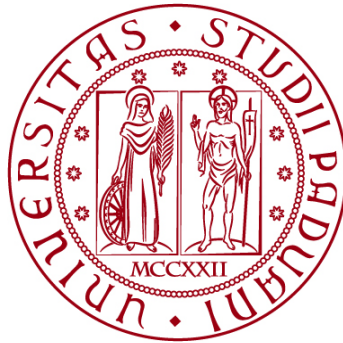


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**SISTEMI DI PRIORITÀ SEMAFORICA PER IL TRASPORTO
PUBBLICO NELLE RETI STRADALI**

Relatore: Chiar.mo PROF. CLAUDIO MENEGUZZER

Laureando: CHRISTIAN RUGGERO

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

INDICE

CAPITOLO 1	1
INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 2	3
TIPOLOGIE DI PRIORITÀ SEMAFORICA.....	3
2.1 Priorità passiva	3
2.2: Priorità attiva.....	5
2.3: Priorità incondizionata e condizionata	9
CAPITOLO 3	13
ARCHITETTURE FUNZIONALI E TECNOLOGIE IMPIEGATE	13
3.1: Architetture funzionali	13
3.1.1: Generazione della richiesta di priorità	14
3.1.2: Modalità di comunicazione delle informazioni.....	15
3.1.3: Attuazione del trattamento prioritario	15
3.2: Esempi applicativi di architetture funzionali	16
3.3: Tecnologie impiegate	17
3.3.1: Spire AVI	18
3.3.2: Rilevatori ottici/infrarossi	19
3.3.3: Impianti di rilevamento a bordo strada	19
3.3.4: GPS e comunicazione radio	19
3.3.5: Sistema di comunicazione Wi-Fi	20
3.3.6: Sistemi di comunicazione per il centro AVL e l'UTC.....	21
CAPITOLO 4	23
EFFICACIA ED IMPATTI NEGATIVI DELLE STRATEGIE PRIORITARIE	23
4.1: Stima dei tempi di percorrenza	23
4.1.1: Stima dei tempi di percorrenza con fermata a monte dell'intersezione	23
4.1.2: Stima dei tempi di percorrenza con fermata a valle dell'intersezione	24
4.2: Valutazione degli effetti delle strategie prioritarie.....	25
4.3: Valutazione dell'influenza di diversi parametri sull'efficacia delle strategie di priorità semaforica	25
4.4: Studio di Malandraki et al. (2015)	31

4.5: Studio di Heaslip et al. (2020).....	35
4.5.1: Simulazione a South Main Street a Blacksburg.....	36
4.5.2: Simulazione a Columbia Pike ad Arlington.....	37
4.6: Studio di Ali (2021)	39
CAPITOLO 5	43
ESPERIENZE DI APPLICAZIONE DI SISTEMI DI PRIORITÀ SEMAFORICA PER IL TRASPORTO PUBBLICO.....	43
5.1: Esperienze internazionali	43
5.2: Torino.....	46
5.3: Genova	48
5.4: Zurigo.....	49
5.5: Londra	50
5.6: Tolosa.....	52
CAPITOLO 6	55
CONCLUSIONI.....	55
Bibliografia.....	59

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Nel mondo contemporaneo le infrastrutture di trasporto stradali sono sempre più soggette a problematiche di congestione. I centri urbani infatti si stanno sviluppando sempre più, con un progressivo aumento della popolazione residente e pertanto con una ulteriore generazione di domanda di mobilità. A questo fenomeno si somma l'incremento del tasso di motorizzazione privata che porta ad una maggiore circolazione di veicoli privati nelle strade. Le reti viarie esistenti spesso non sono state progettate e realizzate per assorbire i livelli attuali di traffico, con conseguenti notevoli criticità. La congestione stradale, evidente soprattutto nelle grandi città, causa infatti significativi aumenti dei tempi di percorrenza, inquinamento atmosferico e inquinamento acustico, con un conseguente peggioramento della qualità della vita. Se l'attuale ripartizione modale tra trasporto privato e pubblico dovesse rimanere inalterata, questi problemi potrebbero diventare ancora più rilevanti in un futuro prossimo. Ad esempio, a Stoccolma si stimava che con i trend di crescita della città relativi al 2013 e con le modalità di trasporto rilevate all'epoca, entro il 2030, anno in cui si prevedeva una popolazione aumentata di circa un quarto, il numero di spostamenti soggetti a fenomeni di congestione stradale sarebbe diventato cinque volte maggiore nelle ore di punta; il tutto nonostante la costruzione di nuove infrastrutture di trasporto (Wahlstedt, 2013).

L'ampliamento delle strade nei centri urbani molto spesso non è possibile. Una soluzione alternativa è rappresentata dalla realizzazione di sistemi di trasporto pubblico su rotaia (quali ad esempio metropolitane), che spesso possono però risultare molto onerosi in termini di costi e tempi di costruzione. Risulta quindi fondamentale riuscire a trasportare maggiori volumi di persone sulle strade già esistenti mediante una migliore gestione della superficie a disposizione. Si tratta in pratica di intervenire sui sistemi di trasporto già presenti al fine di migliorarne la gestione e le performance, per renderli più attrattivi e quindi contribuire alla riallocazione modale, portando le persone a preferire il trasporto pubblico rispetto ai veicoli privati e di conseguenza riducendo il numero di mezzi circolanti sulle strade. Inoltre è importante agire sul miglioramento delle infrastrutture già esistenti, in accordo con uno dei 3 obiettivi fissati dall'Unione Europea per la sostenibilità dei sistemi di trasporto entro il 2050 (European Union, 2011).

La priorità semaforica per il trasporto pubblico assume particolare rilevanza nel raggiungimento di questi obiettivi. Si tratta di una strategia che facilita i mezzi pubblici (bus e tram) nell'attraversare le intersezioni semaforizzate, garantendo la segnalazione verde al loro arrivo o fornendola loro nel minor tempo possibile. La sua attuazione permette quindi di diminuire i tempi di attesa dei mezzi pubblici agli incroci, componente temporale che spesso è molto rilevante nei centri urbani: di conseguenza si possono ottenere una riduzione complessiva dei tempi di percorrenza, un maggiore rispetto degli orari di esercizio programmati e una riduzione di eventuali ritardi accumulati. Grazie alla priorità semaforica, è quindi possibile

rendere il sistema di trasporto pubblico più efficiente e più affidabile con costi relativamente contenuti. Infatti la sua attuazione non richiede importanti e costosi interventi infrastrutturali. Inoltre la priorità semaforica può essere implementata anche su assi viari dove i mezzi pubblici circolano insieme agli altri veicoli a causa dell'assenza di corsie preferenziali.

Le prime applicazioni di sistemi di preferenziamento semaforico risalgono agli anni '70, con una successiva lenta espansione: alcune cause di quest'ultima sono le ridotte competenze tecniche disponibili, la penalizzazione dei veicoli privati, e la scarsa percezione dei vantaggi che queste strategie possono portare alla mobilità urbana (Nash, 2003). Un maggiore sviluppo ha avuto luogo a partire dalla fine degli anni '80 e, anche grazie alla sempre maggiore sensibilità alle problematiche ambientali, la crescita è tutt'ora in atto, con diverse città impegnate ad espandere i propri sistemi di priorità e ad aggiornarli alle più moderne ed efficienti tecnologie. Nel corso degli anni sono state infatti sviluppate nuove strumentazioni quali il sistema GPS che, grazie alle loro potenzialità e ai minori costi, stanno progressivamente rimpiazzando dispositivi più obsoleti e meno flessibili quali le spire induttive o i radiofari.

Oltre ai benefici per gli utenti del trasporto pubblico, la priorità semaforica produce anche una maggiore efficienza gestionale del sistema di trasporto: riducendo i tempi di percorrenza, risulta infatti possibile erogare il servizio con meno mezzi e meno risorse, oppure, a parità di quest'ultime, potenziare il sistema aumentando ad esempio la frequenza dei collegamenti. Questo si traduce anche in un risparmio di risorse economiche che le aziende di trasporto devono sostenere, in aggiunta ai maggiori introiti che possono derivare dall'incremento del numero di passeggeri.

Questa tesi ha lo scopo di analizzare il funzionamento dei sistemi di priorità semaforica a beneficio del trasporto pubblico, evidenziandone le modalità di implementazione, l'efficacia e i principali impatti, anche con riferimento ad alcune applicazioni realizzate in diverse città.

Nel capitolo 2 viene presentata una panoramica delle diverse tipologie di priorità semaforica, analizzando le possibili modifiche delle segnalazioni semaforiche in favore dei mezzi pubblici. Nella prima parte del capitolo 3 vengono descritte le principali caratteristiche e componenti delle architetture funzionali impiegate, per poi analizzare alcuni esempi di strutture ricorrenti; nella seconda parte vengono invece presentate le tecnologie e i sistemi di comunicazione necessari per attuare le strategie prioritarie.

Nel capitolo 4 vengono trattati gli effetti generati dalla priorità semaforica, valutandone sia i benefici che gli impatti sulle altre correnti veicolari. Inizialmente (paragrafo 4.1) viene presentato un metodo per la stima dei tempi di avvicinamento all'intersezione, che risulta fondamentale per l'efficacia del preferenziamento; si passa poi (paragrafo 4.2) ad una descrizione generale dei modelli di simulazione e di valutazione delle strategie prioritarie. Nel paragrafo 4.3 si analizza l'influenza di diversi parametri sull'efficacia delle priorità erogate; nei paragrafi 4.4, 4.5, 4.6 vengono riportate tre analisi con risultati che permettono di mettere a confronto scenari con e senza trattamenti di preferenziamento semaforico.

Infine, nel capitolo 5 vengono presentati alcuni casi applicativi, riguardanti in particolare i sistemi implementati a Torino, Genova, Zurigo, Londra, Tolosa.

CAPITOLO 2

TIPOLOGIE DI PRIORITÀ SEMAFORICA

La priorità semaforica per il trasporto pubblico può essere realizzata attraverso diverse strategie di controllo, che differiscono tra loro per i costi relativi all'attrezzatura necessaria e la cui applicabilità dipende dai livelli di traffico e dalle caratteristiche delle intersezioni. Una prima distinzione può essere fatta tra priorità passiva e priorità attiva.

2.1 Priorità passiva

Le strategie di priorità passiva si basano principalmente su piani semaforici predeterminati regolati con l'obiettivo di favorire il transito dei mezzi di trasporto pubblico, ma non sono dotati di flessibilità in quanto non in grado di operare in tempo reale. Infatti la priorità viene fornita senza l'effettivo rilevamento del veicolo in arrivo all'intersezione, rendendo la modalità passiva un metodo poco oneroso in termini di costi delle attrezzature necessarie. Trova quindi soprattutto applicazione nei casi in cui gli indicatori di carico e i tempi di movimento e sosta dei mezzi pubblici sono abbastanza prevedibili; gli indicatori qui citati vengono assunti con approcci deterministici, aspetto che non corrisponde al reale funzionamento del sistema di trasporto, limitando quindi l'efficacia di questi metodi. Nel seguito vengono descritte le principali strategie passive possibili.

- **Regolazione della lunghezza del ciclo:** una riduzione della durata complessiva del ciclo consente di ridurre il ritardo generale di tutti i veicoli, e quindi anche il ritardo del mezzo pubblico, se l'intersezione è in condizioni di sottosaturazione. Un aumento della lunghezza del ciclo porterebbe invece ad un aumento di capacità complessiva, ma al tempo stesso causerebbe ritardi elevati alle diverse correnti veicolari. A differenza di molte delle strategie attive, questa tecnica non penalizza alcune correnti veicolari convergenti nell'intersezione, in quanto il beneficio viene percepito su tutti gli approcci. L'efficacia della riduzione della lunghezza dei cicli semaforici viene evidenziata da un'analisi effettuata sull'arteria Guadalupe_N. Lamar ad Austin (Texas) mediante il programma TRAF-Netsim (Garrow & Machemehl, 1999). Questo è un programma di micro-simulazione che tratta individualmente tutti i veicoli presenti nella rete, simulando la loro risposta alle diverse forme di controllo del traffico e alla presenza degli altri veicoli. Nel caso in esame gli autobus viaggiano in traffico promiscuo assieme ai veicoli privati e la normale durata di ciclo nelle ore non di punta sarebbe pari a 100 secondi. A partire da questo dato, è stata implementata la strategia di priorità passiva portando a 70 secondi la lunghezza di ciclo, e sono state eseguite tre simulazioni della durata di un'ora ciascuna. Con cicli di 100 secondi, i tempi di percorrenza dei bus sarebbero stati pari a 797 secondi e 814 secondi rispettivamente in direzione nord e in direzione sud. Dall'analisi con cicli di 70 secondi, gli autori hanno rilevato un tempo di percorrenza pari a 768 e 725 secondi rispettivamente. I tempi di transito si sono pertanto

ridotti di 29 secondi in direzione nord, e di 89 secondi in direzione sud, in quest'ultimo caso quindi con una diminuzione pari a circa l'11%, confermando l'efficacia di questa strategia di priorità quando i volumi di traffico sono ridotti.

- Divisione di fase: consiste nel suddividere la fase semaforica prioritaria in più fasi di durata più breve all'interno dello stesso ciclo, con un tempo totale uguale alla durata originaria. In Figura 1 si può osservare il vantaggio di questo sistema. In assenza di

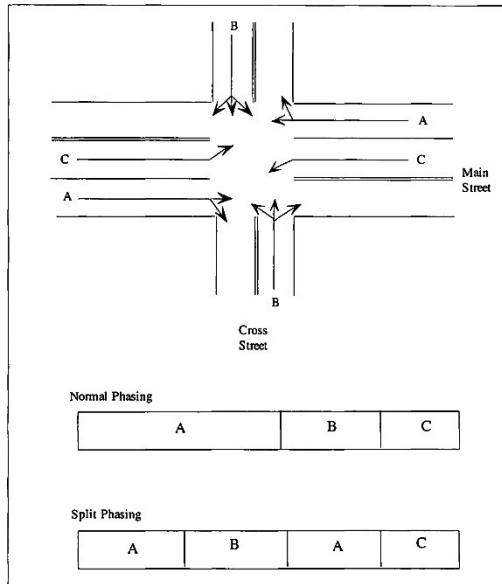


Figura 1: Divisione di fase (Garrow & Machemehl, 1999)

priorità (Normal Phasing) un mezzo pubblico (fase di riferimento A) che dovesse arrivare all'intersezione durante la fase rossa, potrebbe dover attendere tutta la durata delle fasi B e C prima di poter transitare. Considerando invece l'arrivo del mezzo sempre ad indicazione semaforica rossa, ma con la divisione di fase (Split Phasing), si osserva che il tempo di attesa è al massimo pari alla durata della fase B oppure alla durata della fase C, riducendo pertanto il ritardo. Questo metodo può risultare utile nei periodi non di punta del traffico e, rispetto alla strategia basata sulla riduzione della durata del ciclo, ha minori effetti negativi sulle prestazioni globali dell'intersezione.

Gli effetti di questa strategia sono stati evidenziati dallo studio sopra citato, sempre considerando l'arteria Guadalupe-N. Lamar e utilizzando il

programma di simulazione TRAF-Netsim. Gli autori hanno applicato la divisione di fase sulla maggior parte delle intersezioni lungo l'infrastruttura, e hanno condotto simulazioni di un'ora su diverse situazioni. Per quanto riguarda le linee di autobus in servizio locale che transitano lungo la strada Nord-Sud (fase B senza priorità), in direzione nord si è osservata una diminuzione dei tempi di percorrenza da 841 secondi, per la condizione di fasatura normale, a 757 secondi per la condizione con divisione di fase, con una riduzione pari a circa 10%. In direzione sud invece il tempo di percorrenza è aumentato da 751 a 767 secondi. Dato che la divisione di fase non altera la durata complessiva del tempo di verde assegnato ad entrambe le strade, il suo impatto sul ritardo risulta minimo.

- Piani semaforici d'area: i piani semaforici e gli offset tra gli impianti posti in una certa area vengono regolati basandosi sui tempi di percorrenza dei mezzi pubblici. Si crea quindi una forma di coordinamento progettata off-line con tecniche di ottimizzazione per ottimizzare determinati indicatori. Un modello spesso usato è il TRANSYT-7F (Skabardonis, 2000): simulando i movimenti dei plotti di veicoli e usando algoritmi iterativi, ottimizza la programmazione degli offset e delle durate di ciclo dei piani semaforici nelle intersezioni di zona, allo scopo di minimizzare una combinazione pesata di ritardi e numero di arresti.

2.2: Priorità attiva

La priorità attiva è una strategia che tenta di superare gli svantaggi della modalità passiva, puntando quindi ad una flessibilità e adattamento in tempo reale grazie alle moderne tecnologie. Necessita pertanto della presenza di sistemi utili a rilevare l'avvicinamento dei mezzi pubblici così da poter modificare le caratteristiche temporali del piano semaforico per poter garantire la priorità al veicolo. I sensori sono disposti a monte dell'incrocio, anche se un aumento di efficacia della strategia può essere dato da più rilevamenti del mezzo durante tutto l'avvicinamento all'incrocio. Di seguito vengono descritti i principali metodi di modifica del piano semaforico che vengono utilizzati nel caso di priorità attiva; come esempi, si farà riferimento alla situazione di Figura 2, dove la fase semaforica prioritaria è la numero 2 (Diakaki, Papageorgiou, Dinopoulou, Papamichail, & Garyfalia, 2015).

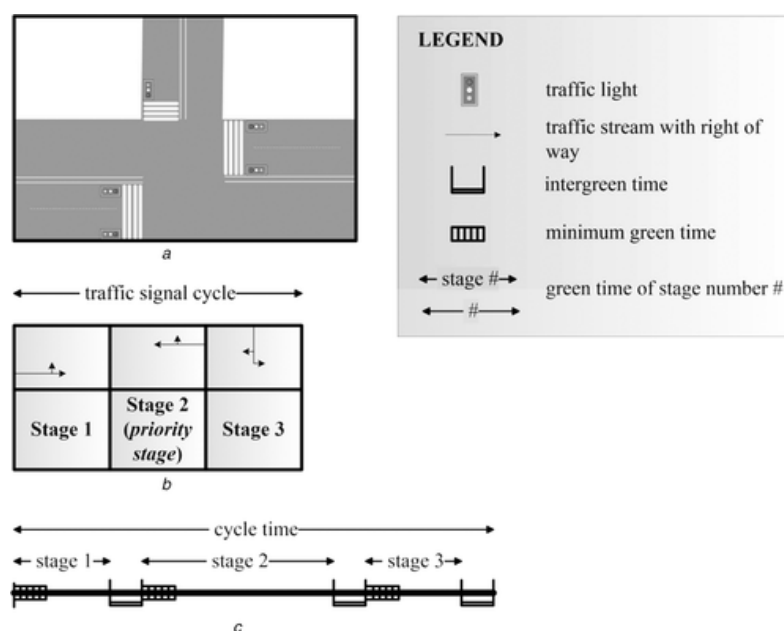


Figura 2: ciclo semaforico di esempio (Diakaki, Papageorgiou, Dinopoulou, Papamichail, & Garyfalia, 2015)

- Troncamento del rosso o anticipo del verde: questa tecnica viene impiegata nei casi in cui la presenza del mezzo pubblico all'incrocio venga rilevata nel momento in cui per esso l'indicazione semaforica sia rossa. Questo metodo consiste nel ridurre la durata del verde per parte o per tutti i movimenti veicolari degli altri approcci, rispettando però i vincoli di durata minima del tempo di verde per ogni fase impostati nel controller semaforico. In questo modo è possibile anticipare l'inizio dell'indicazione semaforica verde per la corsia in cui si trova il mezzo pubblico (Figura 3). Tra tutte le strategie di priorità attiva qui nel seguito presentate, questa è l'unica che potrebbe comportare un certo ritardo per il mezzo pubblico all'intersezione (Figura 8).

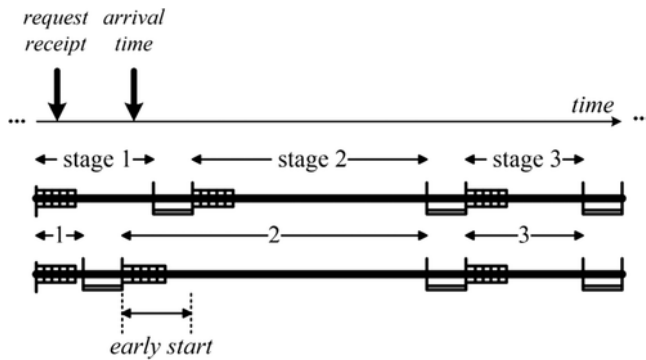


Figura 3: troncamento del rosso o anticipo del verde (Diakaki, Papageorgiou, Dinopoulou, Papamichail, & Garyfalia, 2015)

- Estensione del verde: è una strategia che viene adottata quando il mezzo pubblico che necessita di priorità si avvicina all'intersezione verso la fine della fase verde; in condizioni non prioritarie, il mezzo quindi non sarebbe in grado di attraversare l'incrocio nella fase in atto. Una volta che i sensori rilevano questa condizione, si provvede ad estendere il tempo di verde della fase semaforica in oggetto, così da permettere al mezzo di transitare (Figura 4). L'estensione del verde è comunque limitata superiormente dal raggiungimento del vincolo di durata massima preimpostato, e dai vincoli di durata minima dei tempi di verde delle fasi non prioritarie all'interno del ciclo.

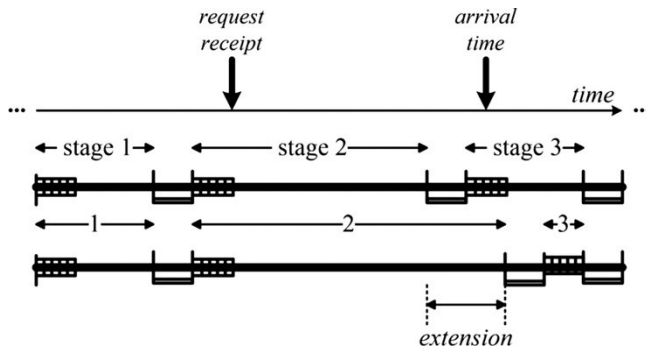


Figura 4: estensione del verde (Diakaki, Papageorgiou, Dinopoulou, Papamichail, & Garyfalia, 2015)

- Riordino o rotazione di fase: consiste nel modificare o ruotare la sequenza delle fasi del piano semaforico allo scopo di anticipare o posticipare la fase verde per l'approccio in cui è presente il mezzo pubblico (Figura 5). Questa fase viene attivata in un momento diverso dal previsto, portando quindi ad una modifica della sequenza delle fasi limitata solo al ciclo in cui è stata rilevata la richiesta di priorità del mezzo pubblico.

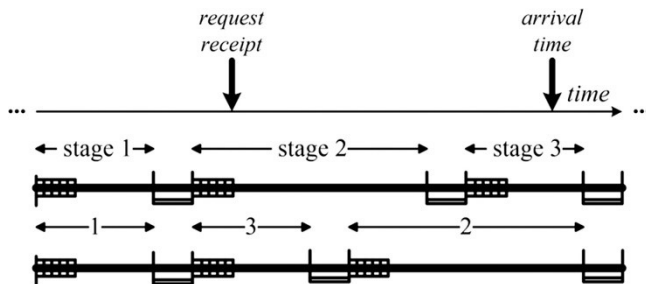


Figura 5: riordino o rotazione di fase (Diakaki, Papageorgiou, Dinopoulou, Papamichail, & Garyfalia, 2015)

- Inserimento di fase: questa strategia permette di inserire, alla prima occasione disponibile, una fase aggiuntiva all'interno del ciclo quando viene rilevata una richiesta di priorità (Figura 6). Le fasi non prioritarie potrebbero quindi venir troncate al minimo tempo di verde o in alcuni casi direttamente saltate. In conseguenza a ciò si assiste ad un incremento del ritardo per gli approcci che ricevono l'indicazione verde nelle fasi prossime alla nuova fase introdotta.

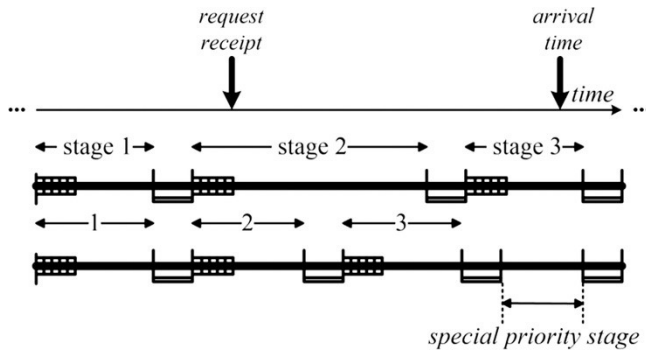


Figura 6: introduzione di fase speciale (Diakaki, Papageorgiou, Dinopoulou, Papamichail, & Garyfalia, 2015)

- Salto di fase: consiste nell'attivare la fase prioritaria dopo aver rilevato il mezzo pubblico, fornendo l'indicazione semaforica rossa a tutti gli altri approcci dell'intersezione e pertanto facendo saltare la fase che normalmente sarebbe in atto nel momento di arrivo del mezzo all'intersezione (Figura 7). Al termine della fase prioritaria, la sequenza continuerà nell'ordine prestabilito. Lo svantaggio di questa strategia risiede proprio nell'omissione di una o più fasi, che generalmente causa un elevato ritardo alle correnti veicolari non prioritarie.

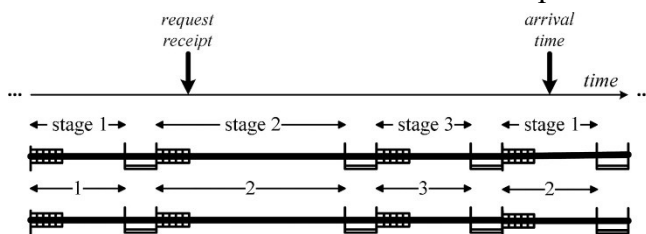


Figura 7: salto di fase (Diakaki, Papageorgiou, Dinopoulou, Papamichail, & Garyfalia, 2015)

Le ultime tre tecniche descritte, a differenza dei metodi di troncamento del rosso e di estensione del verde, sono oggetto di maggiori svantaggi: gli improvvisi cambi di fase possono infatti ridurre la sicurezza e complessivamente possono aumentare i tempi persi all'interno del ciclo, provocando maggiori ritardi soprattutto alle correnti veicolari non prioritarie. Questo porta il troncamento del rosso e l'estensione del verde ad essere le tecniche più comunemente usate. Di seguito viene riportata un'immagine riassuntiva (Figura 8) dei diversi interventi sul piano semaforico relativi alla priorità attiva; come sopra anticipato, si osserva che l'eventuale ritardo per il mezzo pubblico si può riscontrare solo nel caso di troncamento del rosso.

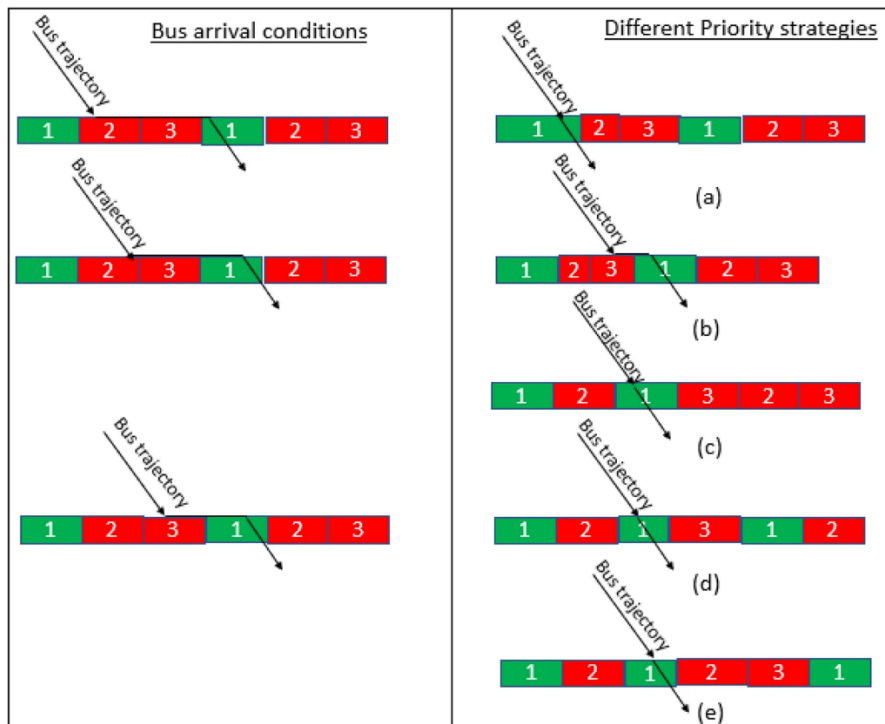


Figura 8: riassunto delle diverse strategie di priorità attiva (Imran, Girijan, & Vanajakshi, 2021); (a) estensione del verde, (b) troncamento del rosso o anticipo del verde, (c) riordino o rotazione di fase, (d) inserimento di fase, (e) salto di fase

Nel contesto della priorità attiva è possibile distinguere la priorità basata su regole e la priorità basata su modelli, a seconda che le decisioni sul controllo dei piani semaforici si basino rispettivamente su regole valutate on-line oppure sull'ottimizzazione di determinati indici di performance.

La priorità basata su regole consiste nel modificare il normale piano semaforico basandosi su una serie di regole decisionali riguardanti ad esempio il ritardo oppure l'headway tra mezzi pubblici. L'efficacia di queste strategie è legata alla correttezza della stima dei tempi necessari al mezzo pubblico per giungere alla linea di stop a partire dall'istante di rilevamento della richiesta di priorità. Nei casi in cui siano previste corsie preferenziali per i mezzi pubblici, i tempi vengono stimati assumendo un determinato valore di velocità e introducendo un coefficiente di sicurezza per prendere in considerazione la possibile differenza tra la velocità teorica assunta e la velocità realmente mantenuta dal mezzo. Quando invece mezzi privati e mezzi pubblici circolano sulla stessa corsia, è necessario considerare anche il tempo di dissipazione dell'eventuale coda di veicoli presenti davanti al mezzo che necessita di priorità. In accordo con (Diakaki, et al., 2003) il tempo di percorrenza che il mezzo impiegherà per raggiungere l'attestamento dell'incrocio a partire dal punto in cui è posizionato il dispositivo di rilevamento della richiesta di priorità, può essere stimato come il massimo tra il tempo necessario in condizioni di free-flow e il tempo necessario a smaltire la coda con segnalazione semaforica verde, quest'ultimo calcolato in base al numero di veicoli effettivamente accodati davanti al mezzo pubblico. Per una stima accurata di questi tempi, i sensori di rilevamento devono essere posizionati ad una distanza (trattata nel capitolo successivo) sufficiente per garantire un adeguato tempo di risposta dell'impianto semaforico in seguito alla ricezione della

richiesta di priorità. Nei casi in cui però sia presente una fermata in prossimità dell'intersezione, al tempo di percorrenza è necessario aggiungere una stima del tempo di sosta alla fermata, la cui quantificazione precisa richiederebbe un sistema di conteggio automatico dei passeggeri.

Un ulteriore aumento di efficienza può essere ottenuto aggiungendo dei dispositivi di rilevamento anche all'uscita dell'intersezione, o anche in posizioni intermedie sull'approccio. Nel primo caso il beneficio è fornito dalla possibilità di interrompere l'azione prioritaria quando il mezzo pubblico ne ha già fruito, oppure, se possibile, di estenderla ulteriormente fino all'effettivo transito del mezzo. Il rilevamento in punti intermedi, effettuato ad esempio con tecnologie AVL o GPS, consente invece di aggiustare l'azione di priorità in base al reale avanzamento del mezzo in funzione delle condizioni del traffico.

I metodi basati su regole non sono in grado di gestire contemporaneamente richieste multiple di priorità, in quanto queste verrebbero semplicemente soddisfatte una alla volta in base all'ordine di ricezione. Il superamento di questo ostacolo porterebbe però ad un aumento di complessità e ad un aumento di informazioni necessarie, rendendo i metodi basati su regole meno efficienti rispetto ai metodi basati sull'ottimizzazione.

Le strategie di priorità basate su modelli forniscono la priorità ai mezzi pubblici ottimizzando diversi indicatori di performance. Alcuni esempi di indicatori sono il ritardo del veicolo e il ritardo dei passeggeri, oppure lo scostamento dell'andamento del mezzo rispetto al programma di esercizio, o combinazioni ponderate di più indici. I modelli utilizzano informazioni su tutti i veicoli che si avvicinano all'intersezione per valutare l'azione migliore da adottare sul piano semaforico. Queste strategie risultano utili anche per gestire richieste multiple di priorità, anche se ciò può comportare un maggiore costo computazionale. Tra i metodi basati sull'ottimizzazione troviamo il sistema UTOPIA (Wahlstedt, 2013), impiegato ad esempio nella città di Torino. È un sistema auto-ottimizzante, che agisce in tempo reale minimizzando una funzione di costo relativa ad esempio a ritardi e numero di arresti. Grazie a sensori in grado di contare il numero di veicoli, e grazie a metodi di stima dei tempi di avvicinamento alle intersezioni, è possibile definire criteri generali per l'ottimizzazione dei piani semaforici. La priorità del trasporto pubblico viene inclusa nel sistema utilizzando dei pesi maggiori per i mezzi pubblici nel calcolo delle funzioni di costo (ad esempio un mezzo pubblico può essere equiparato a 20-50 autovetture). UTOPIA è quindi in grado di valutare il miglior piano semaforico andando a minimizzare una funzione di costo per ogni intersezione. Le unità di controllo di intersezioni vicine si scambiano informazioni sui flussi di traffico per poter programmare le segnalazioni semaforiche allo scopo di creare un'onda verde. Questa tecnica permette di ridurre i tempi di percorrenza sia dei mezzi pubblici, sia dei veicoli privati, generando quindi un vantaggio generale per gli utenti della rete.

2.3: Priorità incondizionata e condizionata

Le strategie di priorità semaforica attiva possono essere ulteriormente classificate in incondizionate e condizionate (Imran, Girijan, & Vanajakshi, 2021) (Diakaki, Papageorgiou, Dinopoulou, Papamichail, & Garyfalia, 2015).

Nel primo caso la priorità viene fornita a tutti i mezzi pubblici in transito, senza valutare se realmente necessitano di trattamenti preferenziali. Queste strategie non sono in grado di gestire efficacemente l'arrivo contemporaneo di più richieste di priorità: in assenza di parametri utili a classificare l'urgenza delle richieste pervenute, la priorità viene generalmente erogata in base all'ordine di arrivo, seguendo quindi un approccio FIFO (First In, First Out). Le strategie incondizionate sono da preferire nei periodi con bassi livelli di traffico per non arrecare ritardi troppo elevati agli approcci non prioritari.

La priorità condizionata consiste nel favorire il transito del mezzo pubblico solo se vengono rispettati determinati criteri, in modo da non penalizzare inutilmente le altri correnti veicolari. La priorità viene pertanto concessa solo quando gli indicatori di riferimento superano una soglia di progetto prestabilita: questi possono riguardare ad esempio il ritardo del mezzo o dei passeggeri, il grado di occupazione del mezzo pubblico o lo scostamento dal programma d'esercizio. Quest'ultimo è importante per garantire un servizio puntuale e viene preso in considerazione soprattutto nei servizi di trasporto con basse frequenze. Quando invece le frequenze sono elevate, spesso non viene definito un vero e proprio orario di transito dei mezzi alle fermate, e l'indicatore di rilievo per garantire un servizio regolare diventa l'headway tra veicoli, ovvero l'intervallo di tempo che intercorre tra due passaggi successivi di un mezzo pubblico ad una determinata fermata. In queste strategie la priorità può venir concessa basandosi sull'headway programmato, oppure facendo riferimento all'headway del mezzo successivo. La prima strategia, che fornisce la priorità quando l'headway del mezzo è maggiore rispetto a quello del programma d'esercizio, non sempre è ottimale, in quanto consente di migliorare la regolarità solo nei casi in cui l'headway del mezzo successivo risulti più piccolo. Con la seconda strategia la priorità viene invece concessa quando l'headway del mezzo considerato è maggiore dell'headway del mezzo seguente, fornendo migliori risultati in termini di regolarità del servizio e di riduzione del ritardo dei passeggeri (Hounsell & Shrestha, 2012). Secondo (Suhyeon, Mincheol, & Kyungsoo, 2005), quando le frequenze sono minori di 15 minuti è più corretto considerare l'headway, nei restanti casi l'aderenza al programma d'esercizio. In alcune situazioni l'erogazione del trattamento preferenziale dovrebbe essere valutata anche in considerazione delle intersezioni semaforizzate successive (Skabardonis, 2000): il mezzo andrebbe avvantaggiato solamente se fosse nelle condizioni di trovare l'indicazione semaforica verde all'incrocio successivo, altrimenti accumulerebbe un ritardo che annullerebbe il vantaggio dato dalla priorità precedentemente concessa. Il trattamento preferenziale non andrebbe concesso al mezzo pubblico anche qualora non fosse in grado di trarne vantaggio a causa di fenomeni di congestione a valle dell'intersezione. Nella decisione di concedere o meno la priorità andrebbero poi presi in considerazione anche i ritardi che verrebbero causati negli approcci non prioritari; a riguardo, due criteri implementabili sono l'inibizione o la compensazione (Skabardonis, 2000). La prima consiste nel limitare la frequenza con cui le priorità vengono concesse, cosa che in parte già avviene quando si è in situazioni di priorità condizionata. La compensazione invece si applica dopo aver concesso un trattamento preferenziale, andando ad aumentare il tempo di verde per le correnti non

prioritarie; questo metodo potrebbe creare eccessive code e ritardi nei casi di elevati volumi di traffico. Inoltre altri criteri usati per la priorità condizionata si basano su indicatori (Diakaki, Papageorgiou, Dinopoulou, Papamichail, & Garyfalia, 2015) quali il ritardo dei passeggeri sui mezzi pubblici, i tempi di attesa alle fermate, il ritardo totale di tutte le persone in attesa all'incrocio (quindi sia su mezzi privati che pubblici) oppure il carico dei mezzi. Questi ultimi richiedono la presenza di tecnologie a bordo in grado di contare il numero di passeggeri (APC: automatic passenger counters) e di dialogare con il sistema di controllo. Le strategie di priorità condizionata trovano applicazione anche nei casi di richieste multiple di priorità, favorendo per primo il mezzo pubblico i cui indicatori superano maggiormente i valori soglia.

CAPITOLO 3

ARCHITETTURE FUNZIONALI E TECNOLOGIE IMPIEGATE

3.1: Architetture funzionali

Le architetture di sistema impiegate per fornire la priorità semaforica ai mezzi pubblici sono svariate, con diversa complessità e diversi costi: dipendono infatti dalla tipologia di priorità adottata e spesso dipendono dalle infrastrutture semaforiche e di controllo già esistenti. Le principali differenze tra architetture sono riscontrabili nelle componenti di sistema impiegate, nel processo decisionale e nella comunicazione; per la descrizione di questi aspetti, nel seguito si fa riferimento principalmente a (Hounsell & Shrestha, 2005). In una configurazione completa e centralizzata le unità fondamentali dell'architettura funzionale sono il mezzo pubblico, il centro AVL (Automatic Vehicle Location), il sistema UTC (Urban Traffic Control) e l'impianto semaforico con le relative comunicazioni (Figura 9). Numerosi dati vengono scambiati in tempo reale tra le varie unità del sistema (Zhizhou, Hao, Yuqi, & Xiaoguang, 2006): è necessario conoscere la quantità di mezzi privati e pubblici in prossimità delle intersezioni, la posizione e la velocità della flotta, il carico di passeggeri, informazioni operative quali il numero identificativo del mezzo pubblico, informazioni sul percorso e sull'andamento dei tempi di viaggio. Questi dati sono necessari per prevedere in modo accurato i tempi di arrivo del mezzo all'intersezione e per valutare i criteri necessari a definire la richiesta di priorità. Infine vengono scambiate informazioni per la gestione dei piani semaforici con le eventuali modifiche da attuare.

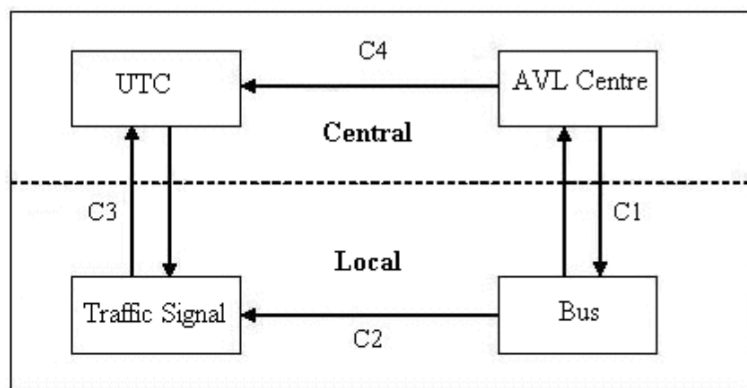


Figura 9: Rappresentazione di un'architettura per la priorità semaforica (Hounsell & Shrestha, 2005)

I principali aspetti che definiscono un'architettura sono l'unità nella quale viene generata la richiesta di priorità, il modo in cui la richiesta arriva all'impianto semaforico, e l'unità nella quale vengono prese le decisioni di intervento sul piano semaforico. Da ciò derivano diverse strutture funzionali caratterizzate da diversa efficacia, diverse tecnologie e pertanto diversi costi.

3.1.1: Generazione della richiesta di priorità

La richiesta di priorità viene determinata dall'”intelligenza” in base ai criteri definiti in fase di progetto e utilizzando le informazioni sulla posizione del mezzo pubblico. Questa decisione può venir presa direttamente a livello locale o a livello centrale.

Nel primo caso l'”intelligenza”, contenente i criteri per definire il livello di richiesta di priorità, può essere situata direttamente nel bus o nell'impianto semaforico. In quest'ultimo caso, che può essere impiegato per metodi prioritari basati sull'headway, il processore registra il tempo di rilevamento del mezzo pubblico precedente e calcola l'headway al momento del transito del nuovo bus. Con questi dati a disposizione definisce il livello di richiesta di priorità e trasmette poi l'informazione al controller semaforico per l'applicazione. Se l'”intelligenza” è invece situata nel bus, il tempo di rilevamento del mezzo precedente viene inizialmente registrato nel processore dell'impianto semaforico, per poi essere trasmesso al bus nel momento di avvicinamento all'intersezione. Il bus calcola quindi l'headway, definisce il livello di richiesta di priorità, e lo trasmette al controller semaforico. Essendo questo un metodo più complesso rispetto a quello precedentemente descritto, trova maggiore applicazione nelle strategie per servizi a bassa frequenza, dove la richiesta di priorità viene determinata in base allo scostamento dal programma d'esercizio memorizzato nel processore a bordo del mezzo (solitamente caricato giornalmente tramite rete wireless o tramite un sistema radio prima dell'inizio del servizio (Li, et al., 2008)). Il mezzo pubblico deve quindi essere in grado di rilevare la propria posizione e valutare diversi indicatori così da poter implementare strategie di priorità condizionata. Il vantaggio dell'”intelligenza” a livello locale risiede nel non necessitare di un centro AVL se i bus possono individuare la loro posizione tramite strumenti GPS presenti a bordo. Queste architetture presentano però limiti nella possibilità di modifica dei criteri per la richiesta di priorità e limiti sulla flessibilità di gestione della flotta per tratte diverse: per assegnare i bus su percorsi differenti è necessario prima inserire a bordo mezzo le nuove informazioni e i nuovi criteri, portando a maggiori costi operativi.

L'altra soluzione possibile è prevedere un'”intelligenza” centrale rappresentata da un centro AVL, spesso predisposto anche allo scopo di fornire costantemente informazioni ai passeggeri. Questo monitora in tempo reale i dati e la posizione dell'intera flotta: è quindi possibile pesare le informazioni relative ai diversi mezzi così da decidere per quali generare la richiesta di trattamento preferenziale (Li, et al., 2008). Si adottano quindi strategie di priorità valutando le prestazioni del servizio a livello di rete, cosa non permessa dalle architetture locali precedentemente descritte. Un sistema così organizzato permette di gestire dinamicamente i criteri di priorità, adattandoli in tempo reale allo scopo di favorire determinati mezzi o determinati percorsi. Lo scambio delle numerose informazioni con i mezzi deve essere frequente e può essere effettuato tramite un sistema radio dedicato che comporta un aumento dei costi di installazione.

3.1.2: Modalità di comunicazione delle informazioni

Il passaggio successivo consiste nel trasmettere la richiesta di priorità fino all'unità di controllo dell'impianto semaforico per renderla attuabile tramite la modifica del piano. In base alle diverse modalità di trasferimento è possibile distinguere tra comunicazione centralizzata e decentralizzata.

La comunicazione centralizzata è caratterizzata dallo scambio di informazioni tra i due centri AVL e UTC. La richiesta di priorità proveniente dal centro di controllo AVL viene inviata all'UTC che gestisce il funzionamento di tutte le intersezioni della rete. L'UTC quindi valuta e decide le azioni da implementare nel piano semaforico per poi inviarle al controller che le deve applicare; è quindi necessaria una comunicazione in tempo reale tra l'UTC e le singole intersezioni, non sempre possibile. Non necessitando di dialogo tra il mezzo pubblico e l'unità di controllo semaforica, e quindi non necessitando di infrastrutture stradali di rilevamento, questa architettura permette di contenere i costi. La posizione del mezzo pubblico viene infatti rilevata tramite un sistema GPS: nel sistema di bordo del bus vengono caricati dei punti virtuali di rilevamento, e al raggiungimento di ognuno di essi il mezzo comunica la posizione e l'orario al centro di controllo AVL. Essendovi comunicazione in tempo reale tra il centro AVL e l'UTC, questo sistema consente di monitorare la frequenza e a quali mezzi viene concessa la priorità, utilizzando queste informazioni per migliorare il programma d'esercizio (Li, et al., 2008).

Nel caso di comunicazione decentralizzata, adatta sia per intersezioni isolate che coordinate (Gardner, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009), la richiesta di priorità viene inviata dal mezzo pubblico al controller semaforico durante l'avvicinamento all'intersezione; nei casi in cui sia il centro AVL a richiedere il trattamento preferenziale, la richiesta viene prima inviata al bus. La richiesta di priorità viene effettuata solo quando il mezzo viene rilevato in avvicinamento all'intersezione, disponendo quindi di una posizione precisa che permette una migliore stima del tempo di arrivo rispetto a quella ottenibile attraverso una comunicazione centralizzata. Una migliore stima dei tempi si traduce in una maggiore quantità di azioni prioritarie erogate con successo. Il rilevamento dei mezzi pubblici può essere effettuato sia con rilevatori fisici su strada quali spire induttive, sia con sistemi GPS. I primi hanno costi di installazione e manutenzione maggiori, ma anche una migliore accuratezza rispetto alla tecnologia GPS. Un ulteriore aumento di costo è poi dato dalla rete di comunicazione necessaria a far pervenire la richiesta di priorità al controller semaforico, rendendo di fatto questa architettura più costosa rispetto al sistema centralizzato. Sistemi di comunicazione decentralizzati sono stati utilizzati per esempio a Londra (Gardner, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009), Cardiff (Hill, 2000) e Leicester (Gillam & Wright, 2000).

3.1.3: Attuazione del trattamento prioritario

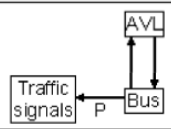
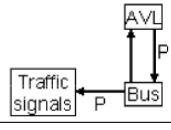
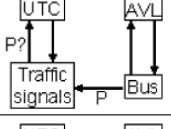
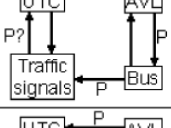
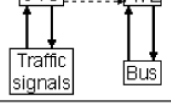
Nelle architetture con sistema di comunicazione decentralizzata e quando gli impianti semaforici sono gestiti tramite l'UTC, la decisione di come agire sul piano semaforico per implementare la richiesta di priorità può avvenire su due livelli: a livello centrale se la decisione viene presa dall'UTC, oppure a livello locale se la decisione viene presa dal singolo controller

semaforico. Il primo caso trova applicazione nelle situazioni in cui gli impianti semaforici sono gestiti in modo coordinato tramite l'UTC: la richiesta di priorità viene da esso elaborata tenendo in considerazione i parametri di controllo e valutando gli effetti dell'azione a livello di rete. L'eventuale modifica del piano semaforico viene poi inviata direttamente all'unità di controllo dell'intersezione. Siccome la decisione viene presa tenendo in considerazione gli effetti di sistema, gli impatti negativi del trattamento prioritario sulle altre correnti veicolari vengono minimizzati. Con un'architettura di questo tipo l'efficacia della strategia prioritaria può essere limitata dai tempi necessari per la comunicazione tra le varie parti del sistema. Nel secondo caso, a livello locale, la decisione sulla modifica del piano viene eseguita dall'unità di controllo semaforica stessa. Questo consente quindi di ridurre i tempi di comunicazione, portando ad una maggiore efficacia delle azioni prioritarie intraprese. Nei casi di comunicazione centralizzata l'unica soluzione possibile è la prima descritta.

3.2: Esempi applicativi di architetture funzionali

In Europa molte città hanno introdotto sistemi di priorità semaforica per il trasporto pubblico basati sulla localizzazione automatica dei mezzi (AVL) che si distinguono in base alle architetture adottate. Secondo (Hounsell & Shrestha, 2005) queste possono essere raggruppate principalmente in 5 categorie (Tabella 1).

Tabella 1: Esempi di diverse architetture di priorità basate su AVL (Hounsell & Shrestha, 2005)

Category	Architecture (P = priority request)	Priority intelligence	Priority request	Priority decision
A1		Local	Decentralised	Local
A2		Central	Decentralised	Local
B1		Local	Decentralised	Central/Local
B2		Central	Decentralised	Central/Local
B3		Central	Centralised	Central

Le prime due architetture, A1 e A2, sono principalmente adatte per intersezioni isolate.

Nel primo caso, categoria A1, l'"intelligenza" locale utilizza le informazioni di localizzazione fornite dal centro AVL per determinare il livello di richiesta di priorità. Essendo il sistema decentralizzato, la richiesta viene inviata direttamente dal mezzo pubblico al controller

semaforico che si occupa poi di decidere come attuarla intervenendo sul piano. Non essendo presente l'UTC, tale decisione può infatti venir presa solamente a livello locale.

Nella categoria A2 la richiesta di priorità ha origine a livello centrale nel centro AVL, impiegato anche per individuare la posizione del mezzo. La richiesta viene poi trasmessa al bus che a sua volta la invia all'unità di controllo semaforica locale. Come nel caso precedente, la decisione di intervento per soddisfare la richiesta viene presa a livello locale.

Nelle successive tre architetture, B1, B2 e B3, gli impianti semaforici sono gestiti tramite l'UTC.

Nel caso B1 la richiesta di priorità viene determinata a livello locale utilizzando le informazioni sullo stato e sulla posizione del bus fornite dal centro AVL e confrontandole con il programma di viaggio caricato nel sistema di bordo. Tramite comunicazione decentralizzata la richiesta viene poi inviata dal mezzo pubblico al controller semaforico. Essendo ora presente l'UTC, la modifica del piano semaforico può essere decisa a livello locale dal controller oppure a livello centrale dall'UTC.

La categoria B2 si differenzia dalla B1 per la determinazione della richiesta di preferenziamento semaforico: in questo caso infatti essa viene presa a livello centrale dal centro AVL per essere in seguito inviata al bus.

Nella tipologia B3 vi è comunicazione tra il centro AVL e l'UTC. La richiesta di priorità viene definita dal centro AVL che dispone della localizzazione e delle informazioni sul mezzo. La richiesta arriva poi in modo centralizzato all'UTC che determina (a livello centrale) le modifiche da effettuare sul piano semaforico per inviarle successivamente al controller locale. L'efficacia di questa architettura dipende molto dall'accuratezza dei dati disponibili nel centro AVL: non essendovi sistemi di rilevamento stradali in prossimità dell'intersezione, sia la richiesta che l'attuazione della priorità dipendono dalle informazioni sulla posizione del mezzo disponibili a livello centrale. Inoltre eventuali ritardi nella comunicazione tra le varie unità del sistema possono portare il mezzo a perdere il beneficio dell'azione prioritaria. Una variante della tipologia B3 consiste nell'introdurre anche una comunicazione dall'UTC verso il centro AVL. Quest'ultimo viene informato dall'UTC delle modifiche sul piano semaforico, e al tempo stesso, nella direzione opposta, l'UTC riceve informazioni sulla posizione dei mezzi pubblici per poter eventualmente ritardare l'attuazione dell'azione prioritaria.

3.3: Tecnologie impiegate

Per poter implementare strategie prioritarie attive nei servizi di trasporto pubblico si rendono necessarie diverse tecnologie (Li, et al., 2008) per il rilevamento dei mezzi e per la trasmissione ed elaborazione delle informazioni. L'entità e i costi dei dispositivi impiegati sono generalmente funzione della tipologia di priorità e di architettura adottata. Ad esempio, la priorità basata su regole, che può essere realizzata a livello decentralizzato, richiede meno infrastrutture tecnologiche rispetto alle strategie basate su modelli che invece spesso richiedono un sistema centralizzato (Imran, Girijan, & Vanajakshi, 2021).

Un ruolo primario è rivestito dalle tecnologie di rilevamento: la corretta identificazione e localizzazione dei mezzi pubblici su strada è fondamentale per implementare efficaci strategie di priorità semaforica. Al rilevamento sono infatti strettamente associate la determinazione dei parametri per la richiesta di priorità, la stima dei tempi di avvicinamento all'intersezione, e l'inizio e la fine della modifica del piano semaforico.

Nel seguito vengono descritti i principali dispositivi che possono essere utilizzati.

3.3.1: Spire AVI

Questi dispositivi consentono di rilevare e di distinguere i mezzi pubblici dai restanti veicoli. Fanno parte di un sistema di identificazione automatica dei veicoli AVI (Automatic Vehicle Identification) costituito da tre componenti principali: un trasmettitore codificato, un dispositivo di rilevamento integrato nella spira, e un ricevitore. Il primo viene montato nella parte inferiore di ogni veicolo della flotta ed è caratterizzato da un codice necessario all'identificazione del mezzo. Il trasmettitore, quando rilevato dalla spira, invia un segnale al secondo dispositivo. Infine il messaggio viene trasmesso via cavo ad un ricevitore collocato nell'impianto semaforico. Un sistema più semplice, che non necessita di dispositivi a bordo del veicolo, è rappresentato da spire che rilevano i mezzi solamente in base alla forma: gli svantaggi sono però evidenti, in quanto possono essere impiegate solamente in contesti dove l'intera flotta di bus possiede caratteristiche di forma omogenee e distinte dai restanti veicoli stradali (Gardner, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009). Le spire possono essere collocate in diverso numero in prossimità di un'intersezione, permettendo di identificare il veicolo sia in fase di avvicinamento ("check-in"), sia al momento dell'attraversamento dell'intersezione ("check-out") così da poter interrompere l'azione prioritaria. Inoltre questi dispositivi sono adatti per qualsiasi condizione meteo, per qualsiasi tipologia di veicolo appositamente dotato di trasmettitore e, essendo le comunicazioni ravvicinate, consentono di ridurre false o mancate identificazioni. Le loro principali limitazioni sono dovute alla collocazione fissa nel manto stradale: necessitano di installazione, la loro funzionalità è legata allo stato della pavimentazione, non possono essere spostate e potrebbero venir danneggiate in caso di lavori stradali. In aggiunta le spire consentono di rilevare i mezzi solo nella direzione di installazione e non permettono l'attuazione di strategie prioritarie condizionate (Wong & Hounsell, 2010). Importante per questa tecnologia è la distanza di installazione dall'intersezione: se posizionate troppo vicino la priorità potrebbe non andare a buon fine, se troppo distanti potrebbero invece portare ad un'estensione eccessiva della fase verde. Secondo uno studio condotto da (Liu, Skabardonis, Zhang, & Li, 2004) la posizione ottimale per il rilevamento risulta essere compresa tra 150 m e 300 m a monte dell'intersezione. Un altro studio (McLeod, Hounsell, & Ishtiaq, 1996) dimostra che una distanza del rilevamento pari a 70-100 metri a monte dell'attestamento risulta generalmente sufficiente su corsie con traffico misto, con intensità medio-alta di traffico e assumendo nulli i ritardi nella comunicazione; invece nei casi di bassa intensità di traffico, oppure se i mezzi pubblici viaggiano su corsie loro dedicate, o in presenza di ritardi nella comunicazione, questa distanza deve essere aumentata.

3.3.2: Rilevatori ottici/infrarossi

I mezzi pubblici vengono dotati di un emettitore che invia un codice identificativo utilizzando una lunghezza d'onda nel campo del visibile o in quello dell'infrarosso. Questa viene ricevuta da un rilevatore posto in prossimità o a monte dell'impianto semaforico; quest'ultimo caso si rende necessario in presenza di ostacoli che possono interferire con la trasmissione del segnale. Questa è una tecnologia consolidata che garantisce flessibilità nell'impostare il raggio di rilevamento. È però limitata dal necessitare dell'assenza di ostacoli tra l'emettitore e il ricevitore, da un ridotto numero di informazioni scambiate (spesso solo il codice identificativo) e da una bassa accuratezza di rilevamento. Inoltre l'efficacia può essere limitata da eventuali ritardi nella comunicazione. La necessità di numerosi dispositivi rende questa tecnologia abbastanza costosa in termini di installazione e manutenzione.

3.3.3: Impianti di rilevamento a bordo strada

Il mezzo pubblico è dotato di un trasmettitore a radiofrequenza che, quando è in fase di avvicinamento all'intersezione, invia un segnale ad un ricevitore installato a bordo strada a monte dell'approccio. In base all'architettura funzionale adottata, il segnale viene poi inoltrato al controller semaforico se il sistema è decentralizzato (Figura 10), oppure al centro AVL o all'UTC se il sistema è centralizzato. Qui l'informazione viene quindi elaborata e viene definita l'azione da attuare sul piano semaforico. Rispetto alla tecnologia basata su rilevatori ottici/infrarossi, questa non presenta problemi dovuti alla presenza di ostacoli per il segnale. Installando un secondo dispositivo di rilevamento a bordo strada è possibile rilevare l'istante in cui il mezzo pubblico supera l'intersezione, al fine di interrompere la modifica del piano semaforico. Inoltre non necessita di rilevanti lavori stradali per l'installazione, anche se richiede un adeguato spazio laterale alla strada. Il costo hardware spesso è consistente e a volte può risultare necessario il pagamento di una licenza.

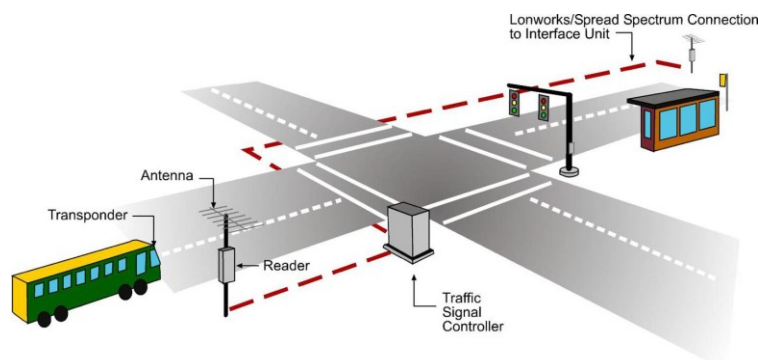


Figura 10: Componenti del sistema con architettura decentralizzata (Li, et al., 2008)

3.3.4: GPS e comunicazione radio

Tecnologie più moderne rispetto alle spire induttive e rispetto al rilevamento attraverso segnali radio sono rappresentate da sistemi GPS (Global Positioning System) con localizzazione automatica dei mezzi pubblici (AVL). I veicoli sono dotati di un ricevitore GPS che fornisce dati ogni 200 ms (5 Hz) (Liao, Davis, & Iyer, 2008) o ogni secondo (Hounsell & Shrestha,

2012) (Li, et al., 2008). Il dispositivo infatti, assieme all'orario, determina la posizione, direzione e velocità del mezzo necessarie a valutare la richiesta di priorità e a prevedere il tempo di avvicinamento con un'accuratezza dell'ordine dei secondi (Imran, Girijan, & Vanajakshi, 2021); l'accuratezza sulla posizione invece si attesta in circa 5-10 m (Gardner, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009). È così possibile definire dei punti di rilevamento virtuali caricati nel processore di bordo, raggiunti i quali viene generata la richiesta di priorità; questo permette di superare i limiti dovuti alla posizione fissa di altre tecnologie quali le spire induttive (un esempio è il caso di Londra dove è stato introdotto il sistema iBus (Wong & Hounsell, 2010)). Nel caso di architettura decentralizzata il mezzo, dotato di un emettitore radio, comunica poi con l'unità di controllo semaforica dove è collocato il ricevitore. Qualora si fosse in presenza di un'architettura centralizzata, le informazioni invece verrebbero inviate al centro AVL: grazie al GPS, questo è quindi in grado di monitorare in tempo reale la posizione di tutta la flotta (Hounsell & Shrestha, 2012), e i criteri per la definizione della richiesta di priorità (quali l'headway) possono così essere determinati in ogni momento. Essendovi lo scambio di numerose informazioni attraverso il centro AVL e il successivo UTC, nel caso centralizzato viene richiesto un sistema di comunicazione più esteso; la presenza del centro AVL consente comunque di ridurre le componenti hardware necessarie a bordo mezzo. Questo tipo di comunicazione wireless presenta vantaggi quali un costo d'installazione contenuto e la possibilità di utilizzo in situazioni con ostacoli fisici per il segnale; inoltre la comunicazione radio consente di trasmettere una grande quantità di dati relativi allo stato dei mezzi. Questa tecnologia, grazie alla possibilità di definire dei punti di rilevamento virtuali che non richiedono installazioni fisiche, consente di gestire in modo flessibile il sistema, potendo agevolmente spostare la loro posizione oppure aumentarne il numero (rilevatori di check-in, intermedi, di check-out). La tecnologia GPS, di cui deve essere dotato ogni mezzo, può però non riuscire ad individuare la posizione nelle zone con grattacieli ("canyon urbani") o in galleria (Zhizhou, Hao, Yuqi, & Xiaoguang, 2006), e non sempre risulta facile l'integrazione con gli altri dispositivi di cui sono dotati i mezzi pubblici.

3.3.5: Sistema di comunicazione Wi-Fi

È un'avanzata tecnologia wireless utilizzata per lo scambio di informazioni tra le unità di sistema che spesso viene associata con il sistema GPS. I dati sulla posizione e sullo stato del mezzo vengono inviati attraverso onde radio dall'emettitore del veicolo al ricevitore posto nel controller semaforico, comunicando all'interno della zona coperta dalla rete. I principali vantaggi sono riscontrabili nella maggiore applicabilità rispetto ad altre tecnologie, nella possibilità di implementare anche comunicazioni tra controller semaforici, e nei ridotti costi delle attrezzature impiegate. Allo stesso tempo però risulta necessario sostenere una spesa iniziale allo scopo di sviluppare il sistema su misura. In aggiunta, l'entità della copertura della rete e, in alcuni casi, la presenza di ostacoli fisici, potrebbero limitare il rilevamento del mezzo.

Di seguito viene riportata una tabella riassuntiva delle tecnologie sopra discusse, in cui è possibile confrontare i costi di installazione e gestione (anno 2008), l'applicabilità e le componenti hardware necessarie per ogni tipologia.

Tabella 2: Confronto delle tecnologie di rilevamento (Li, et al., 2008)

Table 4-1: Comparison of TSP Detection Systems

System	Costs			Customize ID & Data Format?	Potential Interface with AVL schedule?	Tested & Proven Tech?	Central or Local System Typical Applications?	Requires Line of Sight?	Possible Additional Equipment for Implementation		Range	Jurisdictions using TSP detection
	Per Intersection	Per Bus	Operating / Maintenance						Additional Bus Hardware?	Additional Intersection Hardware?		
Smart Loops	\$2,000, depends on local contractor	\$250	Low (cost of loop)	No	Maybe	Yes	Both	No	Transmitter	Would likely need additional loops at each intersection (check-in/check-out)	Limited only by lead-in cable from loop to controller	Los Angeles; Chicago; Pittsburgh; San Mateo County, CA; Arlington Heights, IL
Optical	\$3,500 for card and rack in cabinet \$ 6,500 for site setup and installation	\$3,000	\$2,000 (emitter replacement) Not probable	No	Yes	Yes	Local	Yes	Optical Emitters	Optical detectors, phase selector for controller cabinet	2,500 feet under ideal conditions	Portland, OR; San Francisco; Tacoma; Kennewick, WA; San Jose; Calgary; Houston; Sacramento; Philadelphia; St. Cloud, MN; Salt Lake City; Alameda & Contra Costa Counties (CA)
Wayside or RF based	\$35,000 - \$40,000 includes mast arm poles for readers	\$50 - \$600	\$50 (tag replacement), \$1,000/year	Yes	Yes	Yes	Both	No	None	Roadside reader	Limited only by connection between wayside reader and controller, some readers may be able to detect up to a block away	King County, WA
GPS	\$7,500	\$5,000	No data available	Yes	Maybe	No	Both	No	GPS/ radio units	Radio receiver, phase selector	2,500 feet with no obstructions	Broward County, FL (emergency vehicle preemption only)
Wi-Fi	\$5,000	\$5,000 or less	Low	Yes	Yes	Yes	Both	No (may depend on antenna)	Wireless transmitter	Wireless receiver, bridging equipment	1 Mile +/- (Can be increased with additional access points)	Los Angeles County

3.3.6: Sistemi di comunicazione per il centro AVL e l'UTC

Il centro AVL e l'UTC rivestono particolare importanza nei sistemi di priorità semaforica centralizzata. Il centro AVL si interfaccia in modo continuo con i mezzi per monitorarli e raccogliere dati, permettendo di disporre delle informazioni necessarie a definire il livello di richiesta di priorità. Lo scambio di informazioni può avvenire con comunicazioni vocali tramite radio oppure tramite un vero e proprio sistema AVL. Questo deve avere una frequenza di trasferimento dei dati sufficientemente elevata: trasferimenti di informazioni lenti possono portare il mezzo a non beneficiare del trattamento preferenziale programmato. Una comunicazione risulta efficace quando il tempo che intercorre tra il rilevamento del veicolo e la ricezione da parte del controller semaforico dell'azione da implementare è quantificabile in 1-2 secondi. All'UTC invece competono svariate funzioni come la gestione degli impianti semaforici, le decisioni prioritarie, la raccolta di dati, ecc. che comportano lo scambio di numerose quantità di informazioni sia in entrata che in uscita. Allo scopo può essere utilizzata la fibra ottica, tecnologia in grado di fornire una comunicazione veloce e affidabile. Lo svantaggio principale risiede nei costi di installazione qualora questa non sia già predisposta.

CAPITOLO 4

EFFICACIA ED IMPATTI NEGATIVI DELLE STRATEGIE PRIORITARIE

4.1: Stima dei tempi di percorrenza

Uno dei problemi principali connessi all'implementazione delle strategie di priorità semaforica consiste nell'accurata determinazione del tempo di arrivo del mezzo pubblico all'intersezione. Dato che le modifiche del piano semaforico determinate dalle richieste di priorità sono tipicamente dell'ordine dei secondi, la stima di questi tempi è fondamentale per garantire l'efficacia dei trattamenti preferenziali e per non impattare eccessivamente sulle correnti veicolari non prioritarie. Un elemento che può influire in maniera importante sui tempi di percorrenza è la presenza di una fermata prima dell'intersezione: l'elevata aleatorietà della durata della sosta ne rende difficoltosa una buona quantificazione. Nel seguito viene riportato un metodo per la stima dei tempi di arrivo all'attestamento distinguendo i casi in cui la fermata sia a monte o a valle dell'incrocio (Liao, Davis, & Iyer, 2008), caratteristica che, come si vedrà nel proseguimento del capitolo, risulta molto importante per gli effetti delle strategie prioritarie. Per la descrizione si fa riferimento alla Figura 11: si considera l'intersezione i , e le direzioni est e ovest per le situazioni con fermata a monte o a valle rispettivamente.

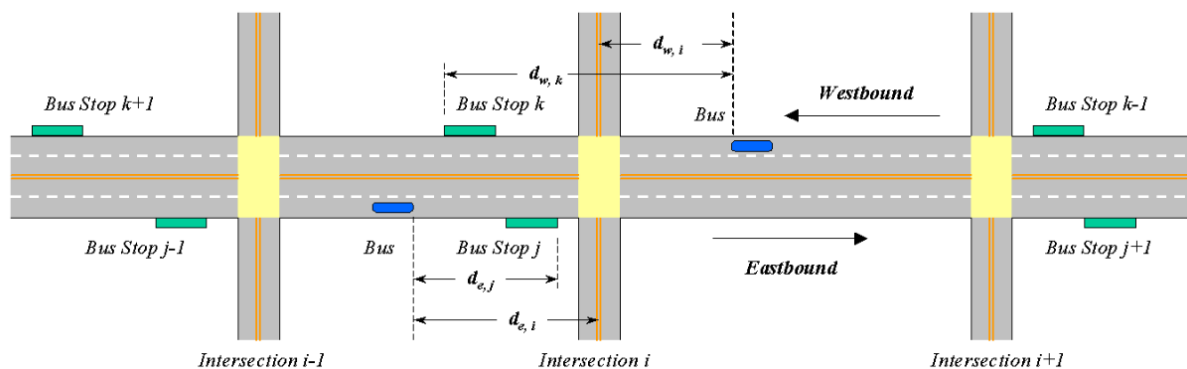


Figura 11: Esempio di corridoio stradale con fermate di bus a monte o a valle di un'intersezione (Liao, Davis, & Iyer, 2008)

4.1.1: Stima dei tempi di percorrenza con fermata a monte dell'intersezione

Nella trattazione seguente si indica con T_{dj} il tempo di sosta previsto alla fermata (che può essere quantificato utilizzando statistiche storiche e con modelli di regressione lineare (Liao, Davis, & Iyer, 2008)), con T_{aj} il tempo di percorrenza dalla posizione attuale alla fermata, con v_b la velocità del mezzo, con $d_{e,j}$ la distanza tra l'attuale posizione del bus e la fermata, con T_{br} il tempo di frenata e con T_{delay} il ritardo dovuto al traffico.

Il tempo che il bus impiega a raggiungere la fermata può essere calcolato come:

$$T_{aj} = \frac{d_{e,j}}{v_b} + T_{br} + T_{delay}$$

Indicando ora con T_{ij} il tempo necessario a percorrere il tratto compreso tra la fermata e l'attestamento, con $d_{e,i}$ la distanza tra la posizione iniziale del bus e l'intersezione, con a

l'accelerazione del mezzo e con T_{bc} il tempo di sgombero della fermata, e assumendo che la distanza tra la fermata e l'intersezione sia insufficiente a raggiungere la velocità v_b , risulta:

$$T_{ij} = \sqrt{\frac{2(de_i - de_j)}{a}} + T_{bc}$$

Sulla base dei due termini calcolati, e definendo con t il tempo attuale espresso in secondi, è ora possibile individuare il momento in cui il mezzo raggiungerà l'intersezione a partire dalla sua posizione:

$$t_{ei} = t + T_{aj} + T_{dj} + T_{ij}$$

Il mezzo invece partirà dalla fermata all'istante dato da:

$$t_{lj} = t + T_{aj} + T_{dj}$$

La richiesta di priorità semaforica deve essere inviata d secondi prima della partenza del mezzo in seguito alla sosta, quindi al tempo $t_{lj} - d$. La grandezza d comprende il tempo necessario al controller per l'elaborazione dei dati, i ritardi nella comunicazione, e una costante di tempo aggiuntiva. Il trattamento prioritario deve poi essere concluso all'istante $t_{ei} + T_{xi}$, dove con T_{xi} si è indicato il tempo necessario al completo attraversamento dell'intersezione.

Sulla base dei valori così calcolati si può valutare se sia necessaria o meno una modifica del piano semaforico per fornire il trattamento preferenziale. Non è necessaria alcuna azione se sia l'istante di inizio $t_{lj} - d$ che quello di fine $t_{ei} + T_{xi}$, ricadono all'interno della fase verde. Se solo l'istante di fine ricade nella fase rossa, allora è necessario agire estendendo il tempo di verde; se invece è solo l'istante di inizio a coincidere con la segnalazione rossa, si agisce anticipando la fase di verde.

4.1.2: Stima dei tempi di percorrenza con fermata a valle dell'intersezione

Ora si considera il bus che viaggia in direzione ovest verso l'intersezione i , rispetto alla quale la fermata K è situata a valle. La trattazione risulta più semplice del caso precedente in quanto il tempo di arrivo all'attestamento dipende solo dalla velocità del mezzo e dalle condizioni del traffico. Indicando con T_{ai} la stima del tempo necessario al bus per arrivare all'intersezione a partire dalla sua posizione attuale, con $d_{w,i}$ la distanza compresa tra il mezzo e l'incrocio, con v_b la sua velocità e con T_{delay} il ritardo dovuto al traffico, si ha:

$$T_{ai} = \frac{d_{w,i}}{v_b} + T_{delay}$$

Definendo sempre con t il tempo attuale espresso in secondi, l'istante in cui il bus arriverà all'intersezione sarà quindi:

$$t_{wi} = t + T_{ai}$$

Il trattamento prioritario deve iniziare d secondi prima dell'arrivo del mezzo pubblico all'approccio, quindi all'istante $t_{wi} - d$, e terminare a $t_{wi} + T_{xi}$. Non è quindi necessario modificare il piano semaforico se entrambi i tempi appena definiti ricadono all'interno della fase verde; se solo l'istante di fine coincide con la fase rossa, allora è necessario prolungare il tempo di verde; nell'ultimo caso, ovvero quando solo l'istante di inizio ricade nella fase rossa, si agisce anticipando la segnalazione semaforica verde.

4.2: Valutazione degli effetti delle strategie prioritarie

L'implementazione delle strategie di priorità semaforica per i mezzi pubblici richiede alcune analisi per quantificare l'efficacia e gli impatti negativi che ne possono derivare (Li, et al., 2008). Gli indicatori di efficacia, i metodi di valutazione e la tipologia e qualità dei dati utilizzati variano notevolmente da caso a caso. Le differenze sono principalmente dovute alle caratteristiche dell'area di studio, alle condizioni del traffico e alle caratteristiche degli impianti semaforici. Alcuni degli indicatori di efficacia che si possono considerare sono l'affidabilità del sistema di trasporto, i tempi di percorrenza, i ritardi, la velocità media, il numero di passeggeri che beneficiano della priorità, i costi operativi, le emissioni inquinanti, e la sicurezza (Heaslip, Kim, Kaplan, & Dietrich, 2020).

I principali strumenti per l'analisi delle azioni prioritarie proposti da (Li, et al., 2008) sono la previsione macroscopica dell'utenza, l'analisi macroscopica del traffico e l'analisi microscopica e dettagliata del traffico. La prima risulta importante in quanto le strategie di priorità semaforica sono un fattore che influenza la domanda di mobilità, e una previsione del numero di utenti è fondamentale per erogare un servizio di trasporto efficiente. I modelli macroscopici del traffico possono essere utilizzati per una iniziale e grossolana valutazione degli effetti delle strategie prioritarie: vengono infatti utilizzati soprattutto per identificare le intersezioni in cui approfondire le analisi mediante l'utilizzo di micro-simulazioni che consentono di simulare ogni singolo veicolo nella rete. Questi ultimi modelli, viste le loro potenzialità, sono sempre più utilizzati anche se sono più complessi rispetto ai modelli macroscopici. Possono essere applicati per testare differenti strategie prioritarie allo scopo di confrontarle e identificare la migliore, oppure per testare nuovi sistemi prima dell'effettiva implementazione (Li, et al., 2008) (Smith, Hemily, & Ivanovic, 2005). Al tempo stesso, attraverso la micro-simulazione è possibile valutare gli effetti secondari dovuti alla diminuzione del numero di arresti, quali il contenimento delle emissioni inquinanti, la riduzione dell'usura delle componenti dei veicoli, oppure anche la riduzione della manutenzione necessaria per la pavimentazione stradale. Una loro limitazione consiste nell'impossibilità di considerare l'influenza dell'utenza e della ripartizione modale nelle simulazioni.

4.3: Valutazione dell'influenza di diversi parametri sull'efficacia delle strategie di priorità semaforica

L'efficacia delle strategie prioritarie varia da caso a caso in quanto è strettamente legata a numerosi fattori relativi al traffico, alle caratteristiche fisiche delle intersezioni, alle segnalazioni semaforiche, ecc. In (Ngan, Sayed, & Abdelfatah, 2004) viene riportato lo studio dell'influenza di diversi parametri sull'efficacia dei trattamenti preferenziali; nel seguito vengono analizzati i condizionamenti legati al volume di traffico nella direzione dei mezzi pubblici, al grado di saturazione delle strade non prioritarie, all'headway tra bus, alla posizione delle fermate, al posizionamento dei punti di rilevamento dei mezzi, e alla gestione dei movimenti di svolta a sinistra. Mediante micro-simulazione con il software VISSIM gli autori hanno analizzato una tratta di bus lungo l'importante arteria stradale Granville Street a

Vancouver, la cui lunghezza simulata è di circa 6 km. In totale vi sono 19 intersezioni semaforizzate, e i dispositivi di rilevamento sono situati circa 100 m a monte della linea di arresto. I valori di traffico impiegati risalgono all'anno 2000 e sono basati sull'ora di punta della mattina: i volumi sono quantificati in circa 2000 veicoli all'ora, 1000 per direzione di marcia. I mezzi pubblici condividono la sede stradale con le altre categorie di veicoli, e si susseguono con headway di 10 minuti. Lungo la tratta considerata sono presenti 5 fermate per ogni direzione, la maggior parte di esse situate a valle delle intersezioni. Le modifiche dei piani semaforici conseguenti alle richieste di priorità possono essere l'estensione o l'anticipo della fase di verde, con restrizioni in presenza di più richieste in due cicli successivi.

Viene definito uno scenario base senza trattamenti prioritari, senza svolte lungo la strada in esame, senza richieste di verde da parte dei pedoni e senza svolte dalle strade non prioritarie. Inoltre si trascurano la pendenza della strada e la presenza di parcheggi laterali alle corsie, fattori che potrebbero influenzare le valutazioni. Il piano semaforico testato è a tempi fissi ed è costituito da due fasi. Lo scenario appena descritto viene utilizzato come riferimento per confrontare e valutare i parametri sopra citati. Gli autori hanno condotto simulazioni della durata di un'ora, con l'aggiunta di 15 minuti iniziali allo scopo di portare il sistema a regime; ogni implementazione è stata ripetuta per un totale di cinque volte. Per ridurre gli effetti dovuti all'aleatorietà dei parametri, i risultati finali sono stati mediati escludendo il valore più alto e più basso ottenuti. Di seguito vengono riportati i risultati a livello globale (per l'intera arteria) e a livello locale (per una singola intersezione).

- Volume di traffico nella direzione dei bus (valutazione globale). Per le simulazioni sono stati considerati volumi pari a 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 2700 veicoli/h in tre corsie, che corrispondono a gradi di saturazione da 0.2 fino a 1.0. In Figura 12 e in Figura 13 vengono mostrati i risultati ottenibili facendo variare il grado di saturazione e fissando tutti gli altri parametri. Si può osservare che le strategie prioritarie hanno maggiore efficacia quando i volumi di traffico sono medio-alti; in situazioni con bassi gradi di saturazione i mezzi pubblici infatti non subiscono elevati ritardi dovuti alla congestione, rendendo meno efficace la priorità semaforica. D'altra parte si osserva che la priorità risulta del tutto inefficace quando il grado di saturazione si avvicina a uno. Quest'ultima situazione riduce anche notevolmente la percentuale di successo delle azioni prioritarie: i bus necessitano infatti di più tempo per raggiungere la linea di arresto a seguito del rilevamento, aumentando la probabilità di non riuscire ad attraversare l'intersezione durante l'estensione di fase.

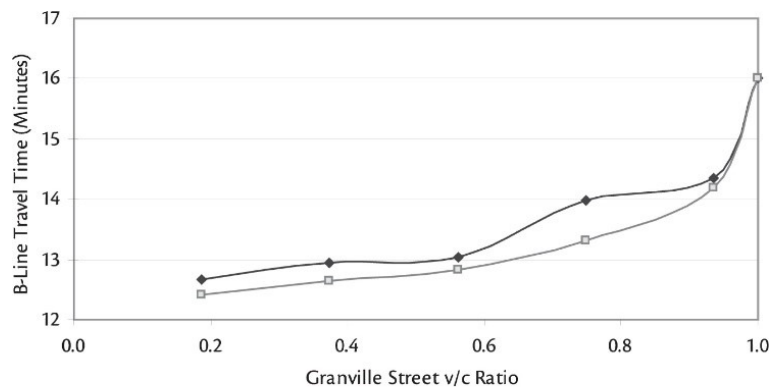


Figura 12: Impatti sul tempo di percorrenza dei bus (Ngan, Sayed, & Abdelfatah, 2004)

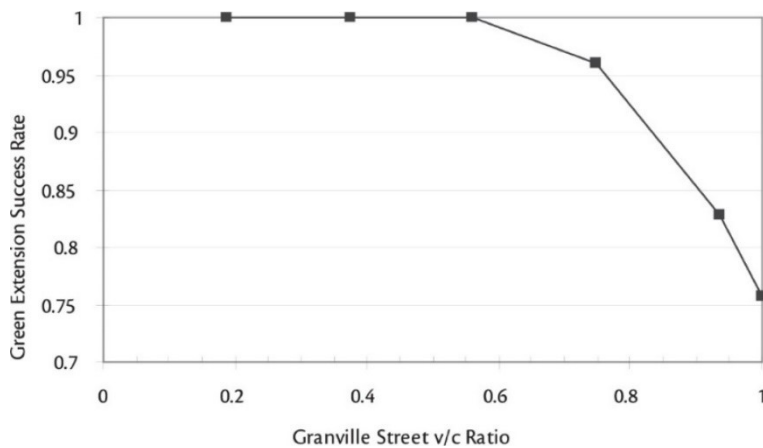
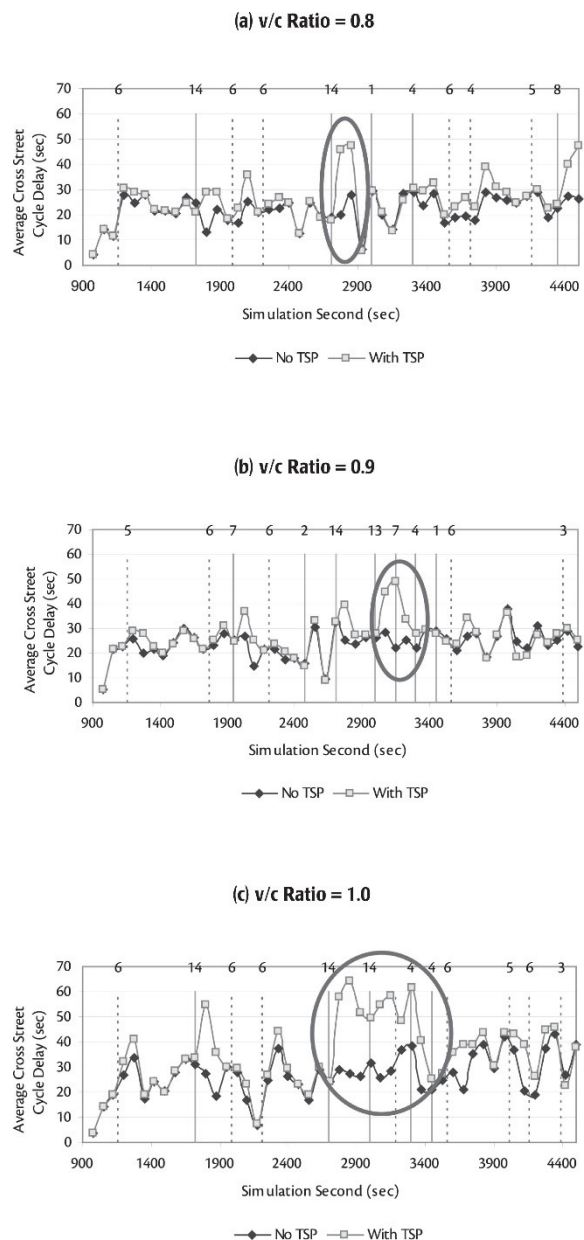


Figura 13: Impatti sul grado di successo dell'estensione del tempo di verde (Ngan, Sayed, & Abdelfatah, 2004)

- Grado di saturazione delle strade non prioritarie (valutazione locale). Le simulazioni hanno evidenziato che gli impatti delle strategie di preferenziamento sulle corsie non prioritarie sono: minimi quando i loro gradi di saturazione sono bassi, moderati quando il grado di saturazione è superiore a 0.8, e significativi quando superiore a 0.9. Il ritardo relativo alle strade non prioritarie viene riportato in Figura 14, dove sono stati presi in considerazione gradi di saturazione pari a 0.8, 0.9 e 1.0. Le linee verticali a tratto continuo rappresentano le estensioni di verde, la cui durata è riportata nell'asse superiore; le linee tratteggiate indicano invece l'accorciamento del tempo di rosso con la relativa entità in secondi. I cerchi identificano il massimo numero di cicli di recupero, ovvero il numero di cicli necessari prima di tornare ad avere un valore di ritardo delle strade intersecanti circa della stessa entità di quello che si avrebbe nello scenario senza priorità.

Figura 14: Ritardi medi per le strade non prioritarie con e senza priorità valutati per diversi gradi di saturazione (Ngan, Sayed, & Abdelfatah, 2004)



- Headway tra i bus (valutazione globale). Sono stati simulati scenari con cinque diversi valori di headway (2, 5, 10, 15 e 20 minuti) e i risultati sono riportati in Figura 15. La maggiore riduzione dei tempi di percorrenza causata dalle strategie prioritarie si osserva in corrispondenza di un headway di 10 minuti. Per valori maggiori i benefici sono limitati o nulli a causa delle ridotte richieste di preferenziamento. Headway minori invece portano ad un volume maggiore di mezzi pubblici che provoca un aumento dei ritardi.

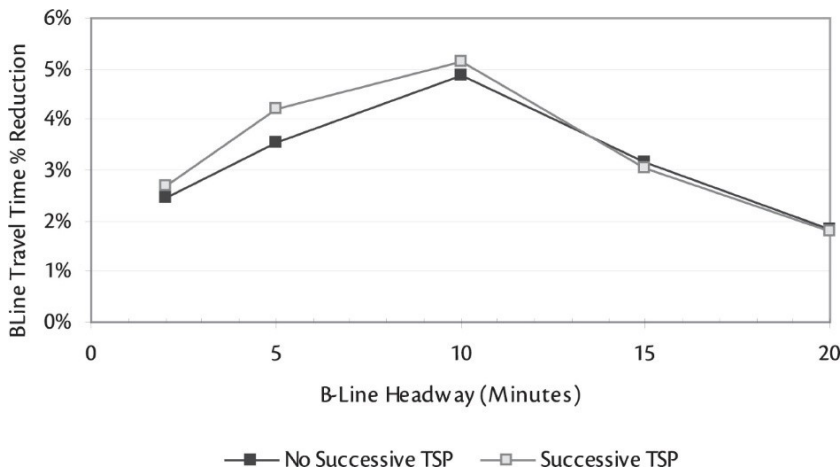


Figura 15: Riduzione dei tempi di percorrenza dei bus per diversi valori di headway (Ngan, Sayed, & Abdelfatah, 2004)

- Posizione delle fermate (valutazione locale). Per valutare l'influenza di questo parametro è stata simulata una singola intersezione, assumendo un headway di 4 minuti, concedendo trattamenti prioritari in cicli successivi e in una sola direzione. È stato quindi considerato uno scenario con la fermata posta a valle dell'intersezione, e uno con la fermata a monte. Le valutazioni sono state effettuate con diversi volumi di traffico: 500, 1000, 1500, 2000 e 2500 veic/h in tre corsie, valori che corrispondono a gradi di saturazione da 0.2 a 0.95. I ritardi ottenuti (Figura 16) sono dovuti esclusivamente al traffico, escludendo dal conteggio il tempo di sosta alla fermata. La simulazione evidenzia che una fermata situata a monte dell'intersezione ("Nearside Bus Stop") provoca mediamente un ritardo maggiore rispetto ad una fermata posizionata a valle ("Farside Bus Stop"): il tempo di

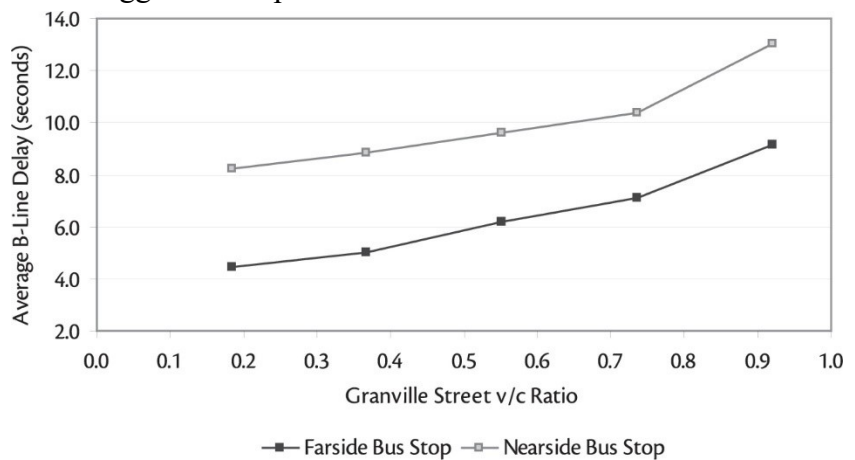


Figura 16: Impatti della posizione delle fermate sul ritardo medio dei bus (Ngan, Sayed, & Abdelfatah, 2004)

sosta infatti impatta negativamente sulla percentuale di successo della strategia prioritaria, provocando un aumento del ritardo medio.

- Posizione del rilevamento dei bus (valutazione locale). Sono stati simulati sette diversi scenari considerando il posizionamento delle fermate sia a monte che a valle delle intersezioni. Anche in questo caso i valori sono relativi solo alle condizioni del traffico. I risultati (Figura 17) evidenziano che i ritardi dei bus sono meno dipendenti dalla posizione del rilevamento se la fermata è situata a monte dell'intersezione, in quanto in questa condizione è la posizione della sosta a impattare maggiormente. Nei casi di fermata situata a valle, si notano benefici tanto maggiori quanto più i dispositivi di rilevamento del check-in sono distanti dall'intersezione, perché ciò consente di programmare in anticipo le azioni prioritarie. La distanza non deve comunque essere troppo elevata, per evitare che la stima dei tempi di avvicinamento diventi troppo incerta.

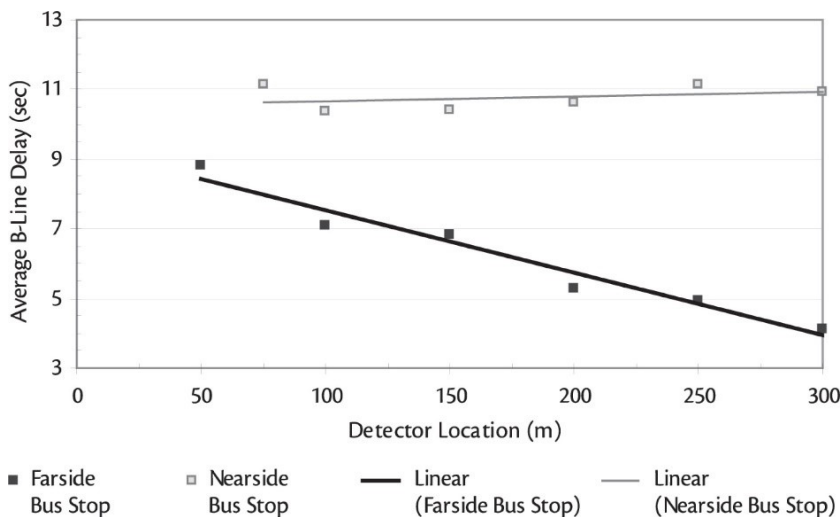


Figura 17: Confronto degli impatti sui ritardi dovuti alla localizzazione del rilevamento per fermate a valle e a monte dell'intersezione (Ngan, Sayed, & Abdelfatah, 2004)

La posizione del rilevamento e la localizzazione delle fermate hanno un importante effetto anche sul successo delle estensioni di fase. In Tabella 3 sono riportati il numero di estensioni del verde concesse, il numero di azioni prioritarie fallite, e il loro tasso di successo. Dai risultati si può osservare che il posizionamento di una fermata a monte e il posizionamento dei dispositivi di rilevamento distanti dall'intersezione implicano un maggior numero di estensioni di fase. Ciò è dovuto al fatto che in queste condizioni il mezzo pubblico necessita di più tempo per attraversare l'intersezione a partire dall'istante di rilevamento e quindi per più bus sarà necessaria un'estensione del tempo di verde. Aumentando la distanza di rilevamento aumenta anche la possibilità di fallimento dell'azione prioritaria sempre a causa del maggior tempo necessario a completare l'attraversamento.

Tabella 3: Efficacia delle estensioni del verde (GE) per fermate posizionate a valle e a monte dell'intersezione e per diverse distanze del punto di rilevamento (Ngan, Sayed, & Abdelfatah, 2004)

Detector Location	Total # of GE		# of GE Failure		GE Success Rate	
	Farside	Nearside	Farside	Nearside	Farside	Nearside
50 / 75 m	2	6	0	2	100%	61%
100 m	3	6	0	2	100%	61%
150 m	3	6	0	2	100%	61%
200 m	4	7	0	3	100%	52%
250 m	6	9	2	6	71%	37%
300 m	6	9	2	6	71%	37%

- Volumi / corsie / fasi di svolta a sinistra (valutazione locale). Sono stati analizzati gli effetti provocati dalle svolte a sinistra nella direzione di transito dei bus. Questi movimenti dipendono molto dai volumi di traffico che provengono dalla direzione opposta, per la quale sono stati simulati diversi gradi di saturazione. Una situazione priva di svolte a sinistra è stata implementata come riferimento per poter poi valutare tre diversi scenari: assenza di una corsia riservata alla svolta che avviene in modalità permessa, corsia riservata con svolta permessa, e corsia riservata con svolta protetta. I volumi di traffico simulati sono pari a 25, 50, 100, 150 e 200 veic/h per la svolta a sinistra, e 1000, 1500 e 2000 veic/h provenienti dalla direzione opposta (che corrispondono a un grado di saturazione rispettivamente di 0.37, 0.55, 0.74). In Tabella 4 sono riportati i risultati in termini di ritardi subiti dai bus (in grassetto sono evidenziati gli incrementi più significativi). L'assenza di corsie riservate alla svolta e l'assenza di una fase protetta in concomitanza con alti volumi di traffico portano ad elevati ritardi per i mezzi pubblici quando vengono implementate strategie prioritarie. Inoltre un elevato numero di veicoli che devono svoltare genera code che possono ostacolare i movimenti nelle restanti corsie; lo smaltimento di queste è fortemente dipendente dal grado di saturazione nella direzione opposta.

Nel seguito vengono riportate tre analisi effettuate per valutare gli effetti delle strategie prioritarie in diversi casi applicativi. Vengono messe a confronto situazioni con e senza trattamenti preferenziali, quantificando e confrontando i benefici ricevuti dai mezzi pubblici e contemporaneamente stimando quanto queste situazioni influiscono globalmente sugli altri veicoli presenti nella rete; in una simulazione vengono prese in considerazione anche le correnti pedonali.

Tabella 4: Impatti delle svolte a sinistra sui ritardi dei bus (con priorità semaforica) (Ngan, Sayed, & Abdelfatah, 2004)

Opp-TH Vol	LT Vol	Change in Average B-Line Bus Approach Delay (Seconds)		
		Permissive LT Phase, Shared LT-TH Lane	Permissive LT Phase, Exclusive LT Lane	Protected LT Phase, Exclusive LT Lane
1,000 v/c=0.37	0	0.0	0.0	0.0
	25	0.5	-0.3	-0.1
	50	0.9	-0.4	-0.2
	100	3.0	0.0	-0.4
	150	7.2	0.6	0.0
	200	32.3	2.0	0.4
1,500 v/c=0.55	0	0.0	0.0	0.0
	25	1.2	-0.1	-0.4
	50	2.2	-0.2	0.1
	100	25.2	2.3	-0.1
	150	63.2	22.2	-0.1
	200	83.9	49.8	-0.1
2,000 v/c=0.74	0	0.0	0.0	0.0
	25	1.2	0.0	0.2
	50	5.6	0.2	0.1
	100	54.4	11.1	0.0
	150	90.3	42.9	0.5
	200	103.2	58.7	0.0

4.4: Studio di Malandraki et al. (2015)

In questo paragrafo viene presentata un'analisi condotta con un modello di micro-simulazione da (Malandraki, Papamichail, Papageorgiou, & Dinopoulou, 2015) su una porzione della rete di trasporto di Chania in Grecia. La strategia prioritaria considerata è basata su regole. I trattamenti preferenziali vengono forniti modificando i piani semaforici a livello locale e, in caso di richieste multiple, viene applicato un trattamento FIFO. Per verificare l'efficacia e gli impatti negativi creati alle correnti non prioritarie, la simulazione viene condotta in diversi scenari confrontando piani semaforici a tempi fissi e piani semaforici traffic-responsive; questi ultimi ottimizzano i flussi e i tempi di attraversamento relativi a tutti i veicoli, variando i tempi di ciclo ogni 10 minuti. Vengono implementate due strategie prioritarie: nella prima viene esteso il tempo di verde oppure viene anticipata la fase prioritaria, mantenendo però immutata la durata complessiva del ciclo; nel secondo caso invece è possibile modificare la durata del ciclo semaforico (C1) solo se per il ciclo successivo (C2) viene applicata la regola $C1 + C2 = 2C$, dove C è la normale durata del ciclo. Viene analizzata una sola linea di bus, che viaggia in corsie con traffico promiscuo; il rilevamento viene effettuato tramite dispositivi situati sufficientemente a monte dell'intersezione. Il ritardo medio, la velocità media e il tempo totale di percorrenza medio sono i criteri scelti per la valutazione delle strategie. Il software di micro-simulazione utilizzato è AIMSUN 7.0.

La rete considerata è costituita da 22 intersezioni semaforiche (nodi verdi in Figura 18); 6 di queste (nodi rossi in Figura 18), caratterizzate da alti volumi di veicoli pubblici e privati, sono state programmate per poter fornire trattamenti prioritari. La linea di trasporto pubblico presa

in esame attraversa la rete da ovest verso est, e i dispositivi di rilevamento, che individuano i passaggi con una frequenza del secondo, sono installati all'estremità di monte di ogni tratto. Inoltre le fermate sono situate a monte dei diversi rilevamenti così da non impattare sulla stima dei tempi di arrivo all'attestamento. Nel caso di intersezioni sature, si assume che non ci siano fenomeni di spill-back delle code. La frequenza dei bus considerata è pari in media a 5 minuti. Per ogni scenario vengono effettuate venti simulazioni, e ognuna viene condotta per un periodo di quattro ore, dalle 12 alle 16, considerando una domanda di trasporto realistica e dinamica.

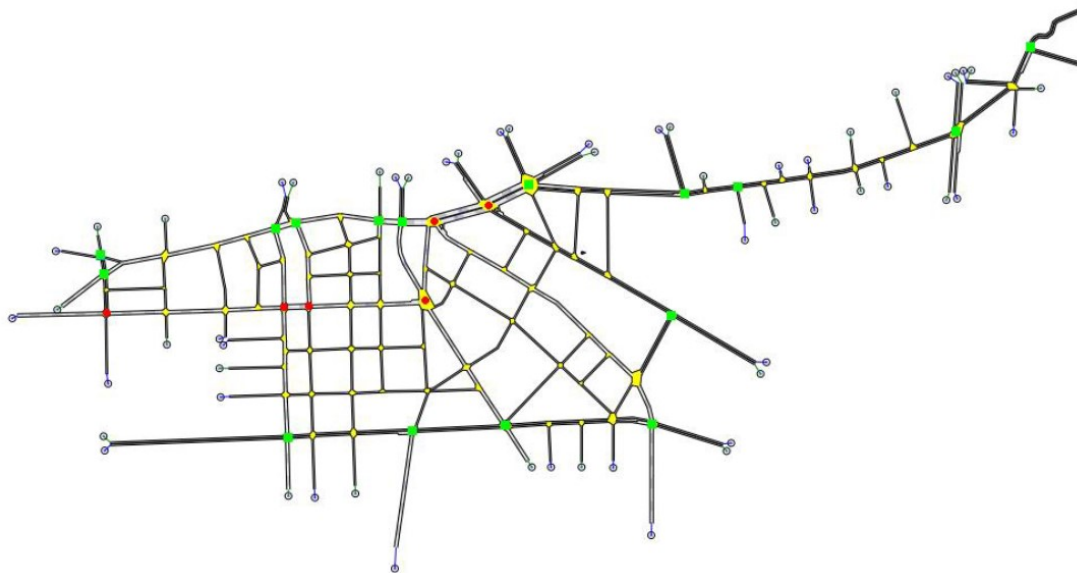


Figura 18: Rete stradale di Chania utilizzata per la simulazione (Malandraki, Papamichail, Papageorgiou, & Dinopoulou, 2015)

- Scenario con piani semaforici a tempi fissi e strategie prioritarie:

In questo scenario i piani semaforici di tutta la rete sono a tempi fissi, e in sei intersezioni vengono applicate le due strategie di priorità semaforica sopra descritte, confrontandole quindi con la situazione in assenza di priorità.

La Tabella 5 riporta i ritardi medi ottenuti dalla simulazione evidenziando come le strategie prioritarie riducono il valore di questo indicatore per i mezzi pubblici (rispettivamente -14,64% e -31,63%) rispetto al caso non prioritario. Le variazioni dei ritardi per gli altri veicoli sono abbastanza trascurabili: il leggero miglioramento ottenuto con l'opzione uno è dovuto al fatto che anche gli autoveicoli presenti nelle corsie prioritarie traggono beneficio dall'azione di preferenziamento. Considerando le variazioni di ritardo di tutti i veicoli si può constatare che questa metodologia effettivamente favorisce i mezzi pubblici senza impattare notevolmente sul restante traffico.

Tabella 5: Ritardo medio con piani semaforici a tempi fissi e alta frequenza di richieste prioritarie (Malandraki, Papamichail, Papageorgiou, & Dinopoulou, 2015)

Delay (sec/km)	NO_PTP	PTP1	PTP2	% Change of PTP1 compared to NO_PTP	% Change of PTP2 compared to NO_PTP
Bus	66.58	56.83	45.52	-14.64	-31.63
Car	91.41	91.17	92.64	-0.27	1.34
All	91.32	91.05	92.48	-0.30	1.27

In Tabella 6 sono riportati i valori medi di velocità: per i mezzi pubblici si osserva un aumento del 7,21% per la prima opzione prioritaria, e del 17,20% per la seconda opzione. È invece trascurabile la variazione per i restanti veicoli nella rete.

Tabella 6: Velocità media con piani semaforici a tempi fissi (Malandraki, Papamichail, Papageorgiou, & Dinopoulou, 2015)

H. Speed (km/h)	NO_PTP	PTP1	PTP2	% Change of PTP1 compared to NO_PTP	% Change of PTP2 compared to NO_PTP
Bus	25.22	27.04	29.56	7.21	17.20
Car	22.66	22.69	22.48	0.14	-0.78
All	22.67	22.71	22.50	0.20	-0.73

Infine in Tabella 7 vengono riportati i tempi di percorrenza medi, che presentano una riduzione del -6,52% e del -14,58% per i mezzi pubblici rispettivamente per la prima e seconda opzione di strategie prioritarie. Anche per questo indicatore risultano trascurabili le variazioni per le autovetture e per tutti i veicoli a livello di rete.

Tabella 7: Tempo totale di percorrenza medio con piani semaforici a tempi fissi (Malandraki, Papamichail, Papageorgiou, & Dinopoulou, 2015)

TTT (hours)	NO_PTP	PTP1	PTP2	% Change of PTP1 compared to NO_PTP	% Change of PTP2 compared to NO_PTP
Bus	2.73	2.55	2.33	-6.52	-14.58
Car	551.0	551.4	560.0	0.07	1.63
All	553.8	553.9	562.4	0.03	1.56

- Scenario con piani semaforici traffic-responsive e strategie prioritarie:

A differenza dello scenario precedente, ora tutte le intersezioni della rete sono gestite con piani semaforici traffic-responsive. Vengono soddisfatte tutte le richieste di priorità pervenute al sistema, e al tempo stesso vengono ottimizzati a livello di rete il ritardo, la velocità e il tempo di percorrenza di tutti i veicoli.

In Tabella 8, che riporta i valori di ritardo medio, è possibile osservare una riduzione di tale indicatore per i bus pari a -5,44% e -17,61%, rispettivamente per la prima e seconda opzione. Dal confronto di questa tabella con la Tabella 5, si nota come quest'ultimo scenario generi dei valori di ritardi per le autovetture, e per tutti i veicoli, minori di quelli ottenibili con piani semaforici a tempi fissi.

Tabella 8: Ritardo medio con piani semaforici traffic-responsive (Malandraki, Papamichail, Papageorgiou, & Dinopoulou, 2015)

Delay (sec/km)	NO_PTP	PTP1	PTP2	% Change of PTP1 compared to NO_PTP	% Change of PTP2 compared to NO_PTP
Bus	59.66	56.41	49.15	-5.44	-17.61
Car	82.03	82.73	83.22	0.85	1.45
All	81.95	82.64	83.10	0.84	1.40

La Tabella 9 riporta i valori medi di velocità: vi è un aumento per i mezzi pubblici, mentre la variazione per gli altri veicoli risulta trascurabile. Confrontandola con la tabella 6 si osserva che i piani traffic-responsive aumentano maggiormente la velocità media a livello di rete anche se vengono applicate strategie prioritarie.

Tabella 9: Velocità media con piani semaforici traffic-responsive (Malandraki, Papamichail, Papageorgiou, & Dinopoulou, 2015)

H. Speed (km/h)	NO_PTP	PTP1	PTP2	% Change of PTP1 compared to NO_PTP	% Change of PTP2 compared to NO_PTP
Bus	26.56	27.22	28.73	2.50	8.19
Car	24.08	23.97	23.89	-0.45	-0.79
All	24.09	23.98	23.91	-0.44	-0.74

Infine in Tabella 10 vengono riportati i valori relativi ai tempi totali di percorrenza medi. Rispetto alla situazione senza trattamenti prioritari, i tempi relativi ai bus vengono ridotti di -2,65% per la prima opzione e -7,29% per la seconda opzione. Confrontando i valori di questa tabella con quelli ottenuti con lo scenario precedente (Tabella 7), si osserva che i piani traffic-responsive generano dei tempi di percorrenza minori di quelli ottenibili con piani semaforici a tempi fissi.

Tabella 10: Tempi di percorrenza totali medi con piani semaforici traffic-responsive (Malandraki, Papamichail, Papageorgiou, & Dinopoulou, 2015)

TTT (hours)	NO_PTP	PTP1	PTP2	% Change of PTP1 compared to NO_PTP	% Change of PTP2 compared to NO_PTP
Bus	2.59	2.52	2.40	-2.65	-7.29
Car	524.5	528.8	530.4	0.83	1.13
All	527.1	531.4	532.8	0.83	1.09

(Malandraki, Papamichail, Papageorgiou, & Dinopoulou, 2015) riportano poi una tabella conclusiva di confronto dei valori di ritardo medio ottenuti negli scenari sopra descritti (Tabella 11). I piani semaforici traffic-responsive, rispetto ai piani a tempi fissi, riducono i ritardi sia per i mezzi pubblici che per i restanti veicoli: per i primi la riduzione è pari a -10.39% mentre è pari a -10.26% sia per le autovetture che per tutti i veicoli nella rete. Considerando ora la prima opzione di strategia prioritaria (PTP1), si osserva come questa riduce in particolare i ritardi dei mezzi pubblici, e, se applicata in combinazione con piani traffic-responsive, porta a benefici maggiori rispetto alla sua applicazione con piani con tempi fissi. Nel caso della seconda strategia di preferenziamento semaforico (PTP2), il ritardo medio dei bus con piani traffic-responsive è maggiore rispetto al caso con piani a tempi fissi, mentre si verifica una situazione opposta se si considerano i ritardi di tutti i veicoli. La strategia PTP2 risulta quindi più efficace

per i mezzi pubblici se applicata a piani a tempi fissi, mentre per il traffico generale è più vantaggiosa se applicata a piani traffic-responsive.

Tabella 11: Confronto dei valori di ritardo medio (Malandraki, Papamichail, Papageorgiou, & Dinopoulou, 2015)

Delay (sec/km)	Vehicle Type	NO_PTP	PTP1	PTP2
Fixed-Time Plan	Bus	66.58	56.83	45.52
	Car	91.41	91.17	92.64
	All	91.32	91.05	92.48
TUC	Bus	59.66	56.41	49.15
	Car	82.03	82.73	83.22
	All	81.95	82.64	83.10
% Change for TUC compared to FTP	Bus	-10.39	-0.74	7.96
	Car	-10.26	-9.26	-10.17
	All	-10.26	-9.23	-10.14

4.5: Studio di Heaslip et al. (2020)

Uno studio condotto da (Heaslip, Kim, Kaplan, & Dietrich, 2020) ha valutato gli impatti delle strategie prioritarie nelle reti stradali di Charlottesville (East High Street), Blacksburg (South Main Street) e Arlington (Columbia Pike) utilizzando il modello di micro-simulazione VISSIM. Nell'analisi vengono considerate le caratteristiche della rete di trasporto, le caratteristiche del traffico veicolare e gli effetti dovuti all'interazione con i pedoni.

I dati necessari sono stati ricavati da database pubblici relativi alle aziende di trasporto e al Dipartimento dei Trasporti della Virginia. Valutando i fattori che impattano sull'efficacia delle strategie prioritarie, ad ognuna delle tre arterie è stato assegnato un punteggio relativo alla probabile maggiore o minore predisposizione ad ottenere miglioramenti prestazionali dall'implementazione di azioni di preferenziamento. I criteri considerati sono riassunti in Tabella 12: il punteggio (score) è riferito ad una scala da 1 a 5, in ordine di importanza per il successo della strategia prioritaria. Le simulazioni sono state poi condotte per gli assi stradali con punteggio minore (South Main Street a Blacksburg) e con punteggio maggiore (Columbia Pike ad Arlington) al fine di confrontarli (per l'assegnazione dei punteggi si rimanda a (Heaslip, Kim, Kaplan, & Dietrich, 2020)).

Nell'ipotesi che tutte le intersezioni siano controllate da semafori attuati dal traffico, per ogni corridoio stradale gli autori hanno valutato le situazioni con e senza trattamenti semaforici prioritari, simulando un orario di punta serale, dalle 4.30 p.m. alle 5.30 p.m., preceduto da un periodo di 15 minuti necessario a portare il traffico in condizioni stabili. Per tenere in considerazione la natura aleatoria del traffico, la simulazione di ciascuno scenario è stata ripetuta dieci volte, ottenendo risultati in termini di valori medi. Gli indicatori di efficacia che vengono valutati sono il ritardo di arresto per tutti i veicoli, il ritardo di arresto per i bus e il ritardo dei pedoni in ogni intersezione della rete simulata.

Tabella 12: Criteri con relativi pesi e punteggi per la classificazione delle arterie stradali (Heaslip, Kim, Kaplan, & Dietrich, 2020)

Criterion	Weight	Score	Description
Geometric Characteristics			
Dedicated Right-of-Way	5	3	Physically Separated Dedicated Right-of-Way
		2	Partial Physically Separated Dedicated Right-of-Way
		1	Dedicated Right-of-Way not Physically Separated
		0	Shared Right-of-Way
Number of Lanes per Direction	3	3	Two and above
		2	One plus left/right-turn pockets or two-way left turn lane
		1	One with shoulder
		0	One
Vertical Alignment	2	3	Uphill, equal to or greater than 5%
		2	Uphill, 2 to 4.9%
		1	Uphill, under 2% but not level
		0	Level Grade or Downhill
Transit Characteristics			
Bus Schedule Adherence	5	3	< 80%
		2	80-89%
		1	90-94%
		0	95-100%
Transit Frequency	4	3	Over 30 buses/hour
		2	21-30 buses/hour
		1	11-20 buses/hour
		0	10 buses/hour or fewer
GPS/AVL ^a	4	3	81-100% installed ^b
		2	51%-80% installed
		1	Less than or equal to 50% installed
		0	Not installed
Number of Passengers	3	3	Over 750 passengers/hour
		2	501-750 passengers/hour
		1	251-500 passengers/hour
		0	250 passengers/hour or fewer
Transit Level of Service	3	3	Transit LOS ^c E, F
		2	Transit LOS C, D
		1	Transit LOS B
		0	Transit LOS A

Criterion	Weight	Score	Description
Bus Stop Placement	3	3	81-100% far side
		2	51-80% far side
		1	1-50% far side
		0	0% far side
Pedestrian Characteristics			
Walk Score	3	3	90-100: "walker's paradise"
		2	70-89: most errands can be accomplished on foot
		1	50-69: some amenities within walking distance
		0	0-49: car-dependent
Transit-Dependent Population	2	3	26%-100% transit-dependent
		2	11%-25% transit-dependent
		1	1%-10% transit-dependent
		0	0% transit-dependent
Traffic Characteristics			
Intersection Control Delay	4	3	Intersection LOS E, F (Control delay per vehicle > 55 seconds)
		2	Intersection LOS C, D (Control delay per vehicle > 20-55 seconds)
		1	Intersection LOS B (Control delay per vehicle > 10-20 seconds)
		0	Intersection LOS A (Control delay per vehicle ≤ 10 seconds)
Signal Characteristics			
Signal Control System	5	3	81-100% of signals are actuated
		2	51%-80% of signals are actuated
		1	1%-50% of signals are actuated
		0	0% of signals are actuated
Signal Coordination	4	3	Corridor Completely Coordinated
		2	75%-99% of Signals Coordinated
		1	1%-74% of Signals Coordinated
		0	No Signal Coordination

4.5.1: Simulazione a South Main Street a Blacksburg

La South Main Street a Blacksburg presenta tre intersezioni, di cui due semaforizzate. Non vi sono corsie riservate ai mezzi pubblici, e la zona è servita da due tratte di bus con una frequenza totale di quattro mezzi all'ora. In Figura 19 vengono riportati i valori di ritardo totale subiti da tutti i veicoli: implementando azioni prioritarie, in entrambe le intersezioni si osserva una riduzione trascurabile di tale indicatore. La causa di ciò è da riscontrarsi nella ridotta frequenza di attuazione dei trattamenti di preferenziamento a causa del limitato numero di bus per ora.

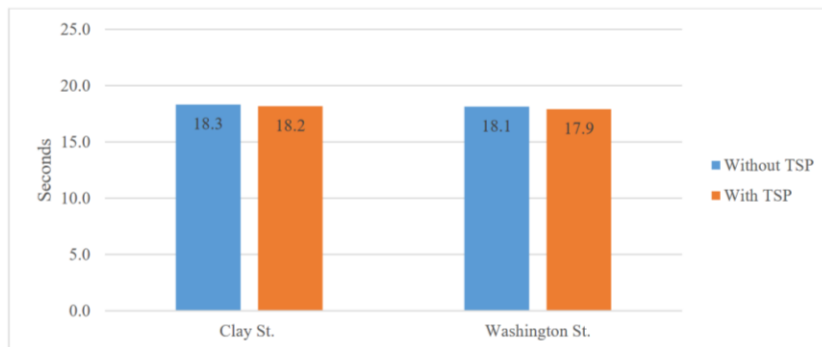


Figura 19: Ritardi totali dovuti all'arresto (Heaslip, Kim, Kaplan, & Dietrich, 2020)

Considerando invece solamente il ritardo dei bus, con le strategie prioritarie si osserva una riduzione di tale indicatore pari a -66% e -45% rispettivamente per le due intersezioni (Figura 20).

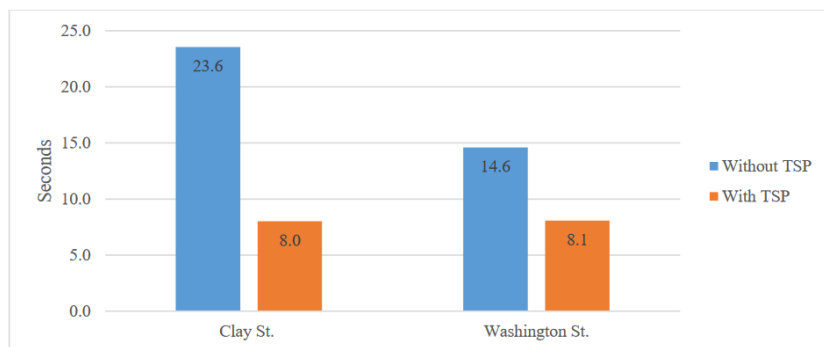


Figura 20: Ritardi di arresto dei soli bus (Heaslip, Kim, Kaplan, & Dietrich, 2020)

Analizzando anche le corsie non prioritarie (Tabella 13), su esse si osserva un trascurabile aumento dei ritardi: questa variazione lieve è legata alle ridotte richieste di priorità nella strada principale. In quest'ultima invece il beneficio del trattamento preferenziale viene in parte percepito anche dagli altri veicoli, con una diminuzione dell'indicatore pari a -6.3%.

Tabella 13: Variazioni dei ritardi in seguito all'applicazione di strategie prioritarie (Heaslip, Kim, Kaplan, & Dietrich, 2020)

Name	All Vehicles	Bus only
No TSP Direction (minor roads)	0.2%	N/A
TSP Direction (major road)	-6.3%	-49.0%

Nella simulazione sono stati considerati anche gli impatti sulle correnti pedonali, con valori risultati trascurabili a causa del basso numero di azioni prioritarie erogate ogni ora (Figura 21).

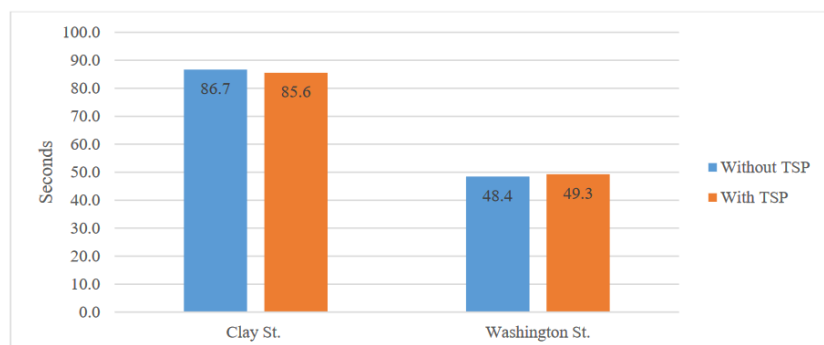


Figura 21: Ritardi dei pedoni (Heaslip, Kim, Kaplan, & Dietrich, 2020)

4.5.2: Simulazione a Columbia Pike ad Arlington

La Columbia Pike è caratterizzata da sette intersezioni semaforizzate, con un'alta frequenza di bus, e non vi sono corsie dedicate al transito dei soli mezzi pubblici. Dalla simulazione si evidenzia che il ritardo per tutti i veicoli aumenta in sei intersezioni su sette (Figura 22); il maggiore incremento lo si osserva nell'intersezione S. Courthouse Rd. in quanto questa è caratterizzata dalla confluenza di due strade di notevole importanza con elevati volumi di traffico. Ciò causa anche un aumento del ritardo dei soli bus in corrispondenza di questo incrocio. Analizzando infatti i risultati relativi ai soli mezzi pubblici si osserva una riduzione di tale indicatore su tutte le intersezioni tranne sulla S. Courthouse Rd. (Figura 23).

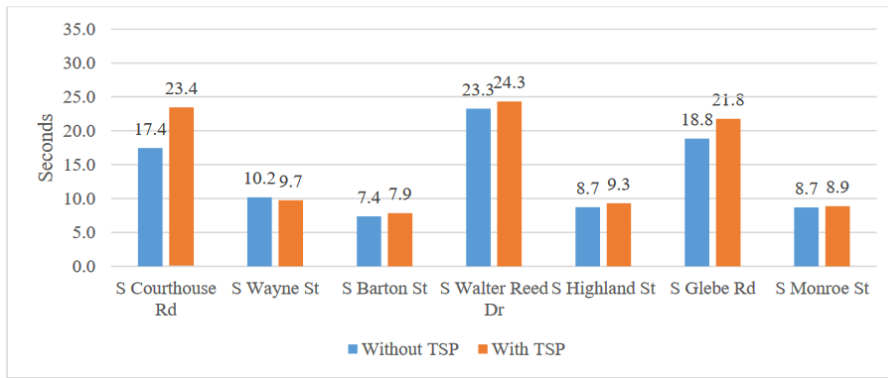


Figura 22: Ritardi totali dovuti all'arresto (Heaslip, Kim, Kaplan, & Dietrich, 2020)

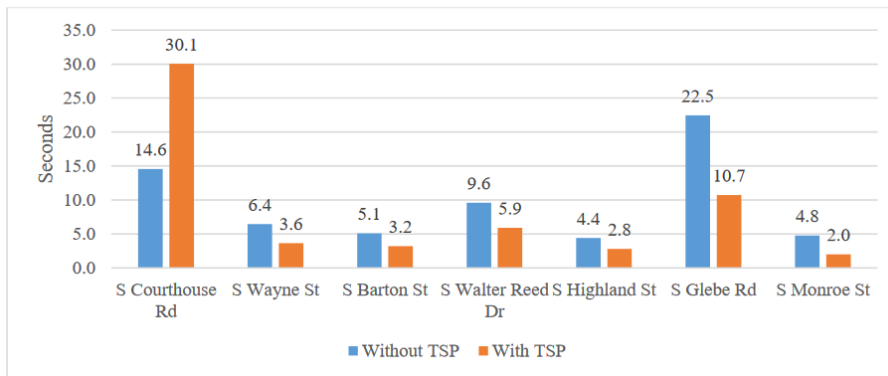


Figura 23: Ritardi di arresto dei soli bus (Heaslip, Kim, Kaplan, & Dietrich, 2020)

Come osservabile dalla Tabella 14, l'implementazione delle strategie di preferenziamento semaforico consente di ridurre il ritardo sia dei bus che dei restanti veicoli nelle direzioni prioritarie, portando però ad un incremento nei restanti approcci.

Tabella 14: Variazioni dei ritardi in seguito all'applicazione di strategie prioritarie (Heaslip, Kim, Kaplan, & Dietrich, 2020)

Name	All Vehicles	Bus only
No TSP Direction	17.5%	N/A
TSP Direction	-8.1%	-26.3%

Infine vengono riportati i dati relativi ai pedoni (Figura 24). Anche per essi vi è un aumento significativo del ritardo nell'intersezione di S. Courthouse Rd., sempre a causa degli elevati volumi di traffico veicolare e pedonale che la interessano. Siccome negli altri incroci le variazioni di tale parametro sono trascurabili, è possibile concludere che l'impatto della priorità sui ritardi subiti dai pedoni risulta rilevante solo nei casi di elevati volumi.



Figura 24: Ritardi dei pedoni (Heaslip, Kim, Kaplan, & Dietrich, 2020)

Queste simulazioni consentono di identificare quali porzioni di rete non possiedono caratteristiche idonee per erogare efficaci azioni prioritarie, e suggeriscono di conseguenza l'attuazione delle necessarie migliorie se possibili. Inoltre le valutazioni degli effetti delle strategie di preferenziamento consentono di definire delle regole operative per poter migliorare il sistema: sulla base delle simulazioni descritte in questo paragrafo, nelle intersezioni con elevati volumi di traffico potrebbe ritenersi necessario erogare la priorità semaforica solamente quando un mezzo pubblico supera determinati indicatori soglia utilizzati per definire la richiesta di priorità. Inoltre si può concludere che anche un'arteria stradale con un punteggio ridotto (assegnato sulla base dei criteri sopra riassunti) può trarre beneficio da strategie di preferenziamento semaforico; allo stesso tempo però un punteggio elevato non necessariamente implica una maggiore riduzione dei ritardi.

4.6: Studio di Ali (2021)

Viene infine riportata un'ulteriore analisi condotta da (Ali, 2021) per valutare gli impatti delle strategie prioritarie sia sui mezzi pubblici che sugli altri veicoli, in una strada a traffico misto attraverso l'utilizzo del modello di micro-simulazione VISSIM. L'arteria considerata si sviluppa per 4 miglia lungo Mayport Road, tra Atlantic Boulevard e Edward Avenue, in Jacksonville, Florida. Nel tratto considerato vi sono dieci intersezioni semaforizzate attuate dal traffico. I dati necessari per calibrare e replicare in modo realistico la simulazione sono stati raccolti mediante osservazioni sul campo (flussi di traffico, tempi di percorrenza, velocità), Google Maps e Google Earth-Street View (caratteristiche geometriche) e anche forniti dalle aziende che gestiscono i servizi di trasporto (informazioni sul servizio di trasporto e sui piani semaforici). Per la simulazione viene prima rappresentato lo scenario in assenza di preferenziamento semaforico per poi integrarlo con strategie prioritarie (estensione o anticipo della fase verde), disponendo quindi di due modelli. Si considera un orario di punta serale, dalle 4 p.m. alle 7 p.m., preceduto da 30 minuti necessari a portare a regime il sistema. Per tenere in considerazione la natura stocastica dei flussi di traffico, le simulazioni sono state ripetute per 15 volte, definendo per ognuna una diversa generazione casuale dei parametri di input (ad esempio i comportamenti di guida, le interazioni con gli altri veicoli, ecc. (Radwan, et al., 2009)). Gli indicatori di efficacia considerati sono i tempi di percorrenza, i ritardi medi e le performance generali a livello di rete.

I tempi di percorrenza sono stati rilevati nei tratti stradali tra ogni coppia di intersezioni; i risultati sono riportati in Tabella 15 e in Tabella 16, dove con "Base scenario" e "TSP-integrated Scenario" si identificano rispettivamente le condizioni senza e con trattamenti semaforici prioritari. Si può osservare che mediamente le strategie prioritarie consentono di ridurre i tempi sia per i mezzi pubblici sia per le restanti tipologie di veicoli, portando benefici in entrambe le direzioni di marcia. In particolare la diminuzione dei tempi di percorrenza è maggiormente evidente per i bus, con riduzioni pari a -9.5% per la direzione nord e -8.1% per la direzione sud rispetto allo scenario privo di trattamenti preferenziali. Gli incrementi che invece si osservano

per gli altri veicoli, in particolare nel tratto tra Atlantic Boulevard e Plaza Road, sono riconducibili all'elevata congestione presente nell'orario di simulazione scelto.

Tabella 15: Tempi di percorrenza relativi a tutti gli altri veicoli e ai bus in direzione Nord (Ali, 2021)

Northbound Approach		Base Scenario		TSP-integrated Scenario			
Segment No.	Segment Name	All Other Vehicles (s)	Buses (s)	All Other Vehicles (s)	% Increase/Decrease Compared to Base	Buses (s)	% Decrease Compared to Base
1.	Atlantic Blvd.-Plaza Rd.	62.9	136.9	67.0	6.51	125.9	-8.03
2.	Plaza Rd.-Levy Rd.	22.3	50.9	21.1	-5.38	45.7	-10.21
3.	Levy Rd.-Dutton Rd.	45.4	76.3	41.0	-9.69	65.4	-14.28
4.	Dutton Rd.-Fairway Villas Dr.	58.2	161.9	56.0	-3.78	146.9	-9.26
5.	Fairway Villas Dr.-Assisi Ln.	48.4	135.6	45.0	-7.02	122.8	-9.43
6.	Assisi Ln.-Mayport Crossing Blvd.	31.8	54.8	27.6	-13.20	50.4	-8.02
7.	Mayport Crossing Blvd.-Mazama Rd.	56.5	149.0	59.1	4.60	135.1	-9.32
8.	Mazama Rd.-Mayport School	21.2	67.2	19.1	-9.90	59.8	-11.01
9.	Mayport School-Wonderwood Dr.	47.4	63.3	42.5	-10.33	58.2	-8.05
Total		394.07	895.9	378.40*		810.2*	
Compared to Base		N/A	N/A		-4.0%		-9.5%

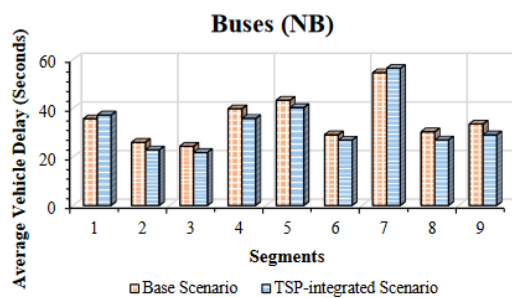
* Value is statistically lower than the corresponding Base value. (s)-seconds

Tabella 16: Tempi di percorrenza relativi a tutti gli altri veicoli e ai bus in direzione Sud (Ali, 2021)

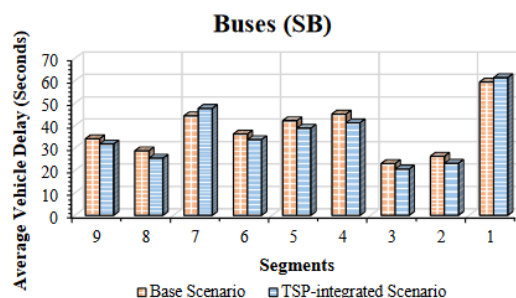
Southbound Approach		Base Scenario		TSP-integrated Scenario			
Segment No.	Segment Name	All Other Vehicles (s)	Buses (s)	All Other Vehicles (s)	% Increase/Decrease Compared to Base	Buses (s)	% Decrease Compared to Base
9.	Wonderwood Dr.-Mayport M. School	46.2	126.2	43.1	-6.70	115.7	-8.32
8.	Mayport School-Mazama Rd.	21.0	41.6	18.8	-10.47	38.5	-7.45
7.	Mazama Rd.-Mayport Crossing Blvd.	43.4	94.5	45.2	4.14	87.4	-7.51
6.	Mayport Crossing Blvd.-Assisi Ln	39.8	60.0	37.5	-5.77	54.8	-8.66
5.	Assisi Ln.-Fairway Villas Dr.	52.0	116.3	46.3	-10.96	106.6	-8.10
4.	Fairway Villas Dr.-Dutton Rd.	49.0	97.5	41.7	-14.89	90.2	-7.01
3.	Dutton Rd.-Levy Rd.	44.9	61.0	44.8	-0.22	55.4	-9.18
2.	Levy Rd.- Plaza Rd.	23.1	18.2	19.5	-15.58	15.8	-13.18
1.	Plaza Rd.- Atlantic Blvd.	90.0	112.0	100.3	11.44	103.6	-10.44
Total		409.43	727.3	397.17*		668*	
Compared to Base		N/A	N/A		-3.0%		-8.1%

* Value is statistically lower than the corresponding Base value. (s)-seconds

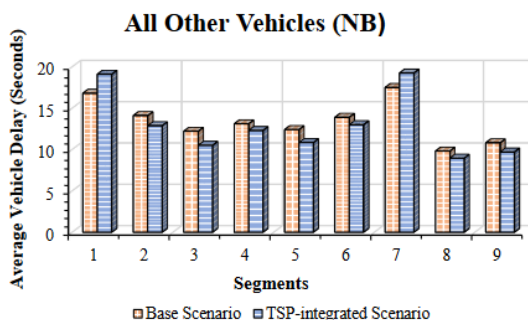
L'autore ha poi calcolato i ritardi medi dei veicoli (Figura 25) che comprendono anche i ritardi per la decelerazione e accelerazione alle fermate. Si può osservare che le azioni prioritarie diminuiscono questo indicatore in tutti i casi riportati (a., b., c., d.), con l'eccezione dei segmenti 1 e 7. Considerando la direzione nord, per i bus la riduzione media è pari a -6% (da 315.8 s a 296.63 s) mentre è pari a -2% (da 120.6 s a 117.0 s) per gli altri veicoli; analogamente, in direzione sud la riduzione osservata è pari a -5% (da 339.3 s a 323.5 s) e -3% (da 127 s a 123.3 s) rispettivamente. Il peggioramento della condizione nel tratto "1" può essere dovuto all'elevato numero di accessi laterali presenti in quella zona; nel tratto "7" può invece essere causato dalla presenza di tre fermate e dall'elevata domanda da parte delle strade laterali per entrambe le intersezioni.



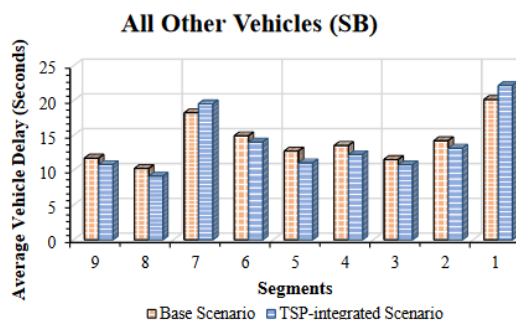
a.



b.



c.

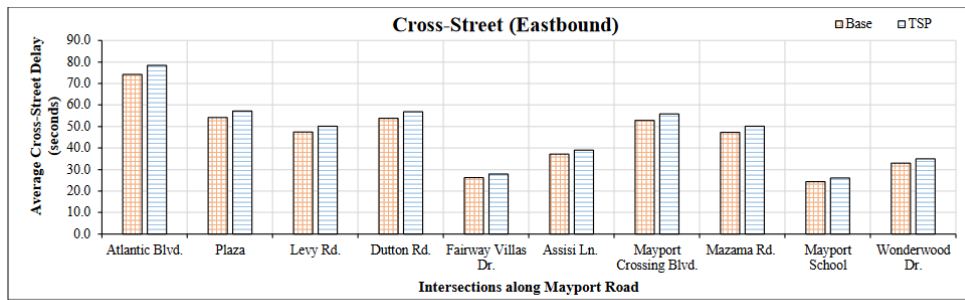


d.

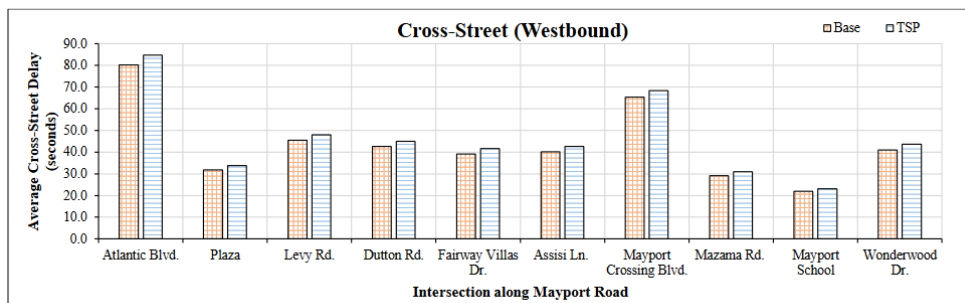
Figura 25: Valori di ritardo relativi a tutti gli altri veicoli e relativi ai bus per entrambe le direzioni di marcia lungo la strada principale; la numerazione sull'asse delle ascisse identifica i 9 stratti stradali compresi tra le 10 intersezioni: segment 1 (Atlantic Blvd.-Plaza Rd.), segment 2 (Plaza Rd.-Levy Rd.), segment 3 (Levy Rd.-Dutton Rd.), segment 4 (Dutton Rd.-Fairway Villas Dr.), segment 5 (Fairway Villas Dr.-Assisi Ln.), segment 6 (Assisi Ln.-Mayport Crossing Blvd.), segment 7 (Mayport Crossing Blvd.-Mazama Rd.), segment 8 (Mazama Rd.-Mayport School), segment 9 (Mayport School-Wonderwood Dr.) (Ali, 2021)

Il secondo indicatore di ritardo importante per la valutazione delle strategie di preferenziamento è il ritardo medio causato alle strade intersecanti, ovvero alle corsie non prioritarie. La Figura 26 evidenzia come le azioni prioritarie aumentano questo parametro, con intensità diversa tra le varie intersezioni. Ad esempio, a Mayport School l'incremento è di entità ridotta a causa dei bassi volumi di traffico che interessano quella zona.

Infine è possibile analizzare le performance a livello globale considerando l'intera arteria stradale. I risultati in termini di tempo di percorrenza, ritardo medio dei veicoli e ritardo medio delle strade non prioritarie sono riportati in Tabella 17. Rispetto allo scenario base, l'implementazione di strategie prioritarie porta ad una riduzione dei tempi di percorrenza sia per i bus che per tutti gli altri veicoli, con una riduzione particolarmente significativa per i primi. Inoltre sulla strada principale si osserva una diminuzione generale del ritardo, ma al tempo stesso un aumento di ritardo per le strade intersecanti: questo è dovuto al fatto che le strategie prioritarie riducono il tempo di verde a disposizione per queste corsie, con impatti significativi soprattutto nei casi di elevati volumi di traffico.



a.



b.

Figura 26: Ritardi relativi alle strade intersecanti (non prioritarie) (Ali, 2021)

Tabella 17: Risultati di performance per l'intera arteria stradale (Ali, 2021)

		Northbound		Southbound	
All Other Vehicles	Corridor Performance	Base	TSP	Base	TSP
	Total Travel Time (s)	394.07	378.4	409.4	397.1
	Average Vehicle Delay (s)	120.6	117.0	127.0	123.3
Buses	Total Travel Time (s)	1066.4	820.3	727.3	672.1
	Average Vehicle Delay (s)	315.8	296.63	339.3	323.5
		Eastbound		Westbound	
Cross-Street	Corridor Performance	Base	TSP	Base	TSP
	Average Cross-Street Delay (s)	450.5	476.5	436.4	461.6

Da questo studio è possibile concludere che le strategie di priorità semaforica per il trasporto pubblico portano benefici non solo ai mezzi pubblici stessi, ma anche agli altri veicoli circolanti lungo la stessa direzione di percorrenza dei bus. Contemporaneamente vi è un aumento dei ritardi nelle strade non prioritarie, aumento che comunque risulta limitato quando i volumi di traffico sono ridotti.

CAPITOLO 5

ESPERIENZE DI APPLICAZIONE DI SISTEMI DI PRIORITÀ SEMAFORICA PER IL TRASPORTO PUBBLICO

5.1: Esperienze internazionali

A partire dal secolo scorso le strategie di priorità semaforica per il trasporto pubblico hanno trovato applicazione in molte città in tutto il mondo al fine di migliorare l'efficienza e le performance dei sistemi di trasporto già presenti. Le principali differenze riscontrabili tra i vari casi riguardano soprattutto l'architettura funzionale, le tecnologie di rilevamento e di comunicazione, e il sistema di gestione degli impianti semaforici. In Tabella 18 vengono riportate le principali caratteristiche dei sistemi realizzati in alcune città, con particolare riferimento alle tecnologie di rilevamento, all'architettura del sistema di comunicazione e all'UTC impiegata (anno 2009).

Tabella 18: Esempi di caratteristiche dei sistemi di priorità semaforica per il trasporto pubblico in alcune città: tabella rielaborata a partire da (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009). Con “ / ” si è indicata l'assenza dell'informazione.

City	Bus detection technology	Priority request communication	Traffic control systems with bus priority facility
Aalborg	GPS supplemented by Odometer	Centralised	/
Brighton	GPS	/	SCOOT UTC
Cardiff	GPS	Decentralised	SCOOT UTC
Genoa	GPS	Decentralised	SIGMA UTC
Geneva	GPS supplemented by Odometer	Decentralised	/
Glasgow	GPS	Centralised	SCOOT UTC
Gothenburg	Loop and transponder	/	SPOT UTC
Helsinki	GPS	Decentralised	
London	GPS supplemented by Odometer and map matching	Decentralised	SCOOT UTC, VA
Malmo	GPS	Decentralised	/
Nantes	Loop and transponder	Decentralised	/
Prague	Beacon	Decentralised	MOTION
Southampton	Beacon	Centralised	SCOOT UTC
Stockholm	GPS	/	UTOPIA / SPOT UTC
Stuttgart	Beacon and GPS	Decentralised	/
Suceava	GPS	/	/

Tallinn	/	/	/
Toulouse	GPS supplemented by Odometer	Centralised	CAPITOUL UTC
Turin	Beacon	Centralised	UTOPIA / SPOT UTC
Vienna	/	Decentralised	/
York	GPS	Decentralised	VA, Fixed Time UTC
Zurich	Loop and transponder	Decentralised	/
Japan	Infra-red beacon	Decentralised	Universal Traffic Management Systems (UTMS)
Auckland	GPS	Centralised	/
Brisbane	Loop	Decentralised	Brisbane's Linked Intersection Signal System (BLISS)
Sydney	GPS	/	Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS)
Portland	Beacon (Opticom)	Decentralised	/
King County	RF tags	Decentralised	/
Los Angeles	Loop and transponder	Decentralised	/

Nella Tabella 19 vengono riportati alcuni valori degli indicatori considerati per quantificare i benefici forniti dai trattamenti preferenziali in alcune delle città considerate in Tabella 18. Questi sono però anche il risultato delle politiche di esercizio adottate nei diversi casi; i valori riportati non sono quindi conseguenti alle sole strategie prioritarie. A Londra, ad esempio, l'obiettivo è fornire azioni di preferenziamento impattando il meno possibile sulle altre correnti veicolari: l'elevata congestione del traffico e l'elevato numero di bus impongono quindi delle limitazioni all'implementazione di trattamenti preferenziali.

Nei paragrafi seguenti vengono analizzati con maggiore dettaglio i sistemi di preferenziamento semaforico impiegati in alcune delle città sopra elencate: Torino, Genova, Zurigo, Londra e Tolosa.

Tabella 19: Benefici derivanti dalla priorità semaforica ai mezzi pubblici (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009)

City	Priority benefits and impacts				
	Delay savings	Travel time	Variability	Patronage	General traffic
Aalborg	5.8 sec/bus/jun	4% reduction in average			
Brighton		Reduced	Reduced		
Cardiff		3-4% reduction	Improved schedule adherence		1-2% increase
Genoa		7-10% reduction			
Glasgow			Reduced considerably	Increased	
Gothenburg		13-15% decrease			5-10% savings
Helsinki		11% reduction		11% increase	
London	9 sec/bus/jun at isolated and 3-5 sec/bus/jun at SCOOT junctions				
Malmo			Headway reduced from 10 min to 7.5 min.		
Prague		2% reduction			
Southampton	9.5 sec/jun				Increased 3.8 sec/jun
Stockholm		10% savings			
Stuttgart		Speed increased from 9 to 10.1 miles/hr		10% increase	
Suceava				10-12% increase	
Tallinn		Speed increase by 2km/hr			
Toulouse		5-24% decrease			
Turin		12% reduction			
Zurich				42% increase	
Japan		5% reduction			
Auckland	11 sec/bus/jun				
Sydney		up to 21% reduction	Up to 49% reduction		
Portland			Improved reliability		Very little effect
King County	25-34%	reduced by 5.5-8%	Reduced by 35-40%		Minimal effect
Los Angeles		reduced by 6-8%		Increased by 1-13%	Typically 1 sec/veh/jun

5.2: Torino

Torino, a partire dal 1996, è stata una delle prime città europee ad adottare strategie di preferenziamento semaforico per le proprie tratte di trasporto pubblico (La priorità semaforica per mezzi pubblici più veloci, 2023). Gli impianti semaforici della città sono gestiti a livello centralizzato attraverso il sistema UTOPIA (“Urban Traffic Optimisation by Integrated Automation”) (TTS_Italia, 2010): è un sistema adattivo che, in base a dati storici e in base a dati sul traffico raccolti in tempo reale, ottimizza i parametri relativi ai cicli semaforici al fine di ottenere benefici globali sia per i mezzi pubblici che per i veicoli privati. Questo sistema è caratterizzato da una gerarchia basata su due livelli: il livello superiore gestisce e controlla l’intera area in riferimento al medio e lungo termine; il livello sottostante invece, relativo ad una singola intersezione, definisce i parametri di regolazione semaforica in base ai dati rilevati in tempo reale, in base alle informazioni provenienti dai vicini incroci, e in base alle decisioni di coordinamento determinate dal livello superiore. Per ciascuna intersezione vengono ottimizzati i flussi di traffico entranti allo scopo di minimizzare il tempo di attesa. I veicoli in arrivo vengono rilevati e contati mediante l’uso di spire induttive o radiofari posizionati sia in ingresso che all’uscita delle intersezioni (Figura 27).

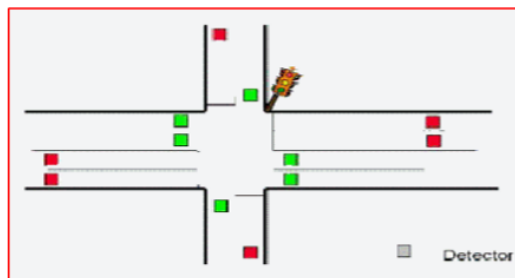


Figura 27: Posizione dei dispositivi di rilevamento (Torino) (TTS_Italia, 2010)

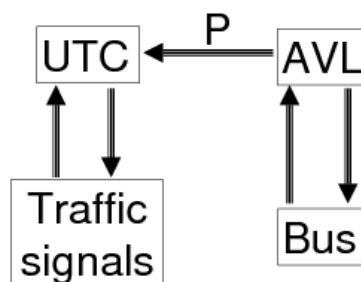


Figura 28: Architettura funzionale del sistema di Torino (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009)

Al fine di integrare strategie di preferenziamento (Figura 28), il sistema di gestione attiva degli impianti semaforici è collegato con il sistema di controllo e monitoraggio dei bus e tram denominato “Centrale GTT” dove vengono raccolti in tempo reale tutti i dati relativi all’esercizio. La Centrale GTT, grazie alla nuova tecnologia GPS, riceve ogni 20 secondi la posizione di ciascun mezzo della flotta, per poi inviarla alla “Centrale della Mobilità”. A questo punto viene calcolato il tempo necessario a raggiungere l’intersezione e, valutando criteri come l’headway e l’aderenza al programma di esercizio (Gardner, D’Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009), viene definita la richiesta di priorità; questa viene inoltrata all’UTC che

quindi rielabora la durata delle fasi semaforiche per erogare l'azione prioritaria (La priorità semaforica per mezzi pubblici più veloci, 2023) (Figura 29).

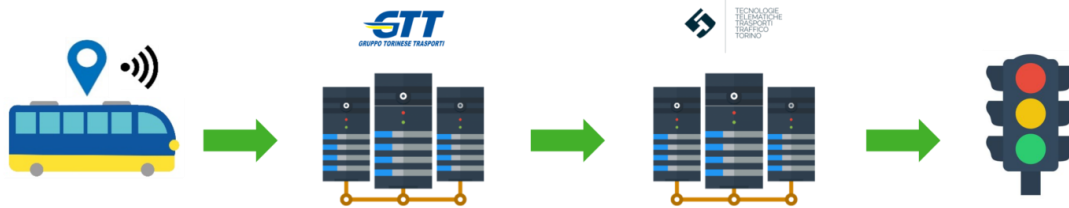


Figura 29: Flusso delle informazioni nell'architettura funzionale impiegata a Torino (La priorità semaforica per mezzi pubblici più veloci, 2023)

Al 2018 (Raffaelli, 2018) le intersezioni semaforizzate programmate per fornire trattamenti prioritari erano 367 per le linee tranviarie e 176 per le tratte di bus. In queste i mezzi pubblici hanno mediamente fruito di un'azione di preferenziamento nell'80% dei casi. Visti i risultati positivi ottenuti, negli anni il sistema è stato esteso ad un numero sempre maggiore di linee di trasporto pubblico: alle linee tranviarie numero 3, 4, 9 e 10, nel 2017 si sono aggiunte la 15 e la 16, mentre nel 2018 è stata effettuata una sperimentazione e successiva implementazione sulle tratte di bus numero 2, 8 e 68. Mediamente la copertura è pari al 90% (ST: Con priorità semaforica, 83 mila ore di tempo risparmiate dagli utenti di tram e bus, 2019), ovvero il 90% delle intersezioni di ciascuna linea sono gestite in modo da fornire trattamenti prioritari. Per quanto riguarda le velocità commerciali, sulle linee tranviarie si è osservato un aumento medio del 10%, mentre sulle tratte di bus l'aumento è pari a circa il 5% a causa della condivisione delle corsie con il restante traffico veicolare. Ad esempio sulla linea di bus numero 2, al 2018, si è osservato un incremento della velocità commerciale da 14,2 km/h a 14,8 km/h, che rappresentava in quel momento il risultato più modesto.

Tra le linee citate, una delle più importanti è la tranviaria numero 4, caratterizzata da una lunghezza di 16 km (per direzione), che attraversa 105 intersezioni, delle quali 85 sono programmate per erogare azioni di preferenziamento (copertura pari all'81%) (La priorità semaforica per mezzi pubblici più veloci, 2023). In questa linea i trattamenti prioritari hanno consentito di ridurre il tempo di percorrenza di 10 minuti, portandolo a circa 60 minuti totali: il beneficio è quindi superiore al 10%. Questo, dal punto di vista di un utente, garantisce un risparmio temporale annuo che può raggiungere le 42 ore (per il calcolo sono stati considerati 255 giorni lavorativi).

Sulla linea 15 (Raffaelli, 2018) le strategie prioritarie hanno portato ad un aumento della velocità media da 11,2 km/h a 12,4 km/h, e una riduzione dei tempi di percorrenza andata-ritorno di circa 7-11 minuti in base alla fascia oraria; questi valori corrisponderebbero ad avere un veicolo in più in servizio nella linea. Globalmente risulta quindi possibile ridurre i costi operativi oppure aumentare la frequenza di esercizio a parità di impiego di risorse (Torino, 2017). Sulla linea numero 16 invece si è osservata una riduzione dei tempi di percorrenza pari a 5 minuti per direzione, e un aumento della velocità media di circa il 16% (ST: Con priorità semaforica, 83 mila ore di tempo risparmiate dagli utenti di tram e bus, 2019).

Nel 2018, grazie alla priorità semaforica, sui mezzi pubblici di Torino è stato stimato un risparmio di circa 83 mila ore di viaggio (5T: Con priorità semaforica, 83 mila ore di tempo risparmiate dagli utenti di tram e bus, 2019). Oltre ai tempi, i benefici ottenibili riguardano anche i consumi energetici dei mezzi: l'arresto di un tram ad un'intersezione semaforica infatti provoca circa il raddoppio dei consumi tra due fermate, rimarcando quindi gli effetti positivi conseguenti all'implementazione di strategie prioritarie (Berger, et al., 2014).

Allo stato attuale (2023) a Torino sono quindi presenti 6 linee tranviarie e 3 linee di bus dotate di preferenziamento semaforico, numero che negli anni probabilmente sarà destinato a crescere: come definito nel nuovo "Piano di Trasporto del Comune di Torino e di GTT", entro il 2027 è previsto il raggiungimento di 13 linee totali dotate di sistemi di priorità semaforica (La priorità semaforica per mezzi pubblici più veloci, 2023).

5.3: Genova

A Genova sono state implementate strategie di preferenziamento semaforico a partire dal 1992 (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009). Gli impianti semaforici sono gestiti mediante un sistema UTC denominato SIGMA. Esso è caratterizzato da una struttura a tre livelli: il primo è rappresentato dal centro di controllo, seguono poi sei controllori di area e infine 113 unità multifunzionali collocate nelle singole intersezioni. Per il rilevamento dei mezzi pubblici vengono impiegate tecnologie GPS e sistemi radio UHF (ultra high frequency) per garantire la comunicazione tra i veicoli e il centro di controllo.

Il sistema AVM riceve dati dalla flotta via radio ogni 30 s per monitorarne tutti i dati operativi e, in base a questi, genera l'eventuale richiesta prioritaria per un determinato mezzo (Figura 30). Questa, tramite il mezzo pubblico, viene poi trasmessa all'UTC che determina le modalità di intervento sul piano semaforico. Il controller semaforico riceve la richiesta quando il bus dista circa 300 m dall'attestamento, e, una volta che il mezzo è abbastanza vicino all'intersezione, seleziona la richiesta più urgente tra tutte quelle pervenute ed eroga la corrispondente azione prioritaria. Al termine di essa viene ripreso il piano semaforico normale e, al fine di garantire nuovamente il coordinamento con le intersezioni limitrofe, si interviene momentaneamente sulle fasi senza accettare nuove richieste prioritarie. Gli effetti delle strategie implementate a Genova hanno evidenziato una diminuzione dei tempi di transito pari a circa il 7-10%. Negli ultimi anni la città persegue il miglioramento del sistema di priorità sperimentando l'impiego della tecnologia 5G: dotando i mezzi dell'apposita strumentazione necessaria, è possibile migliorare la quantità e la velocità nella trasmissione in tempo reale dei dati.

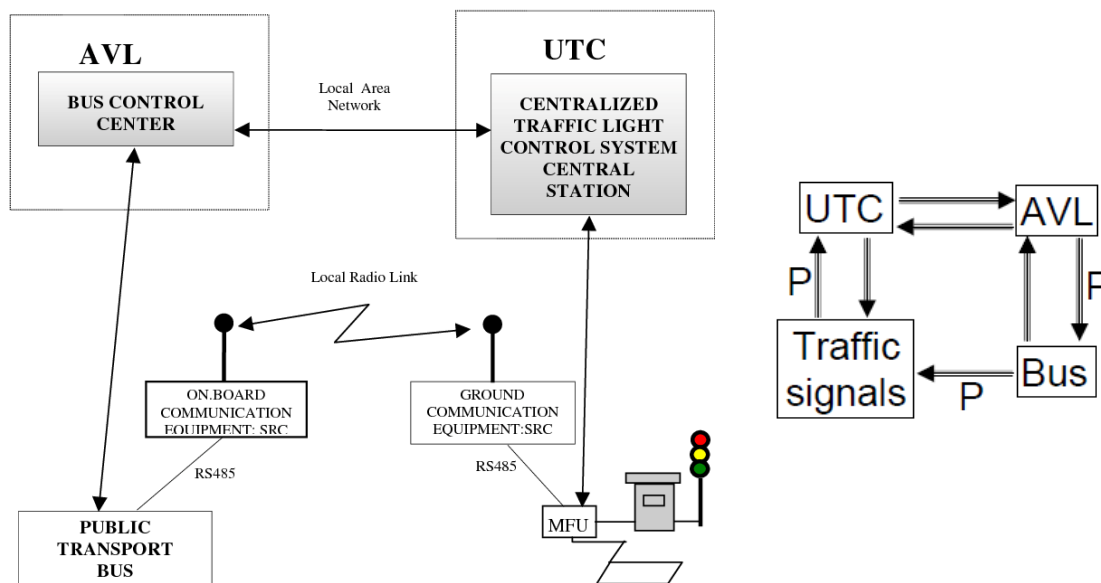


Figura 30: Architettura funzionale impiegata a Genova (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009)

5.4: Zurigo

A Zurigo (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009) (Nash, 2003), sin dagli anni '70 c'è stato un forte orientamento verso il miglioramento del trasporto pubblico allo scopo di favorire la riallocazione modale, limitare gli impatti ambientali e ridurre il volume di veicoli nelle strade, il tutto grazie anche all'appoggio della popolazione locale. Assieme alla realizzazione di corsie preferenziali per i mezzi pubblici e di un centro di controllo AVL, dagli anni '70 agli anni duemila sono stati effettuati ingenti investimenti che hanno portato ad un notevole incremento dell'impiego di strategie semaforiche prioritarie, senza impattare in modo significativo sulle altre correnti veicolari. La decisione di adottare questo sistema è stata presa dopo il fallimento delle proposte di costruzione di una linea metropolitana: rispetto a quest'ultima, un sistema di preferenziamento semaforico risulta più veloce da realizzare, meno costoso, e soprattutto porta benefici diffusi in tutta la rete di trasporto anziché lungo una singola linea. Uno degli aspetti più particolari del caso di Zurigo risiede nella completezza dell'implementazione di queste strategie: tutti i bus e tram di tutte le tratte della città fruiscono di questo sistema, con risultati rilevanti in termini di velocità, frequenza e affidabilità, e pertanto importanti risultati in termini di riallocazione modale. Infatti, anche grazie ad azioni volte a disincentivare l'uso dei mezzi privati, il trasporto pubblico a Zurigo nel 2009 intercettava circa il 42% di tutti gli spostamenti in città. Nel periodo 1970 - 1980, che rappresenta gli anni principali di implementazione del sistema prioritario, il numero di spostamenti pro capite con i mezzi pubblici è aumentato di circa il 22,8%. Dal 1990 al 1997 l'incremento invece è stato del 7% circa (Statistisches Jahrbuch des Kantons Zurich 1999, 2000). Nel 1998 Zurigo era caratterizzata da uno dei più alti tassi di utilizzo dei mezzi pubblici: ogni cittadino utilizzava il trasporto pubblico mediamente 560 volte in un anno, valore circa doppio rispetto alla media di altre grandi città europee (Cervero, 1998).

Il sistema di gestione delle intersezioni è completamente centralizzato: in tutta la città vengono controllate 7 aree, ciascuna delle quali conta circa 60 impianti semaforici, con un totale di oltre

3000 spire induttive che rilevano i mezzi pubblici e raccolgono informazioni sui volumi di traffico. Generalmente vi sono dispositivi di rilevamento installati 300 m e 100 m a monte di ogni intersezione, ai quali se ne aggiunge uno di check-out utile ad interrompere l'azione prioritaria. Al raggiungimento del primo, il trasmettitore installato a bordo mezzo invia un segnale che consente al centro AVL di effettuare una prima stima del tempo di arrivo all'incrocio; questa viene poi migliorata al raggiungimento del secondo dispositivo situato 100 m a monte. Nell'architettura funzionale adottata (Figura 31), non essendovi comunicazione tra il centro AVL e l'UTC, il trasferimento delle informazioni avviene in modo decentralizzato. Le modalità di intervento sulle fasi semaforiche per poter erogare l'azione prioritaria vengono determinate a livello centrale in base alla posizione del bus, agli attuali volumi di traffico, e in base ad alcuni parametri preimpostati. Si è osservato che l'erogazione delle sole estensioni del tempo di verde effettivamente utili, senza eccessi, garantisce benefici ai mezzi pubblici con ridotti impatti sul traffico privato, raggiungendo uno degli obiettivi primari prefissati nella progettazione del sistema.

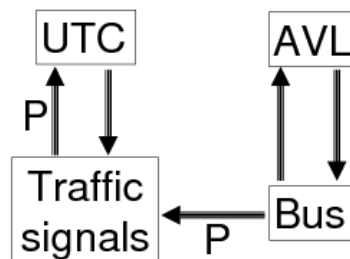


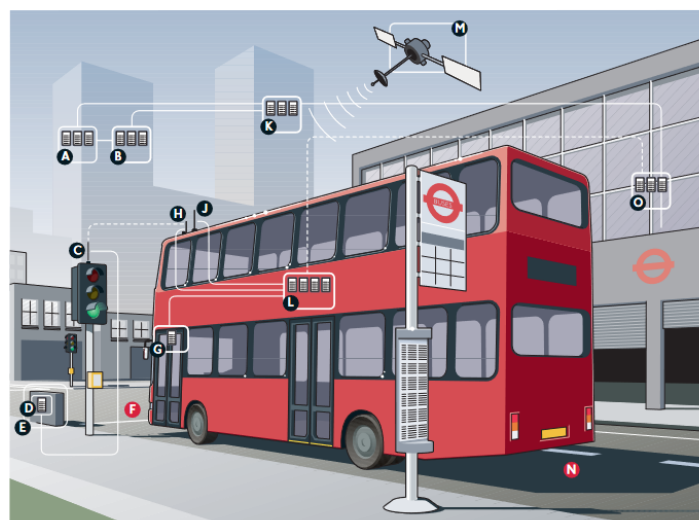
Figura 31: Architettura funzionale impiegata a Zurigo (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009)

5.5: Londra

La città di Londra ha iniziato ad implementare strategie prioritarie attive per i propri bus a partire dagli anni '70 (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009) (D'Souza, Gardner, Hounsell, & Shrestha, 2010). Le prime applicazioni riguardavano intersezioni isolate attuate dal traffico (VA: vehicle actuated), dove i mezzi venivano rilevati mediante spire induttive installate circa 70 m a monte della linea d'arresto: al passaggio del bus, l'emettitore di bordo inviava un segnale così da poter ricevere l'azione prioritaria. Questa solitamente consisteva nell'estensione o nell'anticipo della fase verde eventualmente includendo anche delle compensazioni per le temporizzazioni delle fasi non prioritarie. Alcuni test in queste intersezioni hanno dimostrato una riduzione del ritardo per i bus mediamente pari a 9 s (32%), valore un po' più alto di quello ottenibile in intersezioni coordinate. Il successo di questi sistemi ha portato alla loro continua e progressiva espansione.

Negli anni '90 è stata poi sviluppata l'UTC gestita dal sistema SCOOT includendo quindi nelle strategie di preferenziamento le intersezioni coordinate. Le modifiche dei piani semaforici consistono nell'estensione del tempo di verde, nell'accorciamento della fase rossa o, in alcune situazioni, nell'esecuzione di salti di fasi. Queste azioni vengono valutate dal sistema sulla base del confronto tra il grado di saturazione (valutato in tempo reale) delle corsie non prioritarie e il relativo valore soglia preimpostato: più questo è elevato, più saranno i trattamenti prioritari erogati ma, allo stesso tempo, saranno maggiori anche i disturbi alle correnti di traffico non

prioritarie. Alcune prove in campo hanno dimostrato una riduzione del ritardo pari a 3-5 s per bus ad ogni intersezione. Il sistema era inizialmente basato su dispositivi di rilevamento in sito, soppiantati poi nel nuovo millennio da tecnologie più moderne e flessibili: il rilevamento e trattamento delle informazioni relative ai bus è infatti oggi affidato ad un nuovo e importante sistema AVL, noto come iBus, che impiega la tecnologia GPS e comunicazioni via radio (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009) (Hounsell & Shrestha, 2012). Uno dei principali vantaggi risiede nella possibilità di effettuare il rilevamento in molteplici punti virtuali e, grazie alle informazioni raccolte, adottare strategie prioritarie condizionate (principalmente in base all'entità dei ritardi e ai valori di headway). Il sistema iBus, introdotto a partire dal 2007 (Wong & Hounsell, 2010) (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009), è una delle più grandi realizzazioni AVL al mondo, ed è stato concepito per coprire l'intero sistema di bus londinesi: all'anno 2007 esso contava oltre 8000 mezzi, 3200 intersezioni (Clarke, Bowen, & Head, 2007) e 90 depositi. È costituito da quattro componenti principali connesse tra loro (Figura 31): un'unità installata a bordo di ogni bus ("L"), un server di dati presente in ogni deposito ("O"), un server centrale che memorizza tutte le informazioni operative ("K"), e dei databases per la gestione e monitoraggio della rete ("A" e "B"). L'unità di bordo contiene il software ed è collegata con i sensori delle porte (per registrare gli istanti di apertura e chiusura) ("G"), con il ricevitore GPS ("J") e con un trasmettitore ("H") necessario a comunicare con gli impianti semaforici. A fine turno l'unità di bordo viene connessa in modalità wireless con il server del deposito allo scopo di installare eventuali nuove informazioni sulle tratte e sulla posizione dei punti di rilevamento, e allo stesso tempo trasmettere i dati raccolti durante l'esercizio necessari per successive analisi.



Key

Ⓐ Bus priority fault detection and performance monitoring reports	Ⓗ Bus door sensor
Ⓑ System databases	Ⓘ GPS receiver
Ⓒ Bus priority radio link	Ⓚ Central system server (located remotely)
Ⓓ Bus processor (contained within traffic signal controller)	Ⓛ iBus plus unit
Ⓛ Traffic signal controller	Ⓜ GPS satellites
Ⓜ Bus detection points	Ⓝ Bus garage (when bus is in garage, it is linked to the central system server to send and receive bus priority data)

Figura 32: Componenti del sistema iBus (Wong & Hounsell, 2010)

L'architettura di sistema impiegata è visualizzata in Figura 32 (corrispondente alla categoria B2 trattata nel paragrafo 3.2) (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009). Ogni bus riceve la propria posizione dal sistema GPS, coadiuvato dall'odometro, con una frequenza del secondo e, al fine di garantire il monitoraggio, questa informazione viene inviata ogni 30 s al centro di controllo; inoltre viene inviato anche l'istante di arrivo ad ogni fermata. Queste informazioni vengono poi usate dal centro AVL per calcolare gli headway e valutare i criteri necessari a definire la richiesta di priorità (l'"intelligenza" è a livello centrale). Il rilevamento del mezzo in avvicinamento all'intersezione viene effettuato attraverso punti virtuali configurati nel computer di bordo; la richiesta e il livello di priorità vengono quindi inviati dal sistema AVL al bus per poi essere inoltrati al controller semaforico quando il computer di bordo rileva il raggiungimento di questi punti predefiniti: il sistema di comunicazione impiegato è quindi decentralizzato. A questo punto l'azione prioritaria viene erogata e il bus può trarne beneficio.

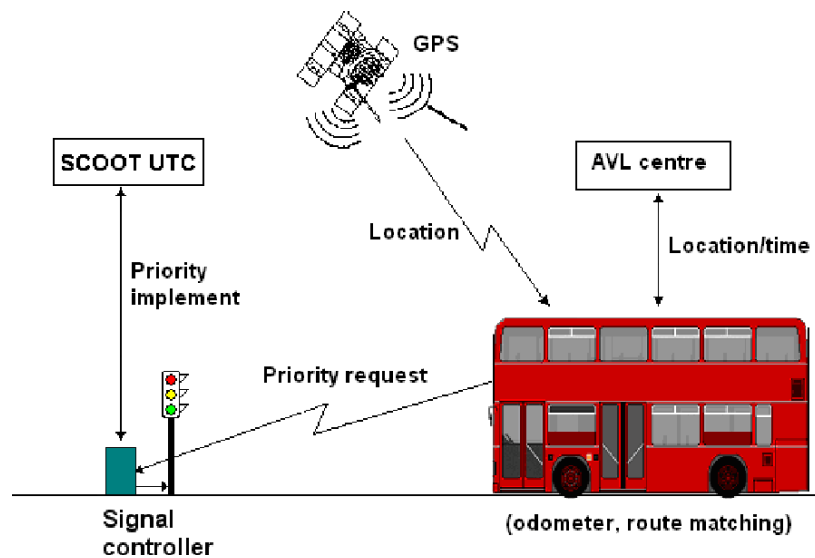


Figura 33: Architettura funzionale impiegata a Londra con il sistema iBus (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009)

In alcuni casi le potenzialità delle strategie prioritarie sono state estese attraverso la creazione di corsie per i soli bus, oppure la realizzazione di brevi tratti riservati che permettono ai mezzi pubblici di arrivare direttamente alla linea di arresto delle intersezioni. In tutta la città di Londra vengono erogate circa 150'000 azioni prioritarie ogni giorno, e, come dimostrato dal piano di sviluppo 2022-2030, il sistema di priorità è in continuo ampliamento e miglioramento (Bus action plan. Building an attractive, zero-emission bus service for all Londoners, 2022).

5.6: Tolosa

La città di Tolosa (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009) adotta sistemi di priorità semaforica da molti anni, avendo introdotto il centro AVL nel 1998, e l'attuale sistema UTC "CAPITOU" a partire dal 1999. Nel 2009 le intersezioni da esso gestite erano 380 su un totale di 490. La flotta di bus viene monitorata in tempo reale tramite l'impiego di tecnologia GPS supportata dall'odometro di ogni mezzo; la trasmissione delle informazioni

avviene attraverso sistemi radio UHF (ultra high frequency). L'architettura funzionale impiegata corrisponde alla categoria B3 tra quelle trattate nel paragrafo 3.2, ed è quindi di tipologia centralizzata (Figura 34). Quando il mezzo pubblico raggiunge ogni punto di rilevamento virtuale ne viene rilevato l'orario che, con una frequenza di 20 s, viene inviato al centro di controllo. Il centro AVL, sulla base dei dati ricevuti, calcola l'entità del ritardo o dell'anticipo rispetto al programma d'esercizio così da poter implementare strategie condizionate: l'eventuale richiesta di priorità viene quindi generata solo se il mezzo pubblico risulta in ritardo. Questa viene poi inoltrata all'UTC nell'istante in cui il bus viene rilevato in specifici punti a monte delle intersezioni. Il sistema CAPITOUL elabora quindi le modalità di intervento sul piano semaforico in modo da erogare l'azione prioritaria. Secondo alcuni studi condotti nel 1999, la priorità semaforica a Tolosa ha portato ad una riduzione dei tempi di percorrenza medi dei mezzi pubblici pari a circa il 5%, valore che può arrivare fino al 24% nei periodi più congestionati; contemporaneamente è stata osservata anche una maggiore regolarità di esercizio.

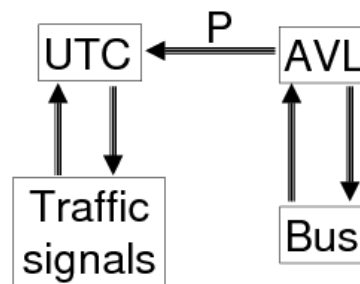


Figura 34: Architettura funzionale impiegata a Tolosa (Gardner, D'Souza, Hounsell, Shrestha, & Bretherton, 2009)

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

In questa tesi è stato trattato il tema della priorità semaforica per i mezzi pubblici, fornendo una descrizione del suo funzionamento, delle risorse necessarie alla sua implementazione, e dei benefici e impatti negativi che può generare.

Dopo una breve introduzione all'argomento nel capitolo 1, nel capitolo 2 sono state presentate le differenti tipologie di priorità che possono essere adottate: la distinzione principale consiste in priorità passiva e attiva, con quest'ultima che a sua volta comprende priorità condizionata e incondizionata, e strategie basate su regole o su modelli. Nel capitolo 3 sono state descritte le possibili architetture funzionali dei sistemi di priorità e ne sono stati presentati alcuni esempi; successivamente sono state analizzate le principali tecnologie utili per erogare trattamenti prioritari, partendo dalle strumentazioni più tradizionali quali le spire induttive, fino ad arrivare ai più moderni e flessibili dispositivi GPS. Nel capitolo 4, dopo una breve descrizione del calcolo del tempo di avvicinamento dei mezzi pubblici alle intersezioni, si è affrontato il problema della valutazione e quantificazione dei benefici e degli impatti generati dalle strategie prioritarie. Sono state prima analizzate le influenze generali di diversi parametri, per poi passare alla trattazione di tre differenti simulazioni riportate in letteratura. Da ciò sono emerse considerazioni in merito ad impatti negativi che risultano generalmente abbastanza trascurabili, ad eccezione dei casi di intersezioni con alti volumi di traffico; in queste situazioni il preferenziamento semaforico è risultato però inefficace anche per i mezzi pubblici stessi. Globalmente la priorità semaforica risulta effettivamente vantaggiosa per i mezzi pubblici, con benefici in termini di tempi di percorrenza, velocità media e ritardi. Infine nel capitolo 5 è stata presentata una panoramica generale sulle esperienze di applicazione delle strategie di priorità semaforica per il trasporto pubblico in diverse città internazionali. Nella seconda parte del capitolo la trattazione si è concentrata sulle città di Torino, Genova, Zurigo, Londra e Tolosa, descrivendo le differenti architetture funzionali, le diverse tecnologie usate, le diverse peculiarità e i benefici che le strategie prioritarie hanno permesso di ottenere.

Le simulazioni analizzate evidenziano che gli effetti provocati dai sistemi di priorità semaforica sono un tema complesso. Vi sono infatti numerosi fattori che possono determinare il successo o il fallimento di queste strategie, quali la posizione delle fermate, il grado di saturazione delle intersezioni, oppure la scelta della localizzazione dei punti di rilevamento dei mezzi pubblici. Ad esempio, intersezioni con alti volumi di traffico possono portare ad una riduzione della probabilità di successo dell'azione prioritaria, oltre ad un significativo incremento dei ritardi per le correnti veicolari non prioritarie. Essendo gli effetti fortemente dipendenti dalle condizioni locali, prima di effettuare interventi di implementazione di strategie di preferenziamento è opportuno eseguire delle simulazioni mirate. Ciò consente di valutare quantitativamente i benefici ottenibili e contemporaneamente di valutare il grado di disturbo generato tenendo in considerazione le peculiarità di ogni situazione.

In questo lavoro ci si è limitati ad analizzare la priorità semaforica, ma va detto che i benefici per i mezzi pubblici sono generalmente maggiori se essa è abbinata alla realizzazione di corsie preferenziali che separano fisicamente la circolazione di bus e tram da quella dei restanti veicoli stradali.

Spetta comunque ai gestori del sistema di trasporto decidere quanto privilegiare il transito dei mezzi pubblici e quindi contemporaneamente decidere il grado di peggioramento delle condizioni di deflusso degli altri veicoli ritenuto accettabile. Allo stesso tempo va tenuta in considerazione la fondamentale tematica della sostenibilità ambientale, oggi sempre più al centro dell'attenzione: la mitigazione dell'inquinamento atmosferico generato dal settore dei trasporti può essere possibile in primis grazie alla riallocazione modale, rendendo quindi di fondamentale importanza il miglioramento dell'attrattività dei sistemi collettivi. Questo può essere reso possibile proprio grazie alla riduzione dei tempi di percorrenza e all'aumento dell'affidabilità e puntualità dei sistemi di trasporto, obiettivi che i sistemi di preferenziamento contribuiscono a raggiungere. In un'ottica di sostenibilità, in particolare nei grandi centri urbani, può quindi risultare utile porre in primo piano l'efficienza del trasporto pubblico, e secondariamente tenere in conto gli impatti negativi generati dalle strategie prioritarie alla circolazione degli altri veicoli su strada; alcune città come Zurigo sono arrivate anche ad adottare tecniche per disincentivare l'utilizzo dei mezzi privati.

Si è osservato come i sistemi di priorità semaforica negli ultimi anni siano sempre più performanti grazie al continuo progresso nel campo tecnologico. A partire dalle spire induttive o da tecnologie fisse alle intersezioni, le aziende di trasporto pubblico stanno progressivamente dotando i propri mezzi di strumenti più flessibili quali i sistemi GPS. Le informazioni raccolte possono essere quindi gestite dai centri di controllo, con la possibilità di valutare l'erogazione delle azioni prioritarie in base a considerazioni a livello di rete. Sebbene l'adozione delle strategie prioritarie non abbia visto un'esplosione nel corso degli anni, in un prossimo futuro potrebbe risultare parte integrante della mobilità stradale. Il progresso tecnologico che sta interessando anche il settore dei trasporti permette infatti lo sviluppo di dispositivi che consentono un dialogo sempre più efficiente tra veicoli e infrastrutture: è il caso delle comunicazioni V2I (vehicle-to-infrastructure) e dei CVs (connected-vehicles), mediante i quali è possibile uno scambio continuo di informazioni tra veicoli e infrastruttura al fine di migliorare l'operatività e la qualità della mobilità, nonché la sicurezza della circolazione (Cvijovic, Zlatkovic, Stevanovic, & Song, 2022). Le aziende automobilistiche stanno progressivamente prevedendo l'installazione dei necessari dispositivi nei nuovi veicoli, e contemporaneamente molti centri urbani stanno dotando le loro infrastrutture di strumentazioni tecnologiche (Otto, Partzsch, Holfeld, Klöppel-Gersdorf, & Ivanitzki, 2023). Grazie a ciò risulta pertanto possibile un rilevamento continuo dei mezzi, con conseguenti maggiori probabilità di successo delle azioni prioritarie anche in condizioni di intenso traffico. Benefici ulteriori possono essere ottenuti combinando le strategie di preferenziamento semaforico con tecnologie che consentono di indicare ai conducenti dei mezzi le velocità ottimali da mantenere; inoltre, le tecnologie a questo scopo impiegate possono risultare utili anche per fornire informazioni in tempo reale

agli utenti. Ulteriori innovazioni recenti riguardano i mezzi pubblici a guida automatica e connessi (CAV: Connected and Automated Vehicles) che, combinati con i sistemi di preferenziamento semaforico, consentono di raggiungere risultati ancora più significativi rispetto all'applicazione della priorità per i mezzi pubblici a guida manuale. (Hu, et al., 2022) descrivono un sistema che, basandosi sulle informazioni in tempo reale relative ai veicoli presenti in prossimità dell'intersezione e sulle informazioni riguardanti i piani semaforici, consente ai bus di effettuare sorpassi di eventuali veicoli lenti e ne definisce le traiettorie e i movimenti necessari per raggiungere velocemente l'attestamento dell'incrocio. Queste azioni complessivamente rendono il movimento dei mezzi autonomi più uniforme, garantendo anche un risparmio di carburante. Le simulazioni condotte dagli autori hanno evidenziato un incremento dei benefici variabile dal 3.5% al 16.1% rispetto a quelli ottenibili con le convenzionali strategie di priorità semaforica; contemporaneamente si è osservato un maggior numero di bus che hanno potuto beneficiare del trattamento prioritario. Dato che le tecnologie necessarie per il funzionamento di questi sistemi sono recenti, la ricerca e lo sviluppo di nuove strategie di preferenziamento semaforico applicabili ai mezzi pubblici automatici e connessi è tutt'ora in atto. I trattamenti prioritari per i mezzi pubblici rientrano nei "sistemi di trasporto intelligenti", categoria che, grazie alla progressiva standardizzazione e armonizzazione in particolare a livello europeo, è destinata ad assumere un ruolo sempre più importante nella mobilità del prossimo futuro.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Professor Meneguzzer Claudio per la cortesia e disponibilità mostrata nella realizzazione di questa tesi.

Ringrazio i miei genitori e i miei parenti per il sostegno mostrato in tutti questi anni.

Ringrazio tutti i miei amici e amici di università per il supporto durante tutto il percorso universitario.

Bibliografia

FONTI DIRETTE

- 5T: Con priorità semaforica, 83 mila ore di tempo risparmiate dagli utenti di tram e bus. (2019, Aprile 12). Torino: Ufficio stampa Consiglio Comunale .
- Ali, M. S. (2021). *Quantifying the Mobility and Safety Benefits of Transit Signal Priority*. FIU Electronic Theses and Dissertations. 4713.
- Bus action plan. Building an attractive, zero-emission bus service for all Londoners. (2022, Marzo). Transport for London: tfl.gov.uk.
- Cvijovic, Z., Zlatkovic, M., Stevanovic, A., & Song, Y. (2022). Conditional Transit Signal Priority for Connected Transit Vehicles. *Transportation Research Record*, 2676(2), 490–503.
- Diakaki, C., Papageorgiou, M., Dinopoulou, V., Papamichail, I., & Garyfalia, M. (2015). State-of-the-art and -practice review of public transport priority strategies. *IET Intelligent Transport Systems*, 9, 391-406.
- D'Souza, C., Gardner, K., Hounsell, N. B., & Shrestha, B. P. (2010). New developments for bus priority at traffic signals in London using iBus. IET Road Transport Information and Control Conference and the ITS United Kingdom Members' Conference (RTIC 2010).
- Gardner, K., Hounsell, N., Shrestha, B., & Bretherton, D. (2009). Deliverable 1 Review of Bus Priority at Traffic Signals around the World.
- Garrow, M., & Machemehl, R. (1999). Development and Evaluation of Transit Signal Priority Strategies. *Journal of Public Transportation*, 2, 65-90.
- Heaslip, K. P., Kim, D., Kaplan, M. M., & Dietrich, C. A. (2020). *Planning Corridors for Transit Signal Priority While Considering Pedestrian Delay*. Virginia, United States: Virginia. Dept. of Transportation; United States. Department of Transportation. Federal Highway Administration.
- Hill, R. (2000). Real Time Passenger Information and Bus Priority System in Cardiff. *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Transport Systems*. Turin.
- Hounsell, N. B., Bowen, G. T., Cook, D. J., & Gardener, K. (1997). SPRINT: Active Bus Priority in Fixed Time UTC in London. *Proc. 25th PTRC European Transport Forum, Seminar K: Traffic Management and Road Safety*, (p. Vol. P419, pp75-86). Brunel University, UK.
- Hounsell, N., & Shrestha, B. (2005). AVL based Bus Priority at Traffic Signals: A Review and Case Study of Architectures. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 5(1), 13-29.
- Hounsell, N., & Shrestha, B. (2012). A New Approach for Co-Operative Bus Priority at Traffic Signals. 13(1), 6-14.

- Hu, J., Zhang, Z., Feng, Y., Sun, Z., Li, X., & Yang, X. (2022). Transit Signal Priority Enabling Connected and Automated Buses to Cut Through Traffic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 7, pp. 8782-8792.
- Imran, N. T., Girijan, A., & Vanajakshi, L. D. (2021, 10 29). A Review on Bus Signal Priority Systems. *Transportation in Developing Economies*.
- La priorità semaforica per mezzi pubblici più veloci. (2023, Aprile 5). Tratto da 5T.torino: <https://www.5t.torino.it/priorita-semaforica-mezzi-pubblici-veloci/>
- Li, Y., Koonce, P., Li, M., Zhou, K., Li, Y., Beard, S., . . . Sun, Z. S. (2008). *Transit Signal Priority Research Tools*.
- Liao, C., Davis, G. A., & Iyer, P. (2008). *A Bus Signal Priority System Using Automatic Vehicle Location / Global Position Systems and Wireless Communication Systems*. University of Minnesota Center for Transportation Studies.
- Malandraki, G., Papamichail, I., Papageorgiou, M., & Dinopoulou, V. (2015). Simulation and Evaluation of a Public Transport Priority Methodology. *Transportation Research Procedia*, 6, 402-410.
- Nash, A. (2003). Implementing Zurich's Transit Priority Program. *Transportation Research Record*, 1835(1), 59–65.
- Ngan, V., Sayed, T., & Abdelfatah, A. (2004). Impacts of Various Parameters on Transit Signal Priority Effectiveness. *Journal of Public Transportation*, Volume 7, Issue 3, 71-93.
- Otto, T., Partzsch, I., Holfeld, J., Klöppel-Gersdorf, M., & Ivanitzki, V. (2023). Designing a C-ITS Communication Infrastructure for Traffic Signal Priority of Public Transport. *Appl. Sci.* 2023, 13, 7650.
- Raffaelli, C. (2018, Novembre 21). Priorità semaforica per GTT, confermata l'utilità. *CittàAgorà – Periodico del Consiglio comunale di Torino*.
- Suhyeon, K., Mincheol, P., & Kyungsoo, C. (2005). A bus priority signal strategy for regulating headwaysof buses. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 6, 435-448.
- Torino, P. d. (2017, Marzo 24). Arriva l'“onda verde” semaforica: i tram risparmiano tempo e riducono i consumi. *Poliflash: Politecnico di Torino Magazine*.
- TTS_Italia. (2010). L'impatto degli ITS per la riduzione di CO2. *DELLA TELEMATICA, TTS Italia–Associazione Nazionale*.
- Wahlstedt, J. (2013). Evaluation of the two self-optimising traffic signal systems Utopia/Spot and ImFlow, and comparison with existing signal control in Stockholm, Sweden. *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)* (p. 1541-1546). The Hague, Netherlands: IEEE.
- Wong, A., & Hounsell, N. (2010). USING THE IBUS SYSTEM TO PROVIDE IMPROVED PUBLIC TRANSPORT INFORMATION AND APPLICATIONS FOR LONDON. Lisbona: Transportation Research Group, School of Civil Engineering and the Environment, University of Southampton, UK.

Zhizhou, W., Hao, C., Yuqi, P., & Xiaoguang, Y. (2006). Bus Priority Control System Based on Wireless Sensor Network (WSN) and Zigbee. *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, Shanghai, China*, 148-151.

FONTI INDIRETTE

- Berger, M., Bottero, M., Bono, M., Cassinelli, P., Dalla Chaira, B., & Deflorio, F. P. (2014). Un'analisi dei tram di Torino: effetti della priorità semaforica ed ITS sui consumi energetici. *TP: TRASPORTI PUBBLICI*, 31-37.
- Cervero, R. (1998). *The Transit Metropolis—A Global Inquiry*. Washington D.C.: Island Press.
- Clarke, R., Bowen, T., & Head, J. (2007). Mass Deployment of Bus Priority Using Real-Time Passenger Information Systems in London. *Proceedings of European Transport conference 2007*.
- Diakaki, C., Dinopoulou, V., Aboudolas, K., Papageorgiou, M., Ben-Shabat, E., Seider, E., & Leibov, A. (2003). Extensions and New Applications of the Traffic-Responsive Urban Control Strategy: Coordinated Signal Control for Urban Networks. *Transportation Research Record*, 1856, 202-211.
- European Union. (2011). White Paper, Roadmap to a Single European Transport Area - Towards a competitive and resource efficient transport system. Brussels, Belgium.
- Gardner, K., D'Souza, C., Hounsell, N., Shrestha, B., & Bretherton, D. (2009). *Review of Bus Priority at Traffic Signals around the World*. Working Group: Interaction of buses and signals at road crossings, UITP, Final Report Version 2.0.
- Gillam, W., & Wright, D. (2000). An Innovative Approach to Real-Time Bus Information. *Proceedings of 10th International Conference on Road Traffic*. IEE London.
- Hill, R. (2000). Real Time Passenger Information and Bus Priority System in Cardiff. *Proceedings of 7th World Congress on Intelligent Transport Systems*. USA.
- Liu, H., Skabardonis, A., Zhang, W., & Li, M. (2004). Optimal Detector Location for Bus Signal Priority. *Transportation Research Record*, 1867(1), 144–150.
- McLeod, F., Hounsell, L., & Ishtiaq, S. (1996). Journey time prediction for bus priority at traffic signals. *24th European Transport Forum*.
- Radwan, E., Shankar Ramasamy, P., Harb, R., Russo, C., Zarillo, M., & Gordin, E. (2009). *Calibration and Validation of Shaker and TNCC for Deployment on Florida's Turnpike*.
- Sane, K. J. (1999). Traffic Signal Priority – A Justified Favouring of Public Transport, ENTIRE documents.
- Skabardonis, A. (2000). Control Strategies for Transit Priority. *Transportation Research Record*, 1727, 20-26.
- Smith, H., Hemily, B., & Ivanovic, M. (2005). *Transit Signal Priority (TSP): A Planning and Implementation Handbook*. Washington, DC: ITS America and United States Department of Transportation.
- Statistisches Jahrbuch des Kantons Zurich 1999. (2000). Zurich, Switzerland: Kanton of Zurich.