

Università degli Studi di Trieste  
*Sede amministrativa*

Istituto Universitario di Architettura di Venezia

Politecnico di Milano

Università degli Studi di Padova  
*Sedi consorziate*

Dottorato di Ricerca in  
**Ingegneria dei Trasporti**

*XIV CICLO*

**UN MODELLO PER LA VALUTAZIONE  
DELLE PRESTAZIONI DI INTERSEZIONI  
COMPLESSE SEMAFORIZZATE**

*Coordinatore:*

Prof. Ing. Fabio Santorini

*Tutore:*

Prof. Ing. Roberto Camus *Università di Trieste*

*Dottorando:*

Dott. Ing. Giulio Bernetti

*Trieste, Novembre 2001*

52/64/

P45325

Università degli Studi di Trieste  
*Sede amministrativa*

Istituto Universitario di Architettura di Venezia

Politecnico di Milano

Università degli Studi di Padova  
*Sedi consorziate*

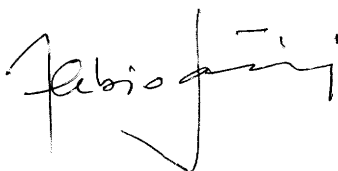
Dottorato di Ricerca in  
**Ingegneria dei Trasporti**

*XIV CICLO*

**UN MODELLO PER LA VALUTAZIONE  
DELLE PRESTAZIONI DI INTERSEZIONI  
COMPLESSE SEMAFORIZZATE**

*Coordinatore:*

Prof. Ing. Fabio Santorini



*Tutore:*

Prof. Ing. Roberto Camus *Università di Trieste*



*Dottorando:*

Dott. Ing. Giulio Bernetti '72

es

*Trieste, Novembre 2001*

*a Francesca*

# SOMMARIO

**INTRODUZIONE**

**VI-VIII**

Capitolo primo

## **IL CONTROLLO SEMAFORICO NELLE AREE URBANE ..... 1**

1.1	PREMESSA.....	1
1.2	LE INTERSEZIONI URBANE .....	2
1.3	DEFINIZIONI.....	6
1.3.1	<i>Definizioni relative alla geometria .....</i>	<i>6</i>
1.3.2	<i>Definizioni relative al movimento degli utenti.....</i>	<i>8</i>
1.3.3	<i>Definizioni relative alla regolazione .....</i>	<i>9</i>
1.3.4	<i>Definizioni relative alle prestazioni.....</i>	<i>11</i>
1.4	ELEMENTI DI BASE NELLA PROGETTAZIONE SEMAFORICA.....	11
1.4.1	<i>Caratteristiche geometriche .....</i>	<i>12</i>
1.4.2	<i>Caratteristiche del traffico.....</i>	<i>12</i>
1.4.3	<i>Caratteristiche della regolazione .....</i>	<i>13</i>
1.4.4	<i>Caratteristiche di prestazione.....</i>	<i>19</i>
1.5	CLASSIFICAZIONE DELLE INTERSEZIONI SEMAFORIZZATE .....	22
1.5.1	<i>Modalità di controllo.....</i>	<i>23</i>
1.5.2	<i>Modalità di gestione dei piani semaforici.....</i>	<i>25</i>

## Capitolo secondo

<b>METODI DI PROGETTAZIONE E VALUTAZIONE DEL CONTROLLO SEMAFORICO A CICLO FISSO .....</b>	<b>27</b>
2.1	PREMESSA..... 27
2.2	INTERSEZIONI SEMPLICI ..... 29
2.2.1	<i>Modello di Webster</i> ..... 30
2.2.2	<i>Modello HCM</i> ..... 32
2.3	RETI SEMAFORIZZATE..... 43
2.3.1	<i>Modelli Maxband e Multiband</i> ..... 44
2.3.2	<i>Modello Transyt</i> ..... 47
2.4	INTERSEZIONI COMPLESSE ..... 52
2.4.1	<i>Modello di ottimizzazione per le intersezioni complesse</i> ..... 54

## Capitolo Terzo

<b>IL MODELLO DI VALUTAZIONE PROPOSTO .....</b>	<b>59</b>
3.1	PREMESSA..... 59
3.2	IL MODELLO..... 60
3.2.1	<i>Ipotesi</i> ..... 61
3.2.2	<i>Dati necessari e notazioni</i> ..... 62
3.2.3	<i>Plotoni</i> ..... 64
3.2.4	<i>Analisi del segnale</i> ..... 65
3.2.5	<i>La struttura del modello</i> ..... 70
3.2.6	<i>La valutazione del livello di servizio</i> ..... 72
3.3	GLI ALGORITMI..... 73
3.3.1	<i>La procedura Aggiungi-Plotone</i> ..... 74
3.3.2	<i>La procedura Analisi-Segnale</i> ..... 75
3.3.3	<i>La procedura Analisi-Plotone</i> ..... 77
3.4	IL SOFTWARE ..... 80
3.4.1	<i>La struttura dei dati di ingresso</i> ..... 80
3.4.2	<i>Utilizzo del programma</i> ..... 82
3.4.3	<i>I risultati</i> ..... 86

Capitolo Quarto

**APPLICAZIONE DEL MODELLO E CONFRONTI ..... 88**

4.1	PREMESSA .....	88
4.2	PIAZZA VERDI (BOLZANO).....	89
4.3	PIAZZALE MAGGI (MILANO).....	94
4.4	PIAZZALE MAGGI A FLUSSI BILANCIATI .....	100
4.5	PORTA SARAGOZZA (BOLOGNA) .....	102

**CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI ..... 106**

*APPENDICE A ..... 111*

*APPENDICE B ..... 115*

*BIBLIOGRAFIA ..... 128*

# INTRODUZIONE

La valutazione delle prestazioni di un'intersezione semaforizzata è un elemento essenziale nell'analisi di un sistema di trasporto stradale, sia questo urbano od extraurbano. Infatti, le intersezioni costituiscono gli elementi più critici nel sistema del traffico: mentre la capacità di un'arteria stradale è correlata principalmente alle sue caratteristiche geometriche ed il livello di servizio dipende dall'entità e dalla composizione dei flussi che interessano l'arteria stessa, nel caso delle intersezioni, la presenza di movimenti in conflitto influenza pesantemente le prestazioni del sistema per effetto della formazione di code e del conseguente tempo di attesa per i veicoli in transito. Emerge quindi la necessità di un'attenta analisi dei parametri che definiscono la semaforizzazione, al fine di ottimizzare lo sfruttamento delle intersezioni e limitare i disagi per gli utenti.

L'analisi e la valutazione delle prestazioni può essere condotta a differenti livelli: da quello relativo ad una singola intersezione al livello più ampio di rete semaforizzata. Le metodologie per la valutazione sia delle reti e che delle singole intersezioni elementari (quei nodi per superare i quali i veicoli incontrano un solo segnale) sono ampiamente trattate in letteratura. Tuttavia, si osserva una certa carenza di interpretazioni modellistiche nell'ambito delle intersezioni di tipo complesso. Tali intersezioni sono costituite da insiemi di nodi elementari collocati in aree di ridotte dimensioni, all'interno delle quali le limitate distanze tra segnali attraversati in

successione da correnti veicolari comportano la presenza di forti interazioni. I percorsi seguiti dalle correnti veicolari in conflitto sono, infatti, più complicati che nel caso delle intersezioni semplici ed inoltre le distanze tra i nodi sono raramente sufficienti a garantire l'accumulo di code senza che queste influenzino gli attestamenti a monte, portando al collasso l'intero sistema. Le intersezioni complesse costituiscono spesso i punti critici dell'intera rete ed un'attenta analisi di queste è una condizione necessaria per ottenere delle prestazioni ottimali da parte dell'intero sistema di controllo.

Le metodologie di analisi sviluppate per le intersezioni semplici non sono sufficienti a rappresentare completamente i fenomeni che hanno luogo nelle intersezioni complesse. L'applicazione di queste metodologie a ciascuno dei nodi elementari costituenti un'intersezione complessa non consente infatti di considerare tutte le interazioni che si sviluppano tra essi. In certi casi possono essere utilizzate le metodologie di valutazione sviluppate per le reti estese; tuttavia, alcune peculiarità delle intersezioni complesse suggeriscono lo sviluppo di metodi specifici per questa tipologia di intersezioni. Per esempio, possono essere trascurati i fenomeni di dispersione dei platonici lungo gli archi della rete, in virtù delle ridotte distanze tra segnali consecutivi (elemento non trascurabile nelle reti estese). Viceversa, è necessario acquisire una più approfondita conoscenza sulle manovre e sul comportamento dei veicoli che attraversano l'intersezione, in termini di formazione delle code, ritardi e deflusso nelle aree di conflitto.

Il presente lavoro propone un modello originale, sviluppato per l'analisi delle intersezioni complesse. Il modello, di tipo mesoscopico, prende in considerazione i platonici che si spostano nel nodo in accordo con le caratteristiche degli archi e le diverse destinazioni. Il comportamento dei platonici è determinato in base alle modificazioni che questi subiscono a causa delle loro reciproche influenze e della regolazione semaforica adottata. Ciò consente di svolgere un'attenta analisi a livello di ciascun segnale, impostata sulle caratteristiche dei platonici che raggiungono l'attestamento (composizione, entità del flusso, intervallo di arrivo) e su quelle relative al segnale in esame (flusso di saturazione, tempo di verde). In funzione di questi elementi, la costruzione di profili geometrici consente di individuare le code ed i ritardi accumulati dai veicoli e le caratteristiche dei platonici che lasciano l'attestamento.

La stima del ritardo, definito come la differenza tra il tempo che un veicolo impiega effettivamente per attraversare il nodo semaforizzato ed il tempo che lo stesso veicolo impiegherebbe se i segnali semaforici che lo controllano fossero disposti sempre al verde, è un elemento significativo nell'analisi di un nodo: al ritardo sono legati molti altri elementi che caratterizzano il traffico in corrispondenza delle intersezioni, quali ad esempio il consumo di carburante e l'emissione dei gas di scarico. Tutto ciò concorre alla valutazione del livello di servizio dell'intersezione complessa in esame.

Il modello consente di stimare in modo accurato il ritardo, riferito non solo a quello globale accumulato nell'intersezione, ma anche al ritardo relativo a ciascuna manovra veicolare ed a ciascuna coppia origine/destinazione all'interno del nodo. Questo è un elemento essenziale, perché consente di effettuare una valutazione del livello di servizio di ogni accesso e di ridurre il nodo complesso ad un'intersezione semplice equivalente. Ciò permette di applicare le definizioni del livello di servizio, proposte in letteratura per le intersezioni elementari, anche al nodo complesso.

Il primo capitolo della ricerca è di carattere introduttivo e riporta le principali caratteristiche del controllo semaforico, le relative definizioni e gli elementi di base della progettazione.

Il secondo capitolo mostra una panoramica delle metodologie di progettazione e valutazione presenti in letteratura. Il capitolo è suddiviso in tre parti la prima si riferisce ai metodi sviluppati per le intersezioni semplici, la seconda riguarda le reti semaforizzate e la terza è dedicata alle intersezioni complesse. Di queste ultime in particolare si sottolineano le peculiarità e si evidenzia la carenza di modelli specificati per questa tipologia di intersezioni.

Nel terzo capitolo si esplicita il modello proposto, differenziando la parte teorica da quella relativa agli algoritmi principali che sono stati implementati. Si presentano infine alcuni aspetti del software sviluppato per il modello.

Nell'ultimo capitolo il modello proposto viene sperimentato per alcuni casi reali di intersezioni complesse. Esso viene validato quindi confrontandolo con altre metodologie esistenti, evidenziandone i vantaggi.

## *Capitolo Primo*

# **IL CONTROLLO SEMAFORICO NELLE AREE URBANE**

## **1.1 PREMESSA**

Il traffico nei centri urbani riveste un ruolo di notevole impatto sulla qualità della vita.

La domanda di mobilità è in continua evoluzione a causa di diversi elementi: un crescente indice di motorizzazione, lo sviluppo delle aree urbane, la dispersione sul territorio degli insediamenti e dei servizi e molti altri fattori economici e sociali. Tale domanda comporta spesso un aumento di congestione dei centri urbani, per limitare la quale è necessaria un'attenta politica di gestione della mobilità. Questa coinvolge svariati campi: la conoscenza della domanda di spostamento e quella dell'offerta infrastrutturale, la pianificazione del trasporto pubblico, la gestione della sosta, delle aree pedonali e anche di elementi esterni al traffico (come i cantieri stradali, dei servizi, ecc.) e molto altro ancora.

Gli effetti di una cattiva gestione determinano una pesante congestione, che non significa soltanto un peggioramento del sistema in termini di tempi persi e tempi medi di viaggio, ma anche forti ripercussioni sui livelli di inquinamento atmosferico e acustico, consumo di carburante, disagi e frustrazioni per gli utenti.

Una razionale e flessibile gestione delle infrastrutture ed un ampio programma di pianificazione della rete di traffico, affiancati da adeguate strategie e

scelte politiche, sono gli strumenti più adatti per il miglioramento della mobilità urbana. Nei casi in cui non sia possibile aumentare la capacità degli archi della rete migliorando le infrastrutture viarie, l'utilizzo degli strumenti di controllo del traffico e la loro valutazione e verifica sono di fondamentale importanza.

Esistono varie strategie di intervento. Da un lato vi sono i metodi di controllo "tradizionali", che cercano di modificare le caratteristiche della domanda di trasporto in modo da ridurre i principali effetti della congestione. La maggior parte di questi interventi è tesa a razionalizzare l'uso del mezzo privato o a disincentivarne l'uso per mezzo dell'aumento del costo generalizzato. Tutto ciò è ottenibile mediante molteplici interventi: l'introduzione di pedaggi, la limitazione all'accesso di determinate aree, l'eliminazione dei flussi di attraversamento, eccetera.

Infine non vanno trascurate le possibilità di creare incentivi per l'uso di modi di trasporto alternativi ed in particolare il trasporto pubblico.

Queste strategie sono affiancate da una nuova generazione di metodi di controllo per l'ottimizzazione della mobilità urbana: dalla regolazione automatica dei parcheggi, alla regolazione semaforica adattiva, fino ai più sofisticati sistemi di informazione agli utenti.

Quali che siano le metodologie utilizzate per il controllo del traffico, un ruolo essenziale è ricoperto dalla valutazione dei risultati ottenuti mediante l'applicazione di dette metodologie. E tutto ciò passa per l'analisi degli elementi più delicati in ambito urbano: le intersezioni, che sono tra i punti più complessi nell'intero sistema infrastrutturale cui si appoggiano i flussi di traffico.

In questo capitolo si passano in rassegna le tipologie di regolazione delle intersezioni urbane. In particolare, dopo aver elencato le principali definizioni che saranno utilizzate nella trattazione che segue, si analizzano le caratteristiche delle intersezioni di tipo semaforizzato e la loro classificazione.

## **1.2 LE INTERSEZIONI URBANE**

La congestione nelle aree urbane nasce principalmente e si sviluppa nelle singole intersezioni. Queste sono i punti di confluenza di diversi rami stradali,

caratterizzati dalla presenza di utenti (veicoli o pedoni) che seguono differenti manovre di attraversamento spesso incompatibili. Le traiettorie seguite dai veicoli o dai pedoni nell'attraversamento dell'incrocio possono infatti intersecarsi in punti, detti *punti di conflitto*, che, oltre a creare intralcio alla circolazione delle diverse correnti di traffico interessate, inducono problemi in termini di sicurezza. Ciò rende necessaria l'adozione di una opportuna regolazione.

Le intersezioni possono essere classificate sulla base delle modalità con cui vengono regolate le correnti di traffico. In particolare si possono distinguere, in ordine crescente di costo, le seguenti tipologie:

- *Intersezione a raso (o a livello) con regole di precedenza*: è un'area comune a più strade, organizzata in modo da consentire lo smistamento delle correnti di traffico dall'una all'altra di esse. La regolamentazione di questo tipo di intersezione, in assenza di particolari indicazioni, è del *tipo a precedenza*. In questo caso i conflitti fra le correnti di traffico esistono e vengono risolti sulla base delle regole di precedenza (a destra) previste dal Codice della Strada.
- *Intersezione a raso (o a livello) con regole di priorità*: in una intersezione a raso la regola di precedenza a destra può essere modificata con l'apposizione di opportuna segnaletica verticale che regola le priorità fra le diverse correnti di traffico, secondo quanto previsto dal Codice della Strada.
- *Intersezioni semaforizzate*: un'intersezione a raso può infine essere controllata da un impianto semaforico. In questo tipo di intersezioni i conflitti tra le varie correnti di traffico sono risolti assegnando il tempo a disposizione di ciascuna di esse per l'attraversamento dell'area di conflitto. La suddivisione del tempo è ottenuta con l'impiego dei segnali luminosi previsti dal Codice della Strada.
- *Intersezione a livelli sfalsati*: è un insieme di infrastrutture (sovrappassi; sottopassi e rampe) che consente lo smistamento delle correnti veicolari fra rami di strade poste a diversi livelli. In questo tipo di intersezione le correnti di traffico effettuano le manovre consentite senza che vi siano dei punti di conflitto, ad esclusione di quelli dovuti alla presenza di confluenze fra correnti di traffico diverse.

Quest'ultima soluzione, assieme all'introduzione di rotatorie, sono spesso una via impraticabile in ambito urbano per varie motivazioni: richiedono spazi molto ampi

spesso indisponibili e, specialmente nel caso delle intersezioni a livelli sfalsati, sono ipotesi sfavorevoli per valutazioni di carattere economico e a causa di vincoli ambientali.

La scelta sulla modalità di regolazione delle correnti si riduce quindi all'introduzione della regolazione semaforica o alla regolazione senza di questa (con regole di precedenza o di priorità).

È opportuno osservare che, in generale, la regolazione semaforica non implica necessariamente un miglioramento nell'efficienza, in termine di tempi medi di attesa. La valutazione in merito all'introduzione o meno del sistema di controllo deve essere quindi condotta con specifico riferimento ad ogni situazione particolare. I criteri guida in tale decisione possono essere legati fondamentalmente a:

- *problemi di sicurezza;*
- *problemi di capacità.*

Una valutazione in merito alla pericolosità dell'intersezione in assenza di regolazione può essere condotta sulla base di opportune analisi delle rilevazioni di incidenti avvenuti nell'area dell'intersezione in esame.

Per quanto concerne la capacità dell'intersezione, è necessario valutare congiuntamente l'entità dei flussi delle differenti correnti in conflitto e la possibilità di smaltimento in presenza o meno di un sistema di regolazione. In linea generale l'efficacia dell'introduzione della semaforizzazione è tanto maggiore quanto i flussi coinvolti sono dello stesso ordine di grandezza.

Una delle grandezze, che si prestano per la valutazione della maggiore o minore efficienza del sistema, è rappresentata dal ritardo medio per veicolo, calcolato considerando il numero totale di veicoli in ingresso nel nodo o nella rete. Numerosi studi sono stati condotti per la quantificazione del ritardo medio per veicolo in presenza e in assenza della regolazione. È noto che, oltre un certo limite di intensità di flussi afferenti ad un'intersezione, le sole regole di precedenza o priorità conducono a livelli di ritardo e di code inaccettabili. Per valori sufficientemente ridotti di flusso in ingresso nell'intersezione, la disciplina a priorità comporta un ritardo inferiore rispetto al caso caratterizzato dalla presenza di regolazione, mentre all'aumentare del flusso, superata una soglia di sostanziale equivalenza dei ritardi sia in presenza che in assenza di controllo, si verifica una condizione inversa: quando cioè il ritardo medio nelle

intersezioni a priorità raggiunge valori molto elevati, la presenza della regolazione consente di ottenere valori ancora relativamente accettabili per i ritardi ovvero di sopportare un flusso maggiore a parità di ritardo medio per veicolo, oltre a garantire un più elevato standard in termini di sicurezza.

In accordo con quanto appena esposto, l'introduzione della regolazione semaforica in una determinata intersezione deve essere il risultato di uno studio e di una valutazione che richiedono un approccio metodologico rigoroso.

Infine, la realizzazione di un sistema semaforico può rivelarsi utile per il raggiungimento di altri obiettivi importanti, non strettamente connessi con la configurazione specifica dell'intersezione. La "Direttiva per la redazione, adozione ed attuazione dei piani urbani del traffico" (1995) indica tra gli altri obiettivi fondamentali del PUT anche:

- il miglioramento delle condizioni della circolazione;
- la riduzione dell'inquinamento atmosferico ed acustico.

In prima approssimazione si può ragionevolmente affermare che la realizzazione di interventi volti al miglioramento delle condizioni della circolazione determina parallelamente anche una riduzione dell'inquinamento in ambito urbano, a seguito della riduzione del numero di veicoli costretti a fermarsi ovvero a procedere con marcia lenta ed episodica. Più in generale risulta necessario valutare l'intersezione da regolare come elemento del sistema più ampio, costituito dalla rete della viabilità cittadina.

Sulla base di tutto ciò è evidente che l'introduzione del sistema semaforico è spesso l'unica soluzione per la maggioranza delle intersezioni urbane.

La presenza di intersezioni regolate con la semaforizzazione implica la necessità di valutare la pianificazione semaforica stessa e stabilire se sia adeguata meno alle caratteristiche del traffico. Vale la pena sottolineare l'importanza di una valutazione accurata, perché anche piccole variazioni nei piani semaforici possono comportare enormi migliorie al sistema soprattutto sotto l'aspetto ambientale: risparmi di tempo quasi impercettibili per il singolo utente possono significare enormi risparmi di carburante e inquinamento per l'intero sistema.

Si ipotizzi, per esempio, che una migliore taratura degli impianti semaforici di un'area urbana consenta di risparmiare un paio di secondi di ritardo per ogni

veicolo che attraversa ogni intersezione. Pur essendo un risparmio di tempo di modesta entità per il singolo utente è facile osservare come ciò abbia notevoli ripercussioni sul totale degli utenti del sistema e sul funzionamento del sistema nel suo complesso. Se, proseguendo nell'esempio, si considera un'area di dimensioni relativamente modeste, comprendente 50 intersezioni semaforizzate, ed si ipotizza che ciascun impianto sia costituito da un incrocio elementare, con un attraversamento di 2000 veicoli all'ora per una decina di ore al giorno, si ottiene un risparmio di tempo pari a 2 milioni di secondi, corrispondenti a poco più di 550 ore. Ciò significa che per ogni giornata vi è un risparmio di 550 ore di emissione di gas di scarico. Tutto ciò con una modifica quasi impercettibile per l'utente. Con le dovute proporzioni è facile immaginare le migliaia di ore che si potrebbero risparmiare nelle grandi città mediante una attenta regolazione semaforica.

### 1.3 DEFINIZIONI

In questo paragrafo si riportano le definizioni utili per comprendere il significato dei termini che saranno impiegati nei prossimi capitoli. Per quanto possibile le definizioni sono state ricavate dall'articolo 3 del Nuovo Codice della Strada (1992).

Conviene suddividere schematicamente questi elementi in quattro categorie: le definizioni relative alle caratteristiche geometriche dell'intersezione, quelle relative al movimento degli utenti, quelle che interessano la regolazione semaforica e infine quelle che si riferiscono alle prestazioni di un'intersezione semaforizzata.

#### 1.3.1 DEFINIZIONI RELATIVE ALLA GEOMETRIA

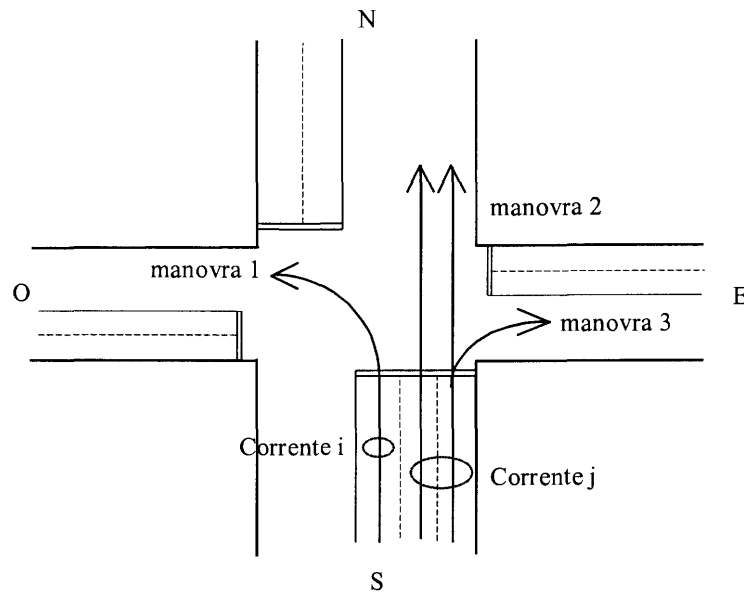
- L'*Area di intersezione* è la parte dell'intersezione a raso nella quale si intersecano due o più correnti di traffico.
- Un *ramo di intersezione* è un tratto di strada afferente una intersezione.
- La *carreggiata* è la parte della strada destinata allo scorrimento dei veicoli; essa è composta da una o più corsie di marcia ed, in genere, è pavimentata e delimitata da strisce di margine.

- Una *corsia* è una parte longitudinale della strada di larghezza idonea a permettere il transito di una sola fila di veicoli.
- La *canalizzazione* è un insieme di apprestamenti destinato a selezionare le correnti di traffico per guidarle in determinate direzioni.
- Il *passaggio pedonale* (anche marciapiede) è una parte della strada separata dalla carreggiata, mediante una striscia bianca continua o una apposita protezione parallela ad essa e destinata al transito dei pedoni. Esso espleta la funzione di un marciapiede stradale, in mancanza di esso.
- Un *attraversamento pedonale* è una parte della carreggiata, opportunamente segnalata ed organizzata, sulla quale i pedoni in transito dall'uno all'altro lato della strada godono della precedenza rispetto ai veicoli.
- Il *salvagente* (o *isola salvagente*) è una parte della strada, rialzata o opportunamente delimitata e protetta, destinata al riparo ed alla sosta dei pedoni, in corrispondenza di attraversamenti pedonali o di fermate dei trasporti collettivi.
- L'*isola di canalizzazione* (o *di traffico*) è una parte della strada, opportunamente delimitata e non transitabile, destinata a incanalare le correnti di traffico.
- Uno *spartitraffico* (o *isola spartitraffico*) è una parte longitudinale non carrabile della strada destinata alla separazione di correnti veicolari.
- La *banchina* è la parte della strada compresa tra il margine della carreggiata ed il più vicino tra i seguenti elementi longitudinali: marciapiede, spartitraffico, arginello, ciglio interno della cunetta, ciglio superiore della scarpata nei rilevati.
- La *zona di attestamento* è il tratto di carreggiata, immediatamente a monte della linea di arresto, destinato all'accumulo dei veicoli in attesa di via libera e, generalmente, suddiviso in corsie specializzate separate da strisce longitudinali continue.
- Per *attestamento* si intende spesso l'insieme di tali corsie, che permettono ai veicoli di attraversare la linea di arresto e quindi l'intersezione, effettuando tutte le manovre consentite. In un'intersezione semaforizzata gli attestamenti possono essere suddivisi in esterni ed interni: quelli esterni, detti anche *accessi*, sono costituiti dai tratti di strada che provengono da altre intersezioni mentre quelli interni sono alimentati da veicoli provenienti da altri attestamenti (esterni o interni) appartenenti all'intersezione in esame.

- *Gruppo di corsie*: l'attestamento può essere suddiviso in uno o più gruppi di corsie, ciascuno dei quali consente di effettuare un sottoinsieme delle manovre ammissibili. Un gruppo di corsie è controllato da un unico segnale semaforico.

### 1.3.2 DEFINIZIONI RELATIVE AL MOVIMENTO DEGLI UTENTI

- Le *manovre* corrispondono alle possibili direzioni che l'utente può seguire nell'attraversamento dell'intersezione nel rispetto della disciplina di circolazione vigente.
- *Corrente*: per ogni gruppo di corsie, l'insieme di tutti i veicoli che effettuano le relative manovre è detto corrente. Per quanto detto sopra ogni corrente è controllata da un unico segnale semaforico. Il termine corrente si riferisce anche ad altri utenti che attraversano l'intersezione, quali pedoni, cicli, ecc. Con riferimento alla figura 1.1, l'attestamento del tratto di strada entrante dal basso (S) è costituito da tre corsie. Le manovre in uscita dall'attestamento sono quelle di svolta a destra, a sinistra e di attraversamento diretto. Supponendo che la manovra di svolta a sinistra (1) sia regolata separatamente da quelle dritto (2) e svolta a destra(3), si possono definire due gruppi di corsie: il primo costituito dalla corsia di sinistra, percorsa dalla corrente *i* dei veicoli che effettuano la manovra di svolta a sinistra ed il secondo costituito dalle altre due corsie, percorse dalla corrente *j* dei veicoli che procedono dritti e/o svoltano a destra.
- *Correnti compatibili*: due correnti si dicono compatibili quando possono attraversare contemporaneamente l'intersezione in condizioni di sicurezza..
- *Correnti incompatibili*: due correnti si dicono incompatibili (per confluenza o attraversamento) quando non possono attraversare contemporaneamente l'intersezione con sicurezza, poiché le manovre corrispondenti confluiscono in una stessa corsia, o si attraversano e quindi presentano uno o più punti di conflitto.
- Il *flusso* di una corrente è il numero di veicoli, appartenenti alla corrente stessa, che transitano attraverso una sezione nell'unità di tempo ed è espresso in veicoli/secondo o veicoli/ora.
- Il *flusso di saturazione* di una corrente è il flusso massimo, espresso in veicoli/secondo o veicoli/ora, che può attraversare a regime la linea d'arresto del gruppo di corsie appartenenti alla corrente, in presenza di coda continua.



**Figura 1.1 - Esempio di attestamenti, correnti e manovre**

- Il *plotone* è un raggruppamento di veicoli in movimento provocato dalle segnalazioni semaforiche, dalla geometria della strada o da altri fattori

### 1.3.3 DEFINIZIONI RELATIVE ALLA REGOLAZIONE

- Le *lanterne semaforiche* sono segnali luminosi conformi a quanto prescritto dall'art. 41 del Nuovo Codice della Strada e dagli artt. 158,159,160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167 del relativo Regolamento. La regolazione semaforica si basa, nel caso di segnali veicolari normali, sulla successione ordinata di accensione delle luci: *verde* (V), con significato di via libera, *giallo* (G), con significato di preavviso di arresto e *rosso* (R), con significato di arresto. L'art. 41 del NCdS disciplina il comportamento che gli utenti devono osservare in presenza di dette luci.
- Si dice *segnale semaforico* l'insieme di lanterne semaforiche, costituito da una o più lanterne collegate fisicamente in parallelo, che controlla un'unica corrente (ad esempio un attraversamento pedonale o una corrente veicolare). Le correnti ed i segnali costituiscono le entità di base per la progettazione del controllo del traffico e per la valutazione degli effetti di tale controllo.

- Per *gruppo di segnali* si intende un insieme costituito da uno o più segnali semaforici collegati fisicamente in parallelo.
- Si definisce *ciclo semaforico* una qualunque sequenza di indicazioni semaforiche, alla fine della quale si ripresenta la medesima configurazione di luci esistente all'inizio della sequenza stessa. Una sequenza si dice completa se garantisce la via libera almeno una volta a tutte le correnti che impegnano l'intersezione. In genere per ciclo semaforico si intende una sequenza completa.
- La *durata del ciclo semaforico*, espressa in secondi, è l'intervallo di tempo necessario per completare un ciclo semaforico.
- Si dice *fase* la parte di un ciclo in cui viene assegnato simultaneamente il verde, in uno o più intervalli del ciclo, ai segnali di un insieme di correnti mutuamente compatibili. Una fase è completa se non è possibile aggiungervi ulteriori correnti compatibili con quelle già incluse.
- La *durata di una fase*, espressa in secondi, è l'intervallo di tempo in cui è assegnato il verde a tutti i segnali della fase.
- *Transizione di fase*: il passaggio da una fase ad un'altra avviene attraverso una transizione di fase, caratterizzata dal tempo fra l'istante in cui commuta al rosso il primo segnale della fase uscente e quello in cui commuta al verde l'ultimo segnale della fase entrante.
- La *struttura di un piano semaforico* è definita da una successione ordinata di fasi e delle relative transizioni di fase. Per realizzare un ciclo completo è necessario che ogni corrente abbia il verde in almeno una fase della struttura.
- Un *piano semaforico* di una singola intersezione è costituito dall'insieme delle informazioni necessarie a descrivere compiutamente sia la durata del ciclo semaforico sia gli istanti di accensione e di spegnimento dei singoli segnali.
- Lo *scalettamento (offset)* di un'intersezione semaforizzata è definito come l'intervallo dato tra la differenza tra l'istante assunto come inizio del tempo di ciclo ed un istante di riferimento assunto come zero. In una rete semaforizzata generalmente si assume l'inizio del tempo di ciclo di un'intersezione come istante di riferimento assoluto ed in base a questo sono determinati gli scalettamenti delle altre intersezioni.

### 1.3.4 DEFINIZIONI RELATIVE ALLE PRESTAZIONI

- Il *coefficiente di saturazione*  $x$  è il rapporto tra il flusso che interessa una data sezione e la sua capacità:  $x = f/c$ .
- Il *rapporto di flusso*  $y$  è il rapporto tra il tasso medio di arrivi ed il flusso di saturazione:  $y = f/s$ .
- Il *ritardo per un veicolo* è definito come l'intervallo temporale dato dalla differenza tra il tempo che il veicolo impiega per attraversare l'intersezione, ed il tempo che lo stesso impiegherebbe a percorrere il tratto di strada in assenza dell'intersezione.
- La *coda* è definita come la lunghezza del tratto di carreggiata a monte di un attestamento occupata da veicoli in attesa di attraversare l'attestamento stesso.
- Lo *spill-back* è il fenomeno che si sviluppa quando il flusso che può uscire da un attestamento è influenzato dalle code che si sviluppano su uno o più attestamenti a valle.
- Il *livello di servizio* è una misura qualitativa che descrive le condizioni operative all'interno di una corrente veicolare, generalmente descritto da fattori quali velocità e tempo di viaggio, libertà di manovra, interruzioni di traffico, comfort e sicurezza.

## 1.4 ELEMENTI DI BASE NELLA PROGETTAZIONE SEMAFORICA

In questo paragrafo vengono illustrati più in dettaglio gli elementi ed i concetti di base necessari a comprendere il funzionamento delle intersezioni semaforizzate. Schematicamente questi elementi vengono suddivisi ancora nelle quattro categorie precedentemente utilizzate per le definizioni: le caratteristiche geometriche dell'intersezione, le caratteristiche del traffico, quelle della regolazione semaforica e quelle relative alle prestazioni dell'intersezione. Gli elementi di queste quattro categorie e le loro interazioni costituiscono la base sia per il progetto sia per l'analisi funzionale delle intersezioni semaforizzate.

### 1.4.1 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE

Le caratteristiche geometriche devono essere desumibili per la maggior parte da planimetrie, siano esse il prodotto di un progetto o la fonte dei dati per effettuare l'analisi funzionale.

#### 1.4.1.1 Planimetria dell'intersezione

Al fine della progettazione semaforica, si rende necessaria la conoscenza di alcuni elementi desumibili dalla planimetria dell'intersezione, quali l'indicazione degli attestamenti, delle corsie e della segnaletica, la numerazione dei segnali e tutto quanto necessario per fornire gli elementi per una analisi completa. In particolare è necessario identificare, per ciascun gruppo di corsie:

- $n_c$  numero di corsie;
- $w_c$  larghezza media delle corsie;
- $l_c$  lunghezza delle corsie.

#### 1.4.1.2 Altri elementi geometrici

Fra le caratteristiche geometriche di interesse assumono particolare rilevanza in fase di progettazione soprattutto per la determinazione del flusso di saturazione e del flusso equivalente:

- la pendenza delle zone di attestamento ( $p\%$ );
- la zona in cui si colloca l'intersezione (zona centrale, commerciale, esterna, industriale, ecc.);
- la presenza di parcheggio o di fermate di mezzi pubblici.

### 1.4.2 CARATTERISTICHE DEL TRAFFICO

#### 1.4.2.1 Autovetture equivalenti ( $A_e$ )

Una corrente veicolare è composta da veicoli di dimensioni e prestazioni diverse (velocità, accelerazione, ecc.). Ai fini progettuali si introduce il concetto di *autovettura equivalente* ( $A_e$ ), nota in inglese come *passenger car unit* ( $pcu$ ), che considera il peso relativo che le diverse categorie dei veicoli hanno sulle caratteristiche di deflusso, assumendo come unitario il peso di un'autovettura media.

### 1.4.2.2 Flusso

Si definisce *flusso* ( $f$ ) di una corrente il numero di veicoli appartenenti alla corrente che transitano attraverso una sezione nell'unità di tempo. Il flusso viene espresso in veicoli/secondo o veicoli/ora.

Per tenere conto della composizione veicolare della corrente, considerando i coefficienti introdotti al paragrafo precedente, il flusso si esprime con la:

$$f = \sum_i (f_i \cdot Ae_i)$$

dove  $f_i$  è il flusso complessivo di veicoli del tipo  $i$ -esimo e  $Ae_i$  il corrispondente coefficiente di peso equivalente. In tal caso l'unità di misura è Ae/sec oppure Ae/h.

Si noti che in alcuni approcci allo studio delle intersezioni semaforizzate i coefficienti di peso dei singoli tipi di veicoli anziché essere applicati al flusso in arrivo all'intersezione viene utilizzato per modificare il flusso di saturazione. I due approcci sono equivalenti in quanto il comportamento dell'intersezione dipende dal flusso in arrivo e dalla capacità di smaltirlo, legata al flusso di saturazione.

### 1.4.2.3 Flusso di saturazione

Ricordiamo che il *flusso di saturazione* di una corrente è il flusso massimo, espresso in veicoli/secondo o veicoli/ora, che può attraversare a regime la linea d'arresto del gruppo di corsie appartenenti alla corrente, in presenza di coda continua. Il flusso di saturazione dipende principalmente dalle caratteristiche geometriche dell'intersezione, dalla composizione del flusso e dalle modalità di regolazione.

## 1.4.3 CARATTERISTICHE DELLA REGOLAZIONE

### 1.4.3.1 Segnali semaforici

Il *segnale semaforico* è stato definito come l'insieme di lanterne semaforiche, cioè una o più lanterne collegate in parallelo, che controllano una corrente di traffico (veicolare, pedonale, ecc.). Nella progettazione degli impianti semaforici i segnali costituiscono le entità di riferimento elementari, in quanto non è in generale necessario riferirsi alle singole lanterne che li compongono.

Tenendo conto che attualmente si utilizzano strumenti software per l'ausilio alla progettazione, è conveniente, e spesso necessario, identificare ciascun segnale con un numero (talvolta è possibile utilizzare una stringa alfanumerica). E' opportuno scegliere la numerazione (o le stringhe) in modo da individuare semplicemente il tipo di corrente controllata dal segnale: ad esempio si possono riservare alcune numerazioni per i segnali veicolari, altre per quelli pedonali, altre ancora per velocipedi, ecc.

E' in genere consigliabile e per alcune applicazioni necessario individuare con numeri diversi i segnali che controllano correnti distinte, anche se questi segnali vengono connessi fisicamente in parallelo sulla stessa uscita di potenza del regolatore semaforico.

#### 1.4.3.2 Gruppi di segnali semaforici

Nel caso in cui più segnali, ciascuno costituito da una o più lanterne, vengano connessi fisicamente in parallelo sulle uscite di potenza del regolatore, l'insieme di tali segnali viene detto *gruppo di segnali*.

I gruppi di segnali sono le entità di riferimento per i programmi di dei regolatori semaforici: normalmente essi sono numerati in modo sequenziale da 1 a  $N_g$ , se  $N_g$  è il numero massimo di gruppi di potenza disponibili nel regolatore.

#### 1.4.3.3 Verde efficace.

Osservando l'andamento nel tempo del flusso di veicoli durante il verde si nota (figura 1.2) che il distanziamento temporale tra veicoli successivi non è costante: in particolare, i valori maggiori si hanno per i primi veicoli mentre per i restanti tende a raggiungere un valore minimo (di solito dell'ordine di 2 sec. per corsia). L'inverso del tempo di distanziamento minimo corrisponde al flusso di saturazione ( $s=0,5$  veicoli/sec. per distanziamenti di 2 sec.). Il flusso in uscita tende quindi a zero durante il periodo di giallo.

Ai fini dei calcoli conviene riferirsi ad un tempo di verde equivalente, in termini di capacità, a quello reale, detto *verde efficace* ( $v$ ), per il quale si assume che il valore del flusso sia costante e pari ad  $s$  e ad un tempo di *rosso efficace* ( $r$ ) durante il quale non avviene alcuna partenza (Webster, 1958).

In termini matematici il verde efficace può essere calcolato sulla base della funzione  $a(t)$ , che esprime l'andamento nel tempo del flusso di veicoli in partenza, e del valore di  $s$ , misurabile nella fase di deflusso stabile della coda, con l'espressione:

$$v_k = \frac{1}{s} \int_0^{v+G} a(t) \cdot dt$$

mentre il rosso efficace risulta di conseguenza dalla:

$$r = C - \sum_k v_k$$

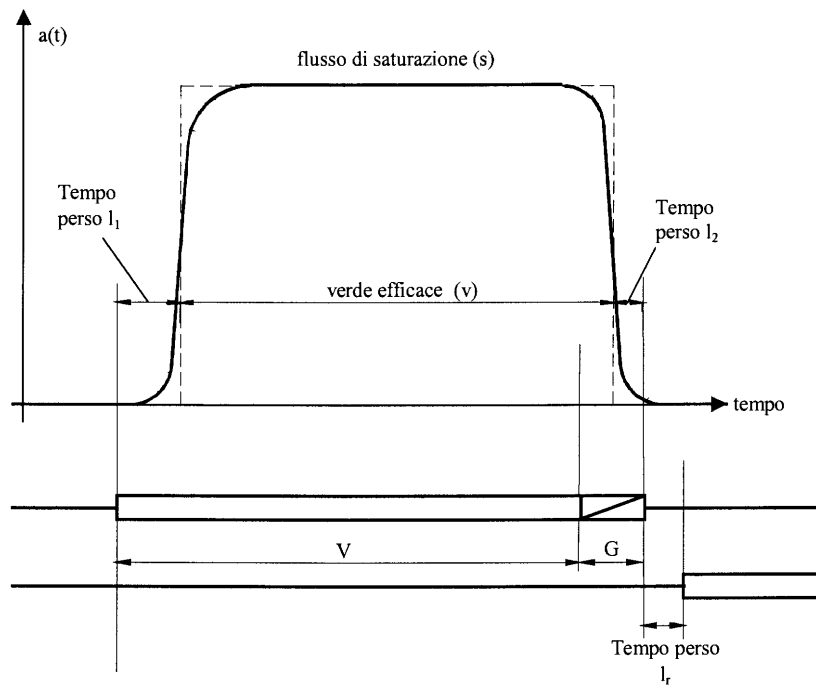


Figura 1.2 - Esempio di deflusso durante il verde: verde reale, verde efficace e tempi persi.

Si noti che il verde di un segnale può essere attivato più di una volta in un ciclo semaforico: in tal caso il verde efficace è dato dalla somma dei singoli verdi efficaci.

#### 1.4.3.4 Tempi persi.

Il ciclo semaforico non può essere utilizzato completamente per far defluire i veicoli ai valori del flusso di saturazione di ciascuna corrente. E' quindi necessario individuare il valore dei *tempi persi*, che giocano un ruolo determinante nella progettazione del ciclo semaforico. I tempi persi sono dovuti sostanzialmente a tre contributi:

- il transitorio di avviamento della coda all'inizio del verde;
- il transitorio di uscita alla fine del verde e durante il giallo
- il tempo di tutto rosso fra la fine del giallo e l'inizio del verde della fase successiva

il tempo perso ( $l_1$ ) all'avviamento è dovuto all'inerzia di avviamento dei veicoli all'inizio del verde, mentre quello di uscita ( $l_2$ ) è dovuto all'arresto graduale che avviene sfruttando anche la durata del giallo. Il tempo di tutto rosso si ricava semplicemente sulla base della durata dell'intervallo di verde ( $t_i$ ), che deve essere non inferiore al tempo di sicurezza, e di quella del tempo di giallo ( $G$ ).

Per la somma dei tempi persi all'inizio ed alla fine del verde vale la relazione:

$$l = l_1 + l_2 = V + G - v$$

Il valore di  $l$  dipende principalmente dalle caratteristiche dei veicoli e dal comportamento degli utenti ed è solitamente compreso tra 2 e 3 secondi:

In corrispondenza al periodo di tutto rosso il tempo perso si può esprimere nella forma:

$$I_r = t_i - G$$

Essendo  $t_i$  il tempo di transizione verso la fase successiva.

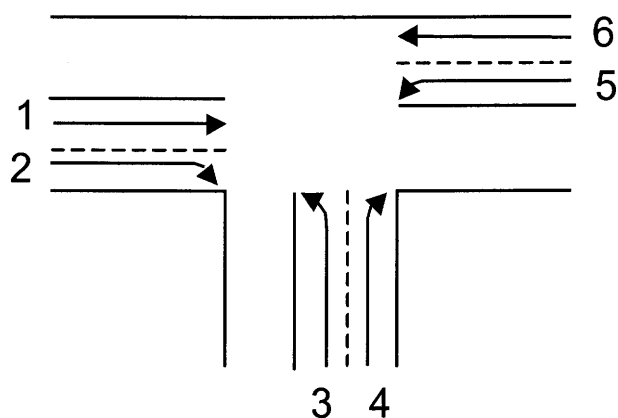


Figura 1.3 - Intersezione a T con indicazione di correnti e segnali

### 1.4.3.5 Correnti compatibili ed incompatibili

Si è visto che le correnti si dicono *compatibili* quando possono attraversare contemporaneamente l'intersezione in condizioni di sicurezza mentre si dicono *incompatibili* (per confluenza o attraversamento) quando non possono attraversare contemporaneamente l'intersezione con sicurezza, poiché le traiettorie seguite dai veicoli delle correnti confluiscono in una stessa corsia, o si attraversano.

Per l'intersezione a tre braccia riportata nella figura 1.3 sono compatibili le coppie di correnti (1,2), (1,6), (2,3), (2,4), (2,6), (3,4), (4,5), (4,6), mentre risultano incompatibili le coppie di correnti (1,3), (1,4), (1,5), (3,5), (3,6), (5,2).

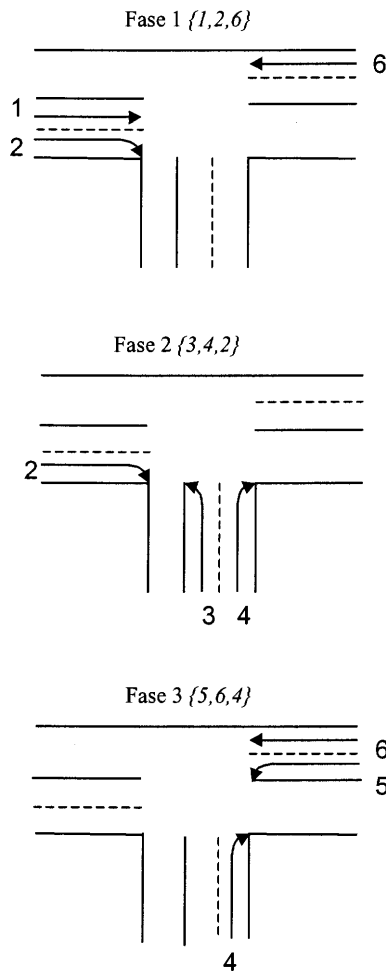


Figura 1.4 - Esempio di suddivisione in fasi.

### 1.4.3.6 Fase

Si è definito come *fase* un insieme di correnti mutuamente compatibili. Nella figura 1.4 è riportato un esempio di suddivisione in fasi per l'intersezione a T della figura precedente.

Una successione ordinata di fasi definisce una *struttura*; si assume che ogni corrente abbia verde in almeno una fase della struttura. Se la regolazione si ripete ciclicamente, la prima fase risulta consecutiva dell'ultima.

### 1.4.3.7 Piano semaforico di una singola intersezione

Un piano semaforico è costituito dall'insieme delle informazioni necessarie a descrivere compiutamente un ciclo semaforico, sia per quanto riguarda la sua durata sia per quanto riguarda gli istanti di accensione e di spegnimento dei singoli segnali. In figura 1.5 è riportato un esempio di piano semaforico per l'intersezione già analizzata.

Le modalità con cui possono essere definite le suddette informazioni sono molteplici. A titolo di esempio si possono fornire la durata del ciclo e, per ogni segnale, i tempi di inizio e di fine del verde e la durata del giallo, come indicato in figura. In alternativa lo stesso piano può essere anche definito come una successione di 3 fasi, le relative transizioni di fase, e le durate di ciascuna fase e dei passi costituenti le transizioni di fase; in questo caso la durata del ciclo risulta dalla somma dei singoli tempi.

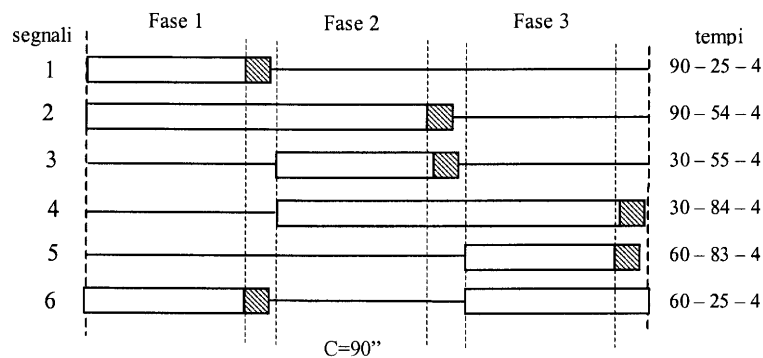


Figura 1.5 - Esempio di piano semaforico

Generalmente i tempi sono discretizzati al secondo (è comunque possibile ricorrere a discretizzazioni anche inferiori, ad esempio 0,5 secondi). Un ciclo semaforico di durata  $C$  secondi contiene dunque valori compresi fra 0 e  $C-1$  (o fra 1 e  $C$ ): gli istanti di inizio e fine dei periodi di verde e giallo di ciascuna corrente devono essere collocati all'interno di questo intervallo. Spesso si assume l'origine dell'intervallo coincidente con l'inizio del verde di un particolare segnale. Si assume, inoltre, che la regolazione si ripeta ciclicamente.

Il piano semaforico di una singola intersezione deve essere progettato in modo da consentire alle varie correnti di attraversarla con sicurezza.

#### 1.4.4 CARATTERISTICHE DI PRESTAZIONE

##### 1.4.4.1 Il ritardo

L'efficacia di un impianto semaforico può essere caratterizzata dall'entità dei tempi di ritardo medi per tutti i veicoli in transito.

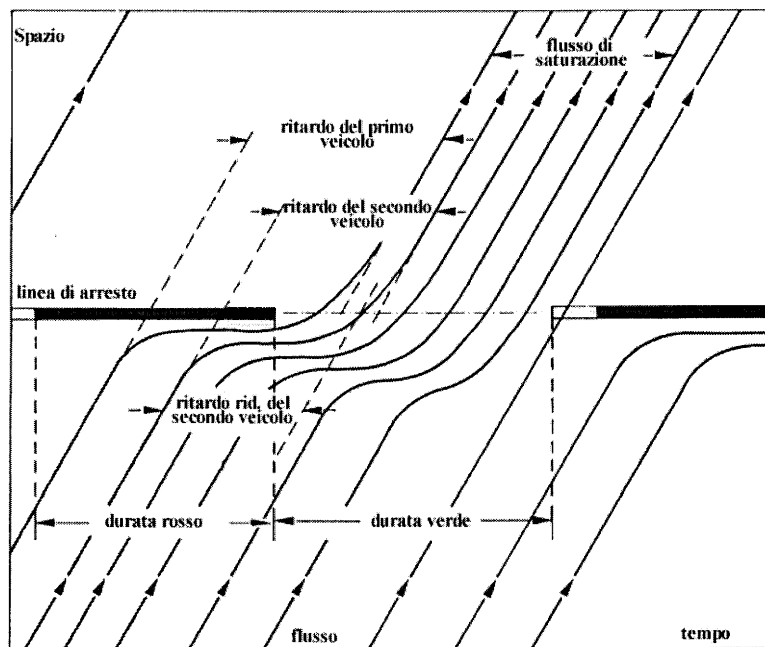


Figura 1.6 – Il ritardo in un'intersezione semaforizzata.

Il ritardo è il tempo aggiuntivo necessario ad un veicolo per attraversare l'intersezione rispetto a quello che si avrebbe in condizioni di deflusso libero. Esso è composto dai ritardi dovuti alla frenatura, all'attesa con veicolo fermo e all'avviamento. Essendo che ogni veicolo subisce un ritardo che dipende dall'istante in cui arriva, si considera quale indicatore del ritardo il valore medio dei singoli tempi di attesa.

In genere si trascura la parte di ritardo dovuta all'accelerazione del veicolo dopo l'attraversamento della linea di arresto, per cui ci si riferisce al *ritardo ridotto*: tale semplificazione porta ad errori accettabili rispetto all'entità complessiva del fenomeno. Nella figura 1.6 è riportato il diagramma delle traiettorie veicolari, in cui sono evidenziati sia il ritardo complessivo che quello ridotto.

La regolazione semaforica è ottimale se il ritardo complessivo per tutti gli utenti è minimo.

Una stima può essere ottenuta attraverso alcune espressioni analitiche che esprimono il ritardo in funzione dei parametri di regolazione e del flusso in arrivo. In particolare il ritardo ad un accesso può essere ottenuto come somma di due termini:

- il *ritardo deterministico*, che esprime la componente di ritardo dovuta ad arrivi assunti periodicamente costanti e dipende dall'andamento dei platon;
- il *ritardo stocastico*, che esprime la componente di ritardo dovuta alle fluttuazioni stocastiche degli arrivi rispetto al valore medio, ed eventualmente il ritardo dovuto a condizioni di sovrasaturazione.

Nella letteratura sono state proposte molteplici espressioni per la valutazione del ritardo in corrispondenza ad un segnale di un'intersezione semaforizzata, generalmente suddivise tra il caso di accessi isolati, in cui si assume che gli arrivi non siano influenzati dalle intersezioni a monte, ed il caso di accessi non isolati, che invece sono fortemente dipendenti dalle altre intersezioni.

#### **1.4.4.2 La formazione delle code**

In molti casi è necessario valutare la lunghezza della coda che si può verificare all'inizio del tempo di verde. Su alcuni archi della rete stradale, specialmente quelli di lunghezza ridotta, è necessario evitare che la coda che si forma su un attestamento possa raggiungere l'area di intersezione di un nodo a monte. Se

questo avviene l'intersezione a monte viene bloccata, almeno in parte, non per cause dipendenti dalla sua capacità, ma per quanto avviene a valle. Il fenomeno è noto come *spill-back*.

Il numero di veicoli mediamente in coda per una corsia può essere calcolato in prima approssimazione con l'espressione:

$$n_1 = f [(C-v)/2 + r] \text{ oppure con la } n_2 = f (C-v)$$

Si considera quindi il valore

$$N_q = \max(n_1, n_2)$$

La lunghezza della coda si ottiene infine considerando una lunghezza media per veicolo, pari per esempio a 5,6 metri per veicolo:

$$q = 5,6 \cdot N_q$$

#### 1.4.4.3 Il numero di arresti

Accanto al ritardo medio anche il numero di arresti può caratterizzare il funzionamento di un impianto semaforico. Nel numero di arresti vengono conteggiati anche quei veicoli che devono frenare ma non si fermano del tutto. Una formulazione per il calcolo del numero degli arresti è proposta da Webster. Sulla base del numero di veicoli in coda, calcolato secondo quanto indicato nel precedente paragrafo, se tali veicoli defluiscono nel tempo di verde e quindi vale la condizione:

$$N_q / (s - f) < v$$

La percentuale del numero di arresti si determina con la:

$$N_a \% = N_q / [f C (1 - f/s)] 100$$

Nel caso in cui invece sia

$$N_q / (s - f) > v$$

La stessa percentuale si determina con la:

$$N_a \% = [N_q / (f C) + v/C] 100$$

#### 1.4.4.4 La capacità

Un altro criterio da utilizzare per ottenere una regolazione ottimale di un impianto semaforico è quello legato alla massimizzazione della capacità complessiva.

Tale caratteristica è di ovvia importanza considerando che la capacità di una rete stradale è condizionata fortemente dalla capacità delle intersezioni. La massimizzazione della capacità delle intersezioni implica quindi la massimizzazione della capacità della rete.

La capacità nel caso di un piano semaforico assegnato può essere calcolata determinando dapprima i flussi massimi che possono essere smaltiti da ciascun segnale nel suo tempo di verde. Tali flussi possono quindi essere confrontati con i flussi effettivi. Il segnale per cui la differenza fra flusso massimo e flusso effettivo è minima rappresenta il segnale critico per tutta l'intersezione.

## **1.5 CLASSIFICAZIONE DELLE INTERSEZIONI SEMAFORIZZATE**

Le intersezioni possono essere classificate secondo due punti di vista, il primo legato alle caratteristiche dei flussi che le interessano, il secondo alle caratteristiche fisiche e geometriche.

Per quanto riguarda le caratteristiche dei flussi in arrivo, le intersezioni possono essere classificate in *isolate* e *interdipendenti*.

La regolazione semaforica induce un effetto di concentrazione dei flussi di utenti in uscita dall'intersezione (formazione di plotoni di veicoli). Questo effetto si attenua lungo i rami stradali a valle dell'intersezione principalmente a causa delle differenze di velocità tra i veicoli, fino ad essere trascurabile ad una certa distanza dall'intersezione stessa. Questa distanza, variabile con le caratteristiche geometriche della rete stradale, l'entità dei flussi, la composizione del parco veicolare, le attitudini di guida ecc., è in generale dell'ordine di alcune centinaia di metri (500-700 m).

Sulla base di queste considerazioni, un accesso di una intersezione si dice *isolato* se il fenomeno di concentrazione dovuto alle intersezioni a monte è trascurabile, altrimenti si dice *non isolato*. Una intersezione con tutti gli accessi isolati si dice *isolata*, altrimenti *non isolata*.

Per quanto riguarda invece la struttura delle intersezioni si può, sempre schematicamente effettuare una suddivisione in intersezioni *semplici* e *complesse*.

Nella prima categoria si possono far rientrare tutte le intersezioni in cui ciascuna corrente veicolare, dopo aver attraversato il proprio attestamento semaforico, è libera di proseguire verso tutte le direzioni ammissibili.

Per intersezione complesse si intende invece un insieme di intersezioni semplici molto ravvicinate. In essa le correnti veicolari incontrano una successione di attestamenti semaforici, fra i quali, a causa delle ridotte distanze, si pone il problema delle code, che possono causare effetti di interferenza tali da poter bloccare il funzionamento dell'intera intersezione. Casi tipici di intersezioni complesse sono ad esempio le piazze di dimensioni anche ragguardevoli in cui si hanno conflitti fra correnti di traffico in diversi punti dell'area di incrocio, con conseguente necessità di semaforizzare anche l'area interna, nella quale comunque le distanze fra segnali sono ridotte e quindi lo spazio di accumulo per le code è ridotto o addirittura nullo. Le intersezioni complesse, che costituiscono il nucleo della presente ricerca, sono riprese nei prossimi capitoli.

### *1.5.1 MODALITÀ DI CONTROLLO*

Le tecniche di controllo applicabili alle intersezioni semaforizzate possono essere fatte rientrare nelle seguenti categorie.

#### **1.5.1.1 Controllo di intersezioni isolate**

Le modalità di controllo per le intersezioni isolate possono essere catalogate nel modo seguente:

- *Controllo manuale*: la durata del ciclo ed i tempi di verde vengono determinati manualmente sulla base di osservazioni locali del comportamento del traffico.
- *Controllo a tempi fissi*: viene eseguito un piano semaforico in cui la durata del ciclo ed i tempi di verde sono prefissati e costanti nel tempo.
- *Controllo attuato*: è un controllo in catena chiusa in cui la successione delle fasi, la durata del ciclo ed i tempi di verde sono determinati in funzione dei flussi veicolari e pedonali. In questo tipo di controllo è presente un sistema di acquisizione dati in tempo reale sulle condizioni del traffico che prevede l'uso di rilevatori opportunamente installati sugli accessi dell'intersezione.

- *Controllo semi-attuato*: la successione delle fasi è prefissata ma può essere variata per effetto di segnali prodotti da dispositivi attivati da veicoli o pedoni (pulsanti pedonali, rivelatori di traffico, contatti tranviari, ecc.). Normalmente nel controllo semi-attuato è presente una fase principale, dalla quale si passa alle altre fasi soltanto se richieste.
- *Controllo a selezione di piano*: è un controllo a tempi fissi che prevede l'utilizzo di più piani semaforici aventi parametri diversi (durata del ciclo e tempi di verde). La selezione dei piani può essere effettuata manualmente, ad orario o in funzione del traffico.
- *Controllo a formazione di piano*: le caratteristiche del piano (fasatura, durata del ciclo e tempi di verde) vengono determinate in modo completamente automatico sulla base delle caratteristiche del traffico.

#### **1.5.1.2 Controllo di intersezioni interdipendenti**

Nel caso di intersezioni interdipendenti, il controllo deve tener conto delle mutue interazioni fra le intersezioni dovute ai fenomeni di implotonamento dei veicoli. In generale è richiesto che la durata del ciclo sia unica (ovvero multipla di un ciclo base) per tutte le intersezioni, il che richiede la presenza di un sistema atto a coordinare le attività dei singoli regolatori semaforici. Tale sistema deve consentire di mantenere il sincronismo dei cicli nelle intersezioni e di definire la posizione di inizio di ogni ciclo (sfasamento) rispetto ad un'origine comune dei tempi.

Per quanto riguarda la tipologia del controllo si possono distinguere i seguenti casi.

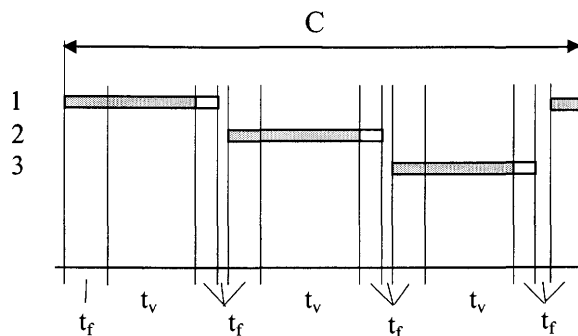
- *Controllo coordinato a selezione di piano*: è un controllo a tempi fissi che prevede la selezione fra più piani di coordinamento semaforico. Ciascun piano di coordinamento è caratterizzato dall'insieme dei piani semaforici con ciclo comune (o multiplo) e sfasamenti, relativi a tutte le intersezioni considerate.
- *Controllo coordinato a formazione di piano*: le caratteristiche dei piani di coordinamento (durata del ciclo comune, tempi di verde e sfasamenti) vengono determinate in modo completamente automatico sulla base delle caratteristiche del traffico.

### 1.5.2 MODALITÀ DI GESTIONE DEI PIANI SEMAFORICI

Un'ulteriore classificazione riguarda il modo con cui i dati dei piani semaforici vengono gestiti al fine di produrre la regolazione voluta. Si può operare una distinzione schematica fra:

- controllo sequenziale;
- controllo a moduli di fase;
- controllo a gruppi di segnale.

Nel caso di controllo sequenziale viene predisposta una struttura costituita da una successione di stati che vengono eseguiti in sequenza. Ciascuno stato può essere di durata fissa  $t_f$  (tipicamente tempi di sicurezza) o di durata variabile  $t_v$ . Agendo sugli stati di lunghezza variabile si ottengono cicli e tempi di verde di durata diversa (figura 1.7). Nel caso di funzionamento attuato alcuni stati possono essere saltati (in assenza di veicoli) ovvero prolungati dalla presenza dei veicoli.



**Figura 1.7 - Esempio di controllo sequenziale.**

Il controllo a moduli di fase è attualmente meno usato e deriva da vincoli di carattere tecnologico, che non si pongono oggi con l'uso di microcalcolatori o PC. In sostanza ciascun modulo controlla una o più correnti di traffico in parallelo e si passa da un modulo al successivo o in modo sequenziale o sulla base delle attuazioni prodotte dai veicoli.

Il controllo a gruppi di segnale infine prevede di assegnare a ciascun gruppo di segnali, indipendentemente dagli altri, la sua posizione all'interno del ciclo (ad esempio istante di inizio e di fine del verde). Si tratta ovviamente del sistema di controllo più flessibile, ma richiede una progettazione accurata al fine di rispettare i conflitti fra le correnti veicolari.

Nei regolatori provvisti di unità di controllo programmabile la distinzione tra le modalità di controllo descritte è sostanzialmente superata dalla possibilità di implementarle a scelta dell'utente.

## *Capitolo Secondo*

# **METODI DI PROGETTAZIONE E VALUTAZIONE DEL CONTROLLO SEMAFORICO A CICLO FISSO**

## **2.1 PREMESSA**

In questo capitolo si vuole fornire una panoramica su alcuni modelli utilizzati nella progettazione e nella valutazione degli impianti semaforizzati a ciclo fisso. Questi si basano sostanzialmente sulla conoscenza dei flussi: le strategie utilizzano tecniche di programmazione matematica o di controllo ottimo per la determinazione dei parametri di regolazione che considerano come ipotesi la distribuzione dei flussi all'interno dell'intersezione o della rete.

I modelli proposti in letteratura si possono distinguere sulla base del rapporto tra la domanda di traffico e la capacità delle intersezioni. La domanda di traffico nelle intersezioni semaforizzate varia durante il giorno. Nei periodi di punta, se la domanda eccede la capacità dell'intersezione, si formano code di veicoli che permangono fino a quando la domanda non decresce sotto il livello di capacità. Quando si realizzano queste condizioni l'intersezione si dice sovrasatura, o in regime di sovrasaturazione. La durata dei periodi di sovrasaturazione è funzione della domanda e della capacità dell'intersezione. I modelli per il controllo delle intersezioni possono quindi distinguersi sulla base dello stato delle intersezioni:

- modelli per intersezioni in regime di sovrasaturazione;
- modelli per intersezioni in regime di sottosaturazione.

Per le finalità del presente lavoro, interessa approfondire questa seconda categoria di modelli.

Per quanto riguarda le caratteristiche proprie dei modelli, questi possono essere classificati sulla base del livello di aggregazione con cui viene rappresentato il flusso di traffico. In particolare si distinguono:

- i *modelli microscopici*, in cui viene simulato il comportamento di ogni singolo veicolo (velocità, traiettoria). Il loro utilizzo non è molto agevole, in quanto essi richiedono delicate procedure di calibrazione dei molteplici parametri in gioco;
- i *modelli mesoscopici*, in cui i veicoli che presentano comportamenti analoghi vengono raggruppati in pacchetti (plotoni); il traffico viene quindi descritto attraverso il comportamento nello spazio e nel tempo di questi pacchetti. Tali modelli consentono di raggiungere un discreto livello di dettaglio nella rappresentazione delle principali caratteristiche del sistema, senza considerare però fenomeni quali sorpassi, cambi di corsia, ed altri legati al comportamento del singolo veicolo;
- i *modelli macroscopici*, nei quali si considerano solamente le grandezze di tipo aggregato e le relazioni che intercorrono fra esse, come ad esempio nel caso dei modelli che sfruttano l'analogia fluidodinamica.

Un'altra classificazione dei modelli riguarda invece la modalità con cui viene gestito l'avanzamento della variabile temporale. Si distinguono così i modelli *continui* da quelli *discreti*: nel primo caso il modello matematico del sistema è descritto da equazioni di tipo integro-differenziale, mentre nel secondo vengono messe in luce unicamente le variazioni di stato che avvengono in corrispondenza di determinati eventi. I modelli del primo tipo vengono implementati su calcolatore utilizzando un intervallo temporale di calcolo predefinito.

Nei paragrafi seguenti si distinguono i metodi sulla base del loro campo di applicazione. In particolare si distinguono i modelli per le intersezioni isolate semplici dai modelli sviluppati per le reti. Infine, si osserva la carenza di modelli sviluppati specificatamente per le intersezioni di tipo complesso.

I metodi riportati sono analizzati principalmente sotto gli aspetti utili per la valutazione.

## 2.2 INTERSEZIONI SEMPLICI

Le intersezioni semplici isolate sono caratterizzate dalla possibilità di progettare e verificare i piani semaforici per esse senza dover prendere in considerazione le relazioni che sorgono con altre intersezioni, in termini di vincoli dovuti alle code, tipologia di arrivo dei platonii agli approcci, coordinamento semaforico eccetera. I modelli per la progettazione e valutazione delle intersezioni isolate sono molteplici e hanno avuto notevoli sviluppi negli anni. Vi è stato uno sviluppo di modelli matematici di analisi e di ottimizzazione molto accurati nei problemi di ottimizzazione della temporizzazione semaforica, grazie alle spinte dovute all'aumento del volume del traffico insieme all'introduzione di processori di controllo degli impianti sempre più versatili.

Le prime teorie sono state sviluppate da Webster (1958, 1966). Alcuni limiti e vincoli di questi modelli sono stati poi superati dai metodi SIGCAP e SIGSET di Allsop (1971, 1972). In tali modelli le variabili di ottimizzazione sono reali ed i vincoli relativi lineari, mentre le fasi e la loro sequenza devono essere prestabilite. Altri modelli consentono di superare questo limite e consentono di determinare con un unico processo di ottimizzazione la struttura delle fasi e la temporizzazione semaforica. Tra questi si ricordano i lavori di Heydecker e Dudgeon (1987) e di Improta e Cantarella (1984, 1988), che propongono modelli con formule di programmazione matematica lineare (o convessa) mista intera binaria con vincoli lineari e variabili reali.

Gli indici che sono utilizzati per valutare le prestazioni dell'intersezione sono generalmente costituiti dal tempo di attesa e dalla capacità, o meglio dal fattore di capacità  $f$ , che rappresenta il massimo moltiplicatore comune per tutti i flussi in arrivo per il quale è ancora verificata la condizione di sottosaturazione. Le funzioni obiettivo sono generalmente caratterizzate dalla minimizzazione del ritardo totale o la massimizzazione del fattore di capacità dell'intersezione.

I modelli visti e altri ancora hanno portato all'implementazione di numerosi software per l'analisi delle intersezioni semaforizzate. I più comuni sono l'HCS, OSCADY, LINSING, SIDRA e SIGSIGN.

Poiché una trattazione completa sui metodi di regolazione delle intersezioni semaforizzate esula dagli scopi del presente capitolo, si riporta nel seguito un approfondimento su due modelli molto utilizzati in questo campo: il modello di Webster, molto diffuso e storicamente rilevante, ed il modello dell’HCM (Highway Capacity Manual), importante nella fase di valutazione e nella definizione del concetto di *livello di servizio* di un’intersezione.

### 2.2.1 MODELLO DI WEBSTER

Il metodo consente di ottenere la durata del ciclo ed i tempi di verde per una singola intersezione di cui sia nota la matrice delle fasi. Il procedimento è semplice e si basa sulla rappresentazione di ogni fase  $i$  mediante una sola corrente, quella caratterizzata dal valore più elevato del rapporto di flusso  $y = f/s$  (tale corrente riceve verde solo nella fase  $i$ ). Si definisca per ogni fase  $i$  la portata  $f_i$ , il flusso di saturazione  $s_i$ , il tempo perso  $l_i$ , ed il verde efficace  $g_i$ .

Il tempo perso totale  $L$  per ciclo è valutato mediante la relazione:

$$L = \sum_{i=1}^n l_i$$

dove  $n$  è il numero delle fasi. Se  $t_i = g_i + l_i$  è la durata della  $i$ -esima fase, si ha:

$$\sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n (g_i + l_i) = c \text{ e quindi: } \sum_{i=1}^n g_i = c - L$$

I tempi di verde efficace di ciascuna fase sono determinati nell’ipotesi che tutte le correnti rappresentative di ogni fase abbiano lo stesso fattore di capacità  $\mu_i$ , che viene assunto come fattore di capacità dell’intersezione  $\mu^*$  (le correnti non rappresentative possono avere un fattore di capacità maggiore). Questo è noto come principio di equisaturazione. Si pone quindi:

$$\mu_i = \frac{g_i / c}{y_i} = \mu^*$$

da cui si ottiene, esplicitando  $g_i$ :

$$\sum_{i=1}^n g_i = \sum_{i=1}^n \mu^* y_i c = c - L$$

Ponendo  $Y = \sum_{i=1}^n y_i$  si ha per il fattore di capacità dell'intersezione:

$$\mu^* = [(c - L)/Y] - [1/c]$$

Utilizzando questa espressione nella relazione  $\frac{g_i/c}{y_i} = \mu^*$  si ottiene infine:

$$g_i = \frac{y_i}{Y}(c - L)$$

È facile dimostrare che il fattore di capacità dell'intersezione fornito con il metodo di Webster è il massimo possibile tra tutti i piani semaforici adottabili.

Il valore della durata del ciclo che rende minimo il ritardo totale può essere valutato con la seguente espressione, ottenuta sperimentalmente:

$$c = \frac{1.5L + 5}{1 - Y}$$

Infine si noti che il minimo ciclo affinché non si abbia sovrasaturazione è ottenuto ponendo pari a 1 il fattore di capacità dell'intersezione. Si ha:

$$c_{\min} = \frac{L}{1 - Y}$$

Il metodo di Webster, di facile applicazione, richiede però l'individuazione, non sempre possibile, delle correnti rappresentative. Inoltre non consente di introdurre i vincoli di verde minimo e rosso minimo. Questi limiti sono superati nei citati modelli di Allsop.

Per quanto riguarda l'aspetto della valutazione delle prestazioni, Webster ha dedotto una formula per la stima del ritardo medio  $d$  subito da ciascun veicolo che affronta un attestamento semaforizzato. Se si indica con  $f$  il flusso in arrivo e con  $x$  il grado di saturazione per l'attestamento considerato, posto  $\lambda = g/c$  si ha la seguente formula:

$$d = cA + \frac{B}{q} - C$$

dove i coefficienti  $A$ ,  $B$  e  $C$  sono calcolati con le relazioni:

$$A = \frac{(1 - \lambda)^2}{2(1 - \lambda x)} \quad B = \frac{x^2}{2(1 - x)} \quad C = 0.65 \left( \frac{c}{q^2} \right)^{1/3} x^{(2+5\lambda)}$$

Una formula più semplice che approssima il ritardo espresso dalle relazioni precedenti è:

$$d = \frac{9}{10} \left\{ \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \right\}$$

### 2.2.2 MODELLO HCM

Per lo studio delle intersezioni semaforizzate l’HCM fornisce due procedure di analisi: una procedura è detta *Operational Analysis*, l’altra è detta *Planning Analysis*. Quest’ultima è utilizzata prevalentemente in fase di progettazione, mentre l’*Operational Analysis* è uno strumento di verifica. Naturalmente nella maggior parte dei casi i due strumenti devono essere utilizzati in modo complementare e con più iterazioni del processo progetto/verifica.

La *Planning Analysis* consente di determinare, per un’intersezione di cui siano dati i valori del traffico le caratteristiche geometriche, una idonea temporizzazione semaforica: la durata del ciclo, la tipologia delle fasi e la loro durata. I dati richiesti non sono particolarmente dettagliati e molti parametri possono essere utilizzati nella progettazione con valori di default. Si richiedono i volumi di traffico per ogni manovra, il fattore dell’ora di punta, la posizione dell’intersezione, le manovre di parcheggio. La procedura che consente di determinare la temporizzazione semaforica prevede la determinazione dei volumi critici ed il calcolo si basa sul principio di equisaturazione visto nel modello di Webster.

La temporizzazione ottenuta deve essere valutata attraverso l’*Operational Analysis* ed eventualmente modificata se non ritenuta adeguata. Questa procedura consente di valutare le prestazioni dell’intersezione in base ai volumi di traffico coinvolti, alla geometria dell’intersezione ed alla progettazione semaforica effettuata.

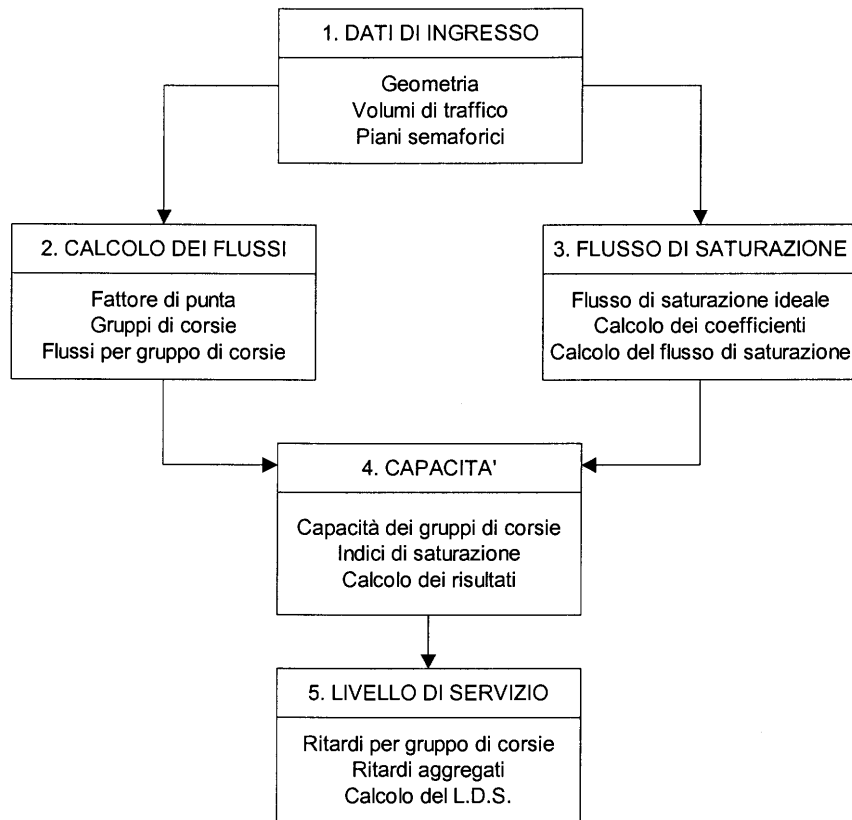
Ai fini del presente lavoro si approfondisce di seguito l’*Operational Analysis* che si sviluppa su cinque moduli.

#### 2.2.2.1 I cinque moduli dell’*Operational Analysis*

L’analisi funzionale di un impianto semaforico proposto dall’HCM consente di determinare la capacità ed il livello di servizio di ogni gruppo di corsie e dell’intera

intersezione. L'analisi richiede dati accurati relativi alla geometria dell'intersezione, ai volumi di traffico ed al piano semaforico.

La successione delle operazioni da effettuare è riportata nel diagramma in figura e consiste in 5 moduli: la raccolta dei dati, la valutazione dei flussi, la valutazione dei flussi di saturazione, il calcolo della capacità ed il calcolo del livello di servizio.



**Figura 2.1 – Schema metodologico proposto dall’HCM.**

Il primo modulo definisce i dati di ingresso che comprendono:

- dati geometrici: la planimetria che deve contenere tutte le informazioni rilevanti, comprese le pendenze, il numero e la larghezza delle corsie, l’esistenza di parcheggio a lato ovvero la presenza di fermate dei bus, la segnaletica orizzontale in modo da poter individuare l’utilizzo delle diverse corsie, la presenza di corsie dedicate alla svolta e gli spazi di accumulo delle code;
- dati relativi ai flussi: i flussi di utenti in arrivo devono essere specificati per ogni movimento di ciascun attestamento, devono essere acquisiti attraverso conteggi effettuati per ciascuna corrente di traffico e suddivisi per tipologia dei mezzi; i

conteggi dovrebbero essere effettuati in modo da ottenere l'andamento del traffico nei diversi periodi della giornata;

- dati relativi al piano semaforico: per l'analisi funzionale dell'intersezione si fa riferimento ad un particolare piano semaforico;

Nel secondo modulo i flussi di calcolo da utilizzare ai fini dell'analisi dell'intersezione sono determinati sulla base dei dati di ingresso, correggendo i valori in funzione del fattore dell'ora di punta *PHF (Peak Hour Factor)*, un coefficiente che considera la distribuzione dei flussi all'interno dell'ora di punta. I flussi sono quindi suddivisi in funzione delle manovre per gruppi di corsie ed un ulteriore coefficiente viene applicato ai flussi per tenere in considerazione la distribuzione dei flussi non perfettamente equilibrata all'interno di più corsie che effettuano la medesima manovra.

Il terzo modulo definisce il metodo di calcolo del flusso di saturazione  $s$  di ciascuna manovra, che è così espresso:

$$s = s_0 \cdot N \cdot f_w f_{HV} f_g f_p f_{bb} f_a f_{rt} f_{lt}$$

dove  $s_0$  è il flusso di saturazione ideale per corsia (pari generalmente a 1900 AE/h),  $N$  è il numero di corsie del gruppo di corsie considerato e tutti gli altri coefficienti sono dei correttivi determinati sulla base di formule e tabelle sperimentali:

$f_w$  è il coefficiente correttivo per la larghezza della corsia;

$f_{HV}$  è il coefficiente correttivo per la presenza di veicoli pesanti;

$f_g$  è il coefficiente correttivo per la pendenza della strada;

$f_p$  è il coefficiente correttivo dovuto alla presenza di manovre di parcheggio in prossimità dell'intersezione;

$f_{bb}$  è il coefficiente correttivo per la presenza di fermate di mezzi pubblici;

$f_a$  è il coefficiente correttivo per la tipologia di area in esame (centrale, periferica);

$f_{rt}$  è il coefficiente correttivo per la presenza di veicoli in svolta a destra;

$f_{lt}$  è il coefficiente correttivo per la presenza di veicoli in svolta a sinistra;

L'alternativa all'utilizzo di tutti questi coefficienti è data dal ricorso ad una misura del flusso di saturazione direttamente sull'intersezione in esame.

Nel quarto modulo si effettua il calcolo delle capacità, un elemento essenziale per la valutazione delle prestazioni di un'intersezione semaforizzata e quindi per la

progettazione della stessa. Esso consente la valutazione del rapporto tra la domanda di spostamento attraverso un'intersezione e la possibilità della stessa di assorbire tale traffico. Nei moduli precedenti si sono determinati il flusso di saturazione per ogni gruppo di corsie dell'intersezione analizzata ed il flusso della domanda in termini di veicoli equivalenti all'ora, con riferimento all'orario di punta del il nodo considerato. Si tratta ora di mettere in relazione i due indicatori, sulla base del piano semaforico (esistente o di progetto), al fine di determinare le condizioni di funzionamento del sistema. In particolare è utile determinare un indicatore sintetico che consenta di valutare il rapporto tra il volume della domanda e la capacità di ogni gruppo di corsie (*livello di saturazione*) e, tra questi, il gruppo di corsie che più facilmente può essere soggetto al raggiungimento delle condizioni di sovrasaturazione, al variare della domanda (*gruppo critico*). A tal fine, è necessario calcolare i seguenti elementi:

- il rapporto di flusso  $y_i$  per ogni gruppo di corsie  $i$ , espresso dal rapporto tra il flusso della domanda  $f_i$  ed il flusso di saturazione  $s_i$ ; cioè:

$$y_i = f_i / s_i$$

- la capacità  $c_i$  di ogni gruppo di corsie  $i$  in base alla regolazione semaforica; ossia, se  $C$  è la durata del ciclo e  $v_i$  il tempo di verde efficace per il gruppo  $i$ :

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

- il livello di saturazione  $x_i$ , espresso dal rapporto tra il flusso della domanda e la capacità di ogni gruppo di corsie  $i$ ; cioè:

$$x_i = f_i / c_i$$

- il livello di saturazione critico  $x_c$  dell'intera intersezione, definito da:

$$x_c = \sum_{ci} \frac{f_{ci}}{s_{ci}} \cdot \frac{C}{C-L} = \sum_{ci} y_{ci} \cdot \frac{C}{C-L}$$

dove  $L$  indica il perditempo totale e l'indice  $ci$  è riferito ai gruppi di corsie critici che saranno individuati nel seguito. Se risulta  $x_c > 1$  allora uno o più gruppi di corsie critici sono in condizioni di sovrasaturazione e la pianificazione dell'intersezione si rivela inadeguata. A tale proposito si osserva che, viceversa, il fatto che il grado di saturazione critico dell'intersezione sia inferiore all'unità, non garantisce che non esistano movimenti in condizioni di sovrasaturazione (ciò può accadere se la distribuzione dei tempi di verde non è proporzionale ai rapporti di flusso).

La definizione del grado di saturazione critico dell'intera intersezione implica l'individuazione dei gruppi di corsie critici. Durante una fase semaforica, è assegnato il tempo di verde ad uno o più gruppi di corsie. Di tali gruppi è necessario individuare quello che ha la domanda più elevata, poiché è quello che determina la lunghezza minima del tempo di verde per la fase in esame. tale gruppo di corsie, che è il più vincolato all'interno della fase, è detto *gruppo critico* per la fase semaforica.

Nel caso più semplice in cui non vi siano fasi sovrapposte (ogni gruppo di corsie ottiene il verde in una sola fase), l'individuazione del gruppo critico per ogni fase e per l'intera intersezione è immediata, attraverso le seguenti considerazioni:

- esiste un solo gruppo critico per ogni fase semaforica;
- il gruppo critico di ogni fase è quello, tra i gruppi che ricevono il verde, con il rapporto di flusso più elevato;
- la somma dei rapporti di flussi dei gruppi critici determina il valore del grado di saturazione  $x_c$  dell'intersezione.

Le fasi sovrapposte sono invece più difficili da esaminare, perché alcuni gruppi di corsie si muovono in più fasi e anche le svolte a sinistra possono essere effettuate in diverse condizioni (permesse o protette). In tal caso è necessario individuare la *sequenza critica*, in altre parole la sequenza delle fasi che, all'interno del ciclo semaforico, presenta la somma dei rapporti di flusso più elevata. La sua individuazione segue le seguenti regole:

- escludendo i perditempo, almeno un gruppo di corsie critico deve essere in movimento durante tutto il ciclo;
- in nessun istante del ciclo ci può essere più di un gruppo di corsie critico in movimento;
- la sequenza critica presenta il valore più elevato della somma dei rapporti di flusso.

Non sempre tuttavia è possibile individuare i movimenti critici attraverso queste considerazioni. In tal caso è necessario distribuire i volumi in maniera più logica possibile, o semplicemente omettere il calcolo del grado di saturazione nell'analisi dell'intersezione.

Nel quinto modulo dell'analisi è possibile infine determinare il livello di servizio *LOS (Level of Service)* dell'intersezione analizzata. Il livello di servizio è un

parametro che indica la qualità del servizio reso all'utente e, nel caso delle intersezioni, esso è strettamente correlato con i tempi di attesa. Per la valutazione del livello di servizio, il modello dell'HCM fa riferimento al ritardo medio subito dai veicoli che attraversano il nodo, valutato per ciascun segnale. Si può quindi ricavare un valore relativo al ritardo medio per ogni attestamento e per l'intera intersezione.

I valori del ritardo sono ottenuti mediante delle espressioni che prendono in considerazione il ritardo subito da tutti i veicoli che si presentano all'intersezione nel periodo relativo all'analisi, inclusi i ritardi dovuti ad eventuali condizioni di sovrasaturazione di alcuni segnali.

### 2.2.2.2 Il calcolo del ritardo

Il ritardo medio  $d$  per veicolo di un dato segnale può essere espresso come somma di tre termini:

$$d = d_1 \cdot PF + d_2 + d_3$$

dove:

$d_1$  è il *ritardo uniforme*, ottenuto nell'ipotesi che i veicoli in arrivo all'intersezione siano distribuiti uniformemente nel tempo;

$PF$  è il *coefficiente di correzione del ritardo uniforme*, ottenuto in base al coordinamento semaforico tra i diversi impianti;

$d_2$  è il *ritardo incrementale*, ottenuto considerando gli effetti dovuti agli effettivi flussi in arrivo nel periodo di analisi (diversi da quelli medi) e a fenomeni di sovrasaturazione, nell'ipotesi che all'inizio del periodo non vi sia una domanda residua da soddisfare nel gruppo di corsie analizzato;

$d_3$  è il *ritardo per la domanda insoddisfatta*, dovuto alla presenza di code per flussi precedenti al periodo di analisi considerato.

Nel seguito si analizzano in dettaglio le tre componenti del ritardo che compongono il ritardo totale  $d$  del gruppo di corsie.

Per quanto riguarda il ritardo uniforme  $d_1$ , il modello HCM fa riferimento all'espressione proposta da Webster:

$$d_1 = \frac{0.50 \cdot C \cdot (1 - v/C)^2}{1 - \min(1, x) \cdot v/C}$$

dove

$C$  è la lunghezza del ciclo (nel caso di segnali attuati si considera la durata media del ciclo);

$v$  indica il verde efficace (medio nel caso di segnali attuati) del segnale che controlla il gruppo di corsie;

$x$  indica il livello di saturazione del gruppo di corsie.

Si osservi che nella formula sono considerati solo i valori di  $x$  inferiori all'unità.

Nell'ipotesi che altri impianti semaforizzati esistano nelle adiacenze di quello analizzato, assume importanza il coefficiente correttivo  $PF$ : il coordinamento tra più impianti semaforici influenza in modo sensibile la distribuzione degli arrivi dei veicoli in corrispondenza ad un determinato segnale, durante un ciclo semaforico, variando in modo significativo il ritardo.

Ad esempio, un buon coordinamento garantisce che la maggior parte dei veicoli raggiungano l'intersezione nella fase di verde, riducendo drasticamente il tempo perso dai veicoli. Una misura dell'efficacia del coordinamento per un gruppo di corsie è dato dalla frazione di veicoli che arriva durante la fase di verde ( $P$ ). Ipotizzando che gli arrivi siano distribuiti uniformemente sul ciclo il valore di  $P$  è dato da:

$$P = v/C$$

cioè dal rapporto fra il verde efficace e la durata del ciclo. Qualora la distribuzione dei veicoli sia diversa da quella uniforme, si può esprimere la frazione dei veicoli che non si arresta introducendo un fattore  $R_p$ :

$$P = R_p \cdot \frac{v}{C}$$

Il valore di  $P$  può essere misurato per ciascun gruppo di corsie ovvero stimato, utilizzando dei valori di default per il coefficiente  $R_p$ , considerando un opportuno livello per caratterizzare il coordinamento esistente.

Il manuale HCM propone 6 livelli di coordinamento: il valore più basso (1) si riferisce ad un coordinamento sfavorevole, il valore intermedio (3) si riferisce ad arrivi uniformi mentre quello massimo (6) corrisponde ad un coordinamento ottimale. I corrispondenti valori di  $R_p$  sono riportati nella tabella seguente.

<i>Livello di coord..</i>	<i>R<sub>p</sub> (range)</i>	<i>R<sub>p</sub> (default)</i>
1	<=0.5	0.333
2	0.50÷0.85	0.667
3	0.85÷1.15	1.00
4	1.15÷1.50	1.333
5	1.50÷2.00	1.667
6	>2.00	2.00

**Tabella 2.1 – Valutazione del coefficiente R<sub>p</sub>.**

Le caratteristiche del coordinamento si ripercuotono prevalentemente sulla componente del ritardo  $d_1$ , che viene pertanto corretto, moltiplicandolo per un coefficiente  $PF$ , che può essere determinato mediante la seguente espressione:

$$PF = \frac{(1 - P) \cdot f_p}{1 - (v/C)}$$

dove  $f_p$  indica un ulteriore coefficiente correttivo in base alla tipologia di arrivo dei platon, i cui valori di default sono definiti dalla tabella 2.2.

<i>Livello di coord.</i>	<i>f<sub>p</sub></i>
1	1.00
2	0.93
3	1.00
4	1.15
5	1.00
6	1.00

**Tabella 2.2 – Valutazione del coefficiente f<sub>p</sub>.**

Nella formula precedente la frazione  $P$  può essere determinata in base al livello di coordinamento, oppure può essere misurata sul campo. In quest'ultimo caso  $P$  è determinato come la frazione di veicoli che giungono in corrispondenza della linea di arresto o si posizionano in coda, quando il segnale è disposto al verde per il gruppo di corsie analizzato. Se un gruppo di corsie è composto da manovre che hanno diversi livelli di coordinamento, è necessario individuare il valore di  $P$  attraverso opportuni coefficienti di peso per le diverse manovre.

L'aliquota del ritardo incrementale  $d_2$  dipende da diversi fattori: il grado di saturazione  $x$  del gruppo di corsie considerato, la durata del periodo di analisi  $T$ , la

capacità  $c$  del gruppo di corsie, la tipologia di regolazione (che viene presa in considerazione attraverso un parametro  $k$ ).

Si può utilizzare quindi la seguente espressione:

$$d_2 = 900 \cdot T \cdot \left[ (x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8 \cdot k \cdot I \cdot x}{c \cdot T}} \right]$$

dove

$T$  è la durata del periodo di analisi espressa in ore;

$k$  è il coefficiente del ritardo incrementale, dipendente dalla tipologia di regolazione, descritto in seguito;

$I$  è il coefficiente relativo all'influenza dei segnali a monte, la regolazione dei quali riduce la possibilità di grosse escursioni del ritardo incrementale; esso dipende dai gradi di libertà dei flussi a monte e dalla quantità di flussi entranti ed uscenti tra le due intersezioni; ad ogni modo per un'intersezione isolata si assume  $I = 1$ ;

$C$  è la capacità del gruppo di corsie espressa in veicoli orari;

$x$  è il livello di saturazione del gruppo di corsie.

Il coefficiente di calibrazione  $k$  è utilizzato per prendere in considerazione gli effetti della tipologia di regolazione sul ritardo.

Negli impianti a ciclo fisso, si assume  $k = 0.5$ . Tale valore è basato su un processo di formazione della coda con arrivi casuali e considerando che la distribuzione del tempo di verde è costante. Per contro, negli impianti di tipo attuato, il tempo di verde può adattarsi alle necessità della domanda, riducendo così l'influenza del ritardo incrementale. In questo caso si può adottare la seguente espressione:

$$k = (1 - 2 \cdot k_{min}) \cdot (x - 0.5) + k_{min}$$

dove  $k_{min}$  è fornito dalla tabella 2.3, in funzione dell'intervallo minimo  $\delta$  di prolungamento del verde attuato.

Si osservi che nel caso di gradi di saturazione prossimi all'unità, l'impianto attuato si comporta come un impianto a ciclo fisso ed i valori del coefficiente  $k$  convergono a 0.5.

$\delta$ [sec]	2	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5
$k_{min}$	0.04	0.08	0.11	0.13	0.15	0.19	0.23

**Tabella 2.3 – Valutazione del coefficiente  $k_{min}$ .**

L'ultimo elemento che costituisce il ritardo totale è il ritardo per la domanda insoddisfatta  $d_3$ . Nell'ipotesi che all'inizio del periodo  $T$  di analisi sia presente una coda residua formata da  $Q_b$  veicoli, si può utilizzare la seguente espressione per la valutazione di  $d_3$  :

$$d_3 = \frac{1800 \cdot Q_b \cdot (1 + u) \cdot t}{c \cdot T}$$

dove:

$Q_b$  è la domanda insoddisfatta all'inizio del periodo di analisi (espressa in veicoli);

$c$  è la capacità corretta del gruppo di corsie (espressa in veicoli orari);

$T$  è la durata del periodo di analisi espressa in ore;

$t$  è il periodo di persistenza della domanda insoddisfatta (espressa in ore);

$u$  è il coefficiente di ritardo.

I parametri  $t$  ed  $u$  sono determinati mediante le seguenti espressioni:

$$t = 0 \text{ se } Q_b = 0, \text{ altrimenti } t = \min \left\{ T, \frac{Q_b}{c \cdot [1 - \min(1, x)]} \right\}$$

$$u = 0 \text{ se } t < T, \text{ altrimenti } u = 1 - \frac{c \cdot T}{Q_b} [1 - \min(1, x)]$$

dove  $x$  è il grado di saturazione del gruppo di corsie in esame.

Le procedure espone consentono di valutare il ritardo per le singole manovre dell'intersezione analizzata. Tuttavia risulta utile fornire degli indicatori aggregati che esprimano il ritardo per le varie direzioni di provenienza e per l'intera intersezione. In generale ciò si ottiene attraverso una media pesata dei ritardi in funzione dei flussi. In particolare per ogni attestamento di ingresso il ritardo vale:

$$d_A = \frac{\sum d_i f_i}{\sum f_i}$$

dove:

$d_A$  è il ritardo per l'approccio  $A$

$d_i$  è il ritardo calcolato per il gruppo di corsie  $i$  dell'attestamento  $A$  (espresso in secondi per veicolo)

$f_i$  è il flusso corretto per il gruppo di corsie  $i$ .

Analogamente il ritardo per l'intera intersezione vale:

$$d_I = \frac{\sum d_A f_A}{\sum f_A}$$

dove

$d_I$  è il ritardo per l'intera intersezione  $I$

$d_A$  è il ritardo calcolato per l'attestamento  $A$  (espresso in secondi per veicolo)

$f_A$  è il flusso corretto per l'attestamento  $A$ .

### 2.2.2.3 Determinazione del livello di servizio

I ritardi così calcolati sono utilizzati per la valutazione del livello di servizio dell'intersezione. Infatti il ritardo è una misura per il disagio del guidatore, per il consumo di carburante e per la maggiorazione del tempo di viaggio. Possiamo così legare direttamente il ritardo al livello di servizio di ogni attestamento e dell'intersezione nel suo complesso.

Il modello HCM propone una tabella che consente di associare il livello di servizio ad un intervallo di secondi di ritardo per veicolo.

<i>LDS</i>	<i>RITARDO MEDIO PER VEICOLO [sec]</i>
A	≤10.0
B	> 10.0 e ≤20.0
C	> 20.0 e ≤35.0
D	> 35.0 e ≤55.0
E	> 55.0 e ≤80.0
F	> 80.0

Tabella 2.4 – Il livello di servizio.

Il livello di servizio  $A$  indica un ritardo minimo ed una progressione estremamente favorevole dei veicoli i quali arrivano all'intersezione prevalentemente nel tempo di verde. La maggior parte dei veicoli non si ferma neppure. Anche il livello di servizio  $B$  è indice di un'ottima prestazione dell'intersezione; si ferma qualche veicolo in più, ma molti veicoli continuano ad arrivare nel tempo di verde.

Livelli di servizio molto elevati sono spesso indice, oltre che di un buon coordinamento, di cicli semaforici brevi che contribuiscono a limitare i ritardi.

Nel livello di servizio *C* i ritardi si fanno più sensibili, ma la progressione dei veicoli resta buona. Il numero dei veicoli costretto a fermarsi è ora significativo, anche se ancora diversi veicoli passano direttamente. Il livello di ritardo aumenta nel livello di servizio *D* e ancor di più nel livello *E* dove si fa sentire l'influenza della congestione. Il livello di servizio *F* è inaccettabile per gli utenti ed il sistema è spesso in condizioni di sovrasaturazione.

## 2.3 RETI SEMAFORIZZATE

I metodi per la regolazione di una rete di intersezioni si possono distinguere in base al tipo di rete che deve essere presa in esame: alcuni metodi si applicano alle reti generiche, altri sono sviluppati per le arterie semaforizzate, ossia per le reti costituite da una successione di intersezioni “aperta”, cioè priva di circuiti.

Per quanto riguarda le arterie, i metodi più diffusi sono stati proposti nei lavori di Morgan e Little (1964), basati su una tecnica euristico-combinatoria di ottimizzazione, e di Little (1966), da cui si sono sviluppati molti programmi informatici. Tali metodi sono basati sulla realizzazione di un'onda verde lungo l'arteria: quando un veicolo viaggia all'interno di un'onda verde incontra tutti i segnali disposti al verde. L'intervallo di tempo in cui esiste l'onda verde all'interno del tempo di ciclo identifica la banda verde che, se sufficientemente ampia, consente a tutti i veicoli accumulatisi al primo accesso dell'arteria di completare il proprio percorso senza ulteriori arresti. I metodi citati ricercano bande di attraversamento dell'arteria quanto più larghe possibili (massimizzazione della banda). Il metodo di Little consente, tra l'altro, di ottenere bande di larghezza differente e di assumere come variabili da ottimizzare il tempo di ciclo e le velocità di attraversamento.

A partire da queste tecniche sono stati sviluppati vari metodi di calcolo in cui la formulazione del problema della ricerca degli offset ottimi tra le varie intersezioni è stata estesa al caso di una rete. Si citano a tale proposito i lavori di Gartner (1972), di Gartner e Little (1975) e di Improta e Sforza (1982).

I modelli più diffusi per l'ottimizzazione delle arterie sono il modello MAXBAND proposto da Little et al. (1981) ed il modello MULTIBAND sviluppato da Gartner et al. (1990).

Per quanto riguarda le reti generiche si ricorda il modello proposto da Robertson (1969) che ha portato allo sviluppo di uno tra i software più utilizzati per la pianificazione semaforica, il TRANSYT.

Per reti di piccole dimensioni e con segnali ravvicinati un modello di ottimizzazione è stato sviluppato da Camus, D'Amore A. e Ukovich (1983). Ulteriori specificazioni su questo modello sono riportate nel paragrafo relativo alle intersezioni complesse, per le quali il modello è più adatto.

Vale la pena sottolineare che l'ottimizzazione di un'arteria non corrisponde a quella di una rete completa: la regolazione di quest'ultima si basa generalmente sulla minimizzazione del ritardo e del numero di fermate subito dai veicoli sulla rete completa, anziché sulla massimizzazione della larghezza di banda. A questo proposito si richiamano i lavori di Cohen (1983), Skabardonis e May (1985) e Cohen e Liu (1986).

Poiché il presente capitolo non vuole fornire una trattazione completa sui modelli e metodi per la regolazione semaforica, si riportano nei prossimi paragrafi due tra i modelli più utilizzati in questo campo: il modello MAXBAND (e la sua estensione MULTIBAND) ed il modello TRANSYT. In particolare si sviluppa una trattazione più approfondita di quest'ultimo perché verrà utilizzato come strumento di verifica e di confronto relativamente al modello che si propone.

### 2.3.1 MODELLI MAXBAND E MULTIBAND

Il modello è implementato per ottimizzare la regolazione semaforica nelle reti di tipo arteriale (senza circuiti) o nelle reti triangolari. I metodi per il coordinamento consentono di calcolare i tempi dei cicli, gli offset, la velocità di progressione e l'ordine delle fasi di svolta che massimizzano la larghezza delle bande nelle due direzioni di marcia lungo un'arteria semaforizzata.

Con riferimento alla figura 2.2, si consideri un'arteria con  $n$  segnali semaforici. Fissati i versi di percorrenza, detti *diretto* ed *indiretto*, e chiamato  $S_i$  il

generico segnale all'intersezione  $i$ , si definiscono i seguenti parametri temporali espressi come frazioni del tempo di ciclo:

- $b$  ( $\bar{b}$ ) la larghezza della banda diretta o in ingresso (indiretta o in uscita);
- $r_i$  ( $\bar{r}_i$ ) il tempo di rosso diretto (indiretto) al segnale  $S_i$ ;
- $w_i$  ( $\bar{w}_i$ ) la variabile interferenza che rappresenta l'intervallo tra l'estremo destro (sinistro) del segmento di rosso e l'estremo sinistro (destro) della banda di verde diretta (indiretta);
- $t_i(h,i)$  ( $\bar{t}_i(h,i)$ ) il tempo di viaggio da  $S_i$  ( $S_h$ ) a  $S_h$  ( $S_i$ ), lungo la banda diretta (indiretta);
- $\Phi_i(h,i)$  ( $\bar{\Phi}_i(h,i)$ ) il tempo tra il centro del segmento di rosso diretto (indiretto) a  $S_h$  e il centro di un particolare segmento di rosso diretto (indiretto) a  $S_i$ ;
- $\Delta_i$  lo sfasamento internodo, il tempo tra il centro del segmento di  $\bar{r}_i$  ed il centro del più vicino segmento  $r_i$  (positivo se  $r_i$  è a destra di  $\bar{r}_i$ );
- $\tau_i$  ( $\bar{\tau}_i$ ) il tempo per smaltire la coda, slittamento della banda diretta (indiretta) per eliminare il flusso entrante prima dell'arrivo del plotone dalla strada principale.

Con questi elementi può essere formulato il problema di massimizzazione della banda (simmetrico e con larghezza uniforme della banda) che può essere risolto con i metodi usuali della ricerca operativa.

Affinché la progressione dei verdi non violi i tempi di rosso, si introducono vincoli sulle interferenze direzionali per ogni segnale  $i$ :

$$w_i + b \leq 1 - r_i$$

$$\bar{w}_i + \bar{b} \leq 1 - \bar{r}_i$$

Un altro vincolo è quello che nasce dal fatto che i segnali delle arterie hanno un ciclo comune: partendo dal centro di un rosso diretto nell'intersezione  $h$  e procedendo lungo un ciclo composto dei centri di rosso diretto e indiretto in  $i$  e in  $h$ , bisogna raggiungere un punto che disti temporalmente dal punto di partenza un numero intero di cicli:

$$\Phi(h,i) + \bar{\Phi}(h,i) + \Delta_h - \Delta_i = m(h,i)$$

dove  $m(h,i)$  è la variabile di ciclo intero.

Se si vuole ottenere una progressione simmetrica è necessario che sia  $b = \bar{b}$ .

I dati di ingresso sono costituiti da tempi dei cicli, tempi di viaggio e tempi di esaurimento delle code; le variabili decisionali dalla larghezza della banda, dagli offsets e dalle interferenze. Infine la funzione obiettivo da ottimizzare è la larghezza della banda, con i vincoli visti.

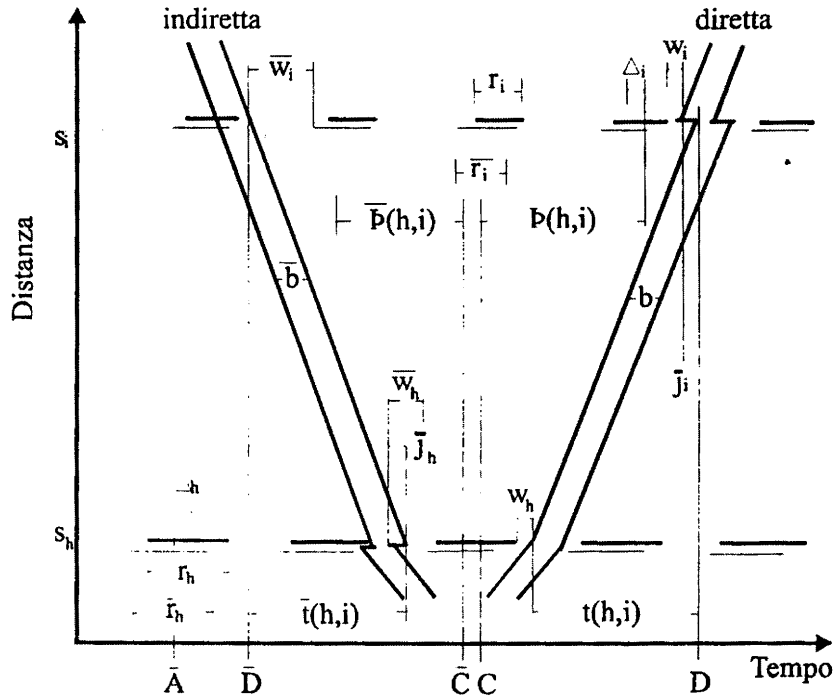


Figura 2.2 – Diagramma spazio-tempo per il modello MAXBAND - Papageorgiou (1991).

Il metodo MAXBAND, basato su una formulazione di programmazione mista intera, si ottiene da alcune estensioni del precedente problema. Il metodo MAXBAND consente di variare l'importanza che si vuole attribuire alle due direzioni del traffico: una progressione con  $b = \bar{b}$  (bilanciata) risulta efficace durante i periodi lontani dalle ore di punta. Per applicare il metodo nelle ore di punta si introduce il coefficiente  $k$ , rapporto tra la larghezza della banda indiretta e quella diretta (corrispondente al rapporto tra i volumi indiretto e diretto lungo l'arteria). La funzione obiettivo diventa:

$$\max(b + k\bar{b})$$

Con i vincoli:

$$\bar{b} \geq kb \text{ se } k < 1 \text{ (favorita la direzione diretta)}$$

$$\bar{b} \geq kb \text{ se } k < 1 \text{ (favorita la direzione indiretta)}$$

$$\bar{b} = b \text{ se } k=1 \text{ (progressione bilanciata)}$$

I primi due vincoli si possono esprimere attraverso un'unica disuguaglianza (vincolo di rapporto tra le larghezze di banda):

$$(1-k)\bar{b} \geq (1-k)kb$$

Un'ulteriore estensione del problema consente di utilizzare, come variabili da ottimizzare, anche il tempo di ciclo comune e la velocità di progressione su ogni ramo.

Il metodo MULTIBAND è un'estensione del modello MAXBAND che consente di incorporare nella procedura di ottimizzazione della banda un criterio di dipendenza dal traffico: si superano quindi alcune limitazioni presenti nel modello MAXBAND come il fatto che la massimizzazione della banda non dipende dai flussi effettivi esistenti sui rami della rete arteriale. Questi flussi sono infatti influenzati dagli ingressi e dalle uscite presenti lungo l'arteria in corrispondenza delle intersezioni.

### 2.3.2 MODELLO TRANSYT

Il modello è stato sviluppato per la progettazione e la valutazione di reti semaforizzate di qualsiasi tipologia (arteriale o chiuse). Il TRANSYT è uno dei software più utilizzati in questo campo. Esso è composto sostanzialmente da due moduli principali: un modello di traffico ed una procedura di ottimizzazione dei segnali.

Il modello di traffico ha lo scopo di riprodurre il comportamento del sistema sulla base di una data pianificazione semaforica: lo spostamento dei flussi di traffico attraverso la rete viene simulato attraverso dei profili ciclici di flusso lungo gli archi. Il modello determina un *indice di prestazione* per la rete in funzione del piano semaforico e dei flussi relativi alla domanda di mobilità lungo la rete. L'indice di prestazione è una misura del costo generalizzato del traffico, ottenuto da una combinazione pesata dei ritardi subiti dai veicoli e del numero di arresti. La procedura di ottimizzazione corregge i piani di ogni nodo e gli offsets tra i nodi e verifica se, così facendo, l'indice di prestazioni si riduce o meno. La procedura aggiorna solo le modifiche che comportano una riduzione dell'indice e procede a nuove regolazioni.

Il TRANSYT si basa sulle seguenti ipotesi sul traffico:

- tutti i principali nodi della rete sono semaforizzati o controllati da regole di priorità;
- tutti i segnali hanno un ciclo semaforico comune (o la metà di questo);
- per ogni corrente di traffico che si sposta tra due nodi o effettua delle manovre in corrispondenza di un nodo, il flusso è assunto noto e costante sul periodo considerato.

### 2.3.2.1 Il modello di traffico

La rete è costituita da nodi collegati da archi; ogni intersezione semaforizzata costituisce un nodo, mentre gli archi rappresentano le correnti di traffico. I flussi soggetti a differenti segnali nello stesso nodo sono di norma assegnati ad archi differenti. Più complessa è la rappresentazione di correnti di traffico che si vogliono mantenere separate per motivazioni legate ai diversi movimenti che queste seguono sulla rete: è necessario introdurre nuovi archi per ogni flusso che si vuole mantenere separato su un attestamento e le modifiche sono spesso improponibili se è necessario estendere la differenziazione a svariati nodi.

Il tempo di ciclo comune è suddiviso in un certo numero di intervalli uguali (della durata generalmente di 1-3 secondi) detti *steps*. Le elaborazioni del programma sono effettuate sulla base dei flussi, delle code e delle manovre che si hanno ad ogni step del ciclo. Ciò avviene attraverso l'individuazione di istogrammi relativi a code e flussi che consentono di simulare l'andamento dei flussi attraverso la rete. I calcoli sono quindi effettuati a livello di flussi e non di singoli veicoli.

Il comportamento del traffico lungo ogni arco della rete è basato su tre tipi di profili ciclici del flusso:

- il profilo IN identifica la distribuzione del flusso che giungerebbe al nodo finale dell'arco se il traffico non subisse modificazioni per effetto della segnalazione semaforica;
- il profilo OUT individua la distribuzione del traffico in uscita dall'arco;
- il profilo GO identifica la distribuzione del traffico in uscita dall'arco che si avrebbe se vi fosse un flusso sufficiente a saturare il verde.

Il traffico che alimenta un arco è ottenuto come un'opportuna frazione (calcolata in base alle informazioni sulle manovre) dei profili OUT degli archi a

monte di quello considerato. Il profilo del traffico entrante viene traslato nel tempo lungo l'attraversamento dell'arco e viene modificato per tener conto delle differenti velocità assunte dai singoli veicoli lungo la rete. Quest'ultimo fenomeno è noto come *dispersione* del plotone ed il TRANSYT ne tiene conto mediante la seguente formula:

$$q_{k+t}^1 = F \cdot q_t \cdot p + (1 - F) \cdot q_{k+t-1}^1 \quad \text{con} \quad F = \frac{1}{1 + 0.35t}$$

dove:

$q_k^1$  è il flusso nello step  $k$  del profilo IN

$q_k$  è il flusso nello step  $k$  del profilo OUT

$p$  è la proporzione del flusso del profilo OUT che entra nell'arco considerato

$t$  è pari a 0.8 volte il tempo medio di crociera (espresso in steps) calcolato sulla distanza per la quale la dispersione viene calcolata

$F$  è il fattore di dispersione.

Il numero di veicoli  $m_i$  in coda sull'attestamento durante l'intervallo  $i$  è definito dalla relazione:

$$\max \begin{cases} m_i = m_{i-1} + q_i - s_i \\ 0 \end{cases}$$

dove:

$q_i$  è il numero di veicoli in arrivo nell'intervallo  $i$  (dato dal profilo IN)

$s_i$  è il massimo numero di veicoli che possono attraversare l'attestamento nell'intervallo  $i$  (dato dal profilo GO).

Quindi il numero di veicoli che lasciano l'attestamento nell'intervallo  $i$  è:

$$m_{i-1} + q_i - m_i$$

da cui si determina il profilo OUT.

Il calcolo dei profili nel TRANSYT viene effettuato per due cicli: il primo ciclo ha lo scopo di ottenere il livello delle code da utilizzare come condizione iniziale per il secondo ciclo. Se la fine del secondo ciclo la coda è superiore a quella che si è ottenuta alla fine del primo ciclo, allora l'arco è in condizioni di sovrasaturazione. Si osserva che il modello semplifica il comportamento del traffico, ipotizzando che i veicoli lungo un arco della rete siano indisturbati fino al raggiungimento della linea d'arresto; se in questo punto il segnale è volto al rosso o vi è la presenza di una coda allora il veicolo in arrivo si arresta istantaneamente. Tale semplificazione non

compromette comunque il risultato del ritardo subito dal veicolo nell'intersezione che rimane lo stesso.

Il ritardo totale su ogni attestamento è calcolato sommando i ritardi di tutti i veicoli che utilizzano l'arco della rete nel periodo considerato. Il TRANSYT esprime il ritardo in pcu-h/h, dove l'unità pcu (passenger car unit) equivale alle autovetture equivalenti. Ciò significa che, per esempio, su un ciclo di 100 secondi, se 40 autovetture equivalenti subiscono un ritardo di 20 secondi ciascuna, il ritardo totale sarà pari a 800 pcu-sec per ogni ciclo, cioè 8 pcu-sec/sec o 8 pcu-h/h. Questo valore corrisponde numericamente al numero medio di vetture in coda durante il ciclo.

La lunghezza della coda è quindi stimata attraverso i profili IN, GO e OUT su ogni step del ciclo semaforico. Da ciò si ricava la lunghezza media della coda. Per archi sui quali i flussi in arrivo non superano la capacità degli archi stessi (il grado di saturazione è inferiore all'unità), questa coda media consente di calcolare il ritardo che subiscono i veicoli ad ogni ciclo con la distribuzione dei flussi in arrivo. Questo ritardo è chiamato *ritardo uniforme* o deterministico di sottosaturazione.

Se tuttavia l'arco è in condizioni di sovrasaturazione allora la coda media si incrementa ad ogni ciclo a causa dei veicoli che non riescono ad attraversare la linea d'arresto nel ciclo in corso. Ciò determina un'ulteriore componente di ritardo, *il ritardo deterministico di sovrasaturazione*, che è stimato dal TRANSYT come il valore medio della frazione di coda dovuta alle condizioni di sovrasaturazione, calcolata su tutto il periodo di tempo per il quale si ipotizza esistano tali condizioni. Si ricorda che tale coda è nulla all'inizio del periodo ed è pari al doppio della coda media alla fine.

Un ulteriore elemento del ritardo deve essere considerato: il flusso in arrivo non è sempre costante e pari a quello ipotizzato, ma ci sono delle variazioni ai valori dei flussi in arrivo che differiscono da ciclo a ciclo. Vi è quindi una componente stocastica del ritardo, dovuta principalmente a veicoli che non riescono accidentalmente ad attraversare la linea di arresto durante il periodo di verde. Il *ritardo stocastico*  $d_r$  è calcolato dal TRANSYT all'interno dell'espressione che stima il ritardo di sovrasaturazione  $d_{os}$ :

$$d_r + d_{os} = \frac{T}{4} \left\{ \left[ (f - F)^2 + \frac{4f}{T} \right]^{1/2} + (f - F) \right\} \quad [\text{pcu-h/h}]$$

dove

$f$  è il flusso medio in arrivo sull'arco considerato [pcu/h]

$F$  è il massimo flusso che può uscire dall'arco [pcu/h]

$T$  è la durata delle condizioni di flusso per la quale si effettua il calcolo [h]

Il ritardo totale è così stimato attraverso la somma delle tre componenti descritte. Con formulazioni analoghe il TRASNSYT consente di calcolare anche il numero di arresti che i veicoli subiscono su ogni attestamento, nonché il consumo di carburante.

Per consentire parzialmente di distinguere i veicoli in base alla provenienza ed alla destinazione mentre si analizza un arco, il TRANSYT offre la possibilità di creare fino a cinque archi che sono supportati dallo stesso ramo di arteria stradale. Mediante una distribuzione del verde, basata sulle frazioni di flusso in arrivo di ogni sotto-arco per ciascuno step di calcolo, il TRANSYT consente di superare alcuni evidenti squilibri dovuti alla distribuzione della domanda. Inoltre è possibile dedicare una classe di archi al trasporto pubblico, che viaggia con diverse velocità e diversi fattori di dispersione.

Infine il modello di traffico consente di rappresentare, sebbene in maniera piuttosto semplificata, le condizioni di attestamenti non semaforizzati e basati su regole di priorità.

### 2.3.2.2 La procedura di ottimizzazione

Il metodo di ottimizzazione dei segnali ricerca una configurazione ottimale dei parametri di regolazione che minimizzi un indice di efficienza  $PI$  (performance index). Tale indice è una misura della qualità del deflusso nell'intersezione ed è definito dalla somma del ritardo totale e del numero di arresti, pesati in maniera opportuna.

L'insieme ottimo dei segnali viene determinato mediante una procedura euristica di salita (*hill climbing*) a partire da una configurazione iniziale nota, che può essere stabilita per esempio con il metodo di Webster per ciascuna intersezione. In pratica sarebbe più corretto parlare in termini di procedura di discesa, poiché il TRANSYT cerca di minimizzare il valore di  $PI$ .

L'indice di efficienza è innanzitutto calcolato sulla base della temporizzazione semaforica iniziale. Quindi, il programma modifica l'offset di un nodo rispetto agli altri di un certo numero di steps e ricalcola il PI per la nuova configurazione. Se esso diminuisce allora l'offset dello stesso nodo viene traslato fino ad ottenere un valore minimo di PI. Se invece con la traslazione iniziale il PI aumenta, allora la procedura viene eseguita nell'altro senso. Questo viene fatto per ogni nodo con un ordine che può essere prestabilito e ripetuto un certo numero di volte, fino a raggiungere un valore minimo di PI.

Nel processo di ottimizzazione degli offsets i tempi di verde delle fasi semaforiche di ogni nodo rimangono invariate. Il TRANSYT prevede anche la possibilità di ottimizzare la durata delle fasi (sempre nel rispetto dei verdi minimi necessari) all'interno di ogni nodo, sempre con la finalità di ridurre l'indice di prestazione.

## 2.4 INTERSEZIONI COMPLESSE

Un'intersezione complessa è costituita da un insieme di nodi elementari collocati in un'area di ridotte dimensioni, all'interno della quale le limitate distanze tra segnali attraversati in successione da correnti veicolari comportano la presenza di forti interazioni. I percorsi seguiti dalle correnti veicolari in conflitto sono, infatti, più complessi che nel caso delle intersezioni semplici ed inoltre le ridotte distanze tra i nodi sono raramente sufficienti a garantire l'accumulo di code senza che queste influenzino gli attestamenti a monte (spill-back), portando al collasso l'intero sistema.

Le intersezioni complesse costituiscono spesso i punti critici dell'intera rete semaforizzata ed un'attenta analisi di queste è una condizione necessaria per un buon esito dell'intero sistema di controllo.

Nel caso di un'intersezione complessa semaforizzata, possiamo definire tre tipologie di segnali:

- *segnali di ingresso*, che sono quelli che per primi vengono affrontati dai veicoli che si approssimano all'intersezione;

- *segnali di uscita*, che sono gli ultimi che i veicoli affrontano nell'attraversare l'intersezione;
- *segnali interni*, che sono tutti gli altri segnali intermedi.

La definizione di intersezione complessa implica l'esistenza di almeno un segnale di uscita dall'intersezione che non sia anche un segnale di ingresso per la stessa. Equivalentemente ci deve essere almeno un segnale di ingresso che non sia contemporaneamente un segnale di uscita. Con queste premesse possiamo definire alcune caratteristiche che sono peculiari delle intersezioni complesse:

- l'area compresa nel nodo è caratterizzata da diversi ingressi ed uscite;
- ogni accesso è controllato da un segnale di ingresso;
- ogni uscita è controllata da un segnale di uscita (che non è escluso coincida con un segnale di ingresso);
- si possono identificare svariati flussi, ciascuno che parte da un segnale di ingresso e giunge ad un segnale di uscita;
- i flussi che attraversano l'intersezione affrontano generalmente più di un segnale;
- un singolo segnale può controllare più flussi con provenienze e destinazioni diverse;
- ci sono varie aree ristrette, dette *aree di conflitto*, all'interno del nodo complesso che sono impegnate da flussi diversi;
- ogni accesso alle aree di conflitto è controllato da un segnale.

La trattazione delle intersezioni complesse richiede quindi una particolare attenzione alle sue peculiarità. È evidente la differenza che tale trattazione richiede sia rispetto all'analisi delle intersezioni semplici, sia rispetto a quella sviluppata per le reti.

Le metodologie di analisi e valutazione sviluppate per le intersezioni semplici non sono sufficienti a rappresentare completamente i fenomeni che hanno luogo nelle intersezioni complesse. L'applicazione di queste metodologie a ciascuno dei nodi elementari costituenti un'intersezione complessa non consente infatti di considerare tutte le interazioni che si sviluppano tra essi.

Possono in certi casi essere invece utilizzate le metodologie sviluppate per le reti estese. Tuttavia le peculiarità delle intersezioni complesse suggeriscono lo sviluppo di metodi specifici per questa tipologia di intersezioni. Per esempio, da un

lato possono essere trascurati i fenomeni di dispersione lungo gli archi della rete, in virtù delle ridotte distanze tra segnali consecutivi (elemento non trascurabile nelle reti estese). Viceversa è necessario acquisire una più approfondita conoscenza sul comportamento dei veicoli che attraversano l'intersezione in termini di formazione delle code, ritardi e deflusso nelle aree di conflitto.

Come si è visto nei capitoli precedenti, i modelli sviluppati per reti estese e per intersezioni semplici sono ampiamente trattati in letteratura. Esistono invece pochi esempi di analisi specificatamente calibrate per i nodi complessi.

Un modello di questo tipo è stato sviluppato da Camus D'Amore e Ukovich (1982) per la determinazione del piano semaforico ottimo. Si propone di seguito una sintesi di questo modello.

#### 2.4.1 MODELLO DI OTTIMIZZAZIONE PER LE INTERSEZIONI COMPLESSE

In un nodo complesso il flusso massimo che può attraversare la linea di attestamento di ciascun segnale può dipendere anche dal tempo di verde di altri segnali dell'intersezione. Il modello introduce alcuni vincoli atti ad eliminare le interazioni ed a garantire la stabilità del sistema. Possiamo individuare due tipologie di vincoli:

- vincoli di stabilità interna, per cui la durata del verde dei segnali interni deve essere maggiore o eguale a quella necessaria per smaltire il flusso in arrivo;
- vincoli di disaccoppiamento, per cui la coda in corrispondenza a segnali interni non deve superare la capacità di accumulo.

Le principali conseguenze dell'impostazione proposta si ha che il flusso il flusso reale coincide con quello effettivo e che le quantità da ottimizzare sono legate alle variabili di controllo da relazioni lineari.

Si considerino i seguenti dati:

- $K$  insieme dei segnali dell'intersezione;
- $I \subset K$  insieme dei segnali di ingresso;
- $s_k$  flusso di saturazione del segnale  $k \in K$  [veic/h];
- $f_i$  flusso entrante nel segnale  $i \in I$  [veic/h];
- $\alpha_{i,k}$  percentuale del flusso entrante  $f_i$  diretta verso il segnale  $k \in K-I$ ;

- $q_k$  coda massima ammissibile sul segnale  $k \in K-I$  [m];
- $l_{j,k}$  distanza fra due segnali  $j, k \in K$  lungo un possibile percorso veicolare [m];
- $v_{j,k}$  velocità media lungo il percorso che collega  $j$  a  $k$  [km/h];
- $r_k$  durata minima del rosso del segnale  $k \in K$  [sec];
- $C$  durata del ciclo [sec];
- $[c_{j,k}]$  matrice dei tempi di sicurezza.

Sulla base di tali dati è possibile determinare alcuni altri elementi.

Il tempo  $t_{j,k}$  di percorrenza del percorso che collega il segnale  $j$  al segnale  $k$  (espresso in secondi) è definito dalla relazione:

$$t_{j,k} = l_{j,k} / v_{j,k}$$

La durata massima  $d_k^M$  del verde del segnale  $k \in K$  (espressa in secondi) è invece così determinata:

$$d_k^M = C - r_k$$

La durata minima  $d_k^m$  del verde del segnale  $k \in K$  (espressa in secondi) può essere definita con due espressioni, sulla base della stabilità del sistema:

$$d_k^m = \frac{C}{s_k} \cdot \sum_{i \in I} \alpha_{i,k} \cdot f_i \quad (\text{stabilità relativa})$$

$$d_k^m = \frac{C}{s_k} \cdot \sum_{i \in I} \alpha_{i,k} \cdot s_i \cdot d_i \quad (\text{stabilità assoluta})$$

Le variabili da ottimizzare nella regolazione dell'intersezione sono:

- $e_k$  istante di fine del verde del segnale  $k \in K$  [sec] all'interno del ciclo  $C$ ;
- $d_k$  durata del verde del segnale  $k \in K$  [sec];

Su tali variabili è necessario introdurre alcuni vincoli che si possono dividere in tre categorie: vincoli di durata, vincoli di conflitto e vincoli di coordinamento.

#### 2.4.1.1 Vincoli di durata

per ogni segnale  $k \in K$  deve essere:

$$d_k^m \leq d_k \leq d_k^M$$

### 2.4.1.2 Vincoli di conflitto

Per ogni coppia di segnali nemici  $j, k \in K$  devono essere soddisfatte le due relazioni:

$$e_k - d_k - e_j + a_{k,j} \cdot C \geq c_{j,k}$$

$$e_j - d_j - e_k + (1 - a_{k,j}) \cdot C \geq c_{k,j}$$

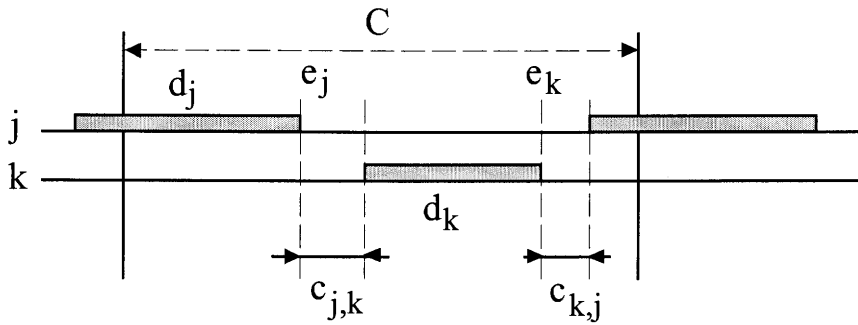


Figura 2.3 – Vincoli di conflitto.

Nelle quali è stata introdotta la variabile binaria  $a_{k,j}$ :

$$a_{k,j} = \begin{cases} 0 & \text{se } e_k > e_j \\ 1 & \text{se } e_k < e_j \end{cases}$$

### 2.4.1.3 Vincoli di coordinamento

Questi vincoli devono essere utilizzati per evitare la formazione di code eccessive all'interno del nodo.

Si pone:

$$e_k - e_j + b_{j,k} \cdot C \geq t_{j,k}$$

$$(e_k - d_k) - (e_j - d_j) + b_{j,k} \cdot C \leq t_{j,k} - h_{j,k}$$

con:

$$b_{j,k} = \begin{cases} 0 & \text{se } e_k > e_j \\ 1 & \text{se } e_k < e_j \end{cases}$$

e  $h_{j,k}$  il tempo necessario a smaltire la coda di veicoli provenienti da altri segnali.

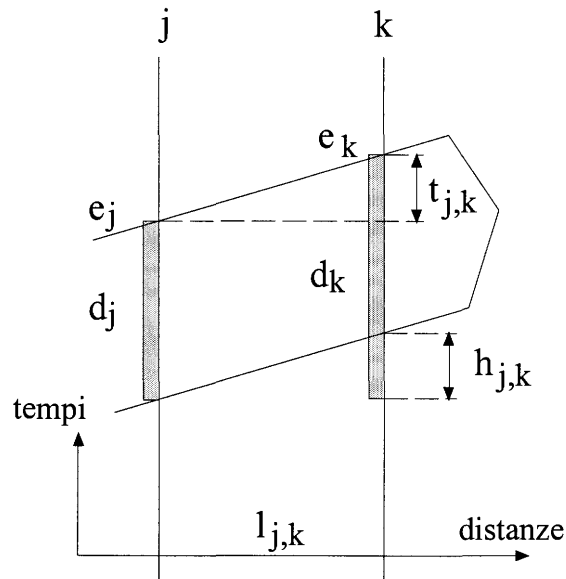


Figura 2.4 – Vincoli di coordinamento.

#### 2.4.1.4 Funzione obiettivo

Il modello introduce una funzione obiettivo che consenta di:

- massimizzare le durate dei verdi;
- ripartire il tempo di verde (per quanto possibile) proporzionalmente ai flussi;
- variare i pesi dei singoli segnali.

La funzione è così definita:

$$\Psi = \beta \cdot \sum_{k \in K} w_k \cdot d_k + \gamma \cdot F$$

dove  $w_k$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  sono opportuni coefficienti di peso e  $F$  è una variabile reale che consente di ottenere la ripartizione proporzionale sulla base di ulteriori vincoli aventi la forma seguente:

$$d_i - C \cdot \frac{f_i}{s_i} \cdot F \geq 0 \quad i \in I$$

Il modello consente di definire un problema di ottimizzazione a variabili miste lineari e intere che può essere risolto con i metodi comuni.

Sotto l'aspetto valutativo, si osserva che tale modello non prende in considerazione i ritardi che si accumulano nel nodo complesso. Emerge quindi la necessità di sviluppare un modello per le intersezioni complesse che riesca a valutare le prestazioni del nodo in funzione dei movimenti di traffico che si sviluppano al suo interno.

## *Capitolo Terzo*

# **IL MODELLO DI VALUTAZIONE PROPOSTO**

### **3.1 PREMESSA**

La scarsa attenzione prestata in letteratura alla valutazione delle prestazioni delle intersezioni di tipo complesso, considerate in quanto tali e non semplicemente come sottoinsieme delle reti semaforizzate, ha suggerito di approfondire l'argomento. Si è così sviluppato un algoritmo per la valutazione delle principali caratteristiche che possono determinare la valutazione delle prestazioni di tali nodi. Da un lato il modello proposto consente di individuare la lunghezza delle code che si formano ad ogni attestamento, così da evidenziare eventuali fenomeni di spill-back. Dall'altro il modello è in grado di valutare i ritardi che si sviluppano all'interno dell'intersezione. In particolare si fa riferimento alla componente deterministica del ritardo. Per quanto riguarda la parte stocastica, se ne può valutare l'effetto su ciascun attestamento, utilizzando le metodologie esistenti; si può comunque prescindere, per gli attestamenti interni, dalla valutazione degli effetti dei fenomeni di sovrasaturazione, che, nelle intersezioni complesse, dovrebbero essere confinati sugli accessi.

La valutazione dei ritardi è condotta in modo tale da consentire una precisa valutazione sia di ciò che accade in corrispondenza di ciascun segnale, sia dei ritardi subiti da ogni singola corrente veicolare che attraversa il nodo. Grazie alla struttura del modello è possibile valutare l'effettivo livello di servizio del nodo.

Si analizza nel seguito la struttura del modello proposto, le ipotesi da cui prende piede ed i processi che utilizza, fino a comprendere i vantaggi che offre rispetto alle metodologie tradizionali.

Successivamente si propone un capitolo che analizza con maggiore precisione i principali algoritmi utilizzati dal modello. Infine si esplicita il funzionamento di un software che è stato ricavato, sulla base delle metodologie esposte, per la valutazione delle prestazioni delle intersezioni complesse

## 3.2 IL MODELLO

Il modello proposto è di tipo mesoscopico: infatti, il flusso viene descritto sulla base del comportamento di singoli plotoni di veicoli che si muovono lungo la rete che determina il nodo complesso. I plotoni in arrivo agli accessi del nodo si suddividono in funzione delle destinazioni verso cui sono diretti ed in funzione degli eventi cui sono soggetti (per esempio, un plotone può non attraversare completamente un attestamento nel tempo di verde ed alcuni veicoli possono essere costretti ad attendere il verde del ciclo successivo). I plotoni che si suddividono formano a loro volta nuovi plotoni che si spostano sulla rete. E così via finché i plotoni abbandonano il nodo.

La valutazione dei ritardi segue l'impostazione classica, strutturata per le intersezioni semplici (come si è visto nel modello dell'HCM) e basata sui flussi di saturazione e sui tempi di verde. L'analisi è però integrata dalla conoscenza delle caratteristiche dei percorsi di attraversamento del nodo e dei flussi che li percorrono.

Poiché il comportamento dei plotoni viene descritto sulla base degli istanti di tempo che ne variano le caratteristiche, l'analisi viene dunque condotta con un modello di tipo discreto attraverso gli eventi che modificano lo stato del sistema.

Si rileva che il modello è in grado di "seguire" i plotoni lungo il nodo, al fine di riconoscere con precisione i ritardi e le code cui sono soggetti. L'importanza di questo fatto può essere meglio compresa con un esempio. Con riferimento alla figura 3.1, si ipotizzi l'esistenza di due origini di spostamento:

- $O_1$  il cui flusso è destinato completamente alla destinazione  $D_1$

- $O_2$  il cui flusso è destinato completamente alla destinazione  $D_2$

Si ipotizzi inoltre che i due flussi di traffico siano della medesima intensità. I flussi si incontrano in corrispondenza dell'attestamento  $A$  e si dirigono seguendo lo stesso percorso verso l'attestamento  $B$ . Se a questo punto non si tiene in considerazione l'origine dei flussi che percorrono l'arco  $AB$  si procederebbe suddividendo il flusso totale in due parti uguali verso le destinazioni  $D_1$  e  $D_2$ , ripartendo allo stesso modo i ritardi subiti. È evidente invece come l'ordine di arrivo in  $B$  in funzione delle due destinazioni possa influenzare fortemente i ritardi cui sono sottoposti i flussi e la definizione delle eventuali onde verdi per i flussi che si vogliono considerare prioritari. Tutto ciò, che possiamo chiamare come “il problema della doppia Y”, è preso in considerazione dal modello che qui si propone.

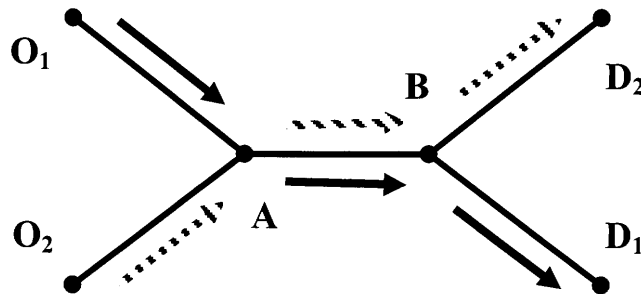


Figura 3.1 – Problema della doppia Y.

In questo modo è possibile valutare con precisione i ritardi subiti da tutti i plotoni di veicoli in base alla loro origine e destinazione. Per ogni coppia O/D si ottiene così un livello di servizio. Questo livello di servizio può essere aggregato per ottenere quello relativo ad ogni accesso, e, con un'ulteriore aggregazione il livello di servizio di tutto il nodo.

### 3.2.1 IPOTESI

Il modello considera alcune ipotesi relative alla struttura dei dati di Input ed al movimento dei veicoli all'interno del nodo.

Per quanto riguarda il piano semaforico, i tempi di verde forniti al modello sono considerati come tempi di verde *efficace*. Quindi non si prendono in considerazione i perditempo di avviamento e quelli che si formano a fine verde. Si considera inoltre che tutti i nodi elementari del nodo complesso siano semaforizzati e che tutti i segnali abbiano un ciclo semaforico comune.

Per quanto riguarda i valori dei flussi di calcolo, per ogni corrente di traffico che si sposta tra due segnali o effettua delle manovre in corrispondenza di un nodo, il flusso è assunto noto e costante sul periodo di analisi. Si considera inoltre il flusso espresso in autovetture equivalenti (*pcu*).

Riguardo al movimento dei veicoli si ipotizza che questi si spostino in platon lungo gli archi della rete. In virtù delle brevi distanze tra segnali consecutivi, lo spostamento è di tipo rigido e si trascura il fenomeno della distorsione dei platon lungo gli archi. Il moto dei veicoli, come nel caso del TRANSYT, è considerato immediatamente a regime nella fase di avviamento e si mantiene indisturbato fino al raggiungimento della linea d'arresto; se in questo punto il segnale è volto al rosso o vi è la presenza di una coda allora il veicolo in arrivo si arresta istantaneamente. Tale semplificazione non compromette comunque il risultato del ritardo subito dal veicolo nell'intersezione che rimane lo stesso. Con queste premesse è evidente che la velocità che si ipotizza venga utilizzata per percorrere gli archi del nodo deve tener conto dei perditempo.

Il ritardo stimato dal modello è di tipo deterministico: esso è calcolato in corrispondenza di ciascun segnale, mantenendo separati i contributi dovuti alle singole correnti veicolari. Non si considera invece la componente stocastica.

La determinazione della frazione stocastica del ritardo può essere effettuata su ciascun attestamento utilizzando le metodologie esistenti; come si è detto si può comunque prescindere, per gli attestamenti interni dei nodi complessi, dalla valutazione degli effetti dei fenomeni di sovrasaturazione, che sono confinati sugli accessi.

### 3.2.2 DATI NECESSARI E NOTAZIONI

Il modello richiede i seguenti dati relativi al piano semaforico e alle caratteristiche del nodo complesso:

- $C$ , durata del ciclo semaforico;
- $K$ , insieme dei segnali del nodo complesso;
- $O \subset K$ , insieme dei segnali di ingresso (origini);
- $s_k$ , flusso di saturazione del segnale  $k \in K$ ;
- $gs_k$ , istante di inizio del verde efficace  $k \in K$ ;
- $ge_k$ , istante di fine del verde efficace  $k \in K$ .
- $v$ , velocità media di percorrenza degli archi della rete;

Per quanto riguarda la geometria dell'intersezione, è necessario definire una matrice  $T = \{t_{ij}\}$  di topologia della rete con un numero di righe e di colonne pari alla cardinalità dell'insieme  $K$ . Gli elementi di tale matrice sono così definiti:

- $t_{ij}$  = lunghezza dell'arco  $(i,j)$ , se esiste, con  $i,j \in K$ ;

E' poi necessario specificare la matrice  $R = \{r_{oj}\}$  di ripartizione dei flussi lungo la rete. La matrice  $R$ , che ha un numero di righe pari ai segnali di ingresso e un numero di colonne pari al numero dei segnali interni e di uscita, è definita in modo che sia:

- $r_{oj}$  = frazione di  $f_o$  diretta al segnale  $j$ , con  $o \in O$  e  $j \in (K-O)$ .

Infine, per una generica sezione stradale  $k$  su cui transita un plotone  $i$  si definisce:

- $ps_i(k)$ , istante in cui il primo veicolo del plotone  $i$  raggiunge la sezione;
- $pe_i(k)$ , istante in cui l'ultimo veicolo del plotone  $i$  raggiunge la sezione;
- $qe_i(k)$ , l'istante in cui l'ultimo veicolo del plotone  $i$  supera la sezione;
- $f_i(k)$ , intensità del flusso del plotone  $i$ , considerata costante nell'intervallo temporale  $(ps_i, pe_i)$ .

Per quanto riguarda i flussi di ingresso essi sono distribuiti lungo il tempo di ciclo in maniera uniforme, in mancanza di altre indicazioni. Sono perciò assimilati ad un plotone  $i$  in arrivo all'attestamento  $k$  con le seguenti caratteristiche:

- $ps_i(k) = 0$
- $pe_i(k) = C$
- $f_i(k) = f$  (flusso di ingresso)

### 3.2.3 PLOTONI

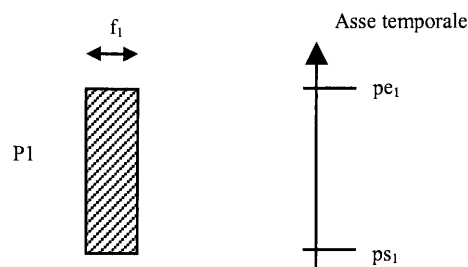
L'analisi del comportamento del nodo si effettua considerando come unità elementare di traffico il plotone. Per una generica sezione stradale, un plotone viene definito da tre elementi principali:  $ps_i$ ,  $pe_i$ ,  $f_i$ .

Dal punto di vista grafico, un plotone può quindi essere visualizzato come una barra disposta lungo l'asse temporale, i cui punti estremi coincidono con gli istanti  $ps_i$  e  $pe_i$ , mentre lo spessore della stessa è proporzionale all'intensità del flusso del plotone (figura 3.2).

Accanto alle caratteristiche principali, il plotone ad ogni segnale registra le caratteristiche della coda che esso forma in corrispondenza dell'attestamento. Per la struttura del modello che si vedrà in seguito, sono necessari soltanto 5 punti per definire completamente il profilo della coda di ciascun plotone lungo il tempo di ciclo.

Infine, poiché il plotone può essere composto da veicoli aventi provenienze differenti, per ogni provenienza viene identificata la quota di intensità del flusso del sottoplotone rispetto al plotone completo e la quota di ritardo che allo stesso sottoplotone compete.

Per semplicità di esposizione, nella spiegazione del modello per identificare un plotone si farà nel seguito riferimento ai soli istanti :  $ps_i$ ,  $pe_i$ , e  $f_i$ , pur ricordando che altri elementi consentono di definire compiutamente il plotone.



**Figura 3.2 – Rappresentazione di un plotone.**

Trascurando il fenomeno della dispersione lungo un arco percorso da un plotone, esso si sposta rigidamente da un segnale all'altro. Graficamente, il rettangolo che rappresenta il plotone non cambia dimensioni ma trasla lungo l'asse del tempo.

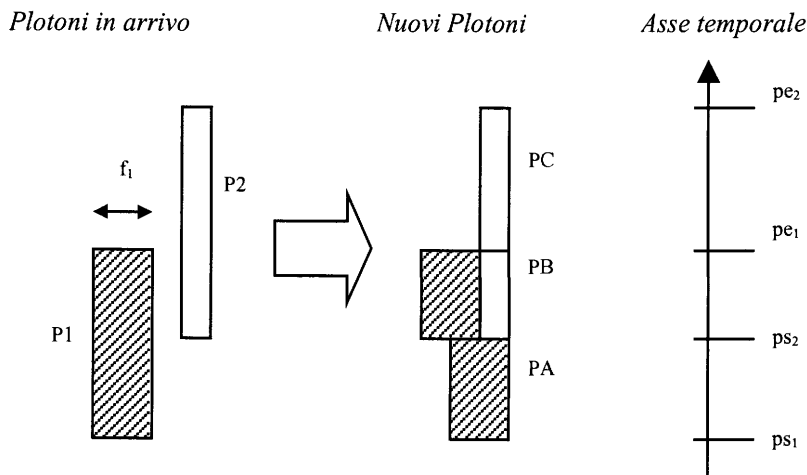
Le modifiche delle caratteristiche dimensionali dei plotoni si hanno invece per i fenomeni di distorsione in corrispondenza dei segnali semaforici, i quali costituiscono il nucleo centrale del modello.

### 3.2.4 ANALISI DEL SEGNALE

Il comportamento dei plotoni che attraversano il nodo complesso è determinato per mezzo dell'analisi di ciò che si verifica a livello di ciascun segnale. Tale analisi può essere suddivisa in tre parti: calcolo dei plotoni in arrivo, analisi delle code e dei ritardi, calcolo dei plotoni in partenza.

#### 3.2.4.1 Calcolo dei plotoni in arrivo

Quando un plotone raggiunge un segnale può accadere che si sovrapponga (in parte o completamente) ad un plotone che ha una diversa provenienza. Il caso non è frequente, perché generalmente i segnali di provenienza dei due plotoni sono in conflitto e pertanto il piano semaforico non assegna il verde contemporaneamente ad entrambi.



**Figura 3.3 – Formazione dei plotoni compositi.**

Tuttavia il fenomeno non si può escludere: è il caso, per esempio, di una confluenza che prevede la possibilità di arrivi contemporanei sui due tronchi che la costituiscono. Se ciò si verifica, indicando con i pedici 1 e 2 gli elementi che

caratterizzano i due plotoni in arrivo, in modo che sia  $ps_1 < ps_2$ , essi vengono suddivisi, nel caso più generale, nei seguenti nuovi plotoni:

plotone  $A$ :

$$\begin{cases} ps_A = ps_1 \\ pe_A = ps_2 \\ f_A = f_1 \end{cases}$$

plotone  $B$ :

$$\begin{cases} ps_B = ps_2 \\ pe_B = \min(pe_1, pe_2) \\ f_B = f_1 + f_2 \end{cases}$$

plotone  $C$ :

$$se \ pe_1 \leq pe_2 \begin{cases} ps_C = pe_1 \\ pe_C = pe_2 \\ f_C = f_2 \end{cases} \quad altrimenti \begin{cases} ps_C = pe_2 \\ pe_C = pe_1 \\ f_C = f_1 \end{cases}$$

Il plotone  $B$ , che è composto dall'area di sovrapposizione dei due plotoni, è detto plotone composito.

Come si è anticipato, il modello prevede che tale plotone conservi, oltre alle sue caratteristiche globali (estremi temporali e intensità), anche le informazioni relative ai sottoplotoni che lo costituiscono.

La figura 3.3 sintetizza le operazioni compiute in presenza di plotoni sovrapposti. Nell'esempio in figura si suppone che sia  $pe_2 > pe_1$ .

Il procedimento può essere facilmente esteso al caso di sovrapposizione di 3 o più plotoni.

Qualora per un plotone in arrivo  $i$  al segnale  $k$  sia  $ge_k \in [ps_i, pe_i]$ , allora il plotone viene spezzato in due nuovi plotoni  $A$  e  $B$ :

$$\begin{cases} ps_A = ps_i \\ pe_A = ge_k \\ f_A = f_i \end{cases} \quad \begin{cases} ps_B = pe_k \\ pe_B = pe_i \\ f_B = f_i \end{cases}$$

Grazie a queste elaborazioni, trasladando inoltre la posizione dei plotoni e del tempo di verde del segnale  $k$  in modo che sia  $ge_k = C$ , è ora possibile disporre i plotoni in ordine temporale lungo il tempo di ciclo.

### 3.2.4.2 Analisi delle code e dei ritardi

I plotoni in arrivo ad un segnale sono ordinati in base valore dell'istante  $ps$  di arrivo sulla linea di arresto. Per effetto delle elaborazioni precedenti, i plotoni sono disposti in ordine temporale e non sovrapposti.

Il comportamento dei plotoni ad ogni segnale  $k$  è determinato sulla base dell'intensità di flusso dei plotoni e del flusso di saturazione  $s_k$  del segnale, nonché in base agli istanti (all'interno del ciclo) in cui si verifica un certo "evento". Gli eventi che possono verificarsi ad un segnale  $k$  sono:

- l'inizio ( $gs_k$ ) e la fine ( $ge_k$ ) del tempo di verde;
- gli istanti  $ps_i$  e  $pe_i$  di ogni plotone  $i$  in arrivo;
- gli istanti  $qe_i$  in cui l'ultimo veicolo di ogni plotone  $i$  attraversa la linea di arresto.

Il tempo di ciclo semaforico è così suddiviso nei soli intervalli intercorrenti tra un evento e l'altro.

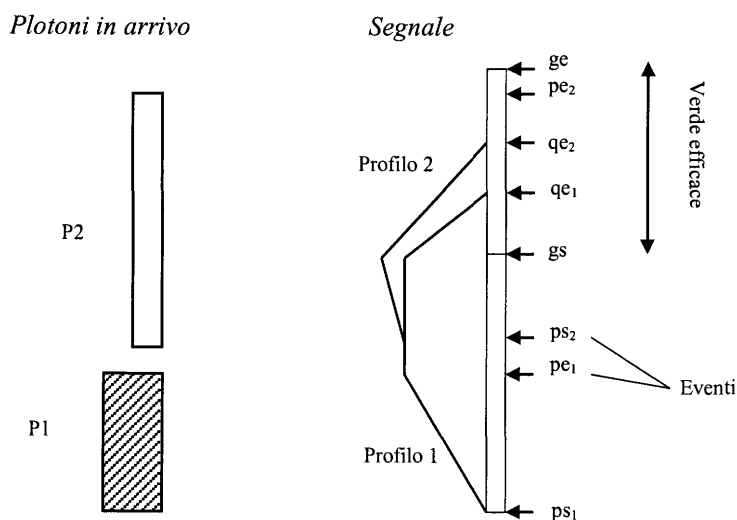


Figura 3.4 – Profili delle code.

Sulla base delle condizioni di afflusso e deflusso di ogni intervallo temporale si calcolano i profili delle code. Precisamente, si definiscono sul tempo di ciclo le funzioni  $dp_i(t)$ , relativa al plotone  $i$ , e  $ds_i(t)$ , relativa alle condizioni di saturazione del segnale  $k$  ed agli effetti prodotti da un eventuale plotone precedente  $i-1$  (quando  $i > 1$ ):

$$dp_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{per } t < ps_i \\ f_i \cdot t & \text{per } ps_i \leq t \leq pe_i \\ f_i (pe_i - ps_i) & \text{per } t > pe_i \end{cases}$$

$$ds_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{per } t < \max(gs_k, qe_{i-1}) \\ s_k \cdot t & \text{per } \max(gs_k, qe_{i-1}) \leq t \leq ge_k \end{cases}$$

La lunghezza  $q_i$  della coda formata dal plotone  $i$  è pari a:

$$q_i(t) = \max \{0, \psi_i(t)\}$$

con:

$$\psi_i(t) = \begin{cases} dp_i(t) & \text{per } t \leq \max(gs_k, ps_i) \\ dp_i(t) - ds_i(t) & \text{altrimenti} \end{cases}$$

L'istante  $qe_i$  ( $qe_0 = 0$ ), in cui l'ultimo veicolo in coda del plotone  $i$  attraversa la linea di arresto (smaltimento della coda), è determinato con considerazioni geometriche, in base alla seguente formula:

$$qe_i = t_{x-1} + (t_x - t_{x-1}) \cdot \psi_i(t_{x-1}) / (\psi_i(t_{x-1}) - \psi_i(t_x))$$

dove  $t_x$  rappresenta il primo evento in cui la funzione  $\psi_i$  assume un valore negativo e  $t_{x-1}$  l'evento precedente.

Si osservi che la condizione di raggiungimento del punto di smaltimento della coda del plotone è “quasi” necessaria per la stabilità del sistema che deve trovarsi in condizione di sottosaturazione. Tranne in un caso: può accadere che alla fine del tempo di verde (e quindi alla fine del tempo di ciclo) vi sia una coda residua dovuta ed il segnale si trovi comunque in condizioni di sottosaturazione. Questo si verifica in presenza di uno o più plotoni in arrivo con un'intensità di flusso superiore al flusso di saturazione del segnale (condizione necessaria ma non sufficiente per trovarsi nel caso in esame) che non riescono ad essere “smaltiti” prima della fine del verde.

Si pensi, per esempio, al caso di un plotone di forte intensità di flusso in arrivo quando il tempo di verde sta esaurendosi. In questo caso i veicoli residui si ripercuotono anche sulle code ed i ritardi dei plotoni in arrivo al ciclo successivo. Per questo motivo, nel caso di coda residua a fine verde, il modello prevede di rifare i

calcoli per un altro ciclo. in questa seconda analisi la coda residua a fine ciclo non può aumentare: se così fosse l'incremento della coda residua si ripercuoterebbe ad ogni ciclo sui plotoni in arrivo e verrebbe ad incrementarsi ancora e, quindi, il sistema di troverebbe in condizioni di sovrasaturazione.

Il profilo della coda totale che si sviluppa al segnale è immediatamente determinabile come somma dei profili di ciascun plotone. Si può verificare che in generale sono sufficienti quattro punti a definire completamente la coda. Un esempio grafico è riportato in figura 3.4. Solo per definire la coda dell'eventuale plotone che non riesce a passare completamente la linea di arresto prima della fine del verde sono necessari 5 punti.

Per quanto riguarda la valutazione dei ritardi, è di verifica immediata che il ritardo subito da ciascun plotone è individuato dall'area sottesa dal proprio profilo. Si osservi che con questo procedimento è possibile distinguere i ritardi subiti da ciascun plotone e memorizzarli nei dati del plotone stesso.

### 3.2.4.3 Calcolo dei plotoni in partenza

In base all'ordine di arrivo dei plotoni e al profilo delle code, si determinano i plotoni che attraversano l'attestamento durante il tempo di verde.

In particolare, se è  $qe_i > ps_i$ , il plotone  $i$  è soggetto al fenomeno della distorsione e le sue caratteristiche sono modificate durante l'attraversamento del segnale in base al procedimento che segue.

Se  $qe_i \geq pe_i$ , allora il plotone  $i$  uscente ha le seguenti caratteristiche:

$$\begin{cases} ps_i = \max(ps_i, qe_{i-1}) & \text{con } q_0 = gs_k \\ pe_i = qe_i \\ f_i = s_k \end{cases}$$

Se invece  $q_i < pe_i$ , allora il plotone  $i$  viene a sua volta scomposto in due plotoni  $i_1$  e  $i_2$ . Il primo con i parametri del caso precedente, il secondo con le seguenti caratteristiche:

$$\begin{cases} ps_{i2} = qe_i \\ pe_{i2} = pe_i \\ f_{i2} = f_i \end{cases}$$

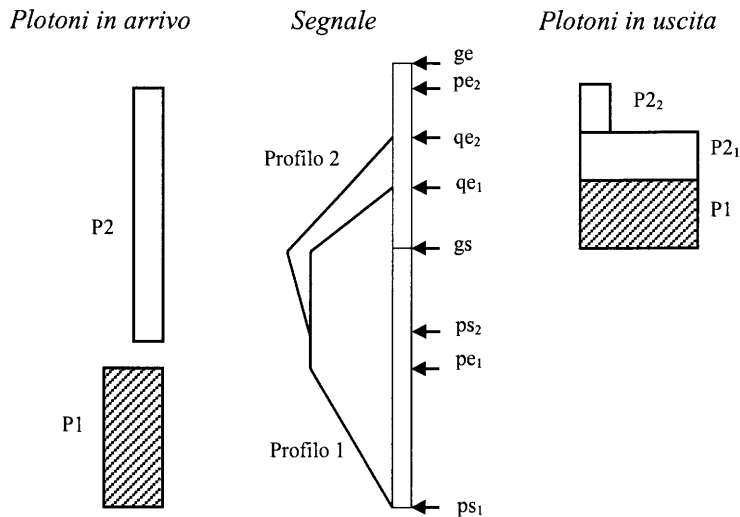


Figura 3.5 – Determinazione dei plotoni in uscita da un segnale.

Una rappresentazione della distorsione è evidenziata nella figura 3.5.

Nel caso di plotoni composti, l'intensità del flusso calcolato in uscita deve essere opportunamente ripartita in base alla composizione del plotone stesso.

### 3.2.5 LA STRUTTURA DEL MODELLO

Dopo aver esaminato il nucleo centrale del modello, è ora possibile specificare come viene svolta l'analisi globale del nodo complesso. La struttura del modello è di tipo iterativo.

Tutti i segnali della rete sono analizzati in un ordine qualsiasi. Per prendere in esame la dinamica di un segnale è necessario innanzi tutto determinare i flussi in arrivo al segnale in questione. Se questo è un segnale di ingresso, viene semplicemente definito un plotone in arrivo, distribuito su tutto il ciclo sulla base del flusso definito dai dati di ingresso. Se invece il segnale è un segnale interno o di uscita, in base alla matrice che definisce la rete, si identificano tutti i segnali da cui si diparte un arco della rete verso il segnale analizzato. L'insieme di questi segnali è noto come *back-star* del segnale.

Per ogni segnale appartenente alla back-star si controllano i plotoni in uscita da questo (se esistono) e, in base alla matrice di ripartizione dei flussi, si determina la frazione di ogni plotone che è destinato al segnale in esame. I plotoni sono traslati lungo la rete sulla base della velocità di percorrenza e della lunghezza degli archi, raggiungendo così il segnale analizzato. Si procede quindi con l'analisi del segnale in base alla metodologia esposta nei paragrafi precedenti, determinando così i plotoni in uscita.

Quando si sono considerati tutti i segnali del nodo complesso, si verifica se i plotoni in ingresso ed in uscita di ogni segnale sono rimasti invariati rispetto all'iterazione precedente. Nel primo ciclo ovviamente i plotoni in ingresso ed in uscita relativi all'iterazione precedente inesistente sono tutti nulli. Se non vi sono variazioni l'analisi è terminata, altrimenti il ciclo viene ripetuto. Generalmente si ha la convergenza dopo poche iterazioni.

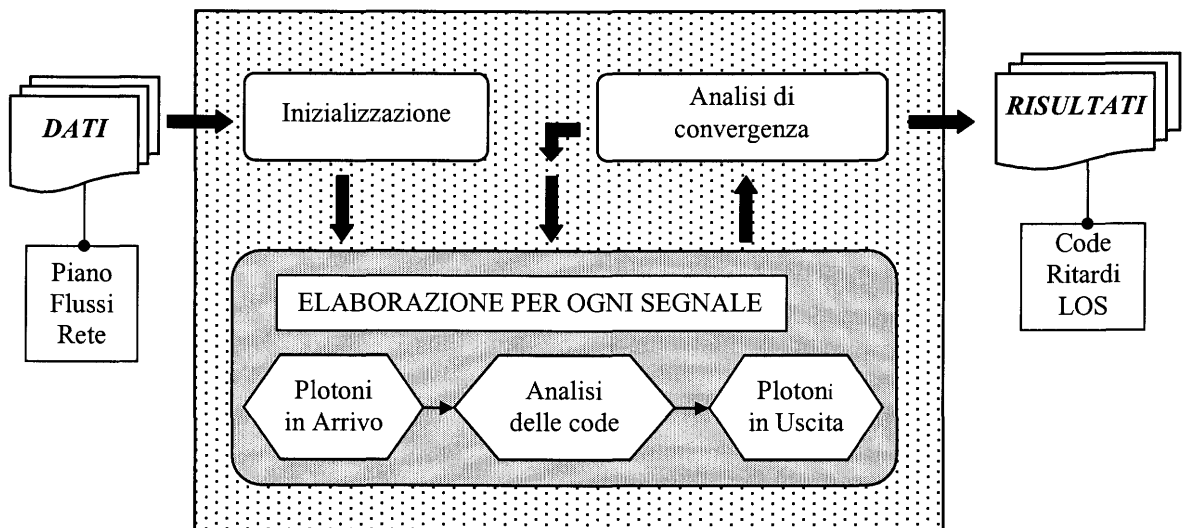


Figura 3.6 – Schema del funzionamento del modello.

Il metodo iterativo non sarebbe necessario se, prendendo in esame un segnale, si fosse certi che tutti i plotoni che potrebbero interessare l'attestamento considerato fossero già stati calcolati. In poche parole se fosse possibile definire univocamente un ordine di analisi dei segnali. Questo è vero solo nell'ipotesi di reti con unicamente cammini aperti, mentre la presenza di percorsi chiusi, come per esempio nel caso di

rotatorie semaforizzate, rende necessario l'utilizzo del procedimento iterativo, non essendo possibile stabilire un ordine dei segnali.

Il funzionamento del modello è schematizzato in figura 3.6.

Quando il ciclo iterativo ha termine, i plotoni in uscita dall'intersezione sono quelli definitivi. In base alle caratteristiche di questi si calcolano code e ritardi nel nodo, nonché il livello di servizio dell'intersezione complessa.

### 3.2.6 LA VALUTAZIONE DEL LIVELLO DI SERVIZIO

I plotoni sono strutturati in modo tale che, quando attraversano l'ultima linea di arresto dell'intersezione, è possibile riconoscere le code ed i ritardi che gli stessi hanno subito nell'attraversamento del nodo. Se si aggregano i plotoni uscenti in modo da considerare tutto il flusso che si muove su una determinata coppia origine/destinazione, è possibile valutare il ritardo medio subito dai veicoli che affrontano l'intersezione spostandosi lungo detta coppia origine/destinazione. L'eventuale esistenza di plotoni composti non crea problemi nella valutazione dei ritardi come sopra esposto, poiché le informazioni sui sottoplotoni componenti sono conservate dal modello.

Dal ritardo medio possiamo quindi ricavare il livello di servizio del collegamento considerato.

Aggregando ulteriormente i plotoni delle varie coppie origine/destinazione sulla base dell'origine del flusso, è possibile valutare il livello di servizio di ogni singolo accesso. In pratica l'intersezione complessa è stata ridotta ad un'intersezione semplice equivalente, formata dai soli accessi. Le valutazioni sul livello di servizio sono ora comparabili con il metodo proposto dall'HCM per le intersezioni semplici.

Con un'ultima aggregazione completa si può definire il livello di servizio di tutto il nodo complesso.

Si è visto che il livello di servizio può essere direttamente correlato alla valutazione dei ritardi. Precisamente, ogni livello di servizio è associato ad un intervallo di ritardi espressi in secondi per veicolo. I limiti di detti intervalli sono definiti per le intersezioni semplici dall'HCM. Nel caso di nodi complessi gli stessi intervalli potrebbero non essere considerati adeguati. Se, per esempio, un ritardo di 80 secondi potrebbe essere considerato non accettabile nel caso di un'intersezione

semplice, tale valore potrebbe essere indice di un buon livello di servizio per un nodo il cui i veicoli che lo attraversano sono costretti al superamento di 5 o 6 linee di arresto. Argomentazioni di questo tipo portano alla necessità di ridefinire i limiti temporali dei diversi livelli di servizio nel caso dei nodi complessi. Si può ipotizzare che questi limiti possano essere in qualche modo messi in relazione con il numero di attestamenti che i veicoli devono superare per attraversare il nodo. Tuttavia, in mancanza di uno studio ad hoc, al fine di evitare una suddivisione dei livelli di servizio troppo arbitraria e discrezionale, si è scelto di utilizzare i valori proposti dall’HCM, che consentono, tra l’altro, un confronto diretto con le intersezioni semplici.

A questo proposito si rileva che gli estremi degli intervalli, che definiscono i livelli di servizio delle intersezioni elementari, sono stati recentemente modificati nella versione dell’Highway Capacity Manual del 1997. Tali intervalli sono stati ampliati, quasi a testimoniare che il livello di accettazione del ritardo da parte degli utenti si è adattato ai livelli di traffico attuali. In pratica, a parità di livello di servizio, l’utente accetta un’attesa superiore a quella di un tempo. Tuttavia si può anche ragionevolmente sostenere che l’ampliamento dei limiti sia dovuto alla necessità di adattare la classificazione ai livelli di congestione attuali, in modo da evitare l’appiattimento dei livelli di servizio verso valori scadenti.

### **3.3 GLI ALGORITMI**

Si riportano di seguito alcuni algoritmi sviluppati per implementare il modello esposto. Lo scopo di questi paragrafi è quello di esplicitare il metodo con cui si sono tradotte in algoritmo le considerazioni teoriche esposte; allo stesso tempo, si vuole evidenziare come sono stati risolti alcuni problemi concettuali in fase di implementazione del programma. Non si vuole quindi fornire la rassegna completa degli algoritmi sviluppati, ma si riportano unicamente quelli ritenuti più significativi.

### 3.3.1 LA PROCEDURA AGGIUNGI-PLOTONE

Nell'analisi delle dinamiche che si sviluppano in corrispondenza di ciascun segnale, è necessario cercare nella back-star del segnale i plotoni che sono destinati al segnale corrente. Ogni qualvolta si identifica un plotone di questo tipo, lo stesso viene aggiunto ai plotoni già fissati sul segnale corrente. L'aggiunta di un plotone tra quelli in ingresso genera una casistica che include anche la formazione di uno o più plotoni composti e che dipende dalle caratteristiche del plotone in arrivo e di quelle degli altri già presenti. Può infatti accadere che il plotone in arrivo si sovrapponga (anche solo parzialmente) ad uno o più plotoni presenti.

Si indichi con  $[S_N, E_N]$  l'intervallo che identifica gli estremi del plotone in arrivo  $N$ , e con  $[S_I, E_I]$  quello relativo al generico plotone  $I$  già presente sul segnale corrente tra gli  $NP$  presenti. Poiché i tempi di verde del segnale sono traslati in modo tale che sia  $E_V=C$ , si considera il solo caso per cui è  $S_N < E_N$ , perché se così non è si ha che il plotone in arrivo è “a cavallo” dell'istante di fine verde e viene quindi scomposto come si è già spiegato.

In ordine temporale rispetto al tempo di ciclo i plotoni presenti sull'attestamento sono scanditi e aggiunti nella nuova lista definitiva che identifica i plotoni in arrivo al segnale corrente (d'ora in poi indicata semplicemente con  $PlotIN$ ), fino a quando viene trovato un plotone  $I$  tale che:

$$S_N < E_I$$

Se non si verifica questa condizione, significa che il plotone in arrivo è preceduto completamente da tutti quelli presenti e viene semplicemente aggiunto in coda alla  $PlotIN$  con gli estremi  $[S_N, E_N]$ , mantenendo inalterate le altre caratteristiche. Per indicare ciò si utilizza la notazione:

$$[S_N, E_N] - \text{puro } N.$$

D'ora in poi si utilizza questa notazione semplificata. Se invece si vuole indicare un plotone  $K$  composto dei plotoni  $I$  e  $N$  si utilizzerà la notazione:

$$[S_K, E_K] - \text{composito } IN.$$

Con  $S_N < E_I$  l'algoritmo prosegue con i seguenti passi:

Step 0: si pone un contatore  $cont=0$

Step 1: se  $S_N < S_I$  si possono presentare due casi:

- $E_N \leq S_I$  nel qual caso si aggiunge alla PlotIN il plotone  $[S_N, E_N]$ - *puro N* e si va allo step 6
- $E_N > S_I$  nel qual caso si aggiunge alla PlotIN il plotone  $[S_N, E_I]$ - *puro N* e si va allo step 3

Step 2: se  $S_N \geq S_I$  si aggiunge alla PlotIN il plotone  $[S_I, S_N]$ - *puro N*

Step 3: si considerano i seguenti casi:

- $E_I < E_N$  nel qual caso se  $cont=0$  si aggiunge alla PlotIN il plotone  $[\max(S_I, S_N), E_I]$ - *composito IN*, altrimenti si aggiunge alla PlotIN il plotone  $[S_I, E_I]$ - *composito IN*
- $E_I \geq E_N$  nel qual caso se  $cont=0$  si aggiunge alla PlotIN il plotone  $[\max(S_I, S_N), E_N]$ - *composito IN*, altrimenti si aggiunge alla PlotIN il plotone  $[S_I, E_N]$ - *composito IN*. Infine si aggiunge il plotone  $[E_N, E_I]$ - *puro I* e si va allo step 6

Step 4: se  $I=NP$  allora si aggiunge alla PlotIN il plotone  $[E_I, E_N]$ - *puro N* e si va allo step 6

Step 5: si valuta la posizione di  $E_N$  rispetto il punto  $S_{I+1}$ :

- $S_{I+1} < E_N$  nel qual caso si aggiunge alla PlotIN il plotone  $[E_I, S_{I+1}]$ - *puro N* (se è  $E_I < S_{I+1}$ ). Quindi si aggiorna il contatore  $cont=cont+1$ , si pone  $I=I+1$  e si va torna allo step 3
- $S_{I+1} \geq E_N$  nel qual caso si aggiunge alla PlotIN il plotone  $[E_I, E_N]$ - *puro N* e si va allo step 6

Step 6: per i valori di  $K$  che vanno da  $I+1$  a  $N_P$  si aggiunge alla PlotIN il plotone  $[E_K, E_K]$ - *puro K*

A questo punto il nuovo plotone è correttamente inserito, eventualmente anche con la creazione di altri plotoni compositi, tra quelli in arrivo al segnale in esame.

### 3.3.2 LA PROCEDURA ANALISI-SEGNALE

Dopo aver completato la PlotIN dei plotoni in arrivo ad un determinato segnale  $S$ , è necessario esaminare come i plotoni interagiscono tra loro e con quali

caratteristiche attraversano la linea di attestamento del segnale in esame. Si ricorda che nell'analisi del segnale  $S$  l'asse dei tempi è traslato in modo che l'istante di fine verde coincida con il tempo di ciclo. Per il segnale in esame sono definiti l'istante di inizio del tempo di verde  $SV$ , l'istante di fine verde  $EV=C$  e il flusso di saturazione  $CV$ . Si indica inoltre con PlotOUT l'insieme dei plotoni in uscita dal segnale.

Step 0: azzeramento delle liste PlotIN e PlotOUT (perché, essendo il processo iterativo, la procedura è chiamata più volte).

Step 1: se il segnale in esame è di ingresso, si aggiunge un plotone distribuito lungo tutto l'intervallo  $[0, C]$  con intensità data per ipotesi.

Step 2: Si inizializzano le variabili:

- $Critico = falso$  (variabile booleana)
- $UltimoLibero = 0$  (variabile intera)

Step 3: per  $p$  che va da 1 al numero di plotoni  $p$  presenti nella PlotIN in ordine temporale si esegue:

- Se  $SV < SF_p$  allora  $UltimoLibero = p$  (con  $SF_p$  pari al primo estremo dell'intervallo di arrivo del plotone  $p$ ). Tale variabile identifica l'ultimo tra i plotoni che non subisce alcuna distorsione nell'attraversamento del segnale.
- esecuzione della procedura Analisi-Plotone (descritta in seguito)
- Se  $Critico = vero$  (la variabile può subire variazioni all'interno della procedura Analisi-Plotone), allora significa che la procedura Analisi-Plotone ha individuato l'esistenza di un plotone critico (come descritto nella procedura chiamata). Si interrompe immediatamente il ciclo e si va allo Step 5

Step 4: il ciclo di cui allo Step 3 non è stato interrotto: la procedura salta il prossimo step e si posiziona allo Step 6

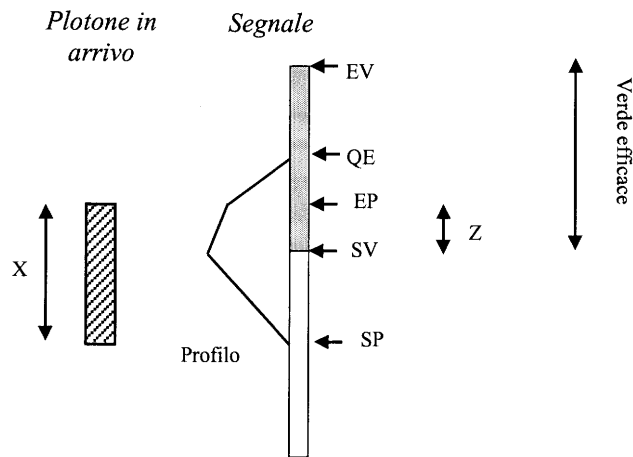
Step 5: essendo nelle condizioni per cui  $Critico = vero$ , tutti i plotoni creati in uscita dal segnale allo Step 3 sono stati azzerati dalla stessa procedura Analisi-Plotone. Per  $p$  che va da 1 al numero d'ordine del plotone che precede quello critico si esegue la procedura Analisi-Plotone (descritta in seguito). Infine, i plotoni sono riordinati nella PlotOUT in modo da posizionare per primo il plotone

*Ultimolibero* e, a seguire, tutti gli altri. Si osserva che, essendo in condizione di plotone critico, l'esistenza di un plotone *Ultimolibero* è garantita: se tutti i plotoni calcolati prima del plotone critico avessero subito una distorsione, saremmo in un caso in cui il verde è completamente saturo e non ci sarebbe una riserva da dedicare al plotone critico.

Step 6: fine della procedura

### 3.3.3 LA PROCEDURA ANALISI-PLOTONE

La procedura è chiamata all'interno della routine Analisi-Segnale. Questa procedura consente di determinare le caratteristiche dei plotoni che escono dal segnale in esame.



**Figura 3.7 – Notazioni della procedura Analisi-Plotone.**

Il comportamento di ogni singolo plotone  $P$  sull'attestamento è funzione dei seguenti elementi (ricordando che l'analisi si svolge mediante l'effettuazione di una traslazione dei tempi lungo il ciclo in modo da posizionare l'istante di fine verde in corrispondenza con il tempo di ciclo):

- Caratteristiche del plotone  $P$  in arrivo: intervallo  $[SP, EP]$  e intensità del flusso  $IF$
- Caratteristiche del segnale in analisi: inizio del tempo di verde  $SV$ , istante del tempo di fine verde  $EV=C$  e flusso di saturazione  $CV$ .

- Istante in cui l'ultimo veicolo del plotone precedente a quello considerato attraversa la linea di arresto. Per ogni plotone questo istante è definito *istante di fine coda QE*.

Si indica inoltre con  $D$  il valore del ritardo accumulato dal plotone.

Step 0: se il tempo di verde inizia prima dell'arrivo del plotone in esame, tale tempo non è utilizzato:

- Se  $SV < SP$  allora  $SV = SP$

Step 1: si definiscono le seguenti differenze:

- $X = EP - SP$
- $Z = EP - SV$

Step 2: se vale la relazione  $IF \cdot X < CV \cdot Z$  allora:

- $D = \frac{CV \cdot IF \cdot (X - Z)^2}{2 \cdot (CV - IF)}$  e  $QE = SV + IF \cdot \frac{X - Z}{CV - IF}$
- se  $SP < SV$  allora si aggiunge alla PlotOUT il plotone compreso tra gli estremi  $[SV, QE]$  di intensità  $CV$  e gravato dal ritardo  $D$
- si aggiunge inoltre alla PlotOUT la parte del plotone che attraversa l'attestamento senza alterazioni: il plotone nell'intervallo  $[QE, EP]$  di intensità  $IF$ , senza alcun ritardo

Step 3: se invece vale la relazione  $IF \cdot X \geq CV \cdot Z$  allora  $QE = SV + IF \cdot X / CV$ . A questo punto è necessario verificare che  $QE$  si trovi prima della fine del tempo di verde  $EP = C$ . La cosa non è scontata:

- se  $QE \leq EP$  allora  $D = \frac{IF \cdot X^2}{2} - IF \cdot X \cdot Z + \frac{IF^2 \cdot X^2}{2CV}$  e si aggiunge alla PlotOUT il plotone compreso tra gli estremi  $[SV, QE]$  di intensità  $CV$  e gravato dal ritardo  $D$
- se  $QE > EP$  allora non tutto il plotone riesce a passare nel tempo di verde. Questo è definito *plotone critico*. Il calcolo dei ritardi e degli istanti di fine coda dei plotoni precedenti va quindi annullato e così anche tutti i plotoni creati in uscita (svuotamento della PlotOUT). Infatti, poiché il plotone critico passa (almeno parzialmente) nel ciclo successivo, sono cambiate le condizioni iniziali per i plotoni

precedenti. Il ritardo del plotone critico deve essere calcolato aggiungendo la componente dovuta all'attesa del verde successivo  $DCrit=(QE-EV) \cdot CV \cdot (rosso)$ , dove *rosso* indica il tempo di rosso. Il ritardo del plotone critico risulta così pari a

$$D = \frac{IF \cdot X^2}{2} - IF \cdot X \cdot Z + \frac{IF^2 \cdot X^2}{2 \cdot CV} + DCrit$$

Poiché il plotone critico è composto da una parte iniziale del plotone che attraversa l'attestamento prima della fine del verde ed una parte che attende il verde successivo, è necessario ripartire il ritardo  $D$  tra i veicoli che passano prima di  $EV$  e gli altri. Il particolare, si indichi con  $H$  l'istante in cui giunge in coda l'ultimo veicolo appartenente alla prima parte del plotone (quelli che passano):

$$H = EP - \frac{(QE - SP) \cdot CV}{IF}$$

Il ritardo  $D_1$  da addebitare al primo plotone è dunque:

$$D_1 = (H - SP) \cdot IF \cdot \left[ \frac{H}{2} \cdot \left( \frac{IF}{CV} - 1 \right) + SV - \frac{SP}{2} \cdot \left( 1 + \frac{IF}{CV} \right) \right]$$

Il primo plotone da immettere nella PlotOUT è compreso tra gli estremi  $[SV, EV]$  di intensità  $CV$  e gravato dal ritardo  $D_2$ . Il secondo plotone aspetta il verde successivo ed è inserito nella PlotOUT tra la fine del rosso ed l'istante posizionato ad una distanza  $(QE-EV)$  dalla fine del rosso; tale plotone ha una intensità di uscita pari a  $CV$  e ha accumulato un ritardo  $D_2=D-D_1$ .

Si aggiorna quindi la posizione di fine verde:

$$SV = (rosso) + QE - EV$$

Dopo aver posto al valore *vero* la variabile booleana *Critico* che identifica l'esistenza del plotone critico, si aggiungono alla PlotOUT tutti i restanti plotoni  $i$  successivi a quello critico nella PlotIN:

Tutti questi plotoni  $i$  attendono il verde successivo ed escono con intensità  $CV$  tra il punto  $QE_{i-1}$  (ponendo  $QE_0=QE$  del flusso critico) ed il punto  $QE_i=QE_{i-1}+(X \cdot IF)/CV$ . Posto  $X_i=EP_i-SP_i$ , il ritardo da questi accumulato è:

$$D_i = X_i^2 \cdot \frac{IF}{2} + X_i \cdot IF \cdot (QE_{i-1} + EV - EP_i) + \frac{X_i^2 \cdot IF_i^2}{2 \cdot CV}$$

Se esiste almeno un plotone dopo quello critico, si aggiorna nuovamente la posizione di inizio verde  $SV$ :, ponendola pari a  $QE_i$  dove l' $i$ -esimo plotone è l'ultimo di quelli che seguono il plotone critico.

Step 4: Se *Critico* = *false* si aggiorna la posizione di inizio verde:  $SV=QE$

### 3.4 IL SOFTWARE

Il modello proposto ha consentito lo sviluppo di un software per la valutazione delle prestazioni delle intersezioni complesse. Il programma può anche essere utilizzato per piccole reti semaforizzate, con l'ipotesi di trascurare la dispersione dei plotoni lungo gli archi. Il linguaggio di programmazione è il Visual Basic: il programma lavora dunque in ambiente Windows. L'interfaccia con l'utente è inoltre facilitato dal fatto che gli input possono essere forniti attraverso un documento Access, mentre i risultati numerici sono forniti in parte su file di testo, per quel che riguarda le elaborazioni numeriche che possono essere comunque sostituite da elementi grafici all'interno del programma, in parte su fogli di calcolo raccolti in un file Excel, per quel che riguarda i risultati finali. Si espongono di seguito alcuni elementi del software con particolare riferimento all'interfaccia utente.

#### 3.4.1 LA STRUTTURA DEI DATI DI INGRESSO

L'utilizzatore del programma definisce i dati di ingresso mediante un file Access. In tal modo l'operazione è abbastanza agevole ed i dati sono gestibili facilmente.

Il file è composto da quattro tabelle:

- *Tabella generale*, che contiene le informazioni generali sul nodo complesso, quali velocità di percorrenza lungo gli archi e tempo di ciclo;
- *Tabella piano*, che contiene i dati relativi al piano semaforico (tempi di verde), ai flussi di ingresso nel nodo e ai flussi di saturazione dei diversi segnali;

precisamente, oltre ad una colonna identificante il numero di record corrente, sono presenti altre cinque colonne che indicano: il numero del segnale, l'istante di inizio verde (efficace), l'istante di fine verde (efficace), il flusso di ingresso (se il segnale corrente è un segnale di ingresso), il flusso di saturazione;

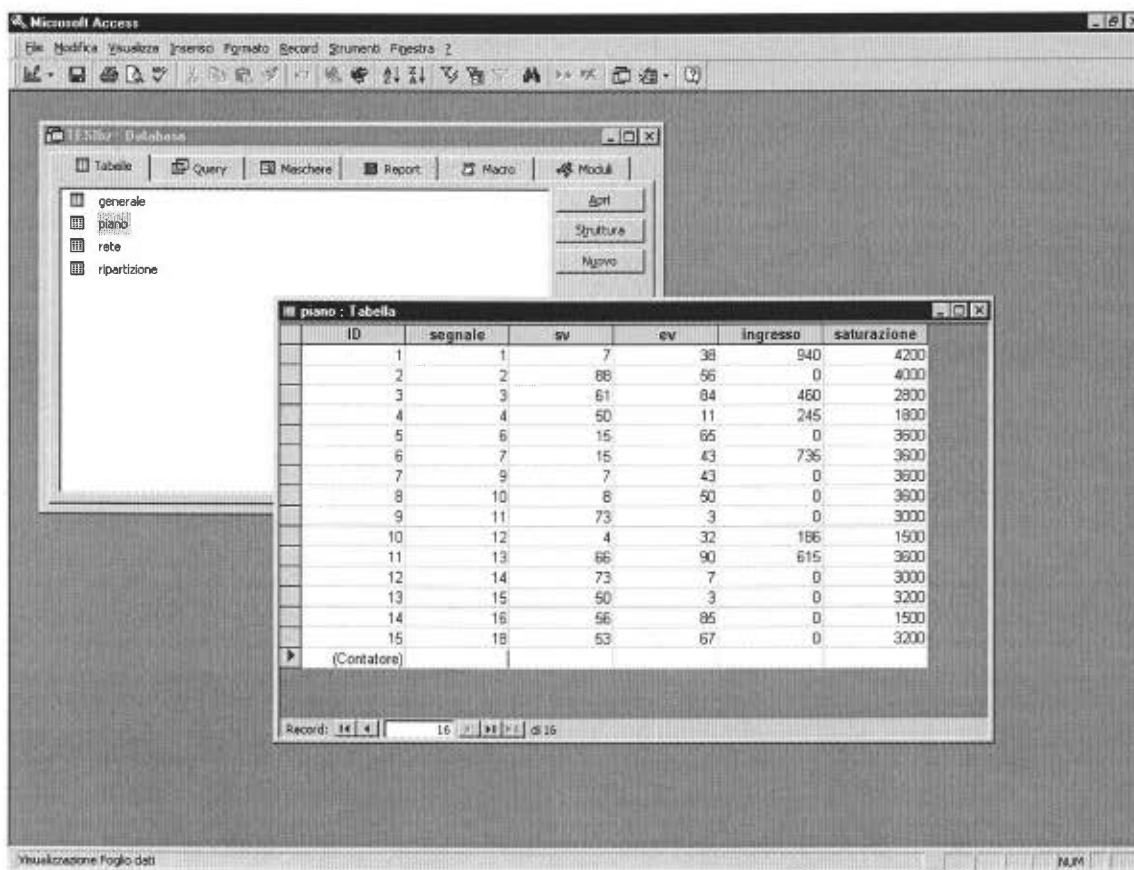


Figura 3.8 – Schermata dei dati relativi al piano semaforico, ai flussi d'ingresso e di saturazione.

- *Tabella rete*, che contiene i dati relativi agli archi della rete; sostanzialmente si elencano gli archi identificando il nodo di partenza e di arrivo e la distanza espressa in metri.
- *Tabella ripartizione*, che identifica la matrice di ripartizione dei flussi nell'intersezione complessa; la tabella è costituita da un elenco di coppie di segnali, il primo di ingresso e il secondo interno o di uscita, al quale è associata la percentuale del flusso che dal segnale di ingresso si dirige al secondo segnale.

Un esempio della schermata dei dati di ingresso è riportato in figura 3.8.

### 3.4.2 UTILIZZO DEL PROGRAMMA

Si descrivono di seguito le principali funzionalità del software progettato. Dopo aver lanciato il programma è necessario aprire il file Access, contenente i dati relativi al nodo in esame.

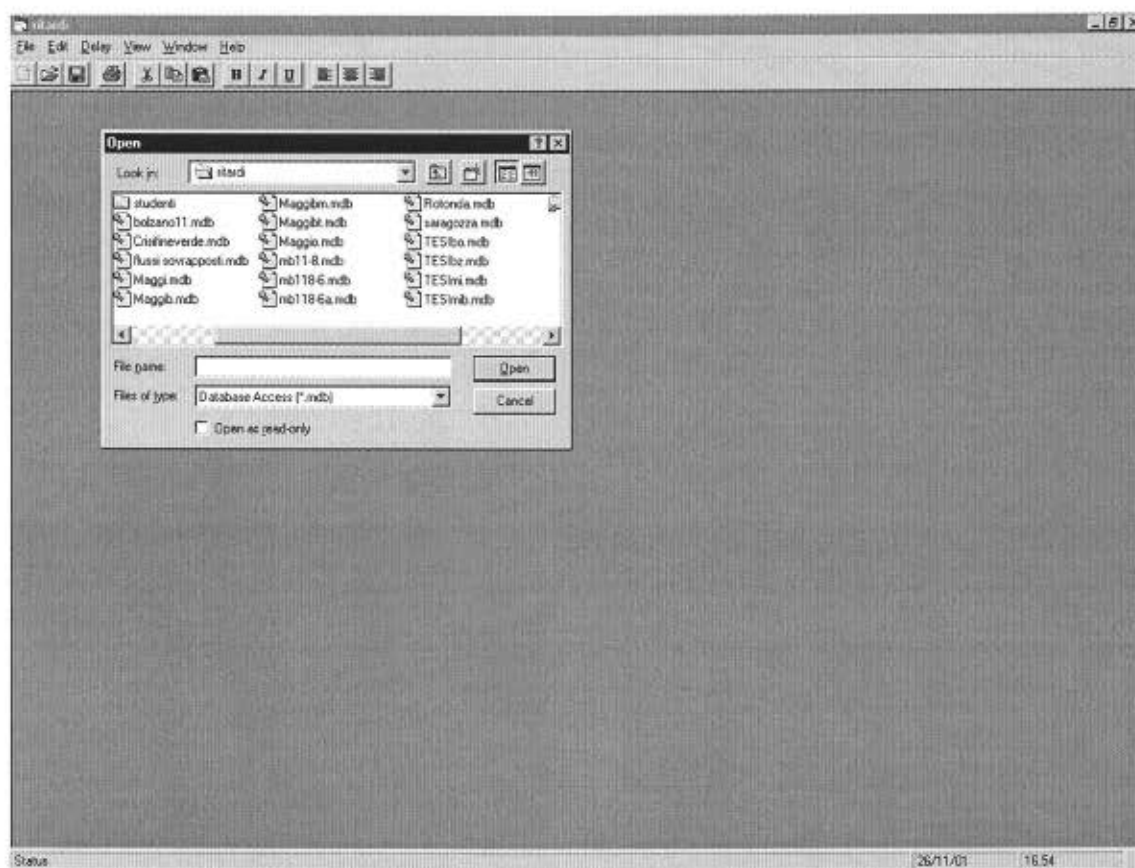


Figura 3.9 – Apertura del file di input.

Tale operazione è effettuata attraverso una comune finestra di apertura file (figura 3.9), dopo aver utilizzato il comando *Open* dal menu File (o l'analoga icona). È necessario selezionare un file di estensione *mdb* da una directory esistente. tale directory viene utilizzata dal programma per creare i file di output.

A questo punto il programma inizializza la procedura: prepara i files per i risultati delle elaborazioni e legge tutti i dati di input. Questi ultimi sono copiati in uno dei file di output; precisamente vengono inseriti in una foglio di calcolo appartenente ad un documento Excel che raccoglierà gli altri principali risultati. In tal modo input ed output sono raccolti in un unico file.

Dopo questa fase preliminare è possibile eseguire il programma vero e proprio che utilizza il modello e le procedure esposte in precedenza. Scegliendo il menu *Delay*, si apre una tendina che, tra le altre opzioni, contiene il comando *Go*. Questo comando esegue il calcolo delle code e dei ritardi dell'intera intersezione e scrive i risultati nei files di output.

Nel menu *Delay* sono presenti anche il comando *Transyt* che esegue richiede di aprire un file output del programma TRANSYT: il comando consente di determinare le differenze tra i risultati del programma in esecuzione e quelli specificati nel file del TRANSYT. Tali differenze sono riportate nei file di output.

Nello stesso menu vi è anche il comando *Output*, che consente di visualizzare i risultati relativi ai ritardi per i vari attestamenti ed i relativi livelli di servizio.

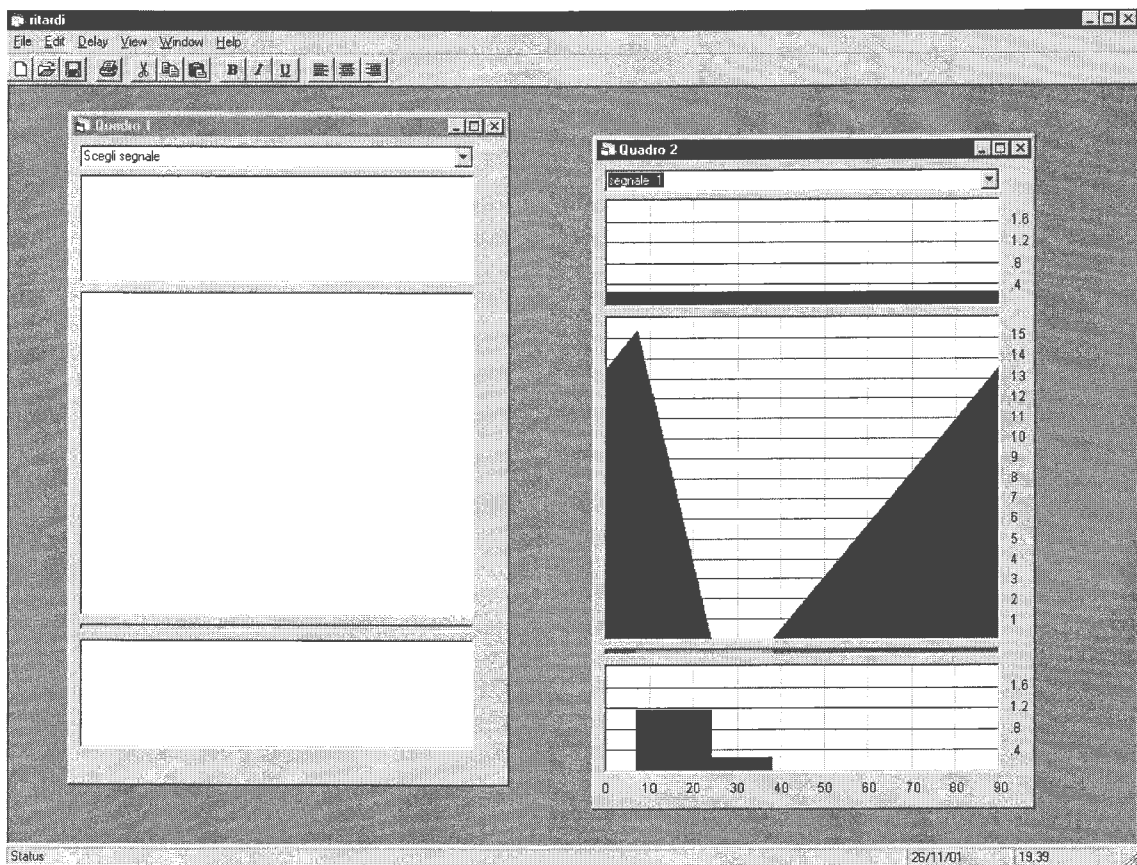


Figura 3.10 – Finestre per la visualizzazione del modello.

Dopo aver utilizzato il comando *Go*, diviene attiva un'icona che rappresenta un foglio bianco (la prima a sinistra del menu relativo alle icone).

Utilizzando tale icona si apre una finestra all'interno della quale è possibile visualizzare in forma grafica i risultati relativi alle elaborazioni del modello. In tale finestra è possibile selezionare il segnale di cui si desidera verificare il comportamento.

La dinamica del segnale scelto è descritta attraverso quattro quadranti, il cui asse orizzontale costituisce la scala della variabile tempo, i cui estremi sono relativi ad un ciclo semaforico. I quadranti, come si deduce dalla figura 3.10, identificano dall'alto verso il basso:

- *Plotoni in arrivo*: sono rappresentati sotto forma di barre il cui spessore (in orizzontale) identifica gli istanti in cui il primo e l'ultimo veicolo del plotone si presentano al segnale; l'altezza della barra rappresenta l'intensità del flusso del plotone, la cui scala è riportata a destra del quadrante. Questa è espressa in veicoli equivalenti per secondo.

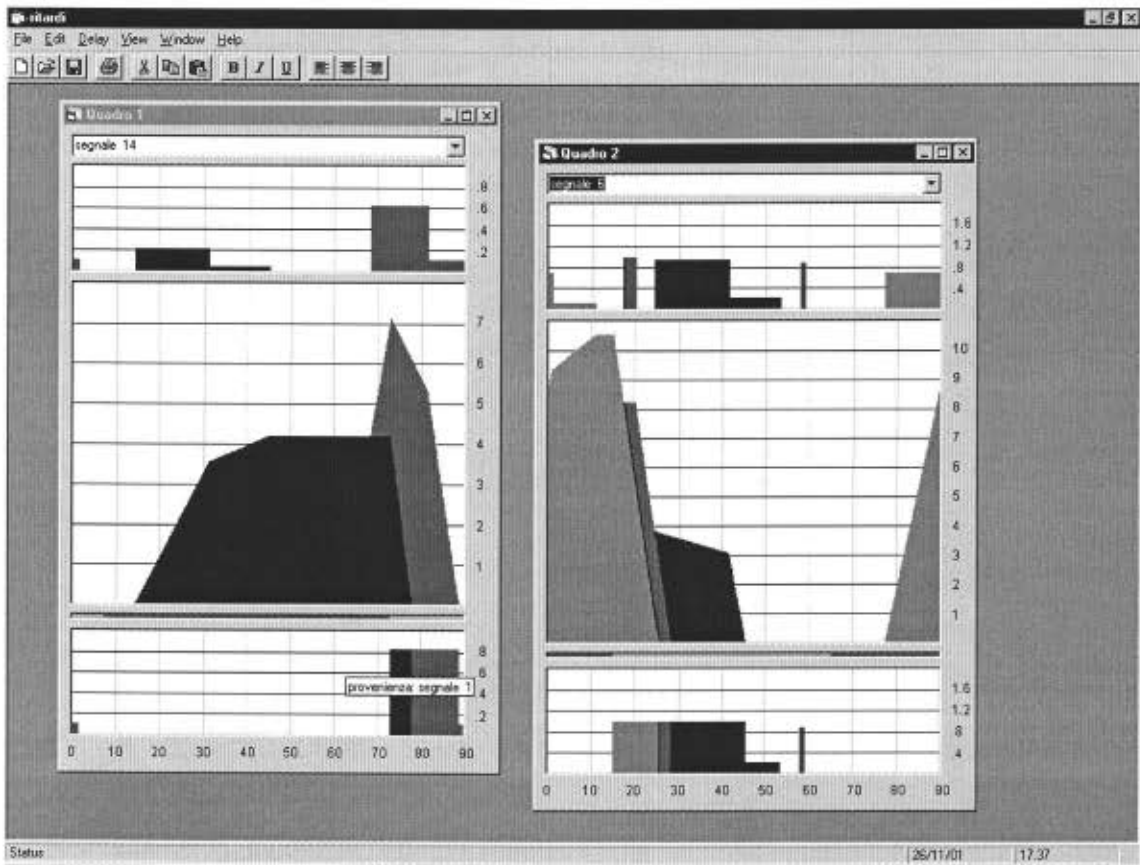


Figura 3.11 – Visualizzazione grafica del modello.

- *Formazione delle code:* in base alle caratteristiche dei plotoni in arrivo e a quelle del segnale, sono tracciate le code. Il riferimento temporale è ancora quello del ciclo semaforico, mentre la lunghezza della coda è espressa in termini di numero di veicoli equivalenti. La scala è riportata a destra del quadrante.
- *Tempo di verde:* le condizioni delle lanterne relative al segnale in esame sono riportate lungo il tempo di ciclo mediante i due colori verde (per il verde efficace) e rosso (per il rosso efficace).
- *Plotoni in uscita:* sono tracciati nel quarto quadrante con le modalità viste per i plotoni in arrivo. La massima altezza della barra non può ovviamente superare il flusso di saturazione del segnale.

Nella rappresentazione grafica i plotoni e le code assumono colori differenti in funzione del segnale di ingresso da cui provengono. Inoltre, è possibile identificare il segnale di provenienza di ogni plotone portando il puntatore del mouse sull'area che definisce il plotone stesso, come è visibile in figura 3.11.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Segnale	Riv/C	Riv/h	Veic/C	Veic/h	Riv/Veic	PCU-H/H	Riv/Veic	Diff	Diff%					
2	1	586	23420	23	940	25	6,5	25	0,0	0					
3	2	48	1923	19	769	3	0,6	3	0,3	12					
4	3	343	13727	12	460	30	3,8	30	-0,1	0					
5	4	60	2396	6	245	10	0,7	10	0,5	5					
6	6	344	13744	33	1319	10	3,5	10	-0,9	-6					
7	7	493	19723	18	735	27	5,5	27	0,1	0					
8	9	77	3069	22	863	4	0,9	4	0,2	6					
9	10	93	3736	12	490	8	1,0	7	-0,3	-4					
10	11	254	10143	9	345	29	2,8	29	-0,2	-1					
11	12	113	4534	5	186	24	1,3	25	0,8	3					
12	13	449	17949	15	615	29	5,0	29	0,1	0					
13	14	282	11286	13	537	21	3,1	21	-0,2	-1					
14	15	30	1208	11	456	3	0,3	2	-0,3	-11					
15	16	16	622	2	67	9	0,5	27	17,7	189					
16	18	324	12946	12	490	26	3,6	26	0,0	0					
17		3511	140427												

Figura 3.12 – Risultati del modello: i ritardi sugli attestamenti.

Negli esempi riportati nelle figure è possibile riconoscere un segnale di ingresso (figura 3.10) dove il flusso in arrivo è uniformemente distribuito e alcuni segnali dal comportamento più complesso (figura 3.11).

### 3.4.3 I RISULTATI

I risultati del programma sono riportati in una cartella Excel, contenente alcuni fogli di calcolo, nonché in una serie di file di testo.

Il file Excel contiene tre fogli di calcolo. Il primo riporta i dati di ingresso, così come noti dal relativo file Access. Il secondo visualizza i flussi ed i ritardi sui vari attestamenti. Inoltre, riporta eventualmente alcune colonne relative ai risultati del programma TRANSYT e le differenze riscontrate (figura 3.12). Il terzo foglio di calcolo riassume i livelli di servizio per ogni coppia Origine/Destinazione, per ogni accesso e per l'intera intersezione complessa (figura 3.13).

RITARDI E LOS PER COPPIE O/D					
Orig	Dest	Rit	Veic	Rit/Veic	LOS
1	1	6	567	19	29 C
2	1	14	319	4	75 E
3	3	6	139	2	60 E
4	3	14	343	9	37 D
5	4	2	113	3	36 D
6	4	18	117	3	38 D
7	7	2	235	8	28 C
8	7	16	41	1	44 D
9	7	18	483	9	52 D
10	12	2	287	3	92 F
11	12	6	48	1	60 E
12	12	16	63	1	85 F
13	13	2	181	5	37 D
14	13	6	574	11	54 D
RITARDI E LOS PER ACCESSO					
Orig		Rit	Veic	Rit/Veic	LOS
15	1		886	24	37 D
16	3		483	12	41 D
17	4		230	6	37 D
18	7		759	18	41 D
19	12		399	5	85 F
20	13		755	15	49 D
INTERSEZIONE COMPLESSA					
Tot		Rit	Veic	Rit/Veic	LOS
21		3511	80	44	D

Figura 3.13 – Risultati del modello: i livelli di servizio.

Altri risultati sono riportati in forma di files di testo: un numero di files pari al numero dei segnali che riportano i dati numerici dei plotoni in ingresso ed in uscita ad ogni segnale (per ogni iterazione del programma), un file che identifica i punti necessari per il calcolo delle code ad ogni segnale, e due files che contengono i dati relativi ai plotoni che si formano ad ogni segnale rispettivamente in entrata ed in uscita.

## *Capitolo Quarto*

# **APPLICAZIONE DEL MODELLO E CONFRONTI**

### **4.1 PREMESSA**

In questo capitolo si applica il modello proposto ad alcune intersezioni complesse esistenti. Si considerano tre intersezioni: Piazza Verdi a Bolzano, Porta Saragozza a Bologna e Piazzale Maggi a Milano. Le prime due costituiscono una rete semaforizzata il cui grafo comprende unicamente cammini aperti, mentre la terza evidenzia l'applicabilità del modello ai grafi in cui sono presenti cicli. Piazzale Maggi è infatti una rotatoria semaforizzata. La validazione del modello avviene attraverso il confronto dei risultati con quelli che sono ottenuti mediante l'applicazione del modello TRANSYT. Ma lo scopo del confronto è anche quello di evidenziare i vantaggi che presenta il modello proposto, sottolineando le carenze del TRANSYT nella valutazione delle prestazioni: si vedrà infatti che il modello TRANSYT non solo non è in grado di fornire alcuni dei risultati ottenibili con il modello proposto, ma presenta anche degli errori di valutazione dovuti alla struttura intrinseca del TRANSYT.

## 4.2 PIAZZA VERDI (BOLZANO)

Il modello proposto è stato applicato al nodo complesso di Piazza Verdi a Bolzano. Il nodo, la cui planimetria è esposta nella figura 4.1, è composto da quattro intersezioni elementari che interagiscono a causa della loro distanza ravvicinata.

<b>PIANO [secondi] E FLUSSI [pcu/h]</b>									
Segnale	Inizio Verde	Fine Verde	Flussi d'ingresso	Saturazione					
1	7	38	940	4200					
2	88	56	0	4000					
3	61	84	460	2800					
4	50	11	245	1800					
6	15	65	0	3600					
7	15	43	735	3600					
9	7	43	0	3600					
10	8	50	0	3600					
11	73	3	0	3000					
12	4	32	186	1500					
13	66	90	615	3600					
14	73	7	0	3000					
15	50	3	0	3200					
16	56	85	0	1500					
18	53	67	0	3200					
<b>MATRICE DELLA RETE [metri]</b>									
	2	6	9	10	11	14	15	16	18
1	0	0	72	0	0	72	0	0	0
3	0	0	73	0	0	73	0	0	0
4	0	0	0	72	0	0	0	0	72
7	0	0	0	92	0	0	0	0	92
9	0	103	0	0	0	0	0	0	0
10	72	0	0	0	0	0	0	72	0
11	73	0	0	0	0	0	0	73	0
12	0	0	0	0	30	0	30	0	0
13	0	0	0	0	33	0	33	0	0
15	0	80	0	0	0	0	0	0	0
<b>MATRICE DI RIPARTIZIONE DEI FLUSSI [%]</b>									
	2	6	9	10	11	14	15	16	18
1	0	82	82	0	0	18	0	0	0
3	0	20	20	0	0	80	0	0	0
4	50	0	0	50	0	0	0	0	50
7	45	0	0	50	0	0	0	5	50
12	67	17	0	0	83	0	17	16	0
13	31	69	0	0	31	0	69	0	0

Tabella 4.1 – Dati di Input del nodo di Piazza Verdi a Bolzano (ciclo=90'', velocità=36 km/h)

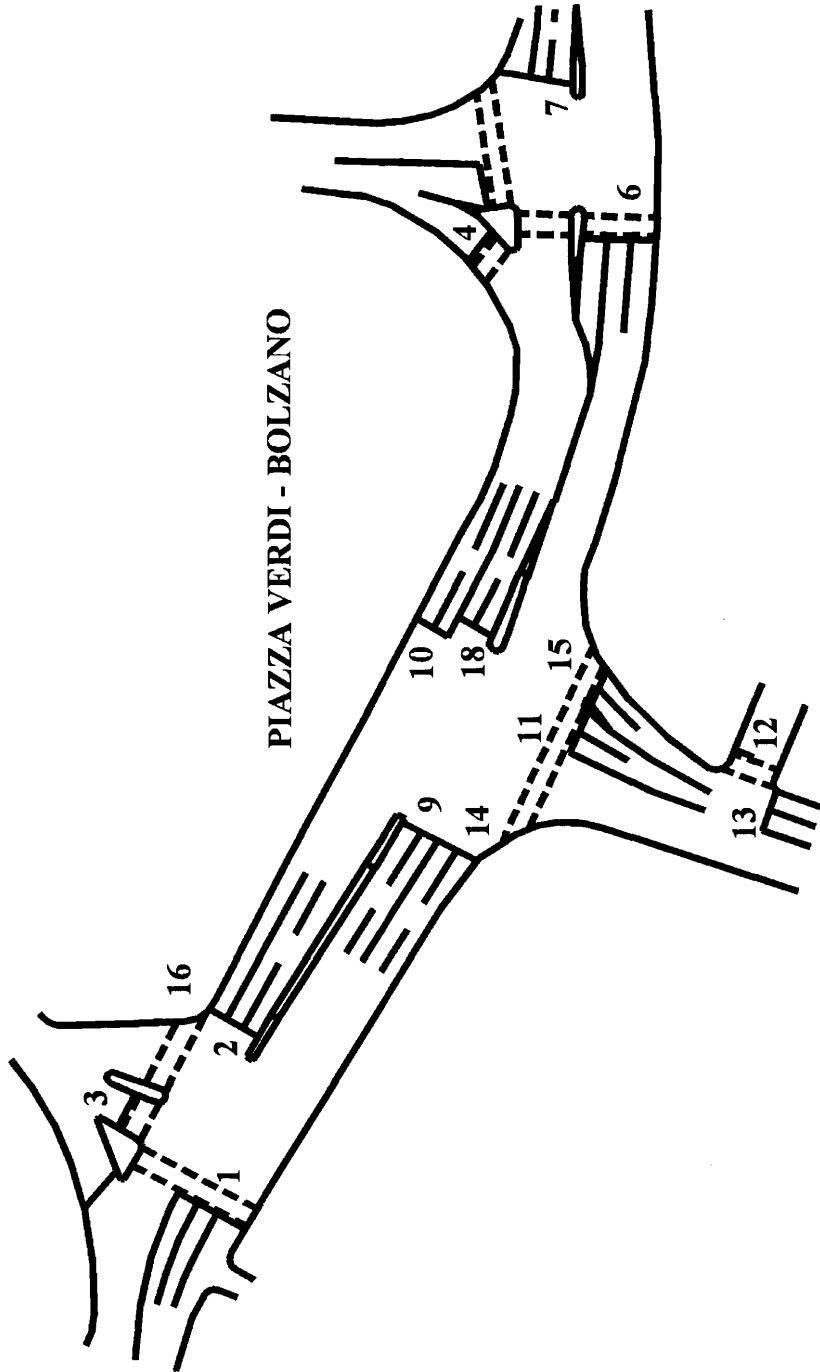


Figura 4.1 – Nodo complesso di Piazza Verdi a Bolzano

Si è assunto un ciclo di 90'' ed una velocità media di percorrenza degli archi di 36 km/h. I restanti dati di Input sono esposti nella tabella 4.1.

I tempi di verde sono espressi in termini di verde efficace e sono ricavati da un piano semaforico che è realmente stato applicato all'incrocio. Anche i dati relativi ai flussi sono ricavati da indagini di campo.

I medesimi dati di ingresso sono stati utilizzati nel programma TRANSYT. I due modelli hanno fornito i risultati che sono evidenziati nella tabella 4.2.

Segnale	MODELLO PROPOSTO					TRANSYT		DIFFERENZE	
	Rit/C [sec]	Rit/h [sec]	Veic/C	Veic/h	Rit/Veic [sec]	PCU- H/H	Rit/Veic [sec]	Diff. [sec]	Diff %
1	586	23420	23	940	24,92	6,5	24,89	-0,02	0
2	48	1923	19	769	2,50	0,6	2,81	0,31	12
3	343	13727	12	460	29,84	3,8	29,74	-0,10	0
4	60	2396	6	245	9,78	0,7	10,29	0,50	5
6	344	13744	33	1319	10,42	3,5	9,55	-0,87	-8
7	493	19723	18	735	26,83	5,5	26,94	0,10	0
9	77	3069	22	863	3,56	0,9	3,76	0,20	6
10	93	3736	12	490	7,62	1,0	7,35	-0,28	-4
11	254	10143	9	345	29,40	2,8	29,21	-0,18	-1
12	113	4534	5	186	24,38	1,3	25,16	0,78	3
13	449	17949	15	615	29,19	5,0	29,27	0,08	0
14	282	11286	13	537	21,01	3,1	20,77	-0,23	-1
15	30	1208	11	456	2,65	0,3	2,37	-0,28	-11
16	16	622	2	67	9,35	0,5	27,06	17,71	189
18	324	12946	12	490	26,42	3,6	26,45	0,03	0

**Tabella 4.2 – Risultati dei due modelli.**

Si ricorda che il TRANSYT utilizza una formula per la dispersione dei plotoni lungo gli archi. Al fine di ottenere un confronto corretto, nel file di input del TRANSYT si è imposto l'annullamento della dispersione lungo gli archi. Come già sottolineato, tale semplificazione non penalizza la corretta valutazione delle intersezioni complesse a causa della ridotta distanza tra segnali consecutivi. A riprova di questo fatto, il TRANSYT è stato utilizzato per calcolare i ritardi anche utilizzando la formula per la dispersione dei plotoni: nel caso del nodo in esame, i risultati sono rimasti sostanzialmente identici (solo in alcuni casi le differenze arrivano al 3%).

La tabella confronta i ritardi subiti da ogni veicolo in corrispondenza dei vari attestamenti. Per una corretta lettura dei valori riportati, è necessario ricordare che il TRANSYT suddivide il ciclo semaforico in un certo numero di *steps* (fino ad un

massimo di 60) e con tale discretizzazione valuta il comportamento dei flussi. Nell'esempio in esame il ciclo di 90 secondi è stato suddiviso in 60 steps: la semplificazione introduce alcuni piccoli errori nel calcolo. Il modello mesoscopico proposto, invece, non utilizza alcun arrotondamento (per quanto possibile con l'uso del computer).

Un'ulteriore fonte di piccoli errori è dovuta al fatto che il TRANSYT fornisce i ritardi in fase di output con un massimo di due cifre significative. Talvolta quindi piccole differenze nei risultati possono essere dovute anche alla scarsa definizione dei risultati del TRANSYT.

Ai fatti di cui sopra sono dovute le minime differenze tra i risultati dei due modelli che sono evidenziate nel calcolo dei ritardi agli accessi. In tali attestamenti i risultati non dovrebbero differire perché i veicoli arrivano con una distribuzione identica. Per quanto riguarda gli attestamenti interni i risultati continuano ad essere molto simili in quasi tutti i casi. Tuttavia emergono alcune differenze pesanti: l'attestamento 16 presenta una differenza di valutazione pari quasi al 200%. Ciò è dovuto proprio al fatto che il TRANSYT non conserva le informazioni sull'origine e la destinazione dei flussi. Questo limite può introdurre degli errori notevoli: il caso del segnale 16 è alimentato dai veicoli provenienti, per esempio, dall'attestamento del segnale 10. Quando i veicoli oltrepassano quest'ultimo attestamento, il TRANSYT considera una frazione di questi e li indirizza verso 16. La frazione è però calcolata in senso "orizzontale", nel senso che il programma invia verso 16 la stessa frazione di veicoli in ogni step. Dalla distribuzione dei flussi però sappiamo che solo i veicoli che provengono dal 7 attraverso 10 sono diretti al segnale 16, mentre quelli provenienti da 4 non sono inviati a 16. Il TRANSYT non è in grado di distinguere questa situazione. Ecco come è giustificata tale differenza.

In ogni caso i risultati forniti dal TRANSYT si fermano qui. Non è possibile quindi valutare il livello di servizio dei vari accessi in funzione delle destinazioni dei veicoli. Volendo forzare un risultato del TRANSYT si potrebbe sommare per ogni coppia Origine/Destinazione i ritardi di tutti gli attestamenti incontrati lungo il percorso sulla base del ritardo per veicolo di ogni attestamento. Utilizzando in tal senso i risultati del TRANSYT si può stimare il ritardo accumulato nello spostamento totale. I risultati però non sono accettabili: in tabella 4.3 sono evidenti le pesanti

differenze tra questo metodo e la precisa valutazione del ritardo per coppia Origine/Destinazione fornita dal modello proposto.

COPPIE O/D e FLUSSI			MODELLO PROPOSTO	TRANSYT	ERRORI	
Orig	Dest	Veic	Rit/Veic	Rit/Veic	[sec/veic]	%
1	6	19	29	39	10	34
1	14	4	75	46	-29	-39
3	6	2	60	44	-16	-27
3	14	9	37	51	14	38
4	2	3	36	20	-16	-44
4	18	3	38	36	-2	-5
7	2	8	28	37	9	32
7	16	1	44	61	17	39
7	18	9	52	53	1	2
12	2	3	92	57	-35	-38
12	6	1	60	37	-23	-38
12	16	1	85	81	-4	-5
13	2	5	37	61	24	65
13	6	11	54	41	-13	-24

**Tabella 4.3 – Ritardi accumulati negli spostamenti per ogni coppia Origine/Destinazione.**

Le differenze sono evidenti e una valutazione di questo tipo sarebbe un errore anche concettuale.

Mentre il TRANSYT non può fornire un'adeguata valutazione del livello di servizio, il modello proposto è in grado di calcolare il livello di servizio (così come definito nell'HCM) per ogni coppia Origine/Destinazione.

Aggregando tali risultati è possibile determinare il ritardo complessivo di ogni accesso. Questo è determinabile attraverso una valutazione pesata dei ritardi calcolati per ogni coppia Origine/Destinazione. Precisamente il ritardo dell'accesso è dato dalla somma dei prodotti tra il numero di veicoli a ciclo per coppia O/D ed il relativo ritardo, dividendo il tutto per il numero totale dei veicoli a ciclo dell'accesso in esame. Dal valore del ritardo è ricavabile immediatamente il livello di servizio dell'accesso stesso.

Analogamente, con un'ulteriore aggregazione, è possibile trovare il ritardo ed il relativo livello di servizio dell'intera intersezione, mediante una media dei ritardi di ogni accesso, pesata in funzione del numero di veicoli che interessano l'accesso stesso. I risultati ottenuti sono evidenziati nella tabella 4.4.

RITARDI E LOS PER COPPIE O/D					
Orig	Dest	Rit	Veic	Rit/Veic	LOS
1	6	567	19	29	C
1	14	319	4	75	E
3	6	139	2	60	E
3	14	343	9	37	D
4	2	113	3	36	D
4	18	117	3	38	D
7	2	235	8	28	C
7	16	41	1	44	D
7	18	483	9	52	D
12	2	287	3	92	F
12	6	48	1	60	E
12	16	63	1	85	F
13	2	181	5	37	D
13	6	574	11	54	D
RITARDI E LOS PER ACCESSO					
Orig		Rit	Veic	Rit/Veic	LOS
1		886	24	37	D
3		483	12	41	D
4		230	6	37	D
7		759	18	41	D
12		399	5	85	F
13		755	15	49	D
INTERSEZIONE COMPLESSA					
		Rit	Veic	Rit/Veic	LOS
Tot		3511	80	44	D

Tabella 4.4 – Livelli di servizio del nodo di Piazza Verdi.

### 4.3 PIAZZALE MAGGI (MILANO)

Si è applicato il modello proposto al nodo complesso di Piazzale Maggi a Milano. Il nodo, la cui planimetria è esposta nella figura 4.2, è sostanzialmente una rotatoria di grosse dimensioni che è stata semaforizzata. La struttura circolare consente di provare il modello anche nel caso di percorsi chiusi. Il tempo di ciclo è pari a 90'' e la velocità media di percorrenza degli archi è stata assunta pari a 36 km/h. I restanti dati di Input sono esposti nella tabella 4.5.

I tempi di verde, espressi in termini di verde efficace, sono desunti da un piano semaforico che è realmente utilizzato dall'incrocio. I dati relativi ai flussi non

sono invece stati misurati, ma sono stimati sulla base di informazioni qualitative disponibili sull'area in esame.

<b>PIANO [secondi] E FLUSSI [pcu/h]</b>								
Segnale	Inizio Verde	Fine Verde	Flussi d'ingresso	Saturazione				
1	54	82	900	3600				
3	86	50	0	5400				
4	16	86	0	3600				
6	84	44	1800	3600				
8	48	80	0	5400				
10	73	52	0	3600				
11	51	76	900	3600				
13	80	47	0	5400				
14	34	1	0	3600				
16	3	33	1100	3600				
18	37	89	0	5400				
20	80	59	0	3600				
<b>MATRICE DELLA RETE [metri]</b>								
	3	4	8	10	13	14	18	20
1	0	0	0	0	0	0	92	78
3	0	0	0	0	0	0	92	78
6	57	47	0	0	0	0	0	0
8	57	47	0	0	0	0	0	0
11	0	0	82	72	0	0	0	0
13	0	0	82	72	0	0	0	0
16	0	0	0	0	52	42	0	0
18	0	0	0	0	52	42	0	0
<b>MATRICE DI RIPARTIZIONE DEI FLUSSI [%]</b>								
	3	4	8	10	13	14	18	20
1	0	0	0	20	20	40	60	40
6	80	20	0	0	0	30	30	50
11	30	40	70	30	0	5	5	25
16	0	40	40	60	100	0	0	0

Tabella 4.5 – Dati di Input del nodo di Piazzale Maggi a Milano (ciclo=90'', velocità=36 km/h)

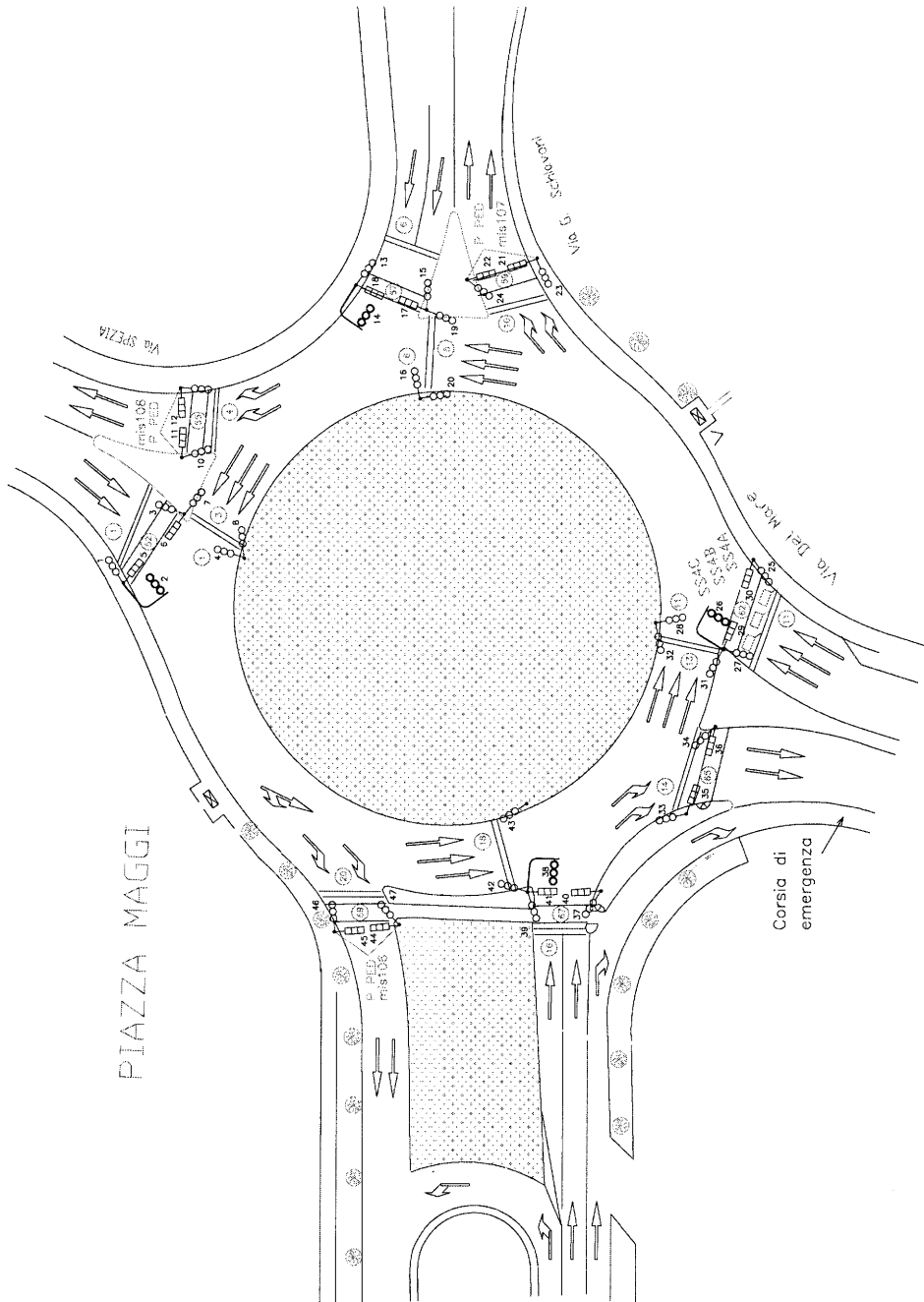


Figura 4.2 – Nodo complesso di Piazzale Maggi a Milano

I medesimi dati di ingresso sono stati utilizzati nel programma TRANSYT. I due modelli hanno fornito i risultati che sono evidenziati nella tabella 4.2.

Segnale	MODELLO PROPOSTO					TRANSYT		DIFFERENZE	
	Rit/C [sec]	Rit/h [sec]	Veic/C	Veic/h	Rit/Veic [sec]	PCU- H/H	Rit/Veic [sec]	Diff. [sec]	Diff %
1	641	25627	22	900	28,47	7,1	28,40	-0,07	0
3	99	3951	43	1710	2,31	1,6	3,37	1,06	46
4	58	2308	29	1160	1,99	0,5	1,55	-0,44	-22
6	800	32000	45	1800	17,78	8,9	17,80	0,02	0
8	313	12504	27	1070	11,69	3,6	12,11	0,43	4
10	48	1929	28	1110	1,74	0,6	1,95	0,21	12
11	704	28167	22	900	31,30	7,8	31,20	-0,10	0
13	16	621	32	1280	0,49	0,4	1,12	0,64	132
14	34	1373	24	945	1,45	0,2	0,76	-0,69	-48
16	792	31680	28	1100	28,80	8,8	28,80	0,00	0
18	204	8175	28	1125	7,27	2,6	8,32	1,05	14
20	106	4230	37	1485	2,85	1,2	2,91	0,06	2

Tabella 4.6 – Risultati dei due modelli.

Il confronto è ancora effettuato imponendo al TRANSYT di non utilizzare alcuna formula per la dispersione dei plotoni lungo gli archi.

La tabella confronta i ritardi subiti da ogni veicolo in corrispondenza dei vari attestamenti. I risultati forniti dal TRANSYT differiscono poco in valore assoluto da quelli forniti dal modello proposto, ma in termini relativi le differenze vanno al di là dei noti scostamenti dovuti alla suddivisione in *steps* (60 nel caso in esame) ed al limitato numero di cifre significative. Solo i risultati sugli attestamenti relativi agli accessi sono praticamente identici. Per quanto riguarda gli attestamenti interni, i risultati sono diversi a causa della nota perdita di informazioni del TRANSYT sull'origine e la destinazione dei flussi.

Si supponga, per esempio, di voler confrontare i due modelli relativamente al comportamento dei plotoni che afferiscono al segnale 3. Questi provengono dal segnale 8 oppure dal segnale 6. Le dinamiche che si sviluppano sui tre attestamenti sono riportate nella figura 4.3 per quanto riguarda l'output del TRANSYT e nella figura 4.4 per i risultati del modello proposto. Per quanto riguarda il significato dei simboli utilizzati dal TRANSYT nella rappresentazione grafica dei risultati si rimanda all'appendice.

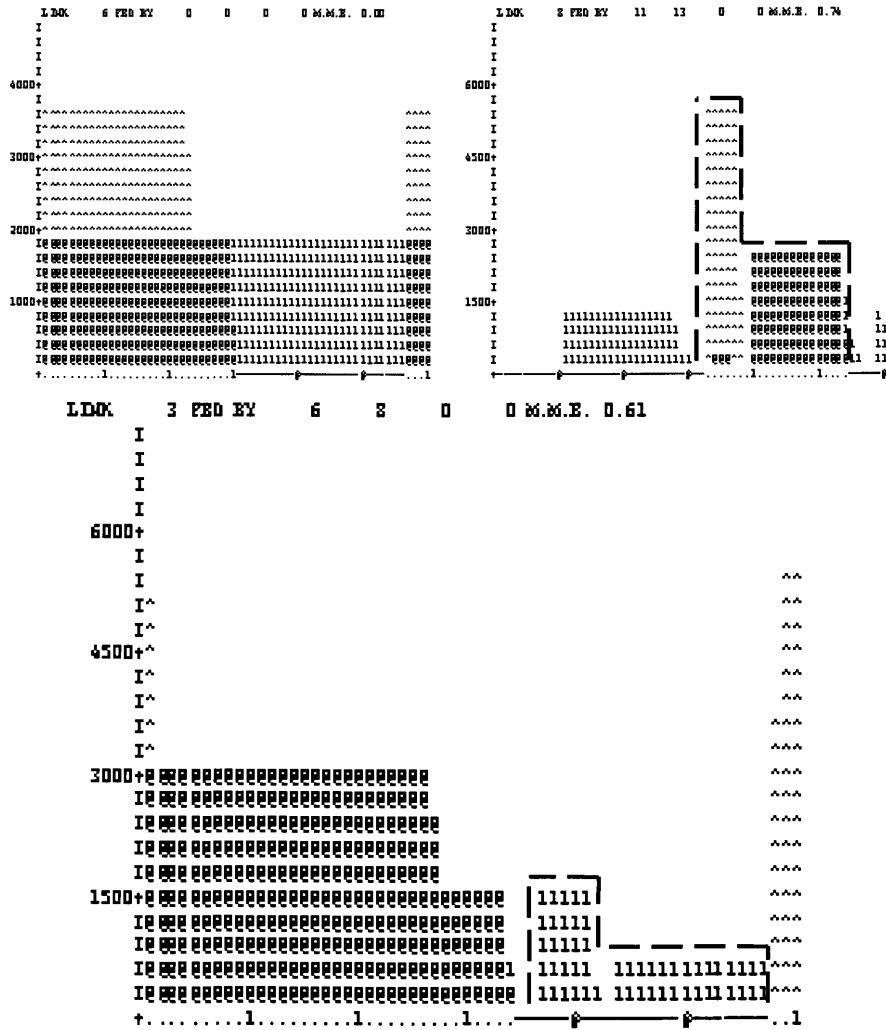


Figura 4.3 – Risultati grafici dei nodi 6, 8 e 3 in base al TRANSYT.

La differenza è evidente: il modello TRANSYT considera il profilo del flusso in uscita dal segnale 8 e, prendendone una frazione opportuna, lo porta ad alimentare il segnale 3. Come si può notare dal profilo evidenziato in figura, il profilo del flusso (pure considerandone una frazione) rimane invariato. Si osserva però che i veicoli presenti al segnale 8 provengono in parte da 11 ed in parte da 16. Ma solo i veicoli provenienti da 11 si dirigono verso 3, come si evince dalla matrice di ripartizione dei flussi. I veicoli provenienti da 16 prendono altre direzioni. Questo è evidenziato nella figura relativa al modello proposto, dove i plotoni in uscita da 8 hanno in parte provenienza 16 (i più scuri) ed in parte provenienza 11 (i più chiari): si può notare che soltanto i veicoli chiari vengono portati (con la dovuta percentuale) verso il segnale 3. Questo elemento che non è considerato dal TRANSYT è causa della differenza nella

valutazione dei ritardi: pur essendo identico il numero di veicoli che si attesta sul segnale 3 nei due modelli, la distribuzione è sensibilmente differente.

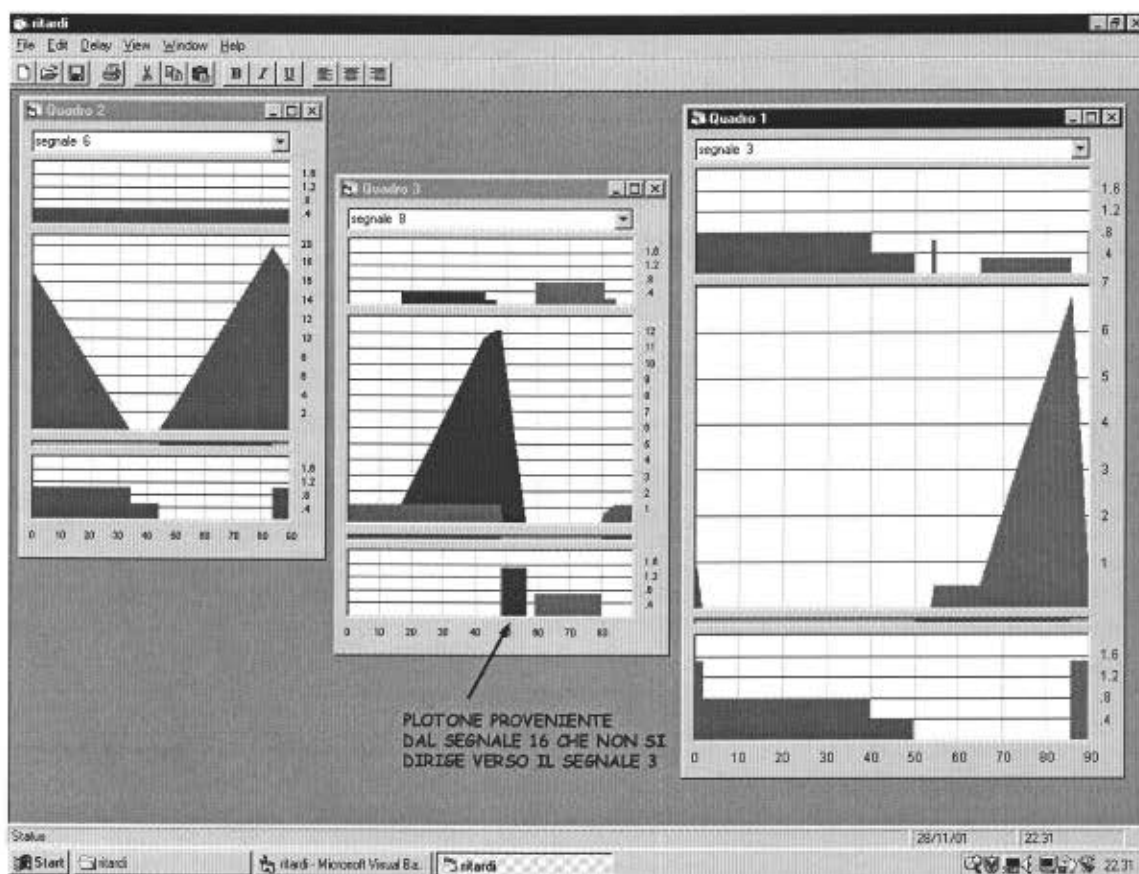


Figura 4.4 – Risultati grafici dei nodi 6, 8 e 3 in base al modello proposto.

Più avanti in questo capitolo si vedrà come, bilanciando i flussi in modo che la distribuzione nel nodo non sia influenzata dalla provenienza degli stessi, spariscono anche le differenze sul calcolo dei ritardi nei segnali interni.

Per la valutazione del livello di servizio dell'intersezione complessa, i risultati offerti dal TRANSYT, come si è già rilevato, non sono sufficienti. Si utilizza quindi il modello proposto per calcolare il livello di servizio (così come definito nell'HCM) per ogni coppia Origine/Destinazione. Inoltre aggregando tali risultati è possibile determinare il ritardo complessivo ed il livello di servizio di ogni accesso e, con un'ulteriore aggregazione, quello del nodo complesso. I risultati ottenuti sono riportati nella tabella 4.7.

<b>RITARDI E LOS PER COPPIE O/D</b>					
<b>Orig</b>	<b>Dest</b>	<b>Rit</b>	<b>Veic</b>	<b>Rit/Veic</b>	<b>LOS</b>
1	10	149	5	33	C
1	14	271	9	30	C
1	20	357	9	39	D
6	4	197	9	21	C
6	14	426	14	31	C
6	20	402	23	17	B
11	4	320	9	35	C
11	10	258	7	38	D
11	14	91	1	80	E
11	20	285	6	50	D
16	4	582	11	52	D
16	10	475	17	28	C
<b>RITARDI E LOS PER ACCESSO</b>					
<b>Orig</b>		<b>Rit</b>	<b>Veic</b>	<b>Rit/Veic</b>	<b>LOS</b>
1		778	23	34	C
6		1025	45	22	C
11		954	23	42	D
16		1057	28	38	D
<b>INTERSEZIONE COMPLESSA</b>					
		<b>Rit</b>	<b>Veic</b>	<b>Rit/Veic</b>	<b>LOS</b>
Tot		3814	118	32	C

Tabella 4.7 – Livelli di servizio del nodo di Piazzale Maggi.

#### 4.4 PIAZZALE MAGGI A FLUSSI BILANCIATI

Si utilizza ancora l'esempio applicativo di Piazzale Maggi per effettuare un ulteriore confronto tra il modello proposto ed il TRANSYT. Lo scopo è di determinare una situazione tale da eliminare ogni possibile differenza tra i risultati dei due modelli. Come si è visto, l'eliminazione della dispersione dei platon non è sufficiente, a causa della perdita di informazioni sull'origine dei flussi nel TRANSYT. Tuttavia, bilanciando i flussi in modo che la distribuzione dei flussi nel nodo non sia influenzata dalla origine degli stessi si ottiene un assetto che non deve dare differenze tra i due modelli che non siano dovute agli arrotondamenti del calcolo. Come si può facilmente verificare, una distribuzione di questo tipo si ottiene con la matrice riportata nella tabella 4.8: una distribuzione effettuata a livello di segnale dà la stessa ripartizione di flussi di quella effettuata per coppie Origine/Destinazione.

MATRICE DI RIPARTIZIONE DEI FLUSSI [%]								
	3	4	8	10	13	14	18	20
1	0	0	0	0	0	44	44	56
6	44	56	0	0	0	33	33	11
11	44	22	66	34	0	33	33	11
16	0	0	0	73	73	27	0	0

Tabella 4.8 – Matrice di ripartizione dei flussi “bilanciati”.

I rimanenti dati di input (flussi, rete, tempi di verde) rimangono gli stessi del paragrafo precedente. L'applicazione dei due modelli al caso in esame fornisce i risultati riportati nella tabella 4.9.

Segnale	MODELLO PROPOSTO					TRANSYT		DIFFERENZE	
	Rit/C [sec]	Rit/h [sec]	Veic/C	Veic/h	Rit/Veic [sec]	PCU-H/H	Rit/Veic [sec]	Diff. [sec]	Diff %
1	641	25627	22	900	28,47	7,1	28,40	-0,07	0
3	157	6284	30	1188	5,29	1,8	5,45	0,17	3
4	190	7618	30	1206	6,32	2,1	6,27	-0,05	-1
6	800	32000	45	1800	17,78	8,9	17,80	0,02	0
8	64	2554	15	594	4,30	0,5	3,03	-1,27	-30
10	56	2255	28	1109	2,03	0,6	1,95	-0,09	-4
11	704	28167	22	900	31,30	7,8	31,20	-0,10	0
13	0	0	20	803	0,00	0,0	0,00	0,00	
14	224	8970	40	1584	5,66	2,5	5,68	0,02	0
16	792	31680	28	1100	28,80	8,8	28,80	0,00	0
18	471	18841	32	1287	14,64	5,3	14,83	0,19	1
20	164	6565	20	801	8,20	1,8	8,09	-0,11	-1

Tabella 4.9 – Risultati dei due modelli a flussi “bilanciati”.

Si osserva che le differenze, sia assolute che percentuali, sono minime. Ciò è quello che ci si aspettava. Vi è un'unica eccezione: in corrispondenza del segnale 8 si verifica una differenza del 30%. Tale inaspettata discordanza è in realtà dovuta alla suddivisione in steps del TRANSYT. Infatti, a parità di tutte le condizioni, si è provato a modificare il numero di step di calcolo del TRANSYT.

Segnale	NumeroS TEP	PCU-H/H	Rit/Veic [sec]	Diff. [sec]	Diff %
1	60	0,50	3,0	-1,3	-30
3	52	0,90	5,5	1,2	27
4	51	1,00	6,1	1,8	41
6	45	1	3,6	-0,7	-15

Tabella 4.10 – Risultati dei due modelli a flussi “bilanciati”.

I risultati in termini di ritardo sono riportati nella tabella 4.10: le oscillazioni del valore del ritardo in corrispondenza del segnale 8 giustificano ampiamente l'errore del TRANSYT e le differenze nei due modelli.

Se ciò non bastasse, si verifica facilmente con un calcolo manuale, essendo il segnale 8 interessato esclusivamente dal flusso proveniente da 11, che i risultati forniti dal modello sono corretti. La motivazione di un errore così rilevante rispetto a quello che accade negli altri segnali è addebitabile al fatto che si è in presenza di un flusso in arrivo di elevata intensità in un breve periodo di tempo. Poiché tale flusso si presenta sull'attestamenti sul finire del tempo di verde, un'approssimazione nella valutazione del punto esatto di arrivo può implicare che una parte non irrilevante del plotone sia bloccato dal rosso in arrivo.

Tralasciando l'errore di cui sopra si nota, a validazione del modello proposto si osserva la coincidenza degli altri risultati.

#### **4.5 PORTA SARAGOZZA (BOLOGNA)**

Si propone ancora un'applicazione del modello proposto, riferita all'intersezione complessa di Porta Saragozza a Bologna. La planimetria è riportata in figura 4.5.

Si è assunto un ciclo di 110'' ed una velocità media di percorrenza degli archi di 40 km/h. I restanti dati di Input sono esposti nella tabella 4.11.

I dati sono relativi ad un piano semaforico che è realmente stato applicato all'incrocio (si ricorda ancora una volta che i tempi di verde specificati sono espressi in termini di verde efficace). I dati relativi ai flussi ed alla distribuzione degli stessi sono ricavati da indagini di campo.

L'applicazione del modello ha fornito i risultati, in termini di ritardi sugli accessi, evidenziati nella tabella 4.12.

PIANO [secondi] E FLUSSI [pcu/h]								
Segnale	Inizio Verde	Fine Verde	Flussi d'ingresso			Saturazione		
7	0	109	1800			7200		
1	0	48	0			3600		
10	64	96	0			3600		
2	0	60	0			5400		
5	105	56	0			5400		
17	75	55	0			5400		
8	0	83	0			3600		
11	0	43	0			1800		
4	64	96	100			3600		
6	105	55	2200			5400		
16	0	50	100			1800		
3	99	107	0			1800		
MATRICE DELLA RETE [metri]								
	1	10	2	5	17	8	11	3
7	30	30	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	55	0	0	0	0
10	0	0	0	0	85	0	0	0
2	0	0	0	0	0	70	0	0
11	0	0	0	0	65	0	0	0
4	0	0	55	0	0	0	55	0
6	0	0	45	0	0	0	45	0
16	0	0	0	0	0	0	0	55
3	0	0	0	55	0	0	0	0
MATRICE DI RIPARTIZIONE DEI FLUSSI [%]								
	1	10	2	5	17	8	11	3
7	61	39	0	61	39	0	0	0
4	0	0	26	0	74	26	74	0
6	0	0	93	0	7	93	7	0
16	0	0	0	100	0	0	0	100

Tabella 4.11 – Dati di Input del nodo di Porta Saragozza a Bologna (ciclo=110'', velocità=40 km/h)

Segnale	Rit/C [sec]	Rit/h [sec]	Veic/C	Veic/h	Rit/Veic [sec]
7	0	11	55	1800	0
1	843	27598	34	1098	25
10	737	24112	21	702	34
2	50	1647	63	2072	1
5	0	14	37	1198	0
17	17	551	28	930	1
8	530	17349	63	2072	8
11	133	4346	7	228	19
4	87	2844	3	100	28
6	1289	42188	67	2200	19
16	53	1733	3	100	17
3	259	8478	3	100	85

Tabella 4.12 – Risultati del modello.

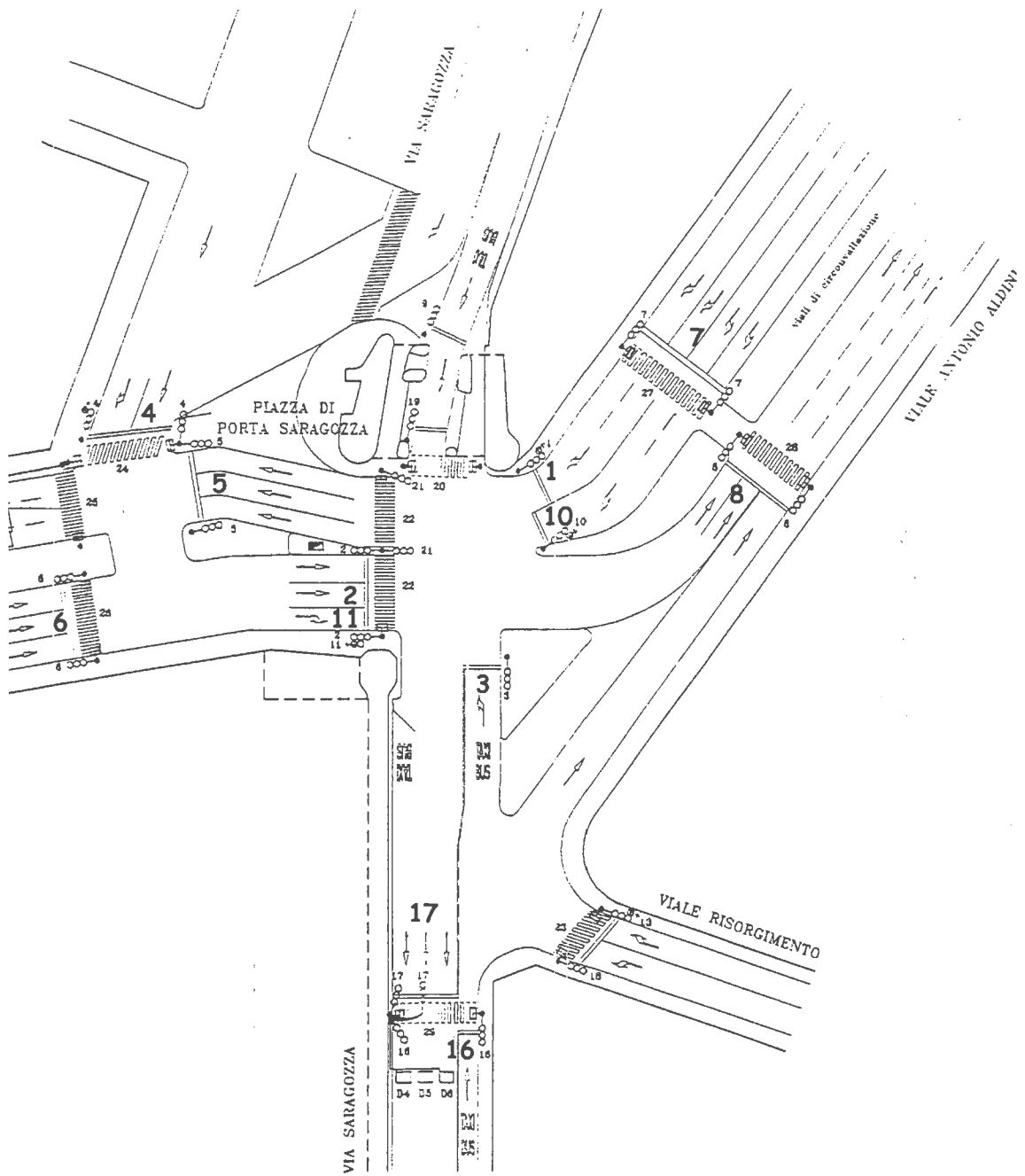


Figura 4.5 – Nodo complesso di Porta Saragozza a Bologna

Infine attraverso il modello è stato determinato il livello di servizio (sempre attraverso gli intervalli di ritardo forniti dall'HCM) per ogni coppia Origine/Destinazione, per ogni accesso e per l'intera intersezione.

I risultati sono riportati nella tabella 4.13.

<b>RITARDI E LOS PER COPPIE O/D</b>					
<b>Orig</b>	<b>Dest</b>	<b>Rit</b>	<b>Veic</b>	<b>Rit/Veic</b>	<b>LOS</b>
7	5	843	34	25	C
7	17	754	21	35	C
4	17	153	2	67	E
4	8	51	1	64	E
6	17	134	5	28	C
6	8	1751	63	28	C
16	5	312	3	102	F
<b>RITARDI E LOS PER ACCESSO</b>					
<b>Orig</b>		<b>Rit</b>	<b>Veic</b>	<b>Rit/Veic</b>	<b>LOS</b>
7		1597	55	29	C
4		204	3	66	E
6		1885	67	28	C
16		312	3	102	F
<b>INTERSEZIONE COMPLESSA</b>					
		<b>Rit</b>	<b>Veic</b>	<b>Rit/Veic</b>	<b>LOS</b>
Tot		3999	128	31	C

Tabella 4.13 – Livelli di servizio del nodo di Porta Saragozza.

Il livello di servizio di classe C che emerge dalla valutazione del nodo consente di affermare che la progettazione del piano semaforico è sufficiente.

## CONCLUSIONI E FUTURI SVILUPPI

Nella ricerca si è affrontata la problematica della valutazione delle prestazioni dei nodi semaforizzati di tipo complesso, dove le distanze tra segnali consecutivi sono ridotte ed i livelli di interazione tra i flussi sono molto elevati. A differenza dei casi relativi alle intersezioni semplici ed alle reti estese, si è notato che in letteratura sono poco sviluppate le tematiche inerenti alle intersezioni complesse, in particolar modo per quanto riguarda l'aspetto valutativo. L'approfondimento di questo argomento ha portato all'elaborazione di un modello che consente di stimare i principali parametri che influenzano la qualità delle prestazioni: la lunghezza delle code ed i ritardi subiti dai veicoli.

Il modello proposto è di complessità paragonabile, in termini di dati richiesti, a quella relativa ai modelli utilizzati nella valutazione delle intersezioni semplici. Infatti, è necessario fornire al modello, oltre alla temporizzazione semaforica, solamente alcune grandezze macroscopiche relative all'entità ed alle manovre dei flussi, nonché alcuni dati che definiscono l'intersezione, quali le caratteristiche degli archi della rete (velocità di percorrenza e lunghezze) ed i flussi di saturazione per i diversi attestamenti.

L'analisi dei ritardi è condotta con una accuratezza ed una quantità di informazioni superiori ad altri modelli sviluppati per le reti, prendendo in considerazione le peculiarità dei nodi complessi. I plotoni di veicoli, unità di traffico

del modello, sono “seguiti” lungo la rete ed è possibile determinare tutti gli eventi cui sono soggetti: tempi di attesa e code agli attestamenti, suddivisione dei plotoni in base alle destinazioni e rottura degli stessi a causa della temporizzazione dei segnali, eventuali fusioni tra plotoni che effettuano manovre non in conflitto.

Oltre all’analisi dettagliata del comportamento dei plotoni, i risultati ottenuti consentono di fornire una valutazione sintetica delle prestazioni, individuando il livello di servizio del nodo complesso. Questo è determinato, sulla base dei ritardi subiti dai veicoli, con un procedimento analogo al metodo proposto in letteratura per il caso delle intersezioni elementari. È quindi possibile stabilire il livello di servizio di tutte le manovre che si sviluppano nel nodo e quello di ogni attestamento. Aggregando tali risultati è possibile stabilire il livello di servizio di ogni singolo accesso all’intersezione complessa, nonché del nodo stesso nel suo insieme. Si può così ottenere una valutazione sintetica ma estremamente significativa delle prestazioni dell’intersezione complessa.

Il metodo proposto è stato validato attraverso il confronto con metodi consolidati, con riferimento a svariati casi reali: Piazza Verdi a Bolzano, Piazzale Maggi a Milano, Porta Saragozza a Bologna. Attraverso tali applicazioni sono state evidenziati le possibilità ed i vantaggi che il modello offre rispetto alle metodologie esistenti, che risultano talvolta inadatte all’analisi delle intersezioni complesse. In particolare si è sottolineato come alcune ipotesi semplificative introdotte da modelli consolidati, accettabili per le reti estese, generano alcuni errori nel caso di nodi complessi.

L’aggregazione dei risultati evidenzia la possibilità, per quanto riguarda la qualità del servizio, di ridurre il nodo ad un’intersezione elementare equivalente. In particolare, grazie alla valutazione sintetica delle prestazioni sugli accessi al nodo, è possibile trascurare tutto ciò che si sviluppa all’interno dell’intersezione complessa ed eliminare i segnali interni. Per esempio, con riferimento alla figura C.1 che schematizza il nodo di Piazzale Maggi a Milano, l’intera intersezione complessa indicata a sinistra della figura può essere ridotta, dopo aver determinato il livello di servizio delle manovre sugli accessi, al nodo elementare riportato a destra nella figura: rimangono solamente le direzioni di entrata e di uscita dal nodo e per ogni coppia

Origine/Destinazione è noto il ritardo accumulato dai veicoli ed il relativo livello di servizio.

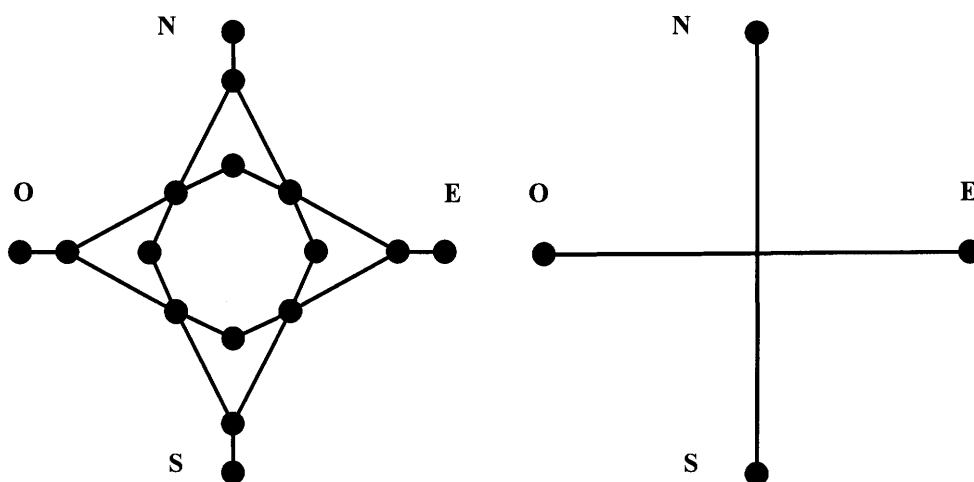


Figura C.1 – Il nodo complesso di Piazzale Maggi e la sua riduzione a nodo elementare equivalente.

Ciò che accade all'interno del nodo, verificato che le code sui vari attestamenti interni siano accettabili in termini di stabilità del sistema ed esclusi quindi i fenomeni di spill-back, è pienamente rappresentato ai fini della valutazione del nodo sugli accessi.

Con queste premesse, fin dove sono accettabili le ipotesi del modello (nella sostanza fin dove è possibile trascurare la dispersione dei platonici lungo gli archi della rete), è possibile ridurre i nodi complessi e le piccole reti ad intersezioni elementari equivalenti. Le semplificazioni, come evidenziato in figura C.2, possono essere considerevoli.

Da queste considerazioni emerge quindi la possibilità di impiegare i risultati conseguiti ai modelli di assegnazione alle reti. Innanzitutto la riduzione di nodi complessi ad intersezioni elementari equivalenti si presta alla riduzione della complessità dei grafi delle reti estese. Inoltre una delle principali problematiche nell'assegnazione alle reti urbane è la modellizzazione delle intersezioni semaforizzate ed in particolare la valutazione delle penalità di svolta. Il metodo proposto consente, grazie alla determinazione dei ritardi sulla base delle coppie

Origine/Destinazione, di effettuare una stima precisa delle penalità di svolta nei modelli di assegnazione.

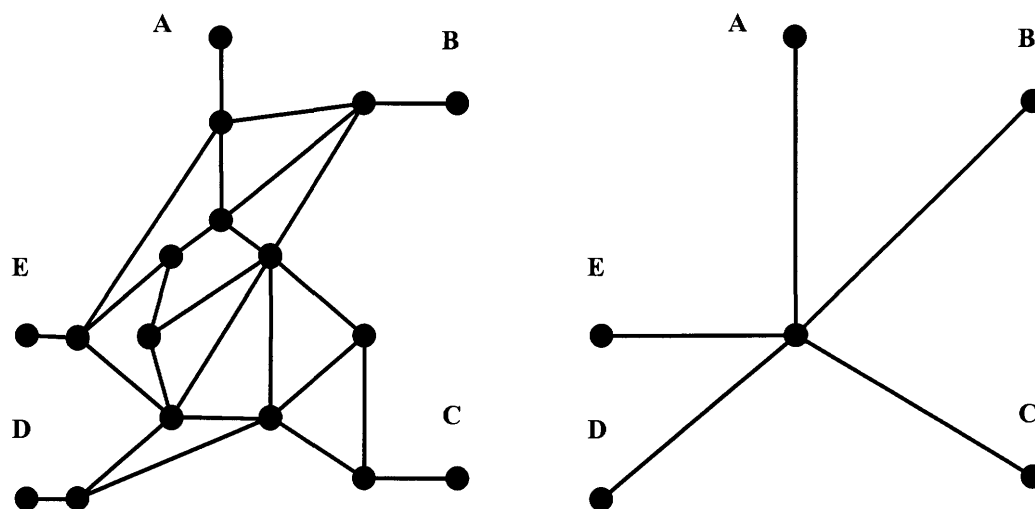


Figura C.2 – Esempio di nodo complesso e riduzione a nodo elementare equivalente.

Uno sviluppo ulteriore del modello potrebbe consistere nell'applicazione dei risultati conseguiti al caso delle reti estese. Un'ipotesi di questo tipo implica la ricerca di soluzioni su due filoni di ricerca differenti, ma non necessariamente alternativi. Da un lato è necessario introdurre nel modello una modifica che consenta la simulazione degli effetti della dispersione dei platonici lungo gli archi della rete. Dall'altro è ipotizzabile l'implementazione di un algoritmo misto. Questo dovrebbe sostanzialmente utilizzare l'impostazione del modello proposto dove le caratteristiche della rete richiedono lo sfruttamento dei vantaggi che esso offre, mentre dovrebbe basarsi sulle tecniche tradizionali nelle porzioni di rete dove questo è possibile.

Nel modello presentato altri elementi che caratterizzano gli spostamenti dei veicoli nelle intersezioni semaforizzate sono ancora suscettibili di un miglioramento. Si pensi, per esempio, alla problematica relativa alle manovre di svolta a sinistra non protette. Negli algoritmi tali manovre non sono ancora modellizzate in maniera precisa, prendendo in considerazione tutti gli elementi che le condizionano, ma fanno riferimento semplicemente al flusso di saturazione.

Infine, non si esclude la possibilità di utilizzare il modello come un punto di partenza per strutturare nuovi algoritmi che consentano non soltanto la valutazione, ma anche l'ottimizzazione dei piani semaforici.

## *Appendice A*

# **INPUT DEL MODELLO TRANSYT**

Si riportano in questa sezione i files utilizzati per i dati di ingresso del programma TRANSYT relativi agli esempi applicativi.

I dati sono forniti al programma mediante alcune schede. Ogni scheda, denominata *card* è composta da una o più righe di un file di testo e la sua tipologia è identificata mediante un numero, il primo di ogni riga. Solo alcune schede sono necessarie negli esempi proposti. In particolare la scheda 1 contiene i dati comuni a tutto il sistema analizzato (tempo di ciclo, numero di *steps*, fattori di scala e così via). Le schede 12 e 13 identificano per ogni nodo dell'intersezione complessa la temporizzazione delle fasi, rispettivamente nel caso di 2 o 3 fasi. Nella scheda 28 sono invece definiti l'offset di ogni nodo. La scheda 31 specifica la relazione tra ogni arco della rete ed il tempo di verde che controlla l'uscita del flusso dall'arco analizzato. Inoltre viene specificata la lunghezza dell'arco, il fattore di dispersione dei platon, il flusso di saturazione dell'attestamento in uscita e altre caratteristiche relative all'arco. Vi è una scheda 31 per ogni arco della rete. Nella scheda 32 si determina il flusso veicolare lungo ciascun arco e gli archi che lo alimentano. Qui si specifica l'eventuale flusso uniforme proveniente dall'esterno del sistema e la velocità dei flussi in arrivo. Infine la scheda 35 è utilizzata per ottenere un output grafico dell'andamento dei flussi in arrivo ed in partenza su ogni attestamento.

**Esempio di Piazza Verdi a Bolzano**

Piazza Verdi - Bolzano					AV 25/11/2001										
1	90	60	60	0	0	0	0	0	80	1	0	1	0	300	50
2	1	2	3	4											
12	1	84	20	38	25										
13	2	3	10	43	15	67	10								
12	3	11	10	43	27										
12	4	0	10	32	40										
28	1	84	2	3	3	11	4								
31	1	1	1	13	2	0	0	0	0	0	1000	0	4200	0	-1
31	2	1	1	4	2	18	0	0	0	0	72	0	4000	0	-1
31	3	1	2	23	1	0	0	0	0	0	1000	0	2800	0	-1
31	4	3	2	7	1	0	0	0	0	0	1000	0	1800	0	-1
31	6	3	1	4	2	22	0	0	0	0	103	0	3600	0	-1
31	7	3	1	4	2	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1
31	9	2	1	4	2	0	0	0	0	0	72	0	3600	0	-1
31	10	2	1	5	2	7	0	0	0	0	92	0	3600	0	-1
31	11	2	3	6	1	0	0	0	0	0	33	0	3000	0	-1
31	12	4	1	4	2	0	0	0	0	0	1000	0	1500	0	-1
31	13	4	2	34	1	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1
31	14	2	3	6	1	4	0	0	0	0	72	0	3000	0	-1
31	15	2	2	7	1	0	0	0	0	0	33	0	3200	0	-1
31	16	1	2	18	1	1	0	0	0	0	72	0	1500	0	-1
31	18	2	2	10	3	0	0	0	0	0	92	0	3200	0	-1
32	1	940	940	0	0	36									
32	2	769	0	11	315	36	10	454	36						
32	3	460	460	0	0	36									
32	4	245	245	0	0	36									
32	6	1319	0	9	863	36	15	456	36						
32	7	735	735	0	0	36									
32	9	863	0	1	771	36	3	92	36						
32	10	490	0	4	122	36	7	368	36						
32	11	344	0	12	154	36	13	190	36						
32	12	186	186	0	0	36									
32	13	615	615	0	0	36									
32	14	537	0	1	169	36	3	368	36						
32	15	456	0	12	32	36	13	424	36						
32	16	66	0	10	37	36	11	29	36						
32	18	490	0	4	123	36	7	367	36						
35	1	2	3	4											
35	6	7	9	10											
35	11	12	13	14											
35	15	16	18												

### Esempio di Piazzale Maggi a Milano

Piazza Maggi - Milano										21/05/2001						
1	90	60	60	0	0	0	0	0	0	80	1	0	1	0	300	50
2	1	2	3	4												
13	1	82	10	16	10	50	10									
12	2	44	15	73	15											
13	3	76	10	34	10	47	10									
13	4	80	15	33	15	59	15									
31	1	1	3	4	1	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1	
31	3	1	1	4	3	0	0	0	0	0	57	0	5400	0	-1	
31	4	1	2	0	1	4	0	0	0	0	47	0	3600	0	-1	
31	6	2	2	11	1	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1	
31	8	2	1	4	2	7	0	0	0	0	82	0	5400	0	-1	
31	10	2	2	0	1	8	0	0	0	0	72	0	3600	0	-1	
31	11	3	3	4	1	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1	
31	13	3	1	4	3	0	0	0	0	0	52	0	5400	0	-1	
31	14	3	2	0	1	15	0	0	0	0	42	0	3600	0	-1	
31	16	4	1	13	2	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1	
31	18	4	2	4	1	9	0	0	0	0	92	0	5400	0	-1	
31	20	4	1	0	3	0	0	0	0	0	78	0	3600	0	-1	
32	1	900	900	0	0	36										
32	3	1710	0	6	1440	36	8	270	36							
32	4	1160	0	6	360	36	8	800	36							
32	6	1800	1800	0	0	36										
32	8	1070	0	11	630	36	13	440	36							
32	10	1110	0	11	270	36	13	840	36							
32	11	900	900	0	0	36										
32	13	1280	0	16	1100	36	18	180	36							
32	14	945	0	18	945	36										
32	16	1100	1100	0	0	36										
32	18	1125	0	1	540	36	3	585	36							
32	20	1485	0	1	360	36	3	1125	36							
35	1	16	11	6												
35	11	6														
35	4	20	14	10												
35	14	10														
35	3	18	13	8												
35	13	8														

**Esempio di Piazzale Maggi a Milano (flussi bilanciati)**

Piazza Maggi - Milano										18/09/2001						
1	90	60	60	0	0	0	0	0	0	80	1	0	1	0	300	50
2	1	2	3	4												
13	1	82	10	16	10	50	10									
12	2	44	15	73	15											
13	3	76	10	34	10	47	10									
13	4	80	15	33	15	59	15									
31	1	1	3	4	1	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1	
31	3	1	1	4	3	0	0	0	0	0	57	0	5400	0	-1	
31	4	1	2	0	1	4	0	0	0	0	47	0	3600	0	-1	
31	6	2	2	11	1	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1	
31	8	2	1	4	2	7	0	0	0	0	82	0	5400	0	-1	
31	10	2	2	0	1	8	0	0	0	0	72	0	3600	0	-1	
31	11	3	3	4	1	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1	
31	13	3	1	4	3	0	0	0	0	0	52	0	5400	0	-1	
31	14	3	2	0	1	15	0	0	0	0	42	0	3600	0	-1	
31	16	4	1	13	2	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1	
31	18	4	2	4	1	9	0	0	0	0	92	0	5400	0	-1	
31	20	4	1	0	3	0	0	0	0	0	78	0	3600	0	-1	
32	1	900	900	0	0	36										
32	3	1200	0	6	800	36	8	400	36							
32	4	1200	0	6	1000	36	8	200	36							
32	6	1800	1800	0	0	36										
32	8	600	0	11	600	36										
32	10	1100	0	11	300	36	13	800	36							
32	11	900	900	0	0	36										
32	13	800	0	16	800	36										
32	14	1600	0	18	1300	36	16	300	36							
32	16	1100	1100	0	0	36										
32	18	1300	0	1	400	36	3	900	36							
32	20	800	0	1	500	36	3	300	36							
35	1	16	11	6												
35	4	20	14	10												
35	3	18	13	8												

## *Appendice B*

# **OUTPUT DEL MODELLO TRANSYT**

Si riportano di seguito i risultati del programma TRANSYT relativi agli esempi applicativi.

I files di output del programma sono forniti come file di testo di estensione PRT. Possiamo suddividere questi files in tre parti. Nella prima sono riportati i dati di input dell'elaborazione. In una seconda parte sono elencati i risultati numerici del calcolo e delle eventuali iterazioni intermedie. Per ogni attestamento sono specificati il grado di saturazione, il flusso che lo interessa, il ritardo che subiscono i veicoli (suddiviso nelle due aliquote di ritardo uniforme e di ritardo casuale e di sovrasaturazione). Altri indicatori riportati sono il costo del ritardo la percentuale di arresti ed il loro costo e la coda sull'arco considerato. Viene inoltre determinato il valore dell'indice di prestazione ed altri elementi riassuntivi.

Nella terza parte è riportato un risultato grafico della simulazione. Per gli attestamenti indicati nella scheda di input 32, il grafo rappresenta la variazione durante un ciclo semaforico (rappresentano come asse orizzontale) del flusso in arrivo (indicato con i simboli @ e I) e del flusso che lascia l'attestamento (indicato con i simboli @ e ^). I due profili sono sovrapposti in modo da poter visualizzare la distorsione del flusso nel tempo di ciclo.

# Esempio di Piazza Verdi a Bolzano

1

TRANSTYT  
-----  
Traffic Network Study Tool

(C) COPYRIGHT 1988 - UK Department of Transport, TRRL, Crowthorne, Berkshire, RG11 6AU, UK  
 0Implementation for IBM-PC standard, running under MS-DOS  
 0Program TRANSTYT, version 9, modification 4  
 0Piazza Verdi - Bolzano AV 25/11/2001

PARAMETERS CONTROLLING DIMENSIONS OF PROBLEM :

```

NUMBER OF NODES           = 4
NUMBER OF LINKS           = 15
NUMBER OF OPTIMISED NODES = 4
MAXIMUM NUMBER OF GRAPHIC PLOTS = 32
NUMBER OF STEPS IN CYCLE  = 60
MAXIMUM NUMBER OF SHARED STOPLINES = 0
MAXIMUM NUMBER OF TIMING POINTS = 3
MAXIMUM LINKS AT ANY NODE = 6
  
```

CORE REQUESTED = 4855 WORDS  
 CORE AVAILABLE = 30000 WORDS

1Program TRANSTYT Piazza Verdi - Bolzano

AV 25/11/2001

Page 2

0 DATA INPUT :-

```

OCARD  CARD
NO.    TYPE
( 1)=  TITLE:- Piazza Verdi - Bolzano AV 25/11/2001
OCARD  CARD  CYCLE NO. OF TIME EFFECTIVE-GREEN EQUISAT 0=UNEQUAL FLOW CRUISE-SPEEDS OPTIMISE EXTRA HILL- DELAY STOP
NO.    TYPE  TIME  STEPS PERIOD DISPLACEMENTS SETTINGS 0=NO 1=EQUAL 10-200 50-200 0=TIMES 1=0/SET FINAL OUTPUT P PER P PER
          (SEC) CYCLE MINS. (SEC) (SEC) 1=YES CYCLE % % 1=SPEEDS 2=FULL OUTPUT 1=FULL PCU-H 100
2)= 1 90 60 60 0 0 0 0 0 0 80 1 0 1 0 300 50
OCARD  CARD
NO.    TYPE
3)= 2 1 2 3 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0
CARD  CARD  NODE
NO.   TYPE  NO.
4)= 12 1 84 20 38 25 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
5)= 13 2 3 10 43 15 67 10 0 0 0 0 0 0 0 0
6)= 12 3 11 10 43 27 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
7)= 12 4 0 10 32 40 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0
CARD  CARD  NODE
NO.   TYPE  NO.
8)= 28 1 84 2 3 3 11 4 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0
LINK CARDS: FIXED DATA
FIRST GREEN SECOND GREEN
CARD  CARD  LINK  EXIT  START  END  START  END  LINK  STOP  SAT  DELAY  DISPSN
NO.   TYPE  NO.   NODE  STAGE  LAG  STAGE  LAG  STAGE  LAG  STAGE  LAG  LENGTH  WT.X100  FLOW  WT.X100  TIME
9)= 31 1 1 1 1 13 2 0 0 0 0 0 1000 0 4200 0 -1
10)= 31 2 1 1 4 2 18 0 0 0 0 0 72 0 4000 0 -1
11)= 31 3 1 2 23 1 0 0 0 0 0 1000 0 2800 0 -1
12)= 31 4 3 2 7 1 0 0 0 0 0 1000 0 1800 0 -1
13)= 31 6 3 1 4 2 22 0 0 0 0 0 103 0 3600 0 -1
14)= 31 7 3 1 4 2 0 0 0 0 0 1000 0 3600 0 -1
15)= 31 9 2 1 4 2 0 0 0 0 0 72 0 3600 0 -1
16)= 31 10 2 1 5 2 7 0 0 0 0 92 0 3600 0 -1
17)= 31 11 2 3 6 1 0 0 0 0 0 33 0 3000 0 -1
18)= 31 12 4 1 4 2 0 0 0 0 0 1000 0 1500 0 -1
19)= 31 13 4 2 34 1 0 0 0 0 0 1000 0 3600 0 -1
20)= 31 14 2 3 6 1 4 0 0 0 0 72 0 3000 0 -1
21)= 31 15 2 2 7 1 0 0 0 0 0 33 0 3200 0 -1
22)= 31 16 1 2 18 1 1 0 0 0 0 72 0 1500 0 -1
23)= 31 18 2 2 10 3 0 0 0 0 0 92 0 3200 0 -1
0
LINK CARDS: FLOW DATA
ENTRY 1 ..... ENTRY 2 ..... ENTRY 3 ..... ENTRY 4 .....
CARD  CARD  LINK  TOTAL UNIFORM LINK CRUISE LINK CRUISE LINK CRUISE LINK CRUISE
NO.   TYPE  NO.   FLOW FLOW NO.   FLOW SPEED NO.   FLOW SPEED NO.   FLOW SPEED NO.   FLOW SPEED
24)= 32 1 940 940 0 0 36 0 0 0 0 0 0 0 0
1Program TRANSTYT Piazza Verdi - Bolzano AV 25/11/2001 Page 3
25)= 32 2 769 0 11 315 36 10 454 36 0 0 0 0
26)= 32 3 460 460 0 0 36 0 0 0 0 0 0 0 0
  
```









5)=	12	2	44	15	73	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6)=	13	3	76	10	34	10	47	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7)=	13	4	80	15	33	15	59	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

LINK CARDS: FIXED DATA

CARD NO.	CARD TYPE	LINK NO.	EXIT NODE	FIRST GREEN		SECOND GREEN		LINK LENGTH	STOP WT.X100	SAT FLOW	DELAY WT.X100	DISPSN X100		
				START STAGE	END LAG	START STAGE	END LAG							
8)=	31	1	1	3	4	1	0	0	0	1000	0	3600	0	-1
9)=	31	3	1	1	4	3	0	0	0	57	0	5400	0	-1
10)=	31	4	1	2	0	1	4	0	0	47	0	3600	0	-1
11)=	31	6	2	2	11	1	0	0	0	1000	0	3600	0	-1
12)=	31	8	2	1	4	2	7	0	0	82	0	5400	0	-1
13)=	31	10	2	2	0	1	8	0	0	72	0	3600	0	-1
14)=	31	11	3	3	4	1	0	0	0	1000	0	3600	0	-1
15)=	31	13	3	1	4	3	0	0	0	52	0	5400	0	-1
16)=	31	14	3	2	0	1	15	0	0	42	0	3600	0	-1
17)=	31	16	4	1	13	2	0	0	0	1000	0	3600	0	-1
18)=	31	18	4	2	4	1	9	0	0	92	0	5400	0	-1
19)=	31	20	4	1	0	3	0	0	0	78	0	3600	0	-1

LINK CARDS: FLOW DATA

CARD NO.	CARD TYPE	LINK NO.	TOTAL FLOW	UNIFORM FLOW	ENTRY 1		ENTRY 2		ENTRY 3		ENTRY 4	
					LINK NO.	CRUISE SPEED	LINK NO.	CRUISE SPEED	LINK NO.	CRUISE SPEED	LINK NO.	CRUISE SPEED
20)=	32	1	900	900	0	0	36	0	0	0	0	0
21)=	32	3	1710	0	6	1440	36	8	270	36	0	0
22)=	32	4	1160	0	6	360	36	8	800	36	0	0
23)=	32	6	1800	1800	0	0	36	0	0	0	0	0
24)=	32	8	1070	0	11	630	36	13	440	36	0	0
25)=	32	10	1110	0	11	270	36	13	840	36	0	0
26)=	32	11	900	900	0	0	36	0	0	0	0	0
27)=	32	13	1280	0	16	1100	36	18	180	36	0	0
28)=	32	14	945	0	18	945	36	0	0	0	0	0

1Program TRANSYT      Piazza Maggi - Milano      21/05/2001      Page 3

CARD NO.	CARD TYPE	LINK NO.	LINK NO.	LINK NO.	LINK NO.	GRAPH PLOT		LINK LINK	
						NO.	NO.	NO.	NO.
32)=	35	1	16	11	6	0	0	0	0
33)=	35	11	6	0	0	0	0	0	0
34)=	35	4	20	14	10	0	0	0	0
35)=	35	14	10	0	0	0	0	0	0
36)=	35	3	18	13	8	0	0	0	0
37)=	35	13	8	0	0	0	0	0	0

0\*\*\*\*END OF SUBROUTINE TINPUT\*\*\*\*  
 1Program TRANSYT      Piazza Maggi - Milano      21/05/2001      Page 4  
 0 90 SECOND CYCLE 60 STEPS

INITIAL SETTINGS  
 - (SECONDS)

0	NODE NO	NUMBER OF STAGES	STAGE 1	STAGE 2	STAGE 3	STAGE 4	STAGE 5	STAGE 6	STAGE 7
1	3	82	16	50					
2	2	44	73						
3	3	76	34	47					
4	3	80	33	59					

0	LINK NUMBER	FLOW INTO LINK	SAT FLOW	DEGREE OF SAT	MEAN PER CRUISE	TIMES PCU	-----DELAY-----		----STOPS----		----QUEUE----		PERFORMANCE INDEX	EXIT NODE	GREEN TIMES	
							UNIFORM DELAY	RANDOM+ OVERSAT	COST OF DELAY	MEAN COST OF STOPS	MAX. AVERAGE EXCESS	WEIGHTED SUM OF ( ) VALUES			START 1ST	START 2ND
1	900	3600	80	124	37	7.1 + 2.0	( 27.4)	96	( 1.9)	22		29.3	1	54	82	
3	1710	5400	53	7	5	1.6 + 0.6	( 6.5)	17	( 0.7)	7		7.2	1	86	50	
4	1161	3600	41	6	3	0.5 + 0.4	( 2.5)	18	( 0.5)	9		2.9	1	16	86	
6	1800	3600	90	124	26	8.9 + 4.3	( 39.6)	91	( 3.7)	44		43.3	2	84	44	
8	1070	5400	56	10	14	3.6 + 0.6	( 12.8)	46	( 1.1)	12		13.9	2	48	80	
10	1110	3600	40	9	3	0.6 + 0.3	( 2.8)	20	( 0.5)	7		3.4	2	73	52	
11	900	3600	90	124	48	7.8 + 4.2	( 35.9)	109	( 2.2)	26		38.2	3	51	76	
13	1280	5400	37	6	2	0.4 + 0.3	( 2.2)	8	( 0.2)	3		2.5	3	80	47	
14	945	3600	41	5	2	0.2 + 0.4	( 1.7)	17	( 0.4)	11		2.1	3	34	1	
16	1100	3600	92	124	45	8.8 + 5.0	( 41.4)	108	( 2.7)	31		44.1	4	3	33	
18	1125	5400	36	11	9	2.6 + 0.3	( 8.6)	42	( 1.1)	13		9.6	4	37	89	
20	1485	3600	54	10	4	1.2 + 0.6	( 5.2)	24	( 0.8)	9		6.0	4	80	59	

0 TOTAL DISTANCE TRAVELLED (PCU-KM/H)      5345.2  
 0 TOTAL TIME SPENT (PCU-H/H)      246.6  
 0 MEAN JOURNEY SPEED (KM/H)      21.7  
 0 TOTAL UNIFORM DELAY (PCU-H/H)      43.4  
 0 TOTAL RANDOM+ OVERSAT DELAY (PCU-H/H)      18.9  
 0 TOTAL COST OF DELAY (\$/H)      ( 186.8)  
 0 TOTAL COST OF STOPS (\$/H)      + ( 15.7)  
 0 TOTAL MAX. AVERAGE EXCESS QUEUES (\$/H)      + ( 0.0)  
 0 TOTAL PERFORMANCE INDEX (\$/H)      = 202.5  
 0 TOTALS

\*\*\*\*\*

0	CRUISE LITRES PER HOUR	DELAY LITRES PER HOUR	STOPS LITRES PER HOUR	TOTALS LITRES PER HOUR
0	423.7	87.2	45.1	555.9

0FUEL CONSUMPTION PREDICTIONS

0 NO. OF ENTRIES TO SUBPT = 1  
 0 NO. OF LINKS RECALCULATED= 17





# Esempio di Piazzale Maggi a Milano (flussi bilanciati)

1

TRANST  
-----  
Traffic Network Study Tool

(C) COPYRIGHT 1988 - UK Department of Transport, TRRL, Crowthorne, Berkshire, RG11 6AU, UK  
 0Implementation for IBM-PC standard, running under MS-DOS  
 0Program TRANST, version 9, modification 4  
 0Piazza Maggi - Milano 18/09/2001

PARAMETERS CONTROLLING DIMENSIONS OF PROBLEM :

```

NUMBER OF NODES           = 4
NUMBER OF LINKS           = 12
NUMBER OF OPTIMISED NODES = 4
MAXIMUM NUMBER OF GRAPHIC PLOTS = 24
NUMBER OF STEPS IN CYCLE  = 60
MAXIMUM NUMBER OF SHARED STOPLINES = 0
MAXIMUM NUMBER OF TIMING POINTS = 3
MAXIMUM LINKS AT ANY NODE = 3
  
```

CORE REQUESTED = 4421 WORDS  
 CORE AVAILABLE = 30000 WORDS

1Program TRANST Piazza Maggi - Milano

18/09/2001

Page 2

0 DATA INPUT :-

0CARD CARD

NO. TYPE

( 1)= TITLE:- Piazza Maggi - Milano

18/09/2001

0CARD NO.	CARD TYPE	CYCLE TIME (SEC)	NO. OF STEPS PER CYCLE	OF PERIOD 1-1200 MINS.	EFFECTIVE-START (SEC)	GREEN DISPLACEMENTS (SEC)	EQUISAT SETTINGS 1=YES	SAT 0=NO 1=EQUAL CYCLE	0=UNEQUAL FLOW SCALE 10-200 %	CRUISE-SPEEDS SCALE CARD32 50-200	OPTIMISE 0=NONE 1=O/SET 2=FULL	EXTRA COPIES FINAL OUTPUT	HILL-CLIMB 1=FULL	DELAY VALUE P PER FCU-H	STOP VALUE P PER 100
2)=	1	90	60	60	0	0	0	0	80	1	0	1	0	300	50

0CARD CARD

NO. TYPE

LIST OF NODES TO BE OPTIMISED

0CARD NO.	CARD TYPE	NO.	STAGE 1 CHANGE	STAGE 2 CHANGE	STAGE 3 CHANGE	STAGE 4 CHANGE	STAGE 5 CHANGE	STAGE 6 CHANGE	STAGE 7 CHANGE
3)=	2	1	2	3	4	0	0	0	0
4)=	13	1	82	10	16	10	50	10	0
5)=	12	2	44	15	73	15	0	0	0
6)=	13	3	76	10	34	10	47	10	0
7)=	13	4	80	15	33	15	59	15	0

0

LINK CARDS: FIXED DATA

CARD NO.	CARD TYPE	LINK NO.	EXIT NODE	FIRST START STAGE	GREEN LAG	END STAGE	LAG	START STAGE	LAG	END STAGE	LAG	LINK LENGTH	STOP WT.X100	SAT FLOW	DELAY WT.X100	DISPSN
8)=	31	1	1	3	4	1	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1
9)=	31	3	1	1	4	3	0	0	0	0	0	57	0	5400	0	-1
10)=	31	4	1	2	0	1	4	0	0	0	0	47	0	3600	0	-1
11)=	31	6	2	2	11	1	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1
12)=	31	8	2	1	4	2	7	0	0	0	0	82	0	5400	0	-1
13)=	31	10	2	2	0	1	8	0	0	0	0	72	0	3600	0	-1
14)=	31	11	3	3	4	1	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1
15)=	31	13	3	1	4	3	0	0	0	0	0	52	0	5400	0	-1
16)=	31	14	3	2	0	1	15	0	0	0	0	42	0	3600	0	-1
17)=	31	16	4	1	13	2	0	0	0	0	0	1000	0	3600	0	-1
18)=	31	18	4	2	4	1	9	0	0	0	0	92	0	5400	0	-1
19)=	31	20	4	1	0	3	0	0	0	0	0	78	0	3600	0	-1

0

LINK CARDS: FLOW DATA

CARD NO.	CARD TYPE	LINK NO.	TOTAL FLOW	UNIFORM FLOW	LINK NO.	ENTRY 1 FLOW	CRUISE SPEED	LINK NO.	ENTRY 2 FLOW	CRUISE SPEED	LINK NO.	ENTRY 3 FLOW	CRUISE SPEED	LINK NO.	ENTRY 4 FLOW	CRUISE SPEED
20)=	32	1	900	900	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21)=	32	3	1200	0	6	800	36	8	400	36	0	0	0	0	0	0
22)=	32	4	1200	0	6	1000	36	8	200	36	0	0	0	0	0	0
23)=	32	6	1800	1800	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24)=	32	8	600	0	11	600	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25)=	32	10	1100	0	11	300	36	13	800	36	0	0	0	0	0	0
26)=	32	11	900	900	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27)=	32	13	800	0	16	800	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28)=	32	14	1600	0	18	1300	36	16	300	36	0	0	0	0	0	0

1Program TRANST

Piazza Maggi - Milano

18/09/2001

Page 3

0

GRAPH PLOT CARDS

29)=	32	16	1100	1100	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30)=	32	18	1300	0	1	400	36	3	900	36	0	0	0	0	0	0
31)=	32	20	800	0	1	500	36	3	300	36	0	0	0	0	0	0







## BIBLIOGRAFIA

- [1] Allsop R.E. (1971), *Delay minimizing settings for fixed time traffic signals at a single junction*, Journal Institute Mathematics Applications, Vol 8, pp. 164-185.
- [2] Allsop R.E. (1972), *Estimating the traffic capacity of a signalized road junction*, Transportation Research, Vol. 6, pp. 245-255.
- [3] Astarita V. (1998), *La modellizzazione delle intersezioni nei modelli dinamici di simulazione del traffico*, in “Metodi e tecnologie dell’ingegneria del traffico” (a cura di Cantarella G.E., Russo F.), Francoangeli, Milano.
- [4] Bernetti G., Camus R. (2000), *Valutazione dei ritardi nelle intersezioni complesse semaforizzate*, atti del Convegno SIDT “Metodi e tecnologie dell’ingegneria dei trasporti”, Reggio Calabria.
- [5] Bernetti G. Camus R. (2001), *L.O.S. evaluation in multi-junction nodes*, International Conference of Traffic Science 2001, proceedings.
- [6] Bilia L. (1999), *Metodi di ottimizzazione della temporizzazione semaforica per le intersezioni isolate*, Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Trasporti,
- [7] Camus R. (1992), *A traffic coordination model for urban signalized network design*, Proceedings, 1<sup>st</sup> meeting of the EURO working group on urban traffic and transportation, Landshut.

- [8] Camus R., D'Amore A., Ukovich W. (1982), *Un metodo per il progetto automatico di intersezioni semaforizzate complesse*, Giornate di lavoro AIRO, 27-29 settembre 1982, Como.
- [9] Camus R., D'Amore A., Ukovich W. (1983), *Optimal Fixed Time Vehicular Control for Multi-Junction Nodes Using Mathematical Programming*, Proceedings of the 4th IFAC/IFIP/IFORS International Conference on Control in Transportation Systems, Baden Baden.
- [10] Cantarella G.E., Viola F.A. (1988), *Analisi delle prestazioni di intersezioni semaforizzate*, in "Modelli e metodi per l'ingegneria del traffico" (a cura di Cantarella G.E., Festa D.C.), Francoangeli, Milano.
- [11] Cantarella G.E., Sforza A., Viola F.A. (1988), *Metodi di regolazione delle intersezioni semaforizzate*, in "Modelli e metodi per l'ingegneria del traffico" (a cura di Cantarella G.E., Festa D.C.), Francoangeli, Milano.
- [12] Cohen S.L. (1983), *Concurrent use of MAXBAND and TRANSYT signal timing programs for arterial signal optimisation*, Transportation Research Rec. 906, pp 81-84.
- [13] Cohen S.L., Liu C.C. (1986), *The bandwidth-constrained TRANSYT signal optimisation program*, Transportation Research Rec. 1057, pp 1-7.
- [14] Gallivan S., Heydecker B. (1988), *Optimising the control performance of traffic signals at a single junction*, Transportation Research – B Vol. 22B, No 5, pp. 357-370.
- [15] *Direttiva per la redazione, adozione ed attuazione dei piani urbani del traffico* (1995), G.U. n. 146 del 24.6.1995.
- [16] Gartner N.H. (1972), *Optimal synchronisation of traffic signal networks by dynamic programming*, Proc. 5<sup>th</sup> Symp. On the theory of traffic flow and transportation, American Elsevier, New York, pp. 281-295.
- [17] Gartner N. H. (1983), *OPAC: a demand-responsive strategy for traffic signal control*, Transportation Research Record 906
- [18] Gartner N.H., Assmann S.F., Lasaga F., Hou D.L. (1990), *MULTIBAND: a variable-bandwidth arterial progression scheme*, Transportation Research Record.

- [19] Gartner N.H., Little J.D.C. (1975), *Generalized combination method for area traffic control*, Transportation Research Rec. 531, pp 58-69.
- [20] Heydecker B.G., Dudgeon I.W. (1987), *Calculation of signal settings to minimize delay at a junction*, On Transportation and Traffic Theory, Gartner and Wilson, pp. 159-178.
- [21] *Highway Capacity Manual* (1997), Transportation Research Board, Special Report 209, third edition, Washington D.C.
- [22] Huddart K.W., Turner E.D (1969), *Traffic signal progressions – G.L.C. combination method*, Traffic Engineering & Control
- [23] Improta G., Cantarella G.E. (1984), *Control System Design for an individual signalized junction*, Transportation Research Board, pp. 147-167.
- [24] Improta G., Cantarella G.E. (1988), *Capacity factor or cycle time optimization for signalized junctions: a graph theory approach*, Transportation Research Vol. 22B n.1, pp. 1-23.
- [25] Improta G., Sforza A. (1982), *Optimal offsets for traffic signal systems in urban networks*, Transportation Research Rec. 16B, pp 143-161.
- [26] Little J.D.C. (1966), *The synchronisation of traffic signals by mixed-integer linear programming*, Operations Research 14, pp 568-594.
- [27] Little J.D.C. Kelson M.D., Gartner N.H. (1981), *MABAND: a program for setting signals on arteries and triangular networks*, Transportation Research Record 795.
- [28] Morgan J.T., Little J.D.C. (1964), *Synchronising traffic signals for maximal bandwidth*, Operations Research 12, pp 896-912
- [29] *Nuovo codice della strada* (1992), Decreto Legislativo 30 aprile 1992, n. 285.
- [30] Papageorgiou M. (a cura di, 1991), *Concise encyclopedia of traffic & transportation systems*, Pergamon Press.
- [31] Robertson D.I. (1969), *Transyt: traffic network study tool*, Ministry of Transport, RRL Report L253, Crowthorne (Road Research Laboratory).
- [32] Robertson D.I., Vincent R.A., Mitchell A.I. (1980), *User guide to TRANSYT version 8*, TRRL Department of the environment, report n. 888, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, U.K.

- [33] Ruberti G. (1994), *L'influenza della schematizzazione delle intersezioni nell'assegnazione della domanda alle reti stradali*, in "Sviluppi della ricerca sui sistemi di trasporto" (a cura di Cascetta E., Salerno G.), Francoangeli, Milano.
- [34] Skabardonis A., May A.D. (1985), *Comparative analysis of computer models for arterial signal timing*, Transportation Research Rec. 1021, pp 45-52.
- [35] Transportation Research Board (1997), *Highway Capacity Manual*, Special Report 209, third edition, Washington D.C.
- [36] Webster F.V. (1958), *Traffic signal settings*, Road Research Laboratory Technical Paper n. 39.
- [37] Webster F.V., Cobbe B.M. (1966), *Traffic Signals*, Road Research Laboratory Technical Paper n. 56.
- [38] Wong S.C., Chung J.S.W., Tong C.O. (1999), *Equilibrium networks: practical schemes for signal optimisation*, Traffic Engineering & Control, Vol 40, No 12.