
R. Camus

Progetto di impianti semaforici



*Trieste
febbraio 2001*

1 Elementi di base

1.1 Introduzione

Le intersezioni (o incroci) di una rete stradale sono quei punti in cui si ha la confluenza di diversi rami stradali. Le traiettorie seguite dai veicoli o dai pedoni nell'attraversamento dell'incrocio possono 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.

La presenza ed il numero di detti punti dipende dalla geometria dell'intersezione, e dalle manovre consentite per le diverse correnti di traffico. Gli effetti negativi dovuti alla presenza dei punti di conflitto possono essere ridotti o annullati mediante un'opportuna regolamentazione delle manovre.

In quest'ambito la regolazione semaforica è la tecnica usualmente adottata per gli incroci urbani caratterizzati da flussi rilevanti, tali cioè da non rendere efficace l'adozione di regole di precedenza o di priorità. La regolazione semaforica costituisce una soluzione operativa di notevole importanza in ambito extra-urbano mentre in ambito urbano assume un ruolo fondamentale nel quadro globale dell'assetto del sistema della mobilità.

Questa tecnica consente di aumentare la sicurezza dell'incrocio riducendo i punti di conflitto delle traiettorie dei veicoli e consente inoltre di:

- contenere i tempi medi di attesa alle intersezioni;
- evitare l'insorgere di condizioni di blocco dell'intersezione;
- ridurre la lunghezza delle code evitando il diffondersi della congestione ad altre intersezioni;
- garantire la precedenza a particolari classi di utenti, quali ad esempio mezzi di trasporto collettivo e/o pedoni;
- contenere il consumo di carburante e le emissioni di inquinanti, riducendo i tempi medi di permanenza dei veicoli nella rete.

Una corretta progettazione del sistema di regolazione semaforica consente di realizzare una circolazione di livello di servizio accettabile, compatibilmente con la capacità delle infrastrutture esistenti, anche in presenza di elevati livelli di domanda.

La regolazione semaforica svolge inoltre un importante ruolo di supporto all'implementazione di schemi di circolazione consentendo di privilegiare alcuni itinerari, di controllare l'accesso ad alcune zone del territorio urbano e, più in generale, di facilitare l'utente nella percezione della gerarchia definita tra gli assi stradali.

1.2 Regolamentazione delle intersezioni

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 presenza di regolazione, le seguenti tipologie.

Intersezione a livelli sfalsati

Una *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.

Intersezione a raso con regole di precedenza

Una *Intersezione a raso* (o *a livello*) 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 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.

Intersezione semaforizzata

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.

1.3 Criteri per l'introduzione della regolazione semaforica

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. 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.

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. Inoltre, 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. In particolare, la Direttiva per la redazione, adozione ed attuazione dei piani urbani del traffico, emanata dal Ministero dei Lavori Pubblici nel 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 (cfr. il primo degli obiettivi citati dalla direttiva) 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.

Infine va ricordato che il sistema semaforico costituisce solo uno dei sistemi che concorrono alla gestione della mobilità nelle aree urbane: ad esso si affiancano infatti altri sistemi, quali quelli di gestione centralizzata dei mezzi di trasporto pubblico, di guida al parcheggio, di informazione all'utenza, sia prima dell'effettuazione del tragitto sia nel corso dello spostamento (messaggi variabili, route guidance, ecc.), di controllo di accesso alle zone di maggiore attrattività (road pricing), di rilevamento dell'inquinamento, ecc.

1.4 DEFINIZIONI

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

Conviene suddividere schematicamente questi elementi in tre categorie, le definizioni relative alle caratteristiche geometriche dell'intersezione, quelle relative al movimento degli utenti e infine quelle che interessano la regolazione semaforica.

1.4.1 Definizioni relative alla geometria delle intersezioni

Area di intersezione

L'*Area di intersezione* è la parte dell'intersezione a raso, nella quale si intersecano due o più correnti di traffico.

Ramo di intersezione

Un *ramo di intersezione* è un tratto di strada afferente una intersezione.

Carreggiata

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.

Corsia

Una *corsia* è una parte longitudinale della strada di larghezza idonea a permettere il transito di una sola fila di veicoli.

<i>Corsia di marcia</i>	Una <i>corsia di marcia</i> è una corsia facente parte della carreggiata, normalmente delimitata da segnaletica orizzontale.
<i>Corsia specializzata</i>	Una <i>corsia specializzata</i> è una corsia destinata ai veicoli che si accingono ad effettuare determinate manovre, quali svolta, attraversamento, sorpasso, decelerazione, accelerazione, manovra per la sosta o che presentano basse velocità o altro.
<i>Corsia riservata</i>	Una <i>corsia riservata</i> è una corsia di marcia destinata alla circolazione esclusiva di una o solo di alcune categorie di veicoli.
<i>Canalizzazione</i>	La <i>canalizzazione</i> è un insieme di apprestamenti destinato a selezionare le correnti di traffico per guidarle in determinate direzioni.
<i>Golfo di fermata</i>	Un <i>golfo di fermata</i> è una parte della strada, esterna alla carreggiata, destinata alle fermate dei mezzi collettivi di linea ed adiacente al marciapiede o ad altro spazio di attesa per i pedoni.
<i>Marciapiede</i>	Il <i>marciapiede</i> è una parte della strada, esterna alla carreggiata, rialzata o altrimenti delimitata e protetta, destinata ai pedoni.
<i>Passaggio pedonale</i>	Il <i>passaggio pedonale</i> (anche <i>marciapiede</i>) 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.
<i>Attraversamento pedonale</i>	Un <i>attraversamento pedonale</i> 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.
<i>Pista ciclabile</i>	Una <i>pista ciclabile</i> è una parte longitudinale della strada, opportunamente delimitata, riservata alla circolazione dei velocipedi.
<i>Sede tranviaria</i>	La <i>sede tranviaria</i> è una parte longitudinale della strada, opportunamente delimitata, riservata alla circolazione dei tram e dei veicoli assimilabili.
<i>Salvagente</i>	Il <i>salvagente</i> (o <i>isola salvagente</i>) 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.
<i>Isola di traffico</i>	L' <i>isola di canalizzazione</i> (o <i>di traffico</i>) è una parte della strada, opportunamente delimitata e non transitabile, destinata a incanalare le correnti di traffico.
<i>Spartitraffico</i>	Uno <i>spartitraffico</i> (o <i>isola spartitraffico</i>) è una parte longitudinale non carrabile della strada destinata alla separazione di correnti veicolari.
<i>Banchina</i>	La <i>banchina</i> 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.
<i>Zona di attestamento (o attestamento)</i>	La <i>zona di attestamento</i> 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 <i>attestamento</i> 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
<i>Accesso</i>	In un'intersezione semaforizzata gli attestamenti possono essere suddivisi in esterni ed interni: quelli esterni, detti anche <i>accessi</i> , 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.
<i>Manovre</i>	Le <i>manovre</i> corrispondono alle possibili direzioni che l'utente può seguire nell'attraversamento dell'intersezione nel rispetto della disciplina di circolazione vigente.

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.

1.4.2 Definizioni relative al movimento degli utenti

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 1.4.1, 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..

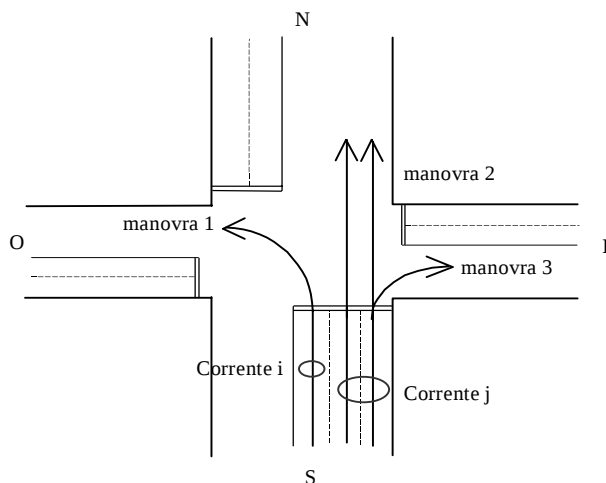


figura 1.4.1 - Esempio di attestamenti, correnti e manovre

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.

Flusso (*f*)

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.

Flusso di saturazione (*s*)

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.

1.4.3 Definizioni relative alla regolazione semaforica

<i>Lanterne semaforiche</i>	Le <i>lanterne semaforiche</i> 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: <i>verde</i> (V), con significato di via libera, <i>giallo</i> (G), con significato di preavviso di arresto e <i>rosso</i> (R), con significato di arresto. L'art. 41 del NCdS disciplina il comportamento che gli utenti devono osservare in presenza di dette luci.
<i>Segnale semaforico</i>	Si dice <i>segnale semaforico</i> 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.
<i>Gruppo di segnali</i>	Per gruppo di segnali si intende un insieme costituito da uno o più segnali semaforici collegati fisicamente in parallelo.
<i>Ciclo semaforico</i>	Si definisce <i>ciclo semaforico</i> 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.
<i>Durata del ciclo semaforico</i>	La <i>durata del ciclo semaforico</i>, espressa in secondi, è l'intervallo di tempo necessario per completare un ciclo semaforico.
<i>Fase</i>	Si dice <i>fase</i> 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.
<i>Durata della fase</i>	La <i>durata di una fase</i>, espressa in secondi, è l'intervallo di tempo in cui è assegnato il verde a <i>tutti</i> i segnali della fase.
<i>Transizione di fase</i>	Il passaggio da una fase ad un'altra avviene attraverso una <i>transizione di fase</i>, 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.
<i>Struttura del piano semaforico</i>	La <i>struttura di un piano semaforico</i> 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.
<i>Piano semaforico</i>	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.

1.5 Elementi di base

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

1.5.1 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.

1.5.1.1 Planimetrie

Le planimetrie delle intersezioni devono avere una scala $(1:200) \div (1:500)$ e devono contenere l'indicazione degli attestamenti, delle corsie, della segnaletica orizzontale e verticale, della posizione dei segnali e della relativa numerazione. Ciascuna lanterna va indicata con il numero di segnale di riferimento, seguito dal numero d'ordine della lanterna (ad esempio: segnale 5, lanterne 5.1, 5.2,...). I segnali che controllano correnti diverse vanno indicati con numeri diversi. Le correnti di traffico vanno indicate con lo stesso numero utilizzato per il segnale che le controlla

Qualora l'intersezione faccia parte di una rete semaforizzata è opportuno che sia prevista una tavola di inquadramento dell'intersezione stessa nella rete. Da tale tavola devono essere desumibili le caratteristiche geometriche relative alle distanze fra intersezioni. La tavola di inquadramento dovrebbe essere in scala non superiore a 1:2000

Gli elementi più importanti per l'analisi funzionale di un'intersezione semaforizzata desumibili dalle planimetrie sono, per ciascun gruppo di corsie:

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

1.5.1.2 Altri elementi geometrici

Fra le caratteristiche geometriche di interesse che non sempre sono riportate sulle planimetrie assumono particolare rilevanza:

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

1.5.2 Caratteristiche di traffico

1.5.2.1 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) 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.

Alcuni valori, comunemente utilizzati, per i pesi relativi sono riportati nella seguente tabella.

<u>Tipo veicolo</u>	<u>A_e</u>
Autovetture	1,00
Veicoli pesanti	2,00
Autobus	2,00
V.pesanti con rimorvchio/Tram	2,50
Motocicli	0.33
Biciclette	0.20

1.5.2.2 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.

1.5.2.3 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.

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

1.5.3 Caratteristiche di regolazione

1.5.3.1 Lanterne semaforiche e sequenze di accensione delle luci

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 lanterne veicolari normali sulla successione ordinata di accensione delle luci: *verde* (V) intervallo di tempo durante il quale i veicoli hanno via libera, *giallo* (G) intervallo di tempo durante il quale i conducenti devono decidere se il veicolo può decelerare ed arrestarsi in condizioni di sufficiente sicurezza o se deve procedere, attraversando l'intersezione, *rosso* (R) intervallo di tempo durante il quale i veicoli devono attendere nell'attestamento prima della linea di arresto.

1.5.3.2 Segnali semaforici

Il segnale semaforico è stato definito nel §1.4 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.

1.5.3.3 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 Ng, se Ng è il numero massimo di gruppi di potenza disponibili nel regolatore.

1.5.3.4 Ciclo semaforico

La definizione di *ciclo semaforico* data nel § 1.4 è del tutto generale e si riferisce ad una qualunque sequenza completa di indicazioni di segnali semaforici, alla fine della quale si ripresenta la medesima configurazione di luci esistente all'inizio della sequenza stessa. Comunemente quando si parla di ciclo semaforico si fa riferimento ad una sequenza completa, tale cioè da garantire la via libera almeno una volta a tutte le correnti che impegnano l'intersezione, che si ripete periodicamente con un periodo C (*durata del ciclo*).

1.5.3.5 Giallo

La durata del giallo (nell'intervallo 3-4 secondi) è determinata da considerazioni di sicurezza, tenendo conto della tipologia dei veicoli che impegnano l'attestamento e delle loro velocità. Quindi i parametri di regolazione di una corrente sono definiti dalle durate del verde e del giallo del segnale che la controlla e dalla durata del ciclo.

1.5.3.6 Verde efficace.

Osservando l'andamento nel tempo del flusso di veicoli durante il verde si nota (cfr. figura 1.5.1) 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:

$$r = C - \sum_k v_k$$

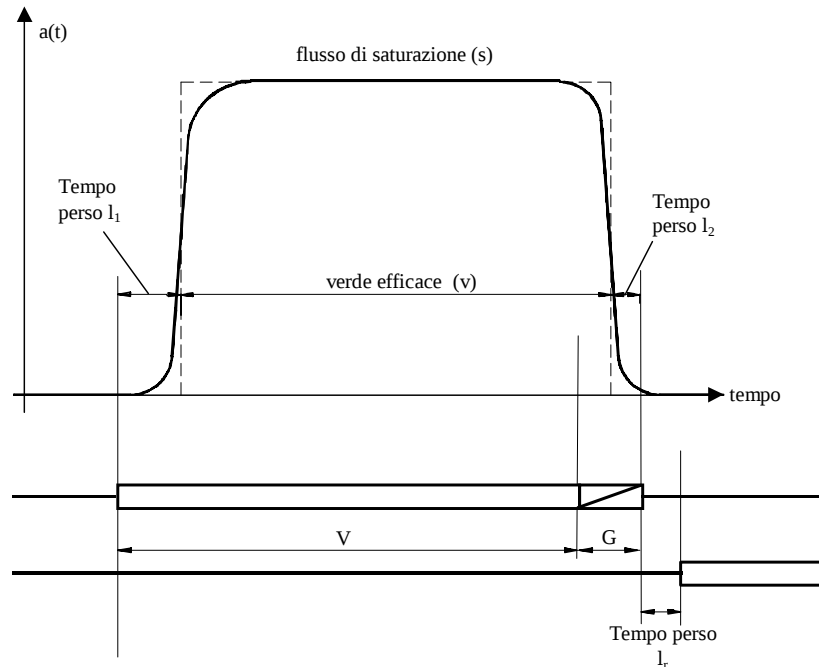


figura 1.5.1 - Esempio di deflusso durante il verde: verde reale, verde efficace e tempi persi.

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.

1.5.3.7 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 giuocano 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'intertempo 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:

$$I_r = t_t - G$$

Essendo t_t il tempo di transizione verso la fase successiva.

1.5.3.8 Correnti compatibili ed incompatibili

Due 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.

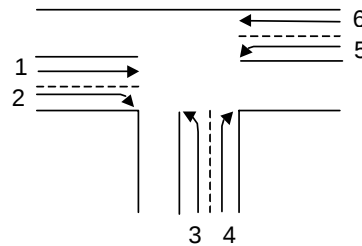


Fig. 1.5.2. -Intersezione a T con indicazione di correnti e segnali

Per l'intersezione a tre braccia riportata nella figura 1.5.2 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).

1.5.3.9 Fase

Un insieme di correnti mutuamente compatibili è detto *fase*. Una fase è completa se non è possibile aggiungervi ulteriori correnti compatibili con quelle già incluse.

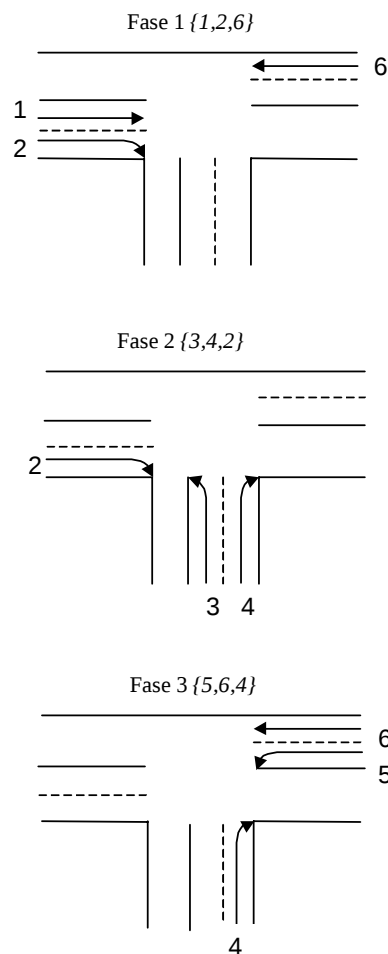


Fig. 1.5.3. - Esempio di suddivisione in fasi.

In figura 1.5.3 è riportato un esempio di suddivisione in fasi per l'intersezione a T di figura 1.5.2.

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.

1.5.3.10 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 1.5.4 è riportato un esempio di piano semaforico per l'intersezione di figura 1.5.2.

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 1.5.4. 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.

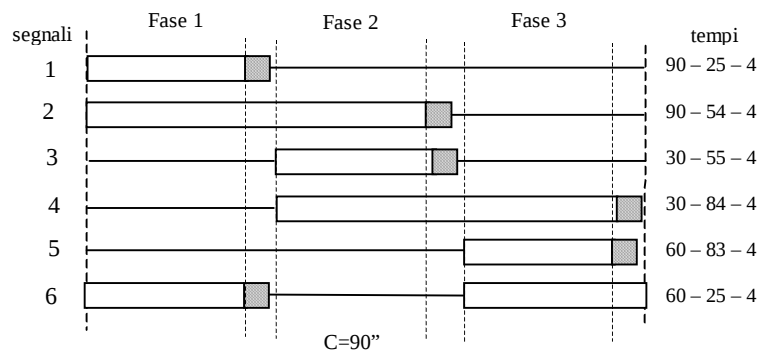


figura 1.5.4 - Esempio di piano semaforico

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.

1.6 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**
- 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**
- 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.

1.6.1 Modalità di controllo

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

1.6.1.1 Controllo di intersezioni isolate

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

<i>Controllo manuale</i>	Nel <i>controllo manuale</i> la durata del ciclo ed i tempi di verde vengono determinati manualmente sulla base di osservazioni locali del comportamento del traffico.
<i>Controllo a tempi fissi</i>	Nel <i>controllo a tempi fissi</i> viene eseguito un piano semaforico in cui la durata del ciclo ed i tempi di verde sono prefissati e costanti nel tempo.
<i>Controllo attuato</i>	E' 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.
<i>Controllo semi-attuato</i>	Nel 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.
<i>Controllo a selezione di piano</i>	E' 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.
<i>Controllo a formazione di piano</i>	Nel 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.

1.6.1.2 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.

<i>Controllo coordinato a selezione di piano</i>	E' 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.
--	---

La selezione dei piani di coordinamento può essere effettuata manualmente, ad orario o in funzione del traffico.

Nel 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.

1.6.2 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 1.6). Nel caso di funzionamento attuato alcuni stati possono essere saltati (in assenza di veicoli) ovvero prolungati dalla presenza dei veicoli.

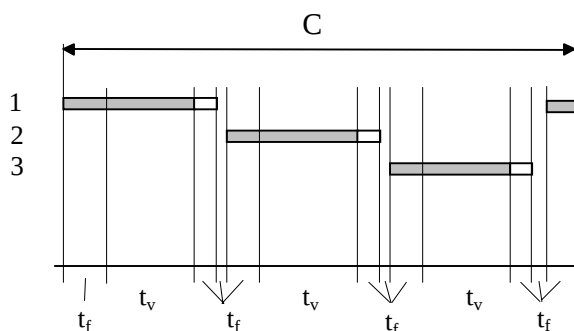


Figura 1.6
Esempio di controllo sequenziale

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.

2 Progetto del piano semaforico a tempi fissi

2.1 Generalità

Il più semplice procedimento di controllo di un impianto semaforico in un nodo indipendente è quello di utilizzare piani semaforici a tempi fissi, senza alcuna retroazione da parte del traffico.

La semplicità del controllo a tempi fissi rispetto a quello attuato dal traffico risiede nel fatto che il progetto può essere effettuato per situazioni di traffico predeterminate e gli effetti del controllo sul traffico sono facilmente misurabili. Inoltre la messa a punto della regolazione può essere effettuata localmente senza grossi problemi.

Le caratteristiche di un piano semaforico sono facilmente rappresentabili in forma grafica.

Evidentemente un piano semaforico progettato per una determinata situazione non si presta a regolare in modo ottimale il traffico per situazioni diverse. In tal caso si può comunque pensare di definire un insieme di piani a tempi fissi adatti alle situazioni prevalenti di traffico.

Un piano semaforico a tempi fissi è caratterizzato da:

- Tempi di sicurezza
- Composizione delle fasi
- Sequenza delle fasi
- Durata del ciclo
- Tempi di verde

Per la progettazione è necessario determinare tutti i precedenti elementi, con riferimento ad una data situazione di traffico.

In generale nei nodi stradali si osservano almeno quattro situazioni diverse: la punta del mattino, la punta della sera, il traffico nella altre ore della giornata e quello della sera. Si tratta ovviamente di una classificazione grossolana, che può essere ulteriormente affinata sulla base dei rilievi di traffico.

Il progetto di un piano semaforico viene effettuato percorrendo i seguenti passi:

- Calcolo dei tempi di sicurezza
- Progetto della fasatura
- Calcolo dei flussi critici e dei flussi di saturazione
- Calcolo della durata del ciclo
- Calcolo dei tempi di verde
- Disegno del piano semaforico

- Verifica della capacità
- Verifica del tempo perso e del numero di arresti
- Determinazione degli intervalli di tempo in cui inserire il piano
- Determinazione degli istanti di commutazione.

2.2 I tempi di sicurezza

I tempi di sicurezza devono essere calcolati sulla base della geometria dell'intersezione e sulla base di ipotesi cautelative sulle velocità con cui i veicoli escono dall'intersezione alla fine del verde e rispettivamente entrano nell'intersezione all'inizio del verde.

Il tempo di sicurezza viene dunque calcolato sulla base dell'intersezione tra le due traiettorie, di uscita e di ingresso, facilmente determinabili sulla base della planimetria dell'intersezione. Nella figura 2.3.1 è riportato l'esempio di un'intersezione semplice, in cui sono evidenziate le traiettorie utilizzate per il calcolo dell'intertempo necessario fra la fine del verde per la corrente D e l'inizio del verde per la corrente A.

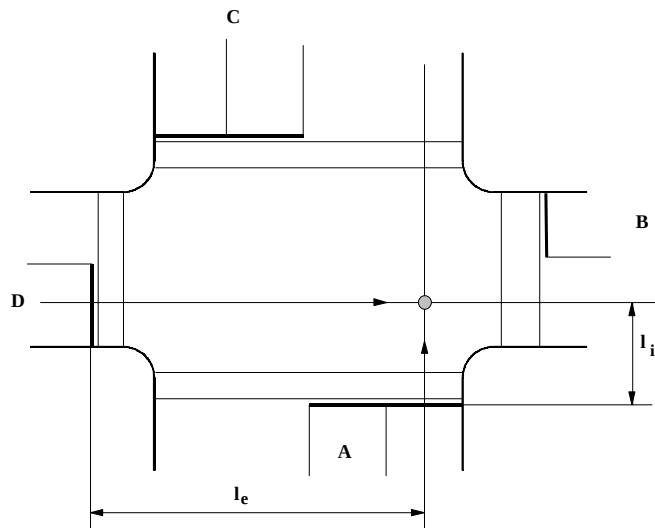


fig. 2.3.1 Traiettorie per il calcolo dei tempi di sicurezza

Il tempo di sicurezza t_s viene determinato come somma algebrica di tre tempi

- t_u tempo di uscita
- t_e tempo di sgombero
- t_i tempo di ingresso

secondo l'espressione:

$$t_s = t_u + t_e - t_i$$

Il tempo di uscita corrisponde al tempo dopo la fine del verde, durante il quale i veicoli possono ancora uscire, per effetto del segnale giallo. Il tempo di sgombero è quello necessario perché il veicolo in uscita superi completamente il punto di conflitto. Il tempo di ingresso è quello necessario ad un veicolo che sopraggiunge sulla direzione antagonista per percorrere lo spazio fra la linea d'arresto e il punto di conflitto. I tempi di sgombero e di ingresso vanno calcolati sulla base delle relative distanze e delle velocità medie necessarie per percorrerle.

I tempi di sicurezza devono essere calcolati per tutte le coppie di correnti in conflitto (pedoni, ciclisti, mezzi pubblici, veicoli, ecc.). L'insieme di tali tempi viene rappresentato dalla matrice dei tempi di sicurezza $T_s = [t_{sij}]$ il cui generico

elemento t_{sij} è il massimo tempo di sicurezza fra la fine del verde del segnale i e l'inizio del verde del segnale j .

2.2.1.1 Determinazione delle distanze di sgombero e di ingresso

Per la determinazione delle lunghezze dei percorsi di sgombero e di ingresso si fa di norma riferimento all'asse delle corsie o degli attraversamenti pedonali. La distanza di sgombero è costituita da due elementi:

- la lunghezza fra la linea di arresto e il punto di conflitto più sfavorevole (più distante) l_e ;
- la lunghezza fittizia l_v del veicolo in fase di sgombero. Tale lunghezza non corrisponde all'effettiva lunghezza del veicolo, in quanto si suppone che i veicoli di elevate dimensioni vengano percepiti più chiaramente da chi impegna l'intersezione. Generalmente si possono considerare le seguenti lunghezze fittizie:

Tipi di veicolo	l_v (m)
Cicli	0
Veicoli sia leggeri che pesanti	6
Tram	15

La distanza di ingresso l_i va determinata per i veicoli fra la linea di arresto e il punto di conflitto più sfavorevole (più vicino), sull'asse della traiettoria veicolare in conflitto ovvero all'inizio della zona pedonale. Per gli attraversamenti pedonali la distanza è quella fra l'inizio dell'attraversamento e l'inizio dell'area di conflitto: nella maggioranza dei casi tale distanza è da considerarsi nulla.

2.2.1.2 Determinazione dei tempi di uscita e di sgombero

Il tempo di uscita t_u è quello fra la fine del verde di un segnale e l'inizio del tempo di sgombero: esso dipende fondamentalmente dalla velocità dei veicoli in arrivo e dalle loro caratteristiche di decelerazione.

Il tempo di sgombero t_e viene calcolato sulla base della distanza da percorrere e delle velocità media di percorrenza:

$$t_e = (l_e + l_v)/v_m$$

I valori suggeriti per la valutazione di t_u e per le velocità da considerare nello sgombero sono riportati nella seguente tabella

Corrente in uscita	Velocità (km/h)	t_u
Veicoli che procedono dritto	36	3
Veicoli in svolta (raggio ≥ 10 m)	25	2
Veicoli in svolta (raggio < 10 m)	18	2
Tram o Bus senza fermata prima dell'intersezione	≤ 30	3
	$30 \div 50$	5
	$50 \div 70$	7
Tram o Bus con fermata prima dell'intersezione (*)	V_{max}	0
Biciclette	14	1
Pedoni	$3,5 \div 5,5$	0

(*) nel caso in cui i mezzi pubblici effettuino la fermata in corrispondenza all'intersezione, il tempo di sgombero è calcolato sulla base dell'accelerazione e della massima velocità raggiungibile dal mezzo. Si può considerare un'accelerazione compresa fra 0,7 e 1,2 m/s^2 per i tram e fra 1,0 e 1,5 m/s^2 per i bus.

2.2.1.3 Determinazione dei tempi di ingresso

Il tempo di ingresso t_i è quello necessario per percorrere il tratto l_i .

Per veicoli leggeri si suppone che il primo veicolo percorra tale tratto ad una velocità media di 40 km/h per cui:

$$t_i = (l_i \cdot 3,6) / 40 \quad [s]$$

Nel caso di mezzi pubblici si considerano due casi: se la fermata non si trova prima dell'intersezione si suppone che i veicoli arrivino con una velocità di $v_o = 20$ km/h ed accelerino fino alla velocità massima v_{max} , in caso di fermata si suppone invece che i veicoli partano da velocità nulla ($v_o = 0$), con accelerazione dell'ordine di un metro al sec^2 .

$$t_i = \sqrt{\frac{2 \cdot l_i}{a}} \quad \text{per} \quad t_i \leq \frac{v_{max}}{3,6 \cdot a}$$

Le biciclette che utilizzano il segnale veicolare non modificano il tempo valido per i veicoli, data la bassa accelerazione e velocità. Nel caso in cui sia prevista una pista ciclabile controllata da uno specifico segnale si suppone che la velocità media sia pari a 18 km/h per cui:

$$t_i = (l_i \cdot 3,6) / 18 = l_i / 5$$

Per i pedoni il tempo viene posto a zero se i veicoli possono passare nell'immediata vicinanza del marciapiede, altrimenti si può utilizzare un tempo di ingresso calcolato sulla base di 1,5 m/s:

$$t_i = l_i / 1,5$$

2.3 Il flusso di saturazione

Si definisce *flusso di saturazione* di un attestamento semaforizzato il valore del flusso che può attraversarlo con segnale al verde ed in presenza di coda continua.

Il flusso di saturazione è espresso in veicoli equivalenti per unità di tempo (veq/s) o (veq/h).

Il flusso di saturazione dipende dai seguenti fattori:

- numero di corsie;
- larghezza delle corsie
- composizione del flusso veicolare;
- pendenza della strada;
- presenza di parcheggio;
- presenza di fermate di autobus;
- localizzazione dell'incrocio nell'area urbana;
- modalità di utilizzo delle corsie disponibili;
- manovre di svolta a destra
- manovre di svolta a sinistra.

L'approccio seguito per la determinazione del flusso di saturazione consiste nella stima di un flusso di saturazione s_0 relativo a condizioni ideali (corsia di circa 3,60 metri in piano, in assenza di mezzi pesanti, di parcheggio, di fermate e di manovre di svolta) cui si applicano poi una serie di fattori correttivi che rappresentano l'influenza dei diversi fattori precedentemente indicati:

$$s = s_0 \cdot N \cdot k_{larg} \cdot k_{vp} \cdot k_{pend} \cdot k_{parc} \cdot k_{bus} \cdot k_A \cdot k_{ut} \cdot k_{dx} \cdot k_{sx}$$

dove:

s_0	è il flusso di saturazione per una corsia in condizioni ideali (1900 veq/h)
N	è il numero di corsie
k_{larg}	considera l'effetto della larghezza delle corsie
k_{vp}	considera la presenza di veicoli pesanti
k_{pend}	considera l'effetto della pendenza
k_{parc}	considera la presenza di parcheggio a lato della strada
k_{bus}	considera la presenza di fermate dei bus
k_A	considera l'area in cui è collocata l'intersezione
k_{ut}	è il coefficiente di utilizzazione delle corsie
k_{dx}	considera l'effetto delle svolte a destra
k_{sx}	considera l'effetto delle svolte a sinistra

Le procedure per il calcolo dei precedenti coefficienti sono descritte nell'Appendice 1.

2.4 Manovre ostacolate

Alcune manovre all'interno di un'intersezione semaforizzata possono essere ostacolate dalla presenza di correnti antagoniste, veicolari o pedonali, aventi diritto di precedenza.

Un caso abbastanza semplice è costituito dalla svolta a destra di veicoli che, effettuando tale manovra, devono dare la precedenza ad un flusso pedonale parallelo alla strada che percorrono.

Il caso più complesso è costituito invece dalle manovre di svolta a sinistra che intersecano le correnti veicolari provenienti dalla direzione opposta. La presenza di queste manovre influisce pesantemente sulle prestazioni di una intersezione.

Le variabili che caratterizzano le manovre ostacolate dipendono principalmente dai seguenti elementi:

- la geometria dell'intersezione;
- le condizioni del traffico;
- la regolazione semaforica

2.4.1 Geometria dell'intersezione

La capacità di un'intersezione dipende dal modo con cui le varie manovre vengono raggruppate in correnti e dall'utilizzo delle corsie disponibili da parte di ciascuna corrente.

Poiché la capacità delle corsie dipende dalle caratteristiche delle manovre consentite, si possono distinguere due tipi di corsie:

- corsie esclusive;
- corsie condivise o miste.

Nel primo caso le corsie sono utilizzate da veicoli che compiono la medesima manovra. Generalmente le corsie esclusive sono trattate nel calcolo come un gruppo di corsie a sé, distinguendone le caratteristiche (flusso di saturazione, capacità) dalle altre manovre presenti sullo stesso attestamento.

Nel secondo caso, invece, le corsie sono impegnate contemporaneamente da veicoli che hanno destinazioni differenti. La capacità delle corsie condivise è influenzata dalla libertà di movimento delle manovre che impegnano tali corsie,

soprattutto nel caso in cui ci siano manovre ostacolate. Per esempio, se un veicolo che impegna la corsia vuole effettuare una svolta a sinistra che gli è impedita dal sopraggiungere di veicoli in direzione opposta, esso blocca la corsia su cui si trova, impedendo anche ai veicoli non interessati alla svolta di proseguire.

2.4.2 Condizioni del traffico

Le caratteristiche del traffico che influiscono sull'analisi delle manovre ostacolate sono di due tipi:

- caratteristiche del traffico nel gruppo di corsie della manovra in esame;
- caratteristiche del traffico dei flussi antagonisti.

Infatti, da un lato la presenza di una maggiore o minore percentuale di flusso che effettua una manovra ostacolata in una corsia mista ha ripercussioni più o meno intense sulla sua capacità; dall'altro l'intensità del flusso delle correnti antagoniste, pedonali o veicolari, influenza la possibilità di attraversamento dei veicoli in svolta, quando entrambi i movimenti sono consentiti.

2.4.3 Regolazione semaforica

In funzione della regolazione semaforica adottata si possono distinguere tre tipi di fase in cui può avvenire la manovra ostacolata:

1. fase "*protetta*", ossia i veicoli possono svoltare senza conflitti con correnti antagoniste.
2. fase "*non protetta*" (o "*permessa*"), in cui i veicoli in svolta devono dare la precedenza ad altre correnti
3. fase "*parzialmente protetta*", che avviene parzialmente in condizioni protette e parzialmente in condizioni non protette.

2.5 Progetto della fasatura

Il progetto della fasatura consiste nella determinazione della composizione delle fasi e della loro successione.

La definizione delle fasi avviene in conformità a una suddivisione degli attestamenti dell'intersezione (esterni ed interni) in correnti. Per ciascuna corrente devono essere specificate il modo d'uso delle rispettive corsie, che comportano in generale dei vincoli.

Ciascuna corrente è controllata da un segnale ed i segnali che controllano correnti non in conflitto possono essere raggruppati in modo da formare una fase. Il numero di fasi è, quindi, determinato sulla base della composizione delle singole fasi e della necessità di far defluire tutte le correnti di traffico. Nel caso di più di due fasi si presenta quindi il problema della determinazione della sequenza di attivazione delle singole fasi. Nota la sequenza delle fasi si possono quindi progettare le transizioni di fase. Un problema particolare è rappresentato infine dalle manovre di svolta sia a sinistra che a destra che possono influire in modo significativo sulla organizzazione delle fasi.

Nel seguito vengono trattati brevemente i diversi problemi, al fine di evidenziare gli elementi che devono essere considerati nella loro soluzione.

2.5.1 Vincoli derivanti dall'uso delle corsie

Dalle modalità di utilizzo delle corsie per l'effettuazione delle diverse manovre discendono alcuni vincoli che devono essere rispettati nella definizione della fasatura di un'intersezione:

- *Vincolo di simultaneità*: il verde deve essere simultaneo per manovre veicolari distinte che utilizzano in modo promiscuo le stesse corsie (ad es. corsie utilizzate per più manovre quali dritto/destra o dritto/sinistra);
- *Vincolo di sequenzialità*: manovre veicolari distinte possono defluire in fasi diverse solo se utilizzano corsie specializzate;
- *Vincolo di ritardato inizio del verde*: il verde di una corrente con diritto di precedenza non può iniziare dopo quello di una corrente compatibile condizionata. Ad esempio un attraversamento pedonale che interferisce con una manovra di traffico veicolare di svolta a destra, non può iniziare dopo il verde assegnato a quest'ultima a meno che non si faccia uso di apposita segnalazione per avvisare i veicoli in svolta a destra della presenza di pedoni in attraversamento.

2.5.2 Numero di fasi

Al fine di massimizzare la capacità dell'intersezione è conveniente:

- determinare il numero di fasi minimo che garantisca comunque il deflusso delle varie manovre, evitando che queste producano interferenze con altre correnti di traffico;
- accorpate in una stessa fase correnti di traffico che richiedono tempi di verde di durata non troppo diversa;
- definire le fasi in modo da ridurre la somma dei tempi non utilizzati dalle correnti veicolari a causa degli intertempi di sicurezza o di altre necessità legate alle transizioni di fase.

2.5.3 Successione delle fasi

Nella scelta della successione delle fasi possono influire diverse considerazioni:

- una sequenza di fasi può essere determinata dall'esigenza di far attraversare l'intersezione da pedoni o cicli che devono impegnare due attraversamenti in successione;
- nel caso di intersezioni complesse la successione di fasi può essere determinata dalla necessità di far defluire alcune correnti in modo da smaltire le code, evitando che queste costituiscano ostacolo per altre correnti di traffico;
- una sequenza di fasi può essere determinata dalla possibilità di far defluire una corrente di traffico in più fasi, che devono pertanto essere consecutive;
- la presenza di un coordinamento con impianti adiacenti può condizionare in modo sensibile la scelta di una particolare sequenza di fasi;
- nel caso non si presenti alcuno dei condizionamenti precedentemente elencati, la sequenza delle fasi più conveniente è quella che consente di ottenere il ciclo minimo, considerando la sommatoria dei tempi persi.

Nel caso di piani a ciclo fisso, la successione delle fasi è rappresentata chiaramente dal *diagramma di temporizzazione*.

Nel caso di controllo attuato dal traffico le fasi e la successione delle fasi sono rappresentate da un diagramma di stato in cui a ciascuno stato corrisponde una fase ed a ciascuna transizione fra stati corrisponde una commutazione tra fasi. A ciascuno stato può essere associata la condizione logica di permanenza nella fase, mentre a ciascuna transizione può essere associata la condizione logica che determina il passaggio da una fase all'altra.

2.5.4 Transizioni di fase

Il passaggio da una fase ad un'altra avviene attraverso una transizione di fase. La transizione di fase è 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 transizione di fase contiene almeno i tempi di sgombero necessari per la sicurezza, ma può contenere anche tempi necessari per soddisfare particolari condizioni (ad esempio prolungare la durata di un segnale per sgomberare i veicoli che provengono da un altro segnale della stessa fase, nel caso di due segnali consecutivi a breve distanza). In generale è opportuno evitare di inserire attuazioni che modifichino la transizione di fase: qualora ciò sia previsto, l'attuazione deve essere effettuata in modo da garantire comunque il rispetto dei tempi di sicurezza.

2.5.5 Svolte a sinistra

Nella definizione delle fasi, le svolte a sinistra costituiscono un problema particolare, in quanto presentano in generale un elevato numero di conflitti con altre correnti veicolari, e vanno pertanto studiate con particolare attenzione. Nel seguito vengono riportate le possibili soluzioni, con alcuni suggerimenti in merito alla loro adozione.

Svolte a sinistra completamente protette. Una svolta a sinistra si dice protetta se durante il proprio tempo di verde i segnali che controllano tutte le correnti in conflitto sono al rosso. La realizzazione di una svolta a sinistra protetta risulta di particolare importanza qualora:

- il traffico sulla direzione opposta sia particolarmente veloce;
- il traffico sulla manovra di svolta debba essere fatto evacuare rapidamente
- il traffico di svolta o quello antagonista siano particolarmente intensi;
- vi sia scarsa visibilità nell'effettuare la manovra;
- il traffico in svolta debba fare attenzione ad una molteplicità di conflitti (tram, svolte a destra, pedoni, biciclette).

Nel caso in cui la svolta si effettui su più corsie di norma la svolta deve essere protetta.

Svolte a sinistra parzialmente protette. Una svolta a sinistra si dice parzialmente protetta se i segnali che controllano le correnti in conflitto sono al rosso, soltanto durante una parte del proprio tempo di verde. In tale situazione, i veicoli in manovra possono passare liberamente nel periodo in cui sono protetti e devono rispettare le precedenza quando le correnti antagoniste sono in movimento. La parte protetta del verde può essere ottenuta prolungando e/o anticipando il verde rispetto a quello delle correnti antagoniste. L'utilizzo di un *verde prolungato* è sempre ammissibile. Il *verde anticipato* deve essere invece valutato attentamente per quanto riguarda la sicurezza dei veicoli in svolta. In tal caso è preferibile adottare una fase apposita di svolta, a meno che i veicoli in svolta non arrivino tutti in corrispondenza del periodo di rosso per le correnti antagoniste (ad

esempio per effetto di un particolare tipo di coordinamento). Nel caso in cui si utilizzi il verde anticipato, si propone di consentire l'uso di una freccia verde di consenso, la cui durata non deve essere inferiore al tempo minimo di verde come definito nel seguito. Per tale freccia devono essere calcolati i tempi di sicurezza analogamente agli altri segnali veicolari. Nel tempo in cui la svolta non è protetta i veicoli in svolta dovrebbero essere avvertiti dell'esistenza di conflitti da una freccia gialla lampeggiante, anche se questa possibilità non è al momento prevista dal Codice della Strada.

Svolte a sinistra non protette. Le svolte a sinistra non protette sono da utilizzarsi soltanto nel caso di flussi antagonisti di modesta entità. Per lo smaltimento delle code di veicoli in svolta che si possono formare all'interno dell'intersezione è possibile prevedere un ritardato inizio della fase successiva. Nel caso di scarsa visibilità delle correnti antagoniste si ritiene opportuno consentire l'uso di un segnale giallo lampeggiante inserito per tutto il tempo in cui sono al verde le correnti antagoniste e per il relativo tempo di sgombero.

2.5.6 Svolte a destra

Le svolte a destra non presentano generalmente problemi particolari, in quanto in generale tali manovre non richiedono la presenza di un segnale direzionale apposito. Nel seguito sono, comunque, riportate le possibili situazioni ed alcuni suggerimenti in merito alla loro soluzione.

Svolte a destra completamente protette. La presenza di un segnale direzionale apposito può essere prevista soltanto nel caso in cui i flussi delle correnti in conflitto siano particolarmente elevati, o nel caso in cui la svolta a destra possa essere effettuata a velocità tali da costituire pericolo per le correnti antagoniste. In presenza di corsie delimitate da isole spartitraffico triangolari, è da prevedere l'uso delle lanterne veicolari di corsia per le correnti in svolta a destra se la manovra viene effettuata su più corsie, se le correnti antagoniste sono particolarmente intense o infine se la velocità con cui viene effettuata la manovra può determinare situazioni di pericolo.

Svolte a destra parzialmente protette. In presenza di corsie specializzate per la svolta a destra si presenta la possibilità di far defluire i veicoli in svolta anche in intervalli di tempo nei quali le correnti antagoniste vengono fermate. In tal caso risulta opportuno prevedere lanterne semaforiche veicolari di corsia, utilizzando la lanterna gialla lampeggiante di indicazione del passaggio pedonale per il tempo in cui quest'ultimo si trova al verde, considerando anche i relativi tempi di sgombero.

Svolte a destra non protette. Nel caso di svolte a destra non protette, il conflitto con la corrente pedonale può essere segnalato con l'apposita lanterna gialla lampeggiante prevista dal codice. Sembra opportuno suggerire l'adozione di altre mascherine, oltre a quella pedonale, per avvisare i veicoli in svolta di possibili conflitti con mezzi pubblici (nel caso di corsie riservate sul lato destro), ovvero con biciclette. Il segnale di avviso deve lampeggiare anche durante i periodi di sgombero delle correnti in conflitto. Il conflitto con veicoli in svolta a sinistra provenienti dalla direzione opposta non è generalmente critico nei casi in cui non vi siano isole spartitraffico triangolari che delimitano la svolta a destra. In presenza di tali isole e con segnale verde pieno per la svolta a destra, il conflitto con le svolte a sinistra della direzione opposta deve essere evitato in quanto può generare situazioni di pericolo. Si può fare eccezione soltanto nel caso di una corsia sufficientemente lunga dopo il segnale semaforico, e dopo l'attraversamento pedonale in conflitto, in modo da poter installare un segnale di dare precedenza, eventualmente in presenza anche di un segnale giallo lampeggiante in modo da far riconoscere chiaramente ai veicoli in svolta l'esistenza di un conflitto con veicoli che possono sopraggiungere da sinistra.

Svolte a destra non segnalate. Le svolte a destra non segnalate possono essere effettuate soltanto nel caso in cui vi sia una corsia apposita protetta da un'isola

spartitraffico triangolare. L'utilizzo di questa soluzione deve essere valutato attentamente per quanto attiene la sicurezza, soprattutto nei casi in cui il flusso in svolta sia elevato o possa effettuare la manovra in velocità.

2.6 I flussi critici

Per la progettazione del piano semaforico è necessario individuare i flussi critici, cioè i flussi determinanti per l'individuazione dei tempi di verde.

2.7 Durata del ciclo semaforico

2.7.1 Ciclo minimo

Sulla base delle nozioni di flusso di saturazione, tempi persi e verde effettivo si può calcolare il ciclo semaforico minimo necessario a smaltire i flussi reali, espressi in termini di veicoli equivalenti, che interessano l'intersezione in esame. In particolare ponendo:

f_k	Flusso max. entrante nella fase k (veq/sec.)
s_k	Flusso di saturazione corrispondente (veq./sec.)
P	Tempo perso totale (sec.)
v_k	Verde effettivo della fase k (sec.)
$y_k = f_k/s_k$	Rapporto dei flussi

Il tempo perso totale può' essere espresso come:

$$P = C_m - \sum_{k=1}^{nf} v_k$$

imponendo l'uguaglianza fra flusso entrante ed uscente:

$$C_m \cdot f_k = v_k \cdot s_k$$

si ottiene la durata del ciclo minimo:

$$C_m = \frac{P}{1 - Y} \quad \text{con} \quad Y = \sum_{k=1}^{nf} y_k$$

2.7.2 Ciclo "ottimo" (ritardo minimo)

Per tener conto del comportamento stocastico dei flussi conviene, ove possibile, adottare la durata del ciclo ottenuta con l'espressione seguente, che provoca un ritardo minimo per i veicoli in attesa:

$$C_o = \frac{1.5 \cdot P + 5}{1 - Y}$$

2.7.3 Tempi di verde

Per ottenere il minimo ritardo complessivo, le durate del verde effettivo devono essere proporzionali ai rapporti dei flussi y , il che si ottiene ponendo:

$$v_k = \frac{y_k}{Y} (C_o - P)$$

	La formula consente il calcolo delle durate di verde delle singole fasi sulla base della durata del ciclo, dei tempi persi e dei rapporti fra flussi entranti e flussi di saturazione. La determinazione dei tempi di verde richiede peraltro il rispetto di alcuni vincoli sia sulla durata del tempo di verde che sulla durata del tempo di rosso, complementare rispetto alla durata del ciclo.
<i>Durata minima del verde</i>	La durata minima del verde per correnti veicolari non dovrebbe di norma essere inferiore ai 10 secondi. Per le correnti principali si raccomanda di utilizzare tempi non inferiori ai 15 secondi. Nel caso di flussi veicolari particolarmente bassi ovvero nel caso di impianti attuati dal traffico, la durata minima può essere ridotta fino ad un minimo di 5 secondi. Per i mezzi pubblici, biciclette e pedoni la durata di verde minima non dovrebbe essere inferiore ai 5 secondi. La durata minima del verde per le svolte a sinistra non dovrebbe di norma essere inferiore ai 10 secondi. Nel caso di utilizzo di frecce direzionali per indicare la parte di svolta a sinistra protetta, tale freccia non dovrebbe durare meno di 5 secondi.
<i>Durata massima del rosso</i>	La durata massima del rosso dipende da molteplici fattori, quali: • accettazione da parte di pedoni e di ciclisti; • disponibilità di spazi di accumulo per i veicoli in coda; • disponibilità di spazi per l'accumulo di pedoni e ciclisti; • ritardi per i mezzi pubblici. Per pedoni e ciclisti non si dovrebbe superare una durata massima di 60 secondi mentre si può accettare una durata anche doppia per il traffico veicolare.
<i>Anticipo del verde in casi di conflitto</i>	L'inizio del verde per movimenti di pedoni o biciclette dovrebbe avvenire 1 o 2 secondi prima dell'arrivo di veicoli provenienti da manovre in conflitto. Il calcolo va effettuato sulla base dei tempi necessari ad impegnare l'area di conflitto.
<i>Ritardo dell'inizio del verde</i>	I veicoli in svolta a sinistra non protetta che hanno superato la linea di arresto e non possono eseguire la manovra per la presenza del traffico opposto devono poter liberare l'area d'incrocio senza rischi. Qualora per i veicoli della fase successiva vi siano delle difficoltà nel riconoscere la presenza dei veicoli in svolta, tale fase va ritardata di un intervallo di tempo di 2÷4 secondi in modo da garantire lo svuotamento della manovra di svolta.

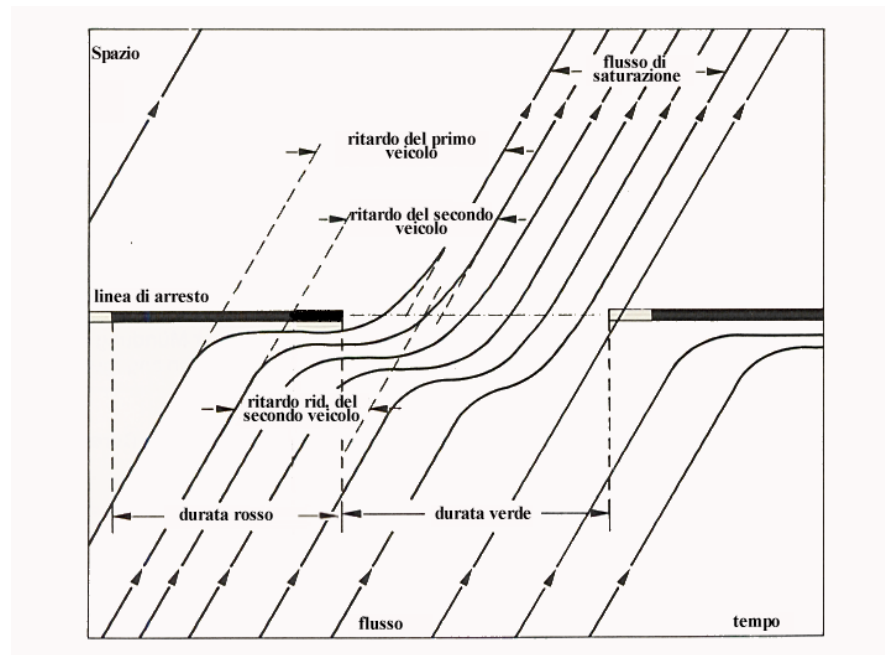
2.8 I criteri di progetto

2.8.1 Ritardi

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

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 seguente 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.

Nella letteratura sono state proposte molteplici espressioni per la valutazione del ritardo in corrispondenza ad un segnale di un'intersezione controllata a ciclo fisso. A titolo esemplificativo si riporta la formula proposta da Webster, relativa ad una distribuzione degli arrivi secondo la distribuzione di Poisson:

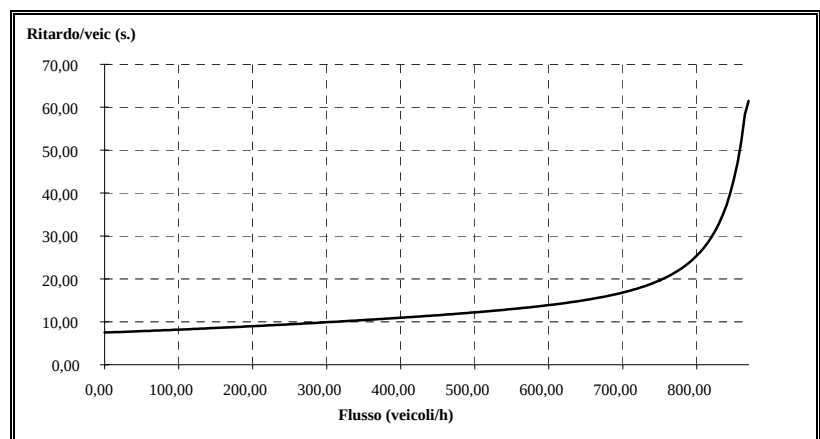
$$r = \frac{C \cdot (1 - \lambda)^2}{2 \cdot (1 - \lambda \cdot x)} + \frac{x^2}{2 \cdot f \cdot (1 - x)} - 0.65 \cdot \left(\frac{C}{f^2} \right)^{1/3} \cdot x^{(2+5 \cdot \lambda)}$$

dove:

r	ritardo (sec./veic.)
C	durata ciclo (secondi)
v	verde efficace (secondi)
s	flusso di saturazione (veic./sec.)
f	flusso entrante (veic./sec.)
$\lambda = v/C$	percentuale di verde
$x = f/(\lambda \cdot s)$	coefficiente di saturazione

Nella figura è riportato, a titolo esemplificativo, l'andamento del ritardo per veicolo, considerando i seguenti valori:

$$C = 60'' , v = 30'' , s = 0.5 \text{ veic./sec.}$$



2.8.2 Livello di servizio

Il livello di servizio di un'intersezione semaforizzata è definito in termini di ritardo, che rappresenta una misura degli effetti negativi, in termini di comfort, consumo di carburante e tempo di tragitto.

Nello specifico il criterio del livello di servizio è definito in termini di ritardo medio per veicolo riferito ad un periodo di analisi di 15 minuti.

I livelli di servizio ed i corrispondenti valori dei ritardi sono riportati nella tabella seguente.

<u>Livello di servizio</u>	<u>Ritardo per veicolo (sec.)</u>
A	≤ 10.0
B	$> 10.0, \leq 20.0$
C	$> 20.0, \leq 35.0$
D	$> 35.0, \leq 55.0$
E	$> 55.0, \leq 80.0$
F	> 80.0

I ritardi possono essere misurati in campo o valutati secondo una procedura standard. La misura del ritardo è complessa e dipende da più variabili, fra le quali la durata del ciclo, la percentuale del verde, il grado di saturazione e il coordinamento fra impianti.

Livello di servizio A: si riferisce a ritardi molto bassi, inferiori a 10 secondi per veicolo. Questo livello di servizio si raggiunge nel caso di impianti molto ben coordinati per cui la maggior parte dei veicoli arriva durante il verde e quindi non si fermano. Anche un ciclo di durata ridotta può contribuire ad abbassare i ritardi.

Livello di servizio B: corrisponde a ritardi compresi fra 10 e 20 secondi per veicolo. Questo livello corrisponde in genere ad un buon coordinamento e/o a cicli di breve durata. Il numero di veicoli che si fermano è superiore al caso precedente.

Livello di servizio C: corrisponde a ritardi compresi fra 20 e 35 secondi per veicolo. Questi valori più elevati possono derivare da un coordinamento scarso e/o da cicli di durata superiore. Il numero di veicoli che si fermano è elevato, anche se parecchi veicoli passano l'intersezione senza fermarsi.

Livello di servizio D: corrisponde a ritardi compresi fra 35 e 55 secondi per veicolo. In queste condizioni il livello di congestione si rende visibile. I ritardi più elevati possono essere causati da un coordinamento sfavorevole, da cicli elevati e da elevati gradi di saturazione. La maggior parte dei veicoli si ferma e si possono verificare sovrassaturazioni in alcuni cicli.

Livello di servizio E: corrisponde a ritardi compresi fra 55 e 80 secondi per veicolo. Questo livello in molti casi è considerato il massimo accettabile. È l'effetto di coordinamento sfavorevole, durate elevate di ciclo, elevati indici di saturazione. La perdita di un ciclo diventa più frequente.

Livello di servizio F: corrisponde a ritardi superiori a 80 secondi per veicolo. Questo livello, per lo più considerato inaccettabile dalla maggior parte degli utenti, si verifica con indici di saturazione elevati, anche superiori all'unità, con coordinamento sfavorevole e cicli di elevata durata.

Come si è detto in precedenza, i ritardi possono essere misurati sul campo o valutati seguendo una metodologia prefissata. Una delle metodologie che può essere seguita è quella proposta nell'HCM, che rappresenta una sintesi di esperienze professionali e di ricerca. L'utilizzo di una metodologia convenzionale fornisce una soluzione imparziale per la valutazione del livello di servizio di intersezioni semaforizzate accettabile per una gran parte di condizioni di funzionamento reale.

E' ovvio peraltro che un calcolo standard non è in grado di riprodurre esattamente il ritardo che può essere misurato nella realtà. Inoltre nella letteratura esistono metodi di calcolo molto diversificati, alcuni dei quali mirano a risolvere particolari problemi: evidentemente questi modelli possono fornire risultati più accurati, ma ciò non costituiscono un riferimento comune quale quello proposto dall'HCM.

2.8.3 Code

In molti casi è necessario valutare la lunghezza della coda che si può verificare all'inizio del tempo di verde. Il numero di veicoli mediamente in coda per una corsia può essere calcolato con l'espressione:

$$n_1 = f [(C-v)/2 + r]$$

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. Doerfer suggerisce un valore di 5,6 metri per veicolo:

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

2.8.4 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. Secondo Webster il numero degli arresti può essere calcolato nel modo seguente.

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:

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

2.8.5 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.

2.9 Inserzione, disinserzione e commutazione di piani

2.9.1 Programmi di attivazione

Nel caso in cui per un'intersezione siano previsti più piani semaforici calcolati per situazioni di traffico differenziate, è necessario definire anche gli istanti di inserzione, di commutazione e di disinserzione.

Programma giornaliero

L'insieme degli istanti di inserzione dei piani (o degli intervalli temporali) e dei piani da inserire nel corso di una giornata costituisce un *programma giornaliero di attivazione*.

Il numero dei piani da progettare dipende sostanzialmente dall'andamento del traffico nel corso della giornata. In generale sono necessari almeno 4 piani, due dei quali di punta per la mattina e la sera e due di morbida per le ore intermedie e per le ore serali.

Sulla base dei conteggi di traffico si possono costruire gli istogrammi dei flussi per ciascun accesso e rappresentare quindi l'istogramma della somma di tutti i flussi: da quest'ultimo è facile individuare le diverse situazioni di traffico che si presentano nel corso della giornata e gli intervalli di tempo in cui si verificano.

Si noti poi che le condizioni di traffico presentano delle caratteristiche diverse in giornate diverse, in particolare si possono distinguere le giornate infrasettimanali da quelle del sabato e della domenica. Anche alcuni giorni della settimana possono avere caratteristiche particolari per la presenza di mercati o per la chiusura delle attività commerciali.

Programma settimanale

In generale quindi è possibile definire un *programma settimanale di attivazione*, costituito dall'insieme dei programmi giornalieri. Ciascun programma giornaliero contiene poi le indicazioni di inserzione dei piani necessari per quella giornata.

2.9.2 Modalità di inserzione, commutazione e disinserzione

L'inserzione, la commutazione e la disinserzione dei piani semaforici richiede alcuni ulteriori commenti relativi alle modalità con cui vengono effettuate. Infatti queste operazioni dovrebbero essere effettuate nella massima sicurezza, senza determinare azioni di disturbo sul deflusso del traffico ed evitando che siano percepite negativamente da parte dell'utente.

Un particolare aspetto della progettazione del controllo è relativo alla determinazione degli istanti in cui devono essere effettuate le modifiche.

Commutazione fra piani

La commutazione fra piani deve essere effettuata in modo da mantenere inalterato lo stato dei segnali: ciò significa che deve essere individuato un istante di tempo sul piano origine e sul piano destinazione, caratterizzati dallo stesso aspetto dei segnali. Ciò però non è sufficiente in quanto devono essere rispettate anche ulteriori vincoli. L'istante di commutazione non deve infatti contenere tempi di sgombero, per evitare che questi si prolunghino o si accorcino, causando condizioni poco chiare o di pericolo. Inoltre si deve assicurare che nella commutazione i tempi di verde non si riducano al di sotto dei valori minimi necessari ad evitare pericoli.

Nel caso in cui non sia possibile individuare sul piano origine e sul piano destinazione una configurazione identica adatta per effettuare la commutazione è necessario raggiungere lo scopo modificando uno dei due piani. Spesso si possono modificare i tempi di alcuni segnali secondari, senza creare particolari problemi alla regolazione dell'intersezione. Se anche questa soluzione non è percorribile, non rimane altro che progettare un piano particolare di transizione.

Ciò si rende necessario in genere solamente nel caso di intersezioni con un elevato numero di segnali.

Inserzione di un piano

L'inserzione di un piano a partire dallo stato di impianto funzionante a lampeggio avviene attraverso uno stato intermedio (tutto giallo o tutto rosso). Normalmente è preferibile adottare lo stato di giallo fisso, che corrisponde al normale avviso al conducente di fermarsi, ovviamente rispettando le condizioni di sicurezza. Il passaggio attraverso la fase di tutto rosso potrebbe creare reazioni troppo brusche nei guidatori, con conseguenti pericoli di tamponamento.

E' consigliabile comunque che, terminata la fase di transizione, l'aspetto delle lanterne sia tale da dare la via libera alle correnti principali.

Disinserzione di un piano

La disinserzione di un piano, cioè il passaggio da colori al giallo lampeggiante, può avvenire in qualunque istante a causa di eventuali malfunzionamenti dell'impianto e quindi non richiederebbe in generale ulteriori precauzioni. Si può comunque consigliare anche in questo caso, se la disinserzione viene effettuata in modo voluto, di disinserire il piano quando la via libera è data alle correnti principali, inserendo quindi una fase di transizione di tutto giallo, in modo da rispettare gli sgomberi e quindi passare al giallo lampeggiante.

3 Progetto del piano semaforico attuato dal traffico

3.1 Premessa

Nel capitolo 2 si è affrontato il progetto degli impianti controllati a ciclo fisso. In questi vengono definiti i piani semaforici sulla base dei conteggi del traffico, cioè in situazioni di traffico predefinito. I piani vengono inseriti manualmente o in funzione del periodo della giornata (ad orario). Poichè queste situazioni di traffico non iniziano e finiscono sempre negli stessi istanti di tempo e poichè anche le caratteristiche del traffico possono modificarsi in modo sostanziale, una regolazione che si basi sulle misure continue delle caratteristiche del traffico può adattarsi meglio alle effettive circostanze. Per impianti singoli si possono adottare due soluzioni:

- Controllo a selezione di piano
- Controllo attuato

Nel primo caso, che non è molto diffuso, la metodologia di progetto e le funzioni dell'impianto sono le stesse viste nel caso di controllo a tempi fissi. La selezione dei piani viene effettuata in questo caso sulla base delle misure sul traffico e di una logica che determina sulla base delle misure stesse, gli istanti di inserzione dei singoli piani.

Nel secondo caso il controllo viene effettuato in funzione del singolo utente, misurandone la presenza e le caratteristiche, dove per utente può essere inteso il pedone, il veicolo, il mezzo pubblico, ecc. il controllo di tipo attuato può essere a sua volta suddiviso in:

- Controllo semiattuato
- Controllo completamente attuato

Il primo procedimento è contraddistinto da una maggior semplicità dei regolatori e della progettazione. Esso consiste in un controllo a tempi fissi in cui, nel caso di richiesta da parte del singolo utente, parti del piano semaforico vengono modificate sulla base delle richieste stesse. Il secondo procedimento, il controllo completamente attuato, non si basa su di un piano semaforico prefissato, ma definisce l'inizio e le durate dei tempi di verde sulla base della misura della presenza e del movimento dei singoli utenti. Il controllo completamente attuato richiede apparecchiature più costose ed un maggior lavoro di progettazione rispetto agli altri casi.

3.2 Il controllo semiattuato

3.2.1 Generalità

Il controllo di tipo semiattuato è adatto non soltanto per il controllo di intersezioni isolate, ma anche per nodi appartenenti a reti coordinate. La progettazione del piano semaforico parte sempre da quello di piani a tempi fissi.

L'introduzione della semiattuazione è motivata per lo più dall'opportunità di prendere in considerazione correnti di traffico particolari. Spesso tali correnti (pedoni, veicoli, veicoli pubblici, ecc.) sono caratterizzate da valori di flusso molto basso, per cui i singoli utenti si presentano soltanto occasionalmente e quindi risulta conveniente assegnare ad essi il verde soltanto quando richiedono di attraversare l'intersezione. Poiché ciò non accade in ogni ciclo il corrispondente tempo può essere più utilmente assegnato alle altre correnti di traffico. Si può presentare anche il caso in cui, per contro, alcuni flussi richiedono soltanto occasionalmente un tempo di verde più lungo, come per esempio nel caso in cui si voglia favorire il passaggio di un mezzo pubblico.

3.2.2 La progettazione

Nella progettazione di un controllo semiattuato sono di particolare interesse i seguenti istanti di tempo:

- L'istante di esame delle richieste attivate;
- L'istante di rientro nel funzionamento normale;
- L'istante di ripristino delle richieste attivate.

Con riferimento ad un piano a ciclo fisso progettato per tutte le correnti di traffico, compresa quella da attivare o sopprimere in funzione delle richieste, l'istante in cui viene esaminata l'esistenza di una richiesta viene fissato immediatamente prima dell'inizio della transizione verso la fase attuata, in modo da poter accettare le richieste fino all'ultimo istante utile per poter effettuare la transizione di fase.

L'istante di rientro nel funzionamento normale è importante soltanto nel caso in cui l'attuazione sia effettuata con una commutazione fra piani, in questo caso si tratta di individuare l'istante di commutazione dal piano modificato al piano base. La scelta dell'istante non crea particolari difficoltà, in quanto è sufficiente che sia trascorso il tempo necessario alla transizione fra la fase attuata e quella successiva.

L'istante di ripristino delle richieste dipende invece da una serie di considerazioni legate da un lato alla necessità di non perdere una richiesta che non è stata soddisfatta e dall'altro di evitare di reinserire una fase nel ciclo successivo, in assenza di effettive esigenze di passaggio. In genere quindi il ripristino delle richieste viene effettuato in prossimità dell'inizio del giallo della fase attuata.

3.2.3 Esempi

3.3 Il controllo completamente attuato

3.3.1 Generalità

Sono detti completamente attuati quegli impianti in cui i tempi di verde sono determinati in funzione delle caratteristiche dinamiche del traffico.

In questo tipo di impianti non esiste un piano di riferimento progettato, come nel caso del controllo a tempi fissi o parzialmente attuato. Si rende peraltro necessario il rispetto di alcune condizioni per l'inserzione e la conclusione dei singoli tempi di verde oltre a quelle ovvie relative al rispetto dei tempi di sicurezza.

Le tecniche di attuazione proposte nella letteratura o presenti nelle apparecchiature disponibili sul mercato sono molto diversificate, per cui non è possibile in questa sede esaminarle tutte. Conviene quindi esaminare brevemente i criteri per l'introduzione del controllo completamente attuato per analizzare poi alcune tipologie più frequenti di attuazione.

Tutte le metodologie di controllo attuato dal traffico hanno l'obiettivo di adattare i tempi di verde alle esigenze del traffico e del singolo utente, in modo da minimizzare gli aspetti negativi della regolazione, in particolare quindi i tempi di attesa.

L'attuazione è in generale utile quando l'intersezione da controllare è soggetta ad un traffico che presenta comportamenti molto variabili nel tempo. Più in dettaglio si possono elencare le seguenti motivazioni di introduzione dell'attuazione:

- le situazioni di traffico che si presentano nell'arco delle giornate sono molte e molto differenziate, per cui non è possibile trattarle con un numero relativo di piani a tempi fissi;
- una o più correnti di traffico (pedonale, veicolare, ecc.) sono molto deboli per cui gli utenti si presentano soltanto occasionalmente o con valori di flussi molto variabili;
- l'interruzione dei flussi principali deve essere ridotta al minimo per cui il verde alle correnti secondarie deve essere il più ridotto possibile;
- per migliorare il coordinamento con impianti adiacenti quando la situazione geometrica del coordinamento è sfavorevole;
- per ridurre i tempi di attesa;
- quando è necessario regolare un'intersezione soltanto in alcuni momenti della giornata;
- quando l'intensità dei flussi non giustificerebbe l'introduzione di una regolazione semaforica, che viene introdotta prevalentemente per ragioni di sicurezza;

3.3.2 Struttura funzionale di un regolatore attuato dal traffico

L'attuazione richiede l'utilizzo di dispositivi di misura del traffico, fra i quali i più comunemente impiegati sono i sensori a spira magnetica. Tali sensori individuano la presenza di un veicolo nell'area della spira per effetto della variazione del campo magnetico prodotta dalla massa ferrosa dei veicoli.

In figura 3.1. è riportato uno schema che illustra le principali funzioni svolte da un regolatore attuato dal traffico. In esso sono evidenziati i rivelatori, cioè i

dispositivi che, collegati da un lato ai sensori, sono in grado di trasformare la presenza del veicolo in un impulso elettrico che può essere utilizzato quindi per ricavare, con opportune elaborazioni, parametri utilizzabili nella logica di controllo del traffico.

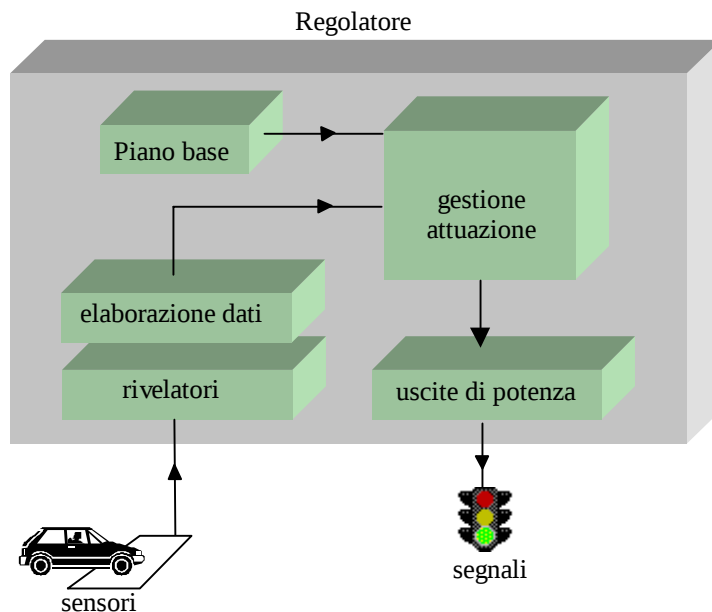


fig. 3.1

Schema funzionale di un regolatore attuato dal traffico

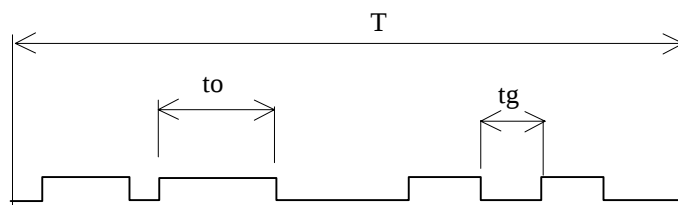
Nel regolatore è prevista comunque la presenza di un controllo a tempi fissi, con uno o più piani eventualmente selezionabili a tempo, da inserire nel caso in cui uno o più rivelatori segnalino la presenza di guasti nella catena di misura del traffico.

La gestione dei segnali semaforici viene quindi effettuata sulla base di una opportuna logica, attualmente implementata in un microcalcolatore, che, sulla base dei dati elaborati relativi alla condizione di traffico in atto, provvede a:

- 1) gestire i tempi delle fasi in atto;
- 2) gestire le richieste provenienti da correnti di traffico antagoniste

3.3.3 Parametri misurati e/o calcolati

In figura 3.2. è riportato un treno di impulsi prodotto da un rivelatore di traffico a spira magnetica (altri tipi di rivelatore possono comunque fornire risultati analoghi).



Impulsi prodotti dai veicoli in transito su una spira

fig. 3.2

Elementi caratteristici misurabili con un rivelatore di traffico

Il treno di impulsi contenuto all'interno di un intervallo di campionamento T è caratterizzato dal numero di impulsi presente nell'intervallo, dalla durata dei singoli impulsi, che corrisponde al periodo in cui un veicolo è presente sul sensore, e dagli intervalli temporali compresi fra un impulso ed il successivo. Da queste caratteristiche è possibile calcolare alcuni parametri di particolare interesse.

Conteggio

In particolare è possibile misurare il flusso, conteggiando, in un intervallo di tempo prefissato T , il numero degli impulsi.

Tasso di occupazione

Le caratteristiche degli impulsi possono essere utilizzate per calcolare il *tasso di occupazione* della spira come somma delle durate degli impulsi rapportata alla durata dell'intervallo di campionamento:

$$\tau = \frac{\sum t_{oi}}{T}$$

Gap

Un'ulteriore grandezza di interesse è l'intertempo fra due impulsi tg , cioè il gap temporale fra due veicoli consecutivi.

Si noti che il conteggio dei veicoli non è in grado di dare un'indicazione sullo stato della circolazione. Uno stesso numero di veicoli può infatti transitare a velocità elevata, cioè in condizioni libere, ovvero a velocità molto bassa come si verifica in presenza di coda. Il tasso di occupazione è una misura che, affiancata a quella del conteggio, consente di individuare lo stato della circolazione: nel primo caso infatti il tasso di occupazione è basso mentre tende all'unità in presenza di coda.

3.3.4 Richieste

3.3.5 Gestione della durata delle fasi

La gestione delle fasi prevede:

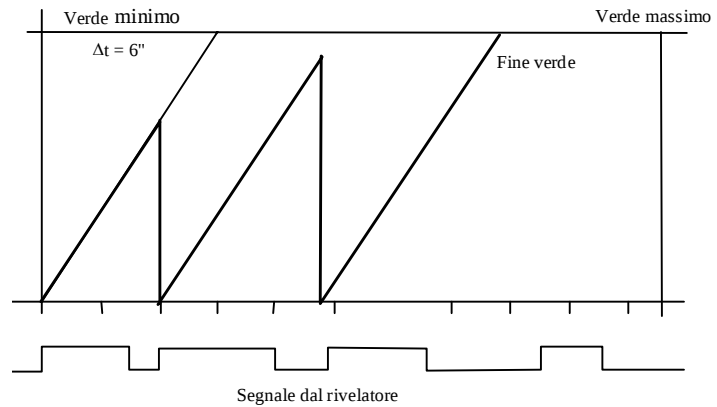
l'individuazione di una durata minima, necessaria per motivi di sicurezza;

l'individuazione di una durata massima, necessaria per poter ottenere una durata del ciclo semaforico accettabile;

l'utilizzo di una tecnica di variazione della durata, che può interrompere il verde nell'intervallo compreso fra la durata minima e quella massima.

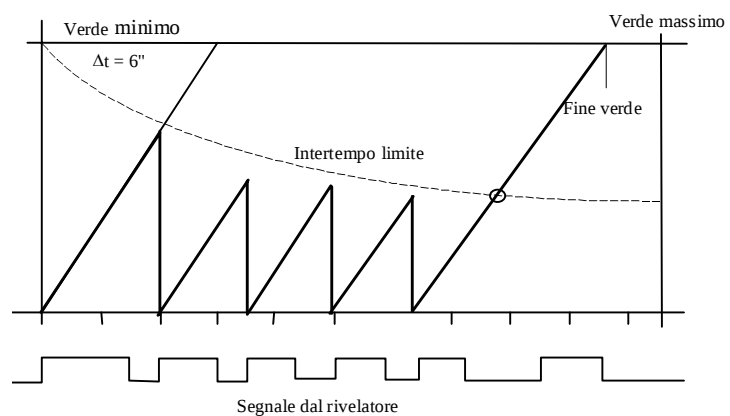
3.3.5.1 Criterio a densità

Il criterio si basa sul superamento di un intervallo prefissato Δt . In pratica ciascun veicolo, all'atto del passaggio sul sensore, prolunga il verde di un valore Δt . Se in questo intervallo non si presenta un veicolo successivo, il criterio di fine viene raggiunto.



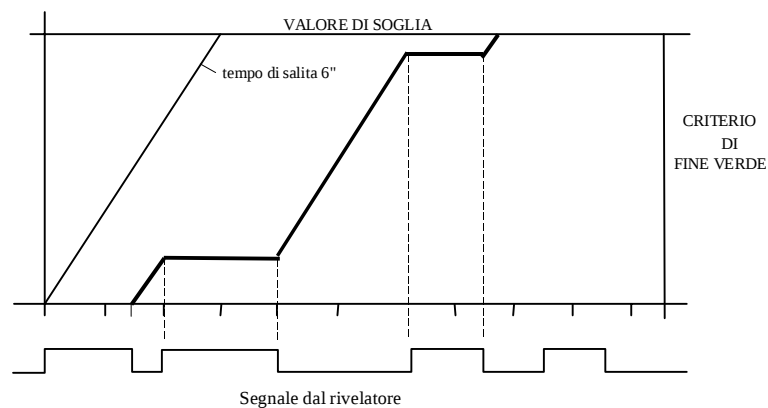
3.3.5.2 Criterio a diminuzione di densità

Il criterio precedente può essere modificato, diminuendo il valore di accettazione di intertempi fra veicoli consecutivi con il tempo di verde trascorso. Il vantaggio di questo tipo di soluzione consiste nella possibilità di assegnare prolungamenti più elevati all'inizio del verde, quando la coda si muove più lentamente e quindi l'intervallo fra il passaggio di due veicoli consecutivi è relativamente elevato. Successivamente gli intertempi fra veicoli consecutivi diminuiscono e quindi si può agire più tempestivamente nella chiusura del verde quando si nota un diradarsi dei passaggi.



3.3.5.3 Criterio a volume-densità

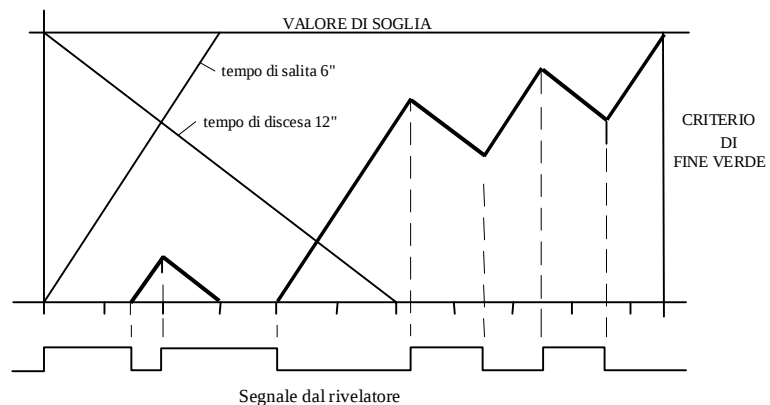
La durata del verde è compresa fra un tempo minimo ed un tempo massimo. All'interno di questo intervallo il verde viene mantenuto sulla base degli intervalli fra veicoli e della presenza dei veicoli sulla spirale come risulta dalla figura.



3.3.5.4 Criterio ad occupazione-densità

In questo caso il criterio di fine viene raggiunto utilizzando due andamenti rettilinei diversi, uno in salita utilizzato nel periodo di assenza di veicoli ed uno in discesa per il tempo in cui la spira è occupata.

Questo procedimento tiene conto di veicoli più lenti o veicoli pesanti.



3.3.6 La progettazione

Le metodologie di attuazione sono condizionate dalle caratteristiche fisiche dei regolatori. La gran parte dei regolatori in commercio, di tipo programmabile, è in grado di essere utilizzata per realizzare sia controlli a tempi fissi sia controlli di tipo attuato dal traffico.

L'attuazione si basa per lo più sulla definizione delle fasi che possono essere utili nel caso della particolare intersezione considerata. Esistono peraltro anche tecniche di attuazione più complesse, basate sull'intervento a livello di singolo gruppo di segnale.

Per quanto riguarda gli attraversamenti pedonali, in genere il tempo di verde viene variato in accordo con quelli veicolari appartenenti alla stessa fase oppure viene assegnato in modo fisso, se non è associato ad alcuna altra corrente veicolare.

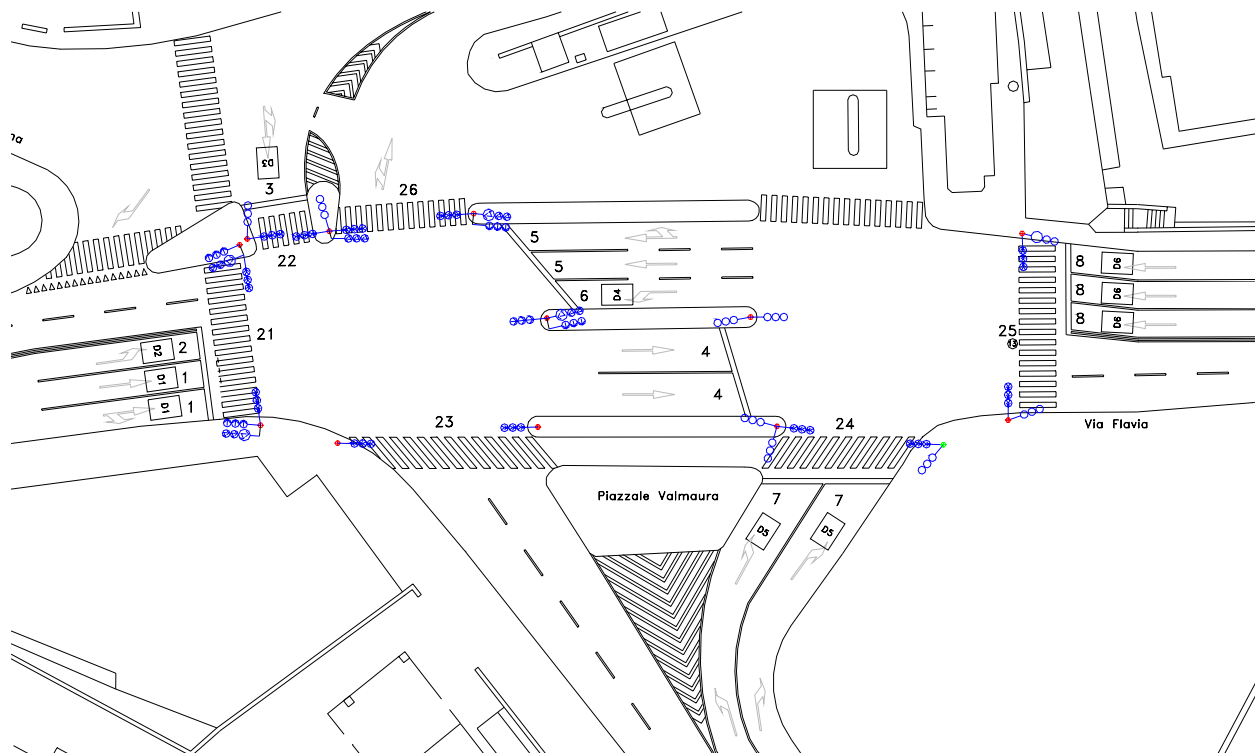
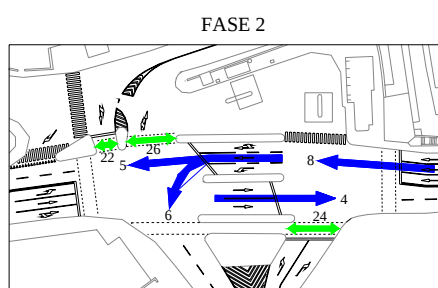
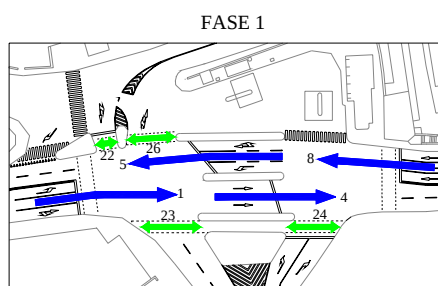
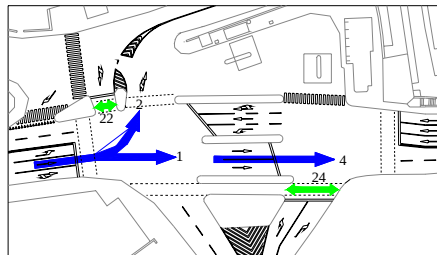


Fig. XX
Esempio di incrocio attuato

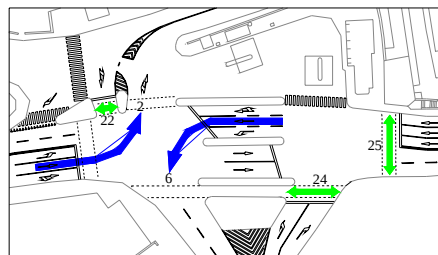
3.3.6.1 Le fasi



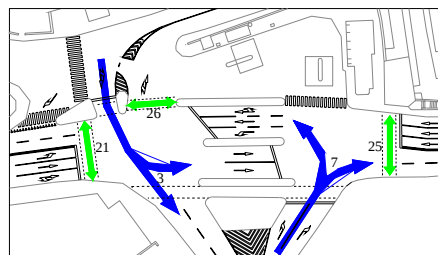
FASE 3



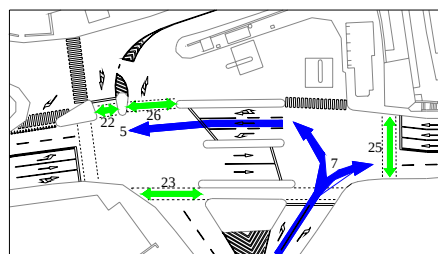
FASE 4



FASE 5



FASE 6



3.3.6.2 Diagramma delle transizioni di fase

Il diagramma delle transizioni di fase rappresenta schematicamente tutte le possibilità di passaggio da una fase alle altre fasi. In figura X.X è riportato un esempio di diagramma delle transizioni di fase in cui la presenza di una freccia orientata rappresenta la possibilità di passaggio dalla fase origine delle fraccia a

quella destinazione della freccia stessa. Nell'esempio è possibile passare dalla fase 2 alla fase 1 e viceversa mentre dalla fase 2 si può passare anche alle fasi 4 e 5 ma da queste non è possibile ritornare direttamente sulla fase 2.

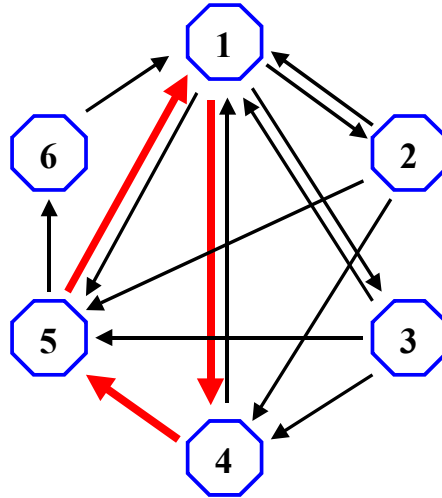


Figura X.X
Esempio di diagramma di transizione di fase

Nell'esempio sono inoltre marcate le transizioni che costituiscono il ciclo base nel caso di richieste continue. Il ciclo base viene realizzato anche nel funzionamento manuale. Che può essere implementato come un particolare tipo di richiesta.

3.3.6.3 LOGICA DI ATTUAZIONE

La logica di attuazione descrive le modalità secondo le quali vengono gestite le richieste di inserzione delle fasi e le durate delle fasi stesse. Detta logica si basa su operatori logici di tipo AND OR e NOT applicati alle variabili che descrivono lo stato del sistema.

Lo stato del sistema dipende dalla fase in corso, dalla condizione in cui si trovano i rivelatori di traffico (in prolungamento o a fine prolungamento), dalle richieste pedonali, dalle richieste in atto da parte delle correnti veicolari, ecc.

Per esemplificare la struttura delle condizioni logiche utilizziamo le seguenti notazioni.

+	=	operatore OR: richiede il verificarsi di almeno una condizione
•	=	operatore AND: richiede il verificarsi di tutte le condizioni
$\bar{x}$	=	operatore NOT: richiede il non verificarsi della condizione x
R_x	=	condizione di attivazione del rivelatore x
FR_x	=	fine della condizione di attivazione del rivelatore x
P_x	=	condizione di attivazione della chiamata pedonale del segnale x
C_x	=	chiamata della fase x
PH_x	=	impianto nella fase x
FIX	=	fase su cui si porta l'impianto in assenza di altre chiamate

Utilizzando la precedente simbologia si possono definire le condizioni che governano il prolungamento di una fase. Con riferimento all'esempio considerato, nella seguente tabella sono riportati tutti gli elementi necessari a definire la gestione del tempo di verde di ciascuna fase. In particolare devono

essere definite le durate minime e massime del verde, il prolungamento del verde per effetto di un veicolo in transito sulla spira, e la condizione che produce tale prolungamento.

Prolungamento del verde

FASE [PH]	Dmin [sec]	Dmax [sec]	Δ veicolo [sec]	Condizione Logica
1	10	31	2	$(R1 + R6) \bullet \overline{C2} \bullet \overline{C3}$
2	1	11	2	R6
3	1	7	2	3.3.6.3.1.1 R1
4	3	11	2	$(R2 + R4)$
5	10	21	2	$(R3 + R5) \bullet \overline{C6}$
6	1	7	2	3.3.6.3.1.2 R5

La fase 1 viene prolungata se il rivelatore R1 oppure il rivelatore R6 sono ancora attivi (non hanno cioè raggiunto il criterio di fine prolungamento) e non sono chiamate le fasi 2 o 3. Le fasie 2, 3 e 6 vengono gestite unicamente dai rivelatori R6, R1 e R5. La fase 4 viene prolungata sia dal rivelatore R2 che dal rivelatore R4. La fase 5 infine viene prolungata dai rivelatori R3 o R5, in assenza di richiesta della fase 6.

Richiesta del verde

Chiamata [C]	Condizione Logica
1	3.3.6.3.1.3 FIX
2	$PH1 \bullet FR1 \bullet R4 \bullet \overline{FR6}$
3	$PH1 \bullet FR6 \bullet R2 \bullet FR1$
4	R2+R4
5	$R3 + R5 + P_{21} + P_{25}$
6	$PH5 \bullet \overline{FR5} \bullet FR3$

Esempi

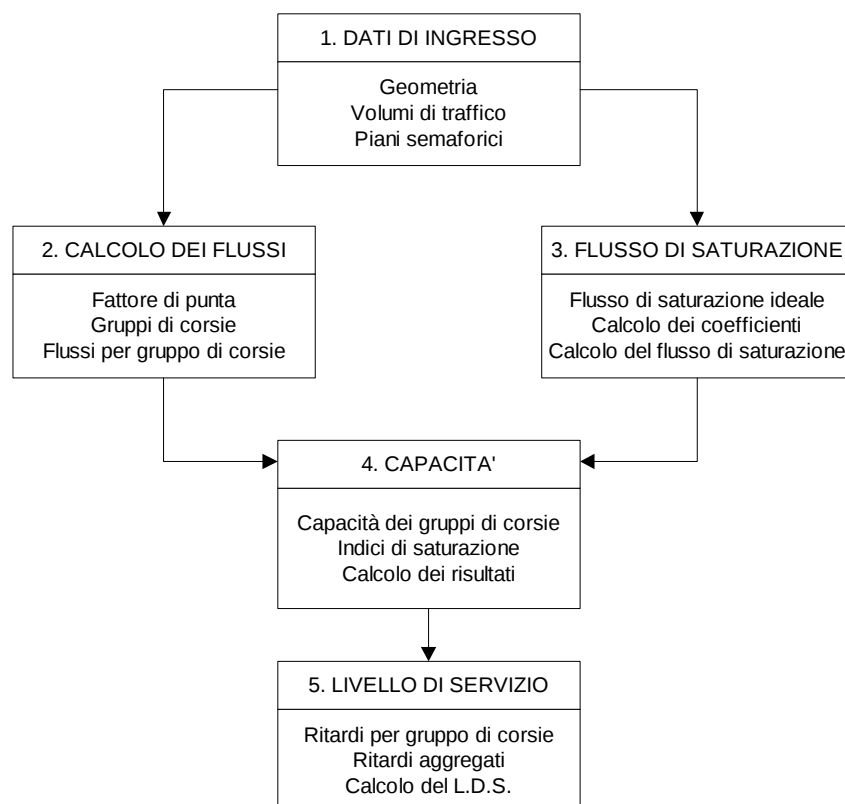
La scelta delle apparecchiature

4 Analisi funzionale di una intersezione semaforizzata

4.1 Fasi dell'analisi

L'analisi funzionale di un impianto semaforico consente di determinare la capacità ed il livello di servizio di ogni gruppo di corsie e dell'intera intersezione. Essa 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 seguente diagramma e consiste in 5 passi: 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.



4.2 Dati di ingresso

4.2.1 Dati geometrici

La geometria dell'intersezione viene presentata normalmente in forma di planimetria. La planimetria 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. Deve essere inoltre riportata la segnaletica orizzontale in modo da poter individuare l'utilizzo delle diverse corsie e la presenza di corsie dedicate alla svolta a sinistra e a destra. E' necessario infine che si possano individuare gli spazi di accumulo delle code.

Evidentemente se la geometria deve essere progettata, tutti i precedenti elementi dovranno essere considerati come dati di progetto.

4.2.2 Flussi

I flussi di utenti in arrivo devono essere specificati per ogni movimento di ciascun attestamento.

I flussi necessari per la progettazione devono essere acquisiti attraverso conteggi effettuati per ciascuna corrente di traffico e suddivisi per tipologia dei mezzi. Nel caso più corsie siano disponibili per una corrente di traffico è opportuno individuare il flusso di ciascuna corsia, per poter individuare il coefficiente di utilizzo delle singole corsie.

I conteggi dovrebbero essere effettuati in modo da ottenere l'andamento del traffico nei diversi periodi della giornata. In generale è opportuno effettuare i conteggi su un arco di 16 ore, per giornata (con un minimo delle 6 ore durante le quali la saturazione è maggiore, se le risorse a disposizione non consentono conteggi per l'intero periodo di 16 ore) e di campionare i dati ad intervalli non superiori ai 15 minuti. Nel caso di intersezioni già semaforizzate è conveniente utilizzare il ciclo semaforico come intervallo di campionamento. Qualora si preveda l'uso di un controllo attuato dal traffico, l'intervallo di campionamento suggerito è il minuto.

E' necessario acquisire anche i dati di traffico relativi a giorni della settimana che presentano comportamenti particolari.

4.2.3 Piano semaforico

Per l'analisi funzionale dell'intersezione si fa riferimento ad un particolare piano semaforico calcolato secondo le metodologie esposte nei capitoli precedenti

4.3 Calcolo dei flussi

4.4 Calcolo del flusso di saturazione

Il *flusso di saturazione* s deve essere calcolato per ciascun gruppo di corsie secondo le procedure illustrate nell'Appendice 1.

In alternativa si può ricorrere ad una misura del flusso di saturazione. Nel caso di un'intersezione semaforizzata tale misura può essere effettuata, per ciascuna corsia, ponendosi in corrispondenza alla linea di arresto della corsia e misurando il tempo Δt intercorrente fra il passaggio del quarto veicolo e l'ultimo dei veicoli in coda. Per misurare i tempi ci si riferisce al passaggio dell'asse

posteriore del veicolo sulla linea di arresto. Si calcola quindi il tempo medio impiegato da ciascun veicolo dividendo il tempo misurato per il numero di veicoli transitati n_v :

$$t_m = \Delta t / n_v$$

Il flusso di saturazione della corsia si ricava quindi dal rapporto

$$s = 3600 / t_m$$

Per ottenere un risultato significativamente valido sul piano statistico è necessario ripetere il calcolo per non meno di 15 cicli semaforici, con non meno di 8 veicoli in coda all'inizio del verde.

4.5 Calcolo delle capacità

Un elemento essenziale per la valutazione delle prestazioni di un'intersezione semaforizzata e quindi per la progettazione della stessa è costituito dalla valutazione della capacità rapporto tra la domanda di spostamento attraverso un'intersezione e la possibilità della stessa di assorbire tale traffico.

In precedenza abbiamo visto come si determina il flusso di saturazione per ogni gruppo di corsie dell'intersezione analizzata e come si valuta 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, mediante le seguenti considerazioni:

1. Esiste un solo gruppo critico per ogni fase semaforica;
2. Il gruppo critico di ogni fase è quello, tra i gruppi che ricevono il verde, con il rapporto di flusso più elevato;
3. 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", cioè 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.

4.6 Calcolo del Livello di Servizio (LDS)

Per la valutazione del livello di servizio di un'intersezione semaforizzata ci si riferisce 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 sovrassaturazione di alcuni segnali.

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;
- d₂** 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 sovrassaturazione, nell’ipotesi che all’inizio del periodo non vi sia una domanda residua da soddisfare nel gruppo di corsie analizzato;
- d₃** 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.

4.6.1 Ritardo uniforme d₁

Un’espressione efficace e largamente accettata per determinare il ritardo nell’ipotesi di un arrivo uniforme dei veicoli di un gruppo di corsie all’intersezione è stata 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.

4.6.2 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.

Livello di coord.	R_p (range)	R_p (default)
1	≤ 0.5	0.333
2	$0.50 \div 0.85$	0.667
3	$0.85 \div 1.15$	1.00
4	$1.15 \div 1.50$	1.333
5	$1.50 \div 2.00$	1.667
6	> 2.00	2.00

Le caratteristiche del coordinamento si ripercuote 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 (oltre ai simboli già definiti in precedenza):

f_p indica un ulteriore coefficiente correttivo in base alla tipologia di arrivo dei plotoni, i cui valori di default sono definiti dalla seguente tabella:

Livello di coord.	f_p
1	1.00
2	0.93
3	1.00
4	1.15
5	1.00
6	1.00

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.

4.6.3 Ritardo incrementale d_2

L'aliquota del ritardo incrementale 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. Tale coefficiente 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 seguente tabella, in funzione dell'intervallo minimo δ di prolungamento del verde attuato:

δ [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

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.

4.6.4 Ritardo per la domanda insoddisfatta **d₃**

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 **d₃**:

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

dove:

- Q_b** domanda insoddisfatta all'inizio del periodo di analisi (espressa in veicoli);
- c** capacità corretta del gruppo di corsie (espressa in veicoli orari);
- T** durata del periodo di analisi espressa in ore;
- t** periodo di persistenza della domanda insoddisfatta (espressa in ore);
- u** 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.

4.6.5 Valutazione del ritardo globale

Le procedure esposte 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 ritardo per l'approccio A

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

f_i 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 ritardo per l'intera intersezione I

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

f_A flusso corretto per l'attestamento A .

4.6.6 Determinazione del livello di servizio

Il livello di servizio si ricava direttamente dall'entità del ritardo per veicolo. Sia per il singolo gruppo di corsie, sia per un determinato attestamento, sia per l'intera intersezione, il livello di servizio può essere desunto dalla seguente tabella:

LDS	RITARDO MEDIO PER VEICOLO [sec]
A	≤ 10.0
B	$> 10.0 \text{ e } \leq 20.0$
C	$> 20.0 \text{ e } \leq 35.0$
D	$> 35.0 \text{ e } \leq 55.0$
E	$> 55.0 \text{ e } \leq 80.0$
F	> 80.0