



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria Civile Edile ed Ambientale

Corso di Laurea Magistrale in
INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

***CRITERI DI GESTIONE DELLA PRIORITÀ SEMAFORICA
PER IL TRASPORTO PUBBLICO: UN CASO APPLICATIVO***

Relatore:
Prof. Ing. Massimiliano Gastaldi

Laureando:
Tommaso Vianello

Correlatore:
Dott. Matteo Stevanato

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

Alla mia famiglia

Indice

PREFAZIONE	1
INTRODUZIONE	3
CAPITOLO 1- STATO DELL'ARTE.....	6
1.1 – PRIORITY NEL TRASPORTO PUBBLICO URBANO	6
1.1.1 – <i>Classificazione dei sistemi di priorità dei mezzi pubblici</i>	9
1.2 – ALGORITMI DI OTTIMIZZAZIONE	21
1.2.1 – <i>Algoritmi Deterministici</i>	26
1.2.2 – <i>Algoritmi Stocastici</i>	29
CAPITOLO 2 – METODOLOGIA	34
2.1 – IL TRAM DI MESTRE.....	34
2.1.1 – <i>Gestione della priorità tranviaria</i>	36
2.1.2 – <i>Il tracciato oggetto di studio</i>	40
2.1.3 – <i>Caso studio: Intersezione n. 27 tra via Rinascita e via Beccaria</i>	43
2.2 – PROGETTO DEL PIANO SEMAFORICO	45
2.2.1 – <i>Acquisizione dei dati</i>	48
2.2.2 – <i>Analisi delle correnti</i>	48
2.2.3 – <i>Struttura del piano semaforico</i>	60
2.2.4 – <i>Calcolo del piano semaforico</i>	69
2.2.5 – <i>Valutazione</i>	76
2.3 – TRANSYT 14	79
2.3.1 – <i>Il modello della rete</i>	81
2.3.2 – <i>Il processo di ottimizzazione</i>	101
CAPITOLO 3 – ANALISI DEI RISULTATI DEL CASO STUDIO	108
3.1 – DESCRIZIONE DELLE SIMULAZIONI EFFETTUATE.....	108
3.2 – DESCRIZIONE DEGLI INDICATORI DI PRESTAZIONE UTILIZZATI	110
3.2.1 – <i>Indice di prestazione (Performance Index – PI) [E/hr]</i>	110
3.2.2 – <i>Grado di saturazione (Degree of Saturation) [%]</i>	110
3.2.3 – <i>Livello di Servizio (Signalled LOS)</i>	111
3.2.4 – <i>Ritardo medio per veicolo equivalente (Mean Delay per PCU) [sec]</i>	112
3.2.5 – <i>Numero medio di fermate per veicolo equivalente (Mean stops/PCU) [%]</i>	113
3.2.6 – <i>Valore massimo medio di coda (Mean Max Queue) [PCU]</i>	113
3.3 – RISULTATI PER IL PIANO SEMAFORICO DEL COMUNE IN ASSENZA DI TRAM (HP 1).....	113

3.4 – RISULTATI PER IL PIANO SEMAFORICO OTTIMO IN ASSENZA DI TRAM (HP 2)	118
3.5 – RISULTATI PER IL PIANO SEMAFORICO DEL COMUNE IN PRESENZA DI TRAM (HP 3)	122
3.6 – RISULTATI PER IL PIANO SEMAFORICO OTTIMO IN PRESENZA DI TRAM (HP 4)	126
3.7 – RISULTATI PER L’OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA IN PRESENZA DI TRAM (HP 5)	129
3.8 – CONFRONTO DEI RISULTATI.....	132
3.8.1 – Confronto tra Hp 1 e Hp 2	132
3.8.2 – Confronto tra Hp 1 e Hp 3	136
3.8.3 – Confronto tra Hp 2 e Hp 4	139
3.8.4 – Confronto tra Hp 3, Hp 4 e Hp 5	142
CAPITOLO 4 – CONCLUSIONI	145
RINGRAZIAMENTI	149
BIBLIOGRAFIA.....	151

Prefazione

Questo lavoro di tesi è stato realizzato attraverso un tirocinio presso la Direzione Mobilità e Trasporti del Comune di Venezia per esigenza del sottoscritto: la voglia di mettersi in gioco in prima persona e realizzare qualcosa di trasversale tra il teorico e il pratico mi ha permesso di concludere questi anni di studio con questo elaborato. Tutto questo per vedere nel concreto quali potessero essere le effettive applicazioni in campo lavorativo delle materie studiate.

La scelta del tirocinio presso il Comune di Venezia territorio in cui vivo è stata dettata dall'idea di lavorare su un ambito a me vicino; mi è stato concesso di lavorare su un progetto di estrema attualità: il Tram di Mestre, nonché il tracciato di Marghera, frazione del Comune dove vivo da sempre.

Il sistema del trasporto pubblico da sempre è un argomento molto importante ma spesso sottovalutato, mentre esso potrebbe essere la soluzione a molti dei problemi di congestione ed inquinamento presenti nei centri urbani di ogni città di estensione medio-grande. La realizzazione del tram a Mestre ha portato a molti cambiamenti della geometria e della viabilità lungo tutto il percorso con infinite problematiche dal punto di vista tecnico e con disagi e difficoltà per le attività commerciali, ma c'è da dire che i cittadini, a lavori (quasi) ultimati promuovono il nuovo mezzo (guasti e blocchi a parte) poiché gli utenti che utilizzano regolarmente il tram risultano in numero superiore rispetto alle migliori aspettative preventivate.

La scommessa di intraprendere un percorso di variazione modale, con l'inserimento del tram passa attraverso una fase di grande importanza. Questo mezzo mette a disposizione dell'utenza un'elevata capacità e un comfort di viaggio non paragonabile a quelli dei tradizionali autobus ed inoltre, di fondamentale importanza, una maggiore velocità commerciale grazie alle diverse strategie di priorità applicate (corsie riservate e priorità semaforica). Questo ultimo punto, di evidente interesse trasportistico, viene affrontato nel seguente elaborato approfondendo la gestione di

un'intersezione semaforizzata, ottimizzando i tempi di fasatura per tutti i veicoli e applicando il regime di priorità al tram.

Introduzione

Nella seconda metà del XX secolo l'Italia ha vissuto un innegabile progresso economico che ne ha trasformato in modo radicale il tessuto sociale. Gli spostamenti tra i piccoli centri e le città principali nella prima metà del secolo avvenivano principalmente tramite ferrovia o autolinee, ricorrendo pertanto ai mezzi pubblici come treni, filobus e tram, che per molti rappresentavano l'unica possibilità per muoversi verso l'ambito urbano o all'interno dello stesso, qualora non si volesse andare a piedi o in bicicletta. Solo pochi privilegiati disponevano di autovetture ma la crescita economica ed industriale del dopo guerra ha mutato la situazione drasticamente. L'esigenza di una sempre maggiore flessibilità e velocità di viaggio ha reso l'autovettura privata il mezzo prediletto per la mobilità urbana ed extraurbana.

Il successo di un modello di mobilità prevalentemente individuale e con autoveicoli privati ha generato non poche conseguenze negative. In primo luogo dal punto di vista ambientale, a causa della massiccia quantità di emissioni inquinanti, ma anche dal punto di vista della congestione prodotta nei centri urbani, trasformando paradossalmente la maggior libertà e flessibilità di spostamento in uno stato di paralisi del sistema insostenibile.

Da molti anni, a livello europeo, è iniziato un ripensamento critico del modello di mobilità affermatosi nello scorso secolo. In tale contesto il rilancio del trasporto pubblico riveste un ruolo fondamentale e il miglioramento e la crescita di quest'ultimo, parallelamente ad una diminuzione nell'uso del trasporto privato, è sicuramente una delle soluzioni più rapide ed efficaci per arginare tali emergenze.

La soluzione non sta nella limitazione di libertà nell'uso del mezzo privato, ma nel rendere coscienti i soggetti dell'utilità e del beneficio che può trarne l'intera comunità dall'uso di una mobilità collettiva, pubblica e sostenibile.

Questa situazione si è verificata anche nella terraferma veneziana. A tal proposito gli obiettivi del PGTU (Piano Generale del Traffico Urbano) vertono proprio su una

riconversione della mobilità privata puntando ad una città più salubre, investendo molto sul cambiamento modale da parte degli utenti.

Il piano risulta molto ambizioso e tra gli obiettivi generali che si pone si parla di miglioramento delle condizioni di circolazione per tutti i veicoli, miglioramento della sicurezza stradale (riduzione degli incidenti), riduzione dell'inquinamento atmosferico e acustico (dai rilievi superano entrambi i valori limite dettati da legge) ed il risparmio energetico.

Come si legge dal Piano

“Ad oggi, una visione ampia dei destini di Venezia è[...] ispirata dall’idea di formare una “città moderna integrata, a cavallo fra laguna e terraferma”. E’ una sfida importante, che impegna la pianificazione urbanistica e della mobilità a definire un nuovo sistema di accessibilità e di circolazione fra le parti, superando la tendenza all’uso quasi esclusivo dell’automobile privata per le connessioni esterne e per gli spostamenti interni. È ormai chiaro che il traffico veicolare privato è responsabile dell’inquinamento atmosferico cronico nell’area urbana e del deterioramento del clima sonoro. Rispetto a questa situazione non possono essere previsti solo interventi di emergenza, né si possono riporre unicamente sull’innovazione tecnologica le aspettative di risanamento complessivo.”

è evidente l’obiettivo da parte dell’amministrazione comunale di perseguire il cambiamento modale degli spostamenti, almeno pendolari, interni al centro abitato, andando a migliorare la rete di trasporto pubblico che ora presenta diverse problematiche.

I problemi principali percepiti del trasporto pubblico nel comune sono le velocità commerciali e, soprattutto, la regolarità dei tempi di percorrenza. Le velocità commerciali decrescono sistematicamente dalle tratte periferiche a quelle centrali; mentre i tempi di percorrenza variano significativamente sia nella punta mattutina che serale, seppur in modo differenziato per direttrice e tratta.

Oltre al potenziamento della rete di autobus già in servizio, è prevista la realizzazione di nuove infrastrutture come il Sistema Ferroviario Metropolitano

Regionale (SFMR) e il progetto del tracciato tranviario su gomma a guida vincolata (già in parte realizzato) con l'idea di realizzare un sistema di trasporto pubblico locale integrato.

Su quest'ultimo punto ci si sofferma in questo lavoro di tesi, nello specifico interessa il tram di Mestre, andando ad approfondire l'importanza del trasporto pubblico all'interno di un centro urbano e quali possono essere le strategie di priorità utilizzate per un suo funzionamento efficiente ed efficace.

La tesi è così strutturata:

nel capitolo 1 si approfondiscono le diverse strategie di priorità semaforica utilizzabili descrivendo alcuni metodi applicati in altre città; sono poi descritti diversi algoritmi di ottimizzazione del piano semaforico.

Nel capitolo 2 viene descritto il caso studio; dapprima vengono descritte le caratteristiche del tram di Mestre, in particolare della tipologia di priorità implementata e il tracciato; successivamente si parla dell'intersezione oggetto di studio e in particolare dell'attività di progettazione dei piani semaforici; infine si introduce il software utilizzato (TRANSYT 14) descrivendo i vari passi per lo sviluppo del modello e il processo di ottimizzazione implementato.

Nel capitolo 3 viene spiegato in dettaglio il caso studio descrivendo ogni singola ipotesi valutata e riportando i risultati relativi alle simulazioni effettuate, con particolare attenzione ai ritardi, alle fermate ed eventuali code caratterizzanti i diversi rami dell'intersezione; si riportano inoltre i confronti tra le diverse ipotesi studiate.

Nel capitolo 4 vengono riportate le conclusioni relative al caso studio.

Capitolo 1- Stato dell'arte

1.1 – Priorità nel Trasporto Pubblico Urbano



Fig. 1.1 – Mezzi di trasporto pubblico in servizio nel Comune di Venezia

L'utilizzo dei mezzi di trasporto pubblico da parte del cittadino medio risulta poco pratico e agevole pertanto si preferisce raggiungere ogni destinazione utilizzando mezzi privati. Questo tipo di comportamento è da attribuirsi alla poca attrazione che i mezzi pubblici hanno sull'utenza a causa di ritardi continui, la possibilità di non raggiungere in modo capillare ogni parte della città, la sporcizia ecc.

È quindi necessario, per progredire nel processo di transizione modale della scelta del mezzo di trasporto, inserire degli accorgimenti che possano attuare questo cambiamento di abitudini da parte dei possibili clienti. Il sistema "trasporto pubblico" a questo proposito deve garantire e consentire all'utente di percepire gli stessi standard di efficienza e comodità del mezzo privato.

I miglioramenti da adottare per rendere più appetibile il servizio al cliente possono essere diversi, come una maggior efficienza dei mezzi e un miglior comfort per i passeggeri, una gestione integrata dei diversi sistemi di trasporto pubblico (ad esempio integrazione tariffaria, interoperabilità dei servizi urbani ed extraurbani) e la riduzione dei costi di servizio che, in mancanza di evasione, può portare ad una riduzione del prezzo del biglietto.

Tra gli obiettivi principali che i gestori dei servizi di trasporto pubblico si devono dare, sono da annoverare indubbiamente la riduzione dei tempi di percorrenza aumentando la velocità commerciale (eventualmente anche a discapito dei mezzi privati) e una maggiore regolarità del servizio (rispetto degli orari).

Sono diverse le tipologie di intervento adottabili per aumentare lo standard qualitativo dei servizi offerti tra cui: l'inserimento di nuove linee, la variazione dei percorsi delle linee esistenti con l'aggiunta di fermate (maggior capillarità del servizio), l'aumento delle corse (maggior frequenza). Inoltre è possibile intervenire anche utilizzando delle strategie di preferenziamento per i mezzi pubblici con interventi essenzialmente di tipo regolatorio.

Quest'ultima soluzione è vista in molti Paesi come migliorativa dell'immagine e della qualità del servizio di trasporto pubblico urbano.

La necessità di inserire dei sistemi di priorità per i mezzi pubblici è evidente in particolare dove i mezzi per il trasporto pubblico si muovono in sede promiscua. In quel caso, in assenza di misure di priorità, i mezzi pubblici sono influenzati dal resto del traffico e incorrono nelle continue fermate causate da fenomeni di congestione o anche semplicemente dalla presenza di intersezioni.

Con riferimento in particolare alle intersezioni stradali, esistono diverse tecnologie in grado di individuare i singoli veicoli con diritto di priorità (autobus, tram ecc.) in avvicinamento all'intersezione ed utilizzare queste informazioni per variare il ciclo semaforico.

La strategia del preferenziamento dei mezzi pubblici è vista come la chiave per realizzare un servizio che sia il più competitivo possibile nella scelta del mezzo di trasporto da parte degli utenti, incrementando l'attrazione del mezzo pubblico a discapito del mezzo privato.

Da esperienze reali basate sullo studio delle strategie di priorità adottate, si possono individuare i seguenti benefici:

- Riduzione dei tempi di viaggio: annullando i tempi di attesa ai semafori, i tempi di viaggio risultano più bassi;
- Risparmio nei costi di esercizio: se il tempo risparmiato è significativo, è possibile ridurre il numero di veicoli in servizio;
- Miglioramento della puntualità e affidabilità: la priorità riduce la variabilità del tempo di viaggio con effetti positivi su puntualità, regolarità e affidabilità del servizio;

- Miglior soddisfazione da parte degli utenti: la riduzione dei tempi di percorrenza comporta una migliore soddisfazione dei clienti e aumenta la possibilità di attrarne di nuovi.

A tutti i benefici citati finora si associano anche delle criticità. Chiaramente, la riduzione di ritardo per il mezzo pubblico produce, come diretta conseguenza, l'aumento del perditempo per gli altri veicoli; a livello globale però, il problema non si pone poiché il ritardo totale degli utenti presenti nella rete risulta ridotto grazie al maggior valore del tasso di occupazione dei mezzi pubblici rispetto ai mezzi privati: dare precedenza a veicoli con un maggior numero di passeggeri permette di ottenere un ritardo globale degli utenti inferiore pur potendo generare, paradossalmente, fenomeni di congestione per i veicoli privati.

Al fine di evitare la paralisi del traffico se in presenza di molti mezzi con diritto di precedenza, è possibile avvalersi di una speciale funzione che può essere implementata nei più sofisticati sistemi di priorità: la priorità differenziale. La priorità differenziale non dà la priorità indistintamente ad ogni mezzo che arriva all'intersezione, ma solo ad alcuni mezzi in base a dei criteri predefiniti. Solitamente è utilizzata per dare priorità ai soli mezzi in ritardo e può essere implementata con due differenti metodi.

Il primo metodo si basa sull'analisi della differenza tra l'orario di passaggio effettivo e quello previsto in una certa sezione di controllo in modo da dare priorità al mezzo solo se il ritardo rispetto alla tabella di marcia è superiore ad una data soglia. Questa metodologia è adatta per servizi a bassa frequenza, dove i passeggeri effettivamente fanno riferimento agli orari previsti per recarsi in fermata.

Il secondo metodo va a monitorare l'intertempo tra due autobus consecutivi e confronta questo valore fornito con quello previsto dalla tabella oraria; la priorità viene fornita solo ai mezzi che risultano avere un intertempo dai veicoli che li precedono superiore ad una data soglia. Questa seconda metodologia è più adatta per servizi ad alta frequenza, dove i passeggeri arrivano alle fermate in maniera casuale confidando in un basso tempo di attesa.

1.1.1 – Classificazione dei sistemi di priorità dei mezzi pubblici

La priorità dei mezzi pubblici può essere effettuata lungo i rami della rete di trasporto, quindi sulle vie di percorrenza dei mezzi, oppure in corrispondenza delle intersezioni presenti. Si possono pertanto definire due categorie di sistemi di priorità:

- Misure di priorità sui link: corsie preferenziali, busway e corsie riservate per la marcia in senso vietato;
- Misure di priorità alle intersezioni: la priorità semaforica e le esenzioni dai divieti di svolta o di proseguire dritto.

Una corsia preferenziale è una parte della carreggiata stradale riservata al transito dei soli mezzi di trasporto pubblico. Risulta essere una delle soluzioni più semplici e immediate al problema del traffico urbano, però questa



soluzione è molto vincolante dal punto di vista degli spazi; nei centri

Fig. 1.2 – Vista di una corsia riservata per il servizio di trasporto pubblico

urbani risulta difficile inserire corsie aggiuntive per il solo transito dei mezzi pubblici oltre a quelle di transito regolare.

Nel caso di corsie soggette a un flusso ininterrotto (assenza di intersezioni), si predispongono dei veri e propri percorsi dove i veicoli pubblici non si devono mai mescolare con i veicoli privati; questi percorsi sono definiti busway.

Negli anni si sono studiate nuove strategie nell’istituzione delle corsie riservate per ovviare in parte al problema della congestione del traffico privato come le corsie High Occupancy Vehicle (HOV) e le corsie riservate a specifiche categorie veicolari solo durante determinati periodi della giornata. Nel primo caso, testualmente “veicoli con elevata occupazione”, viene consentito il transito a tutti i veicoli con un numero superiore di passeggeri rispetto ad un certo valore predefinito, con una riduzione dei tempi di percorrenza per tutti i veicoli (non solo pubblici) che hanno un determinato tasso di occupazione; questa strategia risulta molto utilizzata negli Stati Uniti dove non si presentano problemi di spazio grazie all’ampia larghezza delle carreggiate. Nel secondo caso, invece, le corsie riservate ai mezzi pubblici sono valide solamente

durante fasce orarie predefinite (solitamente in concomitanza con i picchi di traffico del mattino e della sera) mentre durante il resto della giornata risultano delle corsie ordinarie utilizzabili da qualsiasi veicolo; questa tipologia di corsie trova grande applicazione in Inghilterra.

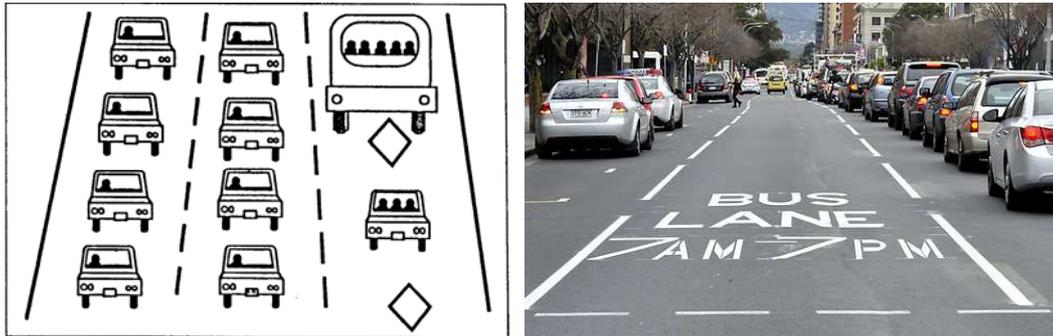


Fig. 1.3 – *A sinistra: Schema rappresentativo delle corsie High Occupancy Vehicle (HOV); a destra: vista di una corsia riservata al trasporto pubblico per una determinata fascia oraria (nello specifico dalle 7 alle 19)*

Nonostante le corsie riservate riducano l’interferenza tra mezzi privati e pubblici presentano nelle città europee l’inconveniente dell’occupazione di spazio nella sede stradale. I metodi utilizzati con maggior frequenza per recuperare, almeno in parte, lo spazio di realizzazione sono i seguenti:

- Riduzione della larghezza delle corsie dedicate al traffico ordinario;
- Conversione di una corsia dedicata al traffico ordinario a corsia per mezzi pubblici, su strade a più corsie per senso di marcia;
- Eliminazione dei parcheggi lato strada;
- Espropriazione di terreni da proprietà private lungo il tracciato.

I primi due metodi, riducendo lo spazio di manovra per il resto del traffico, possono creare problemi di congestione e lamentele da parte dei conducenti, il terzo metodo crea problemi ai residenti e ai negozi mentre l’ultimo metodo trova l’opposizione dei proprietari che vengono espropriati.

Un’altra soluzione direttamente collegata al



Fig. 1.4 – *Sistema di controllo degli accessi attraverso il telecontrollo*

concetto di corsia riservata è l'uso di corsie per la marcia in senso vietato; questa strategia si applica strettamente nella parte centrale della città poiché va a migliorare la penetrabilità del mezzo pubblico penalizzando i mezzi privati. Si tratta infatti di realizzare dei percorsi riservati al solo trasporto pubblico in corrispondenza di un senso unico oppure di un obbligo di svolta per i privati (solitamente in corrispondenza di un'intersezione). Questi interventi possono essere resi maggiormente efficaci con sistemi di controllo degli accessi per evitare le infrazioni di mezzi non autorizzati (telecontrollo, dissuasori mobili ecc.) poiché spesso i benefici che si possono ottenere sono minati dalla presenza di auto in sosta vietata o che transitano illegalmente sulle corsie riservate.

Per quanto riguarda il posizionamento di queste corsie all'interno della sede stradale, non esiste in generale una regola: possono essere inserite a destra o al centro della carreggiata, nel senso di marcia del flusso di traffico o in senso opposto.

La priorità semaforica è un intervento di tipo regolatorio che può dare grossi benefici se ben progettato e combinato con le misure di priorità appena descritte.

È possibile fare una distinzione tra sistemi di priorità attivi e passivi.

Nei sistemi passivi, la priorità viene determinata attraverso il calcolo dei piani semaforici e di tutti i parametri offline (lunghezza del ciclo, tempi di verde e offset) sulla base di dati storici, al fine di favorire gli spostamenti dei mezzi pubblici; il piano semaforico non risulta quindi dipendente dal flusso reale dei veicoli presenti nell'intersezione e non è necessaria pertanto la presenza di strumentazione per il monitoraggio dei flussi veicolari. Esempi di questi interventi possono essere la regolazione dell'offset tra due semafori successivi tenendo conto della ridotta velocità media da parte dei mezzi a causa della possibile presenza di fermate, aumento del tempo di verde delle fasi a servizio del mezzo con diritto di precedenza per aumentare la probabilità che il suddetto mezzo trovi il segnale di via libera all'intersezione semaforizzata oppure l'applicazione di entrambi gli esempi citati. La riduzione della lunghezza del tempo di ciclo è un altro intervento di tipo passivo utilizzato poiché aumenta il numero di rotazioni delle fasi e come diretto risultato si ottiene una riduzione dei tempi di attesa per tutti i veicoli, compresi i mezzi pubblici [7]. Le strategie di priorità passiva sono economiche da sviluppare e semplici da implementare. Il loro successo è palpabile solo in presenza di intersezioni con flussi

di traffico a bassa variabilità ed inoltre, altro difetto non trascurabile, nel calcolo dei parametri si assumono dei tempi di sosta alle fermate prefissati, che non rispecchiano in modo realistico la maggior parte delle operazioni di transito.

Nei sistemi attivi, invece, la priorità risponde alle variazioni del traffico in tempo reale e questi sistemi risultano molto più efficaci dei sistemi di tipo passivo. Le informazioni sulla velocità e sulla posizione dei mezzi pubblici ottenute in tempo reale richiedono un sistema di rilevamento e una forma di comunicazione tra il mezzo e la centralina di controllo situata in prossimità della lanterna semaforica. Le strategie di priorità attiva includono:

- Estensione di fase: in presenza di un mezzo pubblico in prossimità dell'intersezione mentre la fase di verde per quella corrente di traffico sta terminando, la centralina interviene estendendo il segnale di verde al fine di consentire il transito del mezzo pubblico;
- Anticipo di fase: in presenza di un mezzo pubblico in prossimità dell'intersezione mentre è attiva la fase di rosso, la centralina interviene riducendo il tempo di rosso per la corrente interessata dal mezzo e avviando in anticipo la fase di verde;
- Inserimento di fase: in presenza di un mezzo pubblico in prossimità dell'intersezione che abbia bisogno di una fase speciale non presente nel ciclo ordinario, la centralina va ad inserire tale fase variando la struttura del ciclo, il quale riparte una volta transitato il mezzo;
- Rotazione di fase: in presenza di un mezzo pubblico in prossimità di un'intersezione che ha bisogno di eseguire una particolare manovra (soprattutto svolte a sinistra), la centralina può eseguire una rotazione della fase corrente per permettere di servire il mezzo; ad esempio nel caso in cui sia presente una svolta a sinistra ritardata (*lagging phase*) all'interno della fase e si avvicina un mezzo pubblico che deve fare quella manovra, la rotazione di fase rende la svolta a sinistra anticipata (*leading phase*) per consentire il passaggio del mezzo.

Sebbene le strategie di priorità attiva siano più efficaci di quelle passive nel miglioramento delle operazioni di transito, richiedono sistemi di rilievo e di comunicazione che incrementano i loro costi senza alcuna garanzia di successo nella

loro applicazione all'intersezione oggetto di studio. Esse spesso hanno effetti dannosi per il traffico privato, possono causare confusione ai conducenti che hanno familiarità con l'intersezione e in molti casi sono responsabili della perdita del coordinamento tra semafori successivi con un grosso aumento dei ritardi.

Come già detto in precedenza, i sistemi di priorità attiva richiedono sia tecnologie di localizzazione dei mezzi che di comunicazione. Pertanto, questo risulta essere un campo dove possono essere sfruttati gli *Intelligent Transportation Systems* (ITS). Questi dispositivi nascono dalla necessità di gestire i problemi della congestione del traffico, dell'inquinamento ambientale e della sicurezza attraverso la sinergia di tecnologie nel campo dell'informatica e delle telecomunicazioni per il controllo e la gestione dei sistemi di trasporto stradale. I dispositivi ITS forniscono strumenti per l'identificazione e la localizzazione dei mezzi e consentendo la comunicazione tra veicolo e centralina.

Uno strumento ITS che può essere sfruttato per la localizzazione dei mezzi pubblici con diritto di precedenza è il cosiddetto *Selective Vehicle Detection* (SVD), usato per individuare i mezzi che si avvicinano all'intersezione, in modo che il piano semaforico possa essere adattato per dare priorità ai mezzi pubblici in modo attivo. SVD è un sistema che rileva selettivamente i veicoli in particolari punti della rete stradale, che spesso richiedono la comunicazione tra apparecchiature poste a bordo del veicolo e a lato della carreggiata. Una volta individuato il mezzo, viene trasmesso un segnale, solitamente un segnale radio, alla centralina dove le informazioni vengono rielaborate per valutare la modifica del piano semaforico.

Il vantaggio dell'utilizzo di dispositivi ITS nella priorità è chiaro: gli ITS permettono di individuare i mezzi e di comunicare la loro presenza alla centralina, quindi sono in grado di implementare le esigenze di una priorità di tipo attivo. Come conseguenza, la priorità ai mezzi pubblici viene assegnata solo se ce n'è bisogno, quindi si minimizza il disturbo agli altri veicoli. Inoltre in questi sistemi l'uso delle corsie preferenziali non è obbligatorio e questo potrebbe permettere di evitare riduzioni di capacità della strada e i relativi problemi connessi.

In base al tipo di identificazione utilizzata, si può fare una distinzione tra due differenti tipologie di tecnologia: priorità basata sull'identificazione dei mezzi

attraverso sensori fisici posti sulla strada e priorità basata su sensori virtuali che utilizzano dati GPS.

1.1.1.1 – Priorità basata sull'identificazione dei mezzi attraverso sensori

Nei sistemi di priorità basata su sensori, l'identificazione del mezzo avviene mediante rilevatori fisici posti sulla strada o sul ciglio della strada.

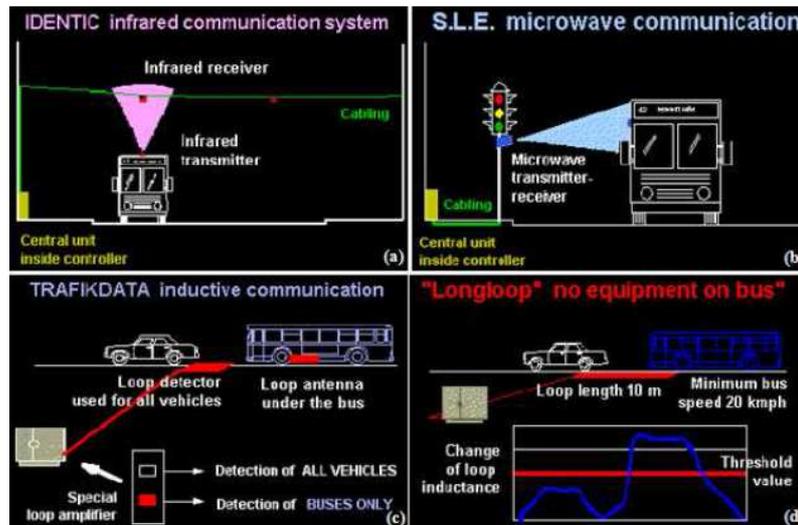


Fig. 1.5 – Sistemi di identificazione del mezzo. (a) rilevatore ad infrarossi; (b) rilevatore a microonde; (c) spire induttive con trasmettitore sul mezzo; (d) spire induttive per veicoli lunghi. [20]

Vengono utilizzati diversi tipi di sistemi per fornire la priorità ai mezzi pubblici:

- Rilevatore a infrarossi: l'identificazione avviene attraverso un trasmettitore di raggi infrarossi posto sul mezzo e un transponder sopra corsia o lato corsia;
- Rilevatore a microonde: l'identificazione avviene tramite la comunicazione con rilevatore radar microonde tra un trasmettitore posto al lato strada e un ricevitore posto sul mezzo; l'equipaggiamento del mezzo non consente una trasmissione continua del segnale quindi si attiva e risponde al segnale presente in prossimità dell'intersezione;
- Spire induttive con trasmettitore sul mezzo: l'identificazione avviene tramite una spira induttiva posta sulla superficie della pavimentazione stradale che identifica tutti i veicoli e un'antenna posta sotto il mezzo che permette di distinguere il mezzo pubblico dagli altri veicoli;

- Spire induttive per veicoli lunghi: l’identificazione non richiede alcun equipaggiamento del mezzo, la spira posta sulla superficie della strada identifica la presenza di un veicolo lungo quando l’induzione magnetica eccede un certo valore predefinito.

I sistemi di priorità basati su sensori, comunque, presentano alcuni inconvenienti. Prima di tutto un sensore fisso implica alti costi di installazione (soprattutto se il sistema viene adottato per più intersezioni) e di manutenzione e poca flessibilità nel riutilizzo. Inoltre, spesso non è possibile posizionare i rilevatori nella posizione più congeniale a causa di problemi di tipo tecnico, strutturale o amministrativo. Infine, gli ostacoli fisici sulla strada possono disturbare il rilevamento del mezzo.

1.1.1.2 – Priorità basata su GPS

Il mezzo pubblico è equipaggiato con un ricevitore GPS, che consente di conoscere costantemente la posizione del mezzo stesso. Quando la posizione dell’autobus o del tram, valutata dal GPS,

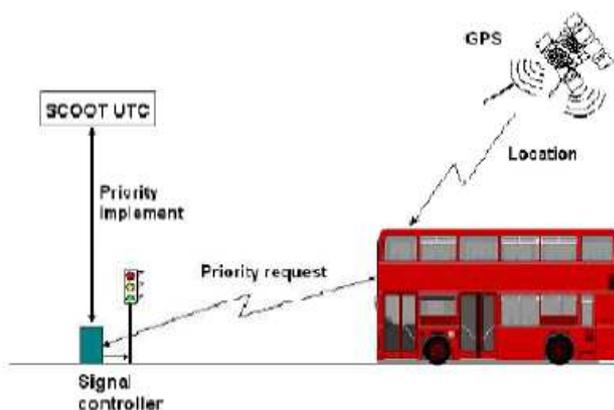


Fig. 1.6 – Schema di un sistema di priorità basato su GPS [20]

corrisponde alla posizione predeterminata di un punto di

rilevamento (rilevamento virtuale) posto ad una certa distanza dall’impianto semaforico, viene inviata una richiesta di priorità alla centralina, solitamente tramite segnale radio, e viene elaborata la procedura di priorità. Il funzionamento, pertanto, è lo stesso del precedente metodo basato su sensori, con la differenza che, in questo caso, si riesce a monitorare continuamente gli spostamenti del mezzo all’interno della rete.

La sostituzione del rilevatore fisico con un ricevitore GPS permette di ridurre i costi di realizzazione e di manutenzione, inoltre il sistema diventa estremamente flessibile. I costi da sostenere per espandere il sistema risultano contenuti, pertanto il sistema si può facilmente adattare ai cambiamenti della rete o alle esigenze del sistema di priorità.

Inoltre se un mezzo pubblico viene equipaggiato con un sistema GPS per la gestione delle priorità ed è per questo continuamente monitorata la sua posizione, la stessa dotazione può risultare utile e facilmente spendibile per servizi aggiuntivi di informazione aumentando di fatto la qualità del servizio offerto.

Infine un'altra interessante opportunità della priorità basata su GPS è la possibilità di differenziare i livelli di preferenziamento, cioè fornire ai mezzi pubblici differenti livelli di priorità basati su criteri predefiniti. Come già detto, tale strategia di controllo è utilizzata specialmente per distinguere i mezzi in orario da quelli in ritardo sulla tabella di marcia assegnando la priorità solo a quest'ultimi, con il significativo vantaggio di non degradare eccessivamente la qualità del deflusso delle altre correnti veicolari.

Un sistema di priorità basato su GPS è molto complesso e solitamente c'è bisogno del supporto di altri strumenti come il correttore differenziale o l'odometro e dei dati di apertura dei semafori precedenti, in modo da compensare errori di localizzazione dovuti ad imprecisioni di posizionamento o alla scarsa copertura dei satelliti.

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa con i vantaggi e gli svantaggi delle possibili soluzioni tecnologiche per la gestione delle priorità descritte finora:

Sistemi di Priorità Passiva		Sistemi di Priorità Attiva			
		Basati su sensori		Basati su GPS	
Vantaggi	Svantaggi	Vantaggi	Svantaggi	Vantaggi	Svantaggi
Semplice da implementare	Necessita di spazio	Minimizza il disturbo al traffico privato	Costi elevati	Bassi costi	Sistema complicato da implementare
	Problemi di applicazione	Non necessita di spazio	Nessuna flessibilità nella variazione della rete	Alta flessibilità nella variazione della rete	Problemi di localizzazione inesatta
	Disturbo al traffico privato	Nessun problema di applicazione	La presenza di ostacoli può interferire con la localizzazione dei mezzi	Integrazione con informazioni in tempo reale	Scarsa copertura dei satelliti in alcune aree
				Priorità differenziale	

Tab. 1.1 – Tabella riepilogativa di vantaggi e svantaggi relativi ai diversi sistemi di priorità

1.1.1.3 – Alcuni sistemi di controllo semaforico per la gestione delle priorità in tempo reale utilizzati

Esistono in commercio un gran numero di sistemi di controllo semaforico in grado di gestire le priorità in tempo reale di tipo attivo. Questi sistemi utilizzano la localizzazione del traffico veicolare su sezioni a monte o a valle dell’intersezione per valutare le condizioni del traffico e variare i parametri del semaforo in tempo reale. Utilizzando le informazioni disponibili, i parametri possono essere ottimizzati in vista di un’applicazione su un unico ciclo, su frazioni di ciclo oppure su un orizzonte temporale più esteso.

Vediamo alcuni esempi di metodi di preferenziamento semaforico “on line” implementati ed attualmente utilizzati in alcune città.

Il sistema SCATS (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) è più di un metodo per realizzare il coordinamento. È uno strumento sofisticato che permette agli ingegneri del traffico di implementare complicate strategie di gestione; si occupa della gestione e controllo di grandi aree urbane di traffico, controlla e determina i tempi di ciclo e la divisione dei tempi di verde, altera i cicli in base alle esigenze del sistema, valuta gli offset tra intersezioni coordinate e gestisce gli attraversamenti pedonali. Con l’inserimento di sensori che permettono l’identificazione dei veicoli, può adattare questi valori in modo da ottimizzare il deflusso del traffico. Inoltre, molto più semplicemente, può gestire i semafori a tempi fissi variando i piani lungo l’arco della giornata o nei giorni della settimana e può coordinare i semafori per una rete intera o per una singola arteria. È in fase di sviluppo una miglioria che tiene conto delle informazioni e della priorità al trasporto pubblico (*Public Transport Information and Priority System - PTIPS*). Si prevede di tracciare i mezzi pubblici attraverso dei ricevitori GPS per poterli monitorare continuamente e, dove possibile, assegnare loro la priorità alle intersezioni. Questo può migliorare il servizio di trasporto pubblico fornendo informazioni in tempo reale ai clienti sia a bordo dei veicoli che alle fermate, riducendo inoltre i tempi di percorrenza; mentre dal punto di vista degli operatori si traduce nella migliore gestione delle corse.

Il sistema SCOOT (*Split Cycle and Offset Optimization Technique*) si basa su criteri di priorità attiva che possono garantire agli autobus (è implementato per questo tipo di mezzo) l’estensione del verde (*extension*) per impedire che quest’ultimi si fermino al rosso, la chiamata della fase (*recall*) nella quale si avvia il verde prima del normale e il salto di fase (*stage skipping*) dove per garantire il verde all’autobus vengono effettivamente saltate una o più fasi (in base alla complessità dell’intersezione) all’interno del ciclo. Il sistema implementa la priorità differenziale che permette di avere diversi livelli di priorità, ad esempio viene assegnata una priorità limitata ai veicoli in ritardo, alta priorità ai veicoli molto in ritardo e nessuna priorità ai veicoli in anticipo o in orario rispetto alle tabelle orarie. Tutte queste tecniche sono controllate da parametri impostati dall’utente per impedire che la priorità agli autobus causi eccessivi ritardi indesiderati per il resto del traffico. SCOOT permette di identificare i mezzi attraverso l’utilizzo di spire per

l'identificazione degli autobus attraverso un transponder a bordo oppure attraverso l'utilizzo di sistemi di localizzazione automatica (GPS). È un sistema utilizzato a Londra e i rilievi fatti mostrano che il ritardo accumulato dagli altri veicoli è compreso tra i 5 e i 10 sec/ciclo senza quindi svantaggi consistenti per il resto del traffico.

Il sistema UTOPIA è un sistema per il controllo adattivo del traffico progettato per ottimizzare i flussi veicolari e dare priorità al trasporto pubblico senza intaccare i tempi di percorrenza per il traffico privato; offre una vasta gamma di strategie volte a venire incontro alle caratteristiche di qualsiasi rete stradale: controllo totalmente adattivo, selezione di piano e strategie di risposta alla domanda di traffico. Nella modalità totalmente adattiva, il sistema monitora e prevede continuamente le condizioni di traffico ed ottimizza la strategia di controllo secondo i criteri di efficienza basati sui flussi veicolari e su criteri ambientali. Tutto questo consente elevate prestazioni anche in condizioni di traffico imprevedibili. Il sistema può assegnare priorità selettiva (autobus o tram che viaggiano in ritardo) o assoluta (mezzi di emergenza) per i veicoli specifici senza penalizzare il resto del traffico. In termini di prestazioni questo sistema permette di ridurre il tempo di viaggio per le autovetture di oltre il 15%, ridurre i tempi di coda del 50% che si rispecchia in una riduzione del 10% delle emissioni inquinanti e infine l'aumento della velocità commerciale per i mezzi pubblici di oltre il 20%. UTOPIA è operativo in decine di aree metropolitane (anche a Torino), offrendo prestazioni senza pari soprattutto in condizioni di congestione e di imprevedibilità, rendendolo uno dei sistemi di controllo del traffico urbano più avanzato in tutto il mondo.

Il modello SSPORT (*Signal Priority Procedure for Optimization in Real-Time*) è stato concepito oltre che per minimizzare il ritardo e il numero di fermate dei veicoli di una rete, anche per provvedere alla priorità dei mezzi pubblici e degli altri veicoli che ne hanno diritto rendendo il funzionamento della rete il più efficiente possibile. Questo modello tiene conto dei flussi di traffico in base alla capacità dell'intersezione e integra la priorità semaforica nel processo di ottimizzazione. Il processo di ottimizzazione si basa su una serie di regole definite dagli sviluppatori in

base ai differenti gradi di priorità dei veicoli che si avvicinano all’intersezione definendo queste azioni (diverse in base al tipo di mezzo) come eventi. Gli eventi che si verificano vengono valutati con una simulazione microscopica che permette l’effettiva valutazione dell’incidenza dei veicoli con diritto di priorità all’interno del flusso di traffico. La distinzione tra veicoli privati (auto e mezzi pesanti) e veicoli pubblici (autobus e tram) permette al sistema di realizzare il processo di ottimizzazione tenendo conto in modo appropriato dei differenti pesi associati ai diversi veicoli; per i pubblici, se necessario, è possibile tener conto degli effetti delle manovre di carico/scarico dei passeggeri alle fermate lungo il tracciato. Successivamente, utilizzando un sofisticato processo decisionale, vengono generati i piani con le relative fasi per le varie correnti affrontando gli eventi al meglio.

Infine, il sistema Centralized TSP (*Transit Signal Priority*) che implementa il controllo semaforico adattivo a Los Angeles: si basa sulla comunicazione tra i veicoli e le centraline semaforiche poste in prossimità dell’intersezione. Il trasponder posto sul mezzo invia continuamente il segnale contenente il proprio codice identificativo e una volta intercettato dalla centralina, quest’ultima implementa un’azione di priorità in base all’istante della fase semaforica che si deve interrompere e in base al codice ricevuto. Essa può anticipare (*Early Green*) o estendere il verde (*Green Extend*), mantenere il verde (*Free Hold*) finché il veicolo non attraversa l’intersezione (non applicabile in presenza di coordinamenti) oppure chiamarsi la fase (*Phase Call*). Se il mezzo pubblico è in anticipo o in orario non viene attribuita alcuna priorità al mezzo.

Altri metodi meno utilizzati sono OPAC, PRODYN, CRONOS e RHODES. Infine, nuove tecnologie di approccio sono state proposte con lo sviluppo di modelli basati su logiche fuzzy.

Un limite che presentano i metodi sopraccitati è quello di valutare la priorità dei mezzi pubblici in un’unica direzione, senza considerare la possibile presenza di altre linee con diritto di priorità nelle direzioni di conflitto. Esistono in letteratura studi che hanno affrontato questa problematica andando a predeterminare i rami con maggior priorità o semplicemente limitando l’analisi a reti con un’unica direzione

principale alla quale destinare la priorità. Un ulteriore limite, che rispecchia un problema reale di questi sistemi, è la mancanza di valutazione del tasso di occupazione dei veicoli: l'ottimizzazione si basa solamente sul singolo veicolo senza valutare il numero di occupanti all'interno delle auto o dei mezzi di trasporto pubblico. Infine, è doverosa un'ultima considerazione per criticare tutti quei sistemi di preferenziamento attivi che vengono applicati senza valutare, attraverso un processo di ottimizzazione, lo stato del traffico presente, gravando talvolta in modo non accettabile sulle condizioni del traffico privato.

1.2 – Algoritmi di ottimizzazione

Il problema di ottimizzazione viene schematizzato dal punto di vista analitico come la necessità di individuare la migliore soluzione in base ad un determinato criterio definito mediante una funzione obiettivo. Le tecniche di ottimizzazione si sviluppano dal calcolo variazionale come tecniche per trovare l'estremo di una funzione, sia esso un punto di minimo o di massimo.

Il concetto di ottimizzazione è stato utilizzato in diversi campi nelle scienze applicate sia dal punto di vista tecnico che dal punto di vista economico-manageriale.

Nel campo dei trasporti, e più nello specifico nella gestione delle priorità semaforiche, il concetto di ottimizzazione è adottabile sia nei sistemi di priorità attiva (implementando direttamente l'algoritmo all'interno della centralina semaforica) sia nei sistemi di priorità passiva (andando ad utilizzare software commerciali di ottimizzazione dei piani come TRANSYT 14).

Una schematizzazione del processo di ottimizzazione in campo ingegneristico può essere il seguente:

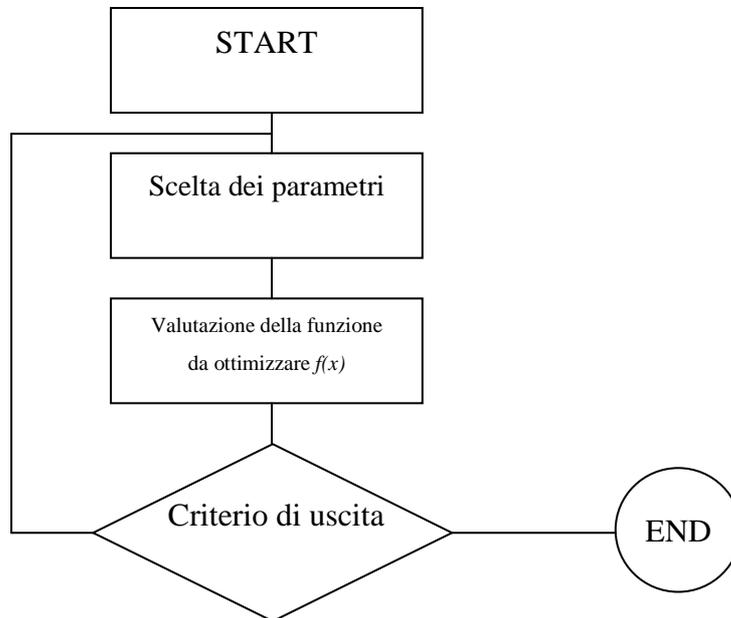


Fig. 1.7 – Flow-chart rappresentativo del processo di ottimizzazione

Pertanto si tratta di un problema di massimo o minimo soggetto a vincolo.

L’area del dominio che soddisfa i vincoli del problema è detta regione di ammissibilità (o di fattibilità) e solo le soluzioni contenute in quest’area possono essere considerate. La funzione può essere valutata in maniera analitica, numerica oppure in modo approssimato ottenendo delle soluzioni non esatte. Essa può essere unimodale oppure multimodale; nel primo caso, la soluzione al problema è unica mentre nel secondo caso esistono diversi punti di massimo e/o minimo (Fig. 1.8).

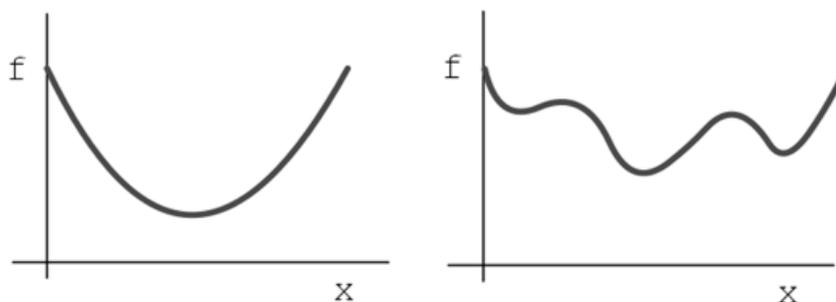


Fig. 1.8 – A sinistra: funzione unimodale, presenta un unico punto di minimo (minimo globale); A destra: funzione multimodale, presenta più punti di minimo locale (solo uno è un minimo globale)

La multimodalità della funzione da ottimizzare comporta la presenza di diversi punti di estremo, ottimi locali, che minimizzano/massimizzano la funzione all'interno di una regione limitata. Si definisce invece ottimo globale il punto che minimizza/massimizza la funzione all'interno di tutto il dominio di variazione dei parametri.

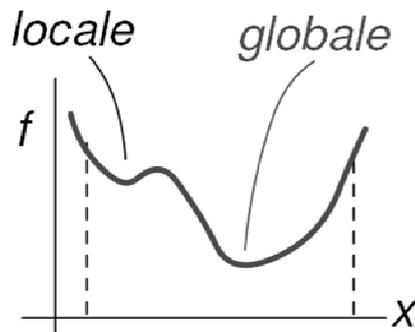
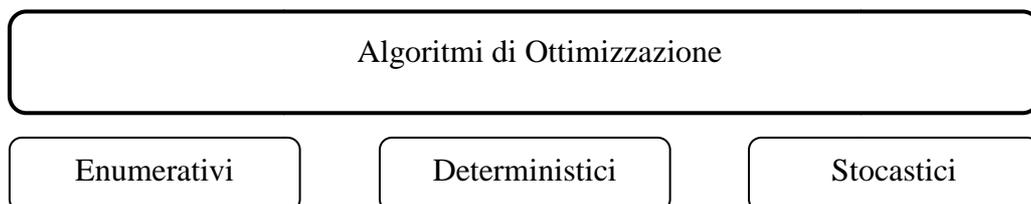


Fig. 1.9 – Distinzione tra punto di minimo locale e punto di minimo globale

Se la funzione obiettivo è definita in maniera analitica, è possibile stabilire alcune sue proprietà e di conseguenza quali sono gli algoritmi che meglio affrontano la sua ottimizzazione. Nel caso ingegneristico invece molto spesso si ha a che fare con una funzione obiettivo campionata attraverso delle tecniche numeriche e quindi non è possibile definire a priori alcuna ipotesi sul suo comportamento.

La scelta dell'algoritmo di ottimizzazione va perciò effettuata realizzando un compromesso tra velocità di convergenza e affidabilità della soluzione.

Gli algoritmi di ottimizzazione possono essere suddivisi in algoritmi enumerativi, deterministici e stocastici.



Gli algoritmi di tipo enumerativo ricercano la soluzione ottima in tutti i punti del dominio, eventualmente discretizzato, della funzione. Le uniche semplificazioni possono derivare dalla riduzione del problema in sottoproblemi più semplici.

Il metodo di risoluzione enumerativo per problemi di ottimizzazione si basa su questi passi:

1. generazione di tutte le possibili soluzioni x ;
2. verifica dell'ammissibilità della soluzione $x \in D$;
3. valutazione di $f(x)$;
4. scelta della x ammissibile cui corrisponde la migliore $f(x)$.

Lo schema risulta molto semplice, ma soffre di due evidenti problemi: il primo è che la valutazione delle $f(x)$ potrebbe non essere banale (ad es. potrebbe essere necessaria una simulazione per valutare la “bontà” di una soluzione); il secondo, più generale, è che la cardinalità di X potrebbe essere molto elevata rendendo poco efficiente dal punto di vista del calcolo computazionale questo tipo di soluzione.

Gli algoritmi di tipo deterministico determinano l'estremo locale della funzione facendo uso delle condizioni di ottimalità (es. azzeramento del gradiente, matrice hessiana definita positiva (punto di minimo) ecc.). La qualità del risultato ottenuto dipende dal punto di partenza della ricerca, mentre la velocità dipende dalla modalità di calcolo del gradiente (analitico o numerico). Metodi di ottimizzazione deterministici hanno i valori della funzione obiettivo che sono reali (per ipotesi) pertanto i risultati che si ottengono dal processo risultano esatti. Gli algoritmi deterministici hanno una veloce convergenza all'ottimo locale più vicino.

Gli algoritmi di tipo stocastico, invece, hanno alcune caratteristiche basilari comuni:

- prendono ispirazione da regole che governano alcuni fenomeni naturali;
- sono indipendenti dal problema specifico trattato.

Questa tipologia di algoritmi permette di trovare i punti di estremità globale di una funzione attraverso diverse strategie fondamentali come la presenza di un *random factor* che rende la ricerca dell'ottimo diversa in ogni esecuzione, l'accettazione di

un deterioramento locale della funzione e l’accumulo di piccole variazioni migliorative.

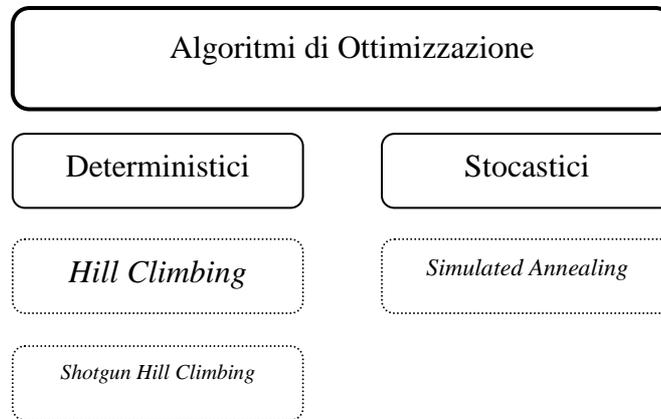
Come conseguenza di quanto detto si può affermare che tali algoritmi convergono lentamente alla regione ottima con risultati molto buoni, però la valutazione delle loro prestazioni va effettuata in modo statistico poiché incorporano al loro interno elementi di tipo probabilistico.

È possibile inoltre realizzare delle tecniche di ottimizzazione ibride nelle quali si può sostituire un ciclo interno con un ottimizzatore di tipo deterministico.

Esistono moltissimi algoritmi di ottimizzazione che sono stati definiti per lo studio di problemi relativi all’ingegneria dei trasporti; di fondamentale importanza è la famiglia degli algoritmi evolutivi, nei quali il più importante è l’algoritmo genetico – GA che usa tecniche ispirate all’evoluzione biologica come l’ereditarietà dai genitori, mutazione, selezione e incrocio. Da questo algoritmo sono state realizzate delle variazioni dando luogo ad algoritmi genetici “migliorati” come l’algoritmo genetico parallelo, l’algoritmo genetico ibrido ecc. Altri algoritmi utilizzati in questo campo sono il *Simulated Annealing – SA*, *Hill Climbing – HC* e sue migliorie (*Shotgun Hill Climbing*), *Ant Colony Algorithm – ACA*, *Particle Swarm Optimization – PSO*, *Artificial Bee Colony Algorithm – ABC*, *Sequential Minimal Optimization Algorithm – SMO* e *Increment Optimization Method*. Quest’ultimo è il metodo di ottimizzazione implementato nella realizzazione del sistema di gestione SCOOT descritto in precedenza.

Sono stati inoltre sviluppati modelli di ottimizzazione applicando le logiche fuzzy; sono presenti in letteratura degli studi (anche di recente pubblicazione) che permettono la gestione ottima di un’intersezione isolata in tempo reale [25].

Ci soffermiamo a studiare e approfondire gli algoritmi sviluppati e utilizzati nel software utilizzato nel seguente lavoro di tesi: TRANSYT 14.



1.2.1 – Algoritmi Deterministici

1.2.1.1 – Hill Climbing

Il metodo Hill Climbing è una tecnica di ricerca di un punto di ottimo e si basa su un ciclo di ricerca di nodi con valori sempre più alti (migliori) nei pressi di un nodo di riferimento.

La denominazione inglese che gli viene data indica la capacità dell’algoritmo di “scalare” i nodi fino a raggiungere quelli di valore maggiore. Lo spazio di ricerca di questo algoritmo è limitato ai soli valori adiacenti, pertanto quando un nodo vicino è migliore del nodo di riferimento, quest’ultimo viene sostituito con il nuovo nodo. Il ciclo ha termine quando viene raggiunto il nodo con valore più alto, ossia quando nessun nodo vicino ha un valore superiore a quello di riferimento.

Nel caso della ricerca locale scegliamo un nodo di riferimento iniziale, in base a una funzione euristica oppure in modo casuale e si procede con l’elaborazione della ricerca.

Questo algoritmo ha come pregio quello di essere molto semplice da utilizzare, inoltre utilizza poca quantità di memoria (complessità spaziale) e non dovendo analizzare tutti i nodi e cammini possibili è caratterizzato da minori tempi di elaborazione (complessità temporale). È quindi un algoritmo molto rapido e veloce. Questo però comporta che nel processo di ricerca, nel caso di funzioni obiettivo multimodali, si incappi in un punto di massimo locale. Quando l’algoritmo si trova di

fronte ad un massimo locale, valore superiore a tutti i valori adiacenti, si blocca il processo di ricerca pregiudicando la possibilità di trovare un punto di massimo globale. Pertanto, in questo modo, il processo di ricerca dipende dal valore di partenza.

Si riporta un esempio banale al fine di schematizzare il funzionamento dell’algoritmo appena descritto.

Data la matrice di figura 1.10, si vuole ricercare al suo interno il numero più alto partendo (in questo caso) da un punto iniziale scelto casualmente.

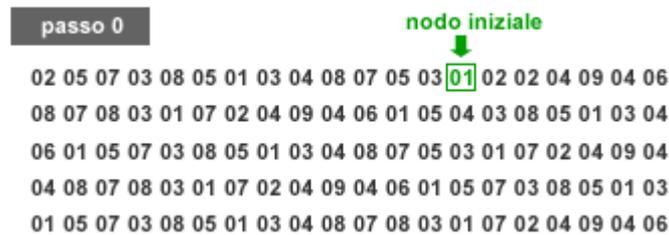


Fig. 1.10 – Matrice di dominio dove avviene la ricerca

L’algoritmo analizza tutti i nodi adiacenti e valuta se sono presenti valori che migliorano il risultato della ricerca (Fig. 1.11).



Fig. 1.11 – Viene avviato il processo di ottimizzazione Hill Climbing, la ricerca studia tutti i valori adiacenti al valore iniziale e seleziona il migliore per poter proseguire il processo

Il processo prosegue, Fig. 1.12, raggiunge fino al raggiungimento del valore più alto a partire dal punto iniziale, che in questo caso risulta essere un punto di massimo locale, ottenendo così una soluzione non completamente soddisfacente.

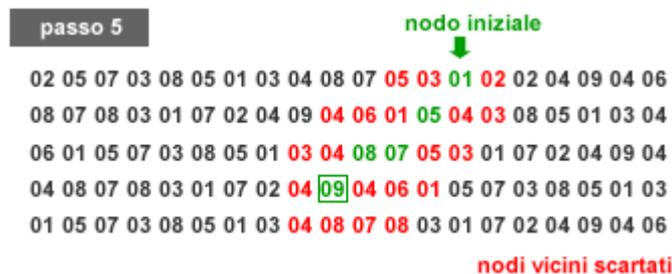


Fig. 1.12 – Termine delle iterazioni, il risultato ottenuto è il migliore che si possa trovare a partire dal valore iniziale definito

Per limitare questo tipo di problema è possibile valutare una buona funzione euristica per la determinazione del nodo iniziale, o in alternativa è possibile eseguire più volte l'algoritmo utilizzando nodi iniziali differenti. Questo metodo innovativo è detto Shotgun Hill Climbing.

1.2.1.2 – Shotgun Hill Climbing (o hill climbing iterativo)

Questa diretta evoluzione dell'algoritmo precedente esegue diversi tentativi di ricerca di un massimo locale prima di restituire in output il risultato dell'elaborazione. Ad ogni iterazione l'algoritmo esplora lo spazio di ammissibilità a partire da un nodo iniziale differente. La selezione del nodo iniziale non viene eseguita in modo *random* altrimenti la probabilità di arrivare ad una soluzione di ottimo globale non aumenta di molto, ma utilizzando funzioni euristiche o funzioni stocastiche.

A partire dal nodo iniziale l'algoritmo elabora il percorso verso il nodo vicino con valore più alto fino ad individuare il nodo con valore maggiore. La soluzione finale dell'iterazione viene confrontata con la precedente e, se risulta essere migliore, viene sostituita a quest'ultima. Infine l'algoritmo si riavvia per iniziare una nuova iterazione a partire da un nodo iniziale diverso dal precedente.

L'algoritmo Shotgun Hill Climbing effettua un numero predeterminato di iterazioni dopo le quali restituisce in output la migliore soluzione trovata.

Si riporta lo stesso esempio del caso precedente per vedere come si comporta questo algoritmo e in che modo può migliorare le soluzioni. Ipotizziamo che il numero massimo di iterazioni dopo le quali restituire un risultato sia tre.

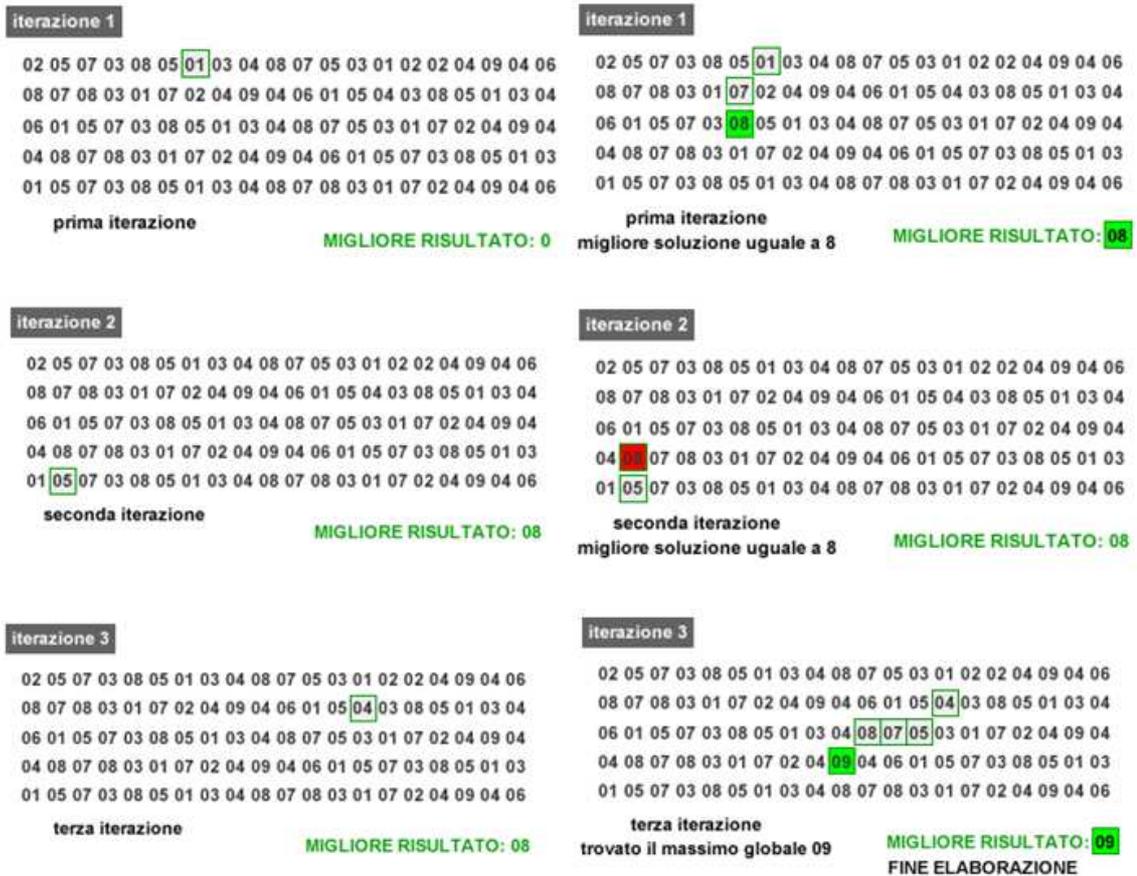


Fig. 1.13 – Esempio del processo di ottimizzazione Shotgun Hill Climbing

I risultati ottenuti nelle prime due iterazioni rappresentano dei massimi locali, poiché la terza risulta essere una soluzione migliore.

Elaborando più volte l'algoritmo Hill Climbing è quindi possibile migliorare l'efficacia della ricerca senza penalizzare eccessivamente la velocità e il tempo di elaborazione. È sempre opportuno valutare qual è l'aggravio di costo computazionale in relazione alla miglior soluzione trovata da questo metodo.

1.2.2 – Algoritmi Stocastici

1.2.2.1 – Simulated Annealing (SA)

È una metodologia di ricerca altamente adatta per qualunque problema di ottimizzazione, fonda le sue basi nella statistica meccanica e negli anni '80 si è giunti alla sua applicazione nei problemi di ottimizzazione. L'anncaling è il processo con il quale un solido, portato allo stato fluido, mediante riscaldamento ad alte temperature, viene riportato poi di nuovo allo stato solido o cristallino, a temperature basse, controllando e riducendo gradualmente la temperatura ottenendo una struttura interna

più ordinata con migliori prestazioni del materiale. Ad alte temperature, gli atomi nel sistema si trovano in uno stato altamente disordinato e quindi l’energia del sistema è elevata. Per portare tali atomi in una configurazione cristallina altamente ordinata (statisticamente), deve essere abbassata la temperatura del sistema. Riduzioni veloci della temperatura possono causare difettosità nel reticolo cristallino con conseguente metastabilità, con fessurazioni e fratture del reticolo stesso (stress termico). L’annealing evita questo fenomeno procedendo ad un graduale raffreddamento del sistema, portandolo ad una struttura globalmente ottima e stabile. Si noti che ad alte temperature tutti gli stati di energia sono possibili (soluzioni di ogni genere), mentre a basse temperature il sistema si trova sicuramente in stati di minima energia con le soluzioni più prossime a quella esatta.

La temperatura non ha alcun diretto riscontro nel processo di ottimizzazione, serve meramente come *parametro di controllo* che definisce implicitamente la regione ammissibile esplorata dall’algoritmo in un particolare stadio del processo. Ad alte temperature, l’algoritmo SA può attraversare quasi tutto il dominio poiché vengono facilmente accettate pessime soluzioni. Successivamente, abbassandosi il valore del parametro di controllo, l’algoritmo viene confinato in regioni sempre più ristrette dello spazio di ammissibilità con sempre più piccole e basse probabilità di accettazione.

Ad alte temperature l’algoritmo si comporta più o meno come una *random search*. La ricerca salta da un punto all’altro dello spazio delle soluzioni individuandone le caratteristiche e quindi le direzioni o le aree in cui è più probabile individuare l’ottimo globale. A basse temperature il SA è simile ai *metodi steepest descent* o metodo del gradiente. Le soluzioni vengono localizzate nella zona del dominio maggiormente promettente. Da quanto detto si intuisce che vi è un certo numero di parametri che l’analista deve calibrare per implementare il metodo, consentendo ampia libertà di scelta e quindi elevata applicabilità. Tuttavia c’è un prezzo da pagare: la taratura di un numero elevato di parametri richiede uno sforzo iniziale non trascurabile affinché il metodo possa convergere. Un vantaggio fondamentale del SA è che l’analista lo può applicare a problemi di ottimizzazione per i quali non ha una conoscenza profonda.

Il processo logico dell’algoritmo SA per un problema di ottimizzazione può essere riassunto nei seguenti passi:

- I. Sia data una configurazione iniziale o soluzione x_0 con valore della funzione obiettivo E_0 e un valore iniziale T_0 per la temperatura.
- II. Per ogni stadio della temperatura effettuare i seguenti passi:
 - A. Generare una configurazione candidato *ammissibile* tramite una piccola perturbazione casuale della configurazione corrente. Valutare la differenza della funzione obiettivo fra le due configurazioni ΔE .
 - B. Se $\Delta E \leq 0$, la configurazione candidato ha un valore della funzione obiettivo inferiore rispetto a quello della configurazione corrente. Accettare la nuova soluzione e sostituirla.
Se $\Delta E > 0$, la configurazione candidato ha un valore della funzione obiettivo superiore rispetto quello della configurazione corrente. Scartare tale soluzione e mantenere la soluzione corrente.
 - C. Se non è raggiunto l’equilibrio termico, tornare allo Step II-A, altrimenti passare allo Step III.
- III. Se il processo di annealing è incompleto, ridurre la temperatura e ritornare allo Step II.

Dato che la riduzione della temperatura governa il successo dell’algoritmo nella sua ricerca delle soluzioni ottime globali, è importante selezionare un appropriato schema di riduzione degli stadi di temperatura determinando quando e quanto ridurre.

- *Quando*: è necessario tarare un parametro detto *transizione*. Il numero di transizioni ad ogni stadio di temperatura deve essere tale da assicurare che si passi da uno stadio termico al successivo solo quando si è raggiunto l’equilibrio; si fa questo per evitare di generare un’elevata quantità di soluzioni per ogni stadio di temperatura che porta ad un aumento del tempo di calcolo.
- *Quanto*: la riduzione della temperatura è l’altra importante componente dello schema di raffreddamento. Ridurre la temperatura troppo velocemente causa la possibilità da parte dell’algoritmo di rimanere confinato in un minimo

locale. D’altro canto, ridurre la temperatura molto lentamente comporterà un aumento degli stadi di temperatura con un conseguente innalzamento del tempo di calcolo. Basandosi su queste considerazioni gli analisti determinano un appropriato schema di raffreddamento in base al problema specifico.

Un altro fattore critico per il successo del processo SA è la determinazione di un appropriato criterio di interruzione. Il processo di annealing converge ad un ottimo globale se la temperatura è ridotta in modo sufficientemente graduale. Al fine di evitare un eccessivo tempo di calcolo, ciò che viene usualmente fatto è di interrompere il processo quando il numero di soluzioni accettate ad un certo stadio è inferiore ad un valore fissato. In tal caso ci si può aspettare una soluzione prossima all’ottimo globale. Eventualmente, per affinare o verificare la bontà della soluzione ottenuta, è possibile utilizzare dei metodi di ricerca locale.

Quando non si voglia adottare un criterio di interruzione, è possibile utilizzare un valore finale della temperatura. Tale valore corrisponde, dal punto di vista fisico dell’annealing, al valore della temperatura ambiente quando il bagno di fusione si è solidificato in una struttura cristallina stabile e di minima energia. Tecnicamente tale valore finale della temperatura viene stabilito in base al problema che si sta affrontando.

Anche la generazione delle soluzioni rappresenta un punto cardine per la velocità di calcolo dell’algoritmo. È necessario che la procedura di generazione, detta anche *perturbazione*, sia il più veloce possibile. Il numero elevato di transizioni per ogni stadio di temperatura, se associato ad un elevato tempo di generazione di soluzioni candidato, porterebbe sicuramente ad un aumento esponenziale del tempo di calcolo. Ecco perché solitamente con questo metodo vengono utilizzate tecniche di perturbazione locale; tali tecniche consentono la generazione di soluzioni in tempi rapidissimi, anche se il loro valore non è molto “distante” da quello della soluzione corrente. Ridurre tale tempo implica una maggiore velocità di riduzione della temperatura e un numero inferiore di transizioni, con la possibilità, però, di interrompere il processo di annealing prima che sia arrivato a convergenza. In tal caso, dato il fluttuare del valore della soluzione, è una buona prassi, per ottenere una

maggior bontà della soluzione finale, conservare la migliore configurazione individuata man mano che l'algoritmo lavora. Questo assicura che la soluzione migliore possa essere recuperata, anche se il processo termina con una soluzione di valore peggiore.

Per tale algoritmo è stata dimostrata la convergenza ad una soluzione di ottimo globale, ma si ricorda che questa viene pagata con un elevato tempo di calcolo.

Capitolo 2 – Metodologia

Lo sviluppo scientifico e tecnologico ha permesso all'uomo un costante miglioramento delle proprie condizioni di vita. Nell'ambito del Trasporto Pubblico Urbano, la continua ricerca, si è tradotta nella realizzazione di veicoli poco inquinanti e quindi sistemi di trasporto innovativi. Un particolare effetto del fenomeno è stata la riscoperta, su scala mondiale, della tranvia come sistema particolarmente adatto alle necessità di una mobilità urbana compatibile con vincoli energetici ed ambientali sempre più stringenti. Il ritorno o la comparsa del tram nelle città è segnato da nuovi concetti di progettazione e realizzazione dei veicoli e delle infrastrutture.

2.1 – Il tram di Mestre

Fin dall'inizio del secolo scorso diverse direttrici afferenti al Centro di Mestre erano servite dal tram. Inizialmente il sistema era a trazione animale, poi sostituito con quella a vapore, con un grosso aumento della capacità di trasporto, fino ad arrivare alla trazione elettrica. Questo mezzo di trasporto permetteva i collegamenti



Fig. 2.14 – Vista della fermata del tram di piazza Umberto I (ora piazza Ferretto) a Mestre a inizio secolo scorso

con una scarsa capillarità a causa dell'elevata rigidità nella scelta dei percorsi, motivo per il quale fu sostituito nel 1933 dal filobus, mezzo più confortevole e funzionale. Successivamente anche quest'ultimo è stato dismesso e sostituito con autobus di tipo tradizionale per ovviare ai problemi dovuti alla linea elettrica aerea.

Nella prima metà degli anni '90, a causa dei continui problemi di inquinamento atmosferico, e successivamente con l'adesione dell'Italia al protocollo di Kyoto, il Comune di Venezia ha iniziato a valutare l'ipotesi di reinserire all'interno del proprio territorio una linea di trasporto più sostenibile al fine di ridurre l'inquinamento

dell'aria. Per ottenere i massimi benefici ci si è rivolti ad una versione più attuale di tranvia, prevalentemente in sede protetta e con contenuti fortemente innovativi nell'automazione e nel controllo centralizzato del sistema.

Nel 2002, con Decreto Ministeriale n. 1761 del 17/12/2002, il Ministero dei Trasporti e la Commissione di Vigilanza della Corte dei conti approvano il progetto definitivo sia dal punto di vista tecnico che dal punto di vista economico.

Il concetto di tram su gomma è molto recente e nasce dall'idea di adottare un mezzo flessibile e reversibile, che funzioni prevalentemente su sede propria (con evidenti vantaggi in termini di affidabilità di esercizio) ma che, all'occorrenza, possa avere un funzionamento in sede promiscua (con vantaggi in termini d'ingombro della via di corsa) senza causare eccessivi disagi alla circolazione circostante.

La tecnologia di un tram su gomma a guida vincolata, rispetto alla classica, porta diversi benefici:

- Le opere di armamento sono ridotte (scavi meno profondi);
- I costi e i tempi di realizzazione sono inferiori (costi inferiori indicativamente del 30%);
- Pendenze affrontabili più elevate;
- Spazi di frenata sensibilmente inferiori;
- Riduzione di rumorosità e vibrazioni;
- Raggi di curvatura più corti.

La scelta è ricaduta sul modello utilizzato già nel Comune di Padova e dell'Aquila: il Translohr della società francese Lohr. Il modello scelto (STE4) prevede convogli bidirezionali a guida meccanica lunghi 32 metri, formati da quattro moduli ciascuno;

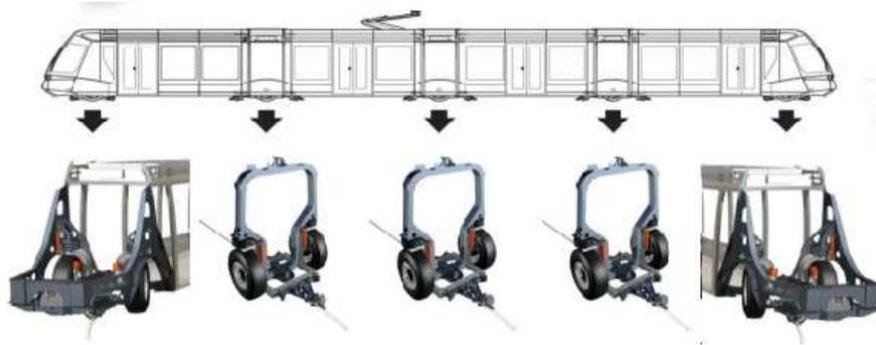
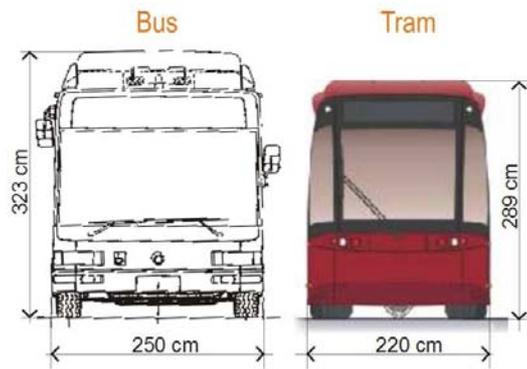


Fig. 2.15 – Dettaglio tecnico del sistema tranviario su gomma Translohr STE4 in uso a Mestre – Venezia [24]

la corsa avviene su ruote di tipo pneumatico che permettono di superare anche pendenze dell'ordine dell'11% garantendo estrema silenziosità e comfort per i passeggeri. La sovrastruttura è formata da una pavimentazione in calcestruzzo armato



con una rotaia di dimensioni ridotte rispetto ai modelli classici al centro,

Fig. 2.16 – Dettaglio comparativo delle dimensioni del tram rispetto ai tradizionali autobus di servizio [24]

che vincola il mezzo e garantisce la traiettoria in ogni momento durante il percorso. Un altro aspetto positivo è l'ingombro laterale che, con una larghezza di 2,20 m, risulta essere inferiore a quello dei più comuni ed utilizzati autobus. Per garantire un servizio che sia il più possibile competitivo, il tram di Mestre è stato progettato col fine di avere, per quanto possibile, la priorità su tutti gli altri mezzi presenti nella rete urbana.

Per una miglior sinergia, sono stati applicati sistemi di priorità sia sui rami sia sulle intersezioni: dove possibile, sono state inserite corsie ad uso esclusivo del tram, mentre nelle intersezioni regolate è stato implementato un sistema di priorità semaforica.

L'inserimento delle corsie riservate, oltre ad essere un vincolo previsto dalla legge n. 211/1992 “*Interventi nel settore dei sistemi di trasporto rapido di massa*” che prevedeva la concessione dei finanziamenti per l'installazione di sistemi di trasporto rapido di massa a guida vincolata in sede propria o di tramvie, è fondamentale per la riduzione dei tempi di percorrenza dei mezzi evitando l'interferenza tra tali veicoli e il resto del traffico presente.

Per quanto riguarda la priorità semaforica, è bene analizzare nello specifico la tecnologia utilizzata lungo il tracciato tranviario.

2.1.1 – Gestione della priorità tranviaria

Il sistema di priorità semaforica in uso lungo il tracciato del tram di Mestre, utilizza un link di comunicazione wireless in tecnologia *Wi-Fi* per attuare il collegamento tra veicolo e regolatore semaforico. In corrispondenza dei regolatori semaforici che

gestiscono gli incroci facenti parte dell’impianto, è prevista la presenza di un apparato di terra (rack/modulo installato all’interno del quadro elettrico del regolatore semaforico) in grado di stabilire un collegamento radio con il corrispondente apparato di bordo collocato su ogni veicolo. Attraverso questo collegamento viene inviata al regolatore la richiesta di preferenziamento. Sulla base dei dati ricevuti l’apparato *Wi-Fi* di terra inoltra con un impulso l’informazione di arrivo del tram al regolatore semaforico, il quale acquisita l’informazione attua il preferenziamento.

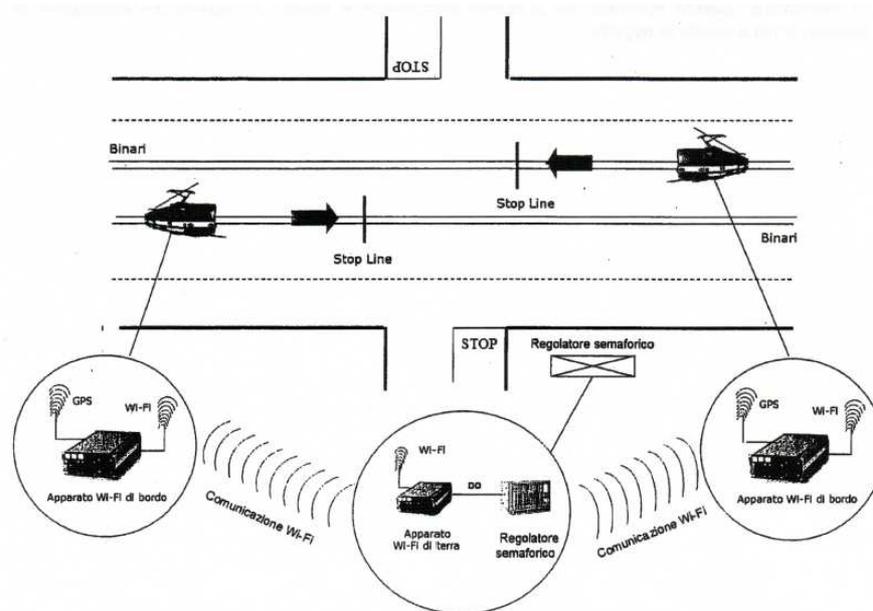


Fig. 2.17 – Architettura del sistema di preferenziamento semaforico in uso a Mestre – Venezia [22]

In condizioni normali il tram, durante il suo avvicinamento all’intersezione, invia in maniera automatica la “*richiesta di PREFERENZIAMENTO*” quando, in base ai dati ricevuti dal suo sistema di auto-localizzazione (basato sull’utilizzo di GPS e di odometro), si trova ad una determinata distanza dall’intersezione; tale distanza è variabile, e in condizioni ottimali è pari a circa 100 metri dalla linea di STOP dell’incrocio. Essa è determinata in base a diversi fattori quali: la nitidezza del segnale *Wi-Fi* che si ottiene collocando l’antenna ricevitrice del segnale in una posizione libera da ostacoli, il profilo di velocità in approccio all’intersezione, i parametri di accelerazione/frenatura del veicolo, i tempi di risposta del regolatore ecc. In condizioni ottimali il regolatore ha il tempo necessario per l’inserimento della fase tranviaria, garantendo altresì il rispetto dei tempi minimi di verde veicolare e dei

tempi di sgombero. Il tram dopo aver ricevuto il segnale di verde si appresta ad attraversare l'incrocio (in condizioni di segnale ottimale e senza vincoli eccessivi nella matrice dei conflitti non è necessario l'arresto o il rallentamento del tram), e dopo aver superato la linea di arresto posizionata prima dell'incrocio, attiva la "chiamata di STOP" al regolatore. A seguito di questa chiamata il regolatore semaforico gestisce la chiusura del segnale di verde tranviario e l'inizio del tempo di giallo. Allo scadere del tempo di giallo viene lanciata la fase di tutto rosso. In uscita dall'intersezione il tram attiva la "chiamata di CLEAR" (ritardata del tempo necessario per lo sgombero dell'area da parte del veicolo tranviario) ed il regolatore semaforico termina la fase di tutto rosso (di durata minima 1 secondo) e riprende il normale funzionamento del ciclo semaforico. Le modalità di rientro al piano standard variano in funzione delle potenzialità del software del regolatore: secondo differenti algoritmi è possibile stabilire anche dei criteri di ri-attivazione delle fasi veicolari in relazione all'istante t in cui sono state interrotte.

Il disegno seguente raffigura le diverse zone dell'intersezione attraversate dal veicolo con la corrispondente sequenza di verde, giallo e rosso che è scandita dall'attivazione delle varie "chiamate" al regolatore.

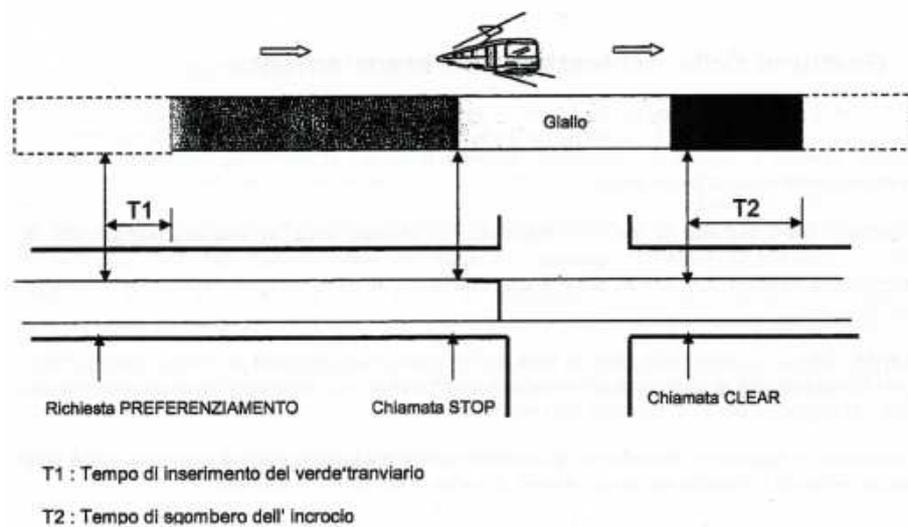


Fig. 2.18 – Descrizione delle zone dell'intersezione con relativo dettaglio dei momenti in cui avvengono le chiamate al regolatore [22]

Il sistema di bordo è in grado di inviare tre distinti segnali di richiesta di priorità semaforica a seconda della situazione del tram rispetto al proprio orario teorico: in anticipo, in orario (entro un certo range) e in ritardo. Questa diversificazione nasce

dall'esigenza di far lavorare il tram all'interno del proprio orario teorico, modificando i tempi di ottenimento del verde tranviario, più lunghi per tram in anticipo e più brevi per tram in ritardo.

È possibile visualizzare nelle tabelle seguenti il funzionamento della preferenziazione in base ai tre distinti segnali citati in precedenza nelle condizioni di apertura e chiusura della fase tranviaria; si precisa che:

- Viene operata una distinzione tra il tracciato in sede riservata e quello in sede promiscua;
- Sul tracciato in sede riservata le lanterne tranviarie saranno normalmente a rosso;
- Con le lettere x , y e z si designano tre valori in secondi da definire incrocio per incrocio essendo $x \leq y \leq z$.

Apertura della fase tranviaria			
Situazione del tram in arrivo all'intersezione	Sede promiscua		Sede riservata
	<i>Fase concorde aperta</i>	<i>Fase concorde chiusa</i>	<i>Fase concorde chiusa</i>
In ritardo	Il tram in arrivo blocca la fase aperta fino al suo passaggio sull'incrocio	Il tram in arrivo chiude la fase in atto garantendo un tempo minimo di x secondi dalla sua apertura	Il tram in arrivo chiude la fase in atto garantendo un tempo minimo di x secondi dalla sua apertura
In orario	Il tram in arrivo blocca la fase aperta fino al suo passaggio sull'incrocio	Il tram in arrivo chiude la fase in atto garantendo un tempo minimo di y secondi dalla sua apertura	Il tram in arrivo chiude la fase in atto garantendo un tempo minimo di y secondi dalla sua apertura
In anticipo	Il segnale del tram in arrivo non ha alcun effetto sulle fasi in corso	Il segnale del tram in arrivo non ha alcun effetto sulle fasi in corso	Il tram in arrivo chiude la fase in atto garantendo un tempo minimo di z secondi dalla sua apertura

Tab. 2.2 – Descrizione del comportamento del tram nella fase di apertura della fase tranviaria [23]

Chiusura della fase tranviaria			
Situazione del tram in arrivo all'intersezione	Sede promiscua		Sede riservata
	<i>Prolungamento della fase concorde</i>	<i>Fase concorde standard</i>	<i>Fase tranviaria in atto</i>
Sempre	Il tram chiude la fase concorde all'atto del suo ingresso; la successiva fase di tutto rosso si chiude su conferma da parte del tram	Il tram ha impegnato l'incrocio prima della chiusura della fase concorde che si chiude secondo il normale ciclo; la successiva fase di tutto rosso si chiude su conferma da parte del tram	Il tram chiude la propria fase all'atto del suo ingresso; la successiva fase di tutto rosso si chiude su conferma da parte del tram

Tab. 2.3 – Descrizione del comportamento del tram nella fase di chiusura della fase tranviaria [23]

2.1.2 – Il tracciato oggetto di studio

Il progetto completo prevede la realizzazione di due linee con uno sviluppo complessivo di circa 20 km:

- Linea 1: il tracciato è lungo circa 14 km con la localizzazione di 23 fermate; i capolinea sono posti a Favaro Veneto (via Monte Celso) e Venezia con punto d'interscambio con la linea 2 in centro a Mestre;
- Linea 2: il tracciato è lungo circa 6 km con la localizzazione di 13 fermate; i capolinea sono posti a Marghera (centro commerciale Panorama) e Mestre centro (zona interscambio).



Fig. 2.19 – Vista aerea dell'intera area del Comune di Venezia interessata dal progetto del tram con dettaglio delle fermate nelle due linee [24]

La parte di tracciato studiata durante il lavoro di tirocinio è contenuta nella linea 2, nello specifico il tratto ancora inattivo di Marghera, parte a sud del nuovo sottopassaggio tranviario della stazione.

Sono state analizzate la viabilità e le intersezioni presenti lungo il percorso specifico, valutando la possibilità di evitare l'inserimento di un numero eccessivo di impianti semaforici, per quanto possibile, non pregiudicando comunque la sicurezza nelle intersezioni.

La tabella seguente riepiloga in questo senso le modifiche apportate:

<i>Progr. Intersezione</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Nr. Bracci</i>	<i>Impianto semaforico previsto da Progetto</i>	<i>Impianto semaforico dopo revisione del Comune</i>
22	Via Rizzardi	3	NO	SI
23	P.le Giovannacci – Via Ulloa	3	NO	SI
24	Via Paolucci – Via Lavelli	3	SI	SI
25	P.le del Municipio	4	SI	SI
26	P.le Concordia – Via Rinascita	2	NO	SI
27	Via Rinascita – Via Beccaria	4	SI	SI
28	Via Rinascita – Via Minotto	4	SI	SI
29	Via Rinascita – Via Correnti	4	SI	SI
30	Via Rinascita – Via del Lavoratore	4	SI	SI
31	Via Rinascita – Via Don Orione	4	NO	SI
32	Via Rinascita – Via Cafasso	3	SI	NO
33	Via Cafasso – Via Bottenigo	3	NO	NO
34	Via Bottenigo – Via Brunacci	4	SI	SI
35	Via Brunacci – Via Monzani	4	SI	NO
36	Via Brunacci – Via Salomonio	3	SI	SI

Tab. 2.4 – Dettaglio del processo di revisione attuato dal Comune per la decisione definitiva delle intersezioni da regolare

Ad oggi risulta non ancora ufficialmente condivisa la necessità di alcuni impianti, specie per l’asse di via Rinascita che è caratterizzato da innesti di viabilità secondaria con livelli di traffico molto bassi. Non è accertata al momento la possibilità di utilizzare sensori di traffico per l’attuazione delle fasi veicolari e quindi l’ottimizzazione dei piani semaforici, pertanto la tabella è da ritenersi indicativa.

2.1.3 – Caso studio: Intersezione n. 27 tra via Rinascita e via Beccaria

L'intersezione studiata si trova circa a metà della linea 2, tra le fermate di Rinascita e Lavoratore. È il crocevia di due strade piuttosto trafficate per gli spostamenti verso le zone commerciali ed industriali poste a sud di Marghera e verso Porto Marghera.

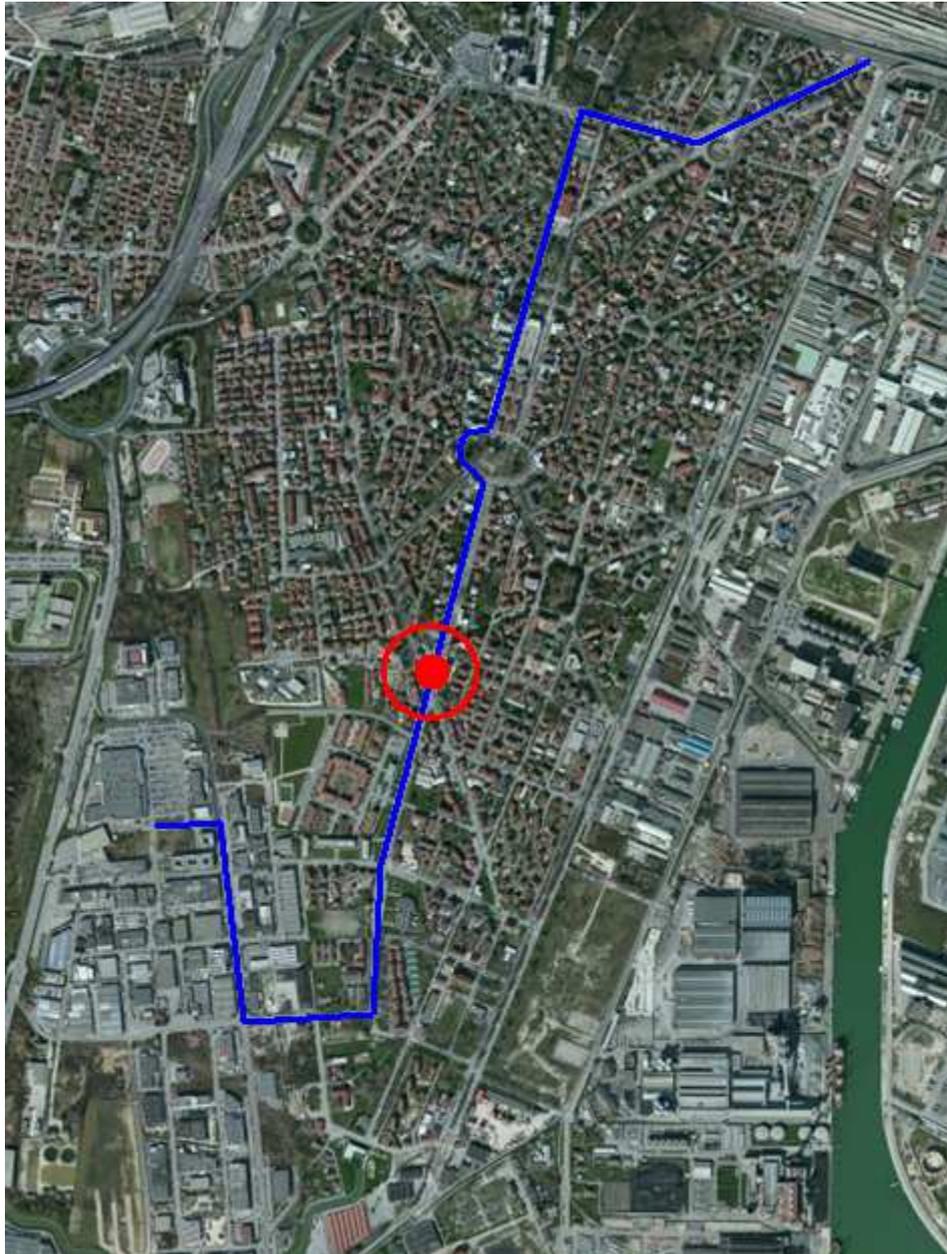


Fig. 2.20 – Vista da satellite dell'ubicazione dell'intersezione oggetto di studio all'interno del tracciato tranviario di Marghera – Venezia

Questa intersezione risulta essere la più complessa nella frazione di Marghera; le due vie che si intersecano formano un angolo acuto tra loro con dei tratti a senso unico

nel mezzo dell'incrocio separati da un'aiuola che consentono, se necessario, l'inversione di marcia ricordando in parte un funzionamento a rotatoria a precedenza invertite.

L'inserimento del tram ha reso necessaria l'introduzione di un impianto semaforico al fine di regolare i diversi flussi che insistono sull'intersezione andando a modificare solamente in modo parziale la viabilità presente in passato.



Fig. 2.21 – Vista aerea dell'intersezione oggetto di studio tra via Rinascita e via Beccaria situata nel tracciato tranviario di Marghera – Venezia

Le strade che interessano l'intersezione sono quattro, due principali e due di seconda importanza:

- Via Beccaria: strada locale che da nord arriva da P.le Parmesan, rotatoria nella quale confluiscono i flussi del miranese e in arrivo dalla strada urbana di scorrimento veloce (tangenziale di Mestre) nonché dall'autostrada A57 (ex A4), e porta verso sud alla zona industriale e commerciale;
- Via Rinascita: strada locale che arriva da nord dal centro di Marghera e porta in direzione sud ad una zona di tipo residenziale di recente costruzione;
- Via Mutilati del Lavoro: strada locale che si innesta all'intersezione arrivando da est, dalla strada regionale 11 (via Fratelli Bandiera);
- Via Nicolodi: strada locale che arriva da ovest e serve una zona residenziale.

Al fine di garantire ad ogni ramo i giusti tempi di verde per un efficiente smaltimento della domanda di traffico, è stata predisposta una campagna di rilievo per la valutazione delle matrici origine-destinazione descritta nel paragrafo successivo.

2.2 – Progetto del piano semaforico

I tecnici del Comune di Venezia nella redazione di un progetto semaforico si basano sullo studio pre-normativo approvato dal C.N.R. il 10 settembre 2001, “*Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali*”. Queste linee guida sono state successivamente adottate dal DM del 19 aprile 2006 – Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali.

Il progetto di un piano semaforico richiede l’effettuazione di una serie di passi fondamentali sintetizzati in figura e sinteticamente descritti di seguito.

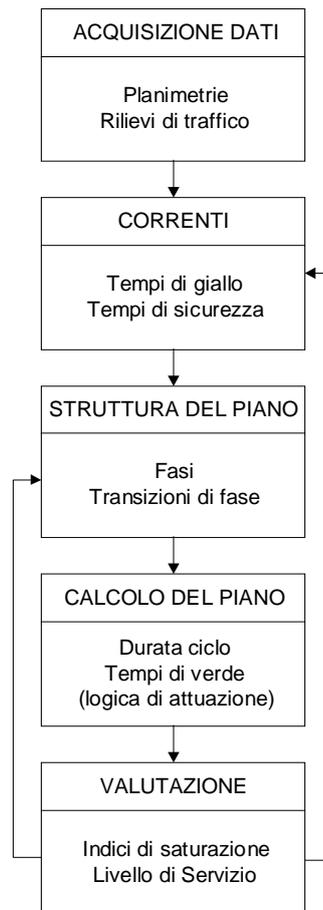


Fig. 2.22 – Schema di funzionamento del progetto di un piano semaforico [8]

Acquisizione dei dati

Il primo passo consiste nell'acquisizione di tutti i dati necessari alla progettazione. In particolare è necessario acquisire i dati geometrici, utilizzando planimetrie in scala opportuna, e quelli relativi ai flussi di traffico, distinti per ciascuna manovra. La raccolta di tali dati, che devono essere completi ed aggiornati, può richiedere l'installazione di strumenti per il monitoraggio del traffico o l'uso di un sistema già esistente.

Analisi delle correnti

I dati geometrici e quelli relativi ai flussi di traffico vengono utilizzati per individuare il numero di corsie di ciascun attestamento e la loro funzione in rapporto alle manovre da effettuare. Si individuano così le correnti nelle quali si considera suddiviso il traffico in arrivo e quindi i segnali semaforici che le controllano. Per ciascuna corrente di traffico si valuta poi il tempo di transizione di giallo tra il verde ed il rosso, sulla base delle caratteristiche di ciascuna corrente (veicolare, pedonale, ecc.).

L'individuazione delle coppie di correnti antagoniste consente infine di valutare per ciascuna di esse il tempo di sicurezza, che deve essere assicurato tra la fine del verde di una corrente e l'inizio del verde di quella antagonista, per evitare rischi di collisione fra i veicoli che devono sgomberare l'area di conflitto alla fine del verde prima del sopraggiungere dei veicoli della corrente antagonista.

Struttura del piano semaforico

Indipendentemente dalla tipologia del controllo, il progetto prosegue quindi, in generale, con lo studio della struttura del piano semaforico cercando di garantire un adeguato livello di sicurezza alle correnti (veicolari, pedonali, ecc.) che attraversano l'intersezione, tenendo conto delle norme del codice della strada e di altre condizioni al contorno.

La struttura del piano si ricava individuando il numero e la composizione delle fasi semaforiche, tenendo conto delle esigenze di capacità dell'intersezione e di tutte le necessità delle singole correnti veicolari, con particolare attenzione per pedoni, ciclisti e mezzi pubblici. Ciascuna fase è definita dall'insieme di correnti compatibili,

cui verrà assegnato il verde simultaneamente in uno o più intervalli del ciclo semaforico. I singoli segnali possono non iniziare o finire simultaneamente per effetto di tempi di sicurezza di diversa durata. Il passaggio da una fase ad un'altra avviene dunque attraverso una transizione di fase, caratterizzata dal tempo fra l'istante in cui commuta al rosso il primo segnale della fase uscente e quello in cui commuta al verde l'ultimo segnale della fase entrante.

Per la definizione delle fasi devono dunque essere individuate:

- le *correnti compatibili*, che non presentano aree di conflitto comuni e quindi possono essere raggruppate in una fase;
- le *correnti antagoniste*, che devono appartenere a fasi separate (ad eccezione del caso di correnti in svolta prive di apposito segnale, che possono essere considerate come correnti compatibili condizionate).

Il numero di fasi dipende dal modo con cui sono raggruppate nelle singole fasi le correnti veicolari, tenuto conto della sicurezza, delle intensità dei flussi e di altri problemi legati ad esempio al coordinamento con impianti adiacenti. La successione delle fasi può essere determinata in modo da massimizzare la capacità dell'intersezione, o in base ad altre considerazioni che saranno riprese nel capitolo seguente.

Calcolo del piano semaforico

Il calcolo della durata del ciclo semaforico e dei tempi di verde da assegnare alle diverse correnti veicolari viene effettuato sulla base dei risultati ottenuti nei passi precedenti, utilizzando in particolare i dati relativi ai flussi e valutando il flusso di saturazione per ciascuna corrente e per tutti gli attestamenti. Il piano semaforico viene normalmente rappresentato sotto forma di *diagramma di temporizzazione*. Nel caso di controllo di tipo attuato dal traffico il piano va calcolato con riferimento alle condizioni di massimo carico dell'intersezione ed in tale caso è necessario inoltre allegare al progetto anche la descrizione del funzionamento della logica di controllo. Nel caso infine di reti di intersezioni il progetto deve contenere anche i *diagrammi di coordinamento* della rete.

Valutazione

L'ultimo passo della progettazione consiste nella valutazione di tutti gli indicatori atti a misurare l'efficienza delle ipotesi progettuali di regolazione per l'intersezione. In particolare deve essere condotta un'analisi delle condizioni di saturazione dell'intersezione ed una valutazione dei ritardi accumulati dai veicoli con conseguente stima del Livello di Servizio. Qualora i risultati della valutazione non fossero soddisfacenti è necessario riconsiderare i vari passi della progettazione, modificando le ipotesi sia per quanto riguarda l'utilizzo delle corsie e l'accorpamento delle manovre in correnti, sia per la composizione delle fasi e le temporizzazioni del ciclo e dei singoli segnali.

Vediamo ora come questi punti appena descritti siano applicati operativamente nella valutazione del piano semaforico per l'intersezione oggetto di studio.

2.2.1 – Acquisizione dei dati

La fase di acquisizione dei dati necessari per la progettazione dei regolatori semaforici è stata realizzata da società terze incaricate dal Comune. Di fondamentale importanza sono il rilievo geometrico (svolto dalla società che si occupa della realizzazione del progetto generale dell'opera) e il rilievo dei flussi di traffico.

Le rappresentazioni grafiche del tracciato in formato cad e le matrici di origine-destinazione erano pertanto già in nostro possesso.

2.2.2 – Analisi delle correnti

Risulta una delle parti più impegnative: la valutazione delle correnti che interessano l'intersezione è stata realizzata con uno studio approfondito della viabilità adiacente onde evitare la possibilità di precludere l'accesso ad alcune zone e, al tempo stesso, rendere sicura l'introduzione dell'impianto semaforico.

I risultati di questa analisi, di seguito riportati, hanno permesso di approfondire uno studio di massima dell'intersezione realizzato precedentemente dal Comune:

- 1) Utilizzo di un'unica lanterna semaforica per veicoli privati e pubblici in via Rinascita nord, vista la presenza di un'unica corsia promiscua;

- 2) Necessità di inserimento di una seconda lanterna semaforica TPL, con relativa linea di arresto, al centro dell'intersezione a causa dei possibili problemi di ostacolo alla trasmissione del segnale nella manovra di "richiesta di preferenziamento" con la possibilità di rischio incidente con una manovra antagonista;
- 3) Variazione della viabilità in via Pesaro, strada a doppio senso e a due corsie, che, vista l'eccessiva vicinanza con l'approccio semaforico di via Rinascita nord, viene convertita a senso unico uscente dall'intersezione;
- 4) Variazione del funzionamento dell'intersezione: vista la particolare conformazione geometrica si è previsto, nella parte nord, un funzionamento che ricorda maggiormente una rotatoria nella situazione di semaforo spento o lampeggiante;
- 5) Esclusione degli attraversamenti pedonali e ciclabili di via Rinascita nord e via Rinascita sud dal piano semaforico spostandoli dall'area dell'intersezione per evitare di appesantire ulteriormente il ciclo.



Fig. 2.23 – Vista aerea dell'intersezione oggetto di studio; i numeri fanno riferimento all'elenco delle note descritto in precedenza

Apportate le modifiche relative alle note appena elencate, si è proceduto con il raggruppamento delle corsie in modo da definire le correnti nelle quali si considera diviso il traffico in arrivo e quindi i segnali semaforici che le controllano.

Il tempo di giallo veicolare, che secondo la normativa adottata non può essere inferiore ai 3 secondi per semafori veicolari, è stato valutato in 4 secondi per tutti i semafori della rete semaforica interessata dal passaggio del tram (linea 1 e linea 2); le cose sono diverse per gli attraversamenti ciclabili nei quali il tempo di giallo è impostato con un valore di 3 secondi considerato che lo spazio di frenata necessario è

molto corto, essendo la velocità bassa; per gli attraversamenti pedonali invece è diverso: non è definito un valore minimo del tempo di giallo, ma la durata deve essere pari al tempo necessario al pedone per effettuare l'attraversamento completo o comunque necessario per portarsi in una zona protetta (salvagente), pertanto il tempo va calcolato sulla base della lunghezza della mezzeria dell'attraversamento, considerando di norma una velocità media per i pedoni che per questo progetto è fissata a 1,2 m/s. I semafori tranviari sono settati in maniera particolare in base alla strategia di priorità già descritta e hanno un tempo di giallo fisso di 5 secondi.

L'individuazione delle diverse correnti di traffico insieme all'impostazione dei tempi di giallo delle differenti lanterne semaforiche consente la valutazione dei tempi di sicurezza tra le diverse manovre e pertanto la definizione della matrice dei 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 tempo di verde e rispettivamente entrano nell'intersezione all'inizio del tempo di verde. Il tempo di sicurezza viene dunque calcolato sulla base dell'intersezione tra due traiettorie, quella di uscita e quella di ingresso, facilmente determinabili sulla base della planimetria dell'intersezione.

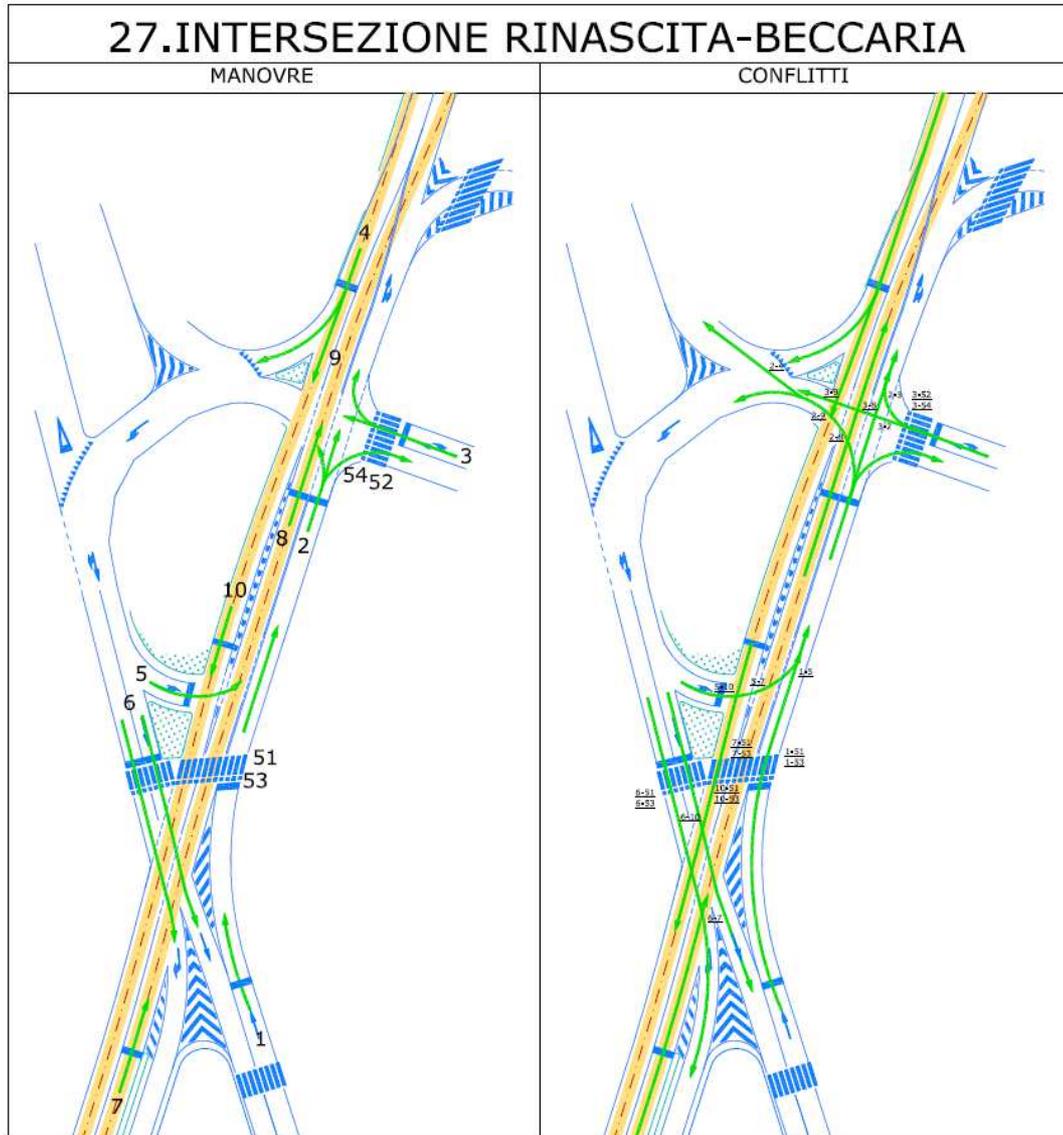
Le manovre definite in questa intersezione sono:

- Manovra 1: manovra con partenza da un ramo esterno che consente di proseguire dritti da via Beccaria sud;
- Manovra 2: manovra con partenza da un ramo interno, al centro dell'intersezione, servito maggiormente dalla manovra 1, e in maniera più leggera dalla manovra 5, che consente di proseguire in tutte le direzioni possibili;
- Manovra 3: manovra con partenza da un ramo esterno che consente l'inserimento nel centro dell'intersezione o la svolta a destra verso via Rinascita e via Pesaro a partire da via Mutilati del Lavoro;
- Manovra 4: manovra con partenza da un ramo esterno che consente per i veicoli diversi dal tram l'inserimento all'interno dell'intersezione con una svolta a destra da via Rinascita nord;

- Manovra 5: manovra con partenza da un ramo interno, al centro dell'intersezione, che regola la svolta a sinistra per i veicoli provenienti da nord;
- Manovra 6: manovra con partenza da un ramo interno, al centro dell'intersezione, servito maggiormente da via Beccaria nord e che consente il raggiungimento della parte sud dell'intersezione (via Rinascita e via Beccaria);
- Manovra 7: manovra di tipo tranviario con partenza da un ramo esterno corrispondente alla corsia dedicata di via Rinascita sud, che permette l'inserimento del tram all'interno dell'intersezione;
- Manovra 8: manovra di tipo tranviario con partenza da un ramo interno in corsia riservata che permette il passaggio sud-nord del tram a seguito del passaggio per la manovra 7;
- Manovra 9: manovra di tipo tranviario con partenza dal ramo esterno in comune con la manovra 4, consente l'inserimento del tram all'interno dell'intersezione da via Rinascita nord;
- Manovra 10: manovra di tipo tranviario con partenza da un ramo interno in corsia riservata che permette il passaggio nord-sud del tram a seguito del passaggio per la manovra 9;
- Manovra 51: manovra di attraversamento pedonale al centro dell'intersezione;
- Manovra 52: manovra di attraversamento pedonale di via Mutilati del Lavoro;
- Manovra 53: manovra di attraversamento ciclabile al centro dell'intersezione;
- Manovra 54: manovra di attraversamento ciclabile di via Mutilati del Lavoro;

Nella figura, a sinistra sono visualizzate tutte le manovre numerate, mentre a destra sono evidenziate le traiettorie di conflitto tra le manovre che servono per il calcolo degli intertempi. I punti di conflitto si distinguono in base alla condizione più sfavorevole per la manovra studiata rispetto alla sua antagonista in base agli spazi di sgombero per la prima e gli spazi di ingresso della seconda; manovre a servizio di più direzioni possono avere più punti di conflitto. In figura, i punti di conflitto

sottolineati indicano un punto di conflitto condiviso da entrambe le manovre coinvolte.



*Fig. 1.24 – Tavola di classificazione delle manovre e dei punti di conflitto tra le manovre
[Estratto da base cartografica del progetto esecutivo del tram, PMV Spa]*

Il tempo di sicurezza t_s viene determinato per i veicoli come somma algebrica di tre tempi secondo l'espressione:

$$t_s = t_u + t_e - t_i$$

dove,

t_u – tempo di uscita: 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;

t_e – tempo di sgombero: Il tempo di sgombero è quello necessario perché il veicolo in uscita superi completamente il punto di conflitto;

t_i – tempo di ingresso: 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.

Per i pedoni invece, il calcolo è più semplice e si riduce al rapporto tra la lunghezza dell'attraversamento pedonale e la velocità media di uscita del pedone v_m (fissata come già detto a 1,2 m/s):

$$t_s = \frac{L}{v_m}$$

I tempi di sicurezza devono essere calcolati per tutte le coppie di correnti in conflitto (pedoni, ciclisti, mezzi pubblici, veicoli, ecc.) e non possono essere inferiori alla durata del tempo di giallo incrementata di 1 secondo (minimo tempo di tutto rosso).

2.2.2.1 – Determinazione dei tempi di uscita

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.

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 in attraversamento	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}	-
Biciclette	14	1

(*) se effettuano la fermata in corrispondenza dell'intersezione, il tempo di sgombero è calcolato sulla base dell'accelerazione e della massima velocità raggiungibile. Si può considerare un'accelerazione compresa fra $0,7$ e $1,2 \text{ m/s}^2$ per i tram e fra $1,0$ e $1,5 \text{ m/s}^2$ per i bus; il tempo di uscita pertanto dipende caso per caso.

Tab. 2.5 – Descrizione dei valori suggeriti di velocità e tempo di uscita per le varie categorie di traffico [8]

La matrice dei tempi di uscita (espressi in secondi) per l'intersezione studiata è:

Manovre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	51	52	53	54
1	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	3	-	3	-
2	-	-	3	2	-	-	-	2	2	-	-	-	-	-
3	-	3	-	-	-	-	-	3	3	-	-	3	-	3
4	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	2	-	-	-	-	-	2	-	-	2	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	2	-	-	3	3	-	3	-
7	-	-	-	-	5	5	-	-	-	-	5	-	5	-
8	-	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	5	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	5	5	-	-	-	-	5	-	5	-
51														
52														
53	1	-	-	-	-	1	1	-	-	1	-	-	-	-
54	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 2.6 – Tabella riassuntiva dei tempi di uscita per l'intersezione oggetto di studio

2.2.2.2 – Determinazione dei tempi di sgombero

Per la determinazione delle lunghezze dei percorsi di sgombero 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 ; se ne riporta la tabella per l’intersezione studiata (espressa in metri).

Manovre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	51	52	53	54
1					56						39		39	
2			22	31				11	16					
3		11						14	18			6		6
4		27												
5	15						9			3				
6							27			13	6		6	
7					65	25					52		52	
8		10	16											
9		24	22											
10					10	33					25		25	
51														
52														
53	1					1	1			1				
54			1											

Tab. 2.7 – Tabella riassuntiva delle distanze di sgombero relative alle manovre in conflitto per l’intersezione oggetto di studio

- 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; questa regola generalmente utilizzata non è stata applicata alla lunghezza del tram per ragioni di sicurezza. Si sono applicate le seguenti lunghezze fittizie:

Tipi di veicolo	l_v (m)
Cicli	0
Veicoli sia leggeri che pesanti	6
Tram	32

Tab. 2.8 – Lunghezze fittizie delle categorie veicolari in fase di sgombero [8]

Il tempo di sgombero t_e viene calcolato sulla base della distanza da percorrere e delle velocità medie di uscita dall'intersezione:

$$t_e = \frac{(I_e + I_v)}{v_m}$$

I valori di velocità media utilizzati sono elencati nella tabella sottostante.

Corrente di sgombero	Velocità media in uscita (m/s)
Veicoli che procedono diritto	10,0
Veicoli in svolta (raggio ≥ 10 m)	6,9
Veicoli in svolta (raggio < 10 m)	5,0
Tram o Bus senza fermata prima dell'intersezione	10,0
Tram o Bus con fermata prima dell'intersezione	5,0
Biciclette	3,9
Pedoni	1,2

Tab. 2.9 – Velocità medie delle categorie veicolari in fase di sgombero [8]

La matrice dei tempi di sgombero (espressa in secondi) per l'intersezione studiata è la seguente.

Manovre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	51	52	53	54
1	-	-	-	-	6,2	-	-	-	-	-	4,5	-	4,5	-
2	-	-	2,8	5,3	-	-	-	2,4	3,2	-	-	-	-	-
3	-	1,7	-	-	-	-	-	2,0	2,4	-	-	1,2	-	1,2
4	-	6,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	3,0	-	-	-	-	-	2,2	-	-	1,3	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	6,6	-	-	1,9	1,2	-	1,2	-
7	-	-	-	-	9,7	5,7	-	-	-	-	8,4	-	8,4	-
8	-	4,2	4,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	5,6	5,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	4,2	6,5	-	-	-	-	5,7	-	5,7	-
51														
52														
53	0,3	-	-	-	-	0,3	0,3	-	-	0,3	-	-	-	-
54	-	-	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 2.10 – Tabella riassuntiva dei tempi di sgombero per l'intersezione oggetto di studio

2.2.2.3 – Determinazione dei tempi di ingresso

Per la determinazione delle lunghezze dei percorsi di ingresso si fa di norma riferimento all’asse delle corsie o degli attraversamenti pedonali.

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 di attraversamento pedonale. Per gli attraversamenti pedonali la distanza è quella fra l’inizio dell’attraversamento e l’inizio dell’area di conflitto e viene impostata di default a 1 m. Se ne riporta la tabella per l’intersezione studiata (espressa in metri).

Manovre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	51	52	53	54
1					15						1		1	
2			15	27				10	24					
3		15						16	22			1		1
4		31												
5	56						65			10				
6							25			33	1		1	
7					9	27					1		1	
8		11	14											
9		16	18											
10					3	13					1		1	
51														
52														
53	39					6	52			25				
54			6											

Tab. 2.11 – Tabella riassuntiva delle distanze di ingresso relative alle manovre in conflitto per l’intersezione oggetto di studio

Il tempo di ingresso t_i è quello necessario per percorrere il tratto l_i e viene calcolato sulla base della distanza da percorrere e delle velocità media di ingresso v_i all’intersezione:

$$t_i = \frac{l_i}{v_i}$$

utilizzando le seguenti velocità medie di ingresso:

Corrente in ingresso	Velocità media di ingresso (m/s)
Veicoli leggeri	11,1
Bus o Tram	5,5
Cicli	5,0
Pedoni	1,5

Tab. 2.12 – Velocità medie delle categorie veicolari in fase di ingresso [8]

La matrice dei tempi di ingresso (espressa in secondi) per l'intersezione studiata viene di seguito riportata.

Manovre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	51	52	53	54
1	-	-	-	-	1,4	-	-	-	-	-	0,7	-	0,2	-
2	-	-	1,4	2,4	-	-	-	1,8	4,4	-	-	-	-	-
3	-	1,4	-	-	-	-	-	2,9	4,0	-	-	0,7	-	0,2
4	-	2,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	5,0	-	-	-	-	-	11,8	-	-	1,8	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	4,5	-	-	6,0	0,7	-	0,2	-
7	-	-	-	-	0,8	2,4	-	-	-	-	0,7	-	0,2	-
8	-	1,0	1,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	1,4	1,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	0,3	1,2	-	-	-	-	0,7	-	0,2	-
51														
52														
53	3,5	-	-	-	-	0,5	9,5	-	-	4,5	-	-	-	-
54	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 2.13 – Tabella riassuntiva delle distanze di ingresso relative alle manovre in conflitto per l'intersezione oggetto di studio

2.2.2.4 – Determinazione della matrice dei tempi di sicurezza

In base alle diverse matrici valutate in precedenza e in base ai tempi di sicurezza degli attraversamenti pedonali determinati sulla base delle lunghezze degli attraversamenti sotto riportati (espressi in metri),

Manovre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
51	12					12	12			12
52			9							

Tab. 2.14 – Lunghezza degli attraversamenti ciclo-pedonali e punti di conflitto con le manovre per l'intersezione oggetto di studio

la matrice dei tempi di sicurezza per l'intera intersezione studiata risulta quella di seguito riportata (espressa in secondi).

Manovre	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	51	52	53	54
1	-	-	-	-	8,0	-	-	-	-	-	7,0	-	7,0	-
2	-	-	5,0	5,0	-	-	-	5,0	5,0	-	-	-	-	-
3	-	5,0	-	-	-	-	-	5,0	5,0	-	-	5,0	-	5,0
4	-	6,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	5,0	-	-	-	-	-	5,0	-	-	5,0	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	5,0	-	-	5,0	5,0	-	5,0	-
7	-	-	-	-	14,0	8,0	-	-	-	-	13,0	-	13,0	-
8	-	8,0	9,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	9,0	9,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	9,0	10,0	-	-	-	-	10,0	-	11,0	-
51	10,0	-	-	-	-	10,0	10,0	-	-	10,0	-	-	-	-
52	-	-	8,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	4,0	-	-	-	-	4,0	4,0	-	-	4,0	-	-	-	-
54	-	-	4,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 2.15 – Matrice dei tempi di sicurezza per l'intersezione oggetto di studio

Dopo la messa in servizio dell'impianto semaforico i tempi di sicurezza devono essere verificati attentamente osservando il funzionamento dell'impianto.

I tempi di sicurezza indicati nelle celle che interessano il tram sono cautelativi e vengono applicati solamente nel caso in cui la condizione della comunicazione tra tram e centralino sia degradata. Questo può accadere quando il segnale wireless per determinati motivi non funziona. Al contrario, se l'antenna è attiva e il centralino riceve normalmente il segnale di CLEAR, la chiusura del movimento tranviario sarà regolata sulla base di tale segnale.

2.2.3 – Struttura del piano semaforico

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 le modalità 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 manovre 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 sull'organizzazione delle fasi.

Con riferimento al caso studio, la struttura del piano semaforico prevede un funzionamento ordinario con la successione di 3 fasi che si ripetono ciclicamente. La regolarità può però essere variata nel caso in cui avvenga una richiesta di passaggio da parte del tram: vengono mandate a rosso tutte le fasi antagoniste o non previste dalla speciale fase tranviaria (nel rispetto dei vincoli dettati dalla matrice dei tempi di sicurezza), e viene avviata la fase dedicata all'attraversamento del tram, diversa a seconda che esso arrivi da nord piuttosto che da sud. Al fine di non appesantire il piano semaforico si è previsto l'utilizzo dell'attraversamento ciclo-pedonale al centro dell'intersezione (manovra 51 e 53) con un sistema a chiamata; tale chiamata però è soggetta a dei vincoli temporali per favorire il deflusso delle auto (trattati nel paragrafo successivo).

FASE 1: vengono inserite in questa fase le correnti che arrivano dai due rami principali, facenti capo alla stessa via Beccaria, imponendo dei vincoli in termini di tempo. Le manovre che vengono servite in questa fase sono:

- Manovra 1;
- Manovra 2;
- Manovra 6;
- Manovra 52;
- Manovra 54.

Per le manovre 1, 2, 6 viene imposto un termine minimo di tempo per ciclo di 40 secondi, valido solamente in caso di chiamata pedonale, mentre per chiamate tranviarie detto vincolo cade in virtù del preferenziamento implementato nella rete.

FASE 2: in questa fase viene inserita la svolta a sinistra all'interno dell'intersezione; le manovre che vengono servite sono:

- Manovra 2;
- Manovra 5;
- Manovra 6 (in mancanza di chiamata pedonale);
- Manovra 52;
- Manovra 54.

Nella transizione tra la fase 2 e la fase 3, si prevede che la manovra 2 venga chiusa con un piccolo ritardo rispetto alla manovra 5 al fine di sgomberare l'intersezione.

FASE 3: in questa fase vengono serviti i rami di via Mutilati del Lavoro e di via Rinascita:

- Manovra 3;
- Manovra 4;
- Manovra 6 (in mancanza di chiamata pedonale).

FASE 4: (Tranviaria): fase speciale che viene inserita nel ciclo quando avviene la "richiesta di preferenziamento" da parte del tram che proviene da sud:

- Manovra 7;
- Manovra 8;
- Manovra 52;
- Manovra 54.

FASE 5:(Tranviaria): fase speciale che viene inserita nel ciclo quando avviene la "richiesta di preferenziamento" da parte del tram che proviene da nord:

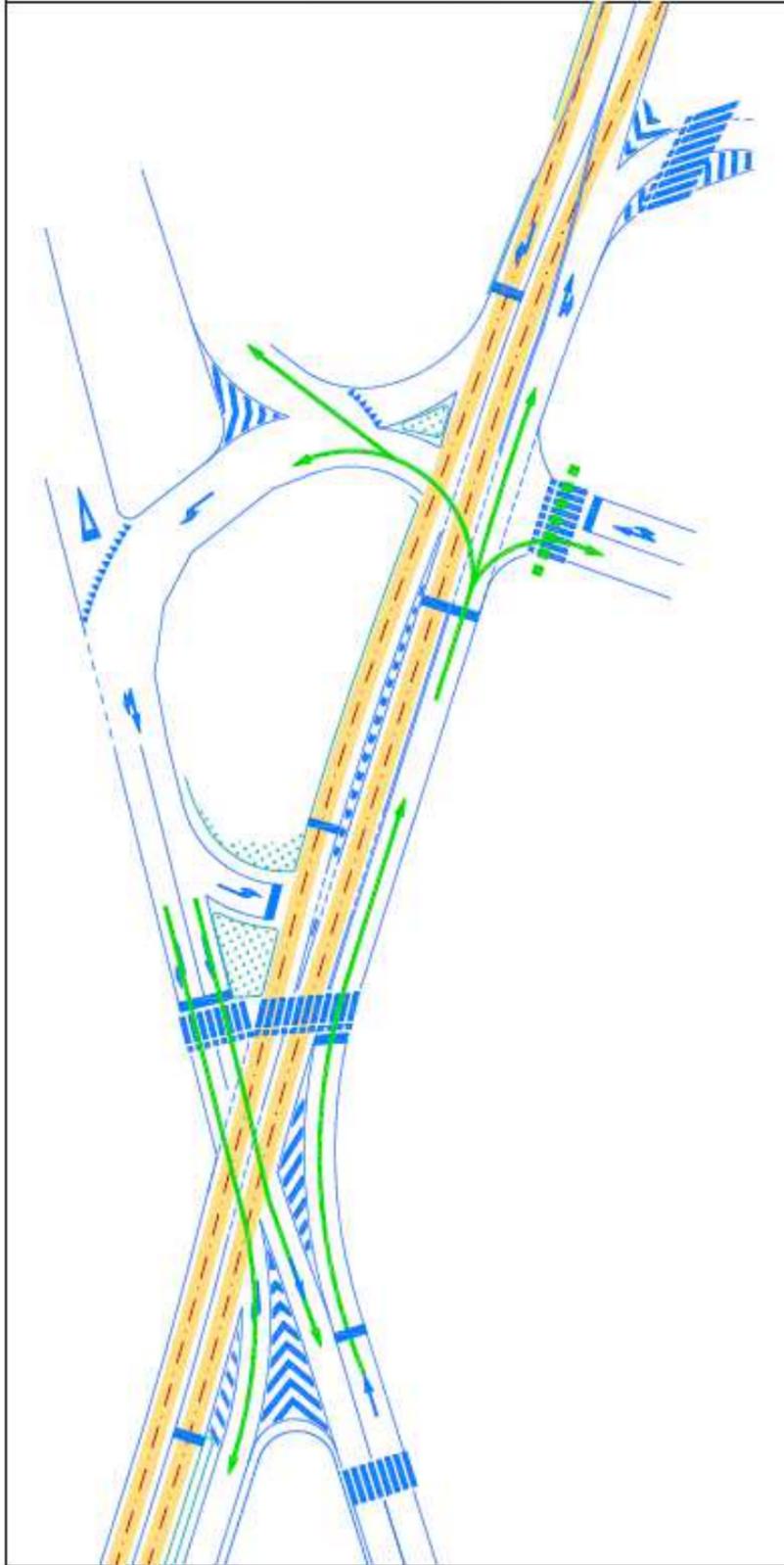
- Manovra 4;
- Manovra 9;
- Manovra 10;
- Manovra 52;
- Manovra 54.

Qui di seguito si riportano le due tavole che rappresentano le diverse fasi valutate per la determinazione del piano semaforico e le lanterne semaforiche previste.

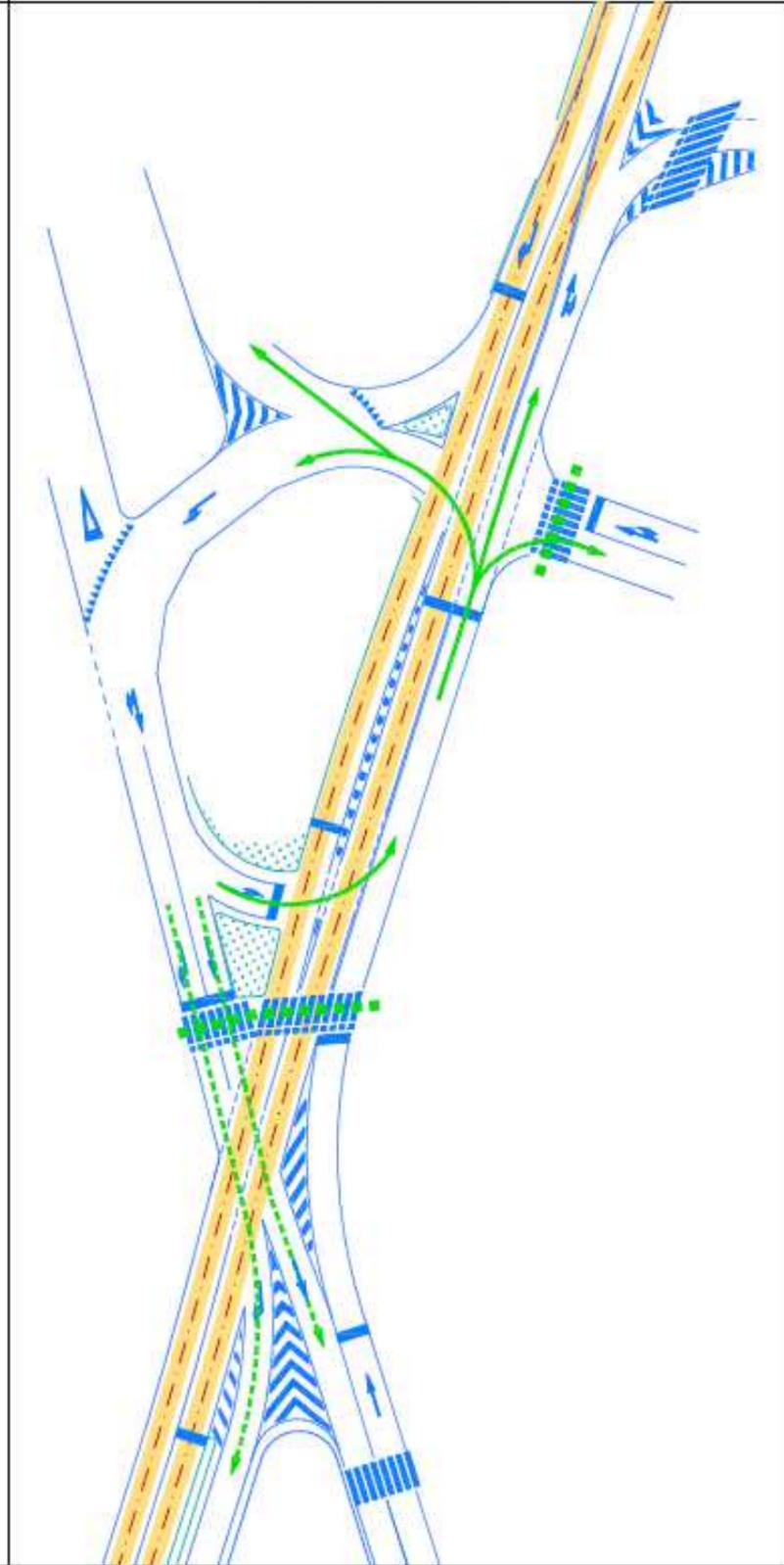
27.INTERSEZIONE RINASCITA-BECCARIA

FASI SEMAFORICHE

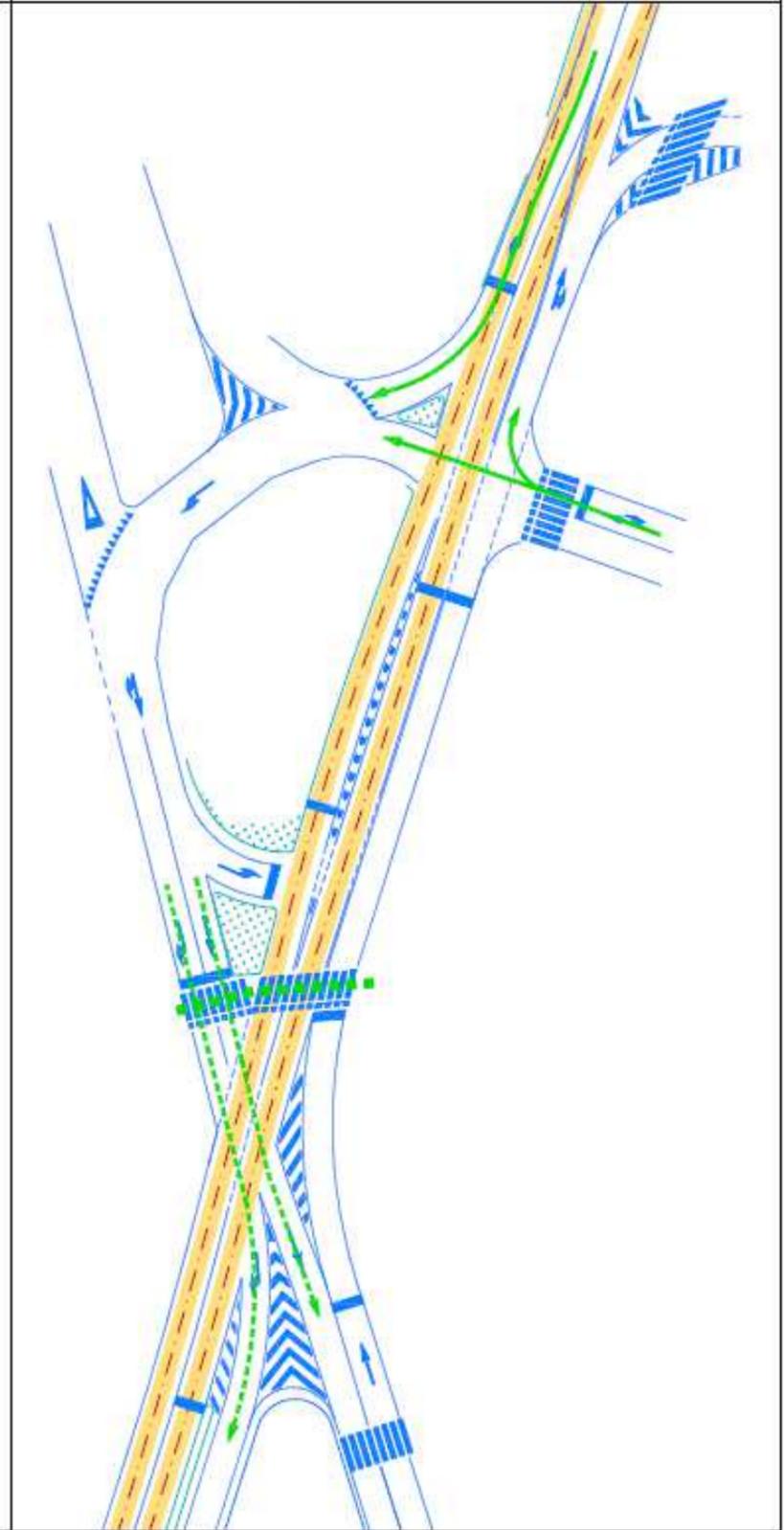
PRIMA FASE



SECONDA FASE *



TERZA FASE *

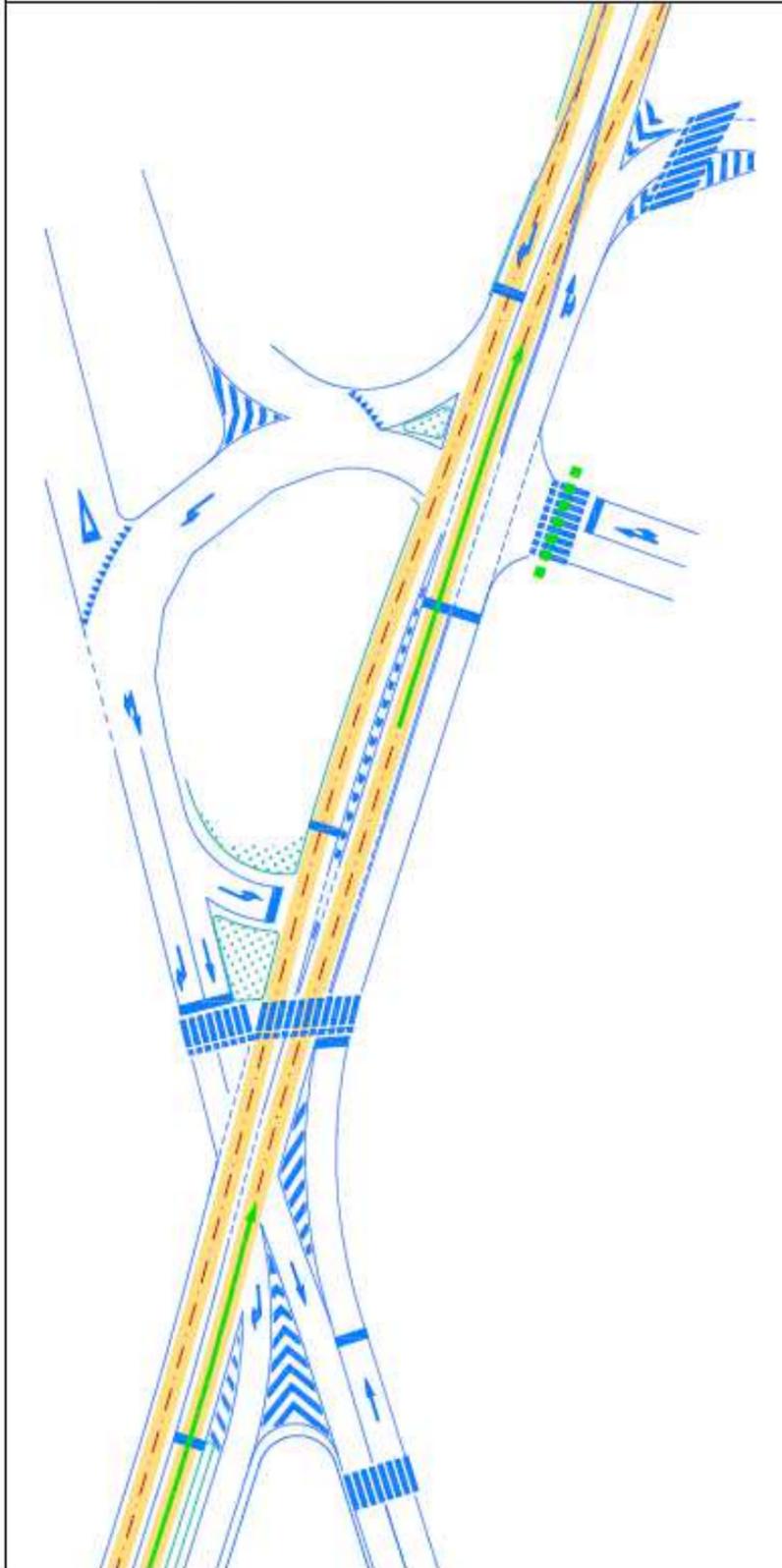


* Pedonale e ciclabile di via Beccaria a chiamata

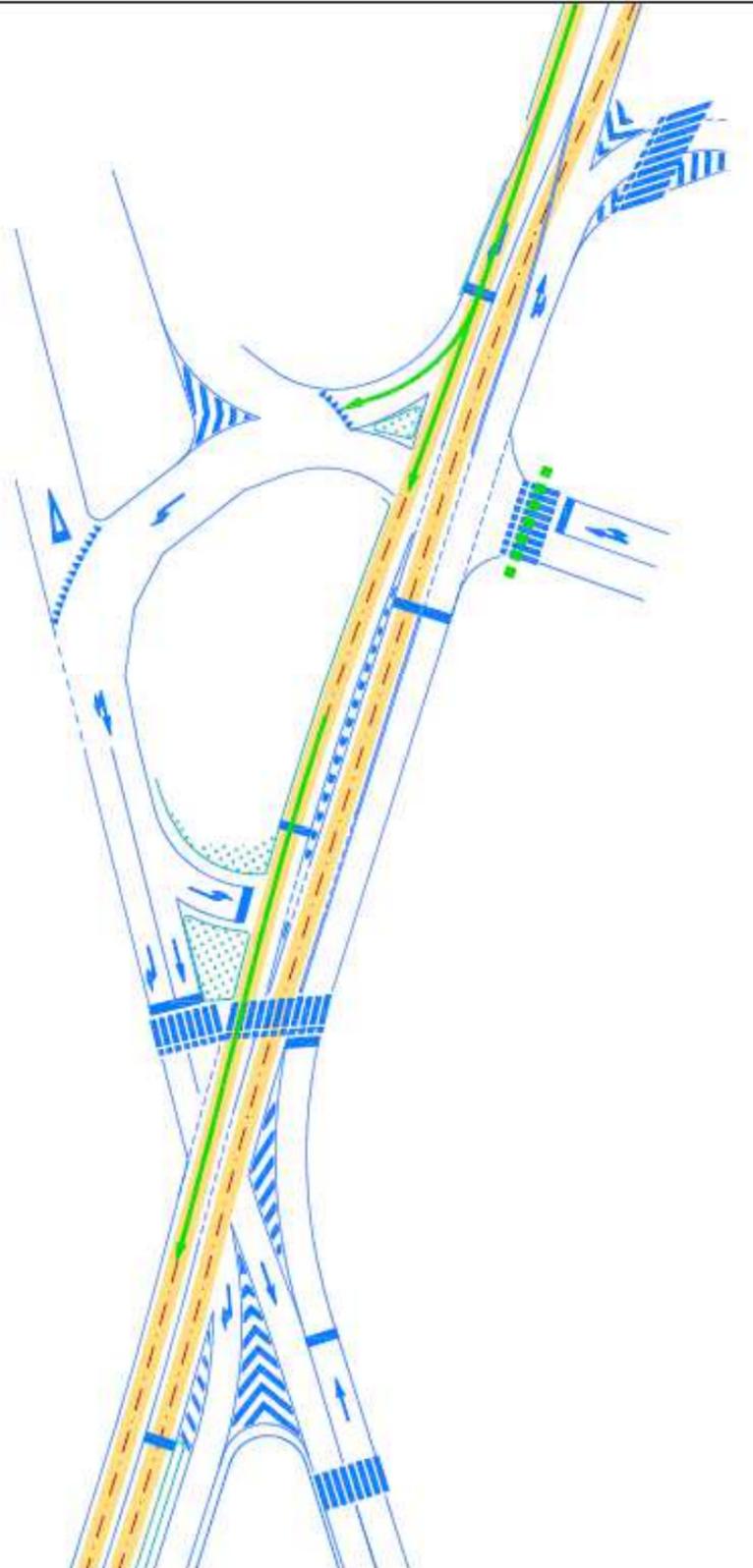
27.INTERSEZIONE RINASCITA-BECCARIA

FASI SEMAFORICHE

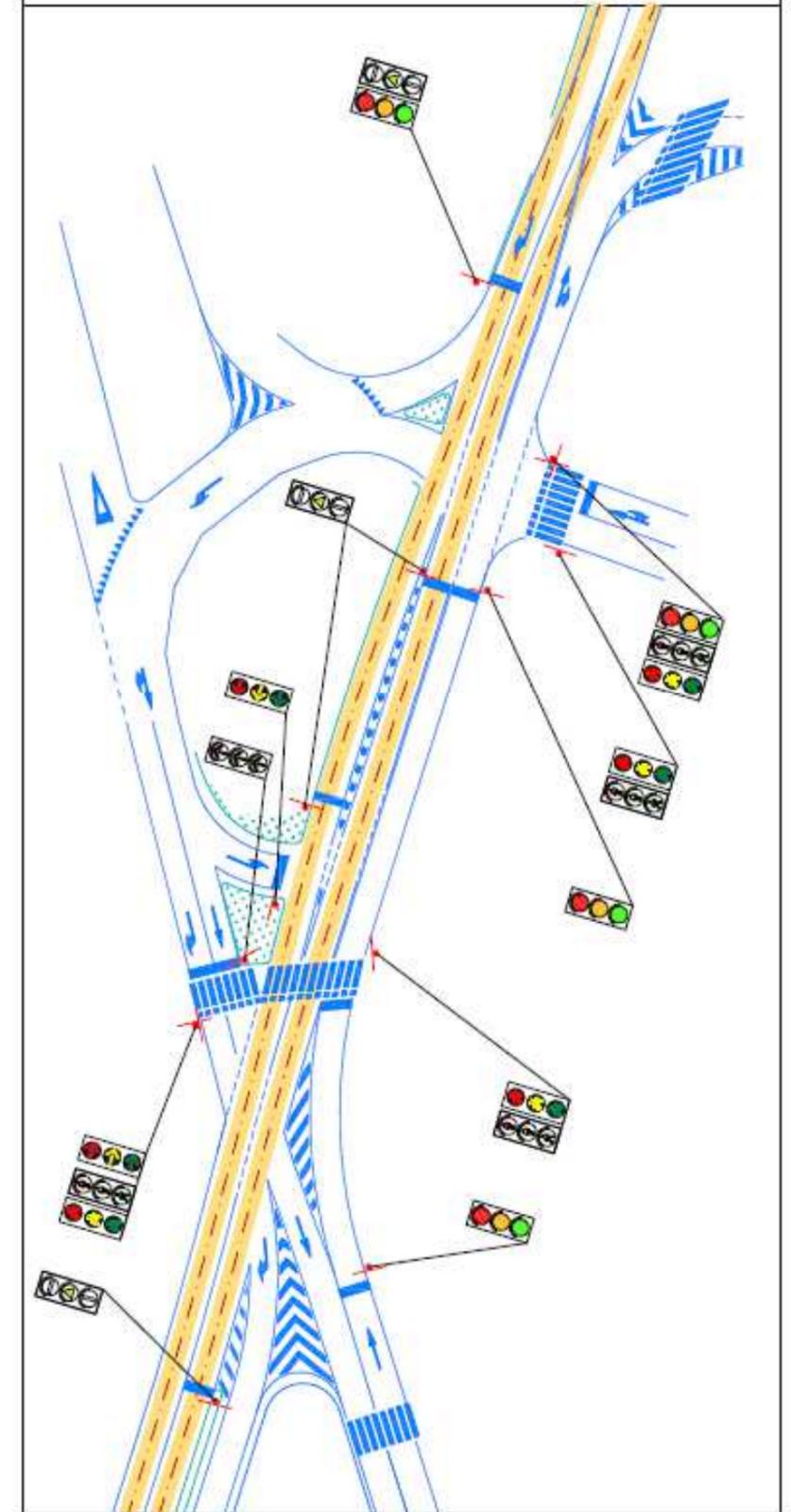
QUARTA FASE (TRAM DA SUD)



QUINTA FASE (TRAM DA NORD)



LANTERNE SEMAFORICHE



2.2.4 – Calcolo del piano semaforico

I parametri che definiscono un piano semaforico sono:

- la durata del ciclo C ;
- le durate del verde V dei segnali che controllano le diverse correnti e le rispettive posizioni nel ciclo;
- le durate dei gialli.

Le durate dei gialli sono state già trattate e definite in precedenza nel calcolo della matrice dei tempi di sicurezza.

Nel presente paragrafo si richiamano dapprima i concetti di base necessari per la regolazione di una corrente veicolare e successivamente sono indicate le scelte fatte e i valori utilizzati nella progettazione.

Nel calcolo di un piano semaforico ci si riferisce ad un tempo di verde efficace (v) ed un tempo di rosso efficace (r), (Webster, 1958):

- il tempo di verde efficace rappresenta, in termini di capacità, il verde reale per il quale si assume che i veicoli possano defluire al valore del flusso di saturazione (s) e quindi con un intervallo costante pari a $1/s$;
- il tempo di rosso efficace rappresenta il periodo di ciclo durante il quale non avviene alcuna partenza; è il valore complementare al tempo di verde efficace.

In termini matematici il verde efficace può essere definito sulla base della funzione $a(t)$, che esprime l'andamento del flusso di veicoli in partenza nel tempo, e dell'inverso del valore del flusso di saturazione s , con l'espressione:

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

dove,

v : tempo di verde efficace;

s : flusso di saturazione;

V : tempo di verde equivalente;

G : tempo di giallo;

$a(t)$: andamento dei flussi in partenza in funzione del tempo;

mentre il rosso efficace si ottiene per differenza dalla:

$$r = C - v = V + G + R - v \quad (\text{sec})$$

dove,

C : tempo di ciclo;

R : tempo di rosso equivalente.

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

- il transitorio di avviamento della coda all'inizio del verde (l_1);
- il transitorio in uscita alla fine del verde e durante il giallo (l_2);
- il tempo di tutto rosso tra la fine del giallo e l'inizio del verde della fase successiva (l_r).

Il tempo perso all'avviamento (l_1) 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 (l_r) si ricava semplicemente sulla base della durata dell'intertempo di verde tra una fase e la sua successiva non tenendo conto del tempo di giallo. Per la somma dei tempi persi all'inizio e 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,

$$l_r = t_t - G$$

dove,

t_t : tempo di transizione dalla fine del verde di una fase all'inizio della fase successiva.

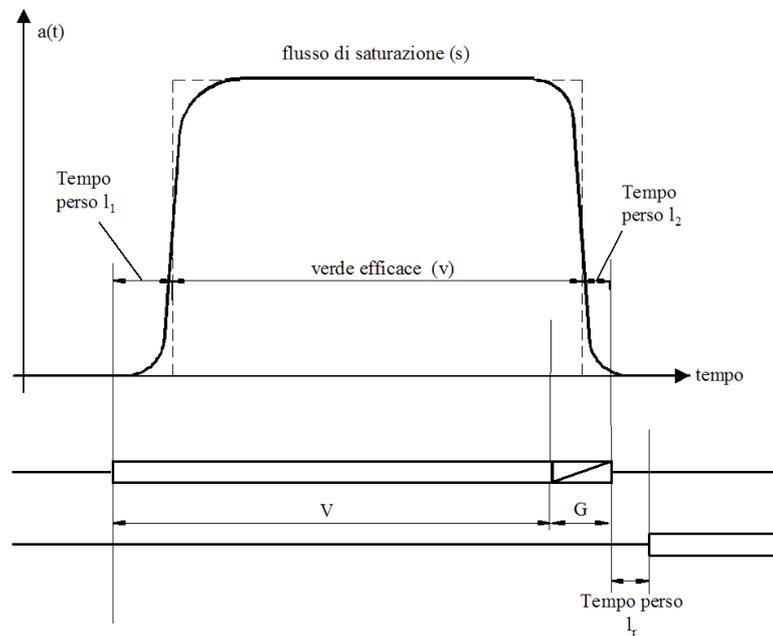


Fig. 2.25 – Esempio di deflusso durante il tempo di verde: verde reale, verde efficace e tempi persi [8]

Per quanto riguarda le notazioni, il progetto deve riferirsi a:

- C : durata del ciclo in secondi, assunta comune per tutte le correnti;
- v_i : verde efficace per la corrente i (secondi);
- g_i : giallo per la corrente i (secondi);
- l_i : tempo perso per la corrente i (secondi);
- f_i : flusso in arrivo per la corrente i (A_e /sec);
- s_i : flusso di saturazione per la corrente i (A_e /sec).

Note le durate del tempo perso (l_i) e del giallo (g_i), è possibile determinare le durate semaforiche del verde e del rosso, dalle durate del verde efficace (v_i) e del ciclo (C) con le relazioni seguenti:

$$V_i = v_i + l_i - g_i$$

$$R = C - (v_i + l_i)$$

La durata del ciclo e le durate dei verdi per le differenti correnti sono progettate in funzione dei flussi di arrivo e dei flussi di saturazione (nota l'organizzazione in correnti).

La successione dei segnali può essere descritta dagli istanti di inizio e fine dei periodi di verde e giallo che controllano ciascuna corrente. Generalmente tali istanti sono discretizzati al secondo. Un ciclo semaforico di durata C 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 in sicurezza.

La durata del ciclo è uno dei risultati delle attività di progetto del piano semaforico. In questa sede si riportano unicamente delle indicazioni relative ai campi di variazione di tale durata, che sono sintetizzati nella seguente tabella.

Durata	Secondi
Minima	30
Normale	50 – 75
Massima	90 – 120

Tab. 2.16 – Classificazione in termini di tempo dei cicli semaforici [8]

La durata minima è generalmente condizionata dalle durate minime di ciascuna fase e dalla durata delle transizioni di fase, quindi è sconsigliabile scendere al di sotto dei 30 secondi. Per quanto riguarda invece la durata massima si suggerisce di non oltrepassare la soglia dei 120 secondi se non in casi eccezionali per evitare la

presenza di tempi di attesa eccessivamente lunghi. Qualora dalla progettazione risultassero necessari cicli di durata superiore, le ipotesi di progetto dovrebbero essere attentamente riconsiderate.

Nel caso dell'intersezione considerata si progetta un regolatore semaforico a scelta di piano, dove in base al periodo della giornata viene eseguito un piano semaforico piuttosto che un altro scelto da una libreria. La libreria stilata si compone di diversi piani progettati con durate di ciclo differenti.

Sono previsti piani con una durata di 110 secondi, quindi una durata piuttosto elevata, per i picchi della mattina e del pomeriggio mentre piani da 80 e da 90 secondi per i periodi di morbida della giornata. La scelta di piani con lunghezza di ciclo elevata è dovuta alla presenza di diversi approcci in contrasto tra loro e alcuni di essi con un flusso in arrivo sostenuto (nei periodi di picco) che comporta l'esigenza di elevati tempi di verde per le singole correnti. Questa lunghezza viene ridotta nei periodi dove il traffico risulta inferiore per ridurre i tempi di attesa agli approcci.



Fig. 2.26 – Piano semaforico per l'intersezione oggetto di studio nel periodo di punta della mattina

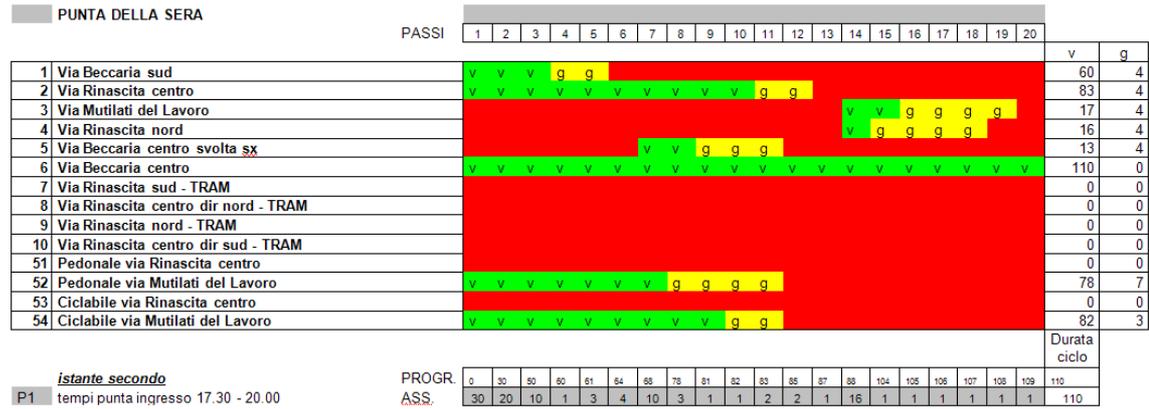


Fig. 2.27 – Piano semaforico per l'intersezione oggetto di studio nel periodo di punta della sera

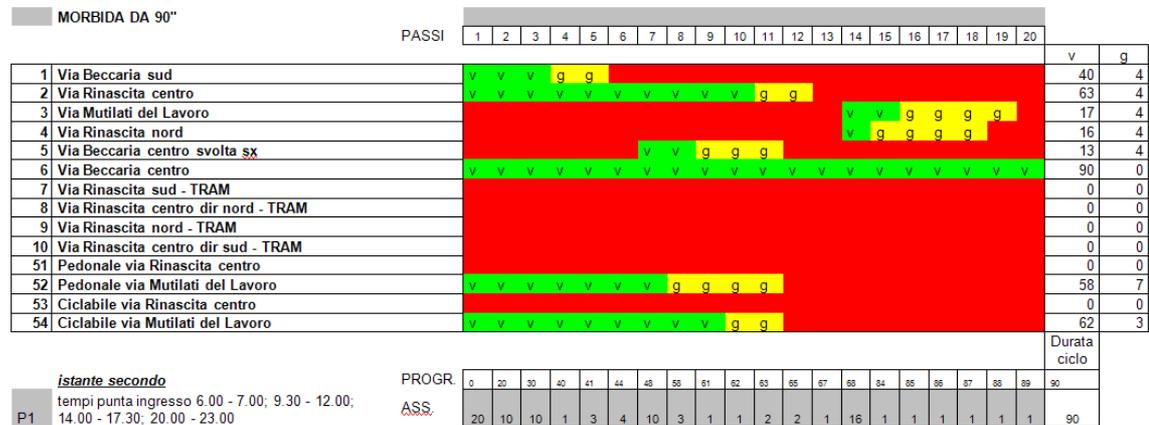


Fig. 2.28 – Piano semaforico (da 90") per l'intersezione oggetto di studio nel periodo di morbida

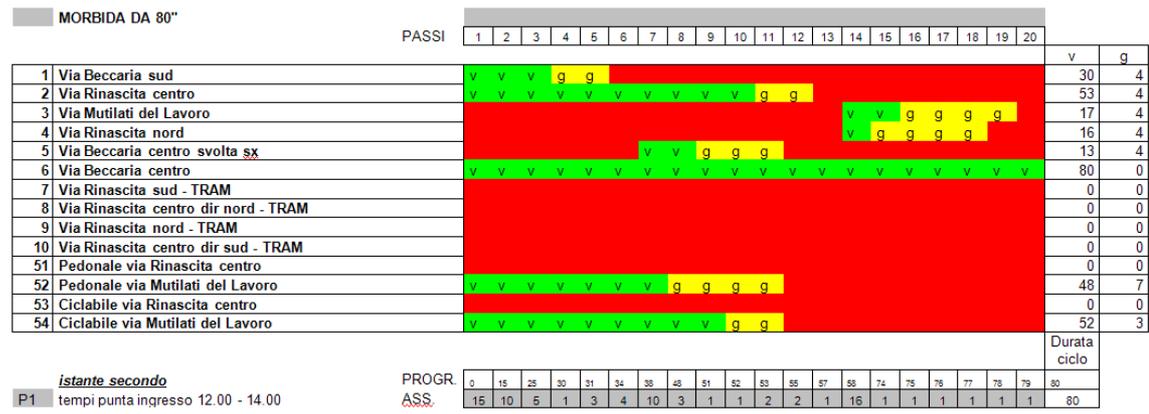


Fig. 2.29 – Piano semaforico (da 80") per l'intersezione oggetto di studio nel periodo di morbida

I piani che seguono sono relativi alle chiamate pedonali. A seconda che la chiamata avvenga durante la prima o la terza fase oppure durante la seconda fase la definizione del piano varia. La lunghezza del ciclo inserita tiene conto del vincolo a cui è soggetta la chiamata pedonale rispetto al tempo di verde delle fasi principali.



Fig. 2.30 – Piano semaforico per l’intersezione oggetto di studio in presenza di chiamata pedonale durante la prima oppure la terza fase del ciclo

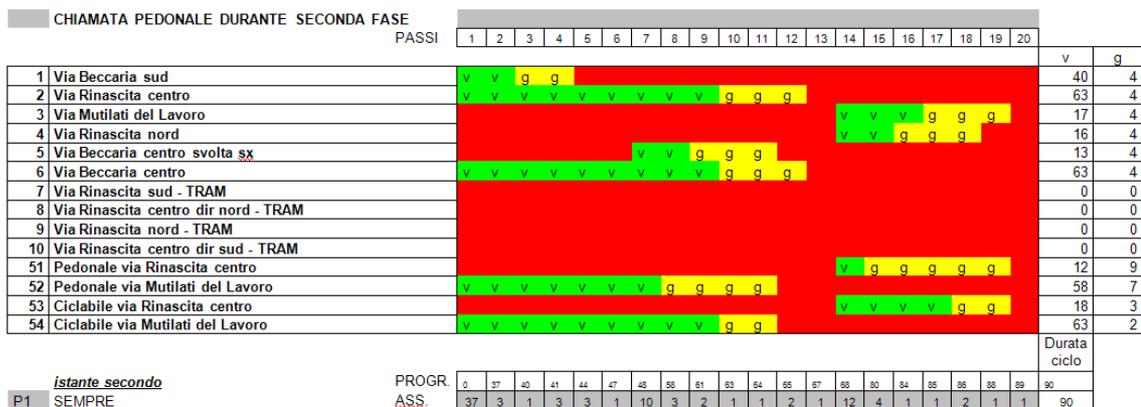


Fig. 2.31 – Piano semaforico per l’intersezione oggetto di studio in presenza di chiamata pedonale durante la seconda fase del ciclo

I piani descritti finora sono relativi al funzionamento dell’intersezione nei periodi di assenza del transito del tram. Il tram, come già specificato in precedenza, utilizza delle fasi speciali (fase 4 e fase 5) che permettono l’interruzione del piano ordinario per consentirgli il passaggio. La priorità al tram è sempre garantita con l’unico vincolo del suo passaggio in anticipo attraverso l’intersezione per perseguire l’obiettivo della puntualità e regolarità del transito alle fermate. In base al momento in cui avviene l’inserimento della fase speciale nel ciclo, viene definita una logica di

preferenziamento che serve per la reintroduzione del ciclo ordinario. Il tutto risulta ulteriormente complicato dall'inserimento dell'attraversamento ciclo-pedonale a chiamata, del quale si deve tener conto. Viene di seguito riportata la tabella delle logiche adottate facendo riferimento, per il rientro nel ciclo ordinario, ai passi presenti nelle figure precedentemente allegate.

Logica di preferenziamento		
1	Se uno dei due tram chiama in assenza di chiamate pedonali nella prima metà della fase 1, ricomincia dal passo 1.	* manovra 3 ha maggior capacità di accumulo e manovra 4 è aperta mentre passa il tram.
2	Se uno dei due tram chiama in assenza di chiamate pedonali nella seconda metà della fase 1, ricomincia dalla seconda metà della fase 1 (passo 2).	
3	Se uno dei due tram chiama in assenza di chiamate pedonali durante la fase 2, ricomincia dalla fase 2 (passo 7).	
4	Se uno dei due tram chiama in presenza di attraversamento pedonale durante la fase 2, ricomincia dalla fase 3 (passo 14).	
5	Se uno dei due tram chiama in assenza di chiamate pedonali nella prima metà della fase 3, ricomincia dalla fase 3 (passo 14).	
6	Se uno dei due tram chiama in assenza di chiamate pedonali nella seconda metà della fase 3, ricomincia dalla fase 1 (passo 1).	
7	Se uno dei due tram chiama in presenza di attraversamento pedonale nella fase 3, ricomincia dalla fase 1 (passo 1).	
8	Se i due tram si susseguono nell'area di intersezione incrociandosi, ricomincia dalla seconda metà della fase 1 (passo 2)*.	

Tab. 2.17 – Tabella esplicativa della logica di rientro al ciclo standard al termine della fase tranviaria

2.2.5 – Valutazione

L'ultima fase del processo di progettazione consiste nella valutazione del funzionamento della regolazione semaforica progettata, sia a livello di singola intersezione, sia a livello di rete. Tale valutazione costituisce un elemento di fondamentale importanza in quanto consente di evitare l'introduzione di sistemi di regolazione inefficienti o addirittura dannosi per l'intera circolazione veicolare. Per il

caso studio sono state realizzate delle analisi approssimate sulle condizioni di saturazione e delle stime di lunghezza della coda dei diversi rami.

L'analisi delle condizioni di saturazione di un'intersezione può essere condotta con vari indicatori equivalenti, noto il valore del flusso in arrivo per le varie correnti ed indipendentemente dal suo andamento nel tempo. La corrente i si dice in condizioni di *sottosaturazione* (o *sovraturazione*) se il numero di utenti in arrivo in un ciclo è minore (o maggiore) del numero di veicoli che possono partire durante il verde efficace:

$$f_i \cdot C < s_i \cdot v_i \Rightarrow f_i < s_i \cdot \gamma_i \Rightarrow y_i < \gamma_i$$

dove,

f_i : flusso della corrente i ;

C : tempo di ciclo;

s_i : flusso di saturazione del ramo;

v_i : tempo di verde efficace;

γ_i : frazione del ciclo utilizzata dal verde efficace della corrente i ;

y_i : rapporto tra flusso in arrivo e flusso di saturazione per la corrente i .

Nel caso di intersezioni isolate la valutazione del livello di saturazione può essere fatta sulla base dei valori massimi di flusso misurati nell'arco della giornata e dei tempi di verde del piano semaforico. Per l'intersezione oggetto di studio, come già detto, sono state svolte piccole verifiche approssimative per il grado di saturazione e per la lunghezza delle code agli approcci semaforizzati; se ne riporta una tabella riassuntiva.

Posto che,

Capacità delle singole corsie pari a 1800 veic/hr;

Tempo di giallo di 4 secondi;

Tempo di ciclo di 110 secondi.

Manovra	1	2	3	4	5	6 dx	6 dr
f	319	433	29	122	114	51	494
t_v	55	83	17	16	16	110	110
C_s	900	1358	278,2	261,8	261,8	1800	1800
DoS	35,44	31,88	10,42	46,60	43,54	2,83	27,44
t_r	51	23	89	90	90	0	0
t_{av}	11,29	8,31	124,1	29,51	31,58	70,59	7,29
Q	5	3	1	3	3	0	0

Tab. 2.18 – Tabella riassuntiva dei valori indicativi di verifica per grado di saturazione e numero di veicoli in coda

dove,

f : flusso in transito al ramo (veic/hr);

t_v : tempo di verde previsto (sec);

C_s : capacità dell'approccio relativo al tempo di verde associato, valutato come

$$C_s = \frac{\text{Capacità corsia} \cdot \text{Tempo di verde}}{\text{Tempo di ciclo}} \quad (\text{veic/hr});$$

DoS : grado di saturazione, valutato come $DoS = \frac{f}{C_s} \cdot 100$ (%);

t_r : tempo di rosso (sec);

t_{av} : intertempo tra i veicoli in arrivo all'approccio¹, valutato come

$$t_{av} = \frac{3600}{f} \quad (\text{sec});$$

Q : numero approssimato di veicoli in coda, valutato come

$$Q = \frac{\text{Tempo di rosso}}{t_{av}} \quad (\text{veic}).$$

Risulta che tutti i rami sono in regime di sottosaturazione e non si presentano eccessivi problemi dovuti alla lunghezza delle code.

Sempre in questa situazione di verifica sono da valutare i ritardi per i veicoli in modo da individuare il livello di servizio dell'intersezione; tale valutazione può essere effettuata utilizzando uno dei molteplici modelli proposti per la valutazione dei ritardi. Ad esempio si può fare riferimento alla metodologia proposta dal manuale americano HCM (*Highway Capacity Manual*). La valutazione dovrebbe essere effettuata in rapporto allo stato esistente, in modo da evidenziare i benefici attesi dall'introduzione o dalla modifica dell'impianto semaforico.

¹ Viene considerato un flusso di tipo uniforme all'approccio.

La valutazione del funzionamento di una rete semaforizzata, in termini di tempi persi per veicolo e di stima delle fermate, costituisce un problema più delicato e richiede in genere l'uso di modelli di tipo simulativo. Uno dei software maggiormente utilizzati in questo contesto è TRANSYT, che può essere utilizzato sia per la valutazione di una situazione esistente, sia per la determinazione del piano di coordinamento di una rete. È opportuno sottolineare che l'utilizzo di questi strumenti di analisi richiede una particolare conoscenza delle loro prestazioni e dei loro limiti di impiego.

A questo proposito si è implementato il modello dell'intersezione studiata con il software TRANSYT 14 al fine di valutare gli indici di prestazione ottenuti tramite l'esecuzione dei piani redatti in via analitica presso il Comune e quelli uscenti dal processo di ottimizzazione utilizzato dal software per lo stesso piano semaforico.

2.3 – TRANSYT 14

Il software TRANSYT (*TRAffic Network Study Tool*) produce un'ottimizzazione offline dei parametri di regolazione di una rete di intersezioni (da semplici intersezioni isolate fino a grandi reti regolate e coordinate), durata del ciclo, tempi di verde, sfasamenti, offset sulla base di una serie di dati storici. È stato progettato per essere utilizzato nella valutazione di intersezioni e rotatorie regolate (utilizzate molto in Inghilterra), rotatorie parzialmente regolate, ma anche per qualsiasi altra intersezione a regime di priorità. L'output finale fornisce informazioni sulla rete: i ritardi, il numero di fermate, le velocità e i consumi di carburante.

Il metodo si basa su alcune ipotesi relative al modello di traffico:

- tutte le intersezioni della rete sono controllate da segnali o da regole di priorità;
- tutti i segnali operano con un tempo di ciclo comune o con un suo multiplo;
- i flussi entranti nella rete, i flussi tra le intersezioni ed i flussi di svolta alle intersezioni sono noti e costanti;
- gli arresti e le partenze dei veicoli sono istantanei.

Il funzionamento di questo software è caratterizzato da due elementi principali: il modello di traffico e il processo di ottimizzazione dei segnali. Vediamo qui di seguito uno schema del funzionamento.

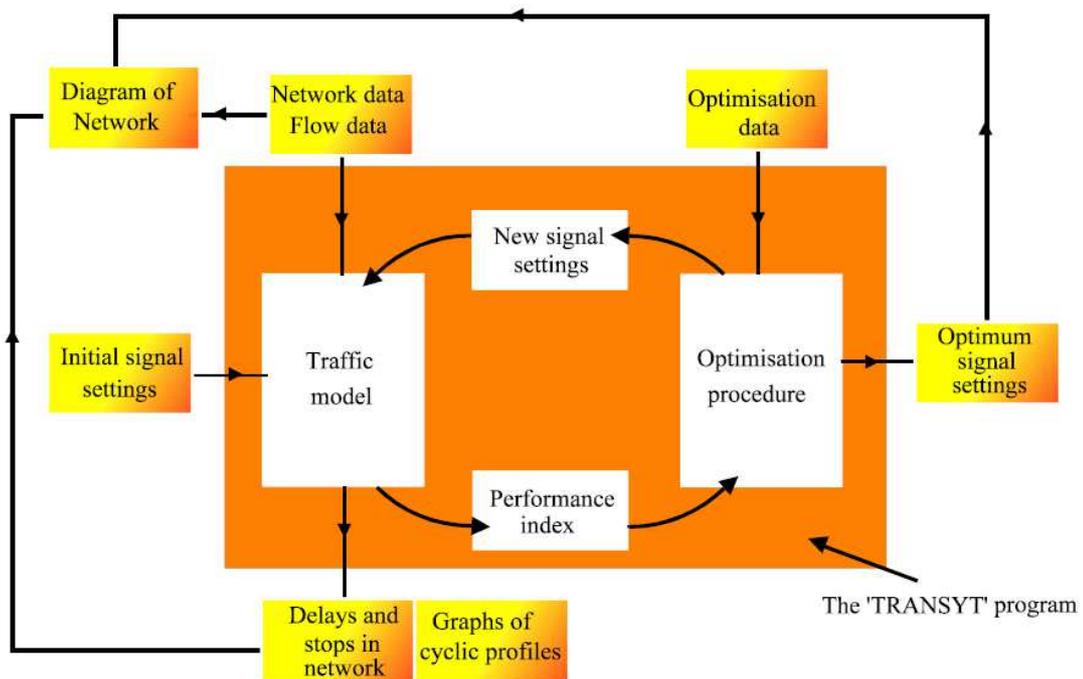


Fig. 2.32 – Schema di funzionamento del software commerciale TRANSYT 14 [4]

Il modello di traffico rappresenta il comportamento dei veicoli in una rete di strade nella quale una o più intersezioni sono controllate da un impianto semaforico. Questi modelli differiscono per alcune particolari caratteristiche che permettono al software di modellare qualsiasi tipologia di comportamento che si debba valutare. Il modello del traffico rientra nel più generale modello della rete, nel quale si tiene conto anche della schematizzazione geometrica della rete e dell'impostazione dei regolatori semaforici.

Il processo di ottimizzazione invece, ricerca, utilizzando degli algoritmi iterativi, una configurazione ottimale dei parametri di regolazione che minimizzi l'indice di prestazione *PI* (*Performance Index*). Tale indice è una misura della qualità del deflusso nell'intersezione ed è definito dalla somma del ritardo totale e del numero degli arresti, pesati in maniera opportuna.

Approfondiamo ora questi due aspetti così importanti per il funzionamento del software che in parte devono essere impostati, sulla base di scelte di progetto, da chi lo utilizza.

2.3.1 – Il modello della rete

Nella realizzazione del modello si devono eseguire tre operazioni principali:

- La schematizzazione geometrica dell'intersezione o della rete da studiare;
- L'impostazione dei parametri relativi al modello di traffico che si vuol descrivere nei diversi rami;
- L'impostazione della regolazione semaforica dell'intersezione.

2.3.1.1 – La schematizzazione geometrica

La schematizzazione geometrica dell'intersezione viene affrontata utilizzando l'editor NetCon (*Network Construction Editor*), strumento messo a disposizione dal software che consente la descrizione dei rami dell'intersezione attraverso l'uso di link o Traffic Streams (TS).

Il rapporto tra corsie reali e le corsie schematizzate in TRANSYT è generalmente di uno a uno, quindi risulta piuttosto semplice definirle all'interno del modello.

La relazione tra le corsie di traffico reale e i link di TRANSYT dipende da come il traffico utilizza le corsie della strada, mentre nel caso delle TS, essendo costituite da una o più corsie di traffico, la schematizzazione del modello risulta più semplice.

Ogni singolo link o TS può essere quindi utilizzato per rappresentare una o più corsie, sempre che il traffico sia equamente distribuito nelle diverse corsie presenti e che il segnale utilizzato nella regolazione sia lo stesso; essi vanno a rappresentare ogni situazione di coda di interesse che si determina nella rete (per code banali, di pochi veicoli, non è necessario garantire un link o TS separato), pertanto la rappresentazione tramite link o TS della rete esige una conoscenza dettagliata dei flussi di traffico che attraversano la rete stessa. Vediamo la schematizzazione di una porzione di rete fatta con l'utilizzo di link e TS.

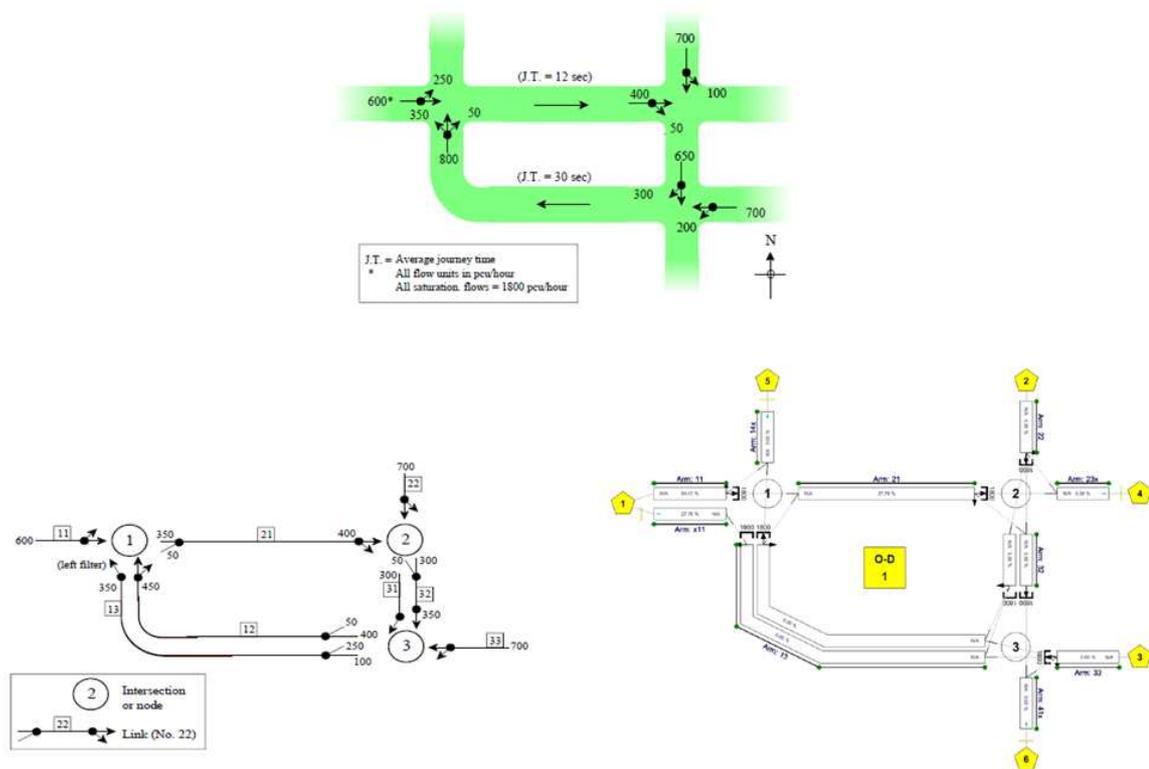


Fig. 2.33 – Differenze di schematizzazione della stessa intersezione con i link (a sx) e le TS (a dx) [4]

È evidente come per le TS la rappresentazione dell'intersezione risulti più realistica poiché è obbligatorio l'utilizzo delle corsie in uscita dall'intersezione. Per il caso studio si è optato per l'utilizzo di TS, con l'unica eccezione per gli attraversamenti pedonali che devono essere impostati come *pedestrian link* come vedremo in seguito. Tutte le TS sono definite con un numero progressivo (da 1 a 20) per le strade con traffico normale, mentre per le corsie riservate al tram vengono definite dal 100 al 103. I due link relativi ai pedoni sono definiti con i numeri 51 e 52.

Per facilitare l'inserimento dei rami al fine di schematizzare al meglio l'intersezione, è possibile inserire un'immagine di sfondo, la quale può essere un'immagine tratta da satellite, da un disegno in cad oppure da una semplice schematizzazione di essa.

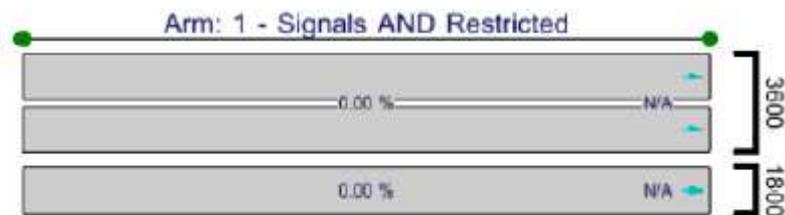
Ogni intersezione tra due o più TS viene rappresentata da un nodo numerato, rappresentato da un piccolo cerchio nero con linea continua per intersezioni regolate, mentre la linea è tratteggiata per intersezioni a regime di priorità.

Per quanto riguarda le TS, ogni braccio viene rappresentato da una linea sottile con dei pallini verdi alle estremità che ne consentono l'allungamento, l'accorciamento e lo spostamento; ciascun braccio può contenere più TS, che sono rappresentate invece

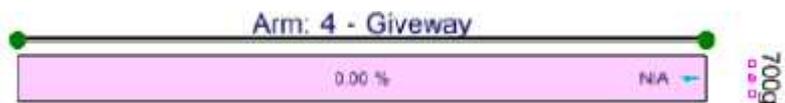
da un rettangolo. Le corsie che appartengono alla stessa TS sono identificate dalla maggior vicinanza rispetto al caso in cui siano separate ed inoltre condividono la stessa linea di arresto. Le linee di arresto sono rappresentate da delle parentesi posizionate a valle di ogni TS e il flusso di saturazione associato (impostato di default a 1800 PCU/hr) è posizionato in testa a ciascuna di esse.

È possibile inserire diverse tipologie di TS in base alle caratteristiche della strada che devono rappresentare, riconoscibili in base alle differenze cromatiche e alla linea di arresto. Le diverse tipologie sono:

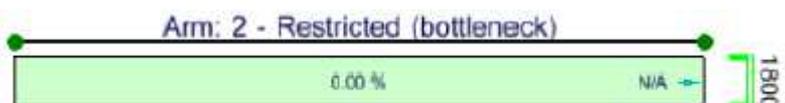
- *Signals and restricted*: rappresenta un approccio ad un'intersezione regolata con la possibilità di congestione; nel disegno viene rappresentato anche un esempio di TS a due corsie;



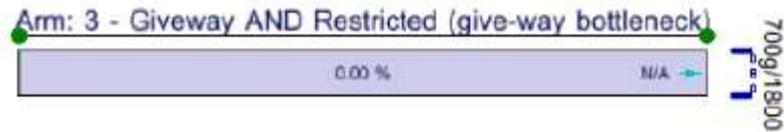
- *Giveway*: rappresenta un approccio ad un'intersezione non regolata nella quale deve dare la precedenza senza tener conto della possibilità di congestione;



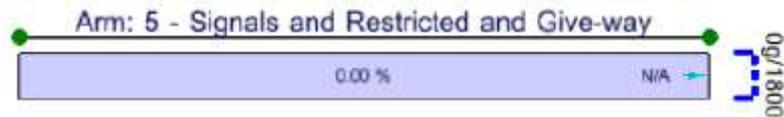
- *Restricted*: rappresenta un approccio ad un'intersezione non regolata nella quale ha diritto di precedenza e tiene conto della possibilità di congestione;



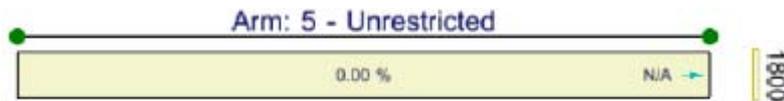
- *Giveaway and restricted*: rappresenta un approccio ad un'intersezione non regolata nella quale deve dare la precedenza e tiene conto della possibilità di congestione;



- *Signals and restricted and giveaway*: rappresenta un approccio ad un'intersezione che può essere regolata oppure no in base alle esigenze dell'utente, nella quale si tiene conto della possibilità di congestione;



- *Unrestricted*: rappresenta un ramo in uscita che non tiene conto della congestione.



L'inserimento delle diverse TS in corrispondenza dei rami non conclude il lavoro di schematizzazione. L'insieme dei rami che definiscono i diversi percorsi (*Path*) che possono essere utilizzati dai veicoli, vengono opportunamente collegati tra loro tramite il comando *Connect Items*. Questi collegamenti che si creano tra i diversi rami della rete sono rappresentati con delle linee sottili rettilinee oppure, nelle svolte, curvilinee (fattore puramente estetico). È da ricordare che ogni link o TS può essere alimentato a monte da non oltre 8 link o TS.

La lunghezza degli archi non viene impostata in base alla scala di rappresentazione ma si deve modificare solo nel caso in cui sia necessario. Nei rami che entrano o escono dall'intersezione viene lasciato il valore impostato di default pari a 100 metri,

mentre per i rami interni è doverosa la sostituzione col valore effettivo di lunghezza del tratto per evitare errori nella fase di calcolo.

Un altro parametro che deve essere impostato è la destinazione d'uso di ogni singolo ramo, si deve cioè settare quali tipologie di traffico transitano in quel tratto: traffico normale, bus, tram o combinazioni delle precedenti. Questo comando è fondamentale per permettere al software di riconoscere la presenza di corsie riservate ai mezzi pubblici e per la definizione delle matrici O/D.

Una volta definita la geometria dell'intersezione si deve definire una matrice origine-destinazione (O/D) locale che serve per assegnare i flussi di traffico alla rete analizzata. Inserita la matrice, si devono definire i centroidi (rappresentati da dei pentagoni gialli numerati) che rappresentano le diverse zone di ingresso e di uscita dei flussi dalla rete analizzata; devono essere inseriti in prossimità dei rami che entrano ed escono e devono essere anch'essi collegati ai rami tramite il comando *Connect Items*.

Sono disponibili tre differenti matrici O/D, una per i veicoli normali, una per gli autobus e una per i tram. Le caselle grigie stanno ad indicare la mancanza di collegamento tra le zone per quella tipologia di veicolo.

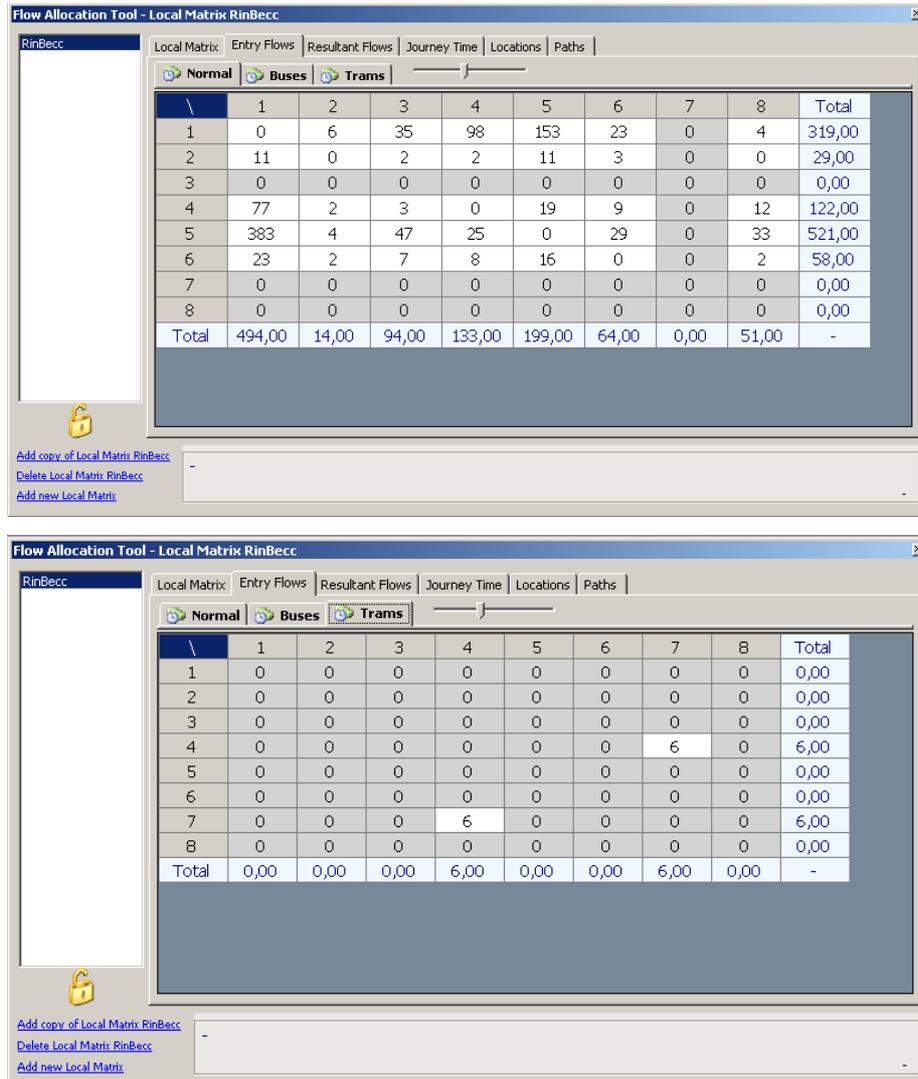


Fig. 2.34 – Matrici di Origine-Destinazione per l'intersezione oggetto di studio; in alto: matrice O/D per i veicoli ordinari; in basso: matrice O/D per i veicoli tranviari

Nel caso studio viene inserita la matrice O/D fornita dal Comune per rappresentare il traffico normale, mentre per la matrice relativa al tram si considera il passaggio ogni 10 minuti per senso di marcia, come previsto dagli orari di esercizio previsti dal progetto.

Attraverso il NetCon è possibile effettuare anche l'introduzione dei regolatori semaforici presenti nella rete. Essa avviene attraverso l'inserimento di *Controller Stream*, elementi rappresentati da un cubo con all'interno il numero identificativo dell'intersezione da regolare. In questa fase si definiscono solamente quali sono i rami interessati dalla regolazione ed il collegamento al *Controller Stream* viene effettuato anche in questo caso con lo strumento *Connect Items*.

Svolti tutti i passaggi descritti finora, il processo di schematizzazione è da ritenersi concluso. La rete studiata si presenta come di seguito.

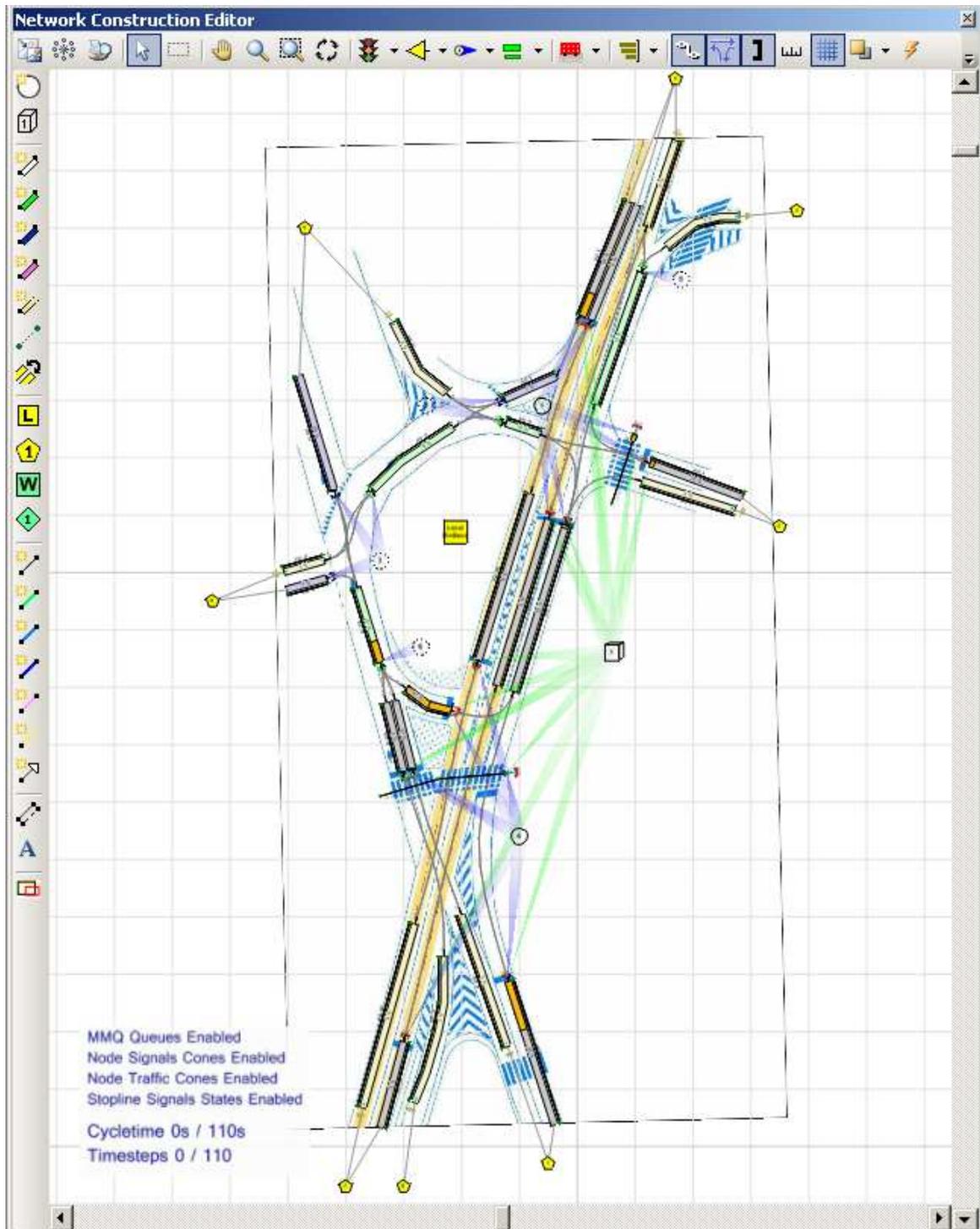


Fig. 2.35 – Schematizzazione attraverso lo strumento NetCon di TRANSYT dell'intersezione oggetto di studio

2.3.1.2 – Il modello del traffico

Prima di definire i diversi modelli di traffico che possono essere descritti attraverso TRANSYT, è necessario fare alcune precisazioni:

1. i flussi di traffico che interessano l'area della rete dove sono posizionati i regolatori semaforici hanno una natura ciclica;
2. tutti i semafori della rete hanno un ciclo comune (oppure metà, un terzo, un quarto di quel valore) del quale sono conosciuti i dettagli delle varie fasi e dei tempi minimi di verde;
3. per ogni ramo di collegamento tra due intersezioni, o di svolta all'intersezione, il flusso di traffico, mediato su uno specifico periodo, è conosciuto e assunto costante.

Poste queste premesse, il software permette di descrivere quattro modelli: modello di dispersione a plotoni (*Platoon Dispersion Model – PDM*), modello di trasmissione delle celle (*Cell Transmission Model – CTM*), il modello di dispersione a plotoni congestionati (*Congested Platoon Dispersion Model – CPDM*) e il modello di dispersione a plotoni veloce (*Quick PDM*). Ciascun modello ha i suoi vantaggi e svantaggi.

Platoon Dispersion Model – PDM

Il modello PDM è adatto a tutti i tipi di rete ed ha il vantaggio di essere in grado di modellare la dispersione dei plotoni di traffico lungo i link (o TS), ma non è in grado di valutare il rigurgito della congestione alle intersezioni precedenti causato dai blocchi di traffico. Il periodo di tempo analizzato viene diviso in tanti *steps*, solitamente di un secondo, che vengono utilizzati in maniera differente in base al tipo di modello da descrivere e, in questo caso specifico, i calcoli sono effettuati sulla base di valori medi della domanda di traffico e delle code per ognuno di questi *steps*. I valori di traffico in arrivo vengono raccolti e rappresentati attraverso degli istogrammi chiamati *cyclic flow profiles*: in TRANSYT tutti i calcoli che vengono svolti dipendono da questi profili. Non viene fatta alcuna rappresentazione di singoli veicoli, ma si assume che i profili siano riferiti all'intero flusso e ripetuti per ogni ciclo di calcolo. Nella realtà però, i profili durante ciascun ciclo varieranno dal valore

medio a causa del comportamento diverso dei singoli veicoli, pertanto il software va a correggere questo effetto.

Sono definiti tre diversi tipi di profili di traffico che utilizzano diverse combinazioni di arrivi e partenze:

- *IN-profile* rappresenta il flusso di traffico che parte da un arco di monte in assenza di impedimenti e vuole arrivare alla linea di arresto dell'arco di valle;
- *OUT-profile* rappresenta il flusso di traffico che esce da un arco;
- *GO-profile* rappresenta il flusso di traffico che attraverserebbe una linea di arresto se ci fosse abbastanza flusso da saturare il tempo di verde.

I profili di traffico in ingresso su un ramo vengono spostati nel tempo e modificati durante il viaggio lungo il ramo stesso a causa delle diverse velocità dei veicoli, pertanto i plotoni di veicoli saranno parzialmente dispersi, e tale dispersione può essere variata ramo per ramo.

Utilizzando i profili come indicato finora, TRANSYT semplifica il comportamento del traffico. Sebbene non siano modellati i singoli veicoli, è possibile pensare che ogni veicolo proceda senza alcun ritardo su un ramo finché non incontra una linea di arresto. Se il veicolo incontra un segnale di rosso o una coda che non è ancora ripartita, si ferma istantaneamente. L'accodamento si presume che si localizzi in prossimità della linea di arresto dove i veicoli ripartono durante il verde effettivo con un'accelerazione istantanea fino a raggiungere la velocità di crociera.

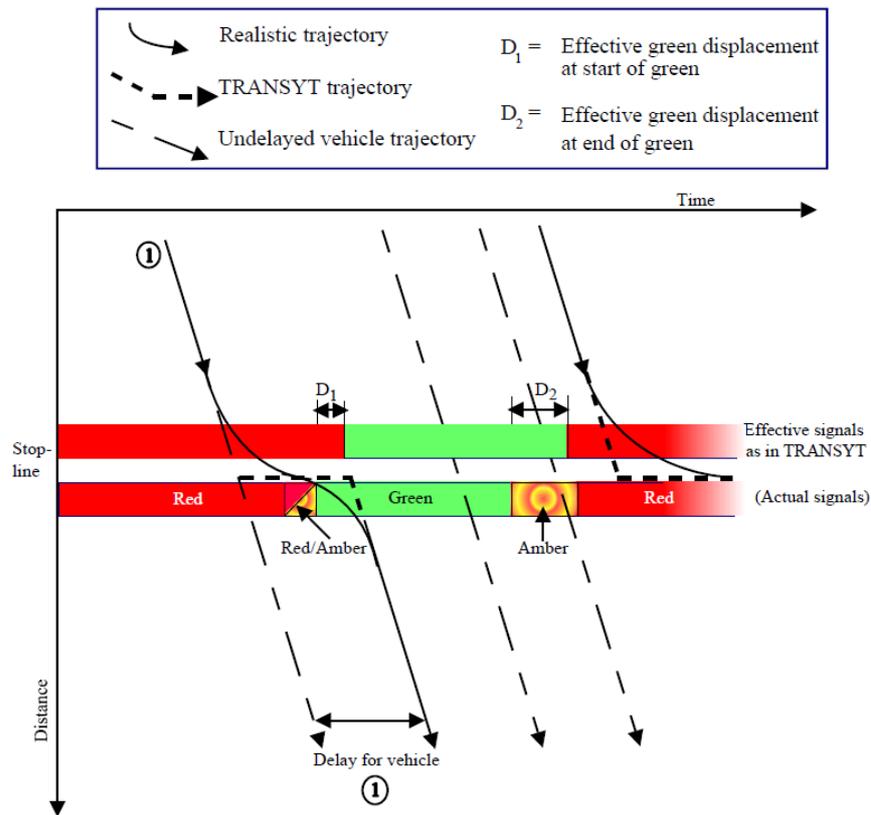


Fig. 2.36 – Descrizione dell'approssimazione del flusso dei veicoli in arrivo ad un approccio in TRANSYT [4]

Nonostante queste semplificazioni, il ritardo è uguale al tempo speso nella coda modellata, pertanto non sono presenti errori nella stima del ritardo.

Congested Platoon Dispersion Model – CPDM

Il modello CPDM è un adattamento del modello PDM, ha la capacità di modellare effetti di blocco dove il traffico in un determinato link (o TS) raggiunge il valore della capacità impedendo l'ingresso ad altri veicoli e bloccando potenzialmente anche altri rami della rete. Non è comunque adatto a modellare effetti di rigurgito a monte dell'intersezione, per far ciò si deve utilizzare il modello CTM come vedremo in seguito.

Quick PDM

Il modello Quick PDM è anch'esso un adattamento del modello PDM con la particolarità che non consente di avere diverse tipologie di modello nei diversi rami della stessa rete, cosa che invece gli altri modelli consentono di fare; il suo vantaggio

principale è la velocità in fase di calcolo, pertanto è indicato in quei casi in cui si ricerchi una soluzione in tempi rapidi e dove non sia richiesta la modellazione dei blocchi di traffico.

Cell Transmission Model – CTM

Il modello CTM è particolarmente utile per piccole reti con link (o TS) corti ed elevati flussi di traffico e il suo vantaggio principale è la sua abilità di modellare gli effetti di blocco del traffico che causano il rigurgito a monte della coda riducendo la capacità del nodo di monte. Anche il modello CTM utilizza gli *steps* come il modello PDM, ma essi sono discretizzati sia nel tempo che nello spazio. Quindi la strada è divisa in sezioni omogenee chiamate celle e la loro lunghezza è differente per ogni ramo.

Lo stato del traffico nella rete per un certo *step* è rappresentato dall'occupazione della cella (*cell occupancy*); il traffico viene trasmesso da una cella alla sua successiva secondo dei rapporti di flusso-densità, e il contenuto della cella viene aggiornato nel flusso di ingresso e uscita ad ogni *step*.

Le misure di prestazione della rete come fermate, code e ritardi hanno le stesse definizioni viste per il modello PDM, mentre il flusso di saturazione ha un significato diverso: in questo caso esso è basato sulla disponibilità del tempo di verde, cioè si tiene conto del tempo perso dovuto ai blocchi di traffico.

Quando si utilizza il modello CTM è necessario definire sia il flusso di saturazione sulla linea di arresto che il flusso di saturazione delle celle: il primo è definito come il flusso di saturazione standard (*Saturation Flow*) mentre il secondo indica il flusso di saturazione dei rami (*Cell Saturation Flow*). Quest'ultimo valore è necessario per limitare la progressione del traffico lungo l'intera lunghezza del ramo. In presenza di significative variazioni di flusso di saturazione lungo un ramo, devono essere inserite all'interno del ramo stesso delle "strozzature" (*Bottleneck*) per meglio descrivere la realtà.

Nel calcolo dei flussi con il modello CTM ci sono due componenti principali:

- Il calcolo del flusso da una cella alla sua successiva;
- Aggiornamento dell'occupazione della cella in base ai flussi calcolati.

Questo processo viene ripetuto per tutti gli *steps* che compongono il ciclo. Per tutte le celle intermedie di un ramo, il passaggio da una cella alla sua successiva dipenderà dal flusso presente nella cella di monte, dalla capacità e dallo spazio disponibile nella cella di valle.

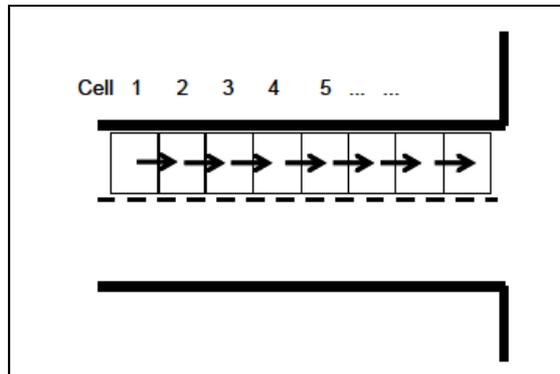


Fig. 2.37 – Descrizione di come avviene la divisione in celle all'interno del modello CTM []

Nel caso di un'intersezione nella quale i flussi provenienti dalla cella finale di ciascun ramo in ingresso vanno nella prima cella di ciascun ramo in uscita, in assenza di congestione il traffico in arrivo da ciascuna cella può entrare nelle relative celle di uscita; in presenza di congestione, quando cioè la prima cella di uno o più rami è parzialmente occupata, il flusso reale viene calcolato in modo tale che le prime celle dei link in uscita ricevano solo la quantità di traffico che possono contenere. Se la prima cella di un ramo in uscita è completamente occupata, si verifica il fenomeno del *blocking back*, ossia il fenomeno di una coda che tende a rigurgitare verso monte.

I parametri in input per definire i link con questo modello sono la velocità di crociera, il flusso di saturazione, l'onda di velocità del flusso di traffico e il grado massimo di occupazione. I primi due sono parametri modificabili dall'utente, mentre gli altri due vengono calcolati direttamente dal software.

Si nota una differenza sostanziale tra i modelli di natura PDM e il CTM. Le differenze principali tra i due modelli sono: la dispersione dei platon e gli effetti di congestione. Il PDM è appropriato per rami senza problemi di congestione, mentre il CTM è adatto per rami corti e congestionati. Quest'ultima situazione è tipica dei

centri abitati dove il viaggiare a flusso libero non è predominante e dove il traffico è più facile che subisca rallentamenti a causa della presenza di intersezioni regolate. Tutti i modelli, in ogni caso, descrivono una semplificazione del comportamento del traffico senza modellare i singoli veicoli e, nonostante questo, il software è in grado di restituire buone approssimazioni nei valori di ritardo.

La selezione del modello di traffico per ciascun link o TS è una delle decisioni più importanti da prendere nella costruzione del modello in TRANSYT. Scegliere il modello più adatto assicura la miglior rappresentazione possibile della rete.

Il modello di traffico può essere scelto o globalmente per l'intera rete o per ciascun singolo link o TS.

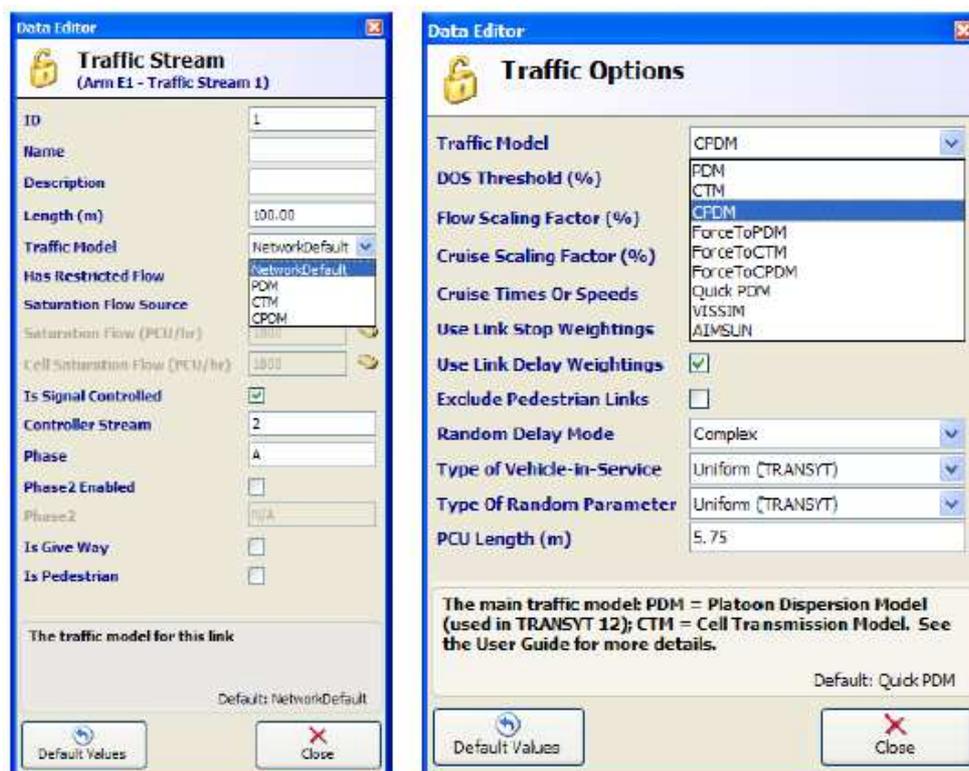


Fig. 2.38 – A sinistra: inserimento del modello del traffico per un singolo approccio; a destra: inserimento del modello del traffico per l'intera rete [4]

Il modello di traffico scelto per la rappresentazione dell'intersezione studiata è il classico PDM per tutti i rami.

Quanto detto finora vale anche per i mezzi pubblici, però lo studio viene svolto in modo separato rispetto al resto dei veicoli e vengono modellati utilizzando delle linee di arresto condivise e dei coefficienti di dispersione utilizzati sia nel caso di link che di traffic streams. L'aspetto fondamentale, in ogni caso, è quello di definire quali sono i percorsi utilizzati dai mezzi pubblici.

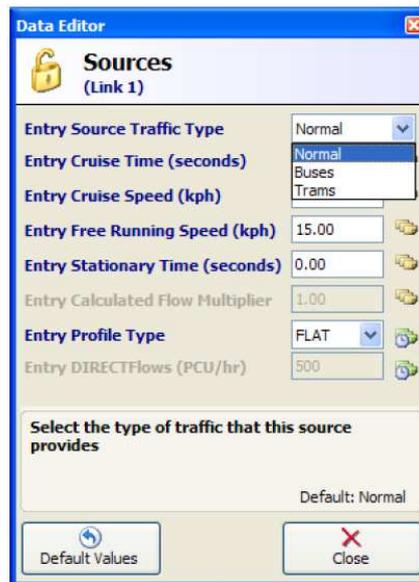


Fig. 2.39 – Selezione della tipologia di traffico utilizzata in un arco [4]

L'inserimento di attraversamenti pedonali può avvenire solamente con l'introduzione di link. È fondamentale sottolineare che, a questo proposito, i pedoni non hanno dei modelli specifici che li descrivono, pertanto vengono rappresentati con gli stessi modelli di traffico dei veicoli definiti in precedenza. Nella realizzazione di analisi semplificate TRANSYT permette di eliminare il contributo dei pedoni se non sono di interesse per il calcolo dell'indice di prestazione.

I pedoni vengono conteggiati come veicoli, pertanto ogni pedone corrisponde ad un PCU, non vengono valutati coefficienti di omogeneizzazione poiché la cosa importante è il rapporto tra il flusso reale e il flusso di saturazione. Come già accennato, non esiste un modello per i pedoni pertanto questi risultati devono essere interpretati con cautela: a meno che i flussi pedonali non siano molto alti, i ritardi e gli altri indicatori assumeranno valori piuttosto bassi; tuttavia i risultati possono dare ancora buone indicazioni sulle prestazioni, dando modo di fare valutazioni e

confronti sui passaggi pedonali. I risultati come il ritardo medio e la coda per i pedoni stanno ad indicare, il primo il tempo medio che un pedone medio deve attendere per attraversare la strada, il secondo il numero medio di pedoni che attendono il segnale di verde per attraversare la strada. Gli attraversamenti pedonali vengono modellati con il PDM.

2.3.1.3 – La regolazione semaforica

I regolatori semaforici, come detto in precedenza, vengono definiti già in fase di schematizzazione della rete attraverso l'inserimento di *Controller Streams*.

L'approccio adottato da TRANSYT per la definizione dei regolatori semaforici è quello di rappresentarli in modo da soddisfare le esigenze di utenti esperti (come ingegneri del traffico o pianificatori) e utenti nuovi, consentendo a tutti di impostare i propri segnali correttamente. Generalmente, i dati in ingresso per la definizione del segnale, come i vincoli di fase e i tempi di sicurezza, si riferiscono alle singole fasi e sequenze di fasi al fine di ottenere dei piani semaforici validi, senza la presenza di errori.

Una volta definito il tempo di ciclo, direttamente dall'utente nelle impostazioni generali senza alcuna possibilità per il software di modificarlo, la prima cosa da fare è la definizione della matrice dei tempi di sicurezza attraverso il comando *Intergreen Matrix Screen*. Il software non consente il calcolo automatico di questi valori estremamente importanti per la gestione in sicurezza del semaforo, pertanto si deve eseguire uno studio a parte e riportarne i risultati. Nel caso studiato si è riportata la matrice dei tempi di sicurezza definita nel calcolo analitico dell'intersezione eseguito in precedenza.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A	-				8						7	
B		-	5	5				5	5			
C		5	-					5	5			5
D		6		-								
E	5				-		5			5		
F						-	5			5	5	
G					14	8	-					13
H		8	9					-				
I		9	9						-			
J					9	10				-	10	
K	10					10	10			10	-	
L			8									-

Fig. 2.40 – Matrice dei tempi di sicurezza per l'intersezione oggetto di studio

Questa matrice è fondamentale poiché interpreta tutti i vincoli, in termini di tempo, per le diverse correnti in arrivo all'intersezione.

Definita la matrice dei tempi di sicurezza è possibile analizzare l'intersezione per valutare le manovre (*Phases*) che si devono alternare all'interno del ciclo semaforico. L'impostazione delle manovre, delle fasi, dei ritardi o degli anticipi e delle sequenze di fasi avviene attraverso il comando *Controller Streams Data*. Nella finestra *Phases*, si definiscono il numero e i nomi delle manovre (12 manovre, dalla A alla L, nel caso di studio) da utilizzare associandole poi ai diversi approcci dell'intersezione. È inoltre possibile imporre dei vincoli per il tempo di verde minimo delle singole manovre. Per le manovre principali A, B ed F viene imposto un tempo minimo di verde per ciclo di 40 secondi, mentre per le manovre del tram G, H, I e J viene imposto un tempo minimo di verde pari al massimo tempo di transito del tram attraverso l'intersezione pari a 18 secondi.

Controller Stream	Phase	ID	Name	Minimum Green (s)	Relative Start Displacement (s)	Relative End Displacement (s)
1	A	A	(untitled)	40	0	0
1	B	B	(untitled)	40	0	0
1	C	C	(untitled)	7	0	0
1	D	D	(untitled)	7	0	0
1	E	E	(untitled)	7	0	0
1	F	F	(untitled)	40	0	0
1	G	G	(untitled)	18	0	0
1	H	H	(untitled)	18	0	0
1	I	I	(untitled)	18	0	0
1	J	J	(untitled)	18	0	0
1	K	K	(untitled)	7	0	0
1	L	L	(untitled)	7	0	0

Fig. 2.41 – Finestra Controller Streams_Phases che rappresenta le manovre e i vincoli nella durata minima dei tempi di fase per l'intersezione oggetto di studio

Le singole manovre devono essere raggruppate all'interno delle fasi vere e proprie andando a definire una libreria di fasi (*Stage Library*) che servono per la costruzione del piano semaforico.

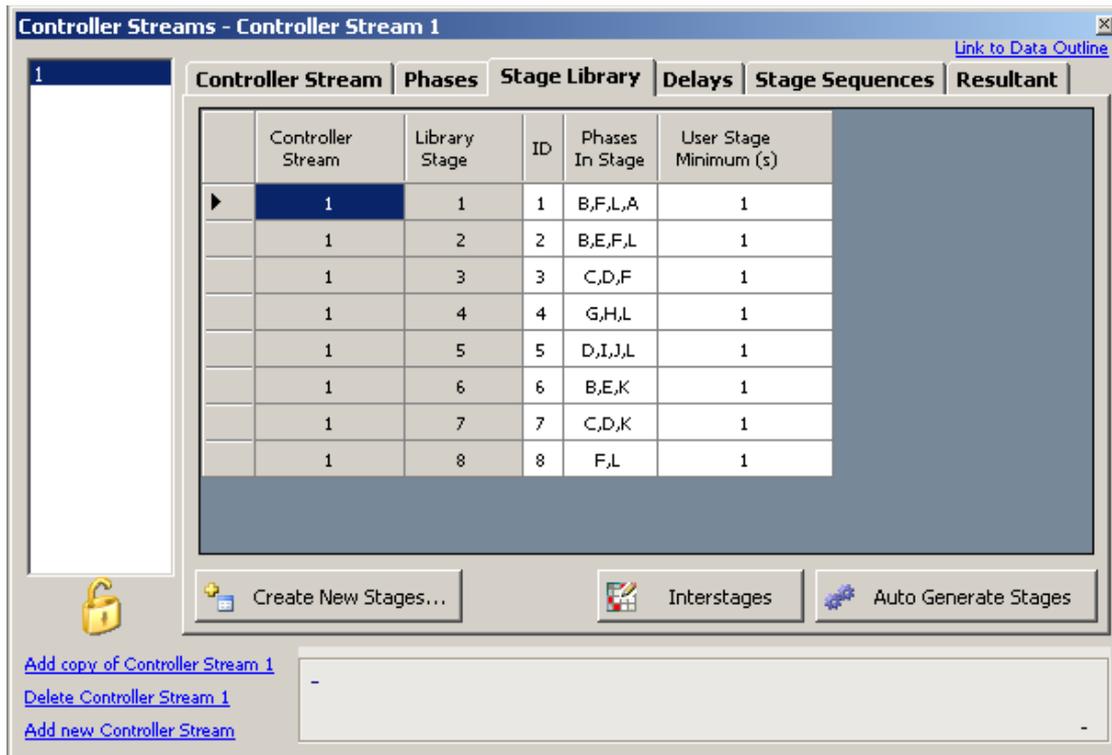


Fig. 2.42 – Finestra *Controller Streams_Stage Library* dove vengono definite tutte le fasi utilizzabili durante il piano semaforico

La finestra successiva, *Delays*, serve per la definizione di ritardi o anticipi di fase; l'impostazione da questa tabella non è molto pratica, è consigliabile definirli direttamente in modo grafico attraverso il *Timing Diagram*.

L'ultima finestra, *Stage Sequence*, serve, come dice il nome stesso, ad inserire la sequenza delle fasi all'interno del ciclo oggetto di studio. È possibile definire molte sequenze, ma ne può esser studiata solo una alla volta.

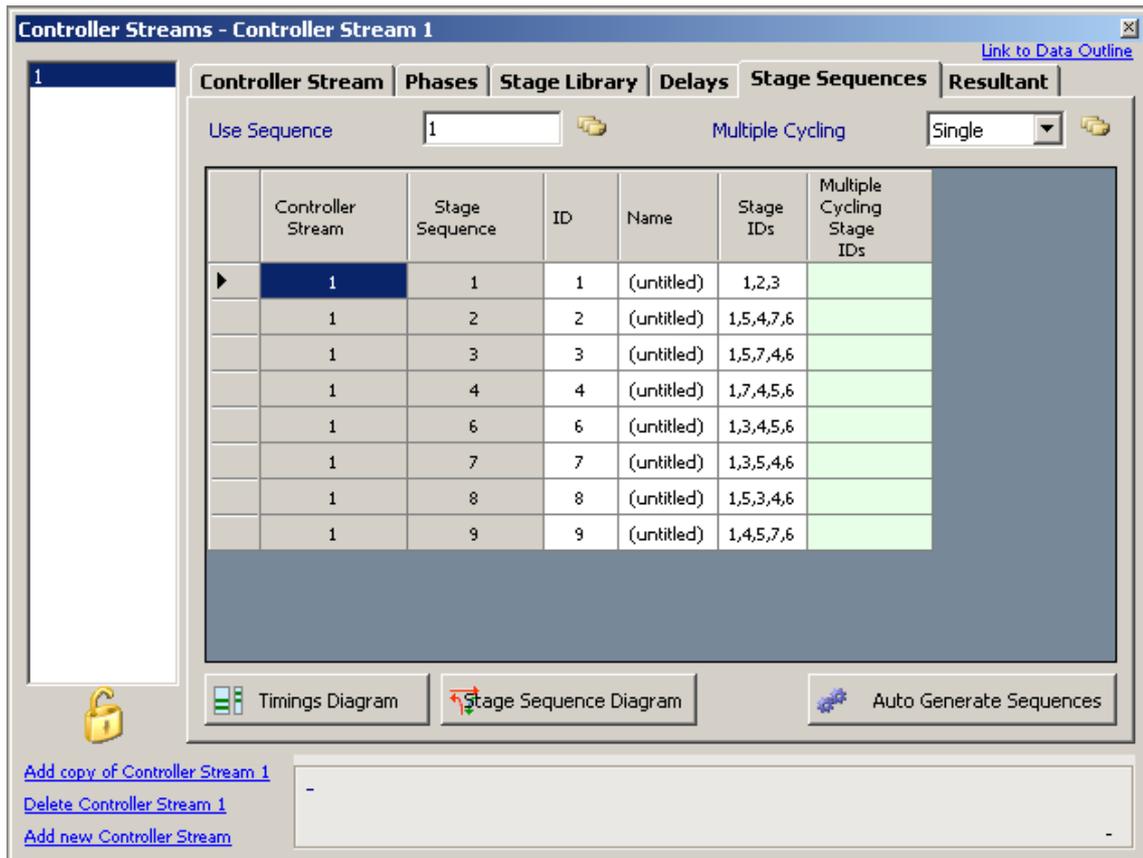


Fig. 2.43 – Finestra *Controller Streams_Stage Sequence* dove vengono definite le sequenze di fasi che generano il ciclo

L'impostazione di queste tabelle non consente in alcun modo di definire i tempi da assegnare alle diverse fasi (eccezione è fatta per i *Delays*), pertanto è possibile agire in modo molto più intuitivo attraverso il *Timings Diagram*, strumento grafico per la visualizzazione del piano semaforico.



Fig. 2.44 – Strumento *Timing Diagram* per la visualizzazione del ciclo semaforico

Il *Timings Diagram* mostra le fasi e le singole manovre che vengono eseguite, inoltre per ciascuna manovra viene visualizzato quale link o TS vi appartiene.

Attraverso questa interfaccia grafica, nella quale sono presenti i tempi di ciclo, è possibile andare a modificare in modo molto intuitivo i tempi delle singole fasi, inserire o togliere delle fasi modificando la sequenza che si sta studiando, eliminare delle manovre dalla fase corrente ecc.

Gli anticipi e i ritardi di fase sono visualizzati nel diagramma attraverso l'utilizzo di rettangoli più scuri che fuoriescono prima o dopo la casella che indica la fase stessa. Le linee verdi sottili tra una fase e la sua successiva indicano i tempi di sicurezza (giallo + tutto rosso) da rispettare; nel caso in cui non siano rispettati la linea diventa rossa e compare un messaggio di errore nell'apposito editor.

Un altro strumento messo a disposizione dal software è il *Stage Sequence Diagram*, nel quale vengono visualizzate le fasi che si susseguono all'interno del ciclo semaforico definito, segnando in rosso le fasi ferme e in verde le fasi che possono transitare.

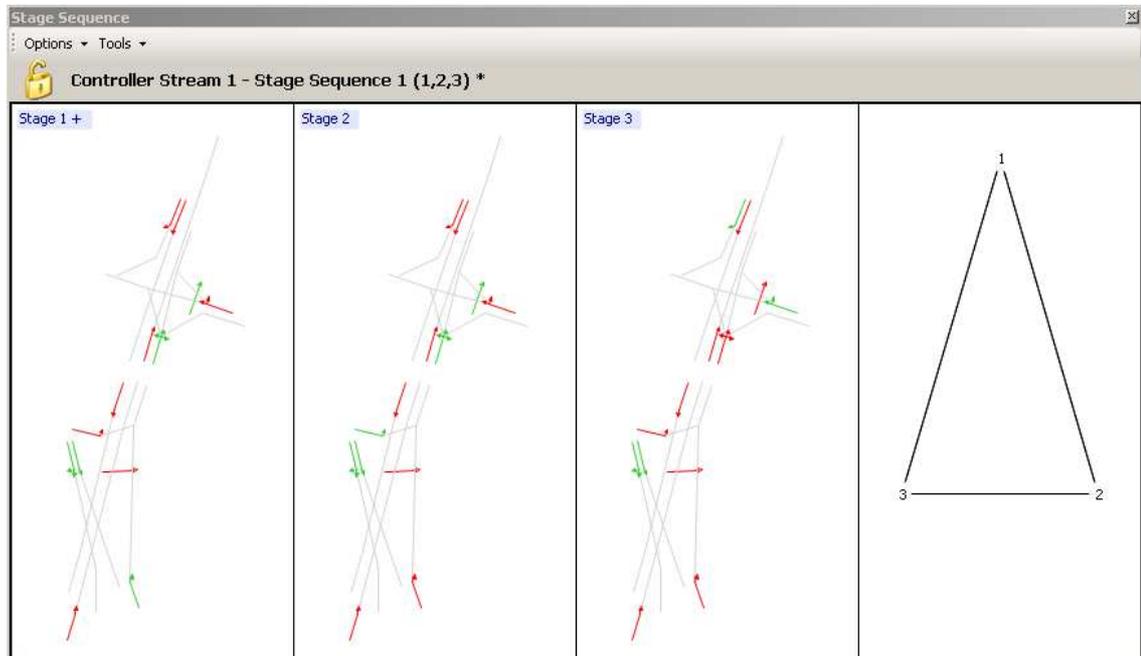


Fig. 2.45 – Strumento Stage Sequence Diagram per la visualizzazione della successione delle fasi nel ciclo

2.3.2 – Il processo di ottimizzazione

Il processo di ottimizzazione che utilizza TRANSYT permette di modificare i tempi di fase di un ciclo semaforico per ridurre al minimo il numero di veicoli che si fermano in coda e i tempi di ritardo. L'ottimizzatore altera sia il valore dell'offset (per reti con più intersezioni regolate e coordinate) che la durata dei singoli periodi di verde per ogni fase. Il tempo di ciclo non può essere migliorato direttamente nel processo di ottimizzazione, ma il suo valore ottimo può essere valutato attraverso lo strumento *Cycle Time Optimizer* che genera un grafico che valuta i diversi tempi di ciclo per l'intersezione, o per la rete che si sta studiando, e permette di selezionare il tempo migliore. Definito il tempo di ciclo è possibile modellare il piano semaforico e successivamente avviare il processo di ottimizzazione. Non è stato utilizzato questa

opzione poiché l'obiettivo principale era quello di comparare diversi piani a parità di durata del ciclo.

È da sottolineare la possibilità che dà il software di escludere dal calcolo dell'indice di prestazione PI singoli link o TS che possono non interessare; lo stesso vale, ma può essere fatto anche a livello globale, per gli attraversamenti pedonali.

Si è parlato di un indice di prestazione che si determina attraverso una combinazione pesata di ritardi e fermate dei vari link o TS presenti all'interno della rete. Esso rappresenta il costo in termini monetari della congestione che si verifica ed è definito come segue:

$$PI = \sum_{i=1}^N \left(W \cdot w_i \cdot d_i + \frac{K}{100} \cdot k_i \cdot s_i \right)$$

dove,

N : numero dei rami (link o TS);

W : equivalente monetario per ora di ritardo per autovettura equivalente (PCU);

K : equivalente monetario per 100 fermate di autovetture equivalenti (PCU);

w_i : peso del ritardo sul ramo i ;

d_i : ritardo sul ramo i ;

k_i : peso del numero di arresti nel ramo i ;

s_i : numero di arresti sul ramo i .

La riduzione del ritardo e del numero di fermate a zero, starebbe ad indicare che ogni veicolo che si avvicina ad un semaforo riuscirebbe a trovare il segnale a verde potendo procedere senza accumulare ritardo e senza aver bisogno di fermarsi, effettuando quindi il proprio viaggio nel minor tempo possibile. Chiaramente non è possibile eliminare ogni ritardo ed ogni fermata all'interno di una rete o di un'intersezione, però il programma ricerca la combinazione di parametri che riduce al massimo tali valori.

Nel caso studio non vengono modificati i pesi e i controvalori monetari delle fermate o dei ritardi per il calcolo del PI , poiché quest'ultimo ci interessa solamente come valore indicativo. Ci interessano principalmente i valori di ritardo e di fermata come vedremo nel prossimo capitolo.

I risultati possono essere generati avviando il processo di ottimizzazione oppure senza avviarlo, in quest'ultimo caso si mantiene il piano semaforico inserito.

La regolazione ottima dei segnali è ottenuta tramite l'applicazione di algoritmi di ottimizzazione applicati ad una configurazione nota del piano semaforico. TRANSYT si appoggia a tre diversi algoritmi: *Hill Climbing*, *Shotgun Hill Climbing* e *Simulated Annealing*.



Fig. 2.46 – Finestra di scelta dell'algoritmo di ottimizzazione [4]

La scelta dell'algoritmo di ottimizzazione si basa su una mediazione tra prestazione e velocità: *Hill Climbing* è il più rapido e sebbene restituisca spesso buoni risultati, gli altri spesso ne restituiscono di migliori, *Simulated Annealing* è il più lento di tutti ma restituisce i risultati migliori, mentre *Shotgun Hill Climbing* è una via di mezzo tra i due sia in termini di prestazioni che di velocità. La velocità di convergenza e il grado di prestazione di questi ultimi due metodi dipendono dal numero di parametri da settare e dalla tipologia di rete. Di seguito se ne descrive il funzionamento.

Hill Climbing

L'algoritmo *Hill Climbing* è noto per la sua caratteristica di essere un ottimizzatore locale, cioè non necessariamente la soluzione ottenuta risulta la migliore in assoluto. Per questo motivo, TRANSYT nel processo di ottimizzazione va ad utilizzare alterazioni dei parametri sia grandi che piccole.

I due parametri principali da ottimizzare in una rete o in una singola intersezione sono l'offset e i tempi di verde. Esistono tre tipologie di calcolo: solo offset, offset e tempi di verde e una variante estesa della precedente.

La prima tipologia permette di valutare solo l'ottimizzazione degli offset (*offsets only*) per una rete: si procede con il calcolo dell'indice di prestazione della rete per un piano semaforico valido, successivamente il programma altera l'offset di un semaforo variandolo di un incremento predeterminato e ricalcola il *PI*. Se il *PI* si è

ridotto, l'offset viene alterato ulteriormente nella stessa direzione e dello stesso incremento finché non si raggiunge il valore minimo; se al contrario, il valore di *PI* cresce allora la direzione è sbagliata e si procede alterando il valore dell'offset nella direzione opposta finché non si raggiunge il valore minimo di *PI*.

Gli incrementi che si applicano risultano essere delle percentuali del tempo di ciclo e vengono raccolti su una lista in numero non superiore a 15. Il programma calcola automaticamente il valore degli incrementi in secondi per applicarli al processo di ottimizzazione. Per assicurare che la lista possa contenere intervalli di incremento da 1 secondo fino al valore massimo (non superiore al 50% del tempo di ciclo), il valore 1 all'interno della lista viene interpretato come un secondo e non come un valore percentuale. Gli incrementi raccomandati (e posti di default) per l'*offset only* sono:

15 40 15 40 15 1 1

L'incremento del 15% permette di valutare un ottimo locale, mentre quello del 40% permette di non rimanere intrappolati in quell'ottimo locale. Gli incrementi finali di un secondo permettono di valutare l'impostazione finale.

Nella seconda tipologia (*offsets and green splits*) si ottimizza il tempo di offset con lo stesso procedimento appena descritto, mentre i tempi di verde possono essere ottimizzati inserendo nella lista degli incrementi dei valori di segno negativo (in questo caso specifico "-1"); la presenza di valori negativi permette di alterare del valore definito dal modulo del numero inserito, tutti i tempi di verde seguendo le regole iterative già definite per gli offset. I tempi di cambio fase restano costanti.

Gli incrementi raccomandati (e posti di default) per l'*offsets and green splits* sono:

15 40 -1 15 40 15 1 -1 1

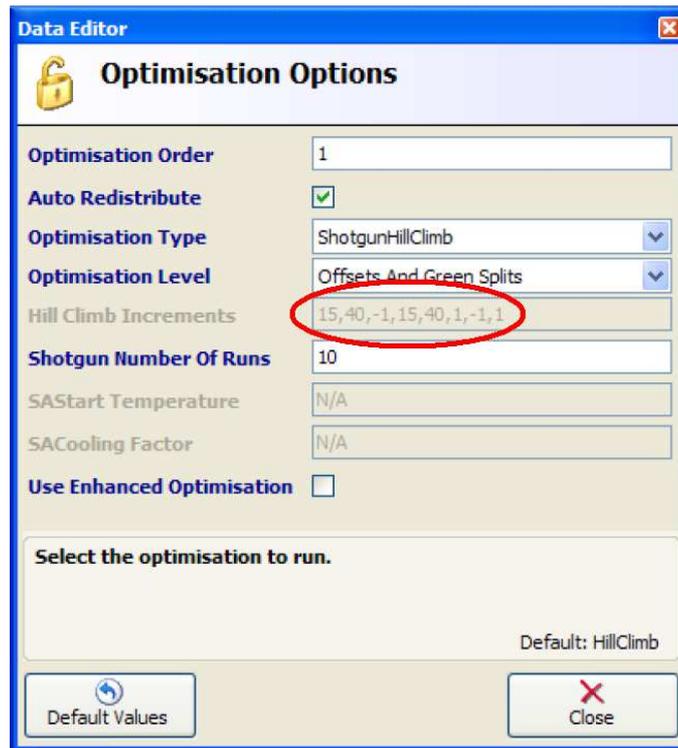


Fig. 2.47 – Finestra di scelta del processo di ottimizzazione con dettaglio della sequenza degli incrementi utilizzati [4]

La terza tipologia (*extended – offsets and green splits*) funziona sulla falsariga della precedente, l'unica differenza è data dal numero di incrementi che applica e dal fatto che gli incrementi utilizzati per il miglioramento dei tempi di verde possono avere valori differenti a “-1”. Gli incrementi raccomandati (e posti di default) per l'*extended – offsets and green splits* sono:

15 40 -1 15 40 15 1 -1 1 -15 -5 -1 15 1

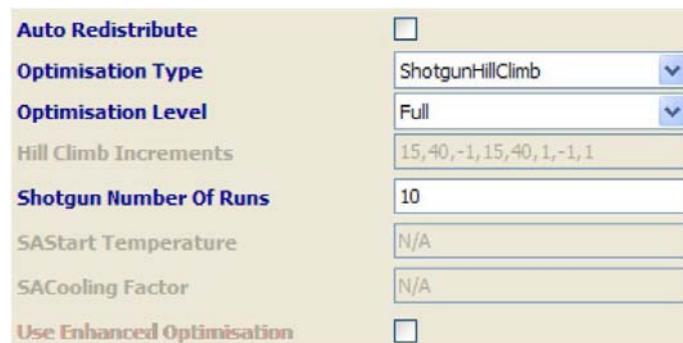
Esiste anche la possibilità di impostare l'ottimizzazione su “*Custom*”, e in questo caso è l'utente che può decidere la lista degli incrementi da applicare, sapendo che l'assenza di numeri negativi nella lista non permette l'ottimizzazione dei tempi di verde.

Shotgun Hill Climbing

L'algoritmo di ottimizzazione *Shotgun Hill Climbing* va a studiare diversi piani semaforici iniziali validi scelti più o meno casualmente e li esegue uno dopo l'altro processandoli con l'algoritmo *Hill Climbing* standard. L'utente decide il numero di esecuzioni (*Shotgun Number of Runs*) che si vogliono effettuare ed ogni ipotesi che

restituisce un valore di PI migliore dei precedenti va a sostituire la soluzione esistente.

È stato dimostrato che da valori di piani semaforici iniziali differenti si ottengono gli stessi risultati ottimizzati, pertanto questa semplice tecnica risulta un modo efficace per migliorare il processo globale di ottimizzazione. Spesso la maggior quantità di tempo speso per effettuare un maggior numero di iterazioni viene ripagato con dei risultati significativamente migliori. Il numero di iterazioni è fissato di default a 10.



The image shows a software interface for configuring the Shotgun Hill Climbing algorithm. It consists of several rows of settings:

- Auto Redistribute:** A checkbox that is currently unchecked.
- Optimisation Type:** A dropdown menu set to "ShotgunHillClimb".
- Optimisation Level:** A dropdown menu set to "Full".
- Hill Climb Increments:** A text input field containing the values "15,40,-1,15,40,1,-1,1".
- Shotgun Number Of Runs:** A text input field containing the value "10".
- SASStart Temperature:** A text input field containing "N/A".
- SACooling Factor:** A text input field containing "N/A".
- Use Enhanced Optimisation:** A checkbox that is currently unchecked.

Fig. 2.48 – Finestra di scelta dell’algoritmo Shotgun Hill Climbing [4]

In pratica questo valore risulta un buon compromesso tra velocità e prestazioni.

Simulated Annealing

La scelta di questo algoritmo va a modificare completamente il funzionamento dell’ottimizzatore. Si tratta di un modello che può essere efficace nel trovare un set di buoni piani semaforici entro un tempo ragionevole, piuttosto che trovare necessariamente il migliore. Il nome deriva dalla metallurgia dove un materiale riscaldato viene raffreddato per ottenere una struttura che risulta migliore in base alla temperatura a cui viene riscaldato e in base alla velocità di raffreddamento.

Come per il precedente modello, anche in questo caso si parte col calcolare l’indice di prestazione PI da una serie di piani semaforici che rispettano i vincoli posti dall’utente; successivamente il programma modifica i tempi come dettato dalla logica di ottimizzazione e ricalcola il PI della rete andando a sostituire la soluzione esistente ogni volta che l’indice ne risulti ridotto.

I piani semaforici vengono aggiornati in questo modo: i due termini “SA Start Temperature” e “SA Cooling Factor” permettono all’utente di controllare il processo

di ottimizzazione. Più è alto il valore della temperatura di inizio, più lungo sarà il processo; mentre il fattore di raffreddamento determina il valore per il quale la temperatura scende al suo valore minimo, quindi più è alto questo valore minore è il tempo di ottimizzazione. L’inserimento di valori troppo alti però non dà al processo di ottimizzazione il tempo adatto per aggiornare al meglio la soluzione restituendo dei risultati scadenti. I valori posti di default forniscono un buon compromesso tra il miglioramento del risultato rispetto ad un *Hill Climbing* standard e il maggior tempo che si deve destinare al calcolo. I valori di default sono espressi nell’immagine sottostante.

Auto Redistribute	<input type="checkbox"/>
Optimisation Type	SimulatedAnnealing
Optimisation Level	Full
Hill Climb Increments	N/A
Shotgun Number Of Runs	N/A
SASstart Temperature	300.00
SACooling Factor	100.00

Fig. 2.49 – Finestra di scelta dell’algoritmo di ottimizzazione *Simulated Annealing* [4]

Nel caso studio si è utilizzato l’algoritmo di ottimizzazione *Hill Climbing* con l’ottimizzazione degli offset e dei tempi di verde per ridurre al minimo la durata del calcolo, poiché essendo un’intersezione unica isolata i risultati ottenuti sono soddisfacenti.

Capitolo 3 – Analisi dei risultati del caso studio

3.1 – Descrizione delle simulazioni effettuate

Definito il modello in TRANSYT, è possibile studiare l'intersezione analizzandola in presenza (o assenza) del tram per valutare le condizioni di deflusso del traffico privato.

Il periodo di riferimento della giornata descritto è il picco del mattino (7.00-9.30), per il quale viene riportata la matrice O/D dei veicoli del Comune, mentre per la matrice relativa al tram si fa riferimento ad una frequenza di passaggio costante (circa ogni 10 minuti per senso di marcia come previsto dal progetto).

Per concentrare l'attenzione sulle conseguenze dovute al passaggio del tram, si omette dai piani valutati l'attraversamento pedonale a chiamata al centro dell'intersezione (link 51), supponendo pertanto che nel periodo di osservazione dell'esperimento non vi sia alcuna chiamata.

Nella fase di schematizzazione del tram, e pertanto della sua gestione in regime di priorità, al fine di ovviare ad alcuni limiti del software disponibile sono state adottate delle semplificazioni; il software TRANSYT 14 opera basandosi su valori medi, pertanto la gestione di situazioni dipendenti da una domanda specifica come quella del tram non sono direttamente modellabili, inoltre prevede una lunghezza massima del ciclo di 500 secondi. Per ovviare a questi inconvenienti, è stato necessario porre alcune condizioni in fase di definizione del periodo di osservazione, nello specifico, si è scelto un tempo di osservazione di 440 secondi, tempo che ha permesso di realizzare quattro volte il ciclo standard (110 secondi), e di simulare il transito in entrambe le direzioni del tram con un intertempo di 220 secondi. Secondo queste ipotesi le chiamate dei tram avvengono in due precisi istanti: il tram da sud effettua la chiamata al secondo 140, mentre il tram da nord effettua la chiamata al secondo 360; in questi istanti il regolatore attiva il giallo per le diverse correnti veicolari al fine di chiudere le fasi attive; una volta terminato l'attraversamento del tram, il sistema riprende il regolare funzionamento.

Al fine di ottenere dei risultati omogenei per i quali sia possibile trarre delle conclusioni è fondamentale che l'istante di passaggio del tram sia il medesimo in tutte le ipotesi implementate; esso risulta un vincolo indispensabile ai fini dello studio che si sta realizzando.

Nel dettaglio sono state valutate le seguenti alternative di piano:

- Hp 1 – Simulazione con piano semaforico del Comune in assenza di tram: ipotesi di schematizzazione del periodo di studio utilizzando il piano calcolato in Comune in assenza di tram (senza applicare gli strumenti di ottimizzazione) ripetuto quattro volte;
- Hp 2 – Simulazione con piano semaforico ottimo in assenza di tram: ipotesi di schematizzazione del periodo di studio utilizzando il piano ottenuto dal processo di ottimizzazione con TRANSYT per l'intersezione in assenza di tram² ripetuto quattro volte;
- Hp 3 – Simulazione con piano semaforico del Comune in presenza di tram: ipotesi di schematizzazione del periodo di studio utilizzando il piano dell'ipotesi Hp 1 con l'inserimento delle fasi tranviarie;
- Hp 4 – Simulazione con piano semaforico ottimo in presenza di tram: ipotesi di schematizzazione del periodo di studio utilizzando il piano dell'ipotesi Hp 2 con l'inserimento delle fasi tranviarie;
- Hp 5 – Simulazione con ottimizzazione del sistema in presenza di tram: ipotesi di schematizzazione Hp 4 avviando il processo di ottimizzazione³;

È evidente che le analisi tra i risultati ottenuti avverrà in modo omogeneo, confrontando le ipotesi che descrivono la stessa situazione, ad esempio Hp 3 con Hp 4 e Hp 5 oppure Hp 1 con Hp 2 ecc.

Al termine del processo di valutazione di ciascuna ipotesi, TRANSYT restituisce una serie di indicatori di prestazione come output: solamente una parte di essi risulta di

² Il tempo di ciclo utilizzato per l'ottimizzazione del piano è il medesimo utilizzato nel piano calcolato in comune ($C=110\text{ sec}$) per garantire l'omogeneità dei risultati.

³ L'utilizzo di questa strategia permette di ottenere un piano ottimale per l'intersezione che però non rispecchia le caratteristiche di un piano a tempi fissi come quello adottato nell'intersezione.

nostro interesse, pertanto i valori che vengono riportati nello studio e nei confronti effettuati risultano opportunamente selezionati.

3.2 – Descrizione degli indicatori di prestazione utilizzati

I risultati sono riferiti in parte all'intersezione globale e in parte alle prestazioni relative ai singoli rami che la compongono.

Per una miglior lettura dei dati e una maggior consapevolezza di cosa effettivamente rappresentino, se ne dà una breve descrizione.

3.2.1 – Indice di prestazione (*Performance Index – PI*) [€/hr]

L'indice di prestazione rappresenta il costo monetario complessivo a cui sono soggetti i veicoli in transito nell'intersezione o nella rete. Questo indice è determinato attraverso un'opportuna conversione in termini monetari del valore delle code presenti e degli arresti effettuati dai veicoli, sommando ad essi eventuali costi aggiuntivi (penalità) dovuti, ad esempio, a valori di coda superiori al limite fissato.

La formula estesa per il calcolo dell'indice di prestazione è riportata al *Par. 2.3.2*.

È bene ricordare che il processo di ottimizzazione si basa sulla minimizzazione di questo parametro.

3.2.2 – Grado di saturazione (*Degree of Saturation*) [%]

Il grado di saturazione (DoS) è un parametro importante poiché indica quanto il link o TS è prossimo alla sua capacità. Nella sua forma più semplice, ossia in assenza di sovrasaturazione e di effetti di blocco, il rapporto è il seguente:

$$DoS = \frac{\text{Total flow into link} \cdot \text{cycle time} \cdot 100 \text{ (per cent)}}{\text{Saturation flow} \cdot \text{effective green time}}$$

Tuttavia, è più semplice considerare il DoS in generale come:

$$DoS = \frac{\text{Total flow into link} \cdot \text{cycle time} \cdot 100 \text{ (per cent)}}{\text{Calculated Capacity}}$$

L'utilizzo della seconda equazione è giustificato dal fatto che non tutto il tempo di verde può essere utilizzato a causa dei possibili effetti di blocco a valle e dei

perditempo presenti ad ogni ciclo. La capacità calcolata [*PCU/hour*] rappresenta il tasso medio di traffico che può transitare su un ramo tenendo conto di tutti gli effetti che avvengono a valle, come ad esempio il blocco del traffico che preclude l'uscita dei veicoli dai rami di monte.

Il valore *Total flow into link* rappresenta il flusso di veicoli in ingresso che tiene conto degli effetti dell'eventuale sovrasaturazione presente nell'arco di monte (*entry flow*): maggiore è lo stato di sovrasaturazione a monte e minore può risultare il valore del DoS a valle. A differenza del *Demand flow*, che corrisponde all'intera domanda potenziale, l'*entry flow* corrisponde al flusso che può effettivamente arrivare al link o TS.

Un valore di DoS che supera il 100% indica la condizione di sovrasaturazione che implica lo sviluppo di una coda finché sussistono tali condizioni di deflusso.

3.2.3 – Livello di Servizio (*Signalled LOS*)

Il livello di servizio di un'intersezione semaforizzata è definito in termini di ritardo e rappresenta una misura degli effetti negativi nel ramo o nell'intersezione studiata relativi al comfort, al consumo di carburante e al tempo di tragitto opportunamente convertiti.

I ritardi possono essere misurati sul campo o valutati secondo una procedura standard come ad esempio quella proposta nel manuale americano HCM, procedura implementata in TRANSYT 14, che rappresenta una sintesi di esperienze professionali e di ricerca. Definiamo le caratteristiche attribuite ai diversi livelli di servizio.

Livello di servizio A: corrisponde a ritardi molto bassi, inferiori a 10 secondi per veicolo equivalente. I veicoli subiscono raramente interruzioni.

Livello di servizio B: corrisponde a ritardi compresi fra 10 e 20 secondi per veicolo equivalente. Questo livello corrisponde ad una buona progressione da parte dei veicoli. Il numero di veicoli che subiscono interruzioni è superiore al caso precedente.

Livello di servizio C: corrisponde a ritardi compresi fra 20 e 35 secondi per veicolo equivalente. Questo livello corrisponde ad una scarsa progressione da parte dei veicoli. Il numero di veicoli che si fermano è elevato, anche se parecchi di essi passano l'intersezione senza fermarsi.

Livello di servizio D: corrisponde a ritardi compresi fra 35 e 55 secondi per veicolo equivalente. In queste condizioni il livello di congestione si rende visibile. I ritardi risultano maggiori a causa dell'aumento del grado di saturazione. La maggior parte dei veicoli si ferma e la quota dei veicoli che riesce a passare senza essere arrestati decresce fortemente.

Livello di servizio E: corrisponde a ritardi compresi fra 55 e 80 secondi per veicolo equivalente. Questo livello è considerato il valore limite di accettabilità (si considera raggiunta la capacità). La progressione dei veicoli è pessima con elevati valori del rapporto flusso-capacità, prossimi a 1 che implica la presenza di frequenti condizioni di sovrasaturazione.

Livello di servizio F: corrisponde a ritardi superiori a 80 secondi per veicolo equivalente. Questo livello, considerato inaccettabile dalla maggior parte degli utenti, si verifica con rapporti flusso-capacità superiori all'unità con valori di ritardo che tendono ad aumentare indefinitamente.

3.2.4 – Ritardo medio per veicolo equivalente (*Mean Delay per PCU*) [sec]

Questo è il valore medio del ritardo subito da un veicolo equivalente (*PCU*) su un ramo o, a livello globale, nell'intersezione. Si ottiene dividendo il tasso di ritardo totale (*uniform delay and random + oversaturation delay*) per il flusso nel ramo.

$$\text{Mean Delay per PCU} = \frac{\text{Total delay rate}}{\text{Flow into link (or TS)}} = \frac{\text{Uniform delay} + (\text{Random} + \text{Oversaturation delay})}{\text{Flow into link (or TS)}}$$

Uniform delay [PCU-hour/hour]: è la componente uniforme del valore totale di ritardo; è equivalente al numero medio di PCU in coda sul link o TS durante un tempo di ciclo tipico;

Random + oversaturation delay [PCU-hour/hour]: rappresenta la somma tra il tasso di ritardo casuale, componente che rappresenta le fluttuazioni casuali del traffico in arrivo al link o TS, e il tasso di ritardo di sovrasaturazione, componente che rappresenta il costante aumento della coda a causa del maggior numero di arrivi rispetto al numero di partenze; questo valore è equivalente al numero medio di veicoli in coda sul link o TS durante il tempo di ciclo.

3.2.5 – Numero medio di fermate per veicolo equivalente (*Mean stops/PCU*) [%]

Questo valore rappresenta la media delle fermate per i PCU che entrano nel link o TS espressa in percentuale: un valore di 100% significa che, in media, ciascun PCU si ferma una volta. La stima tiene conto del valore sia delle fermate uniformi sia delle fermate casuali. Le fermate uniformi (*Uniform Stops*) sono il numero di fermate previsto associate ad un tipico ciclo in regime di sottosaturazione, mentre le fermate casuali (*Random Stops*) sono il numero di fermate extra dovute all'arrivo casuale del traffico e alle condizioni di sovrasaturazione.

3.2.6 – Valore massimo medio di coda (*Mean Max Queue*) [PCU]

Il valore è dato dalla media della coda stimata su tutti i cicli simulati nella sua posizione più lontana (misurata in numero di PCU dietro la linea di arresto anziché in termini di lunghezza); essendo un valore medio esso viene superato diverse volte durante la simulazione.

3.3 – Risultati per il piano semaforico del Comune in assenza di tram (*Hp 1*)

Questa ipotesi si riferisce al ciclo del piano semaforico calcolato in Comune ripetuto quattro volte per modellare il periodo di osservazione (440 secondi).

Il piano utilizzato prevede un ciclo di 110 secondi, piuttosto lungo dunque a causa della complessità dell'intersezione, formato dalla sequenza di tre fasi. La sequenza delle fasi e il diagramma di fasatura di un singolo ciclo vengono riportati nelle seguenti immagini per meglio analizzarlo.

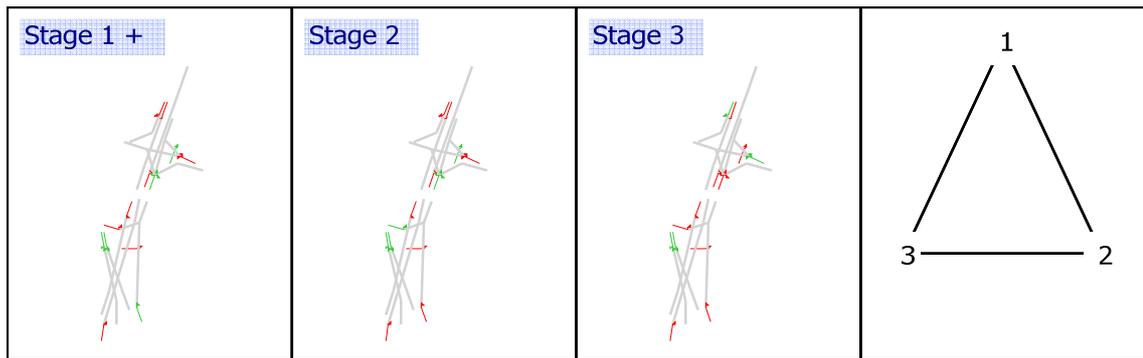


Fig. 3.50 – Diagramma della sequenza delle fasi per il piano semaforico del Comune

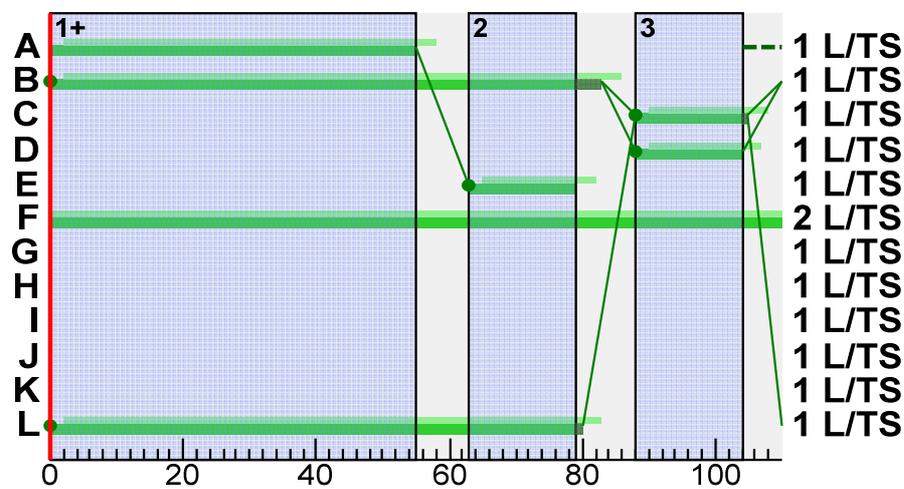


Fig. 3.51 – Diagramma di fasatura per il piano semaforico del Comune

Questo piano favorisce la manovra di attraversamento della corrente principale di via Beccaria, utilizzando dei tempi di fase piuttosto alti (manovre A, B, F); la manovra B, attiva sia nella fase 1 che nella fase 2, serve allo smaltimento delle correnti in arrivo da via Beccaria sud (A) e delle correnti di svolta in arrivo da via Beccaria nord (E); è impostato un ulteriore ritardo di fase per la manovra B che consente il totale smaltimento dei veicoli in arrivo dalla corrente di svolta E. La presenza di una linea tratteggiata tra la fase 3 e la fase 1 in corrispondenza della manovra A, indica la mancanza di vincoli per l'inizio della manovra, questo significa che potrebbe avviarsi fin dalla fine della fase 3. Questo non avviene per una scelta progettuale: si vuole evitare che i veicoli che effettuano la manovra A arrivino al ramo dedicato alla manovra B dovendosi arrestare al semaforo ancora rosso.

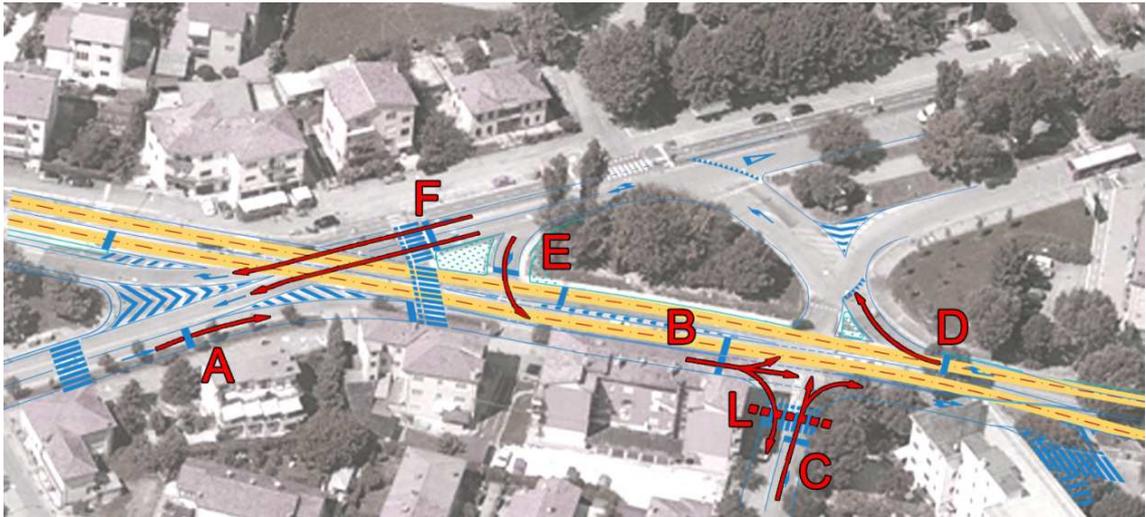


Fig. 3.52 – Schema di rappresentazione delle manovre nei diversi approcci

I tempi di manovra delle fasi sono riassunti nella seguente tabella.

Descrizione tempi di verde del diagramma di fasatura del Comune			
Manovra	FASE 1	FASE 2	FASE 3
A	55 sec		
B	83 sec		
C			17 sec
D			16 sec
E		16 sec	
F	110 sec		
G	TRAM*		
H	TRAM*		
I	TRAM*		
J	TRAM*		
K	PEDONALE A CHIAMATA*		
L	81 sec		

* In questo piano non esistono le fasi a chiamata e quindi le rispettive manovre.

Tab. 3.19 – Tabella riepilogativa dei tempi di manovra delle fasi per il piano semaforico del Comune

Riportiamo ora la sequenza delle fasi e il diagramma di fasatura per l'ipotesi studiata, ossia il piano appena descritto ripetuto quattro volte.

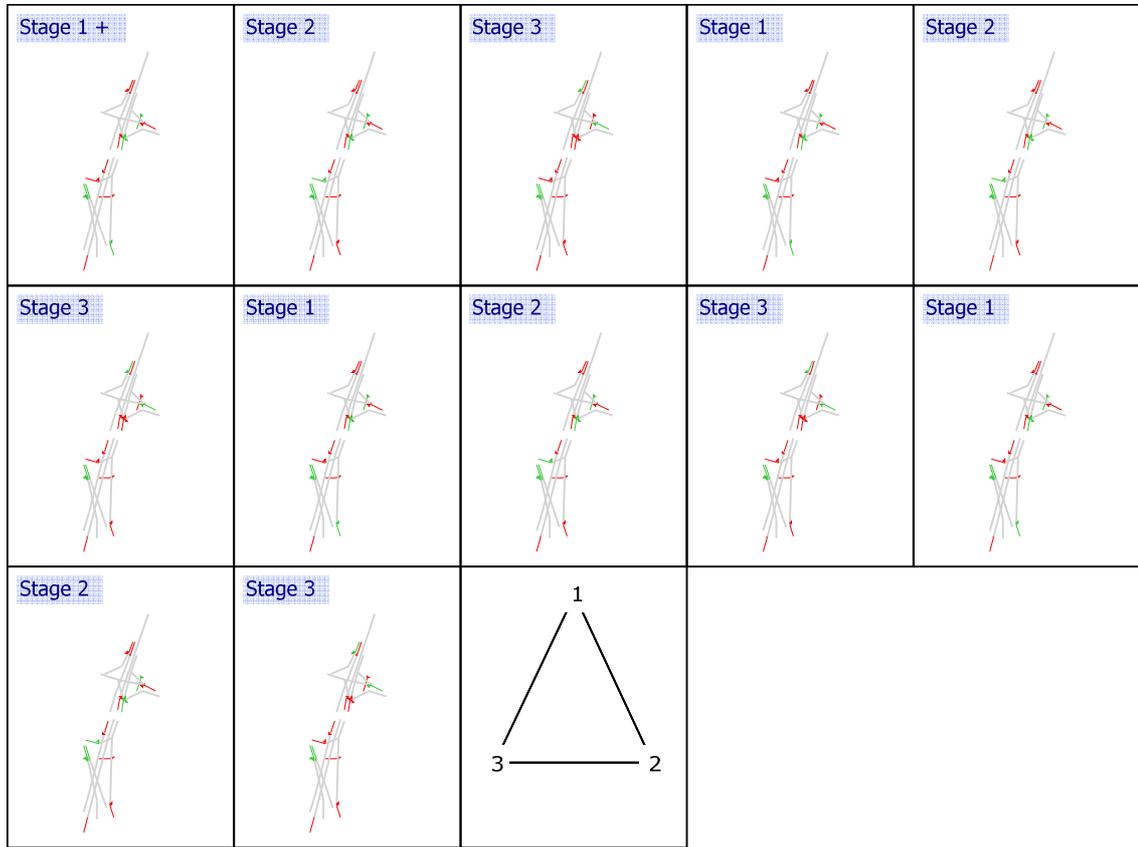


Fig. 3.53 – Diagramma della sequenza delle fasi per l'ipotesi 1

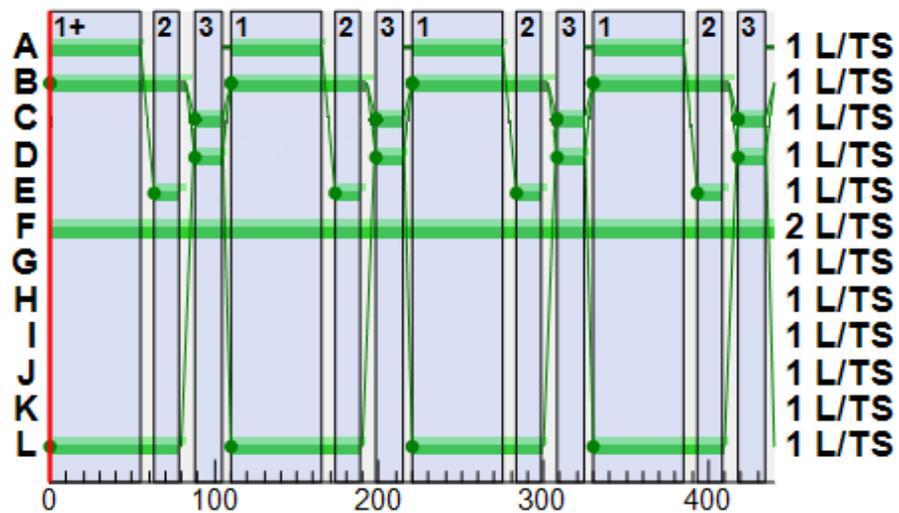


Fig. 3.54 – Diagramma di fasatura per l'ipotesi 1

I risultati ottenuti in questa ipotesi sono i seguenti.

Hp 1							
Network Results							
Performance Index (£/hr)	80,60						
Signalled LOS	B						
Mean Delay per PCU (s)	4,10						
Mean stops per PCU (%)	9,84						
Link Pedestrian Results							
Degree of Saturation (%)	L						
Signalled LOS	A						
Mean Delay per PCU (s)	3,96						
Mean stops per PCU (%)	26,17						
Mean max queue (PCU)	0,64						
Traffic Streams Results							
	A	B	C	D	E	F (dx*)	F (dr*)
Degree of Saturation (%)	35,00	32,00	10,00	44,00	41,00	3,00	27,00
Signalled LOS	B	A	D	D	D	A	A
Mean Delay per PCU (s)	17,16	0,76	39,84	47,20	47,83	0,03	0,38
Mean stops per PCU (%)	58,78	0,79	84,08	93,43	93,36	0,00	0,00
Mean max queue (PCU)	5,85	0,16	0,75	3,52	3,29	0,00	0,05

* La manovra F governa due movimenti differenti: la svolta a destra (dx) e l'attraversamento (dr).

Tab. 3.20 – Tabella riepilogativa dei risultati ottenuti per l'ipotesi 1

3.4 – Risultati per il piano semaforico ottimo in assenza di tram (Hp 2)

Questa ipotesi si riferisce al ciclo del piano semaforico ottimo ripetuto quattro volte per modellare il periodo di osservazione (440 secondi).

Il piano ottimo viene definito a partire dal piano semaforico del Comune descritto nel precedente paragrafo, pertanto la lunghezza di ciclo utilizzata è la stessa: 110 secondi. Nel realizzare questo piano mediante il processo di ottimizzazione disponibile in TRANSYT, sono stati eliminati tutti i ritardi e anticipi di fase opportunamente inseriti nell'ipotesi precedente che sarebbero altrimenti risultati dei vincoli di cui tener conto nel processo di calcolo del piano ottimo.

Si riportano anche in questo caso le immagini relative a sequenza delle fasi e diagramma di fasatura per il singolo ciclo.

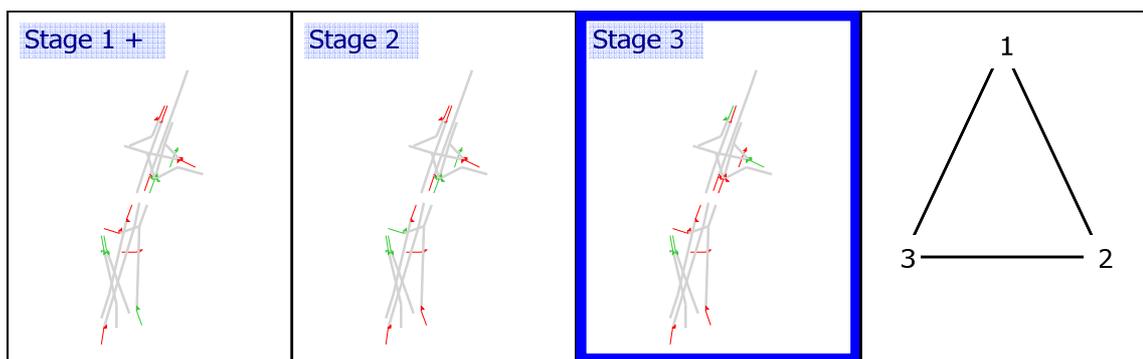


Fig. 3.55 – Diagramma della sequenza delle fasi per il piano semaforico ottimo

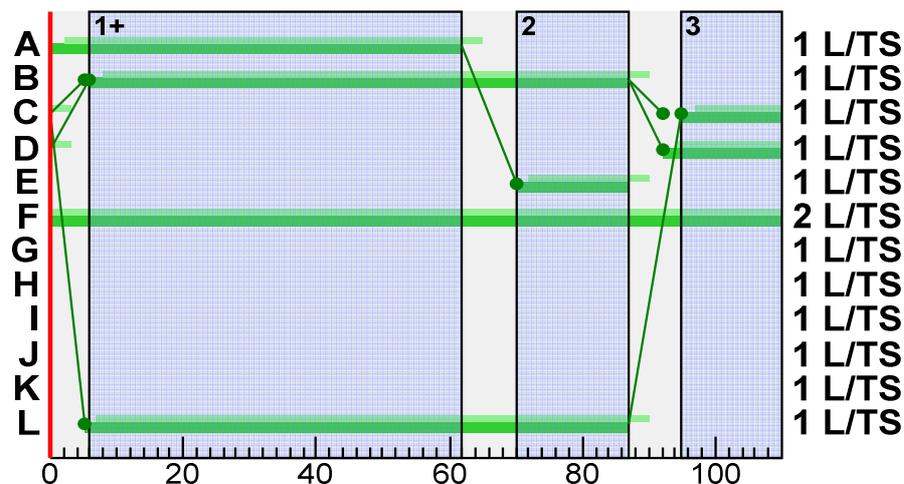


Fig. 3.56 – Diagramma di fasatura per il piano semaforico ottimo

Il processo di ottimizzazione inserisce il maggior numero di tempi di verde possibili, in contrasto con le scelte progettuali descritte in precedenza, per ridurre al minimo il perditempo nei singoli rami. Questo si realizza inserendo degli anticipi di fase per le manovre A e F nella fase 1. La distribuzione dei tempi di fase, tuttavia, risulta piuttosto confrontabile, per ordine di grandezza, a quella del piano non ottimizzato.

Descrizione tempi di verde del diagramma di fasatura del piano ottimo			
<u>Manovra</u>	<u>FASE 1</u>	<u>FASE 2</u>	<u>FASE 3</u>
A	62 sec		
B	81 sec		
C			15 sec
D			18 sec
E		17 sec	
F	110 sec		
G	TRAM*		
H	TRAM*		
I	TRAM*		
J	TRAM*		
K	PEDONALE A CHIAMATA*		
L	82 sec		

* In questo piano non esistono le fasi a chiamata e quindi le rispettive manovre.

Tab. 3.21 – Tabella riepilogativa dei tempi di manovra delle fasi per il piano semaforico ottimo

Riportiamo ora la sequenza delle fasi e il diagramma di fasatura per l'ipotesi studiata, ossia il piano appena descritto ripetuto quattro volte.

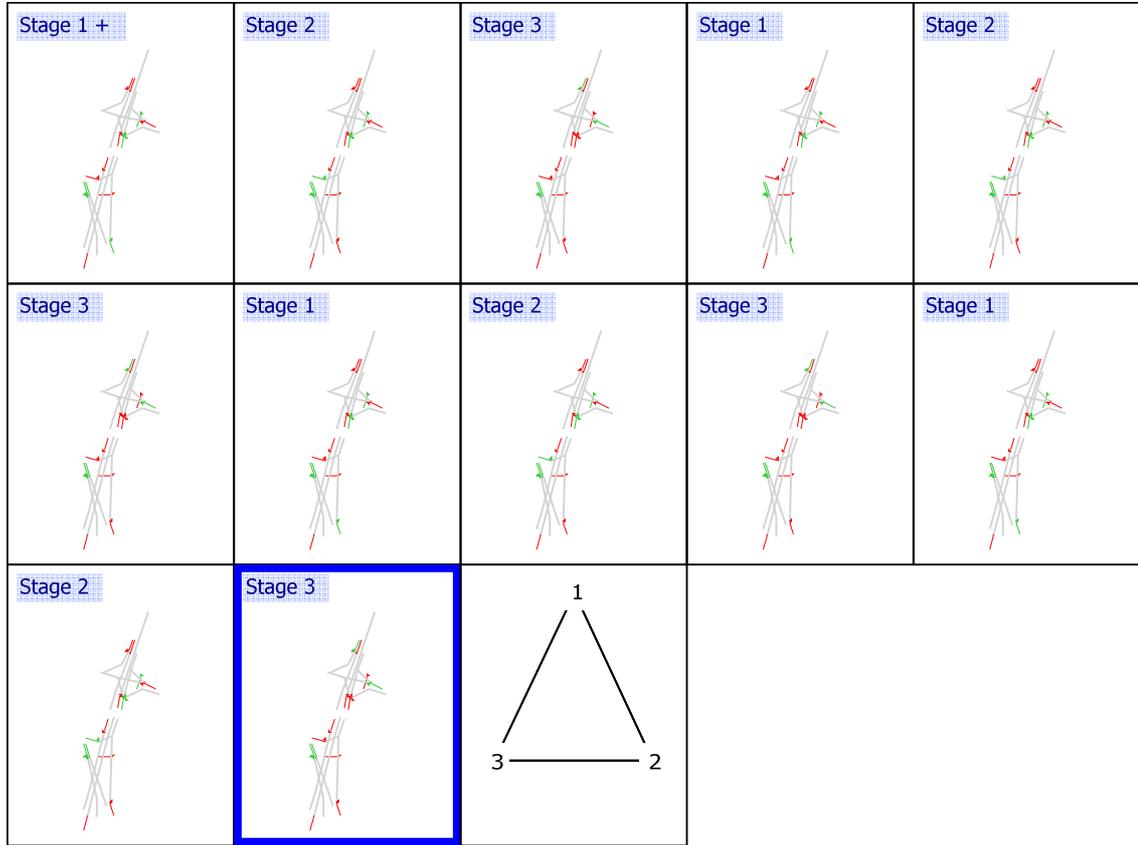


Fig. 3.57 – Diagramma della sequenza delle fasi per l'ipotesi 2

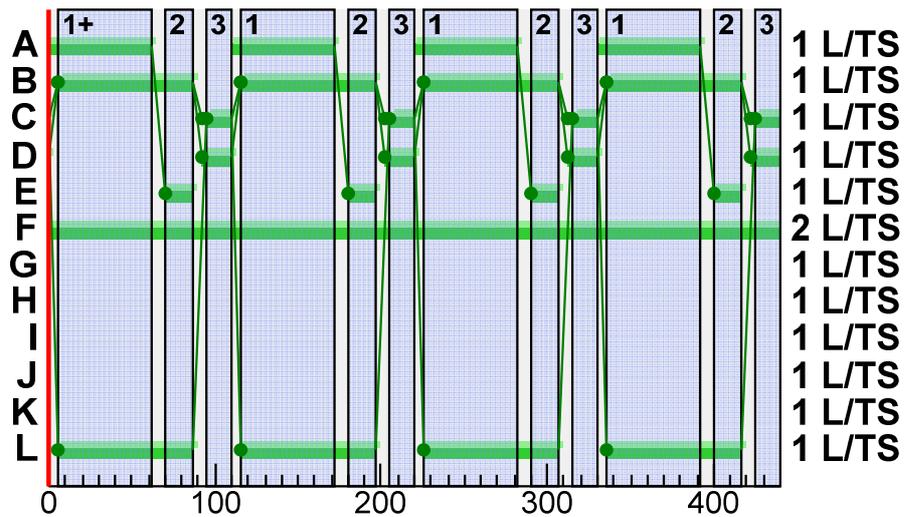


Fig. 3.58 – Diagramma di fasatura per l'ipotesi 2

I risultati ottenuti in questa ipotesi sono riassunti nella seguente tabella.

Hp 2							
Network Results							
Performance Index (£/hr)	73,74						
Signalled LOS	B						
Mean Delay per PCU (s)	3,74						
Mean stops per PCU (%)	9,51						
Link Pedestrian Results							
	L						
Degree of Saturation (%)	1,00						
Signalled LOS	A						
Mean Delay per PCU (s)	3,44						
Mean stops per PCU (%)	24,35						
Mean max queue (PCU)	0,60						
Traffic Streams Results							
	A	B	C	D	E	F (dx*)	F (dr*)
Degree of Saturation (%)	31,00	32,00	11,00	39,00	39,00	3,00	27,00
Signalled LOS	B	A	D	D	D	A	A
Mean Delay per PCU (s)	12,99	1,12	41,75	44,11	46,47	0,03	0,38
Mean stops per PCU (%)	50,77	4,68	86,06	90,46	91,89	0,00	0,00
Mean max queue (PCU)	5,12	1,62	0,77	3,41	3,24	0,00	0,05

* La manovra F governa due movimenti differenti: la svolta a destra (dx) e l'attraversamento (dr).

Tab. 3.22 – Tabella riepilogativa dei risultati ottenuti per l'ipotesi 2

3.5 – Risultati per il piano semaforico del Comune in presenza di tram (*Hp 3*)

L'ipotesi 3 descrive il funzionamento dell'intersezione in presenza del tram con l'utilizzo del piano realizzato in Comune; rappresenta l'ipotesi 1 con l'inserimento delle due fasi speciali relative al passaggio del tram.

Come detto in precedenza, le chiamate del tram arrivano rispettivamente al secondo 140 e al secondo 360, interrompendo rispettivamente la fase 1 e la fase 2. Per questa ipotesi, descrivendo al meglio il piano realizzato in Comune, il rientro alla fase regolare avviene applicando la logica di preferenziamento prevista dal piano stesso (*par. 2.2.4*).

Il tempo associato alle fasi di tram è il massimo tempo che esso potrà impiegare nell'attraversamento dell'intersezione (18 secondi), quindi si modella la condizione maggiormente sfavorevole.

Si riportano la sequenza delle fasi e il diagramma di fasatura.

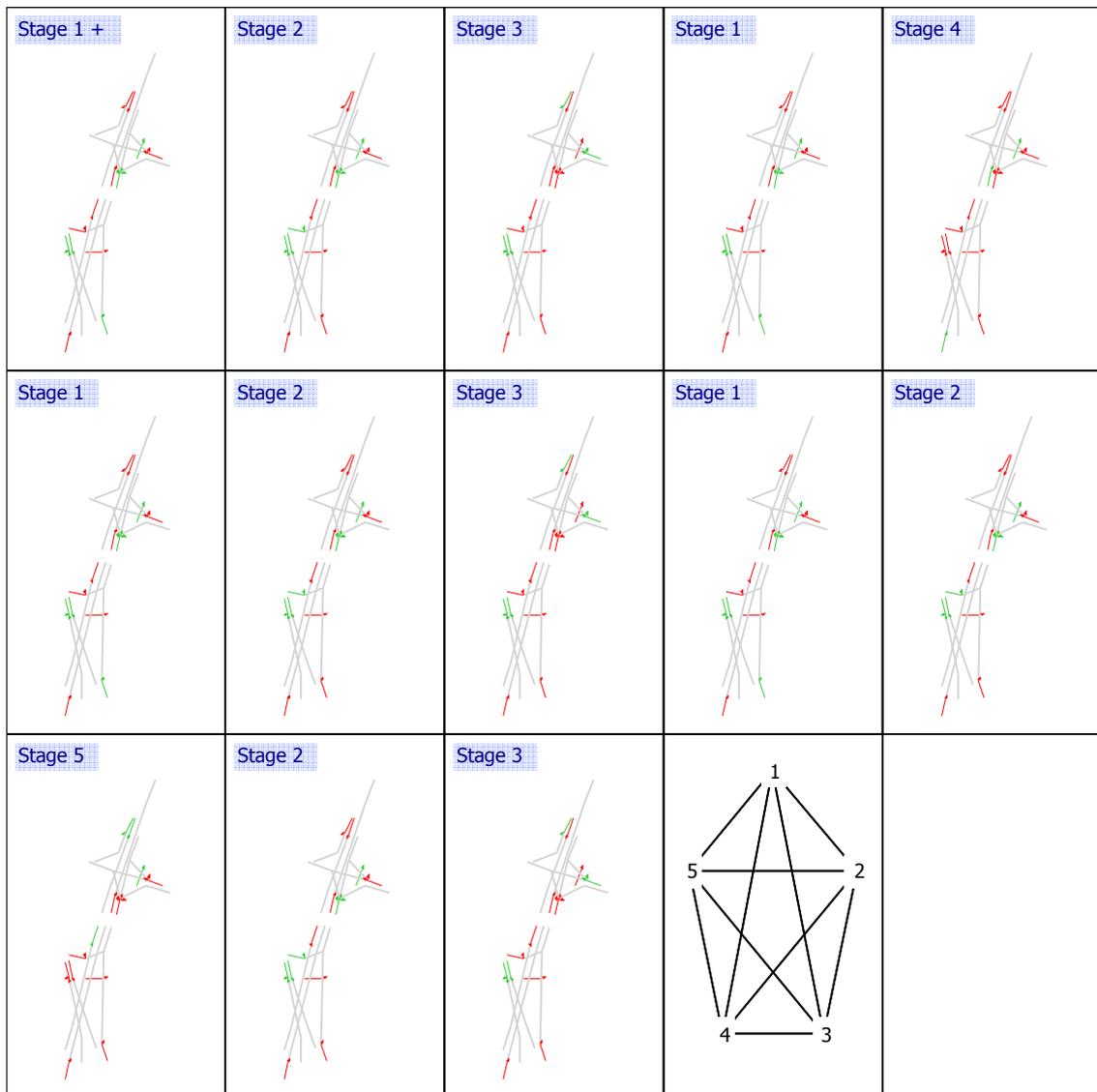


Fig. 3.59 – Diagramma della sequenza delle fasi per l'ipotesi 3

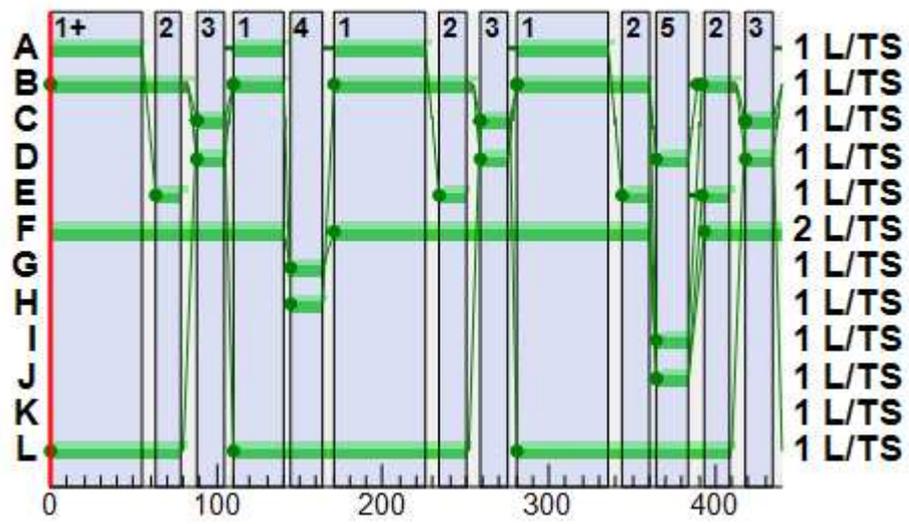


Fig. 3.60 – Diagramma di fasatura per l'ipotesi 3

I risultati ottenuti con questo piano sono i seguenti.

Hp 3							
Network Results							
Performance Index (£/hr)	120,49						
Signalled LOS	B						
Mean Delay per PCU (s)	6,16						
Mean stops per PCU (%)	12,76						
Link Pedestrian Results							
Degree of Saturation (%)	L						
Signalled LOS	A						
Mean Delay per PCU (s)	2,97						
Mean stops per PCU (%)	19,63						
Mean max queue (PCU)	0,64						
Traffic Streams Results							
	A	B	C	D	E	F (dx*)	F (dr*)
Degree of Saturation (%)	39,00	35,00	13,00	43,00	41,00	3,00	32,00
Signalled LOS	C	A	E	E	E	A	A
Mean Delay per PCU (s)	25,38	1,37	61,05	55,16	56,47	2,38	3,78
Mean stops per PCU (%)	66,06	2,32	88,89	92,80	93,31	15,29	19,35
Mean max queue (PCU)	11,20	0,68	1,26	5,75	5,26	0,67	7,69

* La manovra F governa due movimenti differenti: la svolta a destra (dx) e l'attraversamento (dr).

Tab. 3.23 – Tabella riepilogativa dei risultati ottenuti per l'ipotesi 3

3.6 – Risultati per il piano semaforico ottimo in presenza di tram (Hp 4)

L'ipotesi 4 descrive la medesima situazione descritta nell'ipotesi 3 con la differenza che il ciclo utilizzato non è quello realizzato in Comune ma quello ottimo.

La fase del tram viene schematizzata per rappresentare la priorità del mezzo pubblico, pertanto le manovre attive al momento della chiamata vengono troncate; in questa ipotesi, al contrario della precedente, il ciclo riprende banalmente dalla fase che sarebbe prevista dall'ipotesi 2 all'istante preciso del rientro, senza attuare alcuna logica. Questo comporta l'inserimento assolutamente poco sensato di un secondo all'interno della fase 1 al rientro della prima fase tranviaria.

Si riportano le sequenze delle fasi e il diagramma di fasatura.

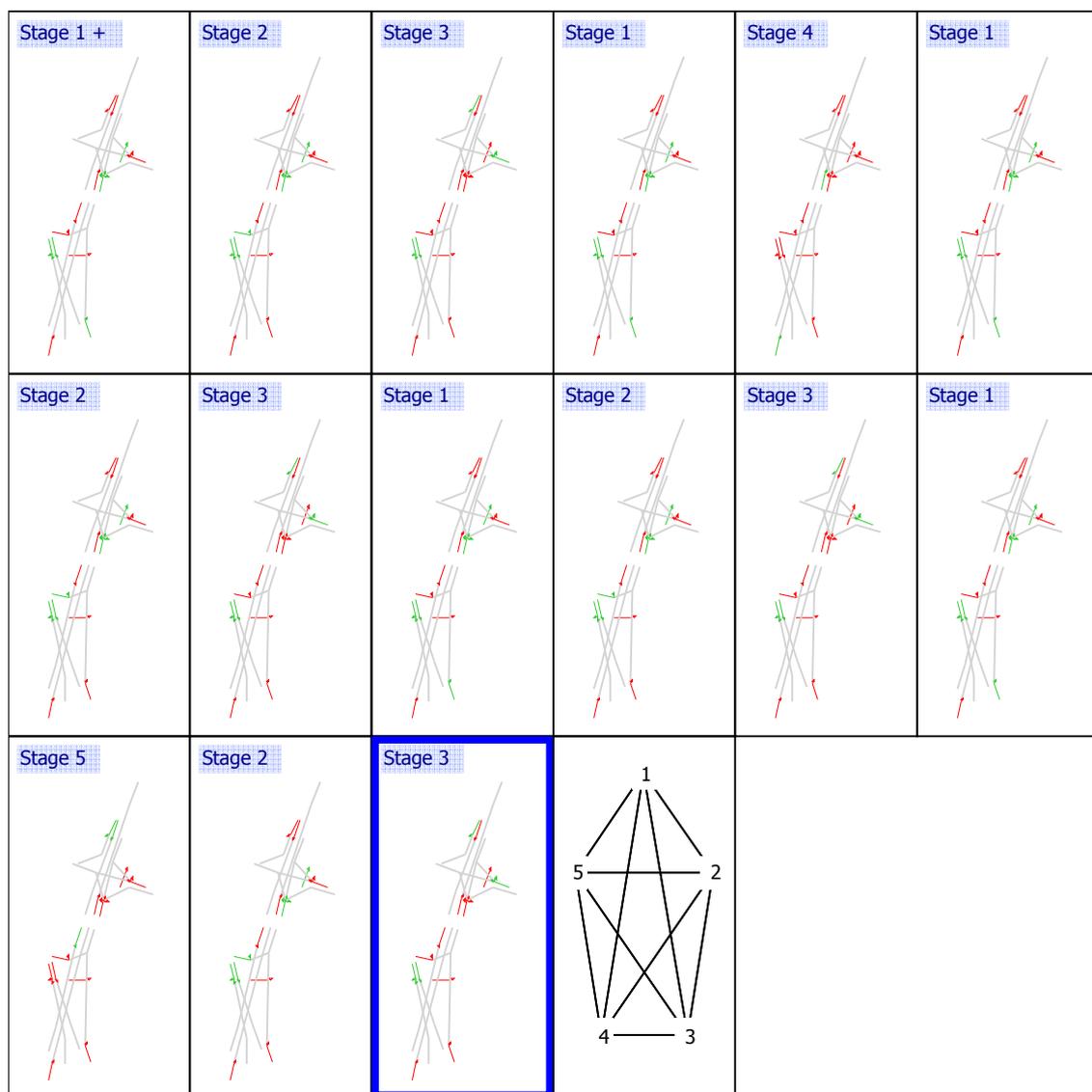


Fig. 3.61 – Diagramma della sequenza delle fasi per l'ipotesi 4

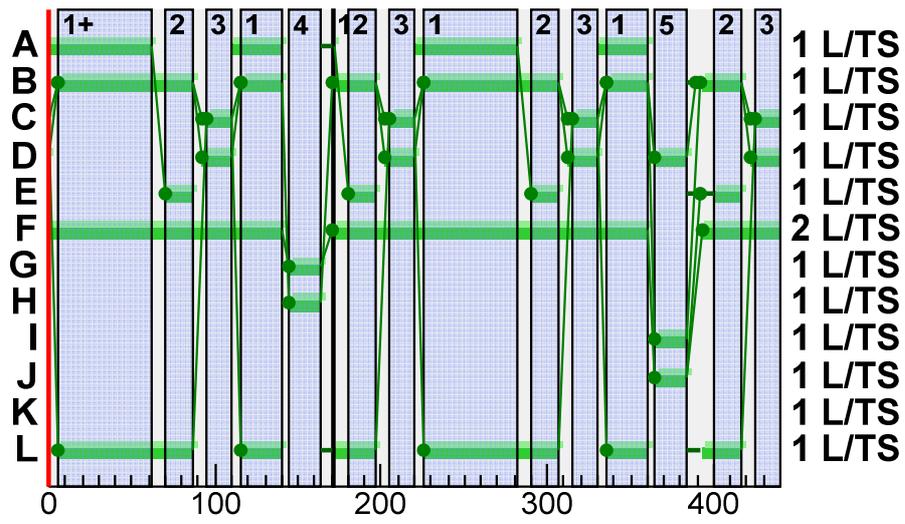


Fig. 3.62 – Diagramma di fasatura per l'ipotesi 4

I risultati ottenuti con questo piano sono i seguenti.

Hp 4							
Network Results							
Performance Index (£/hr)	102,59						
Signalled LOS	B						
Mean Delay per PCU (s)	5,20						
Mean stops per PCU (%)	13,20						
Link Pedestrian Results							
L							
Degree of Saturation (%)	2,00						
Signalled LOS	A						
Mean Delay per PCU (s)	5,70						
Mean stops per PCU (%)	38,35						
Mean max queue (PCU)	0,71						
Traffic Streams Results							
	A	B	C	D	E	F (dx*)	F (dr*)
Degree of Saturation (%)	41,00	40,00	11,00	31,00	39,00	3,00	32,00
Signalled LOS	C	A	D	D	D	A	A
Mean Delay per PCU (s)	23,32	2,19	41,75	35,58	46,19	2,05	3,29
Mean stops per PCU (%)	68,61	7,79	86,06	84,44	91,86	12,37	16,82
Mean max queue (PCU)	8,56	1,67	0,77	3,36	3,32	0,50	6,17

* La manovra F governa due movimenti differenti: la svolta a destra (dx) e l'attraversamento (dr).

Tab. 3.24 – Tabella riepilogativa dei risultati ottenuti per l'ipotesi 4

3.7 – Risultati per l’ottimizzazione del sistema in presenza di tram (Hp 5)

L’ipotesi 5, in linea teorica, dovrebbe restituire i risultati migliori poiché è stata realizzata avviando il processo di ottimizzazione al piano descritto nell’ipotesi 4. Il risultato non potrà mai essere un piano semaforico a tempi fissi come quelli utilizzati dal Comune, ma rappresenterà più verosimilmente un piano ottimo per la gestione della rete, con dei tempi di fase che risultano differenti ad ogni ripetizione. L’ottimizzazione garantisce la capacità del sistema di servire al meglio il transito dei veicoli ai diversi approcci.

Si riportano la sequenza delle fasi e il semaforico diagramma di fasatura.

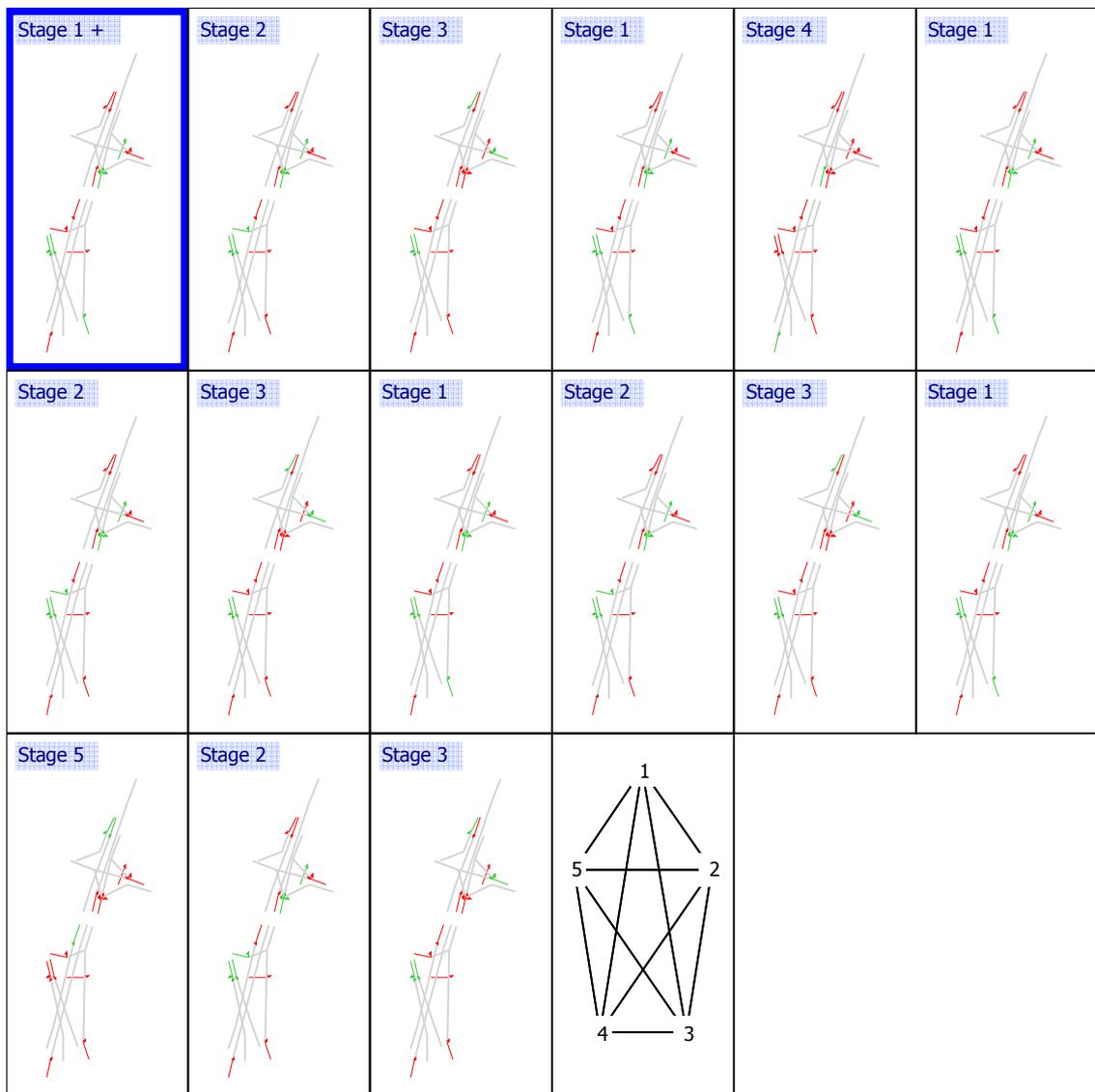


Fig. 3.63 – Diagramma della sequenza delle fasi per l’ipotesi 5

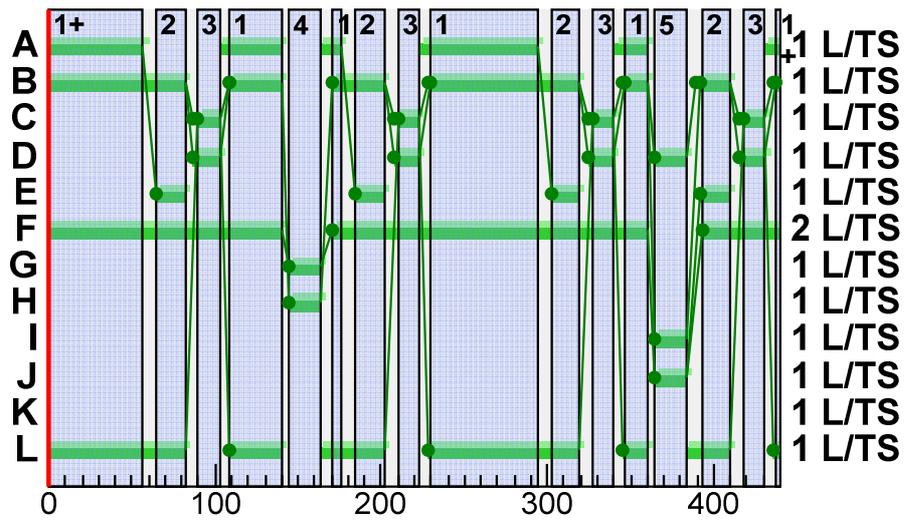


Fig. 3.64 – Diagramma di fasatura per l'ipotesi 5

I risultati ottenuti con questo piano sono i seguenti.

Hp 5							
Network Results							
Performance Index (£/hr)	96,99						
Signalled LOS	B						
Mean Delay per PCU (s)	4,89						
Mean stops per PCU (%)	12,97						
Link Pedestrian Results							
	L						
Degree of Saturation (%)	1,00						
Signalled LOS	A						
Mean Delay per PCU (s)	4,11						
Mean stops per PCU (%)	32,44						
Mean max queue (PCU)	0,56						
Traffic Streams Results							
	A	B	C	D	E	F (dx*)	F (dr*)
Degree of Saturation (%)	37,00	38,00	13,00	34,00	38,00	3,00	32,00
Signalled LOS	B	A	D	D	D	A	A
Mean Delay per PCU (s)	17,16	2,19	44,37	40,64	46,09	2,09	3,20
Mean stops per PCU (%)	61,95	11,29	88,14	87,00	90,99	12,22	16,35
Mean max queue (PCU)	7,64	3,23	0,87	3,82	3,51	0,49	5,84

* La manovra F governa due movimenti differenti: la svolta a destra (dx) e l'attraversamento (dr).

Tab. 3.25 – Tabella riepilogativa dei risultati ottenuti per l'ipotesi 5

3.8 – Confronto dei risultati

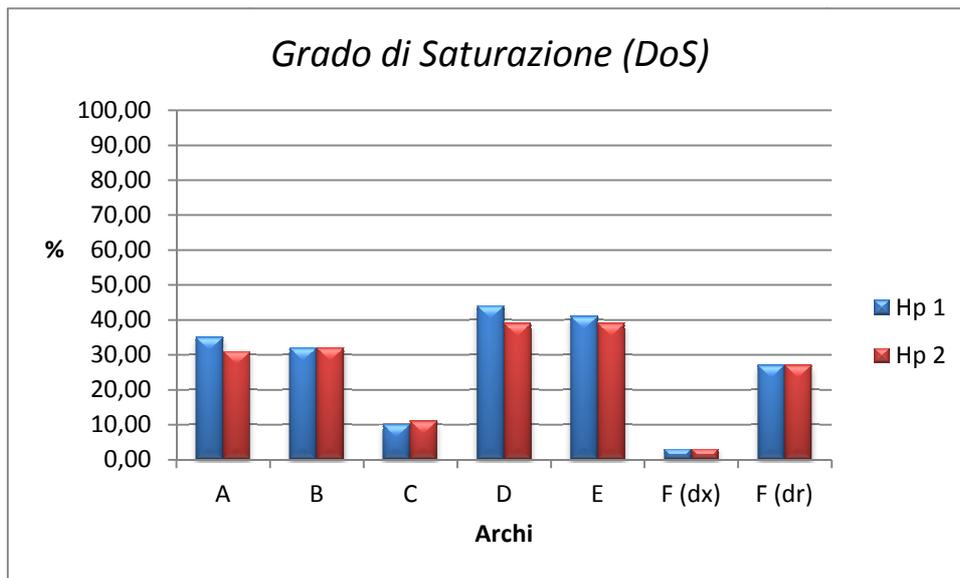
Questo paragrafo raccoglie i risultati rielaborati e rappresentati attraverso degli istogrammi al fine di consentire un confronto tra le ipotesi di piano simulate. I gruppi di confronto vengono di seguito elencati:

- Hp 1 – Hp 2;
- Hp 1 – Hp 3;
- Hp 2 – Hp 4;
- Hp 3 – Hp 4 – Hp 5.

A livello globale l'intersezione risulta lavorare in ciascuna ipotesi con un livello di servizio B, che indica un buon funzionamento della stessa.

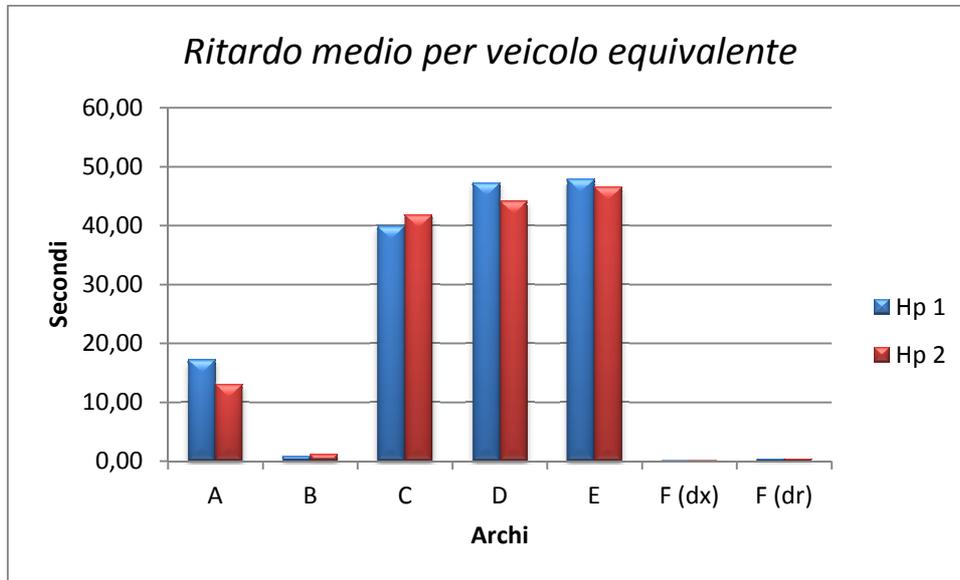
3.8.1 – Confronto tra Hp 1 e Hp 2

Qui di seguito vengono riassunti i risultati al fine di confrontare il piano redatto dal Comune e il piano ottimo sviluppato attraverso l'uso di TRANSYT.

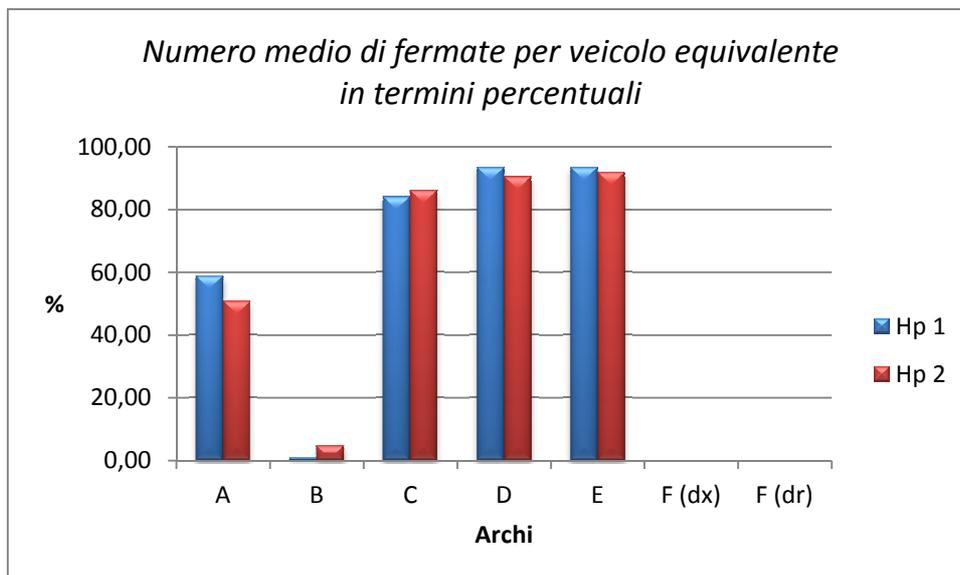


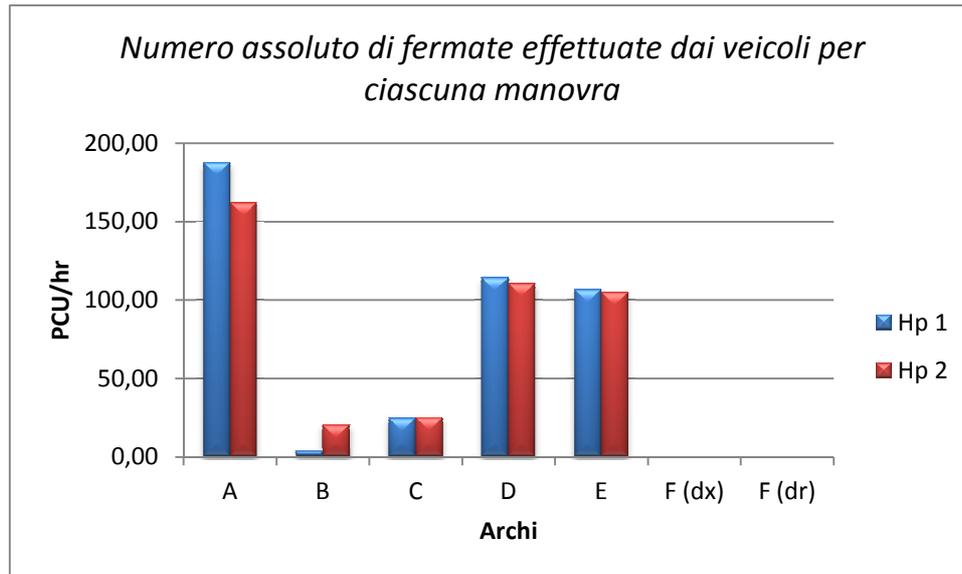
Per quanto riguarda il grado di saturazione degli archi dell'intersezione si evidenzia una leggera riduzione nei rami A, D ed E per l'ipotesi 2 dovuta ad un aumento del tempo di verde che questo piano prevede per questi tre approcci; questo implica però una riduzione del tempo dedicato al ramo C che ne risente con un aumento molto leggero.

A livello globale si nota che un leggerissimo aumento del grado di saturazione in un arco secondario permette un miglioramento in termini di prestazione dell'intera intersezione.

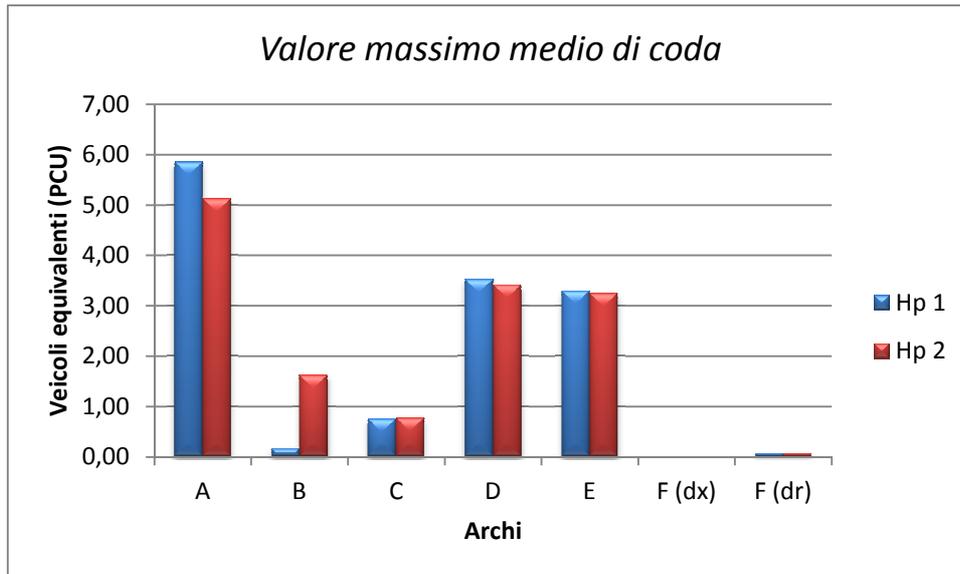


Nell'istogramma riferito ai ritardi medi si rispecchia ulteriormente la condizione descritta in precedenza. Nell'ipotesi 2, gli archi A, D ed E riducono il loro ritardo medio grazie all'aumento del tempo di verde loro dedicato, mentre per il ramo C si ha un leggero aumento. Gli archi F/dx e F/dr non hanno alcuna variazione poiché il tempo di verde per essi è pari all'intero ciclo.





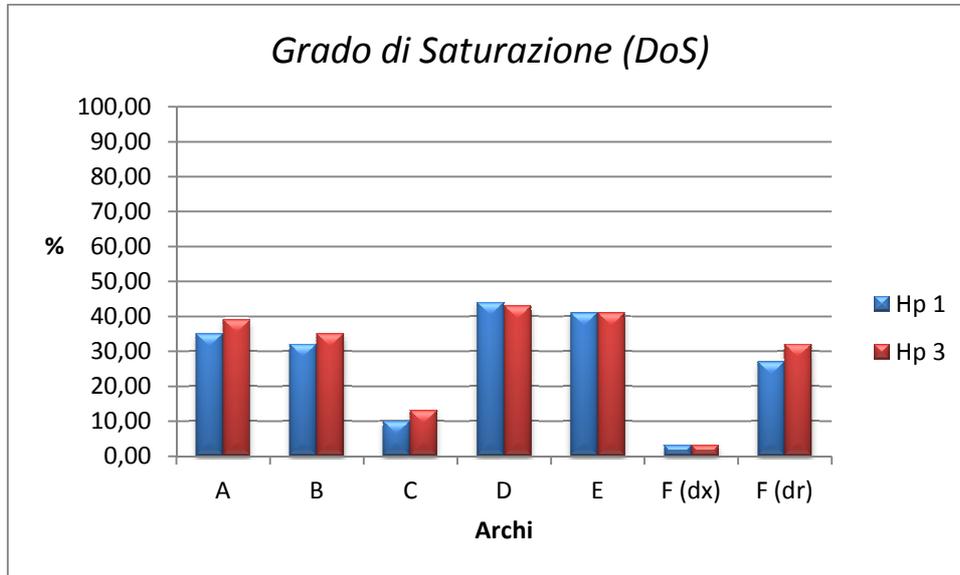
Il numero di fermate medie viene analizzato sotto due aspetti: in termini percentuali e in termini assoluti; questo permette di vedere sia la percentuale dei veicoli passanti per quel ramo che si devono fermare (risultato restituito come output da TRANSYT), sia il numero assoluto di arresti effettuati dai veicoli per ciascuna manovra in un'ora. Nel primo diagramma emerge che nei tre rami di corrente secondaria la percentuale dei veicoli che si fermano è molto elevata, ci si aggira attorno al 90%, osservando tuttavia il secondo diagramma si vede che nel ramo C tale percentuale rappresenta circa 20 veicoli, mentre per il ramo A la percentuale poco inferiore al 60% rappresenta quasi 200 veicoli, numero certamente più consistente. L'andamento delle fermate è molto simile a quello visto in precedenza per il grado di saturazione, eccezione fatta per il ramo B, nel quale è possibile vedere un aumento del numero di fermate. Questo fenomeno è dovuto alla scelta progettuale fatta nell'ipotesi 1 descritta in precedenza (*Par. 3.3*) ed è maggiormente visibile nel diagramma relativo alle code.



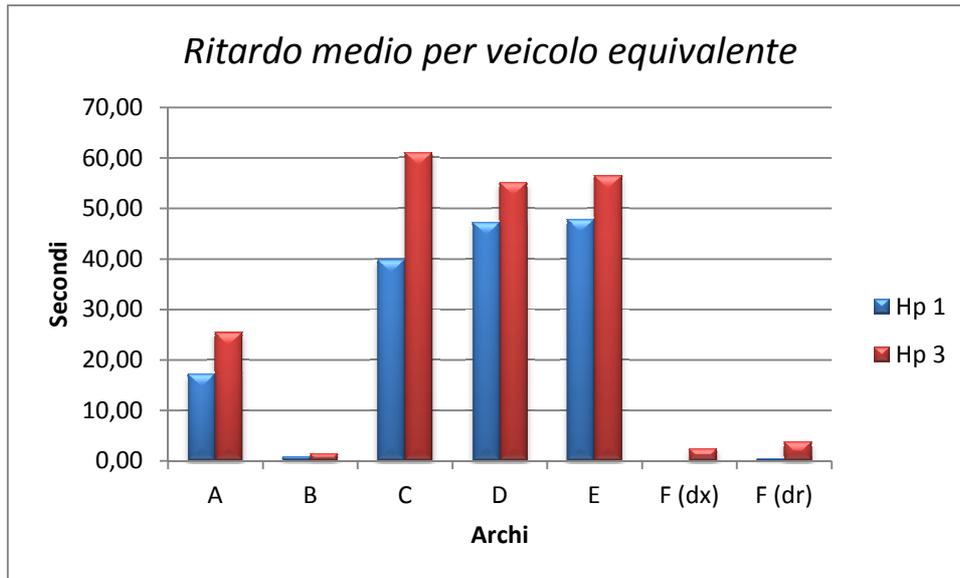
Per il ramo B nell'ipotesi 2 è visibile un valore massimo medio di coda di quasi 2 PCU contro lo zero presente nell'ipotesi del Comune. Questo indica che la scelta progettuale effettuata porta dei vantaggi relativi allo sgombero totale dell'arco B in mezzo all'intersezione. Nell'ipotesi 2 nei rami C, D ed E la variazione del valore di coda (in positivo o negativo) è pressoché inconsistente, mentre nel ramo A si ha il valore che si riduce di quasi 1 PCU.

3.8.2 – Confronto tra Hp 1 e Hp 3

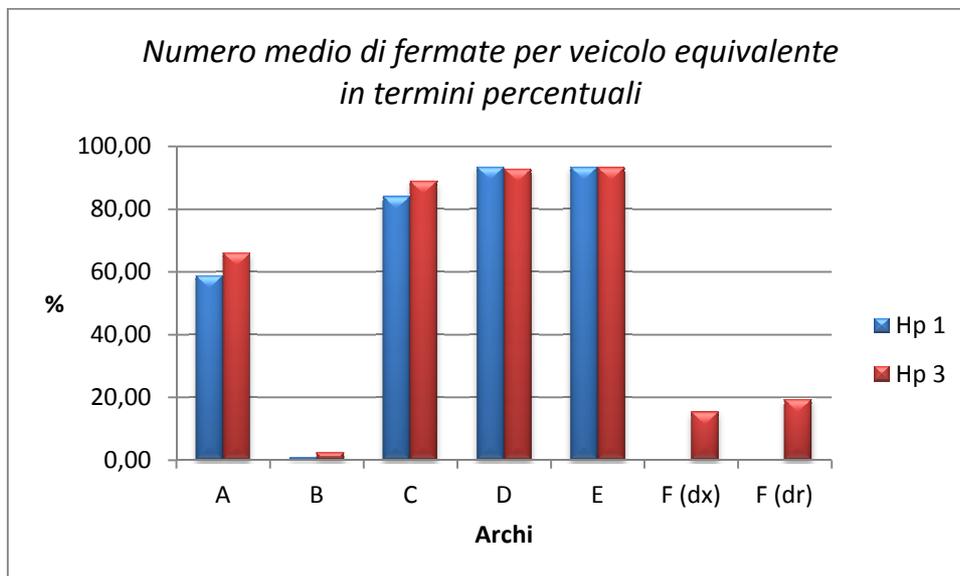
Questo paragrafo rappresenta le ipotesi relative al piano realizzato in Comune, in assenza o in presenza del tram.

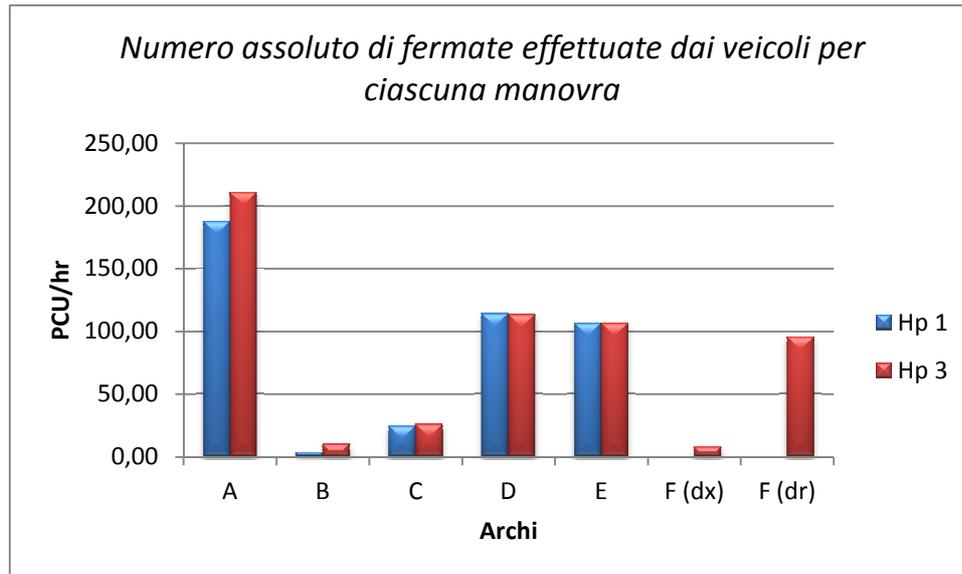


Il grado di saturazione dei singoli rami, com'era prevedibile, ha la tendenza ad aumentare; questa tendenza si verifica in tutti i rami tranne uno: il ramo D. Tale fenomeno è spiegato dalla presenza della fase semaforica 5 tranviaria (tram proveniente da nord) nella quale, essendo un arco in sede promiscua, i veicoli ottengono un tempo di verde aggiuntivo che migliora leggermente le condizioni di transito.

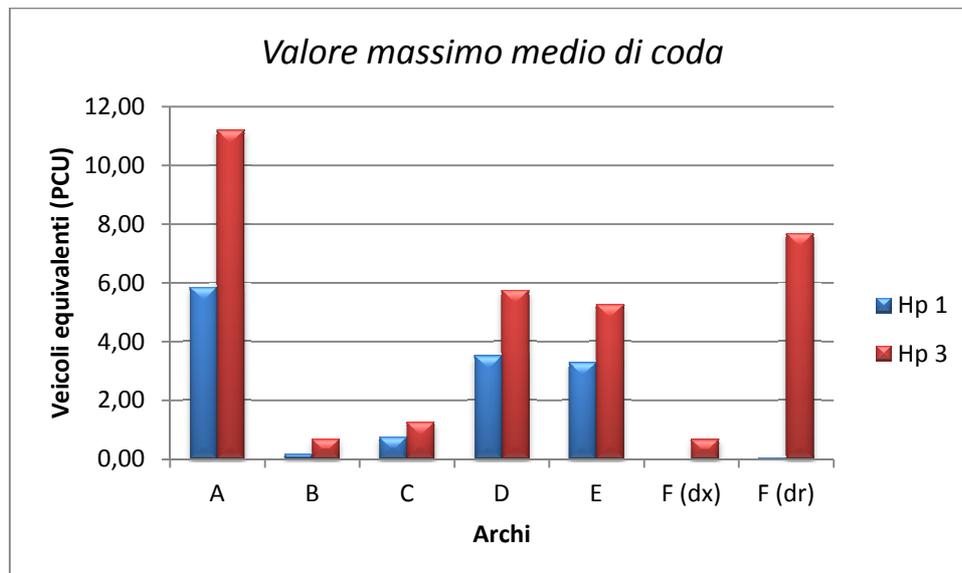


Il diagramma dei ritardi medi evidenzia l'aumento di tale valore per tutti gli archi passando dall'ipotesi 1 all'ipotesi 3. L'arco che risente di più del passaggio del tram è il C con un aumento del ritardo medio del 50% circa (20 secondi circa).





Nello studio delle fermate si nota un consistente aumento nell'ipotesi 3 rispettivamente negli archi A, F/dx e F/dr; l'arco F/dr in particolare, in assenza di tram, presenta un tempo di verde della stessa durata del piano, per smaltire il grosso carico di traffico in transito, pertanto la presenza delle due fasi tranviarie influisce negativamente incrementando di molto il numero di veicoli che son costretti a fermarsi passando da 0 a 96 PCU/hr.

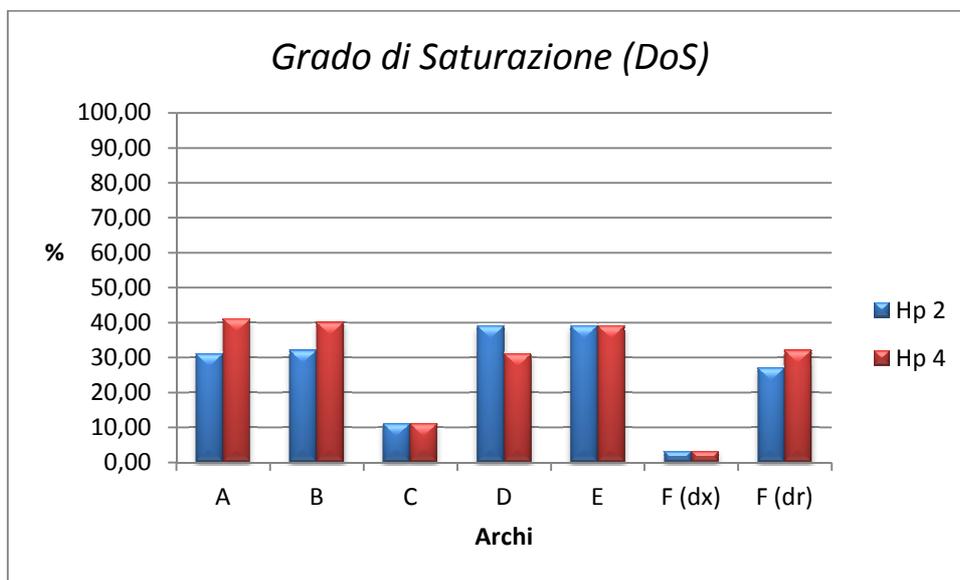


Quanto detto in precedenza per il numero di veicoli obbligati a fermarsi si rispecchia nei valori medi delle code. Gli aumenti sono piuttosto sensibili nei rami B, C e F/dx;

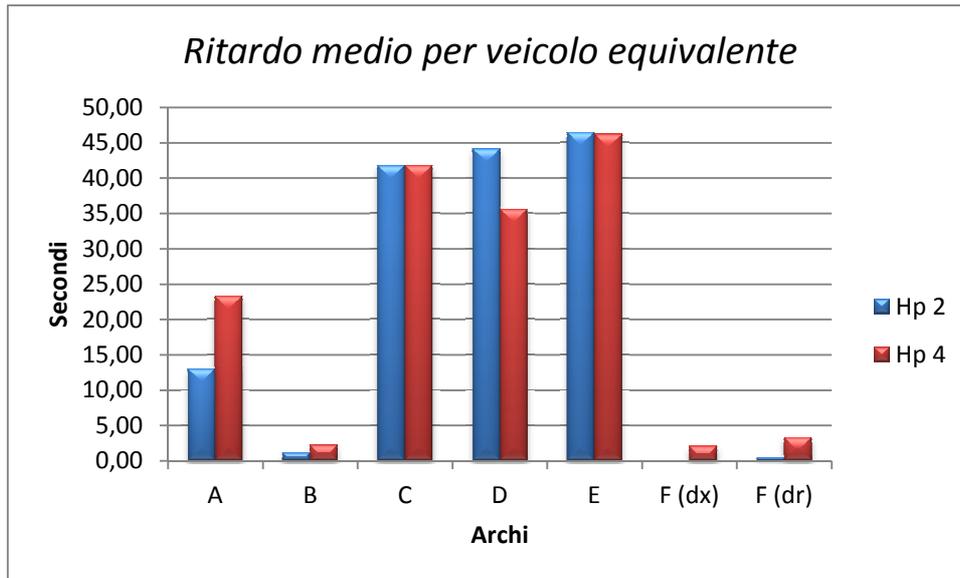
sono più consistenti per i rami D ed E con un incremento del 60%; mentre sono piuttosto importanti nei rami A e F/dr con un aumento dell'85% nel primo caso (il valore della coda media passa da 6 a 11 PCU circa) e un passaggio da 0 a 8 PCU nel secondo.

3.8.3 – Confronto tra Hp 2 e Hp 4

In questo caso si confrontano le prestazioni del sistema in presenza (o assenza) del tram utilizzando il piano ottimo calcolato con il software.

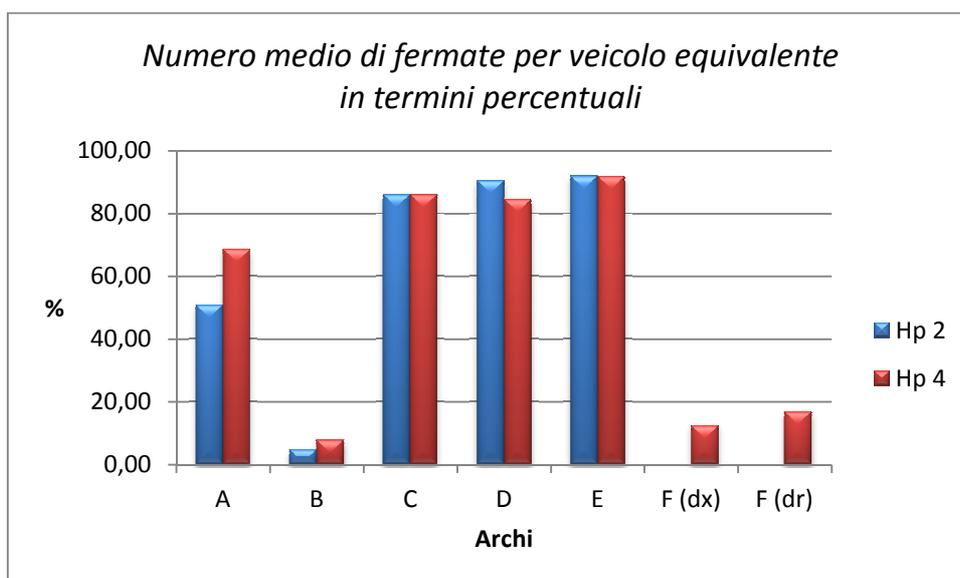


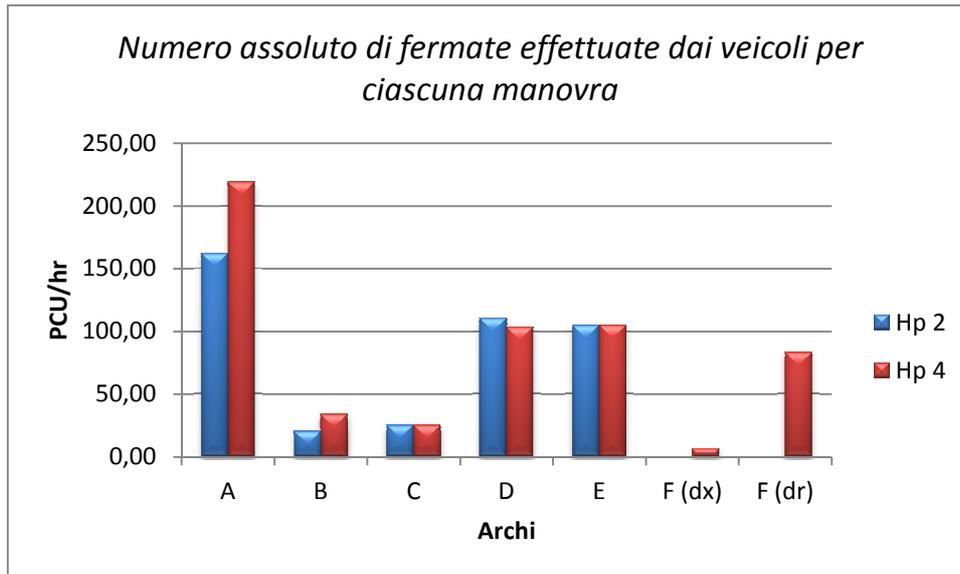
Anche in questo caso come nel confronto precedente, i risultati ottenuti nell'ipotesi 4, in presenza del tram, risultano peggiorare per tutti i rami tranne che per il ramo D, dove la presenza della fase 5 tranviaria permette un periodo aggiuntivo di verde per i veicoli interessati.



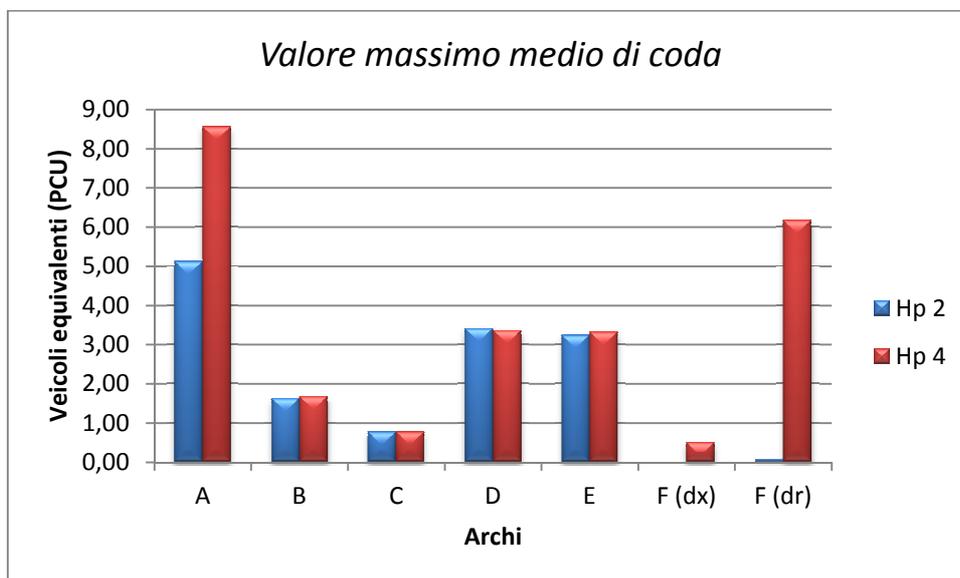
La condizione favorevole dovuta al passaggio del tram da nord, nell'ipotesi 4, permette una riduzione dei tempi medi di ritardo di quasi 10 secondi per i veicoli che transitano per l'arco D; questa differenza non è così marcata nel confronto precedente (Hp1 – Hp2) poiché la logica di preferenziamento all'interruzione della prima fase col passaggio del tram da sud, fa ripartire il ciclo da capo imponendo un intertempo tra le due successive fasi 3 molto lungo (oltre i 200 secondi).

Il passaggio dei tram invece incide negativamente nel ramo A con un aumento del perditempo di 10 secondi.





Per quanto riguarda il numero di fermate le variazioni sono piuttosto marcate solamente nei due rami principali A e F/dr. Nell'ipotesi 4 si ha un incremento per il ramo A di 60 PCU/hr, mentre per il ramo F/dr l'incremento è di 83 PCU/hr.

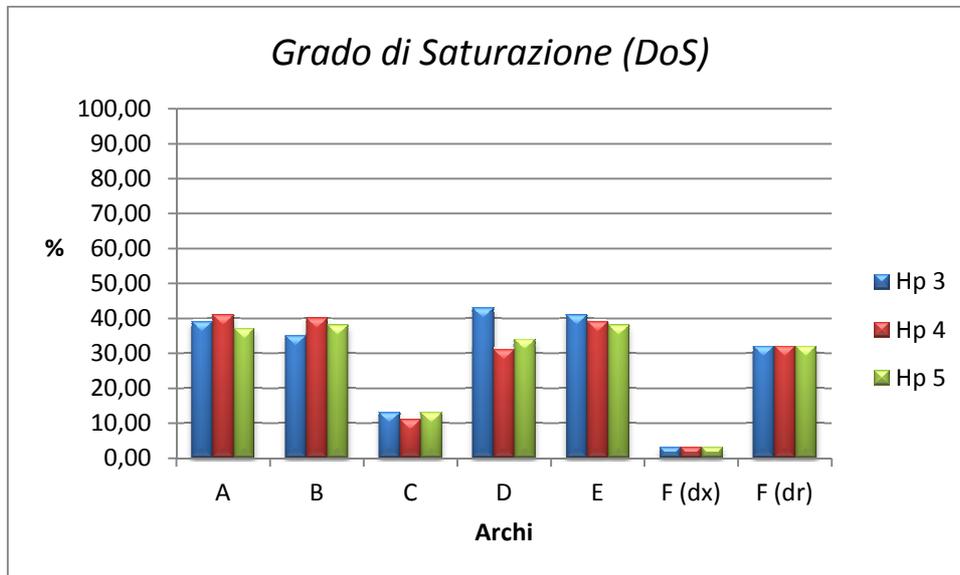


Il valore medio dei veicoli in coda rispecchia quanto visto per le fermate. Si presentano grosse differenze solamente per gli archi A e F/dr.

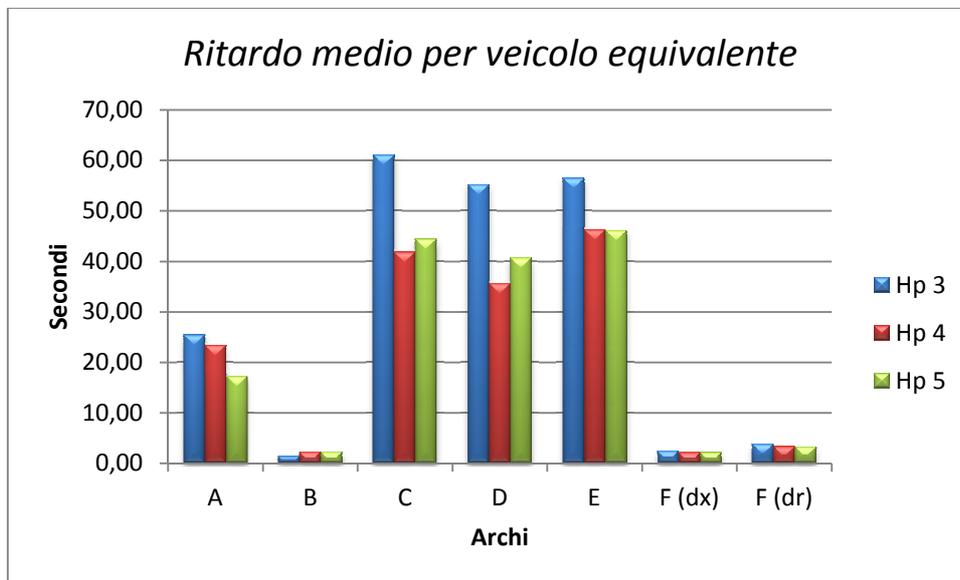
Nell'ipotesi 4 l'incremento del numero medio di veicoli in coda per il ramo A è del 70%, passando da una media di 5 PCU a poco più di 8, mentre per il ramo F/dr si passa da 0 a 6 PCU.

3.8.4 – Confronto tra Hp 3, Hp 4 e Hp 5

L'ultimo confronto avviene tra le tre diverse ipotesi nelle quali sono presenti le fasi dedicate al tram.

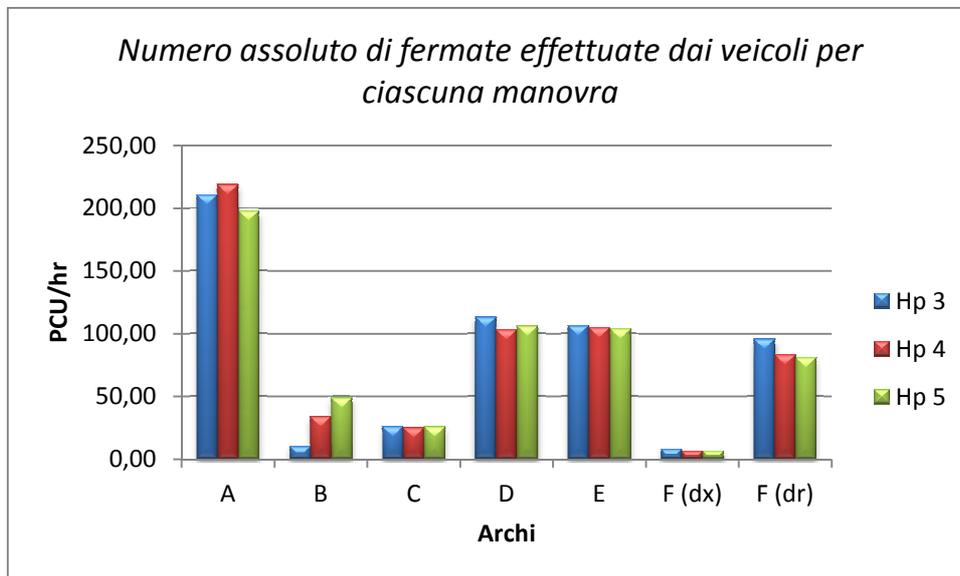
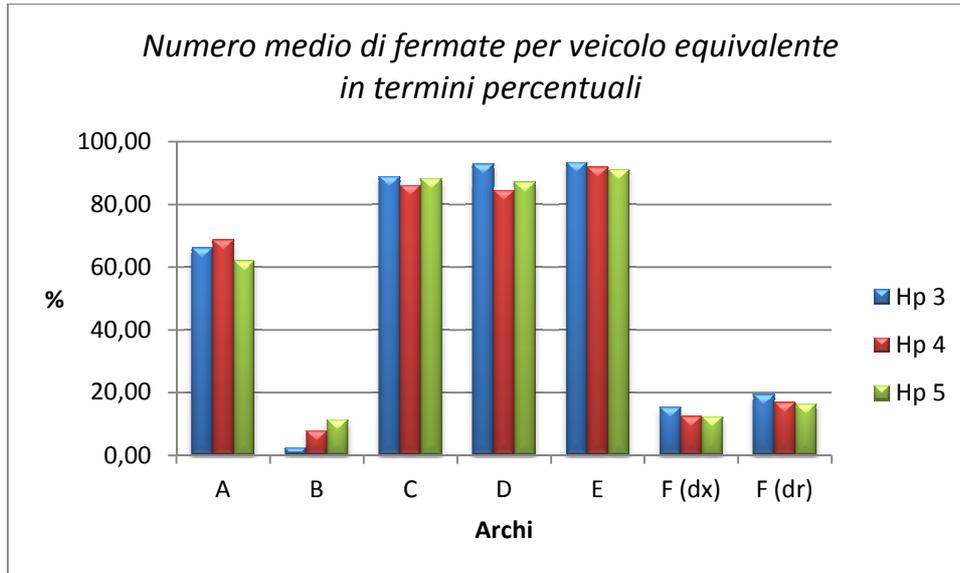


Il grado di saturazione non presenta grosse differenze nelle tre diverse ipotesi.



L'andamento dei ritardi medi evidenzia che l'ipotesi 3 ha sempre il valore maggiore, con valori piuttosto importanti (nell'ordine dei 15/20 secondi) per gli archi C, D ed E. A differenza di quanto ci si potesse aspettare il valore relativo all'ipotesi 5 per i

ritardi medi non è il migliore in tutti i rami. Questo accade perché la classificazione delle prestazioni avviene in riferimento ad un unico indice PI, che riassume la condizione di ottimo globale, prevedendo pertanto la possibilità di eventuali condizioni peggiori locali rispetto all'ipotesi da dove è partita l'ottimizzazione (Hp 4).

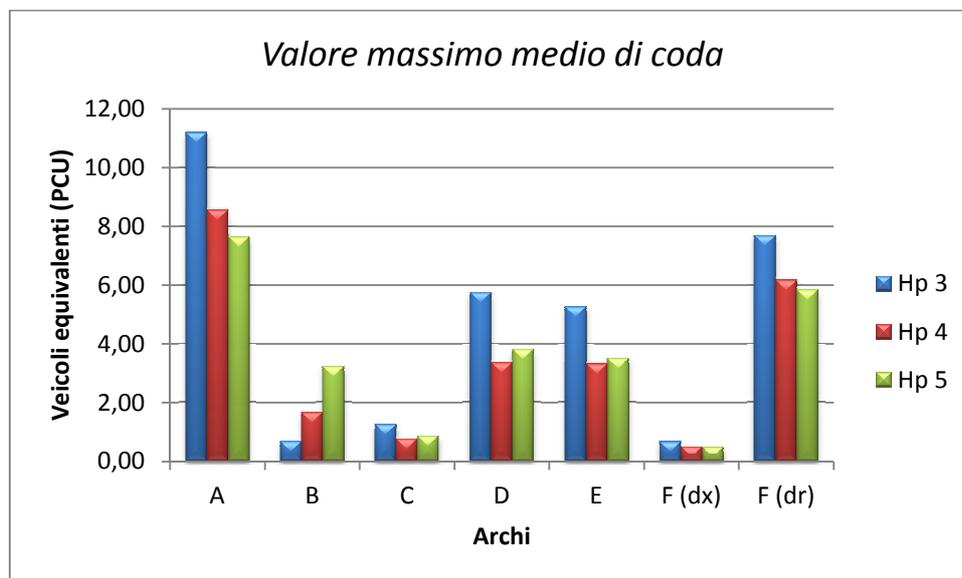


Nello studio delle fermate invece l'ipotesi 5 risulta la migliore in tutti gli approcci, tranne il B poiché, per migliorare al massimo l'efficienza della rete, sfrutta anche la possibilità di accumulo del ramo stesso, incrementando così il numero delle fermate.

L'aumento del numero delle fermate nell'ipotesi 4 rispetto all'ipotesi 3 nel ramo A è dovuta all'inserimento delle fasi tranviarie nei periodi relativi alla fase 1; l'ipotesi di introduzione delle fasi tranviarie speciali in modo "banale", causa una riduzione del tempo di verde destinato alla manovra in partenza dal ramo A aumentando di conseguenza il numero di veicoli costretti alla fermata.

I risultati dell'ipotesi 4 e l'ipotesi 5 non mostrano grosse differenze, eccezione fatta per i due casi appena definiti (ramo B e ramo A).

L'ipotesi 5 rispetto all'ipotesi 3, riduce il numero di fermate medie di circa 13 PCU/hr per l'arco A e di circa 15PCU/hr per l'arco F/dr, mentre la riduzione delle fermate rispetto agli altri rami risulta piuttosto trascurabile.



Anche per il valore medio della coda i risultati delle ipotesi 4 e 5 sono piuttosto sovrapponibili, eccezione fatta per i rami A e B.

La differenza sostanziale nei risultati è tra l'ipotesi 3 e l'ipotesi 5: la riduzione del valore medio della coda nel ramo A è di poco inferiore al 40% (4 PCU circa), nei rami D ed E è del 35%, mentre nel ramo F/dr è del 25% (2 PCU). Gli altri rami prevedono variazioni trascurabili.

Capitolo 4 – Conclusioni

La presente tesi si è occupata di regolazione semaforica con particolare riferimento al preferenziamento per i mezzi di trasporto pubblico. Nello specifico si è analizzato il caso studio del sistema tranviario su gomma a guida vincolata di Mestre (VE).

La valutazione di diversi piani semaforici è avvenuta attraverso la modellazione dell'intersezione prescelta, sfruttando il software di ottimizzazione semaforica TRANSYT 14: in particolare sono state confrontate le prestazioni del piano semaforico redatto in via analitica durante il tirocinio svolto presso il Comune di Venezia e quelle del piano prodotto mediante un processo di ottimizzazione sfruttando, come detto, TRANSYT 14.

Il sistema di priorità adottato per il transito del tram attraverso le intersezioni è stato determinato sulla base di ipotesi semplificative in merito alla stima dell'intervallo di passaggio dei tram nelle due direzioni, pertanto i risultati ottenuti descrivono in modo approssimato la realtà.

L'analisi delle ipotesi di studio svolte porta alle seguenti conclusioni:

- l'introduzione del tram all'interno dell'intersezione produce un significativo peggioramento delle condizioni del traffico con incrementi consistenti dei valori degli indicatori di prestazione riferiti ai singoli archi (grado di saturazione, ritardo medio, numero medio di fermate e numero medio di veicoli in coda);
- il piano ottimo permette, in generale, di migliorare i risultati studiati sia in presenza che in assenza di tram;
- l'assenza di una strategia di rientro a seguito della chiusura della fase tranviaria, può incidere negativamente nei risultati relativi all'ipotesi con piano ottimo.

Nota quanto appena scritto, potrebbe essere apportato un miglioramento all'intersezione studiata adottando il piano ottimo e applicando a quest'ultimo la strategia di rientro definita.

Si è valutata poi un'ulteriore ipotesi nella quale si è ottimizzato l'intero periodo di studio; in quest'ultimo caso i risultati ottenuti sono migliori anche rispetto al piano ottimo, ma la sua applicazione ai regolatori semaforici del Comune non risulta possibile poiché si ha la variazione, anche se solo marginale, dei tempi di fase ad ogni ciclo.

Quest'ultima soluzione evidenzia come l'introduzione di un sistema di regolazione del traffico di tipo adattivo possa portare all'effettiva ottimizzazione della rete, evidenziando come l'uso di strumenti per l'analisi del traffico, soprattutto per la risoluzione di problematiche complesse, possa agevolare il compito dei tecnici. Dall'altra parte bisogna precisare che l'adozione di tale soluzione comporterebbe in ogni caso la necessità di una copertura economica non prevista nel progetto.

Ringraziamenti

Desidero innanzitutto ringraziare il Professor Gastaldi per la disponibilità e la pazienza dimostrata nella realizzazione della tesi. Intendo poi ringraziare l'ing. Silvia Grandese e tutti i dipendenti della Direzione Mobilità del Comune di Venezia per l'accoglienza e la simpatia rivoltami durante il tirocinio, in particolare vorrei esprimere la mia sincera gratitudine a Matteo per gli insegnamenti ricevuti e per tutte le informazioni indispensabili alla realizzazione di questa tesi.

Desidero inoltre ringraziare gli amici dell'università e gli amici tutti per il supporto e il sostegno in tutti questi anni.

Infine, ho desiderio di ringraziare con affetto i miei genitori e mio fratello per il sostegno ed il grande aiuto che mi hanno dato nell'affrontare con la giusta determinazione quest'avventura universitaria.

Bibliografia

- [1] Al-Sahili K. A. and Taylor W. C. (1996) "Evaluation of bus priority signal strategies in Ann Arbor, Michigan", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1554, pp. 74-79.
- [2] Beasley D., Bull D. R. and Martin R. R. (1993) "An overview of genetic algorithms: part 1, fundamentals", *University Computing*.
- [3] Bertsimas D. and Tsitsiklis J. (1993) "Simulated Annealing", *Statistical Science*, vol. 8, no. 1, pp. 10-15.
- [4] Binning J. C., Crabtree M., Burtenshaw G. (2011) "TRANSYT 14 user guide", *TRL Application Guide AG 65*. Crowthorne: Transport Research Laboratory.
- [5] Chiu S. and Chand S. (1993) "Adaptive traffic signal control using fuzzy logic"
- [6] Christofa E. and Skabardonis A. (2010) "Traffic signal optimization with conditional transit signal priority for conflicting transit routes", *Proceedings of the 12th World Conference on Transportation Research*, Lisbon, 2010.
- [7] Christofa E. and Skabardonis A. (2011) "Traffic signal optimization with application of transit signal priority to an isolated intersection", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2259, pp. 192-201.
- [8] Cialdini P., Loschiavo C., Antoniazzi S., Cantarella G. E. and Camus R. (2001). *Norme sulle caratteristiche funzionali e geometriche delle intersezioni stradali*.
- [9] Conrad M., Dion F. and Yagar S. (1998) "Real-Time signal optimization with transit priority: recent advances in the signal priority procedure for

- optimization in real-time model”, *Transportation Research Record: Journal of the transportation research board*, vol. 1634, pp. 100-109.
- [10] Cotfas L. and Diosteanu A. (2011) “Public transport route finding using a hybrid genetic algorithm”, *Informatica Economică*, vol. 15, no. 1, pp. 62-69.
- [11] Decreto Ministeriale 19 aprile 2006, “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali”, emesso dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e pubblicato nella *Gazzetta Ufficiale* n. 170 del 24 luglio 2006.
- [12] Dell’Orco M., Başkan Ö., Marinelli M., (2012) “Artificial bee colony-based algorithm for optimising traffic signal timing”, *Proceedings of the 17th World Online Conference on Soft Computing in Industrial Applications*, WWW.
- [13] Department for Transport, UK (2004). *Bus Priority: The Way Ahead*, Resource Pack Edition 2.
- [14] El-Mihoub T. A., Hopgood A. A., Nolle L. and Battersby A. (2006) “Hybrid Genetic Algorithm: a review”, *Engineering letters*, vol. 13, no. 2.
- [15] Hadi M. A. and Wallace C. E. (1993) “Hybrid genetic algorithm to optimize signal phasing and timing”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1421, pp. 104-112.
- [16] Han B. (1996) “Optimising traffic signal settings for periods of time-varying demand”, *Transportation Research A*, Vol. 30, No. 3, pp. 207-230.
- [17] He J. and Hou Z. (2012) “Ant colony algorithm for traffic signal timing optimization”, *Advances in Engineering Software*, vol. 43, pp. 14-18.
- [18] Hunt P. B., Robertson D. I., Bretherton R. D., and Winton R. I. (1981) “SCOOT—A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals”, TRRL LR 1014. U.K. Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, England.

- [19] Kuang X. and Xu L. (2012) “Real-Time traffic signal intelligent control with transit-priority”, *Journal of software*, vol.7, no. 8, pp. 1738-1743.
- [20] Morellato C. and Sdun M. (2010) “The use of ITS for improving bus priority at traffic signals”, *Trafikdage pa Aalborg Universitet*, www.trafikdage.dk/papers_2010/348_CamillaMorellato.pdf.
- [21] Piano Generale del Traffico Urbano (PGTU) del Comune di Venezia, adottato con delibera di Consiglio Comunale n. 92 del 22 maggio 2002.
- [22] PMV Spa (2008). Progetto Costruttivo: Sistema Tranviario su Gomma a Guida Vincolata di Mestre – Venezia, Impianti Tecnologici di Gestione e Controllo del Servizio, Sistema di Assistenza all’Esercizio (SAE), Gestione Fase Tranviaria.
- [23] PMV Spa (2009). Progetto Costruttivo: Sistema Tranviario su Gomma a Guida Vincolata di Mestre – Venezia, Impianti Semaforici: Relazione sul Funzionamento del Sistema di Priorità Semaforica.
- [24] PMV Spa. Sito web: www.pmvspa.it.
- [25] Shahsavari N., Asadi H. and Kheradmand M. (2013) “Fuzzy multiobjective traffic light signal optimization”, *Journal of Applied Mathematics*.
- [26] Skabardonis A. (1999) “Control Strategies for transit priority”, *Proceedings of the 79th Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington DC.
- [27] Skabardonis A. (2000) “Control Strategies for transit priority”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1727, pp. 20-26.
- [28] Smith H. R., Hemily B., Ivanovic M. and Fleming G. (2005). *Transit Signal Priority (TSP): A Planning and Implementation Handbook*.
- [29] Vu Tu T. and Sano K. (2012) “Genetic algorithm for optimization in adaptive bus signal priority control”, *An international journal of optimization and control: theories and applications*, vol. 3, no. 1, pp. 35-43.

- [30] Zang L., Zhu W., Hu P. and Li J. (2012) “Study on intelligent control algorithm for traffic signals at multi-phase intersections”, *Journal of Computation Information Systems*, vol. 8, no. 24, pp. 10477-10484.
- [31] Zhou G., Gan A. and Shen D. L. (2007) “Optimization of adaptive transit signal priority using parallel genetic algorithm”, *Tsinghua Science and Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 131-140.