacità i valori di  $f_{rt}$  sono anche tabellati in funzione di  $P_{RT}$  e  $P_{RTA}$ ; la tabella in questione è stata, ovviamente, compilata utilizzando le suddette formule. Per le svolte a sinistra si considerano sei diverse condizioni, descritte in tab. A.8.

**TAB. A.8**

[A.2]

| <b>Casi</b> | <b>Tipo di gruppo di corsie</b>               | <b>Fattore di correzione svolta a sinistra, <math>f_{LT}</math></b>                                                                                                                                 |
|-------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1           | Corsia escl. di svolta a sx; fase protetta    | 0.95                                                                                                                                                                                                |
| 2           | Corsia escl. di svolta a sx; fase permessa    | Procedura speciale: vedi HCM 1994                                                                                                                                                                   |
| 3           | Corsia escl. di svolta a sx; fase prot.+perm. | Si applichi il caso 1 per la fase protetta<br>Si applichi il caso 2 per la fase permessa                                                                                                            |
| 4           | Corsia condivisa; fase protetta               | $f_{LT}=1,0/(1,0+0,05 P_{LT})$<br>$P_{LT}$ =Percentuale di svolte a sinistra                                                                                                                        |
| 5           | Corsia condivisa; fase permessa               | Procedura speciale: vedi HCM 1994                                                                                                                                                                   |
| 6           | Corsia condivisa; fase protetta+permessa      | $f_{LT}=(1400 - V_o)/[(1400 - V_o)+(235+0,435 V_o) P_{LT}]$<br>per $V_o \leq 1220$<br>$f_{LT}=1/[1+4,525 P_{LT}]$ per $V_o > 1220$<br>con $V_o$ = volume proveniente dall'accesso opposto (veic./h) |

L'analisi risulta essere molto semplice nel caso in cui si ha corsia esclusiva e svolta "protetta": il fattore correttivo è costante. Quando la svolta è ancora protetta e la corsia è "condivisa" (*shared*), il fattore correttivo dipende anche dal rapporto tra i veicoli che svoltano a sinistra e gli altri.

Il problema diventa complicato quando la svolta è "permessa"; consideriamo infatti la figura A.6. Un veicolo che vuole svoltare a sinistra dalla corsia condivisa entra in conflitto col flusso veicolare proveniente dal verso opposto. Se consideriamo la fase di verde notiamo che vi sono diverse porzioni di essa in cui le condizioni operative della svolta sono molto differenti tra loro. All'inizio della fase di verde, la coda dei veicoli proveniente dal verso opposto inizia a muoversi; sia  $gq$  il tempo che occorre a smaltire la suddetta coda. Durante questo periodo di tempo non vi sono sufficienti distanziamenti temporali (*gap*) nel flusso di traffico che proviene nel verso opposto, e quindi non possono essere effettuate le svolte a sinistra.

In caso di estrema congestione  $gq=g$  e le svolte a sinistra si possono effettuare solo alla fine della fase durante il "tutto rosso".

Se  $gq < g$ , la rimanente parte della fase non è affetta dalla presenza della coda nel verso opposto; questa parte del tempo di verde è detta “*non saturata*” ed è indicata con  $gu$ . Durante questo intervallo di tempo i veicoli che svoltano a sinistra hanno a disposizione, in genere, opportuni distanziamenti temporali per poter effettuare la manovra.

L’effetto del flusso proveniente nel verso opposto sul ritardo dei veicoli che devono svoltare a sinistra ha due componenti: la lunghezza di  $gq$ , durante il quale le svolte non possono essere effettuate, e l’intensità del flusso durante  $gu$ .

**FIG. A.6**

[A.3]

Se poi la svolta è effettuata, come nell’esempio scelto, da una corsia condivisa entra in gioco un altro fattore: la presenza della coda da smaltire proveniente nel senso opposto non influenza il flusso della corsia condivisa fino a che non arriva alla linea di arresto il primo veicolo che chiede di svoltare a sinistra. L’intervallo di tempo che trascorre dall’inizio della fase di verde fino all’arrivo del suddetto veicolo è indicato con  $g_f$ ; durante tale intervallo le svolte a sinistra non influenzano il flusso della corsia condivisa.

In questo caso (corsia “condivisa” e manovra “permessa”) dobbiamo considerare tre parti distinte della fase di verde:

$g_f$  = intervallo di tempo fino a che non arriva il primo veicolo che svolta a sinistra (sec); il fattore correttivo per questo periodo di tempo vale 1.00.

$gq-g_f$ = intervallo di tempo tra l'arrivo del primo veicolo che chiede di svoltare a sinistra e lo smaltimento della coda proveniente dal verso opposto; per questo periodo il fattore correttivo vale 0.00.

$gu$ = intervallo di tempo che si ha dopo lo smaltimento della coda proveniente dal verso opposto; il fattore correttivo dipende dal flusso che proviene dal verso opposto.

Per tenere conto di questi fattori l'HCM del 1994 presenta due procedure speciali per il calcolo del fattore correttivo, una per accessi multicorsia e l'altra per accessi singola corsia; per lo studio di tali procedure, alquanto laboriose dal punto di vista analitico, rimandiamo alla lettura del manuale.

#### *D) Analisi di capacità'.*

L'analisi di capacità è la fase più interessante dell'intera procedura, perché in essa compare il concetto di capacità dell'intersezione. Tale fase è inoltre particolare perché vi sono due diversi percorsi attraverso cui eseguirla, a seconda se sono o meno noti i tempi della semaforizzazione, cioè se essi risultano essere dei dati di *input* oppure devono essere determinati.

La figura A.7 mostra lo schema del procedimento.

I vari passi della procedura sono di seguito descritti.

*Passo 1).* Calcolo dei rapporti  $v/s$ .

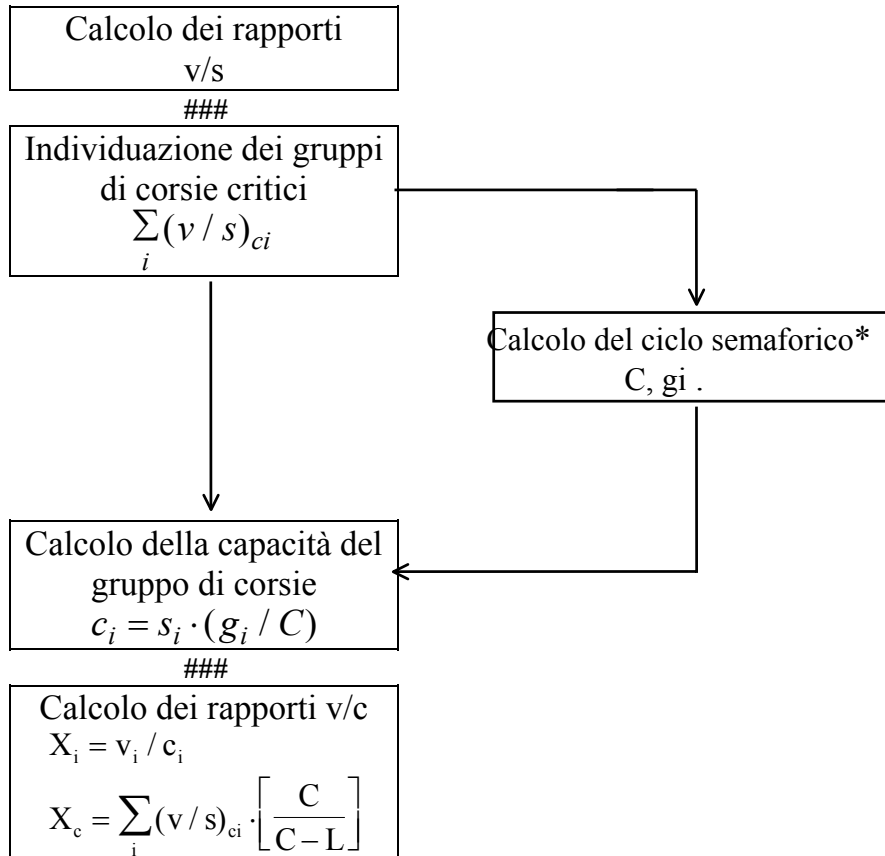
Il primo passo nell'analisi di capacità è il calcolo del “**rapporto di flusso**”,  $v/s$ , tra il volume di domanda ed il flusso di saturazione, per ogni gruppo di corsie dell'intersezione.

Ciò si fa molto semplicemente, dato che i tassi di flusso ( $v$ ) e i flussi di saturazione ( $s$ ) corretti già sono stati determinati nelle fasi precedenti. Per ogni gruppo di corsie “ $i$ ”, si ha semplicemente:

$$\left(\frac{v}{s}\right)_i = \frac{v_i}{s_i}$$

FIG. A.7

[A.3]



\* solo se non già noto.

*Passo 2).* Individuazione dei gruppi di corsie critici.

E' richiesta ora dalla procedura l'individuazione dei gruppi di corsie critici.

I “**gruppi di corsie critici**” sono quelli che presentano il flusso più intenso tra i gruppi che hanno “via libera” in una stessa fase. L'intensità del flusso è misurata dal rapporto v/s: valori più alti indicano un flusso più intenso.

La scelta dei gruppi di corsie critici è regolata da tre regole:

- 1) Ogni fase ha *uno ed un solo* gruppo di corsie critico. Perciò, in ogni istante del ciclo semaforico (esclusi i tempi persi per lo sgombero), ci sarà un unico gruppo di corsie critico che si serve dell'intersezione; in nessun istante, inoltre, ci sarà più di un gruppo di corsie critico che si serve dell'intersezione.
- 2) Quando le fasi sono separate, e non sovrapposte, il gruppo di corsie critico è l'unico che ha il rapporto  $v/s$  più alto tra tutti quelli che hanno il via libera durante la fase.
- 3) Quando le fasi sono sovrapposte (cioè uno o più gruppi di corsie hanno il verde per più fasi semaforiche), i gruppi di corsie critici sono quelli che hanno la più alta somma dei rapporti  $v/s$  e che soddisfatti la prima regola.

Individuati i gruppi di corsie critici (uno per fase) se ne sommano i rapporti  $v/s$ . Questi principi sono ben spiegati con degli esempi.

La figura A.8 mostra una intersezione con un semplice piano di fasatura a 2 fasi. In questo caso abbiamo due gruppi di corsie critici, uno per ogni fase, e sono quelli cui competono i valori più elevati del rapporto  $v/s$ , cioè il gruppo di corsie proveniente da SUD per la prima fase ( $v/s=0.35$ ) e il gruppo di corsie proveniente da OVEST per la seconda fase ( $v/s=0.45$ ). La somma dei rapporti  $v/s$  è pari a  $0.35+0.45=0.80$ .

**FIG. A.8**

[A.3]

La figura A.9 mostra un caso simile, solo che le fasi sono 3. In questo caso i gruppi di corsie critici sono 3, uno per ogni fase, e sono quelli corrispondenti rispettivamente ai valori del rapporto  $v/s = 0.15, 0.28, 0.32$ . La somma dei rapporti critici è pari a 0.75.

**FIG. A.9**

[A.3]

La figura A.10 mostra il caso di un piano di fasatura con “verde anticipato” e “verde ritardato”, che comporta fasi sovrapposte. Per semplicità indichiamo ogni gruppo di corsie riportato in figura col valore del suo rapporto  $v/s$  scritto tra parentesi.

Il gruppo (0.16) si muove solo nella fase 1a, mentre il gruppo (0.40) si muove sia nella fase 1a che 1b. Il gruppo (0.38) si muove nelle fasi 1b e 1c, mentre il gruppo (0.12) si muove solo nella fase 1c. Si noti comunque che c'è un confine netto tra le fasi 1 e 2 senza periodi di sovrapposizione.

La scelta del gruppo di corsie critico per la fase 2 è semplice, perché la fase è separata e non sovrapposta: il gruppo di corsie critico è il (0.38), per il quale il rapporto  $v/s$  è più alto.

**FIG. A.10**

**[A.3]**

Per la fase 1 il modo più semplice per determinare il gruppo di corsie critico è riferirsi al diagramma ad anello; è chiaro da questo diagramma che la durata totale della fase 1 sarà determinata dalla somma delle durate delle fasi di verde per i gruppi:  $(0.40) + (0.12)$  oppure  $(0.16) + (0.38)$ .

In effetti in questa fase il verde è dato o alla parte destra o a quella sinistra del diagramma. I rapporti  $v/s$  nei due casi sono dati da:

$$0.40 + 0.12 = 0.52 \quad 0.16 + 0.38 = 0.54$$

Il gruppo di corsie critico per la fase 1 sarà il 2° (parte destra del diagramma ad anello) perché la somma suddetta è più elevata, e sarà costituito dalle rispettive manovre.

La somma dei rapporti critici  $v/s$  è  $0.38 + 0.54 = 0.92$ .

*Passo 3).* Calcolo del ciclo semaforico (se non già fissato).

Per procedere al calcolo delle capacità dei gruppi di corsie e dei rapporti  $v/c$  è necessario specificare la durata del ciclo e dei tempi di verde assegnati ad ogni fase. Tali valori possono essere già noti oppure devono essere calcolati. Ci sono due casi in cui è necessario effettuare il calcolo:

A) Per semafori predeterminati se la temporizzazione non è nota (ci si riconduce ad un problema di progetto del ciclo semaforico).

B) Per semafori attuati per i quali i tempi medi dei vari segnali devono essere stimati.

L'algoritmo di calcolo in entrambi i casi è lo stesso, anche se la sua applicazione differisce alquanto.

La prima cosa da fare è calcolare una opportuna durata del ciclo semaforico; devono essere calcolate due durate del ciclo: la minima durata necessaria per soddisfare la domanda pedonale e la minima durata necessaria per soddisfare la domanda veicolare. La prima è già stata calcolata precedentemente quando abbiamo parlato dei flussi pedonali. Della seconda anche abbiamo parlato, ma solo in condizioni di  $v/c=1$  (durata minima del ciclo semaforico), per cui la riprendiamo.

Per un dato gruppo di corsie "i" viene detto "grado di saturazione" il rapporto:

$$X_i = (v/c)_i = \frac{v_i}{s_i \cdot (g_i / C)} = \frac{(v/s)_i}{(g_i / C)}$$

Analogamente possiamo definire lo stesso grado di saturazione per l'intera intersezione, considerando i gruppi di corsie critici:

$$X_c = \frac{\sum_i (v/s)_{ci}}{(C - L) / C}$$

$X_c$  in questo caso è anche detto rapporto critico per l'intersezione.

Posso quindi scrivere:

$$X_c = \sum_i (v/s)_{ci} \cdot \frac{C}{C-L}$$

e da questa calcolare la durata del ciclo minimo per un assegnato valore di  $X_c$ :

$$C = \frac{L \cdot X_c}{X_c - \sum_i (v/s)_{ci}}$$

il quale diventa il valore minimo assoluto per  $X_c=1$ .

Vediamo che valore assumere per  $X_c$ :

- Per semafori predeterminati in genere il ritardo risulta minimo quando  $X_c$  è compreso tra 0.80 e 0.90. Valori più bassi possono comportare tempi di verde inutilizzati nel ciclo, causando inutili ritardi ai veicoli in attesa al rosso; valori più alti possono causare attese più lunghe di un ciclo ai veicoli all'intersezione.
- Per semafori attuati, se funzionanti correttamente, è raro che vi siano tempi di verde inutilizzati, per cui il valore atteso di  $X_c$  è elevato. Può essere usato un valore di  $X_c$  compreso tra 0.90 e 0.95.
- I semafori semiattuati sono i più complicati da analizzare, in quanto il ciclo può avere lunghezza indefinita qualora non si presentino veicoli alle strade laterali. Durante i periodi di punta ci si aspetta che vi sia comunque una aliquota di verde inutilizzato per la strada principale, mentre virtualmente il verde in eccesso è nullo per quella secondaria. Si può, allora, assumere un valore di  $X_c$  compreso tra 0.80 e 0.85.

Fissata la durata del ciclo,  $C$ , i tempi di verde effettivo dati ad ogni fase o sottofase "i", si ricavano dalla:

$$X_i = \frac{(v/s)_i}{(g_i/C)}$$

cioè:

$$g_i = (v/s)_i \cdot (C/X_i)$$

Per il valore di  $X_i$  si opera come segue:

- 1) Per i semafori predeterminati si pone  $X_i = X_c$  per tutti i gruppi di corsie critici. Per le manovre secondarie si pone  $X_i = 0.95$  e il verde in eccesso lo si cede alle manovre principali.
- 2) Per i semafori attuati si pone  $X_i = X_c = 0.90$ .
- 3) Per i semafori semiattuati si pone  $X_i = 1.00$  per le strade laterali, e si assegna il verde in eccesso alla strada principale.

*Passo 4).* Calcolo della capacità del gruppo di corsie.

Fissata la durata del ciclo semaforico ed i tempi di verde effettivo assegnati ad ogni fase, la capacità di ogni gruppo di corsie “i” può essere ottenuta come:

$$c_i = s_i \cdot (g_i / C)$$

*Passo 5).* Calcolo del rapporto v/c critico per i gruppi di corsie e per l’intersezione.

Il rapporto critico per il gruppo di corsie “i” viene calcolato semplicemente come:

$$X_i = \frac{v_i}{c_i}$$

Lo stesso rapporto per l’intera intersezione è calcolato come:

$$X_c = \sum_i (v / s)_{ci} \cdot \frac{C}{C - L}$$

I risultati di questi due calcoli sono molto importanti per la progettazione dell’intera intersezione.

Quando  $X_c > 1.00$ , vuol dire che la capacità dell’intersezione non è sufficiente a smaltire la domanda; in questo caso si possono prendere i seguenti provvedimenti:

- aggiungere corsie ai gruppi critici;
- aumentare la durata del ciclo;
- prevedere fasi protette per le svolte a sinistra;
- proibire le svolte a sinistra all’intersezione.

L'aggiunta di corsie aumenta, chiaramente, la capacità del gruppo e riduce il flusso di domanda che si ha in ogni corsia; ciò richiede però l'esistenza di un sufficiente spazio, cosa rara in ambito urbano.

L'incremento della durata del ciclo incrementa la capacità, in quanto il "tempo perso" in un'ora diminuisce (le fasi restano le stesse); inoltre, con l'aumento della durata del ciclo si possono avere dei ritardi troppo elevati.

Se i flussi che chiedono di svoltare a sinistra sono elevati e la manovra è "permessa", si possono creare delle interferenze tali, tra essi e i flussi che proseguono dritti, che possono portare alla congestione dell'intersezione; con la creazione di una fase apposita per queste svolte le manovre risultano essere più efficienti e la capacità dell'intersezione aumenta. In questo modo si incrementa però sia la durata del ciclo che il tempo perso. Per tali motivi a volte si preferisce impedire la svolta a sinistra alle intersezioni, dirottando i veicoli su percorsi alternativi.

L'intera procedura per l'analisi di capacità viene supportata dalla scheda di figura A.11.

**FIG. A.11**

[A.2]

*E) Determinazione del livello di servizio.*

Il livello di servizio di una intersezione semaforizzata è connessa al ritardo medio di fermata per veicolo. La procedura proposta indica per il calcolo del ritardo il seguente metodo:

$$d = d_1 \cdot DF + d_2$$

$$d_1 = 0.38 \cdot C \cdot \frac{[1 - (g / C)]^2}{[1 - (g / C) \cdot \text{Min}(X, 1.0)]}$$

$$d_2 = 173 \cdot X^2 \cdot \left[ (X - 1) + \sqrt{(X - 1)^2 + \frac{m \cdot X}{c}} \right]$$

dove:

$d$  = ritardo medio di fermata per veicolo (sec/veic.).

$d_1$  = ritardo uniforme (sec/veic.)

$d_2$  = ritardo incrementale (sec/veic.)

$DF$  = fattore di correzione dovuto alla qualità della proreessione e al tipo di controllo.

$X$  = rapporto  $v/c$  per il gruppo di corsie.

$C$  = durata del ciclo semaforico (sec).

$c$  = capacità del gruppo di corsie (veic/h).

$g$  = verde efficace per il gruppo di corsie (sec).

$m$  = coeff. di calibrazione che tiene conto del tipo di arrivo e dell'entità dei plotoni di veicoli.

Il termine  $d_1$  rappresenta il ritardo per arrivi uniformi, mentre il termine  $d_2$  tiene conto del fatto che tali arrivi uniformi non sono.

Il coefficiente  $DF$  tiene conto dell'effetto del tipo di semaforo e della qualità della progressione; i due effetti si escludono vicendevolmente, per cui se ne può considerare uno solo ma non entrambi. Per questo motivo il termine  $DF$  sarà indicato con  $CF$  se si tiene conto solo del tipo di controllo e con  $PF$  se, invece, si tiene conto della qualità della progressione.

I metodi di calcolo dei due termini sono riportati in tabella A.9, dove è anche riportato, in funzione del tipo di arrivi, il coefficiente “ $m$ ”.

**TAB. A.9**

[A.2]

| Fattore di correzione per il tipo di controllo (CF) |       |                             |       |       |                           |       |
|-----------------------------------------------------|-------|-----------------------------|-------|-------|---------------------------|-------|
| Tipo di controllo                                   |       | Intersezioni non-coordinate |       |       | Intersezioni coordinate   |       |
| Predeterminato                                      |       | 1,0                         |       |       | Calcolare PF come segue   |       |
| Semiattuato                                         |       |                             |       |       | 1,0                       |       |
| Gruppi di corsie attuati                            |       | 0,85                        |       |       | Calcolare PF come segue   |       |
| Gruppi di corsie non attuati                        |       | 0,85                        |       |       |                           |       |
| Attuato (tutti i gruppi di corsie attuati)          |       | 0,85                        |       |       | Trattare come semiattuato |       |
| Fattore di correzione per la progressione (PF)      |       |                             |       |       |                           |       |
| PF=(1 - P) <sub>f<sub>p</sub></sub> /(1 - g/C)*     |       |                             |       |       |                           |       |
| Tipo di arrivo                                      | 1     | 2                           | 3     | 4     | 5                         | 6     |
| f <sub>p</sub> medio                                | 1,00  | 0,93                        | 1,00  | 1,15  | 1,00                      | 1,00  |
| R <sub>p</sub> medio                                | 0,333 | 0,667                       | 1,000 | 1,333 | 1,667                     | 2,000 |
| m                                                   | 8     | 12                          | 16    | 12    | 8                         | 4     |

\* P=percentuale di veicoli che arrivano durante il verde (P=R<sub>p</sub> g/C). Non può eccedere 1.  
f<sub>p</sub> = ulteriore fattore correttivo

Calcolato il ritardo “d” per ogni gruppo di corsie si ottiene il livello di servizio di ciascun gruppo (vedi tabella A.1).

Si può poi calcolare il ritardo medio dell’accesso (media pesata dei ritardi dei gruppi di corsie che lo costituiscono) e dell’intera intersezione (media pesata dei ritardi degli accessi), come segue:

$$d_A = \frac{\sum d_i \cdot v_i}{\sum v_i} \quad d_I = \frac{\sum d_A \cdot v_A}{\sum v_A}$$

dove:

d<sub>i</sub>= ritardo per il gruppo di corsie “i”.

d<sub>A</sub>= ritardo per l’accesso “A”.

d<sub>I</sub>= ritardo per l’intersezione.

v<sub>i</sub>= flusso corretto per il gruppo di corsie “i”.

v<sub>A</sub>= flusso corretto per l’accesso “A”.

La scheda utilizzata per tali calcoli è riportata in figura A.12.

**FIG. A.12**

[A.2]

### 3) Esempio di calcolo degli ipercammini di costo minimo.

Si riporta di seguito un esempio di calcolo dell'iperalbero di minimo costo utilizzando l'algoritmo di Dijkstra generalizzato.

Si consideri la semplice rete di trasporto pubblico in fig. A.13:

Il nodo 1 è il nodo origine; il nodo 13 è il nodo destinazione; i nodi 2, 6 e 12 sono nodi fermata (di essi sono però nodi di salita solo i nodi 2 e 6, da cui si dipartono archi di salita); gli archi (2,3), (2,4) e (6,8) sono archi di salita; gli archi (5,6), (7,6), (9,12), (10,12), (11,12) sono di discesa; (1,2) e (12,13) sono archi pedonali; gli altri archi sono di linea. Il costo in minuti degli archi, tranne quelli di salita, sono indicati tra parentesi tonda (per gli archi di discesa tale tempo è stato preso pari ad un minuto); in parentesi quadra su ciascun arco di salita è indicata la frequenza in bus/h.

Il problema è calcolare l'ipercammino di costo minimo tra l'origine 1 e la destinazione 13; calcoliamo quindi l'iperalbero di costo minimo di radice 13,  $\bar{H}_{13}$ .

**FIG. A.13**

*passo 1)* (inizializzazione):

Si parte con un iperalbero iniziale ottenuto collegando il nodo destinazione 13 con tutti gli altri nodi del grafo mediante archi diretti fittizi dal costo molto elevato (il nodo 13 è inizialmente posto nel serbatoio, essendo il primo nodo da esaminare). La matrice iniziale della procedura si presenta così:

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1000  | 0      | 13        | 13        |
| 2    | "     | "      | 888       |           |
| 3    | "     | "      | 13        |           |
| 4    | "     | "      | "         |           |
| 5    | "     | "      | "         |           |
| 6    | "     | "      | 888       |           |
| 7    | "     | "      | 13        |           |
| 8    | "     | "      | "         |           |
| 9    | "     | "      | "         |           |
| 10   | "     | "      | "         |           |
| 11   | "     | "      | "         |           |
| 12   | "     | "      | "         |           |
| 13   | 0     | 2      | "         |           |

Si osservi che nella terza colonna (nodi che seguono nell'ipercammino verso il nodo di destinazione 13) il numero 888 è utilizzato come indicatore di un nodo di salita, che rimanda ai due vettori IP e IV per la lettura dei nodi che seguono nell'ipercammino. I vettori IP e IV in questo passo iniziale sono, ovviamente, vuoti.

*passo 2):*

Si considera il nodo destinazione 13 e si esaminano quindi i nodi estremi della stella di archi convergente nel nodo, cioè il nodo 12, per il quale  $C_{12}=1000$ ; il nodo 12 non è di salita e si ha che non è verificata la condizione del Teorema di Bellman  $C_{12} \leq C_{13}+C_{12,13}$  ( $1000 \leq 0+5$ ); si pone allora  $C_{12}=5$  ed il nodo 12 entra nel serbatoio; 12 è il solo nodo presente nel serbatoio, che altrimenti dovrebbe essere ordinato in ordine crescente di costo prima di passare al passo successivo. In questo stesso passo l'indice del nodo 13 diventa 1 (nodo già esaminato) e quello del nodo 12 diventa 2 (nodo nel serbatoio). La nuova matrice è allora data da:

Appendice

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1000  | 0      | 13        | 12        |
| 2    | "     | "      | 888       |           |
| 3    | "     | "      | 13        |           |
| 4    | "     | "      | "         |           |
| 5    | "     | "      | "         |           |
| 6    | "     | "      | 888       |           |
| 7    | "     | "      | 13        |           |
| 8    | "     | "      | "         |           |
| 9    | "     | "      | "         |           |
| 10   | "     | "      | "         |           |
| 11   | "     | "      | "         |           |
| 12   | 5     | 2      | "         |           |
| 13   | 0     | 1      | "         |           |

*passo 3):*

Si estrae il nodo 12 dal serbatoio: i nodi di estremità della stella di archi convergenti nel nodo 12,  $N_{12}^-$ , sono i nodi 9, 10 e 11 e nessuno è nodo di salita; si ha:  $C_9=1000$  che non verifica  $C_9 \leq C_{12}+C_{9,12} = 5+1=6$ .

Perciò si pone  $C_9=6$  ed il nodo 9 entra nel serbatoio (l'indice viene posto pari a 2); la stessa cosa si ha per i nodi 10 e 11; avendo tutti i nodi lo stesso costo essi sono ordinati nel serbatoio in semplice ordine numerico; il nodo seguente per questi nodi è il 12 (terza colonna della matrice); l'indice del nodo 12 diventa 1 (nodo già esaminato); la nuova matrice è la seguente:

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1000  | 0      | 13        | 9         |
| 2    | "     | "      | 888       | 10        |
| 3    | "     | "      | 13        | 11        |
| 4    | "     | "      | "         |           |
| 5    | "     | "      | "         |           |
| 6    | "     | "      | 888       |           |
| 7    | "     | "      | 13        |           |
| 8    | "     | "      | "         |           |
| 9    | 6     | 2      | 12        |           |
| 10   | 6     | 2      | 12        |           |
| 11   | 6     | 2      | 12        |           |
| 12   | 5     | 1      | 13        |           |
| 13   | 0     | 1      | "         |           |

*passo 4):*

Si estrae il nodo 9:  $N_9^- = \{5\}$ .

Il nodo 5 non è di salita:  $C_5=1000$  non verifica  $C_5 \leq C_9 + C_{5,9} = 6+10=16$ . Si pone perciò  $C_5=16$  ed il nodo 5 entra nel serbatoio (indice=2), mentre da esso esce il nodo 9 (indice=1); i nodi sono ordinati per costo crescente:

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1000  | 0      | 13        | 10        |
| 2    | "     | "      | 888       | 11        |
| 3    | "     | "      | 13        | 5         |
| 4    | "     | "      | "         |           |
| 5    | 16    | 2      | 9         |           |
| 6    | 1000  | 0      | 888       |           |
| 7    | "     | "      | 13        |           |
| 8    | "     | "      | "         |           |
| 9    | 6     | 1      | 12        |           |
| 10   | 6     | 2      | 12        |           |
| 11   | 6     | 2      | 12        |           |
| 12   | 5     | 1      | 13        |           |
| 13   | 0     | 1      | "         |           |

*passo 5):*

Si estrae il nodo 10:  $N_{10}^- = \{8\}$ .

Il nodo 8 non è di salita:  $C_8=1000$  non verifica  $C_8 \leq C_{10} + C_{8,10} = 6+8=14$ , perciò si pone  $C_8=14$  ed il nodo 8 entra nel serbatoio, mentre vi esce il nodo 10:

Appendice

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1000  | 0      | 13        | 11        |
| 2    | "     | "      | 888       | 8         |
| 3    | "     | "      | 13        | 5         |
| 4    | "     | "      | "         |           |
| 5    | 16    | 2      | 9         |           |
| 6    | 1000  | 0      | 888       |           |
| 7    | "     | "      | 13        |           |
| 8    | 14    | 2      | 10        |           |
| 9    | 6     | 1      | 12        |           |
| 10   | 6     | 1      | 12        |           |
| 11   | 6     | 2      | 12        |           |
| 12   | 5     | 1      | 13        |           |
| 13   | 0     | 1      | "         |           |

*passo 6):*

Si estrae il nodo 11:  $N_{11}^- = \{7\}$ .

Il nodo 7 non è di salita:  $C7=1000$  non verifica la relazione  $C7 \leq C11 + C7,11 = 6 + 15 = 21$ ; si pone perciò  $C7=21$  ed il nodo 7 entra nel serbatoio, mentre il nodo 11 esce da esso:

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1000  | 0      | 13        | 8         |
| 2    | "     | "      | 888       | 5         |
| 3    | "     | "      | 13        | 7         |
| 4    | "     | "      | "         |           |
| 5    | 16    | 2      | 9         |           |
| 6    | 1000  | 0      | 888       |           |
| 7    | 21    | 2      | 11        |           |
| 8    | 14    | 2      | 10        |           |
| 9    | 6     | 1      | 12        |           |
| 10   | 6     | 1      | 12        |           |
| 11   | 6     | 1      | 12        |           |
| 12   | 5     | 1      | 13        |           |
| 13   | 0     | 1      | "         |           |

*passo 7):*

Si estrae il nodo 8:  $N_8^- = \{6\}$ .

Il nodo 6 è di salita ( $\phi_{6,8}=6$  bus/h= 1/10'): l'insieme dei nodi che seguono il nodo 6 nell'ipercammino ( $F(6)$ ) è vuoto, per cui il nodo 8 vi entra a far parte senz'altro, infatti  $C_6=1000$  non soddisfa Bellman e pertanto si ha:

$$C_6 = C_8 + \frac{1}{\phi_{6,8}} = 14 + 10 = 24$$

$F(6)=\{8\}$  ed il nodo 6 entra nel serbatoio; la nuova matrice è data da:

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1000  | 0      | 13        | 5         |
| 2    | "     | "      | 888       | 7         |
| 3    | "     | "      | 13        | 6         |
| 4    | "     | "      | "         |           |
| 5    | 16    | 2      | 9         |           |
| 6    | 24    | 2      | 888       |           |
| 7    | 21    | 2      | 11        |           |
| 8    | 14    | 1      | 10        |           |
| 9    | 6     | 1      | 12        |           |
| 10   | 6     | 1      | 12        |           |
| 11   | 6     | 1      | 12        |           |
| 12   | 5     | 1      | 13        |           |
| 13   | 0     | 1      | "         |           |

I nuovi vettori IP ed IV, che fino al passo precedente erano vuoti, diventano:

IP IV

$$\begin{matrix} 2 \\ 6 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 8 \\ \end{bmatrix}$$

*passo 8):*

Si estrae il nodo 5:  $N_5^- = \{3\}$ .

Il nodo 3 non è di salita:  $C_3=1000$  non verifica la relazione  $C_3 \leq C_5 + C_{3,5} = 16 + 20 = 36$ ; si pone perciò  $C_3=36$  ed il nodo 3 entra nel serbatoio, mentre vi esce il nodo 5; i vettori IP e IV sono immutati e la nuova matrice è:

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1000  | 0      | 13        | 7         |
| 2    | 1000  | 0      | 888       | 6         |
| 3    | 36    | 2      | 5         | 3         |
| 4    | 1000  | 0      | 13        |           |
| 5    | 16    | 1      | 9         |           |
| 6    | 24    | 2      | 888       |           |
| 7    | 21    | 2      | 11        |           |
| 8    | 14    | 1      | 10        |           |
| 9    | 6     | 1      | 12        |           |
| 10   | 6     | 1      | 12        |           |
| 11   | 6     | 1      | 12        |           |
| 12   | 5     | 1      | 13        |           |
| 13   | 0     | 1      | 13        |           |

*passo 9):*

Si estrae il nodo 7:  $N_7^- = \{4\}$ .

Il nodo 4 non è di salita:  $C_4=1000$  non verifica la relazione  $C_4 \leq C_7 + C_{4,7} = 21 + 10 = 31$ , per cui si pone  $C_4=31$  ed il nodo 4 entra nel serbatoio, mentre il nodo 7 ne esce:

Appendice

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1000  | 0      | 13        | 6         |
| 2    | 1000  | 0      | 888       | 4         |
| 3    | 36    | 2      | 5         | 3         |
| 4    | 31    | 2      | 7         |           |
| 5    | 16    | 1      | 9         |           |
| 6    | 24    | 2      | 888       |           |
| 7    | 21    | 1      | 11        |           |
| 8    | 14    | 1      | 10        |           |
| 9    | 6     | 1      | 12        |           |
| 10   | 6     | 1      | 12        |           |
| 11   | 6     | 1      | 12        |           |
| 12   | 5     | 1      | 13        |           |
| 13   | 0     | 1      | 13        |           |

*passo 10):*

Si estrae il nodo 6:  $N_6^- = \{5, 7\}$ .

Essendo i nodi 5 e 7 già stati esaminati (indice 1) il nodo 6 esce dal serbatoio, senza apportare ulteriori modifiche alla matrice, che quindi diventa:

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1000  | 0      | 13        | 4         |
| 2    | 1000  | 0      | 888       | 3         |
| 3    | 36    | 2      | 5         |           |
| 4    | 31    | 2      | 7         |           |
| 5    | 16    | 1      | 9         |           |
| 6    | 24    | 1      | 888       |           |
| 7    | 21    | 1      | 11        |           |
| 8    | 14    | 1      | 10        |           |
| 9    | 6     | 1      | 12        |           |
| 10   | 6     | 1      | 12        |           |
| 11   | 6     | 1      | 12        |           |
| 12   | 5     | 1      | 13        |           |
| 13   | 0     | 1      | 13        |           |

# Appendice

*passo 11):*

Si estrae il nodo 4:  $N_4^- = \{2\}$ .

il nodo 2 è di salita e  $\phi_{2,4} = 5 \text{ bus/h} = 1/12$ ; siccome  $F(2)$  è vuoto il nodo 4 vi entra a far parte senz'altro, infatti  $C_2 = 1000$  non soddisfa Bellman e quindi si ha:

$$C_2 = C_4 + \frac{1}{\phi_{2,4}} = 31 + 12 = 43$$

$F(2) = \{4\}$  ed il nodo 2 entra nel serbatoio; la matrice e i vettori IP ed IV diventano:

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1000  | 0      | 13        | 3         |
| 2    | 43    | 2      | 888       | 2         |
| 3    | 36    | 2      | 5         |           |
| 4    | 31    | 1      | 7         |           |
| 5    | 16    | 1      | 9         |           |
| 6    | 24    | 1      | 888       |           |
| 7    | 21    | 1      | 11        |           |
| 8    | 14    | 1      | 10        |           |
| 9    | 6     | 1      | 12        |           |
| 10   | 6     | 1      | 12        |           |
| 11   | 6     | 1      | 12        |           |
| 12   | 5     | 1      | 13        |           |
| 13   | 0     | 1      | 13        |           |

IP IV

$$\begin{matrix} 2 \\ 6 \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \\ 8 \end{bmatrix}$$

*passo 12):*

Si estrae il nodo 3:  $N_3^- = \{2\}$ .

Il nodo 2 è nodo di salita,  $\varphi_{2,3}=10$  bus/h=  $1/6$ '; il nodo 2 è nel serbatoio; si deve perciò vedere se il nodo 3 può essere aggiunto all'insieme  $F(2)$  sinora determinato ( $F(2)=\{4\}$ ):

$$\left( C_4 + \frac{1}{\varphi_{2,3} + \varphi_{2,4}} \right) \frac{\varphi_{2,4}}{\varphi_{2,3} + \varphi_{2,4}} + \left( C_3 + \frac{1}{\varphi_{2,3} + \varphi_{2,4}} \right) \frac{\varphi_{2,3}}{\varphi_{2,3} + \varphi_{2,4}} = 38,3$$

e dunque  $C(F(2)+3) \leq C(F(2))$  per cui il costo del nodo 2 è corretto e posto pari a  $C_2=38,3$  ed il nodo 3 entra a far parte di  $F(2)$ :  $F(2)=\{3,4\}$ . In questa relazione si è tenuto conto del fatto che l'aggiungere l'arco (2,3) all'ipercammino va a diminuire il tempo di attesa medio degli utenti alla fermata, nell'ipotesi di comportamento adattivo indifferente, qualunque sia la linea che essi prenderanno; il nuovo tempo di attesa medio sarà pari a 4 minuti per entrambe le linee. La nuova matrice ed i nuovi vettori diventano:

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 1000  | 0      | 13        | 2         |
| 2    | 38,3  | 2      | 888       |           |
| 3    | 36    | 1      | 5         |           |
| 4    | 31    | 1      | 7         |           |
| 5    | 16    | 1      | 9         |           |
| 6    | 24    | 1      | 888       |           |
| 7    | 21    | 1      | 11        |           |
| 8    | 14    | 1      | 10        |           |
| 9    | 6     | 1      | 12        |           |
| 10   | 6     | 1      | 12        |           |
| 11   | 6     | 1      | 12        |           |
| 12   | 5     | 1      | 13        |           |
| 13   | 0     | 1      | 13        |           |

IP IV

$$\begin{matrix} 2 & \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 3 \\ 4 \\ 8 \end{bmatrix} \\ 6 & & \end{matrix}$$

*passo 13) (ultimo passo):*

Si estrae il nodo 2:  $N_2^- = \{1\}$ .

Il nodo 1 non è di salita ed è nodo origine:  $C1=1000$  non verifica la relazione  $C1 \leq C2 + C1,2 = 38,3 + 8 = 46,3$ ; perciò si pone  $C1 = 46,3$  e si estrae il nodo 2 dal serbatoio; l'algoritmo termina, dato che il serbatoio è vuoto e sono stati fatti tanti passi quanti sono i nodi della rete; il risultato finale è:

| NODO | COSTO | INDICE | NODO SEG. | SERBATOIO |
|------|-------|--------|-----------|-----------|
| 1    | 46,3  | 1      | 2         | -         |
| 2    | 38,3  | 1      | 888       |           |
| 3    | 36    | 1      | 5         |           |
| 4    | 31    | 1      | 7         |           |
| 5    | 16    | 1      | 9         |           |
| 6    | 24    | 1      | 888       |           |
| 7    | 21    | 1      | 11        |           |
| 8    | 14    | 1      | 10        |           |
| 9    | 6     | 1      | 12        |           |
| 10   | 6     | 1      | 12        |           |
| 11   | 6     | 1      | 12        |           |
| 12   | 5     | 1      | 13        |           |
| 13   | 0     | 1      | 13        |           |

## Appendice

IP IV

$$\begin{array}{c} 2 \\ 6 \end{array} \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 \\ 4 \\ 8 \end{bmatrix}$$

L'iperalbero di costo minimo è il seguente:

L'ipercammino di costo minimo dal nodo 1 al nodo 13 si ottiene considerando solo i percorsi dell'iperalbero che congiungono i due nodi; l'ipercammino di costo minimo è quindi il seguente:

Per come è stata condotta la procedura, si è considerato che l'utente effettui una scelta consuntiva di tipo compensatorio, e che l'errore di percezione è nullo (utilità deterministica).

Calcoliamo adesso i flussi di arco sull'ipercammino dovuti ad una domanda di trasporto  $D_{1,13}=620$  pass./h.

Ordiniamo i nodi dell'ipercammino in ordine decrescente di costo rispetto al nodo destinazione 13:

$[1,2,3,4,7,5,9,11,12,13]^1$

Secondo quest'ordine si procede nelle estrazioni successive.

- Si estrae il nodo 1: 1 non è di salita ( $1 \notin NB$ );  $N1^- = \{\emptyset\}$ ;  $N1^+ = \{2\}$ ; tutta la domanda  $D_{1,13} = 620$  pass./h viene assegnata all'arco che esce da 1: in questo caso è l'arco (1,2), che è anche l'unico arco uscente dal nodo 1:  $X_{1,2}=620$  pass./h.

---

<sup>1</sup>I nodi 6,8 e 10 non vengono considerati perché non fanno parte dell'ipercammino, pur facendo parte dell'iperalbero; essi saranno considerati nel caso in cui si ha a che fare con più origini e destinazioni, come sarà detto alla fine del paragrafo.

- Si estrae il nodo 2: 2 è di salita ( $2 \in NB$ ); il flusso che attraversa il nodo 2 è:  $f_2 = \sum_i X_{i,2} = X_{1,2} = 620$  pass./h; dato che 2 è di salita si vanno a vedere i vettori IP e IV, si ha che:  $F_2^* = \{3,4\}$ ; si deve distribuire  $f_2$  tra gli archi (2,3) e (2,4):

$$X_{2,3} = f_2 \cdot \frac{\varphi_{2,3}}{\Phi[F(2)]} = 620 \cdot \frac{1/6}{1/6 + 1/12} = 413 \text{ pass/h}$$

$$X_{2,4} = f_2 \cdot \frac{\varphi_{2,4}}{\Phi[F(2)]} = 620 \cdot \frac{1/12}{1/6 + 1/12} = 207 \text{ pass/h}$$

(si utilizza un modello di scelta adattivo di tipo indifferente).

- Si estrae il nodo 3:  $3 \notin NB$ ;  $N_3^- = \{2\}$ ;  $N_3^+ = \{5\}$ ;  $f_3 = X_{2,3} = 413$  pass./h;  $X_{3,5} = f_3 = 413$  pass./h.
- Si estrae il nodo 4:  $4 \notin NB$ ;  $N_4^- = \{2\}$ ;  $N_4^+ = \{7\}$ ;  $f_4 = X_{2,4} = 207$  pass./h;  $X_{4,7} = f_4 = 207$  pass./h.
- Si estrae il nodo 7:  $7 \notin NB$ ;  $N_7^- = \{4\}$ ;  $N_7^+ = \{11\}$ ;  $f_7 = X_{4,7} = 207$  pass./h;  $X_{7,11} = f_7 = 207$  pass./h.
- Si estrae il nodo 5:  $5 \notin NB$ ;  $N_5^- = \{3\}$ ;  $N_5^+ = \{9\}$ ;  $f_5 = X_{3,5} = 413$  pass./h;  $X_{5,9} = f_5 = 413$  pass./h.
- Si estrae il nodo 9:  $9 \notin NB$ ;  $N_9^- = \{5\}$ ;  $N_9^+ = \{12\}$ ;  $f_9 = X_{5,9} = 413$  pass./h;  $X_{9,12} = f_9 = 413$  pass./h.
- Si estrae il nodo 11:  $11 \notin NB$ ;  $N_{11}^- = \{7\}$ ;  $N_{11}^+ = \{12\}$ ;  $f_{11} = X_{7,11} = 207$  pass./h;  $X_{11,12} = f_{11} = 207$  pass./h.
- Si estrae il nodo 12:  $12 \notin NB$ ;  $N_{12}^- = \{9,11\}$ ;  $N_{12}^+ = \{13\}$ ;  $f_{12} = X_{9,12} + X_{11,12} = 413 + 207 = 620$  pass./h;  $X_{12,13} = f_{12} = 620$  pass./h.

Poiché il nodo 13 è il nodo destinazione termina la procedura di assegnazione. Il risultato ottenuto è il seguente:

| ARCO   | 1-2 | 2-3 | 2-4 | 3-5 | 4-7 | 5-9 | 7-11 | 9-12 | 11-12 | 12-13 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-------|-------|
| FLUSSO | 620 | 413 | 207 | 413 | 207 | 413 | 207  | 413  | 207   | 620   |

Nel nostro caso si sono considerate una sola origine ed una sola destinazione, per cui l'assegnazione è stata effettuata utilizzando l'ipercammino trovato; nel caso più generale in cui si hanno più origini e più destinazioni, si fa uso degli iperalberi: si prende in esame un iperalbero per volta, ripartendovi tutta la domanda destinata in "s", e ciò si fa per tutte le destinazioni. Il flusso totale su ogni arco è dato dalla somma dei relativi flussi trovati nell'esame di ciascun nodo destinazione della rete. Nel caso generale si preferisce operare con tutti gli archi della rete, anche quelli che non fanno parte dell'iperalbero, in quanto a questi ultimi la procedura stessa assegnerà flusso nullo: quando un arco non fa parte dell'iperalbero, si ha che, estratto il nodo "j" del suddetto arco  $(i,j)$ , il nodo precedente "i" non è stato ancora estratto, per cui l'arco  $(i,j)$  non fa parte dell'insieme di ottimo e il flusso ad esso assegnato è nullo.

#### **4) Schede di intervista.**

In questo paragrafo sono riportati degli esempi di schede utilizzate per indagini sulla mobilità (I.TER. - Indagini territoriali - Napoli):

- *scheda per indagine a domicilio* (fig. A.14 a-h);
- *schede intervista su strada* (figg. A.15 e A.16);
- *schede intervista trasporto collettivo* (fig. A.17 -a bordo- e A.18 -a terra-).

**FIG. A.14 (a)**

**FIG. A.14 (b)**

**FIG. A.14 (c)**

**FIG. A.14 (d)**

**FIG. A.14 (e)**

**FIG. A.14 (f)**

**FIG. A.14 (g)**

**FIG. A.14 (h)**

**FIG. A.15**

**FIG. A.16**

**FIG. A.17**

**FIG. A.18 (a)**

**FIG. A.18 (b)**

## BIBLIOGRAFIA

### **BIBLIOGRAFIA**

#### **CAPITOLO 1: L'offerta di trasporto.**

- [1.1] *Norme sulle caratteristiche geometriche delle strade urbane*; Bollettino Ufficiale del CNR, A. XII, n. 60, 1978.
- [1.2] *Highway Capacity Manual*; Transportation Research Board, Washington 1994.
- [1.3] R. McShane, R. P. Roess; *Traffic Engineering*; Prentice Hall 1990.
- [1.4] F. V. Webster; *Traffic Signal Settings*; Road Research Technical Paper 39, Road Research Laboratory, Her Majesty's Stationery Office 1958.
- [1.5] *Proposed Recommended Practice: Determining Vehicle Change Intervals*; ITE Journal, Maggio 1985.
- [1.6] *Manual of Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways*; U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration 1986.
- [1.7] U. S. Department of Transportation; *Traffic Control Devices Handbook*; FHWA 1983.
- [1.8] *Norme sull'arredo funzionale delle strade urbane*; Bollettino Ufficiale del CNR, A. XXVI, n. 150 1992.
- [1.9] *Direttive per la redazione, adozione, ed attuazione dei Piani urbani del traffico*; Suppl. ord. n. 77 alla G.U. n. 146 del 24 giugno 1995.
- [1.10] E. Cascetta; *Metodi quantitativi per la pianificazione dei sistemi di trasporto*; Cedam 1990.
- [1.11] A. Pratelli; *Esercizi di pianificazione dei trasporti*; SEU (Servizio Editoriale Universitario di Pisa) 1993.
- [1.12] A. Nuzzolo, M. Di Gangi, U. Crisalli; *Guida alle esercitazioni del corso di Pianificazione dei trasporti, A.A. 1993-94*; Appunti dalle lezioni.
- [1.13] P. Ferrari, F. Giannini; *Geometria e progetto di strade*; ISEDI 1991.
- [1.14] Vukan R. Vuchic; *Urban public transportation*; Prentice Hall 1981.
- [1.15] CNR-Progetto Finalizzato Trasporti; *Sottoprogetto 3 - Trasporto locale. Tema 2 - Problemi di integrazione modale. Manuale parte seconda*; contratto CNR/MN N. 86/02662.93, TRANSYSTEM S.p.A.-Milano 1993-94.
- [1.16] B. Montella; *Esercizio dei sistemi di trasporto*; Appunti dalle lezioni 1982.
- [1.17] M. Matassa; *Il progetto delle autostazioni*; Petron editore 1984.
- [1.18] *Codice della strada e regolamento di attuazione*; Pirola editore 1993.
- [1.19] M. de Luca; *Tecnica ed Economia dei Trasporti*; CUEN 1989.

## BIBLIOGRAFIA

- [1.20] G. Rossetti, A. Colangelo, G. Castro; *Tappeti mobili e traslatori a navetta*; C.E.R.T.U.M 1974.
- [1.21] M. Cesa; *Quale è il veicolo più frequente e numeroso? Il pedone*; Onda verde n. 32 Novembre/Dicembre 1994.
- [1.22] Camera di commercio industria artigianato e agricoltura della provincia di Napoli; *Studio per un Piano dei parcheggi nella città di Napoli*; 1984.
- [1.23] G. Cassisa; *Caratteristiche tecniche e problemi economici dei parcheggi*; C.E.R.E.S.T 1983.
- [1.24] M. Olivari; *Elementi di teoria e tecnica della circolazione stradale*; Franco Angeli Editore 1994.
- [1.25] V. F. Hurdle; *Signalized Intersection Delay Model: A Primer for Uninizedated*; Transportation Research Board Report 971, 1984.
- [1.26] G. E. Gray, L. A. Hoel editors; *Public Transportation*; Prentice Hall 1992.
- [2.1] J. L. Horowitz; *Air quality analysis for urban Transportation planning*; MIT Press. Cambridge Mass 1982.
- [1.1] A. Crotti; *Caratteristiche e prestazioni dei sistemi di trasporto*; Trasporti e Trazione, Febbraio 1994.
- [1.2] D. Klose; *Parcheggi e garages*; Edizioni di comunità, Milano 1965.

## **CAPITOLO 2: La domanda di trasporto.**

- [2.1] *Highway Capacity Manual*; Transportation Research Board, Washington 1994.
- [2.2] *Traffic and Transportation Engineering Handbook*; ITE 1982.
- [2.3] Matson, Smith and Hurd; *Traffic Engineering*; McGraw-Hill 1955.
- [2.4] R. McShane, R. P. Roess; *Traffic Engineering*; Prentice Hall 1990.
- [2.5] E. Cascetta; *Metodi quantitativi per la pianificazione dei sistemi di trasporto*; Cedam 1990.
- [2.6] *Parking Generation: An Interim Report*; ITE 1985.
- [2.7] M. de Luca; *Tecnica ed Economia dei Trasporti*; CUEN 1989.
- [2.8] *San Diego Area Transportation Study*; San Diego, CA 1958.
- [2.9] P. J. Box, J. C. Oppenlander; *Manual of Traffic Engineering Studies*; ITE 1975.
- [2.10] *Transportation and Traffic Engineering Handbook*; ITE 1976.
- [2.11] E. Cascetta, A. Nuzzolo, F. Russo, A. Vitetta; *A modified Logit route choice model overcoming paths overlapping problems. Specification and some calibration results for interurban networks*; Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (edited by J.B. Lesort), Pergamon.

## BIBLIOGRAFIA

- [2.12] Ben Akiva M., Lerman S.R.; *Discrete choice analysis*; MIT Press, Cambridge Mass 1987.
- [2.13] Bifulco C.; *Modellizzazione esplicita della sosta*; presentato al seminario "L'assegnazione alle reti di trasporto" tenutosi presso l'Università di Roma "Tor Vergata", 18-19 Dicembre 1995.
- [2.14] Bifulco C.; *A Stochastic User Equilibrium Assignment Model for the Evaluation of Parking Policies*; EJOR, 71, 1993.
- [2.15] B. Montella; *Esercizio dei sistemi di trasporto*; Appunti dalle lezioni 1982.
- [2.16] A. Pratelli; *Esercizi di pianificazione dei trasporti*; SEU (Servizio Editoriale Universitario di Pisa) 1993.
- [2.17] Camera di commercio industria artigianato e agricoltura della provincia di Napoli; *Studio per un Piano dei parcheggi nella città di Napoli*; 1984.
- [2.18] D. Luck, H. Wales, D. Taylor; *Manuale delle ricerche di Marketing*; Etas Kompass 1965.
- [2.19] W. Smith and Associates; *Traffic, Parking, and Transit-Colonial Williamsburg*; Columbia, SC 1963.
- [2.20] *Quick-Response Urban Travel Estimation Techniques and Transferable Parameters*; NCHRP Report 187, Transportation Research Board 1978.
- [2.21] P. A. Abib; *Curbside Pickup and Delivery Operation and Arterial Traffic impacts*; Final report, Polytechnic University, Brooklyn N.Y. 1981.
- [2.22] G. Gallo, S. Pallottino; *Introduction and recent advances in shortest path methods*; ICTS-CNR 1982.
- [2.23] A. G. Wilson; *Urban and regional models in geography and planning*; J. Wiley, New York 1974.
- [1.1] G. Hutchinson; *Principles of urban transportation system planning*; McGraw-Hill 1974.
- [2.1] M. D. Meyer, E. J. Miller; *Urban transportation planning*; McGraw-Hill 1984.
- [2.2] S. Nguyen, S. Pallottino; *Assegnamento dei passeggeri ad un sistema di linee urbane: determinazione degli ipercammini minimi*; Ricerca Operativa n. 38, 1986.
- [2.3] E. Cascetta, A. Nuzzolo; *Uno schema comportamentale per la modellizzazione delle scelte di percorso nelle reti di trasporto pubblico urbano*; Rapporto interno Dipartimento Ingegneria dei Trasporti, Napoli 1986.
- [2.4] A. M. Moed, A. F. Graybill, C. D. Boes; *Introduzione alla statistica*; McGraw-Hill 1991.

## BIBLIOGRAFIA

### CAPITOLO 3: *La progettazione dell'esercizio.*

- [3.1] M. Di Gangi, B. Montella; *Progetto di una rete di trasporto collettivo mediante indicatori di prestazioni*; SIDT 1991.
- [3.2] CNR-Progetto Finalizzato Trasporti 2; *1.1.A - Manuale per la pianificazione regionale dei trasporti (2° anno di attività)*; Contratto n. 93.02017.74, CLES s.r.l. 1994.
- [3.3] *Norme sull'arredo funzionale delle strade urbane*; Bollettino Ufficiale del CNR, A. XXVI, n. 150 1992.
- [3.4] B. Montella, M. Gallo; *DSS per la generazione di schemi di circolazione e sosta da valutare nei Piani Urbani di Traffico*; Atti del V Convegno nazionale SIDT, 6-7 Giugno 1996.
- [3.5] *Direttive per la redazione, adozione, ed attuazione dei Piani urbani del traffico*; Suppl. ord. n. 77 alla G.U. n. 146 del 24 giugno 1995.
- [3.6] *Codice della strada e regolamento di attuazione*; Pirola editore 1993.
- [3.7] E. Cascetta; *Metodi quantitativi per la pianificazione dei sistemi di trasporto*; Cedam 1990.
- [3.8] B. Montella; *Esercizio dei sistemi di trasporto*; Appunti dalle lezioni 1982.
- [3.9] M. de Luca; *Tecnica ed Economia dei Trasporti*; CUEN 1989.
- [3.10] Camera di commercio industria artigianato e agricoltura della provincia di Napoli; *Studio per un Piano dei parcheggi nella città di Napoli*; 1984.
- [3.11] P. Ferrari, F. Giannini; *Geometria e progetto di strade*; ISEDI 1991.
- [3.12] *Norme sulle caratteristiche geometriche delle strade urbane*; Bollettino Ufficiale del CNR, A. XII, n. 60, 1978.
- [3.13] L. J. LeBlanc; *Transit System Network Design*; Transportation Research B Vol. 22B, N. 5, pp. 383-390, 1988.
- [3.14] T. L. Magnanti, R. T. Wong; *Network Design and Transportation Planning: Models and Algorithms*; Transportation Science, Vol.18 N.1 Febbraio 1984.
- [3.15] A. Sforza; *Problemi di flusso su rete*; Università degli Studi di Napoli "Federico II", A.A. 1992/93.
- [3.16] G. E. Cantarella, G. Improta, A. Sforza; *Elementi di programmazione discreta*; Università degli Studi di Napoli "Federico II", A.A. 1992/93.
- [3.17] J. Billheimer, P. Gray; *Network design with fixed and variable cost elements*; Transportation Science, n. 7 pp. 49-74, 1973.
- [3.18] G. E. Gray, L. A. Hoel editors; *Public Transportation*; Prentice Hall 1992.
- [3.19] Vukan R. Vuchic; *Urban public transportation*; Prentice Hall 1981.
- [3.20] S. Nguyen, S. Pallottino; *Assegnamento dei passeggeri ad un sistema di linee urbane: determinazione degli ipercammini minimi*; Ricerca Operativa n. 38, 1986.

## BIBLIOGRAFIA

### **CAPITOLO 4: Il controllo della gestione e dell'esercizio.**

- [4.1] B. Montella; *Esercizio dei sistemi di trasporto*; Appunti dalle lezioni 1982.
- [4.2] Vukan R. Vuchic; *Urban public transportation*; Prentice Hall 1981.
- [4.3] *Direttive per la Redazione, Adozione, ed Attuazione dei Piani urbani del traffico*; bozza preliminare in attesa di diffusione su G.U.
- [4.4] E. Cascetta, B. Montella; *Analisi delle applicazioni delle TLC e della telematica associate ai sistemi di trasporto collettivo in ambito urbano e metropolitano nel medio periodo. RAPPORTO FINALE*. Convenzione tra Centro San Salvador di Venezia della TELECOM e Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti dell'Università di Napoli "FEDERICO II", 1995.
- [4.5] G. E. Gray, L. A. Hoel editors; *Public Transportation*; Prentice Hall 1992.
- [4.6] *Computer Controlled Urban Transportation - A Survey of Concepts, Methods, and International Experiences*; Edited by H. Strobel, International Institute for Applied System Analysis, John Wiley & sons 1982.
- [4.7] R. McShane, R. P. Roess; *Traffic Engineering*; Prentice Hall 1990.
- [4.8] J. Halroyd, J. A. Hillier; *Area Traffic Control in Glasgow*; Traffic Engineering and Control, Settembre 1969.
- [4.9] W. Ullmann; *A contribution to the control-theoretic analysis of dynamic processes in vehicle strings*; Dissertation, Hochschule für Verkehrswesen, Friedrich List, Dresda 1978.

### **APPENDICE.**

- [A.1] E. Cascetta; *Metodi quantitativi per la pianificazione dei sistemi di trasporto*; Cedam 1990.
- [A.2] *Highway Capacity Manual*; Transportation Research Board, Washington 1994.
- [A.3] R. McShane, R. P. Roess; *Traffic Engineering*; Prentice Hall 1990.
- [A.4] A. Pratelli; *Esercizi di pianificazione dei trasporti*; SEU (Servizio Editoriale Universitario di Pisa) 1993.