

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali - DICAM*

*CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE*

**TESI DI LAUREA**

in

Laboratorio di Infrastrutture Viarie e Trasporti

**MICRO-SIMULAZIONE DI TRAFFICO SULLA RETE DI  
BOLOGNA, CON DOMANDA BASATA SULLE ATTIVITÀ  
E CALIBRAZIONE DI UNA FUNZIONE DI UTILITÀ**

CANDIDATO

**Davide Morgano**

RELATORE

**Chiar.mo Prof. Joerg Schweizer**

CORRELATORI

**Chiar.mo Prof. Federico Rupi**

**Dott. Ing. Cristian Poliziani**

Anno Accademico 2018-2019

Sessione III – Marzo 2020



# INDICE

---

1.	INTRODUZIONE .....	6
2.	STATO DELL'ARTE .....	9
2.1.	Agent-Based Model e Activity-Based Model.....	10
2.2.	Microsimulazioni su larga scala.....	11
2.3.	Richiami teorici.....	16
2.3.1.	Generazione della domanda di trasporto .....	16
2.3.2.	Individuazione degli itinerari.....	17
2.3.3.	Map Matching .....	21
2.3.4.	Teoria dell'utilità casuale .....	22
2.3.5.	Validazione dei modelli.....	25
3.	SOFTWARE E DATI.....	28
3.1.	Software utilizzato .....	28
3.2.	Dati impiegati .....	30
4.	METODOLOGIA.....	35
5.	MODELLO DI OFFERTA.....	37
6.	MODELLO DI DOMANDA .....	40
6.1.	Generazione della domanda di trasporto privato .....	40
6.2.	Generazione domanda ciclabile .....	41
6.3.	Generazione domanda trasporto pubblico .....	43
7.	ALGORITMO VP-CREATOR.....	46
8.	TEST E EDITING DELLA RETE.....	51
8.1.	Import della domanda .....	51
8.2.	Editing della rete .....	52
8.3.	Test della rete e delle modalità di routing.....	52
8.3.1.	Dynamic Routing e Re-routing.....	53
8.3.2.	Introduzione di semafori attuati e modello sub-lane .....	56

8.3.3. Dynamic User Equilibrium.....	58
9. CREAZIONE DELLO SCENARIO .....	64
9.1. Definizione dell'area di studio.....	64
9.2. Operazioni preliminari .....	65
9.3. Generazione della domanda di trasporto privato .....	67
9.4. Generazione della domanda di trasporto pubblico.....	70
9.5. Generazione della domanda ciclabile .....	71
9.6. Generazione della domanda pedonale .....	75
9.7. Creazione dei piani alternativi .....	76
10. ALGORITMO EXCHANGE-PLANS .....	79
10.1. Metodo sequenziale .....	79
10.2. Metodo dello scambio dei piani.....	80
11. FUNZIONE DI UTILITA' .....	87
11.1. Procedimento .....	87
11.2. Applicazione al caso di studio .....	92
12. RISULTATI .....	100
12.1. Popolazione virtuale .....	100
12.2. Flussi ed emissioni inquinanti.....	110
13. VALIDAZIONE.....	118
14. CONCLUSIONI.....	126
APPENDICE .....	129
A.1. Generazione Trips&Routes .....	129
A.2. Generazione del servizio di trasporto pubblico .....	130
A.3. PT-Network .....	134
A.4. Problematiche riguardanti la domanda .....	135
A.5. Correzione del modello di rete .....	138
A.5.1. Controllo dei permessi di transito.....	138
A.5.2. Correzione/Creazione dei cicli semaforici.....	138

A.5.3. Correzione del disegno delle rotatorie.....	139
A.5.4. Eliminazione di connettori errati .....	140
A.5.5. Modifica della posizione di alcune corsie ciclabili.....	140
A.5.6. Completamento di alcune zone di bordo della rete .....	140
A.5.7. Incremento della velocità sulle corsie di immissione.....	142
A.6. Implementazione del rerouting.....	144
A.7. Introduzione dei semafori attuati .....	146
A.8. Calibrazione dei parametri V-Types.....	147
A.9. Parametri per la microsimulazione finale .....	149
A.10. Procedura per il caricamento dei flussi misurati (spire).....	151
BIBLIOGRAFIA .....	153

# 1. INTRODUZIONE

---

In un mondo sempre più frenetico, in cui tutto sembra facilitato dalle nuove tecnologie ed in particolare dalla diffusione del tanto chiacchierato *Internet of Things*, la domanda di trasporto per persone e merci è cresciuta, e sta continuando a crescere, a dismisura, specialmente grazie alla semplicità di acquisto di servizi e prodotti sul web e alla notevole diminuzione dei costi fatta registrare rispetto ai decenni precedenti. Tutto ciò ha portato a una rapida saturazione delle reti di trasporto di un elevatissimo numero di città e metropoli in giro per il mondo, appartenenti ai paesi più sviluppati (gli stati occidentali, Cina e Giappone) ma anche alle nazioni emergenti e in crescita esponenziale sotto questo aspetto (in particolare Brasile e India).

Nasce dunque la necessità di studiare con grande attenzione tali reti, con l'obiettivo di valutare gli effetti dell'enorme domanda che le caratterizza, specialmente durante gli orari di punta, riguardanti possibili congestioni o emissioni inquinanti ed eventualmente proporre delle soluzioni per migliorare la qualità dei servizi forniti alla popolazione.

A questo scopo sono stati creati dei modelli con una popolazione virtuale e una rete stradale che rispecchia 1:1 quella reale. Per tali modelli si usa anche l'espressione inglese *digital twin*. Su essi è possibile eseguire delle simulazioni di traffico per prevedere quali saranno le conseguenze di eventuali scenari di traffico, della bontà di un ipotetico intervento sulla rete o, ancora, per analizzare i dati rilevati a seguito dell'osservazione di una situazione reale.

Numerosi sono gli studi che hanno fatto uso di tali approcci per la valutazione degli impatti conseguenti il verificarsi di una certa condizione di traffico, spesso relative ad aree urbane di limitate estensioni, ma molto inferiori sono gli studi che si sono concentrati sulla previsione delle scelte eseguite dai cittadini costituenti la popolazione per quanto riguarda le alternative a loro disposizione per l'effettuazione di uno spostamento.

Proprio questo tema rappresenta la parte centrale della presente trattazione, ossia la calibrazione di una funzione di utilità, ed in particolare dei parametri costanti che la caratterizzano, che sia in grado di riprodurre le scelte effettuate da ogni singolo individuo quando gli si presenta la necessità di compiere uno spostamento all'interno della rete di trasporto considerata.

Lo studio è stato svolto basandosi su un modello di rete, sviluppato nel corso degli anni dal gruppo di trasporti del dipartimento DICAM dell'Università di Bologna, riguardante

il comune di Bologna e parte delle zone urbane limitrofe e appartenenti al territorio provinciale, facendo uso del software SUMOPy.

L'elaborato, dopo una approfondita analisi teorica dei concetti richiamati nel corso della trattazione e una rapida presentazione dei dati utilizzati, si incentra su una prima fase di descrizione dei modelli di domanda e di offerta e delle metodologie utilizzate per la creazione della popolazione virtuale, elemento centrale della ricerca.

Particolare attenzione è stata rivolta alla descrizione dell'algoritmo *VpCreator* appositamente realizzato per la generazione di tale popolazione a partire dalle tracce GPS fatte registrare dai ciclisti durante i loro spostamenti, utilizzate come fonte da cui ricavare la domanda di trasporto ciclabile complessiva.

Prima di entrare nel vivo della trattazione, tuttavia, è stato fondamentale avviare un procedimento iterativo che prevedesse una alternanza di microsimulazioni e interventi sulla rete o sugli algoritmi che governano tali processi, allo scopo di correggere gli errori presenti sul modello ed individuare la migliore configurazione di funzionamento del simulatore, in modo che fosse possibile riprodurre in maniera veritiera le reali condizioni di traffico.

Terminate le operazioni preliminari, si entra nel cuore della trattazione con una approfondita descrizione delle operazioni svolte per la creazione dello scenario utilizzato per le successive analisi. L'idea fondante è quella di costruire una popolazione virtuale (composta da circa 55000 persone) che compie spostamenti all'interno dell'area di studio individuata, di estensione inferiore rispetto ai confini del comune di Bologna, basandosi sui dati derivanti dalle matrici OD o dalle tracce GPS citate in precedenza, per poi completare lo scenario generando una domanda di trasporto che rappresenti gli spostamenti di scambio e di attraversamento della stessa e che abbia la funzione di creare una sorta di traffico di fondo sulla rete, senza che sia assoggettata alle analisi cui viene sottoposta la popolazione virtuale.

In particolare, a tutte le persone è stato attribuito il possesso di diversi veicoli (automobili, biciclette o motocicli) e sono stati assegnati i diversi piani di viaggio che possono essere utilizzati per il completamento degli spostamenti che devono effettuare, ognuno associato a un modo di trasporto differente. Per ciascuno di essi è stato determinato il tempo effettivo di percorrenza, a parità di condizioni di traffico, rese possibili dall'imposizione di una ripartizione modale stabilita a priori (tramite l'utilizzo dell'algoritmo *Exchange-Plans*), in modo che possano essere confrontati dagli utenti. Essi sono visti come dei decisori razionali, che effettuano le loro scelte basandosi sulla

massimizzazione dell'utilità associata a ciascuna delle alternative che hanno a disposizione. È, quindi, stata di fondamentale importanza l'introduzione di una funzione di utilità, basata sui tempi registrati, e la calibrazione dei parametri che la descrivono per fare in modo che gli utenti individuassero la strategia più vantaggiosa per completare il proprio viaggio e che, allo stesso tempo, riproducesse in maniera sufficientemente precisa la realtà.

In conclusione della trattazione, è stata eseguita una microsimulazione che ha consentito di confrontare i dati ottenuti al termine dello studio, con quelli misurati da una serie di dispositivi contatori distribuiti lungo le strade cittadine, allo scopo di validare il modello utilizzato, con risultati piuttosto soddisfacenti.



## 2. STATO DELL'ARTE

---

Prima di procedere con la descrizione delle operazioni eseguite per lo svolgimento della trattazione, occorre dedicare un po' di spazio all'analisi dello stato dell'arte sul tema della microsimulazione di reti urbane su larga scala.

Nell'ambito trasportistico, quello della microsimulazione è un argomento che si è sviluppato solo recentemente, anche grazie all'incremento esponenziale della potenza di calcolo dei computer, fattore fondamentale per lo svolgimento di questo tipo di operazioni, ma nonostante ciò, i lavori di ricerca e le pubblicazioni risultano essere in numero molto elevato.

Molti di questi studi sono incentrati su piccole porzioni di rete al fine di migliorare le prestazioni di intersezioni lavoranti in condizione di saturazione [21],[22], di quantificare gli impatti generati dal traffico stradale in un certo quartiere [23], di stimare il traffico che potrebbe transitare lungo una nuova arteria o, ancora, di redigere piani di esodo di aree urbane di diversa dimensione, qualora si venissero a verificare delle calamità naturali come: tempeste di neve [3],[19], allagamenti, uragani [20] o terremoti. Tuttavia, sono presenti anche un elevato numero di pubblicazioni riguardanti microsimulazioni su larga scala, svolte avvalendosi di software differenti da quello impiegato nella presente trattazione (MATSim, TRANSIMS, VISUM), ma con caratteristiche e problematiche del tutto simili. La maggioranza di questi lavori presenta metodi alternativi per la modellazione della rete stradale di aree di vaste dimensioni, ed in particolare per la generazione della domanda e la ricostruzione degli itinerari percorsi dagli utenti, che rimangono gli aspetti più complicati da gestire.

Molti di essi trattano il tema delle microsimulazioni di tipo *agent-based* o *activity-based*, ossia basate sugli agenti oppure sulle attività, altri si concentrano sull'algoritmo di assegnazione della domanda alla rete e altri ancora si occupano della scelta del modo di trasporto in base alle funzioni di utilità e dell'itinerario o piano da seguire.

Questi ultimi sono sicuramente gli articoli più interessanti e strettamente correlati con il tema della trattazione e, pertanto, meritano di essere esaminati più nel dettaglio.

Infine, alcuni articoli presentano ricerche eseguite utilizzando il simulatore SUMO, sempre relative ad aree di limitata estensione, che sono stati di aiuto per una migliore modellazione della rete stradale. Per esempio, lo studio eseguito da ricercatori svedesi su una rotatoria situata presso la città di Norrköping [14] ha messo in evidenza le problematiche di modellazione e calibrazione dei parametri necessari per questa particolare tipologia di intersezione all'interno del software SUMO. In primis il

cosiddetto *'problema grid-lock'* secondo cui ogni utente posizionato all'interno della rotonda attende il movimento di qualcun altro, senza che la situazione si riesca a sbloccare. Questo è stato un problema ricorrente anche nella microsimulazione svolta sulla rete di Bologna, risolto grazie alla modifica di alcuni parametri di gestione, come proposto dai colleghi nordici, e al ridisegno della geometria e dei connettori sul modello di rete.

## **2.1. Agent-Based Model e Activity-Based Model**

Come accennato in precedenza, molti articoli che si trovano in letteratura sul tema della microsimulazione sfruttano un processo di generazione della domanda agent-based o activity-based.

I modelli di simulazione agent-based (Agent-Based Model) sono stati impiegati ampiamente in diversi settori, specialmente quelli economico ed ingegneristico, e ritenuti particolarmente utili in quanto ogni elemento della popolazione viene rappresentato come un oggetto software, chiamato *agente*, caratterizzato da un set di attributi che ne governano le scelte, i quali vengono utilizzati per ottenere una descrizione dettagliata del modello di popolazione.

Nell'ambito dei trasporti, l'utilizzo di un ABM per lo studio dei flussi di traffico rappresenta la scelta più naturale per la schematizzazione del traffico reale [2], in quanto ogni agente simboleggia un reale utente che effettua uno spostamento lungo la rete stradale. Gli agenti possono interagire con l'infrastruttura e tra di loro secondo diversi modelli che, nelle simulazioni a larga scala, gestiscono essenzialmente l'accodamento e i cambi di corsia delle correnti veicolari.

Tali modelli possono poi essere divisi in due categorie in base al metodo utilizzato per la generazione della domanda: Trip-Based Model e Activity-Based Model.

Si evince, dunque, che i modelli basati sulle attività sono una sottocategoria degli Agent-Based Model, caratterizzati da un particolare metodo di generazione della domanda incentrato, ovviamente, sulle attività svolte da ogni singolo agente durante l'arco della giornata.

In pratica, la domanda di trasporto dell'intera popolazione è generata dalla necessità di ogni individuo che ne fa parte di trasferirsi da un luogo ben determinato ad un altro, per svolgere, in un preciso intervallo temporale, una certa attività. Per effettuare tale spostamento ciascuna persona dovrà effettuare delle scelte: istante di tempo in cui

iniziare il viaggio, modo di trasporto da utilizzare (anche più di uno) e percorso da seguire, sono le principali. [12]

Lo scopo degli Activity-Based Model è proprio quello di cercare di riprodurre i viaggi di persone e veicoli sulla rete stradale partendo dall'analisi del diario giornaliero di ogni utente, su cui sono riportate tutte le attività svolte, i luoghi e gli orari che le caratterizzano, i modi di trasporto e i percorsi scelti per spostarsi tra due attività successive.

Il grosso limite di questi modelli è legato alla quasi totale impossibilità di conoscere esattamente il diario di ogni persona reale in modo da poterla riprodurre fedelmente all'interno del modello stesso. Per aggirare questo problema sarà dunque necessario ricorrere a una sua stima dettagliata, basata su un procedimento in 4 fasi: generazione della popolazione esistente all'interno dell'area di studio (a ciascuna persona vengono attribuite numerose caratteristiche socio-economiche, ricavate a partire da censimenti e/o dati pubblici), definizione delle attività svolte da ogni individuo (corredate da luoghi e orari ben precisi), generazione dei piani di trasporto che consentano di spostarsi tra due attività successive (descritti da modo di trasporto e itinerario scelto) e, infine, la microsimulazione e l'analisi dei risultati ottenuti.[13],[18]

I vantaggi di questo tipo di modellazione della domanda, rispetto a quelli tradizionali, sono numerosi e analizzati da diversi articoli in letteratura [10], ma possono essere facilmente riassunti nella migliore realistica del comportamento e delle scelte eseguite dai singoli elementi della popolazione virtuale.

## **2.2. Microsimulazioni su larga scala**

Per quanto concerne gli articoli presenti in letteratura sul tema della microsimulazione su larga scala, numerosi sono gli studi eseguiti su aree di diverse dimensioni e con popolazione molto variabile: dalla città di Zurigo (di estensioni paragonabili a quelle del comune di Bologna), passando per l'area urbana delle città di Amsterdam e Parigi, la città di Fresno in California e l'area metropolitana della città di Jakarta, in Indonesia, fino ad arrivare ad aree di estensioni elevatissime quali la zona Sud-Est della Florida, comprendente le contee di Palm Beach, Broward e Miami-Dade [1], o l'intero territorio Svizzero [6].

Gli studi eseguiti sulle ultime due zone, hanno ben poco da spartire con la presente trattazione, sia per l'enorme differenza di estensione e di numero di abitanti dell'area di

studio considerata, sia perchè essendo, di fatto, delle intere nazioni l'attenzione è stata concentrata essenzialmente sulla domanda di trasporto privato tramite autoveicoli.

Si è potuto, tuttavia, osservare come il processo di realizzazione dello scenario risulti del tutto simile a quello utilizzato per reti di dimensioni nettamente inferiori sotto molti aspetti: la costruzione della rete di trasporto, la raccolta dei dati necessari per la generazione della domanda, il processo iterativo della microsimulazione e la validazione del modello.

In entrambi i casi, infatti, il modello di rete è stato estratto a partire dal sito Open Street Map (OSM) ed aggiornato mediante lo strumento di editing messo a disposizione dal software di simulazione utilizzato (nel primo caso MATSim, nel secondo VISUM).

Dopodichè è stato stimato il diario dei piani per ogni agente appartenente al modello creato, partendo da una serie di informazioni socio-economiche riguardanti l'intera popolazione reale dell'area di studio considerata, raccolti da enti o agenzie specializzate in indagini demografiche e censimenti.

Per quanto concerne il processo iterativo di microsimulazione, esso viene avviato in modo tale che il comportamento di ogni agente facente parte del modello possa essere aggiornato durante lo svolgimento della stessa simulazione. Questa possibilità è garantita dalla presenza di un modulo che consente di tenere in memoria più piani per ogni utente, a ciascuno dei quali viene assegnato un punteggio sfruttando una funzione basata sull'utilità di ciascun piano, calcolata tenendo conto dei benefici che si ottengono svolgendo una certa attività (ad esempio il guadagno se è una attività lavorativa, il relax se è una attività di piacere, l'istruzione se è educativa,...) e della disutilità causata dal tempo speso viaggiando e dell'eventuale ritardo subito.

Generalmente, ogni utente sceglie il piano con punteggio maggiore, solitamente il più veloce nel caso di rete scarica, tra tutti quelli che ha a disposizione e lo prova durante la simulazione successiva. In questo modo molti automobilisti finiscono per utilizzare le stesse arterie stradali, causando elevati livelli di congestione che trasformano il percorso teoricamente più rapido in uno dei più lenti e quindi dei meno convenienti. [6]

L'aggiornamento del comportamento consiste nella possibilità che, al termine della generica iterazione, una certa percentuale di utenti possa non essere soddisfatta del piano scelto e provi, nella ripetizione successiva, ad utilizzare uno di quelli che inizialmente avevano punteggio minore in cerca di maggior fortuna, seguendo una metodologia assimilabile all'algoritmo di Frank & Wolfe nel caso di assegnazione statica della domanda. Questo aggiornamento procede fino al raggiungimento della

convergenza, ossia il rispetto di un certo criterio di arresto imposto dall'utente del software, dopo decine se non centinaia di ripetizioni, che coincide con una equa ripartizione dei flussi su tutta la rete.

Infine, la validazione del modello viene eseguita confrontando i dati di flusso ottenuti al termine del processo iterativo con quelli rilevati da strumenti di conteggio del traffico sparsi all'interno della rete stradale reale.

Come detto, questo stesso modo di procedere è stato adottato in molte delle ricerche esaminate aventi come obiettivo principale l'analisi del traffico veicolare privato, sia su aree di studio di dimensioni molto elevate sia su quelle di estensione più ridotta, conducendo sempre a risultati del tutto paragonabili, ossia una buona rappresentatività della realtà da parte del modello con grafici dei flussi simulati-rilevati che danno vita a valori  $R^2$  prossimi all'unità, nonostante si siano serviti di software di simulazione e di funzioni per il calcolo del punteggio differenti da caso a caso.

Quello che si evince, però, è la bontà del metodo utilizzato per la realizzazione dei vari modelli che, nonostante le evidenti differenze sotto l'aspetto di estensione dell'area di studio e della popolazione residente al suo interno, riescono a riprodurre con sufficiente precisione la realtà analizzata.

Dati i numerosi successi documentati in letteratura, si è deciso di sfruttare un procedimento analogo anche nel corso della presente trattazione.

Come accennato all'inizio del capitolo, un importante aspetto della microsimulazione, oltre l'assegnazione della domanda, è quello ricoperto dalla scelta del modo di trasporto per il completamento dello spostamento, che spesso viene associata a quella del piano/itinerario da seguire.

Per comprendere meglio quali fossero gli approcci più comuni utilizzati in tale ambito sono stati analizzati ulteriori articoli riguardanti la microsimulazione di reti a larga scala caratterizzate da domanda multimodale.

Diversi sono gli studi che hanno fatto uso del software MATSim, in cui non è prevista l'interazione tra flusso veicolare privato e mezzi di trasporto pubblico (ma neanche con pedoni e ciclisti), il cui servizio viene schematizzato tramite un modello di 'teletrasporto' degli utenti a velocità dimezzata rispetto a quella tenuta dagli autoveicoli in condizioni di flusso libero. [4],[5]

Pertanto, la scelta modale viene eseguita confrontando i punteggi ottenuti dai vari piani associati ai diversi modi di trasporto una volta che questi sono stati simulati, proprio

come succedeva per l'aggiornamento del comportamento degli utenti descritto in precedenza.

La differenza, tuttavia, risiede nel fatto che le reti studiate presentano sempre almeno le 4 principali modalità di trasporto che possono essere utilizzate per compiere gli spostamenti dai privati cittadini (auto, trasporto pubblico, bicicletta e camminata). Il punteggio è ricavato da una sommatoria delle utilità e disutilità generate dallo svolgimento delle attività agli estremi dello spostamento, dal trasferimento e dai ritardi subiti. Ciascuno di questi termini risulta essere influenzato da un elevato numero di parametri, il cui valore è molto variabile a seconda del modo di trasporto scelto, che vanno a moltiplicare i tempi esecutivi che caratterizzano il piano associato: tempi di viaggio, di attesa, di svolgimento dell'attività, eccetera. [11]

Un altro lavoro è stato eseguito per valutare il cambiamento delle preferenze modali dei cittadini di Parigi qualora venga introdotto un nuovo sistema di trasporto che affianchi quelli classici già esistenti, nel caso considerato si tratta di veicoli a guida autonoma in sharing (SAV). [7]

A tale scopo, è stata utilizzata una funzione di calcolo del punteggio, la cui formulazione varia a seconda del tipo di mezzo utilizzato e in base alle caratteristiche socio-economiche degli utilizzatori (età, genere, impiego), applicata a 3 diversi scenari: uno senza la presenza del nuovo sistema e 2 con, in cui sono e non sono considerate le preferenze degli utenti nella funzione che porta alla determinazione del punteggio finale. Questo ha consentito di osservare la variazione delle ripartizioni modali nel caso di inserimento di un nuovo mezzo di trasporto che, nel caso considerato, coincidono con una riduzione degli utilizzatori dell'auto a favore del sistema SAV.

Sono poi stati analizzati ulteriori due articoli il cui obiettivo principale era la realizzazione di un nuovo modello per la simulazione e l'analisi di una rete di traffico multimodale.

Nel primo [8] è stato creato un modello della città di Jakarta, secondo le regole descritte in precedenza. Al momento della scelta del modo di trasporto, essa risulta essere condizionata anche dalla scelta della destinazione dello spostamento, secondo la teoria del modello di assegnazione nested-logit, ma anche dal possesso di mezzi motorizzati (le cui percentuali risultano molto basse rispetto alle medie occidentali) che, in parte, sono a loro volta condizionate dalla densità abitativa dell'area di origine o dall'impiego della generica persona.

Nel secondo [9], invece, viene affermato che per eseguire la scelta modale, i viaggiatori effettuano una valutazione congiunta di diversi aspetti come: livello di congestione del traffico, convenienza del modo, spese da sostenere per il viaggio, tariffa e tempo di ricerca del parcheggio. Basandosi su questa idea, i ricercatori, hanno sviluppato una formulazione generale per la stima dei costi che devono essere sostenuti dagli utenti a seconda del modo di trasporto scelto per effettuare lo spostamento. In questo caso la formulazione risulta molto simile a quella introdotta in precedenza, basata sul concetto di utilità e disutilità ma contornata da un elevatissimo numero di parametri che prendono in considerazione tutti i fattori che vanno ad influire sulla scelta del mezzo di trasporto: da parametri standard come il tempo di viaggio, il valore monetario del tempo o i costi causati dalla congestione, a parametri più specifici come il tempo speso alla ricerca di un parcheggio, l'affollamento all'interno dei mezzi pubblici o il fatto che i parcheggi nelle zone centrali delle città abbiano costi più elevati e quindi questo possa far propendere gli utenti verso spostamenti multimodali, nei quali lasciano la macchina in corrispondenza di parcheggi scambiatori e poi raggiungono il centro sfruttando la rete di mezzi pubblici, che può essere su sede propria (come nel caso delle linee tramviarie, ferroviarie o metropolitane) e non risentire dell'eventuale congestionamento delle arterie stradali, oppure in sede promiscua come succede nel caso di linee di TPL.

Il modello presentato in questo articolo, denominato MMDUE è basato su un metodo di assegnazione di tipo nested-logit ed è stato formulato come un problema di risoluzione della disequazione variazionale, per cui è stata dimostrata l'esistenza e l'unicità della soluzione.

Tale modello di scelta modale è stato poi applicato alla rete multimodale di larga scala della città di Fresno, California, da cui è stato possibile stimare i tempi di viaggio effettivi per ogni modo di trasporto tramite un modello mesoscopico di tipo Deterministic Network Loading (DNL), che ha consentito di valutare i costi sostenuti dai vari utenti e di osservare come, effettivamente, tutte le variabili introdotte nella formulazione esposta in precedenza, influiscano veramente sulla scelta modale.

Grazie all'analisi di queste ricerche è stato possibile farsi un'idea del metodo da utilizzare per lo studio della scelta modale, che sfrutterà il principio della determinazione di un punteggio tramite funzione di utilità, la quale, tuttavia, sarà molto semplificata e condizionata da un numero limitato di parametri additivi e moltiplicativi.

## 2.3. Richiami teorici

Terminata la revisione bibliografica, è il momento di concentrare l'attenzione sull'approfondimento di alcuni concetti teorici che verranno richiamati nel corso della trattazione.

### 2.3.1. Generazione della domanda di trasporto

Il primo aspetto da approfondire riguarda la generazione della domanda di trasporto. Si è visto che la tecnica utilizzata nel presente studio è basata sul metodo delle attività ed è stato descritto il suo funzionamento, ma non è stata analizzata l'origine dei dati impiegati per tale procedimento.

La microsimulazione, a differenza della teoria classica dei trasporti in cui viene fatto uso di dati aggregati, richiede in input una domanda di trasporto in forma disaggregata, la quale è in grado di descrivere il viaggio di ogni singola persona. Ovviamente, questa tecnica è molto più onerosa sotto l'aspetto della raccolta dei dati, ma con una buona stima sarà possibile raggiungere risultati molto più precisi rispetto a quelli ottenuti tramite simulazione macroscopica.

L'approccio cui si farà riferimento in questo studio è il cosiddetto *Metodo dei flussi OD*, la cui idea è quella di generare viaggi (*trips*) e itinerari (*routes*) a partire dai dati relativi agli spostamenti registrati tra le varie zone in cui è suddivisa l'area di studio, contenuti all'interno di una matrice origine-destinazione (ODM), facente riferimento ad un preciso intervallo temporale e mezzo di trasporto. Siccome tale matrice rappresenta la domanda in forma aggregata, sarà necessario procedere alla sua disaggregazione prima di utilizzarla nell'ambito della simulazione microscopica.

Come detto, l'obiettivo è quello di generare i parametri che descrivono i viaggi (arco di origine e destinazione e posizione di partenza e arrivo lungo gli stessi, modo di trasporto e tempo di inizio) a partire dalle informazioni sui flussi.

Prima di eseguire la disaggregazione è necessario identificare tutti gli archi presenti all'interno delle zone di origine e destinazione e calcolare la probabilità che ogni arco possa essere quello di partenza o arrivo dei viaggi. Tale probabilità riflette il numero di potenziali luoghi di origine o destinazione nelle vicinanze dell'arco stesso (case, scuole, uffici, aziende), che viene stimato a partire da alcuni attributi degli archi come la lunghezza e la priorità.

Più un arco è lungo e maggiore è la probabilità che su di esso si affaccino edifici che possono fungere da origine o destinazione del viaggio, così come per archi di priorità



compresa tra 3 e 6 la cui probabilità di essere scelti aumenta in quanto solitamente rappresentano strade caratterizzate da una elevata densità abitativa.

La procedura di disaggregazione seguita dai software durante l'assegnazione della domanda alla rete, dunque, è sintetizzabile come segue:

- Determinazione degli archi di origine e destinazione di tutti i viaggi, secondo il criterio descritto;
- Generazione della posizione di partenza e arrivo tramite generatore aleatorio;
- Generazione dell'istante temporale di partenza, sempre tramite generatore aleatorio.

Terminata la procedura sono noti tutti i parametri dei viaggi, necessari per procedere alla microsimulazione. A seconda della metodologia seguita sarà richiesta o meno la determinazione degli itinerari che l'utente potrà seguire durante lo spostamento.

Proprio su questo aspetto si concentrerà il secondo approfondimento teorico: il *routing*.

Prima di passare a tale argomento, tuttavia, si vuole concentrare l'attenzione sul fatto che la generazione della popolazione virtuale e delle attività, a cui si faceva riferimento nei paragrafi precedenti, nell'ambiente SUMOPy può essere eseguita sfruttando diverse modalità, tra cui la generazione a partire da matrici OD. Nella presente trattazione si farà spesso uso di tale metodologia ed è quindi doveroso fornire una spiegazione teorica di tale approccio.

La popolazione virtuale generata a partire da ODM è costituita da un numero di individui pari al numero totale di spostamenti descritti dalle matrici, mentre le tipologie di attività sono individuate in base allo scopo del viaggio, così come le strutture di origine e destinazione. L'intervallo temporale associato alla matrice OD, invece, viene utilizzato per definire i tempi finali ed iniziali delle due attività successive, tra i quali si svolgerà lo spostamento, solitamente utilizzando il modo di trasporto preferito dal generico individuo, ossia quello associato alla matrice dei flussi. Quest'ultimo sarà poi utilizzato per costruire il piano di trasporto iniziale della persona, che consiste in una sequenza di *stages*, ciascuno dei quali contenente tutte le informazioni necessarie al microsimulatore: tipo di stages (activity, autoride, bikeride, motoride, transitride, walk,...), tempo di inizio e fine, informazioni sul veicolo e posizione (dell'edificio nel caso di attività, sull'arco iniziale e finale nel caso di spostamento).

### **2.3.2. Individuazione degli itinerari**

Il secondo aspetto teorico da esaminare è il *routing*: esso rappresenta il processo di individuazione della sequenza degli archi che collegano origine e destinazione del

viaggio. Pertanto, un itinerario è completamente descritto quando sono noti tutti i parametri che caratterizzano il viaggio e il vettore che rappresenta la precisa successione di archi che vengono percorsi dall'utente per raggiungere la destinazione.

L'algoritmo di generazione degli itinerari cerca di minimizzare i tempi di viaggio, ma a questo scopo occorre conoscere i tempi di percorrenza di ogni arco, i quali vengono inizialmente ipotizzati proporzionali alla sua lunghezza in condizioni di flusso libero e cioè dati dal rapporto tra lunghezza dell'arco e velocità massima consentita lungo esso.

Gli algoritmi di routing più diffusi nell'ambito delle simulazioni di traffico sono i seguenti:

- Algoritmo di Dijkstra: considera il percorso caratterizzato dal minimo tempo di percorrenza tra arco di origine e di destinazione, ignorando gli altri possibili itinerari anche se il tempo di viaggio ad essi associato è leggermente superiore al valore minimo assoluto.
- Algoritmo C-Logit: la probabilità di scelta di un certo percorso aumenta al diminuire del tempo di percorrenza associato. In questo modo, anche gli itinerari che non hanno il tempo di percorrenza più basso in assoluto possono essere scelti, proprio come succede nella realtà, dove itinerari con tempi simili ottengono simili probabilità di essere scelti. Assegnata una certa probabilità a tutti i possibili itinerari individuati, la scelta verrà eseguita per mezzo di un generatore aleatorio che tenga conto dei valori associati ad ogni percorso.

Attualmente, esistono 3 diversi approcci per la determinazione degli itinerari, che si distinguono in base al metodo utilizzato per determinare il tempo di percorrenza dei vari archi che li compongono. Essi sono: Pre-Routing, Dynamic User Equilibrium, Dynamic Routing.

#### **2.3.2.1. Pre-Routing**

Con questo metodo, il tempo di percorrenza degli archi viene stimato prima di effettuare la microsimulazione, facendo l'ipotesi di rete non congestionata (ragionevole solo nel caso di scenari caratterizzati da basso livello di traffico) e che la velocità del generico veicolo sia vincolata solamente dalla velocità massima consentita sullo specifico arco; pertanto, il tempo di percorrenza sarà dato dal rapporto tra lunghezza dell'arco e tale velocità.

Tale approccio ha caratteristiche molto simili all'assegnazione Tutto O Niente (TON) della teoria classica.

### 2.3.2.2. Dynamic User Equilibrium (DUE)

Si tratta di un metodo iterativo che si basa sull'effettuazione di una successione di microsimulazioni, in cui viene tenuto conto dell'effetto della congestione e della possibilità che gli utenti cambino itinerario, durante le quali i tempi di percorrenza degli archi vengono aggiornati ad ogni iterazione, con l'obiettivo che convergano verso valori di equilibrio.

L'idea è quella che ogni utente cerchi sempre di minimizzare il suo tempo di viaggio, confrontando i tempi stimati delle varie alternative e quelli effettivi derivanti dalle sue esperienze, ipotizzando, dunque, la conoscenza di tutti i tempi di percorrenza degli archi dell'intera rete.

Tuttavia, siccome tutti gli utenti cercheranno di minimizzare i propri tempi di viaggio, almeno inizialmente, si troveranno immersi in situazioni di congestione, fatto che li spingerà a modificare i loro itinerari alla ricerca della riduzione dei tempi di percorrenza, fino al raggiungimento di una condizione di equilibrio, nella quale nessun utente della rete sarà più in grado di ottenere vantaggio da un cambio di percorso.

La procedura seguita dall'algoritmo DUE, che si propone l'obiettivo del raggiungimento dell'equilibrio nel minor numero di iterazioni possibile, è la seguente:

- Precedentemente alla prima iterazione del metodo, i tempi di percorrenza vengono stimati con la tecnica del pre-routing; dopodichè inizia il vero e proprio processo iterativo;
- Individuazione degli itinerari da utilizzare per la simulazione seguente in base ai tempi ricavati dalla ripetizione precedente e a quelli stimati;
- Microsimulazione degli itinerari forniti in input, al termine della quale si ricavano dei nuovi tempi di percorrenza;
- Test di arresto che consiste nel verificare se è stato raggiunto o meno un equilibrio dei tempi di percorrenza.

Per garantire la convergenza dell'algoritmo è necessario fare in modo che non troppi veicoli cambino itinerario dopo ogni iterazione; per questo motivo durante la fase di routing non si può sfruttare l'algoritmo di Dijkstra, che causerebbe una oscillazione permanente di tutti i veicoli tra itinerari di tempo minimo, ma si dovrà fare affidamento su un algoritmo che scelga l'itinerario con una probabilità proporzionale alla sua durata, come il C-Logit.

Il principale problema dell'approccio DUE è l'elevato tempo di calcolo, proporzionale alle dimensioni dello scenario, richiesto per il raggiungimento della convergenza,

causato dall'alto numero di microsimulazioni che devono essere eseguite, una per ogni iterazione del processo.

### 2.3.2.3. Dynamic Routing

Con tale approccio, il routing viene eseguito durante lo svolgimento della simulazione e, pertanto, non è necessario individuare i possibili itinerari prima dell'avvio del processo iterativo, ma basterà fornire in input al microsimulatore le caratteristiche dei viaggi.

L'idea alla base di tale metodo è quella di riprodurre il più realisticamente possibile il processo decisionale di un generico utente della rete stradale, ossia: egli decide quale percorso seguire solamente nell'istante in cui inizia lo spostamento, considerando le condizioni attuali del traffico, e non precedentemente, basandosi su informazioni relative ad una situazione differente da quella corrente.

Da un punto di vista applicativo, il routing dinamico è implementato nella seguente maniera:

- Generazione dei viaggi e determinazione del tempo di percorrenza dei vari archi mediante il rapporto tra lunghezza e velocità massima consentita;
- Viene avviata la microsimulazione e i tempi di percorrenza degli archi della rete vengono aggiornati istante per istante a seconda delle condizioni di traffico, ossia considerando la velocità media attuale dei veicoli in transito su quei determinati tratti stradali;
- Nell'istante in cui viene introdotto il generico veicolo sulla rete, viene effettuato un routing utilizzando l'algoritmo di Dijkstra basato sui tempi di percorrenza aggiornati all'istante precedente;
- Aggiornamento della posizione dei veicoli e dei tempi di viaggio lungo i vari archi a seguito dell'inserimento di un nuovo veicolo.

Il procedimento si ripete finché l'intervallo temporale associato alla simulazione non si è concluso.

Si fa presente che, una volta determinato il percorso da seguire, la generica persona continuerà ad utilizzare tale itinerario anche nel caso dovesse imbattersi in fenomeni di congestione; questo perché l'aggiornamento dei tempi di percorrenza è valido solo ai fini del routing iniziale e non per far modificare l'itinerario in corso di svolgimento in base alle condizioni del traffico. Per questo fine è stato recentemente sviluppato un procedimento denominato *Rerouting*, che sfortunatamente è ancora poco documentato dal punto di vista del funzionamento e che quindi richiede una importante opera di calibrazione.

Importante sottolineare come, nonostante anche questo approccio tenga in considerazione le condizioni di traffico sulla rete come il DUE, i risultati ottenuti non sono esattamente gli stessi, tuttavia si ha un notevole risparmio di tempo poiché il procedimento non richiede un elevato numero di iterazioni e microsimulazioni, ma è di tipo autoconclusivo, cioè termina completamente all'interno di una sola simulazione.

### 2.3.3. Map Matching

Un ulteriore approfondimento teorico è da dedicare alla tecnica del *Map matching*, anch'essa utilizzata nel corso della presente trattazione e particolarmente significativa per la ricostruzione della domanda ciclabile e la generazione del servizio di trasporto pubblico locale.

Il map matching consente, sostanzialmente, di integrare un determinato record di coordinate GPS e i dati relativi alle mappe digitali della rete stradale, al fine di accoppiarli agli archi del grafo in maniera da riuscire a individuare la reale posizione spazio-temporale tenuta dai veicoli e ricostruire correttamente l'itinerario percorso.

Ogni viaggio è rappresentato da una successione di punti GPS (*traccia*), dove ciascun punto, di coordinate note, corrisponde ad una posizione occupata dall'utente in un certo istante temporale; l'obiettivo è, dunque, quello di ricostruire il percorso da egli seguito sfruttando tali informazioni.

Siccome il sistema GPS risulta essere affetto da diverse tipologie di errore, non è possibile ottenere la perfetta corrispondenza tra i punti di coordinate note e la mappa geo-referenziata dell'area di studio; pertanto, proprio per questo motivo è necessario l'impiego di algoritmi che riescano a ricostruire perfettamente questa correlazione.

L'algoritmo implementato all'interno del software SUMOPy è un algoritmo di tipo topologico-probabilistico, basato sulla tecnica della formulazione delle ipotesi multiple (con relativa attribuzione di un punteggio - *score* - a ciascuna di esse), sul mantenimento in memoria di un certo numero di possibili alternative e sulla progressiva eliminazione delle ipotesi a cui è attribuito il punteggio peggiore fino all'individuazione topologica dell'itinerario percorso sulla base del criterio del minimo costo. I costi attribuiti a ciascuna alternativa sono definiti sulla base del criterio della distanza geometrica euclidea del punto GPS dall'arco, delle caratteristiche di parallelismo dei percorsi e di accessibilità degli archi e di minor lunghezza del percorso seguito a partire dal nodo di partenza (*shortes path*).

Lo schema operativo dell'algoritmo è quello riportato di seguito e viene applicato a tutte le tracce GPS che vengono importate nel software. Considerando un generico viaggio:

- A partire dal primo punto GPS, la fase iniziale prevede la determinazione di tutti i possibili archi di partenza dell'itinerario che si vuole ricostruire: per ciascun arco della rete si definisce un buffer, di ampiezza impostabile dall'utente del software, e si vanno ad individuare tutti gli archi per cui il punto analizzato ricade all'interno del relativo buffer.
- Una volta determinati i potenziali archi iniziali dell'itinerario si procede considerando il punto GPS successivo e, per ognuno, se ne determina l'appartenenza o meno, mediante il criterio della proiezione ortogonale e sulla base dell'area del buffer. Si possono verificare più casi differenti:
  - Se il punto analizzato può essere attribuito all'arco considerato: si definisce un nuovo itinerario composto dall'arco iniziale stesso e se ne calcola il costo;
  - Se il punto GPS ricade al di fuori dell'arco iniziale: si procede prendendo in analisi tutti gli archi successivi e, per ognuno, si calcola il costo dei possibili itinerari di cui, insieme a quello iniziale, fanno parte.

Tale procedimento viene ripetuto per tutti i potenziali itinerari, ovvero: per tutti i possibili archi di partenza e per quelli che da essi si diramano (qualora il punto GPS ricada esternamente dall'arco iniziale) nel caso di passo iniziale e per tutti quelli via via consecutivi nel caso di passi seguenti, fino ad un numero massimo di itinerari tenuti in memoria, stabilito dall'utilizzatore del programma.

- Definiti i possibili *routes*, essi vengono ordinati sulla base del costo crescente. Il costo del generico itinerario viene calcolato come una combinazione di: errore associato all'itinerario, dovuto essenzialmente a difetti di tipo geometrico, e costo dello stesso, data dal prodotto fra la lunghezza dell'itinerario fino al punto considerato (lunghezza cumulata) e il peso ad essa associato.
- L'algoritmo prosegue l'analisi considerando tutti i punti GPS della traccia e, giunto al termine, scegliendo l'itinerario di minimo costo fra quelli seguiti.

In questo modo è possibile ricavare, in linea teorica e a meno di errori di modellazione della rete, il percorso più simile possibile a quello seguito realmente dall'utente durante il suo spostamento per cui sono stati registrati i dati GPS.

#### **2.3.4. Teoria dell'utilità casuale**

Siccome uno degli scopi della trattazione riguarda la calibrazione di una funzione di utilità e dei parametri che la caratterizzano, viene presentato un breve approfondimento riguardante la teoria dell'utilità casuale e le ipotesi su cui si basa.

Questa teoria rappresenta il paradigma teorico più utilizzato in assoluto per quanto riguarda la simulazione delle scelte relative al trasporto e, più in generale, delle scelte tra alternative discrete. Al suo interno è possibile specificare diversi modelli (Logit, Logit multinomiale, Nested-Logit, Probit,...), con varie forme funzionali, applicabili ad una vasta gamma di contesti. [26]

Si basa sull'ipotesi che ogni individuo sia un decisore razionale, cioè che compia la propria scelta massimizzando l'utilità associata alle alternative che ha a disposizione. In particolare, tale teoria è incentrata sulle seguenti assunzioni:

- Il generico decisore  $i$ , nel fare una scelta, considera  $m_i$  alternative mutuamente esclusive che compongono il suo insieme di scelta  $I^i$ , il quale può essere differente da individuo a individuo (per esempio: nel caso di scelta del mezzo di trasporto, l'insieme di scelta di un individuo senza patente di guida non prevederà al suo interno l'alternativa "auto da conducente");
- Il decisore  $i$  assegna ad ogni alternativa  $j$  del suo insieme di scelta una utilità percepita (o attrattività)  $U_j^i$  e seleziona l'alternativa che massimizza questo valore;
- L'utilità associata ad ogni alternativa di scelta dipende da una serie di attributi che caratterizzano l'alternativa stessa o il decisore:

$$U_j^i = U^i(X_j^i)$$

dove  $X_j^i$  è il vettore degli attributi relativi all'alternativa  $j$  e al decisore  $i$ ;

- L'utilità assegnata dal decisore ad ogni alternativa non è nota con certezza all'osservatore esterno a causa di una serie di fattori aleatori e quindi deve essere rappresentata come una variabile casuale.

Sulla base di queste assunzioni, solitamente non è possibile prevedere con certezza l'alternativa che sceglierà il generico individuo, ma è comunque possibile esprimere la probabilità di selezione di ciascuna di esse condizionata dall'insieme di scelta di cui fa parte. Essa è la probabilità che l'utilità percepita dall'utente per l'alternativa  $j$  risulti essere superiore a quella associata ad ogni altra alternativa appartenente all'insieme di cui essa stessa fa parte:

$$p^i[j/I^i] = \Pr [U_j^i > U_k^i \forall k \neq j, k \in I^i]$$

Interessante notare che l'utilità percepita  $U_j^i$  può essere espressa come somma di una componente sistematica  $V_j^i$ , che rappresenta il valore medio dell'utilità percepita qualora i decisori abbiano tutti lo stesso insieme di scelta e che a sua volta è data dalla

sommatoria dei prodotti tra gli attributi che caratterizzano ogni alternativa e i parametri moltiplicativi ad essi associati:

$$V_j^i[X_j^i] = \sum_k \beta_k X_{kj}^i$$

e di una componente casuale  $\varepsilon_j^i$ , la quale indica l'aleatorietà dell'utilità percepita da ogni individuo:

$$U_j^i = V_j^i + \varepsilon_j^i = \sum_k \beta_k X_{kj}^i + \varepsilon_j^i$$

Gli attributi che caratterizzano ogni alternativa, contenuti all'interno del vettore  $X_j^i$ , possono essere classificati in diverse categorie:

- Attributi di performance: sono quelli correlati al servizio offerto dal sistema di trasporto, come tempi, costi, comfort o frequenze di servizio;
- Attributi del sistema di attività: sono associati all'utilizzo del territorio situato all'interno dell'area di studio, per esempio il numero di scuole o negozi per ogni zona;
- Attributi socioeconomici: sono relativi al decisore e alla sua famiglia, come il reddito, il possesso della patente di guida o il numero di auto possedute.

La differenza tra utilità percepita e utilità sistematica, rappresentata dal cosiddetto residuo aleatorio  $\varepsilon_j^i$ , invece, può essere attribuita a numerosi fattori, legati sia al modello sia al decisore, per esempio:

- Errori di misura degli attributi di utilità sistematica (generalmente calcolati da modelli);
- Assenza di attributi che non sono direttamente osservabili o difficilmente valutabili (come il comfort di viaggio);
- Presenza di attributi strumentali che sostituiscono gli attributi influenzanti l'utilità percepita delle alternative (es. gli attributi di preferenza modale sostituiscono variabili di comfort e privacy di un certo modo di trasporto);
- Errori di valutazione degli attributi da parte del decisore (es. stima errata dei tempi di viaggio);
- Variabilità della percezione di utilità da parte di diversi decisori (es. un individuo giovane potrebbe percepire la strategia camminata in maniera diversa da un anziano).

Da prove sperimentali è emerso che tanto più è accurato il modello e quindi tanto maggiori sono gli attributi considerati per la stima dell'utilità sistematica, e tanto minore



sarà la variabilità della componente aleatoria, quindi più precisa sarà la ricostruzione delle scelte realmente eseguite dai decisori.

Pertanto, uno degli obiettivi del seguente studio, sarà quello di stimare il più accuratamente possibile l'utilità percepita associata ad ogni alternativa a disposizione del generico individuo della popolazione, in modo da riuscire a riprodurre la sua scelta. Per fare ciò non si avrà a disposizione un elevato set di attributi, che possono aiutare la ricostruzione realistica della scelta eseguita, in quanto richiederebbe un grande onere per la raccolta di dati sufficienti a tale scopo, ma si semplificherà il tutto riducendo tutti queste caratteristiche ad un'unica costante che li rappresenti in maniera aggregata, come verrà illustrato nel corso del capitolo 11.

### 2.3.5. Validazione dei modelli

Infine, si conclude il paragrafo con qualche concetto relativo ai metodi per la valutazione della correttezza degli studi eseguiti. Al termine della realizzazione di un modello statistico, quindi anche nel caso di modelli di traffico, è consuetudine procedere con un'opera di validazione del lavoro svolto. Questa operazione consiste nell'andare a determinare una serie di indicatori che consentano di verificare la bontà del lavoro eseguito e di quanto rappresenti correttamente la realtà.

Per quanto concerne i modelli di traffico, e di conseguenza le microsimulazioni, la validazione riguarda essenzialmente un confronto tra i flussi rilevati da una serie di dispositivi contatori, situati su un numero limitato di strade reali rispetto al totale e collocati in maniera tale da fornire dei risultati rappresentativi dell'intera rete, e i flussi registrati sugli archi virtuali ad esse corrispondenti al termine della simulazione. Ovviamente, quanto più i risultati sono simili tanto più è da ritenersi valido il modello realizzato.

Gli indicatori più significativi per tale scopo sono i seguenti: [27]

- MAE (Mean Absolute Error): si tratta del rapporto tra la somma degli scarti assoluti e il numero di archi su cui sono stati effettuati i conteggi di traffico ( $n$ ), espresso in veicoli/h:

$$MAE = \frac{\sum_i |f_i^* - f_i|}{n}$$

dove  $f_i$  rappresentano i flussi simulati e  $f_i^*$  quelli misurati.

- MSE (Mean Squared Error): cioè lo scarto quadratico medio, espresso in  $(\text{veic/h})^2$ :

$$MSE = \frac{\sum_i (f_i^* - f_i)^2}{n}$$

Esiste anche la sua variante in forma percentuale (il cui acronimo è MSEP), che prevede la divisione degli addendi della sommatoria per il quadrato dei flussi simulati, in modo da dare vita a un indicatore normalizzato in base ai flussi transitati sull'arco in esame:

$$MSEP = \frac{\sum_i \left( \frac{f_i^* - f_i}{f_i} \right)^2}{n}$$

- RMSE (Root Mean Squared Error): si tratta di un parametro adimensionale che si ricava calcolando la radice quadrata del precedente e dividendola per il flusso misurato medio.

$$RMSE = \frac{\sqrt{MSE}}{\sum_i \frac{f_i^*}{n}}$$

Anche per esso esiste la variante in forma percentuale (RMSEP), che però non prevede l'ulteriore divisione della radice quadrata.

Per tale indicatore sono stati osservati sperimentalmente dei valori soglia che dovrebbero essere rispettati per ritenere accettabile il modello realizzato, i quali, però, risultano molto stringenti e quindi raramente soddisfatti nei casi di reti reali:

- Reti extraurbane: RMSE < 10%;
- Reti urbane: RMSE < 15%.

Nel caso di reti urbane la tolleranza è maggiore per via della maggiore complessità dei modelli.

- Coefficiente di determinazione  $R^2$ : indica la proporzionalità tra variabilità dei dati e correttezza del modello utilizzato. Esso è sempre compreso all'interno dell'intervallo  $[0,1]$ , dove 0 è sinonimo di una condizione inaccettabile, mentre 1 rappresenta l'ottimo.

Per la sua individuazione sono state identificate diverse formulazioni; due, in particolare, sono state utilizzate per la presente trattazione.

La prima è strettamente legata alla regressione lineare che viene realizzata per interpolare i dati presenti all'interno di un piano cartesiano nel quale in ascissa sono riportati i flussi simulati e in ordinata quelli misurati:

$$R_{rlin}^2 = \frac{\sum_i (f_{rlin,i}^* - \bar{f}_{rlin}^*)^2}{\sum_i (f_i - \bar{f})^2}$$

dove:

- $f_{rlin,i}^*$ : flusso ricavabile dalla regressione lineare, come prodotto tra il flusso simulato e il coefficiente angolare  $m$  della retta di tendenza;
- $\bar{f}_{rlin}^*$ : valor medio delle grandezze precedenti;
- $f_i$ : flusso misurato (riportato sull'asse delle ordinate);
- $\bar{f}$ : valor medio dei flussi misurati.

Per essa sono stati individuati, per via sperimentale, dei limiti di accettabilità per una buona proporzionalità dei dati, fissati a:  $R_{rlin}^2 > 0.88$  e  $0.9 < m < 1.1$ .

La seconda formulazione, invece, tiene maggiormente in considerazione la corrispondenza tra i dati posizionati sui due assi coordinati e quindi rappresenta un confronto diretto tra flussi simulati e misurati (*Goodness of Fit*):

$$R_{GoF}^2 = \frac{(\sum_i (f_i - \bar{f}_i)(f_i^* - \bar{f}_i^*))^2}{\sum_i (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_i (f_i^* - \bar{f}_i^*)^2}$$

con i valori soprastegnati che indicano le medie delle rispettive grandezze.

Quest'ultima, diversamente dalla precedente, non prevede l'istituzione di valori minimi da dover rispettare, ma ben si presta all'interpretazione dei risultati ottenuti.

## 3. SOFTWARE E DATI

---

Il fine del presente capitolo è quello di eseguire una panoramica completa riguardante il software utilizzato nel corso della trattazione nonché i dati su cui si è fatto affidamento per il completamento dello studio.

### 3.1. Software utilizzato

Come accennato all'interno del paragrafo introduttivo, per lo svolgimento del presente elaborato si è deciso di utilizzare il software di simulazione SUMO (Simulation of Urban MObility), corredato dall'interfaccia grafica SUMOPy, sviluppata dal Prof. J. Schweizer.

SUMO è una suite di simulazione del traffico open source che consente di effettuare microsimulazioni multimodali, con la peculiarità di rappresentare con un elevato grado di dettaglio le interazioni tra gli utenti e tra questi e gli elementi costituenti la rete di trasporto. [18] Inoltre, il pacchetto software di cui fa parte comprende tutte le applicazioni necessarie per espletare le operazioni propedeutiche alla simulazione come:

- DUAROUTER e JTRROUTER: necessari per la ricerca del percorso;
- ACTIVITYGEN: utile per la generazione della domanda basata sulle attività;
- NETEDIT: per la modifica e la visualizzazione della rete;
- EMISSIONSMAP ed EMISSIONSDRIVINGCYCLE: per il calcolo delle emissioni.

Tali estensioni possono essere utilizzate tramite l'interfaccia grafica di SUMOPy, che è software-tool utile a facilitare l'uso del simulatore tramite la presenza di un ambiente scripting che consente l'import delle reti di trasporto, la creazione di scenari di studio, la generazione della domanda disaggregata (in base a diversi metodi adattabili alla tipologia di dati disponibili), le simulazioni di traffico, la visualizzazione ed analisi di dati.

Uno degli strumenti più utili del pacchetto è sicuramente quello denominato ACTIVITYGEN, che è in grado di creare piani di trasporto costituiti da un certo numero di stages nell'ambito della generazione della domanda basate sulle attività, in un formato compatibile con il microsimulatore di SUMO, a partire da un file di rete e uno di dati socioeconomici e demografici che descrivono l'area di studio considerata. Tuttavia, esso presenta alcuni inconvenienti come la rigida e limitata possibilità di

configurare la popolazione virtuale e la mancanza di opzioni per gestire i modelli di scelta di origine e destinazione. [12]

Per tale motivo, la generazione della domanda nella presente trattazione sarà affidata al modello di domanda presente all'interno di SUMOPy, che consente una creazione di piani di trasporto più flessibile e precisa, ma che comunque garantisce la sofisticatezza e dinamicità della simulazione su SUMO.

La caratteristica distintiva di tale modello, che ricalca da vicino la struttura di MATSim, è l'utilizzo delle *strategie di mobilità* al posto dei classici modi di trasporto, che possono essere descritte come metodi di muoversi all'interno dell'ambiente urbano, utilizzando differenti veicoli, servizi e comportamenti. Le strategie utilizzabili dal generico individuo sono determinate dalle sue caratteristiche socioeconomiche, dall'eventuale possesso di veicoli e dal posizionamento delle attività che essi devono svolgere e hanno lo scopo di riprodurre al meglio il suo pensiero.

Per esempio: la *strategia auto*, utilizzata dal generico utente, è caratterizzata da un percorso a piedi dall'edificio di origine fino al parcheggio della sua auto, un itinerario a bordo dell'auto fino al parcheggio più vicino all'edificio di destinazione e, infine, un nuovo spostamento a piedi tra parcheggio e tale edificio.

Il funzionamento del software per la creazione della domanda alla base del processo iterativo di simulazione (Fig. 3.1), può essere descritto sinteticamente come segue:

- Su uno scenario di partenza in cui è riportato il modello della rete da studiare, viene creata la popolazione virtuale grazie all'utilizzo combinato di due strumenti, denominati *Population Synthesizer* e *Activity Generator*. Ogni individuo sarà caratterizzato da una serie di attributi: edificio di residenza, edifici in cui svolge le sue attività, dati socioeconomici, disponibilità di veicoli, modo di trasporto preferito e schema delle attività; tutti dati ottenuti a partire dalla disaggregazione di informazioni statistiche cumulative.
- Assegnazione dei veicoli a seconda delle percentuali di possesso fornite in input al *Vehicle Provider*.
- Generazione dei piani di trasporto che possono essere utilizzati da ciascun utente per completare lo spostamento tra le due attività ad esso assegnate. Questo compito viene svolto dal *Plans Generator* che individua il percorso migliore da far seguire alla persona per ogni strategia di mobilità che essa potrà utilizzare.
- Selezione del piano ritenuto migliore, in base a differenti aspetti, tra quelli creati mediante il *Plan Selector*.

- Simulazione dello scenario tramite SUMO, al termine della quale verranno aggiornate le caratteristiche dei piani ed eventualmente modificate le scelte effettuate in precedenza per la successiva iterazione del procedimento.

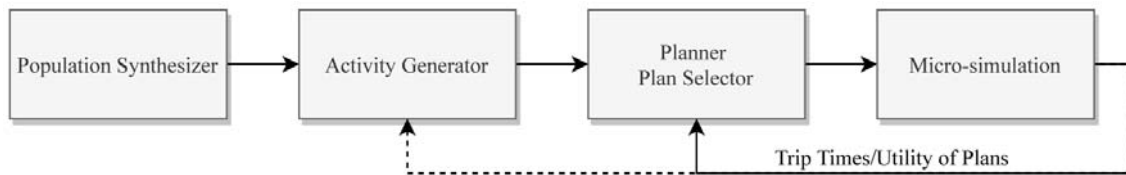


Figura 3.1 – Schema del funzionamento della generazione di domanda basata sulle attività

Sarà questo il procedimento utilizzato durante la presente trattazione per ottenere tutte le informazioni necessarie al termine della simulazione.

### 3.2. Dati impiegati

I dati a disposizione per lo sviluppo del lavoro oggetto della trattazione devono essere distinti in due macrocategorie: quelli associati al modello di offerta e quelli riguardanti il modello di domanda.

Per quanto concerne l’offerta, si è fatto uso di un modello virtuale della rete stradale del comune e di parte dell’area metropolitana della città di Bologna, su cui sono state eseguite numerose modifiche nel corso degli anni da parte di tirocinanti e tesisti. Per la descrizione dettagliata si rimanda al capitolo dedicato, denominato ‘*Modello di Offerta*’. Concentrando, ora, l’attenzione sui dati da cui sono state ricavate le informazioni necessarie per la generazione della domanda di trasporto, essi si possono suddividere in 3 tipologie:

- Matrici origine-destinazione;
- Tracce GPS;
- Dati GTFS.

I dati relativi alla prima categoria derivano dal 14° Censimento della Popolazione e delle Abitazioni eseguito dall’ISTAT nel corso dell’anno 2001, grazie al quale sono state ricostruite le matrici OD per i principali modi di trasporto (auto-conduttore, auto-passeggero, moto, autobus, treno e altro), riferite alla fascia oraria 7:00-8:00 e all’intera giornata (0:00-24:00), per un totale di 12 matrici.

Nel corso del presente studio verranno utilizzate unicamente quelle relative all’orario di punta del mattino, in cui la maggioranza degli spostamenti effettuati risultano essere di tipo sistematico, principalmente Casa-Scuola o Casa-Lavoro, preventivamente sottoposte ad un aggiornamento temporale all’anno 2018.

Queste matrici sono state elaborate nel corso di un precedente studio effettuato presso il gruppo di trasporti del dipartimento DICAM dell'Università di Bologna [15], in quanto inizialmente non vi era corrispondenza tra gli identificativi delle zone derivanti dai file della zonizzazione forniti dal comune e quelli riportati all'interno delle matrici. Per risolvere tale problematica è stata, in breve, ricostruita una nuova zonizzazione (proposta nella Fig. 3.2) che ricalcasse i dati statistici a disposizione, dando vita a un totale di 177 zone, di cui:

- 116 facenti parte del territorio comunale (dalla numero 14 alla 129);
- 61 rappresentanti le rimanenti aree dell'intera provincia (dalla 601 alla 661).

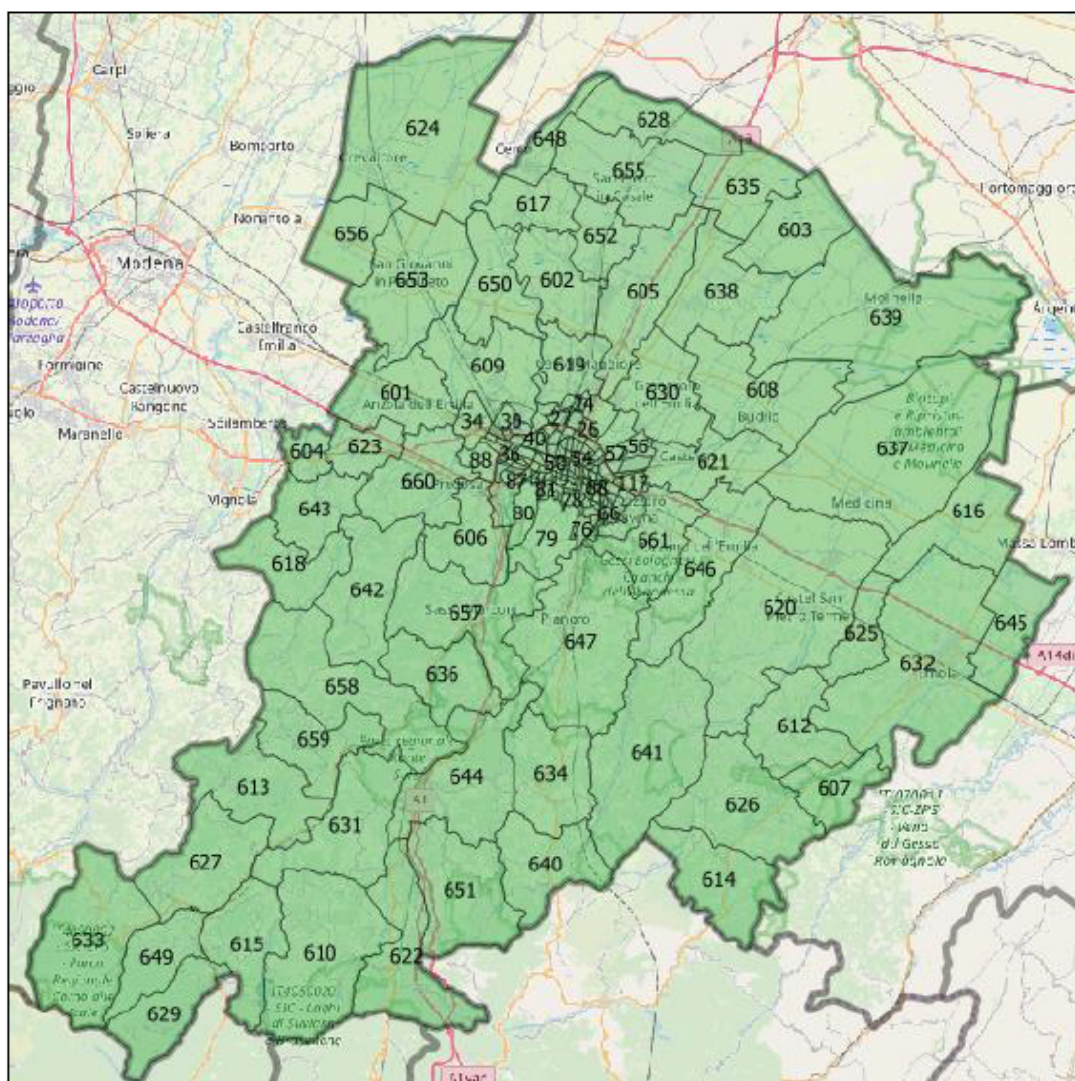


Figura 3.2 - Zonizzazione aggiornata della provincia di Bologna

Nella tabella seguente sono riportate alcune caratteristiche statistiche sintetiche che consentono di avere un quadro generale dei dati a disposizione, tra cui: numero complessivo di spostamenti, numero medio di spostamenti per zona e per coppia origine destinazione, distinti per tipologia di modo di trasporto e per territorio analizzato.

		<b>Territorio Provinciale</b>	<b>Territorio Comunale</b>	<b>Territorio Esterno</b>
	n° zone per area	177	126	61
<b>Auto</b>	Totali	83378	46623	36755
	Medi per zona	474	402	603
	Medi per coppia OD	5.61	5.49	5.78
<b>Autobus</b>	Totali	41835	20979	20856
	Medi per zona	238	181	342
	Medi per coppia OD	5.30	4.08	7.57
<b>Moto</b>	Totali	15038	8994	6044
	Medi per zona	86	78	99
	Medi per coppia OD	2.21	1.79	3.42
<b>Altro</b>	Totali	57482	27732	29750
	Medi per zona	327	239	488
	Medi per coppia OD	14.76	8.76	40.75

Tabella 3.1 - Descrizione statistica dei dati da matrice OD a disposizione

La seconda categoria di dati impiegati nel corso dello studio, è stata ottenuta nel corso del mese di maggio 2016 e durante l'intero anno 2017, nell'ambito di progetti promossi dal comune di Bologna per la sensibilizzazione della popolazione nei confronti del tema della mobilità sostenibile, rispettivamente denominati *European Cycling Challenge (ECC)* e *BellaMossa (BM)*.

Entrambe le iniziative si basano sulla raccolta, tramite l'utilizzo di applicazioni per smartphone - come *Endomondo*, *Naviki* o *Cycling365*, di dati GPS che descrivono gli spostamenti ciclabili (ma anche a bordo di autobus, treni, auto in car-sharing o car-pooling e a piedi nel caso di *BellaMossa*) effettuati dagli utenti partecipanti e che sono composti da successioni ordinate di punti con coordinate georeferenziate, i quali costituiscono le tracce degli spostamenti eseguiti, su cui verrà basata la ricostruzione della domanda.

Si fa presente che i dati relativi all'ECC 2016, nel corso della trattazione, saranno impiegati per la generazione della domanda ciclabile sia per la fase di editing della rete, sia per la creazione dello scenario definitivo, mentre i dati BM 2017, limitati al solo mese di maggio, verranno utilizzati unicamente per testare il modello di rete finale tramite la creazione di una popolazione virtuale di prova.



Una descrizione sintetica di questi dati può essere affidata ad alcuni aspetti statistici interessanti, come il numero di tracce a disposizione, la durata e la distanza media degli spostamenti registrati, nonché la distribuzione di frequenza della durata dei viaggi. Il tutto è stato riportato nelle tabelle e grafici seguenti.

	n° Tracce	Durata media [s]	Distanza media [m]
ECC - maggio 2016 (Bici)	7523	1755.12	4582.31
BM - maggio 2017 (Autobus)	5821	1086.71	3812.77

Tabella 3.2 - Descrizione statistica dei dati GPS a disposizione

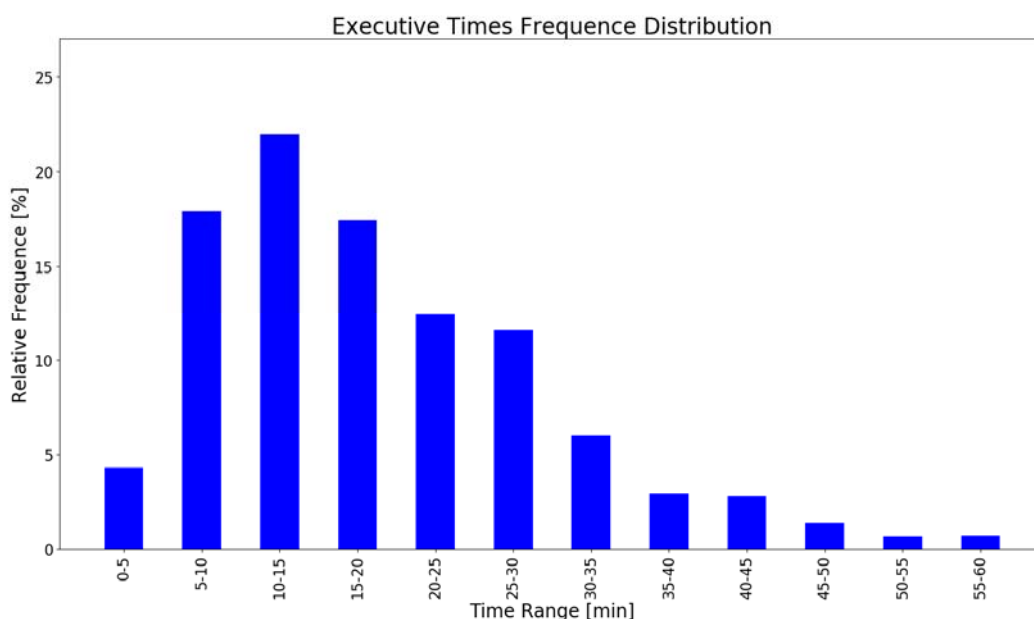


Figura 3.3 - Distribuzione di frequenza dei tempi di viaggio in bici, ricavata dai dati GPS

Infine, l'ultima tipologia di dati a disposizione, i file GTFS (*General Transit Feed Specification*), i quali definiscono un formato comune per gli orari dei trasporti pubblici e le relative informazioni geografiche, consente di riprodurre fedelmente, all'interno del *digital twin*, l'intero servizio di trasporto pubblico svolto dall'azienda locale, nel caso specifico TPer.

Questi file risultano essere costituiti da una serie di database, i cui più importanti sono quelli denominati *Shapes*, *Stops* e *Services*, contenenti, rispettivamente, informazioni dettagliate riguardanti il percorso seguito da ciascuna linea, le coordinate georeferenziate di ogni fermata dislocata sulla rete e le tabelle orarie dell'intero servizio, giorno per giorno.

Questi file racchiudono al loro interno 1771 tracce GPS, da sfruttare per la ricostruzione degli itinerari seguiti dai vari autobus, i dati di oltre 2000 fermate (coordinate, nomi, linee che vi fanno sosta) e le tabelle orarie per tutto l'anno, studiate da Tper.

Per un'accurata descrizione delle operazioni eseguite per il caricamento del servizio di trasporto pubblico locale nel modello si rimanda ai paragrafi 6.3 e 9.2.

Ai dati relativi alla domanda, si vanno ad aggiungere quelli riguardanti i conteggi di traffico eseguiti da dispositivi contatori sparsi per il comune di Bologna, utilizzati per la validazione del modello.

Essi sono costituiti da delle coppie di file *Shapes* e *Data*, contenenti informazioni sul posizionamento delle spire in modo da poterli posizionare correttamente all'interno del modello, sugli archi virtuali corrispondenti alle strade reali, e sui flussi di traffico conteggiati da ciascun dispositivo. Sono disponibili sia i dati riguardanti alcuni giorni feriali dei mesi di Febbraio e Settembre 2014, sia quelli riguardanti i flussi medi registrati nel corso di tali mensilità.

Per la validazione del modello oggetto della trattazione verranno utilizzati unicamente i dati relativi ai flussi medi di Febbraio 2014 che saranno confrontati con i flussi derivanti dalla microsimulazione finale.

## 4. METODOLOGIA

---

In questo capitolo verrà brevemente e schematicamente illustrata, grazie anche all'ausilio di un diagramma di flusso esplicativo (Fig. 4.1), la sequenza delle operazioni svolte nel corso della trattazione.

La prima fase dello studio è stata ampiamente dedicata alla realizzazione di script in linguaggio Python che fossero in grado di eseguire le operazioni necessarie per il raggiungimento dello scopo prefissato.

In particolare, è stato modificato un codice già esistente all'interno del software SUMOPy, denominato *VpCreator*, in modo che fosse in grado di generare in maniera ottimale una popolazione virtuale a partire dalle tracce GPS descritte in precedenza; successivamente, è stato creato un nuovo algoritmo che consentisse all'intera popolazione virtuale di provare tutti i modi di trasporto alternativi a disposizione per completare i propri spostamenti, nelle medesime condizioni di ripartizione modale. Questi algoritmi sono descritti nel dettaglio, rispettivamente, nei capitoli 7 e 10.

La seconda fase è stata dedicata ad un processo ripetitivo di test (tramite micro-simulazioni monomodali) ed editing del modello di rete a disposizione, sul quale è stata caricata, volta per volta, una differente domanda di prova generica, in parte ricavata dai dati a disposizione e descritti nel capitolo 3.

Questa procedura iterativa si è conclusa una volta osservato che la domanda importata non generava più alcun tipo di congestione all'interno della rete, consentendo di ricavare il modello di offerta definitivo da utilizzare per la parte centrale dello studio.

Infine, si è concentrata l'attenzione sulla generazione dello scenario, fase durante la quale sono stati effettuati i seguenti passi:

- Import dell'intera domanda di trasporto sulla rete precedentemente modificata e creazione della popolazione virtuale finale oggetto delle successive analisi;
- Generazione delle strategie di trasporto alternative per ciascuna persona virtuale;
- Avvio del processo iterativo di simulazione con scambio di piani, reso possibile dall'algoritmo creato inizialmente, denominato *Exchange-Plans*.

I risultati ottenuti sono stati introdotti all'interno di una funzione di utilità, definita da una serie di parametri, inizialmente incogniti, rappresentanti il costo monetario di ciascun viaggio e il valore monetario del tempo, i quali sono stati calibrati tramite un algoritmo iterativo di ottimizzazione stocastica per fare in modo che fossero in grado di riprodurre nella maniera più fedele possibile le reali condizioni di traffico. Esso estrae

casualmente un set di parametri da un intervallo prefissato e calcola il valore della funzione obiettivo ripetutamente, finché non sono soddisfatte le condizioni d'arresto. Al termine di tale procedimento è stato possibile avviare tutte le analisi del caso, riguardanti la composizione della popolazione virtuale e le scelte da essa effettuate ma anche la distribuzione di flussi ed emissioni all'interno della rete schematizzata, per poi completare lo studio mediante un'operazione di validazione del modello.

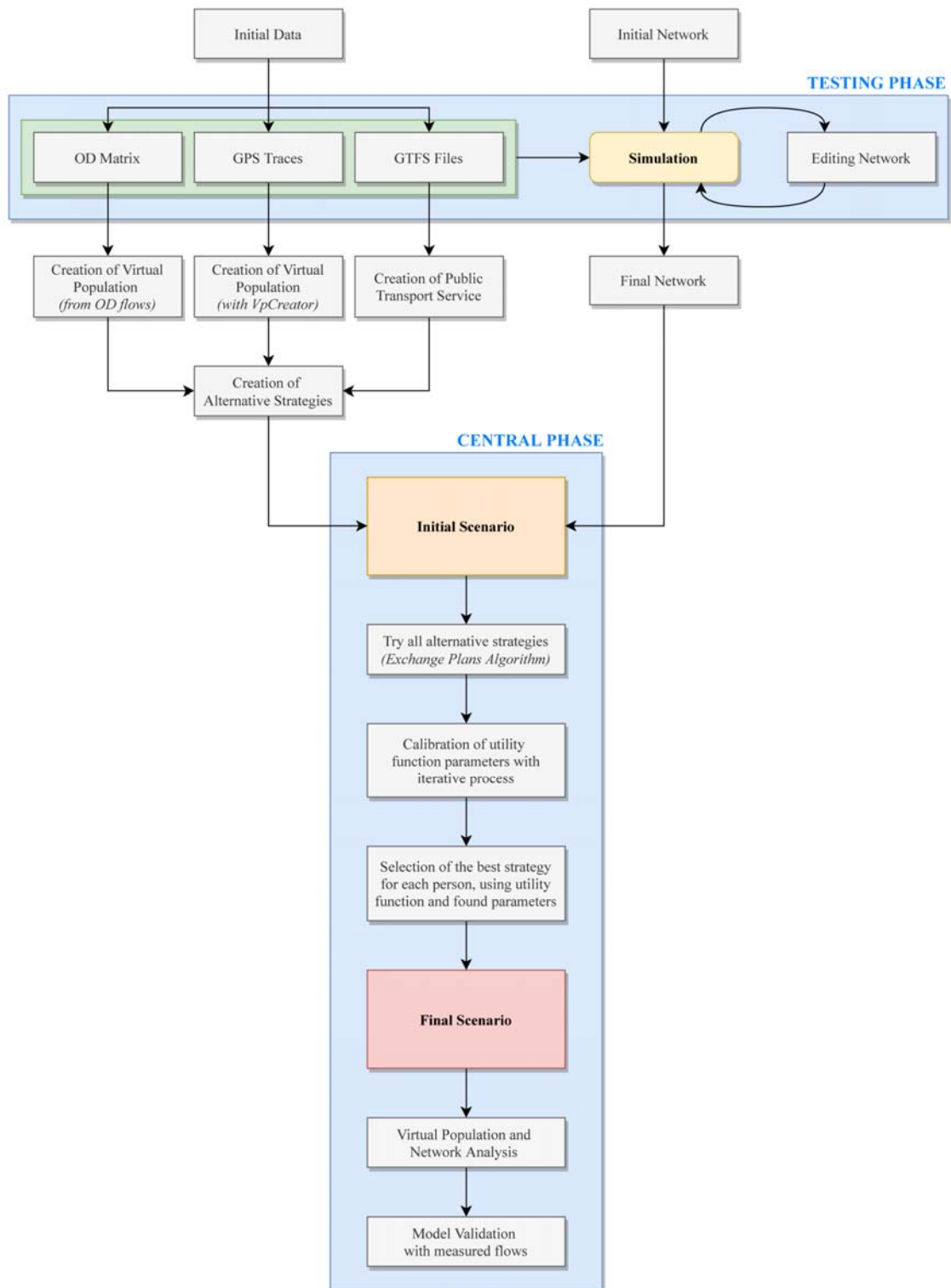


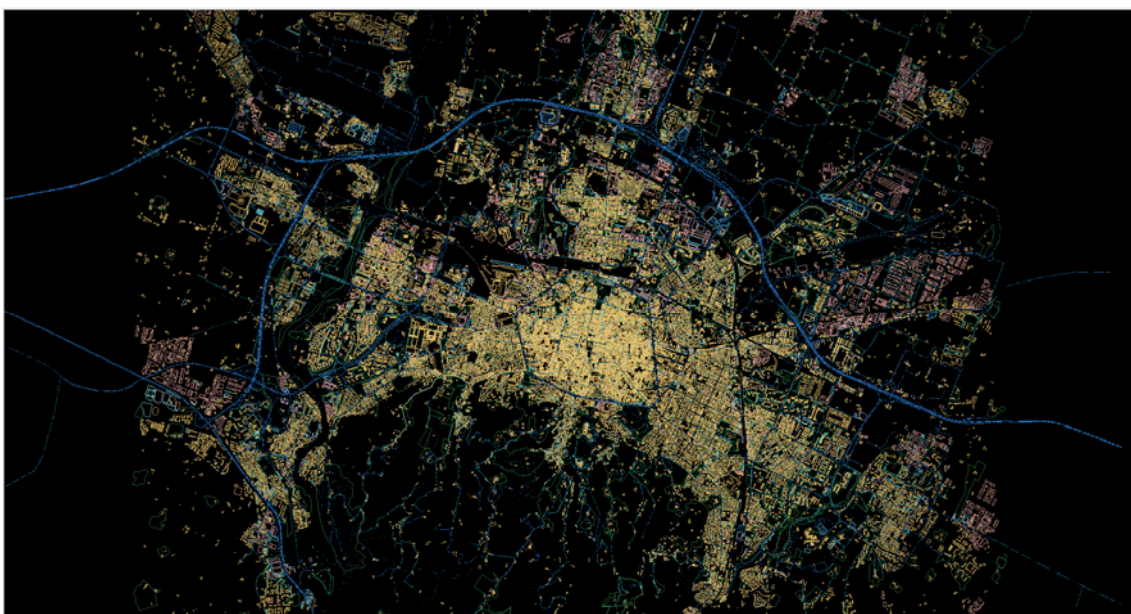
Figura 4.1 - Diagramma di flusso delle operazioni svolte

## 5. MODELLO DI OFFERTA

---

Il primo elemento che deve essere preso in considerazione quando si svolgono delle microsimulazioni di traffico è rappresentato dal modello di offerta di trasporto.

Per il presente elaborato, tale modello è rappresentato dall'intera rete stradale della città di Bologna, inizialmente ricavata dal sito web *Open Street Map (OSM)* dal Prof. Joerg Schweizer durante la fase di prima creazione dello scenario e successivamente oggetto di ripetute modifiche e miglioramenti da parte di collaboratori, tirocinanti e tesisti, volte a renderla il più realistica possibile.



*Figura 5.1 – Digital twin della rete di Bologna*

Ad oggi, la rete risulta essere costituita da oltre 32400 archi e più di 14700 nodi, anche grazie all'introduzione delle principali arterie che collegano il comune bolognese con le aree situate nella provincia, effettuata nel corso di uno dei progetti di tesi più recenti. [15]

Il modello di offerta, tuttavia, risulta essere costituito da numerosi altri elementi di contorno che consentono di riprodurre fedelmente la rete reale, in maniera estremamente dettagliata: corsie che suddividono i vari archi (possono essere marciapiedi, piste ciclabili, preferenziali o semplicemente corsie per la generica circolazione), connettori che collegano le corsie e indicano quali sono le manovre consentite all'interno dei nodi, attraversamenti pedonali e impianti semaforici.

Ciascuna di queste componenti della rete è descritta da un elevato numero di caratteristiche, oltre all'identificativo, le cui principali risultano essere le seguenti:

- Archi: nodo origine e destinazione, lunghezza, priorità (essa varia da 1 a 12 e indica l'importanza della strada: 1 = sentiero pedonale, 12 = autostrada). Essi

contengono una o più corsie e quindi le sue caratteristiche sono essenzialmente legate a quelle di quest'ultime.

- Nodi: coordinate (x,y) del centro e tipo di nodo (i più diffusi sono *priority* – cioè incrocio con diritto di precedenza, *traffic light* – intersezioni semaforizzate, *zipper* – nodi di immissione).
- Corsie: larghezza, velocità massima consentita, limitazione all'accesso (in una corsia che funge da marciapiede, l'unica categoria per cui è consentita la circolazione risultano essere i pedoni). A seconda delle combinazioni di queste 3 caratteristiche, è possibile dare vita ad autostrade, strade urbane, percorsi ciclopedonali, corsie preferenziali, eccetera.
- Connettori: la principale caratteristica è rappresentata dagli identificativi delle corsie che congiunge. Ovviamente ognuno di essi è orientato e indica quali sono le manovre che possono essere eseguite in corrispondenza della generica intersezione, grazie alla rappresentazione esplosa del nodo. Nel presente scenario ce ne sono quasi 60000.
- Attraversamenti pedonali: diversamente dai connettori, essi congiungono gli archi e permettono ai pedoni di passare da un arco a quello diretto nel verso opposto.
- Impianti semaforici: connettori che ne fanno parte, tipologia (statici o attuati), programma semaforico (durata del ciclo, sequenza e durata delle singole fasi). Il programma viene realizzato assegnando ad ogni connettore che costituisce l'impianto, per ogni fase semaforica, un certo colore avente un preciso significato. Ai classici colori rosso, giallo e verde, si aggiungono il verde e giallo scuro, che hanno lo stesso significato dei colori chiari, semplicemente senza avere la precedenza sulle correnti di traffico contrapposte aventi la lanterna disposta sulle colorazioni chiare, e il ciano e il marrone, rispettivamente corrispondenti all'assenza di lanterna su quel connettore e al giallo lampeggiante.

Alla mera infrastruttura devono poi essere aggiunti due elementi che consentono di completare l'offerta di trasporto: i parcheggi e il servizio di trasporto pubblico locale, comprendente tabelle orarie, itinerari seguiti e fermate dei bus.

Queste componenti non fanno parte del modello di partenza, ma la loro introduzione è stata effettuata solo successivamente, secondo le modalità ampiamente descritte nel proseguo della trattazione (paragrafo 9.2).

Nodo 36: Intersezione via Arno - via Due Madonne - via Emilia Levante (Ciclo: 120 s)

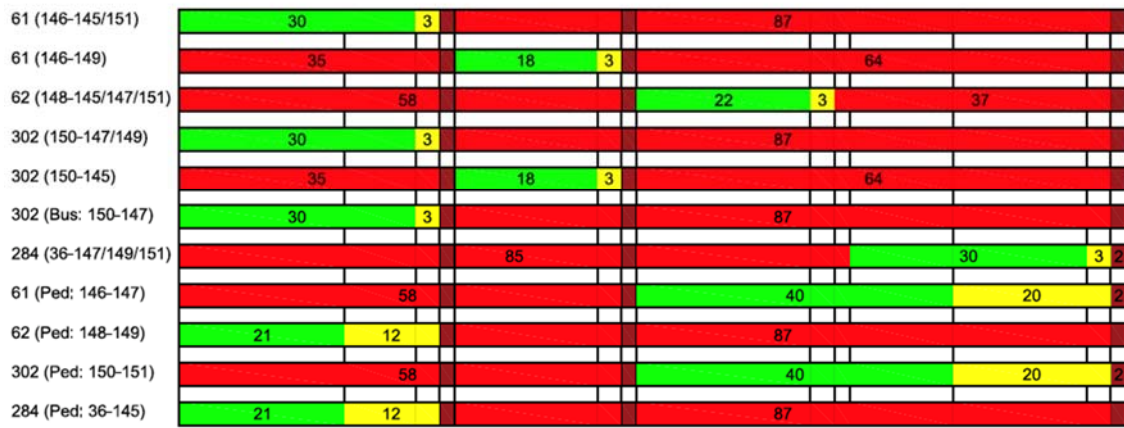


Figura 5.2 - Esempio di fasatura semaforica

## 6. MODELLO DI DOMANDA

---

Per poter avviare le simulazioni necessarie per il miglioramento della rete stradale di Bologna, degli algoritmi di creazione degli itinerari e per l'esecuzione delle analisi su cui si incentra la presente trattazione, risulta di fondamentale importanza procedere con l'import, all'interno dello scenario, della domanda di trasporto.

Nel corso di questo capitolo verranno illustrate le varie tecniche utilizzate per la generazione della domanda a seconda del modo di trasporto considerato.

### 6.1. Generazione della domanda di trasporto privato

Per quanto riguarda la definizione della domanda di trasporto privato tramite autoveicoli è stato possibile fare affidamento su una matrice origine-destinazione, derivante dal 14° Censimento della Popolazione e delle Abitazioni svolto dall'Istat nel corso del 2001. Essa è basata su una zonizzazione del tutto assimilabile ai quartieri del territorio comunale bolognese, contornata da una serie di aree di maggiori dimensioni che coincidono con i restanti comuni della provincia, ed è riferita all'orario di punta del mattino 7:00-8:00 e al modo di trasporto auto (come conducente).

Su questa matrice è stato eseguito un aggiornamento all'anno 2018, sfruttando le percentuali di incremento della popolazione nel corso dei 17 anni intercorsi tra i due considerati, sia a livello comunale sia provinciale, pari, rispettivamente, a 5.5% e 10.9%. Con essi si sono moltiplicati, tramite il parametro *scale* presente all'interno del comando di import dei flussi da matrice OD, il numero degli spostamenti interni ed esterni, passando da un totale di 83378 viaggi a uno di 89017.

Una volta caricata la matrice OD sullo scenario è necessario procedere con la disaggregazione della domanda, allo scopo di ricavare le giuste grandezze da fornire in input al simulatore. Questa operazione viene svolta sfruttando un apposito comando del software SUMOPy denominato *OD Trips Generator*, il cui funzionamento è già stato descritto nel paragrafo 2.3.1.

Particolare attenzione è stata rivolta alla creazione dei viaggi aventi origine o destinazione in corrispondenza di un arco appartenente alla ZTL del centro città. Siccome lungo questi archi, dalle ore 7:00 alle ore 20:00 di tutti i giorni della settimana, possono circolare unicamente mezzi autorizzati (bus, taxi, motocicli, velocipedi, auto dei residenti, veicoli per le consegne,...) e siccome nel modello di rete per evitare che tutti i veicoli privati transitino per il centro cittadino è stato imposto il divieto di accesso



alle generiche autovetture, per poter simulare anche questa tipologia di spostamenti è stata sfruttata una funzione, denominata *Fallback Mode*, che porta alla generazione di un viaggio mediante la modalità *Taxi*, invece che *Passenger*, in modo tale che la persona che lo effettua sia in grado di accedere al centro storico con il proprio mezzo.

Terminata la fase di disaggregazione, come ultimo step, è necessario applicare un modello di assegnazione del percorso, in modo da individuare l'itinerario, da fornire in input al simulatore, inizialmente scelto da ogni veicolo per portare a compimento lo spostamento associato, secondo la tecnica del pre-routing.

Tale approccio prevede che il percorso venga individuato basandosi su valori di costo degli archi proporzionali a un tempo di percorrenza stimato prima di effettuare la simulazione, facendo l'ipotesi di rete non congestionata, e dunque pari al rapporto tra la lunghezza dell'arco e la velocità massima consentita sullo stesso.

Determinati tutti i costi degli archi è possibile ricostruire l'itinerario scelto come la sequenza di archi la cui somma dei costi da luogo al percorso di costo minore. Chiaramente, l'ipotesi di rete non congestionata è molto forte e valida unicamente per bassi livelli di flusso veicolare e quindi non propriamente corretta per il caso in esame, come verrà ampiamente illustrato nel seguito della trattazione, ma come base di partenza può essere ritenuto un metodo semplice, efficace e veloce per stabilire un primo itinerario di partenza. Per una descrizione dettagliata della procedura utilizzata per la generazione di questa componente di domanda, si veda l'appendice A.1.

Sfruttando questo procedimento è stato possibile avviare le prime simulazioni di test della rete, fornendo in input al simulatore una serie di dati da utilizzare per completare il procedimento. Essi riguardano i *Trips & Routes* generati tramite la disaggregazione della matrice OD, l'istante di inizio e fine della simulazione (rispettivamente imposti pari a 0 e 4500 s, in modo tale da consentire il completamento anche degli spostamenti iniziati negli ultimi minuti dell'ora di riferimento) e lo step di calcolo (pari a 0.5 s).

Diversamente da quanto effettuato per il trasporto privato, per importare la domanda ciclabile e generare l'intero servizio di trasporto pubblico locale è stata utilizzata la tecnica del map matching.

## **6.2. Generazione domanda ciclabile**

Per la generazione dei viaggi eseguiti in bicicletta si è fatto uso delle tracce GPS registrate nell'ambito del progetto European Cycling Challenge, promosso dal Comune

di Bologna e tenutosi durante il mese di maggio 2016, nella fascia oraria compresa tra le ore 7:00 e le ore 8:00.

Come già visto in precedenza, la tecnica del map matching consiste, in poche parole, nell'andare a ricostruire un percorso sul *digital twin* della città di Bologna che ricalchi il più fedelmente possibile quello seguito dall'utente, basandosi su una traccia di punti GPS fatte registrare nel database dal dispositivo mobile utilizzato dal soggetto in esame. Come primo passo è necessario andare ad importare, sullo scenario utilizzato, le tracce GPS relative all'intervallo orario scelto, ottenendo tutti i dati che descrivono i viaggi effettuati dagli utenti, raccolti nei database *Trips*, *Persons* e *Points*, contenenti, rispettivamente, informazioni sugli spostamenti, sulle persone reali che li hanno effettuati e sui punti che costituiscono le tracce GPS ad essi correlate.

Dopodichè, sarà possibile eseguire alcune operazioni propedeutiche alla generazione della domanda. Si procederà con l'imposizione di un filtro geometrico, avente lo scopo di ridurre l'elevatissima mole di punti GPS, costituito da due parti: la prima consente di andare a rimuovere tutte quelle tracce ove risultano presenti punti con distanza spaziale dai precedenti o successivi superiore al kilometro, con distanza temporale superiore ai 5 minuti o con distanza percorsa nel senso contrario rispetto alla destinazione maggiore del 30% della lunghezza complessiva del percorso. Questa fase consente di evitare che il software tenga in considerazione tracce GPS per cui la ricostruzione del percorso potrebbe risultare poco attendibile. La seconda parte di scrematura, applicata unicamente alle tracce che hanno superato il primo filtro, consiste nell'andare ad eliminare tutti quei punti che risultano essere troppo vicini ai precedenti o successivi (distanza inferiore ai 2 metri), per evitare che si vengano a creare delle nuvole di punti che possono mandare in confusione l'algoritmo di matching, e nell'eliminazione di tutte le tracce la cui velocità tra due punti successivi risulta essere superiore a quella prestabilita per almeno 3 volte (fissata, ragionevolmente, a 30 km/h).

A seguito della doppia applicazione di questo filtro, doppia perché sulle tracce mantenute dopo il primo tentativo, da cui sono stati rimossi dei punti, potrebbe essere necessario eseguire un nuovo controllo del rispetto delle impostazioni inserite, il numero di tracce GPS relative alle biciclette subisce, in genere, una riduzione circa del 15%.

Definite le grandezze da fornire in input, è dunque possibile avviare il procedimento di ricostruzione degli itinerari seguiti dagli utenti della rete ciclabile imponendo una serie di parametri che governano il funzionamento dell'algoritmo, ottenuti in seguito al

lavoro di altri colleghi che si sono concentrati proprio sulla calibrazione di tali valori e impostati come indici di default per l'operazione all'interno del software (l'unica accortezza riguarda la rimozione della spunta dalla casella *Ignore Connections*).

Al termine del procedimento di matching, si ottengono, dunque, tutte le ricostruzioni degli itinerari (*Routes*) seguiti dagli utenti per effettuare i propri spostamenti, ricavati a partire dalle tracce GPS rilevate dai dispositivi mobili da essi utilizzati.

Viene poi applicato un *Post-match filter* con il quale è possibile isolare unicamente i percorsi con le caratteristiche migliori (in particolare quelle con *length index* compreso tra 80% e 120% e *distance error* inferiore a 15 m).

Tali *Routes* rappresentano la base di partenza per la creazione della popolazione virtuale tramite l'algoritmo *VpCreator*, che sarà utilizzata sia per lo svolgimento delle microsimulazioni di test della rete, sia per la creazione dello scenario che verrà analizzato nel presente elaborato.

### **6.3. Generazione domanda trasporto pubblico**

Per quanto riguarda, invece, la definizione della domanda di trasporto collettivo, è possibile eseguire la generazione dei viaggi tramite due metodologie distinte: partendo dalla matrice OD oppure basandosi sulle tracce GPS matchate. Tuttavia, prima di avviare una di queste procedure, risulta di fondamentale importanza procedere con l'import dell'intero servizio svolto dall'azienda di trasporto pubblico locale, comprendente il corretto posizionamento delle fermate, il percorso seguito e la tabella oraria delle varie linee circolanti sulla rete, urbana ed extraurbana.

Per fare ciò, si è fatto uso di file GTFS (General Transit Feed Specification), i quali definiscono un formato comune per gli orari dei trasporti pubblici e le relative informazioni geografiche. Il primo passo consiste nel caricamento, sulla rete, del file *Shapes*, contenente un elevatissimo numero di punti GPS, rigorosamente numerati in ordine crescente in base alla traccia di appartenenza, che indicano in maniera piuttosto grossolana il percorso seguito da ogni singola linea di autobus, dai quali sono stati rimossi tutti i punti posizionati in zone molto distanti dagli archi costituenti la rete studiata (generalmente appartenenti a linee extraurbane).

Basandosi sui punti rimanenti è poi stata eseguita l'operazione di map matching, in modo da ricostruire il percorso seguito dalle singole linee di trasporto pubblico. Conclusa questa operazione, si è proceduto all'import del file *Stops*, contenente le coordinate georeferenziate delle varie fermate dislocate sul territorio, le quali sono state

collocate negli archi più vicini a tali punti rispettanti una serie di caratteristiche predefinite, come la presenza di una corsia in cui è consentito il transito dei bus affiancata da un marciapiede e la lunghezza minima. La presenza delle fermate è fondamentale per consentire la generazione del servizio, che altrimenti sarebbe impossibile e che rappresenta l'ultimo passaggio di questa procedura. È poi previsto l'import del file *Services*, contenente la tabella oraria dei vari mezzi nel corso di tutti i giorni dell'anno, fissando una data ed un orario da riportare all'interno dello scenario. Nel caso in esame sarà un generico giorno feriale del mese di maggio, nella fascia oraria compresa tra le 5 e le 10, in modo tale da consentire all'intero servizio di raggiungere il funzionamento a regime durante la fascia oraria presa in esame e di permettere agli utenti che utilizzeranno tale mezzo di trasporto di poter completare il proprio viaggio anche al di fuori di esso.

Terminata questa procedura sequenziale e completato l'algoritmo di calcolo, all'interno della schermata relativa al servizio di trasporto pubblico del software SUMOPy vengono riportate tutte le sequenze di archi e nodi percorse dalle varie linee di autobus importate. Su di esse si baserà poi la generazione della domanda vera e propria. Una descrizione completa di questa operazione è proposta nel paragrafo A.2.

Prima di poter procedere con tale operazione, tuttavia, è necessario avviare la costruzione dei *PT Links*, che non sono altro che archi che vanno a costituire una sottorete su cui si muovono gli autobus e le persone che fanno uso del servizio di trasporto pubblico locale; in questo caso, sarà su di essa che verrà effettuata la ricostruzione degli spostamenti effettuati dagli utenti, tramite apposito comando.

Per comprendere meglio la conformazione di questa particolare rete, si rimanda all'appendice A.3, in cui è riportata una descrizione dettagliata.

Terminate le operazioni preliminari, è finalmente possibile avviare la procedura di generazione della domanda di trasporto pubblico, che nella presente trattazione è stata eseguita sfruttando due metodologie differenti:

- La generazione da matrice origine-destinazione: utilizzata per la creazione dello scenario definitivo su cui sono state eseguite le analisi centrali dell'elaborato;
- La generazione a partire dagli itinerari ottenuti a seguito della procedura di map matching delle GPS registrate sul database di BellaMossa per il mese di maggio 2017: impiegata per la costruzione di una popolazione virtuale di prova, necessaria per testare, e successivamente aggiornare, il modello di rete di partenza.

Per quanto riguarda il primo metodo, si rimanda l'intera spiegazione al paragrafo 9.4 dedicato alla creazione dello scenario; mentre di seguito vengono rapidamente illustrate le caratteristiche di funzionamento dell'algoritmo di map matching delle tracce GPS relative al trasporto collettivo.

Si fa presente che dopo aver importato il file di punti, prima di avviare tale procedura, anche in questo caso devono essere eseguite una serie di operazioni propedeutiche alla ricostruzione degli itinerari che ricalcano in tutto e per tutto quelle già descritte nel paragrafo 6.2, dedicato al trasporto ciclabile. Le uniche differenze riguardano alcuni parametri che governano il filtro geometrico, ma il procedimento seguito è esattamente il medesimo e porta, in entrambi i casi, all'avvio dell'algoritmo di map matching.

Durante l'elaborazione dei dati, innanzitutto, esso cerca di individuare le fermate di origine e destinazione dello spostamento a bordo dell'autobus situate nelle vicinanze del punto di partenza e di arrivo della traccia GPS, dopodichè esegue un routing intermodale fra tutte le possibili coppie di fermate partenza/arrivo trovate, cercando di connettere i due estremi utilizzando unicamente la *PT Network* e ammettendo spostamenti in autobus, alternati a tratti percorsi a piedi qualora necessari. Tra il ventaglio di possibili itinerari creati, viene scelto quello con il costo minore. A questo punto l'algoritmo individua la linea utilizzata per il completamento dello spostamento e qualora ce ne fosse più di una in grado di soddisfare la richiesta, effettua una assegnazione probabilistica per cui la linea con maggiore frequenza ha più possibilità di essere scelta.

Nel caso venga eseguito un trasbordo, il procedimento è leggermente diverso. In tal caso, infatti, verranno impiegate più linee e l'algoritmo dovrà eseguire una ricerca mirata delle linee che possono essere utilizzate, aventi, come condizione imprescindibile, la fermata (o fermate, nel caso in cui l'utente si sposti da una fermata all'altra a piedi) in cui avviene il cambio tra quelle appartenenti alla linea. Anche in questa circostanza, se venissero individuate più alternative, l'algoritmo prevederebbe l'utilizzo della assegnazione probabilistica.

Al termine del procedimento, ottenute tutte le ricostruzioni degli itinerari seguiti dagli utenti per effettuare i propri spostamenti e filtrati i risultati mediante *Post-match filter*, mantenendo unicamente quelli aventi le caratteristiche migliori, è possibile avviare la creazione della popolazione virtuale necessaria per lo svolgimento delle microsimulazioni di test del modello di rete tramite l'algoritmo *VpCreator*, il cui funzionamento sarà illustrato in maniera dettagliata nel corso del prossimo capitolo.

## 7. ALGORITMO VP-CREATOR

---

Allo scopo di riprodurre in maniera realistica la domanda, basata sulle attività, che riguarda pedoni e persone che si spostano utilizzando biciclette o mezzi pubblici, è stato realizzato un algoritmo capace di creare una popolazione virtuale a partire dai dati GPS registrati in diversi database dai vari utenti reali, tramite applicazioni per dispositivi mobili in grado di tracciare con precisione gli spostamenti da essi effettuati; nel caso di studio specifico relativi alle iniziative European Cycling Challenge e BellaMossa.

Tale metodo di creazione della popolazione virtuale si va a contrapporre alla classica stima della domanda tramite matrici origine-destinazione, il cui principale problema rimane la difficoltà di aggiornamento, tanto che le più recenti pubblicate dal comune di Bologna risalgono all'anno 2001. Per questo motivo si è deciso di procedere alla creazione della popolazione avente come modo di trasporto preferito uno dei tre sopracitati tramite il metodo alternativo appena descritto, che consente di fare riferimento a dati più recenti (rilevati tra il 2015 e il 2017) e quindi più realistici per quanto riguarda le categorie di mezzi di trasporto considerate.

In pratica, lo scopo è quello di ricostruire la matrice OD partendo dalle tracce GPS fatte registrare da un campione limitato di utenti ed estenderle all'intera popolazione della città di Bologna confrontando questi dati con quelli rilevati nel corso di diverse campagne di monitoraggio manuale dei flussi, sia di ciclisti sia di utilizzatori di mezzi pubblici, svolte dal gruppo di trasporti del dipartimento DICAM dell'università di Bologna.

L'algoritmo *VpCreator*, con cui è stato possibile eseguire questa operazione, era originariamente diviso in due parti. La prima generava una persona virtuale per ogni viaggio presente all'interno del database delle tracce GPS registrate (quindi, per esempio, se la stessa persona avesse fatto registrare più spostamenti nell'arco di una stessa giornata, per ipotesi 3, l'algoritmo avrebbe creato 3 diverse persone virtuali, ciascuna associata a un solo viaggio); la seconda parte invece creava una sola persona virtuale per ogni persona reale che registrava uno o più viaggi nel database (nell'esempio precedente, dunque, sarebbe stata creata una sola persona virtuale associata a 3 diversi viaggi).

Queste due parti sono state unite, in modo da ottenere un algoritmo più compatto ed editabile con maggiore rapidità, in quanto molte delle operazioni da esso eseguite erano comuni a entrambe le porzioni di codice, e leggermente modificate in modo tale che, tramite un comando in input, potesse essere scelto dall'utente del software quale dei due

metodi utilizzare per le analisi e quale strategia di trasporto studiare (*bike, transit, pedestrian, all*; quest'ultima indica la possibilità di creare una popolazione virtuale associata a viaggi effettuati con tutte le precedenti strategie di trasporto).

Infine, è stato implementato il comando *scale*, di fondamentale importanza per andare ad estendere i risultati ottenuti dalle sole tracce GPS a tutta la popolazione. L'idea è quella di stimare un parametro moltiplicativo confrontando i dati rilevati tramite tracce GPS e quelli ottenuti mediante i monitoraggi manuali, in modo da creare una popolazione virtuale che rappresenti una stima piuttosto accurata di tutti gli utenti di un determinato mezzo di trasporto.

All'atto pratico, l'intero algoritmo è stato inserito all'interno di un ciclo *for* che ripete la procedura tante volte quanto è grande il parametro *scale* inserito, creando dei duplicati delle persone virtuali già generate durante le iterazioni precedenti, quindi aventi stesso punto di origine e di destinazione, percorso intermedio e durata dello spostamento, ma caratterizzati da un diverso istante di inizio del trasferimento e quindi dispersi all'interno della scala temporale, tanto da non sembrare neanche più la stessa persona.

Una particolarità di questo comando è la possibilità di utilizzare, nell'algoritmo, come parametro scala un numero non necessariamente intero. Ciò significa che, qualora il numero  $n$  inserito fosse intero, semplicemente il procedimento verrebbe ripetuto completamente  $n$  volte, mentre nel caso in cui il numero  $n$  avesse anche una parte decimale, dopo  $n$  iterazioni complete seguirebbe un'ultima iterazione (la  $n+1$ esima) parziale durante la quale, dal vettore di tutte le persone considerate in un generico passaggio precedente, viene estratto un sottovettore con un numero di elementi pari alla parte decimale dello stesso, che verranno poi utilizzati per individuare i piani associati e completare la realizzazione della popolazione virtuale.

Per quanto riguarda il lato prettamente informatico, di seguito è riportato un diagramma di flusso (Fig. 7.1) che mostra il funzionamento concettuale dell'algoritmo, accompagnato da una sintetica spiegazione.

L'algoritmo richiede come input una serie di parametri (come raggio medio e deviazione standard da utilizzare nell'individuazione degli edifici di partenza e arrivo di un viaggio, l'attività svolta in tali edifici, il parametro di scala, ma soprattutto la strategia da analizzare e il metodo da utilizzare), dopodichè sfocia nella prima scelta, ossia quella del metodo da utilizzare per la creazione della popolazione virtuale. A seconda del metodo scelto in fase di input, vengono creati i viaggi e le persone virtuali con uno dei due procedimenti descritti in precedenza.

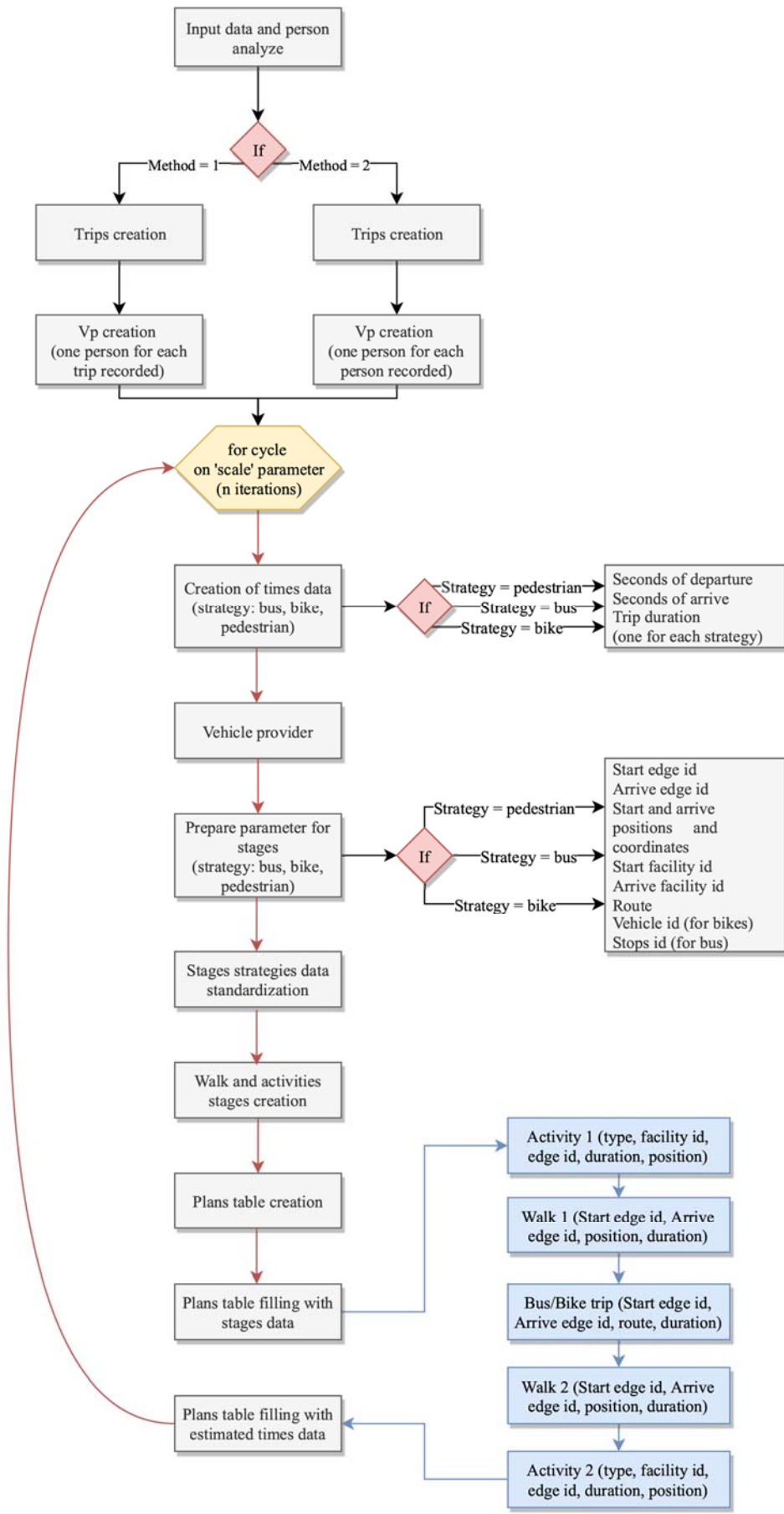


Figura 7.1 - Schema di funzionamento dell'algoritmo VpCreator



A questo punto viene avviato il ciclo for sul parametro scala durante il quale, per ognuna delle n iterazioni (più l'eventuale iterazione parziale) vengono eseguiti una serie di step sempre uguali: il primo consiste nella creazione di dati temporali, come l'istante di tempo di partenza e di arrivo e la durata di ogni viaggio, riferiti ad ognuna delle possibili strategie indagate, seguito dall'assegnazione dei veicoli alle varie persone generate e dalla preparazione di alcuni dei parametri fondamentali per l'assegnazione degli stages di viaggio dei vari utenti. In particolare, questi parametri riguardano numero identificativo, posizione e coordinate dell'arco e dell'edificio di partenza e di arrivo, nonché l'identificativo del mezzo utilizzato (nel caso di strategia *bike*), quello delle fermate e dei connettori della rete di trasporto pubblico (nel caso di strategia *transit*) e la sequenza di archi seguiti per completare il viaggio (*routes*). Anche in questo caso, ciascuno di essi è riferito alla strategia associata e quindi sarà necessario standardizzare le diverse variabili create sotto un unico nome, qualora si voglia eseguire un'analisi di tutte le strategie.

Risulta di grande importanza la spiegazione del metodo utilizzato per individuare le coordinate del punto di origine e di destinazione del generico viaggio svolto con una qualunque strategia. Le tracce GPS memorizzate all'interno dei database sono composte da una serie di coordinate di punti che partono da una determinata posizione e terminano in un'altra; come visto in precedenza, la procedura del map matching consente di andare a ricostruire il percorso seguito dai vari ciclisti o utenti di trasporto pubblico che hanno registrato i propri spostamenti su app specializzate.

Questo percorso rappresenta lo spostamento centrale della persona virtuale che viene creata, che però possiede una abitazione e deve raggiungere un posto di lavoro, rappresentati da un generico edificio individuato all'interno di un cerchio di raggio pari al valore fornito in input all'algoritmo, centrato nel punto di inizio o fine del percorso matchato. Da tale edificio ha poi origine il viaggio vero e proprio della persona virtuale, che uscirà di casa, raggiungerà la fermata dell'autobus o il parcheggio della bici a piedi, effettuerà lo spostamento centrale sul mezzo scelto e infine completerà il suo spostamento raggiungendo l'edificio di destinazione camminando dal parcheggio della bici o dalla fermata di destinazione fino all'edificio stesso.

Qualora non fosse possibile individuare un edificio valido all'interno del raggio fissato o al pedone non fosse possibile completare lo spostamento tra l'edificio trovato e l'arco di origine dello stage centrale (per esempio perché su tale arco non è consentito il transito ai pedoni, classico caso in cui il viaggio inizia su una pista ciclabile - problema

non riscontrabile nel caso del trasporto pubblico perché questo tipo di spostamento inizia dalle fermate degli autobus, che per essere create necessitano di archi dotati di almeno due corsie: una in cui è consentito almeno il transito dei bus e un marciapiede), l'algoritmo fa in modo che il pedone venga generato direttamente in corrispondenza dell'arco di origine di tale stage, sopprimendo la fase di camminata, generando una sequenza del tipo: activity(1), bikeride(2), activity(3).

Le attività svolte alle estremità dello spostamento possono essere di diverso tipo (svago, shopping, lavoro, casa, educazione), vengono eseguite presso i due edifici individuati e hanno una durata standard pari a un'ora.

Terminata la creazione degli stages "di contorno" si passa alla creazione della tabella dei piani, con un numero di righe pari al numero di piani che le persone della popolazione virtuale creata eseguono e al riempimento dei campi legati agli stages: vengono dunque generate delle sottotabelle in cui vengono riportate le varie caratteristiche degli stessi:

- Tipo, identificativo dell'edificio e dell'arco, posizione e durata delle attività;
- Identificativo dell'arco di origine e destinazione, posizione e durata degli spostamenti a piedi (nel caso di strategia *walk* sarà presente un unico stage di camminata tra i due edifici che ospitano le attività svolte);
- Identificativo dell'arco di origine e destinazione, posizione e durata dello spostamento centrale (in bus o bicicletta).

Per ciascuno di questi stages viene anche stimato un tempo necessario per il completamento che verrà inserito nella tabella dei piani e su cui si baserà poi il successivo algoritmo di selezione dei piani più convenienti da utilizzare.

In questo modo termina la prima iterazione del ciclo; in quelle successive si ripete lo stesso procedimento e ogni persona viene dunque "clonata" un numero di volte pari al parametro scala inserito. Le persone "clonate" presentano stesso punto di origine e destinazione, stessa sequenza di stages, stesso percorso seguito e stessa durata dello spostamento, ma diverso istante di inizio del viaggio, pertanto risulta praticamente impossibile distinguere due persone create a partire dalla medesima traccia GPS.

## 8. TEST E EDITING DELLA RETE

---

Prima di procedere con la costruzione della popolazione virtuale finale, ossia quella in cui ogni persona facente parte della popolazione ha a disposizione più piani associati alle diverse strategie “possibili”, è stato necessario eseguire più prove con una sola tipologia di mezzo di trasporto circolante sulla rete al fine di individuare eventuali errori di costruzione della stessa.

### 8.1. Import della domanda

Per prima cosa si è provato a caricare sulla rete la domanda ciclabile e di trasporto pubblico (una per volta) tramite gli algoritmi di map matching illustrati, sfruttando i dati provenienti dai database dell'ECC 2016 e di BellaMossa 2017, relativi al mese di maggio. Una volta ricavati tutti i viaggi e gli itinerari seguiti dai vari utenti, su questa base, è stata generata una popolazione virtuale mediante l'utilizzo dell'algoritmo *VpCreator*, descritto in precedenza, e avviata la microsimulazione.

Essa, oltre ad aver evidenziato alcuni problemi di rete (principalmente legati a connettori errati o mancanza di permessi di transito di determinate categorie di veicoli), prontamente risolti tramite l'applicativo NETEDIT del software SUMO, ha fatto emergere alcune criticità riguardanti la creazione della popolazione virtuale e dei percorsi effettuati dai vari utenti, descritte nel dettaglio, congiuntamente alle soluzioni proposte, nel paragrafo A.4 dell'appendice.

Dopo aver analizzato la domanda relativa al trasporto pubblico e ciclabile, l'attenzione è stata rivolta nella direzione del traffico veicolare privato. In questo caso, i viaggi e gli itinerari seguiti dai vari automobilisti sono stati generati a partire dalla matrice origine-destinazione caratterizzante tutti gli spostamenti avvenuti all'interno dell'intera provincia di Bologna. Essa, come accennato nel capitolo 3, è una matrice quadrata costituita da un lato formato da 177 elementi, pari al numero di zone in cui è stato suddiviso il territorio provinciale, tramite la quale è stato possibile andare a generare più di 85000 viaggi per poi ricostruire gli itinerari seguiti per completare gli spostamenti, rappresentati da una sequenza di archi e nodi, tramite l'algoritmo di routing denominato *duarouter*, il quale non fa altro che eseguire una assegnazione TON della domanda introdotta, secondo il metodo del pre-routing descritto nel paragrafo 2.3.2.1.

## 8.2. Editing della rete

Concluso l'import della domanda di prova, è stata lanciata una simulazione che sfruttasse i *Trips&Routes* creati, che ha consentito di individuare diversi errori presenti all'interno della rete stradale della città, i quali contribuivano a causare delle grosse problematiche alla circolazione veicolare.

Le principali modifiche apportate alla rete per ridurre al minimo i fenomeni di congestione, sono sinteticamente riportate nel seguito e descritte in maniera dettagliata nel paragrafo A.5:

- Controllo dei permessi di accesso: per consentire il transito a tutti i mezzi aventi diritto lungo le strade a circolazione ridotta o limitare il passaggio di determinate categorie di veicoli in corsie a loro non accessibili;
- Correzione/Creazione dei cicli semaforici: poiché in molte intersezioni semaforizzate erano assenti oppure sbagliati;
- Correzione del disegno delle rotonde: la cui geometria errata causava diverse difficoltà nello svolgimento delle simulazioni;
- Eliminazione dei connettori errati: per evitare che venissero effettuate manovre in realtà non consentite, che causano problemi alla circolazione;
- Modifica della posizione di alcune corsie ciclabili;
- Completamento di alcune zone di bordo della rete: per migliorare il deflusso di traffico nelle zone periferiche della città tramite la realizzazione di strade che forniscono vie alternative a quelle già esistenti;
- Incremento della velocità limite sulle corsie di immissione: per rendere più veritiera le modalità di accesso o uscita dei veicoli in strade ad elevate velocità di scorrimento, come tangenziale e autostrada.

## 8.3. Test della rete e delle modalità di routing

Terminata la fase di correzione principale della rete, sono state eseguite diverse microsimulazioni, basate unicamente sul traffico veicolare privato circolante nella provincia bolognese durante l'ora di punta mattutina (7:00 – 8:00), per testare la bontà degli interventi effettuati. Da esse si è potuto osservare che dopo circa 20/25 minuti di deflusso libero, di cui almeno 15 necessari per il caricamento della domanda minima sulla rete, si iniziavano a verificare numerosi problemi di congestionamento su molte delle arterie principali della città come, da Ovest verso Est: viale Pertini (in direzione Casalecchio), via Emilia Ponente (in corrispondenza dell'Ospedale Maggiore), via

Andrea Costa, viale Silvani e via delle Lame (entrambe all'altezza della Porta), viale Pietramellara, via Stalingrado, via San Donato (in corrispondenza del ponte sulla ferrovia), via Irnerio, via Massarenti, via Pelagio Palagi, viale Lenin, via Emilia Levante (dal quartiere Mazzini fino a San Lazzaro).

Per alcune di queste strade era previsto un fisiologico congestionamento, non era però pensabile che causasse code di svariati chilometri, lasciando tutto il resto della rete completamente libera ed inutilizzata. Questo particolare comportamento è sicuramente legato alla metodologia di routing utilizzata, che si basa su un modello di assegnazione TON in cui tutti i flussi veicolari vengono concentrati sugli itinerari di minimo costo a rete scarica, senza tenere in considerazione la presenza di altri veicoli e dunque la possibilità di un incremento dei costi di tali archi. Chiaramente, questo metodo di ragionamento risulta essere fortemente in contrasto con quello reale degli utenti, che appena intravedono delle code, cercano immediatamente di intraprendere percorsi differenti per evitare di rimanere bloccati nel traffico.

### **8.3.1. Dynamic Routing e Re-routing**

Per provare a risolvere questa problematica si è fatto uso di un algoritmo di routing dinamico in cui, essenzialmente, dopo aver eseguito il classico routing e aver avviato la simulazione, gli utenti analizzano i costi dei vari archi della rete nell'istante in cui vi entrano realmente andando a confermare il percorso prefissato oppure scegliendone un altro più conveniente a seconda delle condizioni di traffico sulla rete in quel preciso momento. Si è osservato, tuttavia, che tale modifica non risulta essere sufficiente, poiché si viene a verificare il fenomeno di trasferimento del congestionamento su un'altra arteria, mentre quella inizialmente bloccata si libera, preparandosi ad accogliere nuovi veicoli che vogliono evitare la prima alternativa e via di seguito in una sorta di "effetto ping-pong" del congestionamento.

Per porre un limite a tale fenomeno si è dunque deciso di utilizzare un algoritmo di routing dinamico accompagnato da un processo di re-routing, che consiste nella continua ricerca, dopo un certo intervallo temporale prefissato, di un nuovo itinerario di minimo costo che porti dalla posizione attualmente occupata dal generico utente alla destinazione, in maniera ripetuta per tutta la durata del viaggio, fino al suo completamento. Tale operazione è però consentita solamente a una parte della popolazione, altrimenti si continuerebbe a verificare il sopracitato "effetto ping-pong".

Questo comportamento rispecchia abbastanza accuratamente la realtà, in cui molti automobilisti non hanno piena conoscenza di tutta la rete stradale cittadina e quindi,

stabilendo a priori il percorso da seguire, qualora rimanessero bloccati nel traffico non riuscirebbero a trovare itinerari alternativi per evitare la congestione, a meno che non possano usufruire di un dispositivo di navigazione satellitare in tempo reale (il *rerouting device* nel caso in analisi, GoogleMaps o qualunque altro servizio nella quotidianità), aggiornato in base alle condizioni del traffico, che suggerisca una strada alternativa e li guidi passo per passo fino al raggiungimento della loro destinazione. Per ulteriori dettagli riguardanti tale tecnica di routing si veda il paragrafo A.6.

A supplemento delle migliorie appena descritte, sono state eseguite anche delle modifiche alla dinamica dei veicoli circolanti (auto e taxi), che hanno consentito di rendere più realistico il comportamento dei conducenti. Questo passaggio si è reso necessario poiché, specialmente alla ripartenza da fermi dopo una fase di rosso semaforico, i veicoli mantenevano una distanza di sicurezza accettabile per le norme di sicurezza della circolazione, ma del tutto irrealistiche in condizioni di congestione, nelle quali, in genere, gli automobilisti tendono a ripartire molto vicini ai veicoli che li precedono e con accelerazioni piuttosto elevate, per evitare di perdere troppo tempo in corrispondenza del semaforo (paragrafo A.8).

Grazie a tutte le modifiche apportate al modello di microsimulazione, è stato possibile ottenere un sensibile miglioramento delle prestazioni della rete, tali che i primi seri problemi di congestionamento si iniziano ad osservare solo dopo circa 40 minuti di simulazione e pressoché unicamente in corrispondenza dell'intersezione tra viale Lenin, via Po e via Emilia Levante, per poi estendersi a gran parte degli archi situati all'interno del quartiere Mazzini.

Questa grossa problematica è probabilmente legata all'eccessivo flusso convergente all'incrocio in esame dalle zone periferiche della città e a qualche errore nella gestione del routing di tali viaggi, fatto osservabile grazie alla modestia dei flussi su tutti gli itinerari alternativi per raggiungere il centro città che generalmente risultano essere molto trafficati nell'ora di punta mattutina, tanto che anche modificando ulteriormente i parametri descritti in precedenza, non si riescono ad ottenere miglioramenti.

Inoltre, in corrispondenza di questo crocevia è presente un impianto semaforico ad attuazione dinamica di piano, che fa quindi variare la durata del ciclo e delle diverse fasi a seconda del flusso veicolare in arrivo, caratteristica inizialmente non introdotta all'interno del *digital twin* impiegato ma che potrebbe consentire di migliorare notevolmente le prestazioni dell'intersezione.

In ogni caso, il miglioramento delle prestazioni dell'intera rete è stato consentito proprio grazie alla redistribuzione di parte dei flussi su itinerari alternativi a quelli inizialmente individuati dall'algoritmo di pre-routing per il completamento del viaggio, in modo tale che fosse utilizzato un maggior numero di archi rispetto a quanto fatto in precedenza, consentendo una riduzione della congestione sulle arterie principali.

Di seguito si riportano alcuni diagrammi in cui è possibile osservare il miglioramento delle prestazioni della rete, in particolare facenti riferimento all'evoluzione dei tempi di attesa a causa della congestione lungo i vari archi e in prossimità delle intersezioni prima (Fig 8.1) e dopo (Fig. 8.2) le modifiche eseguite alla rete, alla dinamica dei veicoli e all'algoritmo di assegnazione utilizzato.

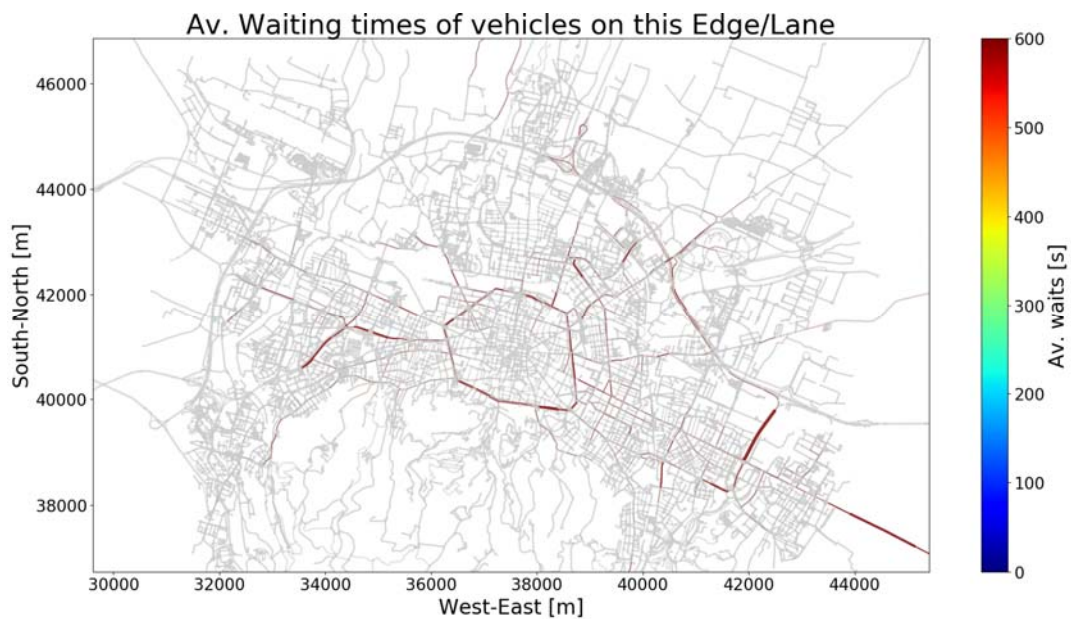


Figura 8.1 - Tempi medi di attesa sulla rete - Scenario di partenza

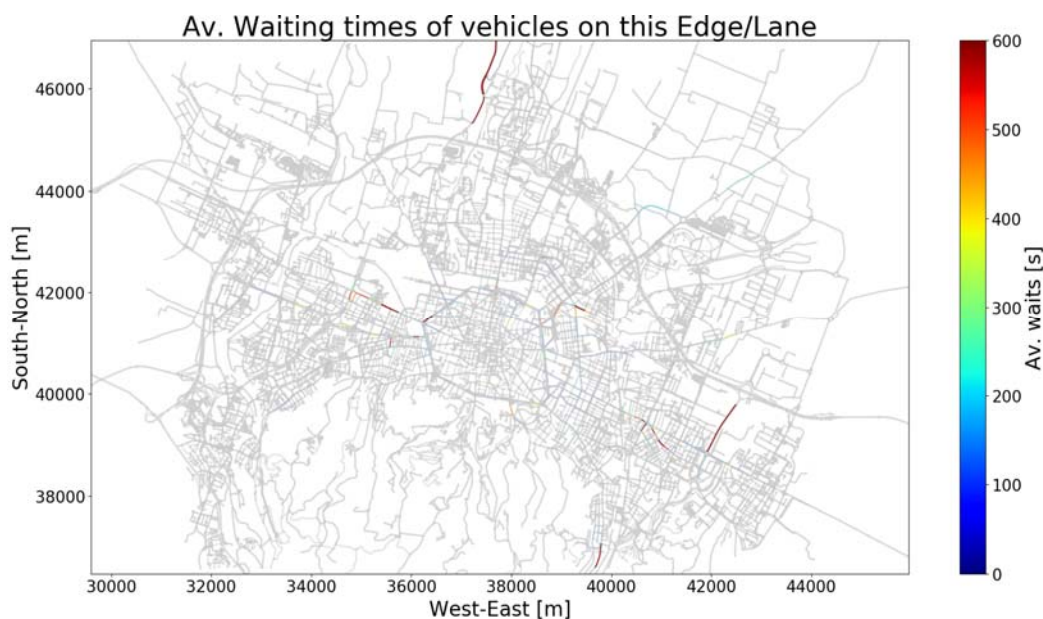


Figura 8.2 - Tempi medi di attesa sulla rete – Scenario intermedio

Dalle Figure 8.1 e 8.2 è immediatamente evidente il notevole miglioramento ottenuto a seguito delle modifiche effettuate rispetto alla situazione iniziale. I tempi di attesa hanno subito una riduzione significativa, specialmente lungo i viali di circonvallazione e viale Pertini in direzione Casalecchio, grazie alla migliore distribuzione dei flussi, consentita dal processo di re-routing.

Sono tuttavia rimaste delle zone in cui il problema degli elevati tempi di attesa non è stato risolto, come lungo via Saffi, porta S. Felice, in prossimità dell'incrocio tra viale Lenin, via Po e via Emilia, lungo via Stalingrado e nel tratto di viale davanti alla stazione.

Pertanto, si è deciso di continuare a intervenire sulla rete tramite migliorie del modello di offerta e della tipologia di algoritmo di assegnazione utilizzato, fino a raggiungere risultati eccellenti sotto l'aspetto appena analizzato, come riportato nella Figura 8.7 a fine capitolo.

### 8.3.2. Introduzione di semafori attuati e modello sub-lane

Nonostante la situazione sia decisamente migliorata rispetto alle condizioni di partenza, dunque, si è deciso di trovare una soluzione a tutti i problemi di congestionamento emersi durante l'ora di simulazione considerata. Per fare ciò, in primis, è stata implementata all'interno del codice di SUMOPy la possibilità di introdurre sulla rete i semafori ad attuazione dinamica, cioè quelli che modificano la durata delle fasi semaforiche in base al flusso veicolare transitante per gli archi afferenti all'intersezione. Questa modifica è stata applicata a tutti gli impianti sparsi all'interno della rete stradale di Bologna ed ha portato ad un sensibile miglioramento della congestione in



corrispondenza delle intersezioni più trafficate e geometricamente complesse, grazie alla riduzione delle interruzioni al deflusso veicolare quando esso risulta essere molto intenso, come in prossimità delle porte lungo i viali di circonvallazione o davanti all'ospedale Maggiore, senza però riscuotere grande successo nell'incrocio Po-Lenin-Emilia, per cui il problema continua a sembrare legato più a una questione di routing che altro (paragrafo A.7).

Contestualmente all'introduzione dei semafori attuati, sono state apportate alcune modifiche a livello di dinamica della circolazione durante lo svolgimento delle microsimulazioni, facendo uso del modello *sublane* e variando alcuni parametri che regolano il comportamento degli utenti, come l'impazienza o l'aggressività alla guida.

Il *sublane model*, diversamente da quello usato in precedenza che prende il nome di *lane-change model*, è un modello che permette di suddividere la singola corsia appartenente al generico arco in un numero variabile di sottocorsie (generalmente 3, ma eventualmente anche di più) di larghezza impostabile dall'utente (di default pari a 1m) e consentire il transito in parallelo di più veicoli all'interno della stessa corsia, cosa che col modello precedente non era possibile.

Questa peculiarità porta al verificarsi di determinati vantaggi in termini di fluidità di circolazione, come: la possibilità di compiere sorpassi su veicoli a due ruote all'interno della singola corsia, la formazione di "corsie virtuali" nel caso di congestione (es. gli autoveicoli fermi in prossimità di un semaforo collocato in una corsia di larghezza 4 metri, si affiancano a formare due code, riducendo la lunghezza della coda stessa), miglioramento della realistica della dinamica laterale (le biciclette tendono ad occupare il lato destro della corsia invece che il centro, viene implementata l'aggressività degli utenti nel compiere un cambio di corsia, l'accettazione di una riduzione di gap spaziale dai veicoli circostanti durante le manovre di cambio corsia).

In pratica, il *sublane model* non è altro che una variante del *lane-change* in cui la strada non viene più schematizzata come un arco monodimensionale, in cui il veicolo può spostarsi solo lungo il suo asse, ma come un elemento bidimensionale all'interno del quale il mezzo può muoversi sia nella direzione longitudinale sia in quella trasversale, rendendo la simulazione molto più realistica.

Come è ovvio intuire, si tratta di un modello molto complesso governato da un elevato numero di parametri, la cui corretta calibrazione è un passaggio cruciale per consentire una rappresentazione della realtà più precisa possibile (per ulteriori dettagli si rimanda al paragrafo A.8).

### 8.3.3. Dynamic User Equilibrium

Questa ulteriore modifica, tuttavia, non è stata sufficiente a garantire l'eliminazione di tutti i problemi di congestione sparsi sulla rete, ma è stato necessario ricorrere ad un approccio differente per quanto riguarda l'individuazione degli itinerari seguiti dai vari automobilisti. Si è, infatti, deciso di abbandonare le tecniche del pre-routing o dynamic routing (con eventuale re-routing) utilizzate finora e di fare uso della terza tecnica descritta nel paragrafo 2.3.2, denominata *Dynamic User Equilibrium (DUE)*, il cui funzionamento è già stato ampiamente illustrato.

Le principali problematiche riconducibili ad errori di generazione degli itinerari riguardavano un eccessivo flusso veicolare lungo la tangenziale e tutte le arterie a scorrimento veloce o caratterizzate da un elevato numero di corsie (viale Pertini, viale Lenin, via Saffi e via Emilia Ponente) dislocate all'interno della città, mentre la rete restante rimaneva stranamente poco trafficata.

Per cercare di porre un rimedio a tali anomalie si è dunque deciso di tentare di utilizzare un nuovo approccio di generazione degli itinerari che fosse in grado di garantire una più equa redistribuzione dei flussi grazie all'impiego di un procedimento iterativo, nonostante i tempi computazionali fossero decisamente più lunghi rispetto a quelli dei metodi impiegati precedentemente.

Inizialmente, questo processo è stato avviato ammettendo al massimo 5 iterazioni; dopodiché, osservati i miglioramenti ottenuti e volendo raggiungere la miglior distribuzione dei flussi possibile, è stato rilanciato altre due volte, facendo variare il numero di ripetizioni previste per il completamento del procedimento: prima 10 e poi 20.

Nei diagrammi riportati di seguito (Fig. 8.3 – Fig. 8.6) è possibile osservare l'evoluzione della distribuzione dei flussi veicolari passando da una tecnica di routing all'altra e facendo aumentare il numero di iterazioni utilizzate per il DUE.

Si può facilmente affermare che la situazione sia notevolmente migliorata; basti notare di quanto si siano ridotti i flussi fatti registrare lungo la tangenziale e viale Pertini, già solo confrontando le prime due immagini in cui gli archi colorati di rosso sono diminuiti in maniera drastica, e come, invece, siano cresciuti quelli sparsi per il resto della rete, specialmente in corrispondenza dei viali di circonvallazione e delle arterie radiali che da essi si diramano, senza però generare picchi che significano elevata congestione.

Quest'ultimo aspetto risulta essere di facile osservazione specialmente se si confrontano la prima e l'ultima figura: è infatti immediatamente percepibile l'incremento di archi

stradali che sono contraddistinti da un colore blu/azzurro, che precedentemente erano grigi (cioè inutilizzati), che indica la maggiore distribuzione dei flussi su tutti gli archi della rete, non solo lungo le arterie principali, ma anche sulle strade secondarie, rendendo quindi evidente il funzionamento dell' algoritmo DUE.

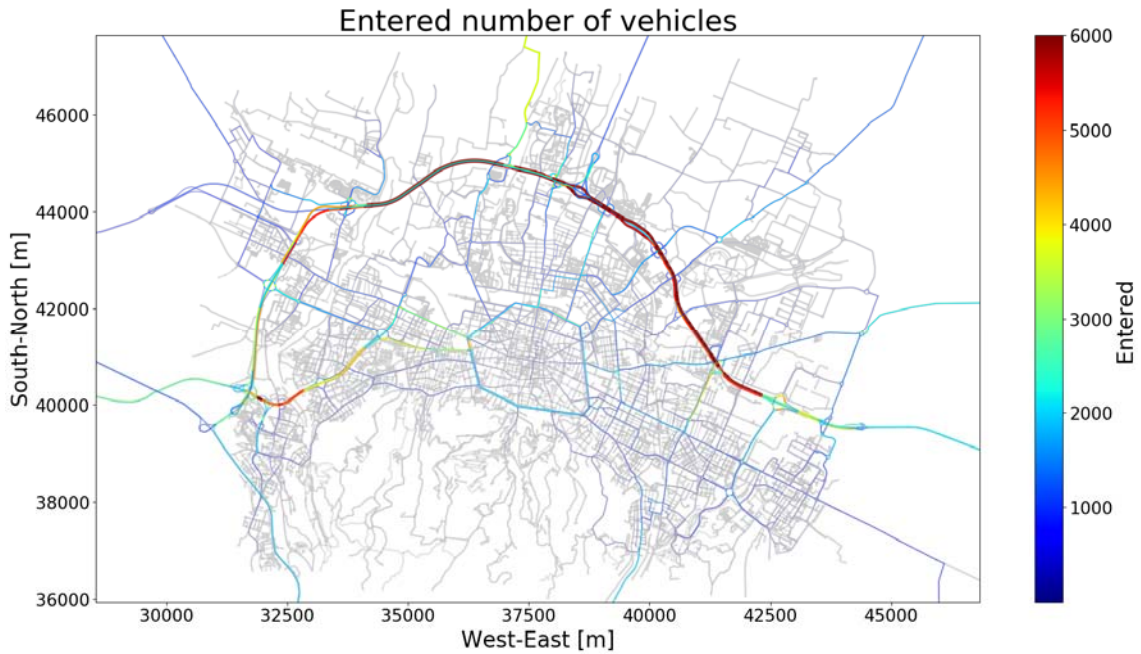


Figura 8.3 – Flussi sulla rete a seguito di assegnazione con dynamic routing e rerouting

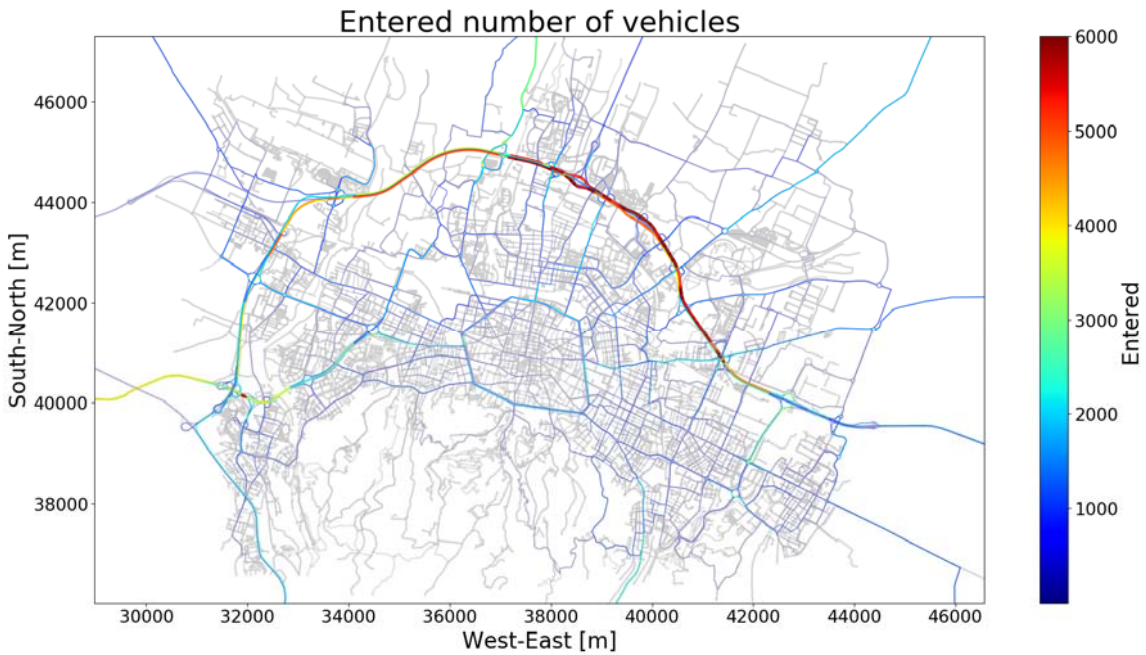


Figura 8.4 – Flussi sulla rete a seguito di assegnazione con DUE (5 iterazioni)

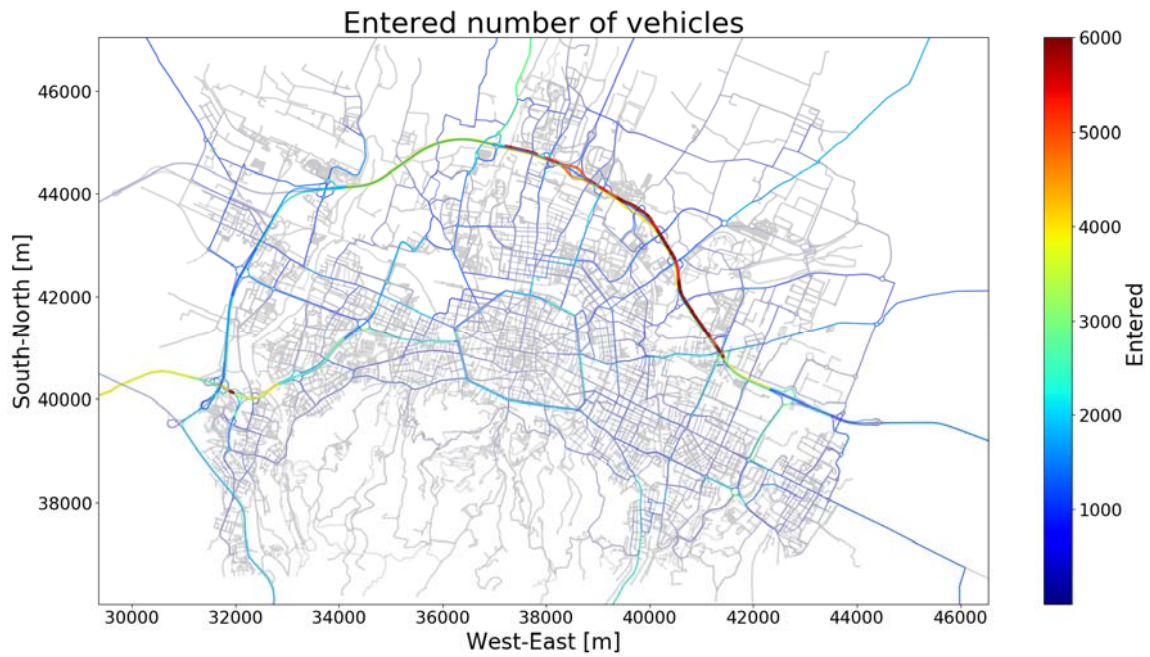


Figura 8.5 - Flussi sulla rete a seguito di assegnazione con DUE (10 iterazioni)

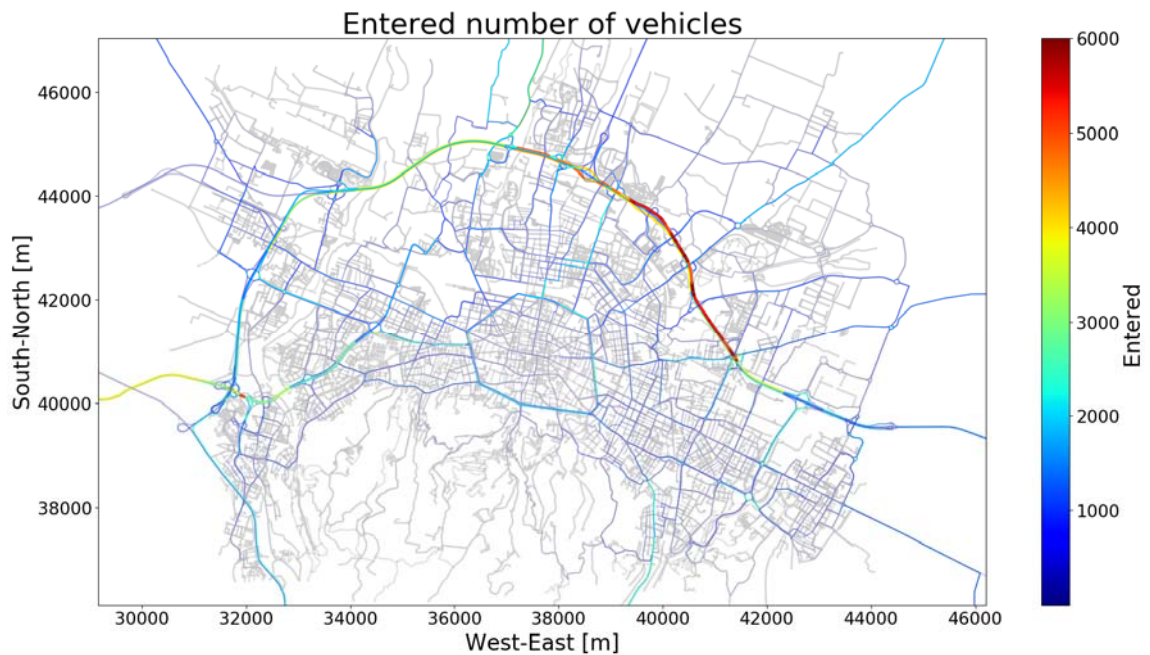


Figura 8.6 - Flussi sulla rete a seguito di assegnazione con DUE (20 iterazioni)

Limitando il confronto alle 3 immagini legate al Dynamic User Equilibrium, aumentando il numero di ripetizioni dell'algoritmo si è ottenuto un aumento dei flussi sugli archi urbani e una sensibile diminuzione sulle arterie principali. Emblematico il caso dell'asse autostradale cittadino che ha visto una tale riduzione di flussi che si è passati da un colore rosso intenso (con valore oltre 6000), fatto registrare dopo 5 iterazioni, a un arancione alternato a rosso (circa 5000 veicoli transitati) per la porzione est e all'azzurro/verde (flusso variabile tra 2000 e 3000) per il tratto a ovest.

Una ulteriore conferma del notevole miglioramento, rispetto allo scenario di partenza deriva dall'osservazione del diagramma relativo al tempo medio di attesa su ogni arco del modello, riportato nell'immagine seguente e da confrontare con le Figg. 8.1 e 8.2.

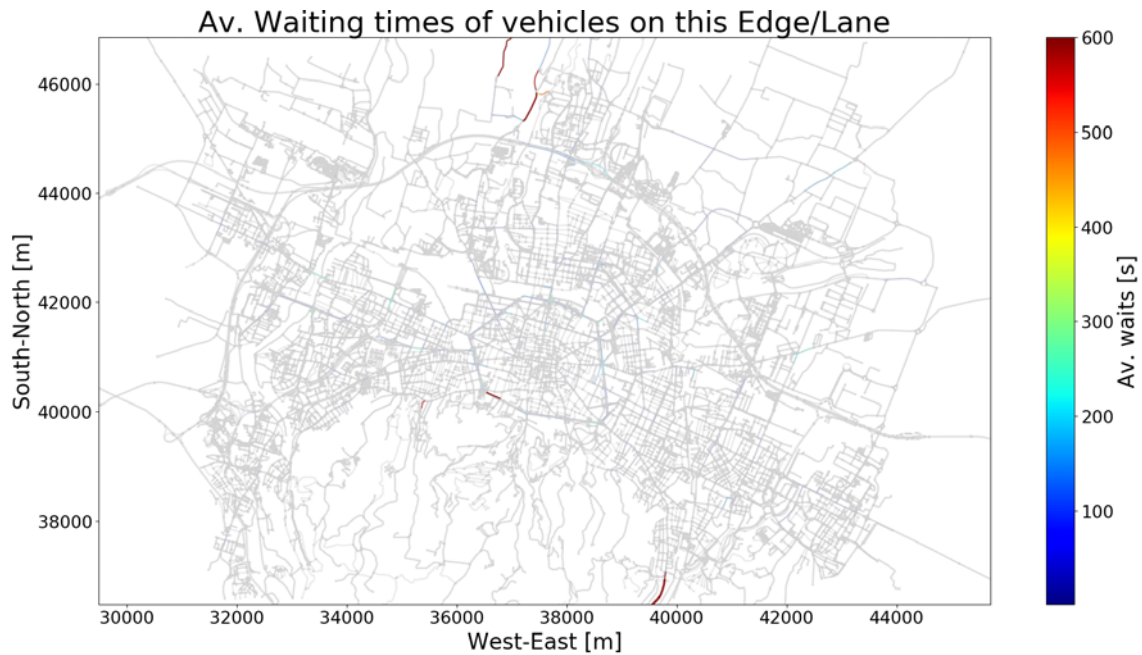


Figura 8.7 - Tempi medi di attesa sulla rete – Scenario finale (Scala per confronto con Figg. 8.1 e 8.2)

Si può, infatti, notare, come le uniche strade che presentano dei tempi di attesa piuttosto elevati, siano poste in corrispondenza di Porta Saragozza e in prossimità dell'uscita 5 della tangenziale in direzione Casalecchio, zone in cui, durante l'ora di punta del mattino, si formano code che possono portare a tempi di permanenza sul medesimo arco piuttosto simili a quelli ottenuti dalla simulazione.

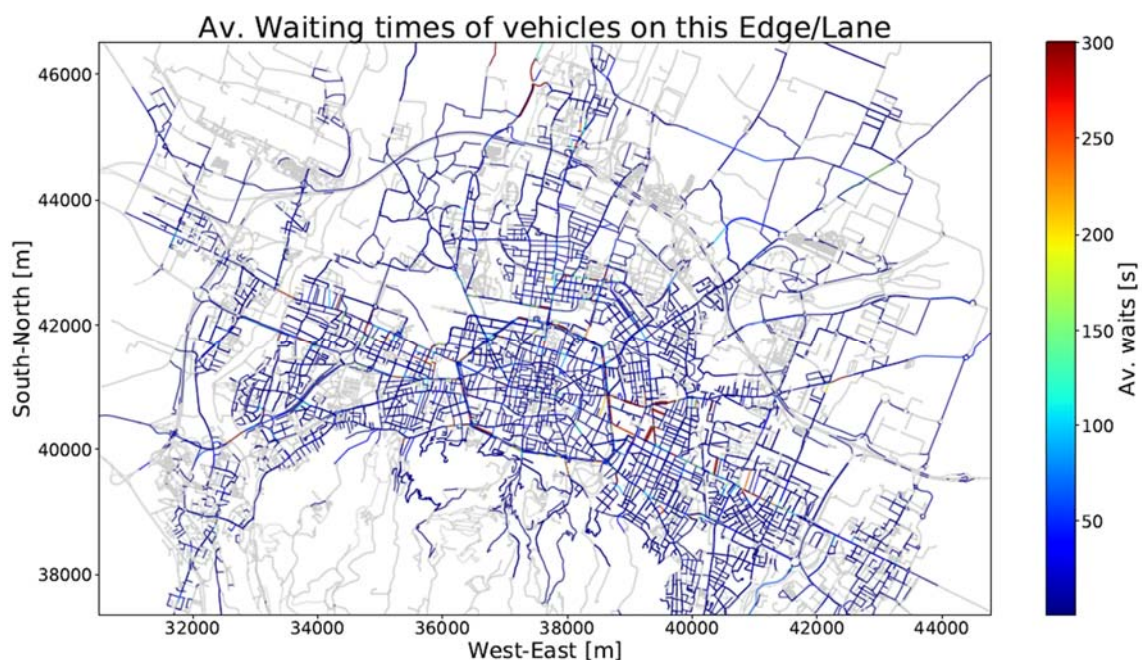


Figura 8.8 - Tempi medi di attesa sulla rete – Scenario finale (Scala per analisi risultati)

Su tutti gli altri archi si è verificato un significativo abbassamento delle attese, specialmente grazie all'opera di distribuzione dei flussi sulla rete tramite l'algoritmo di assegnazione DUE, ma anche all'introduzione di semafori ad attuazione dinamica e all'utilizzo del modello sub-lane che rendono più realistico il comportamento degli agenti di traffico all'interno del modello.

Le stesse conclusioni si possono trarre osservando lo svolgimento della micro simulazione successiva al procedimento di routing tramite metodo DUE: non sono stati notati, infatti, eccessivi rallentamenti lungo le arterie a scorrimento veloce, né zone di congestione del traffico in corrispondenza delle intersezioni, anzi, il deflusso veicolare risulta abbastanza scorrevole in ogni zona della rete per gran parte dell'intervallo di simulazione, salvo qualche eccezione legata principalmente a problemi di modellazione e di comportamento degli utenti all'interno delle rotatorie, in particolare in quelle situate in prossimità dell'uscita 6 della tangenziale, in cui però il decongestionamento avviene in maniera automatica e anche piuttosto rapida.

Si vuole far presente che, qualora la medesima microsimulazione fosse avviata includendo la possibilità di effettuare il rerouting alla stessa percentuale di utenti e con le stesse caratteristiche utilizzate in precedenza, si verrebbero a generare problematiche simili a quelle descritte prima dell'uso della tecnica DUE.

La spiegazione di tale comportamento è da ricercarsi nel fatto che, nonostante la nuova tecnica di routing abbia distribuito equamente tutti i flussi all'interno della rete portando dei vantaggi a tutti gli utenti, il singolo automobilista ha una visione egoistica dello spostamento e quindi cerca di ridurre al minimo il tempo a lui necessario per il trasferimento da una zona all'altra della città. Proprio su questo concetto si basa la tecnica del re-routing che prende le mosse dal dynamic routing che, a sua volta, è basato sull'algoritmo di Dijkstra il quale, come illustrato nel paragrafo 2.3.2, assegna tutti i flussi all'itinerario di minimo costo che riesce ad individuare nell'istante di immissione del veicolo nella rete.

Pertanto, gran parte degli utenti che entrano nella rete ad inizio simulazione trovano che il percorso più veloce in quel preciso istante risulta essere quello che transita per le arterie elencate in precedenza (per via della velocità consentita, della presenza di più corsie per senso di marcia e quindi anche della capacità dell'arco) e decidono dunque di ignorare la soluzione ricavata tramite il procedimento di equilibratura dei flussi, causando di nuovo gli stessi problemi che il metodo DUE aveva risolto.

Solamente riducendo significativamente la percentuale di veicoli in grado di effettuare il re-routing (intorno a valori nell'ordine dell'unità) le problematiche descritte hanno smesso di presentarsi e, dunque, si è deciso di dare questa possibilità unicamente a una piccola parte degli automobilisti totali (circa il 5%), limitando gli altri a seguire il percorso per loro previsto dal DUE, senza possibilità di modificarlo a favore di itinerari che consentano loro di evitare le poche zone di congestione ad ora presenti o di ridurre, in linea teorica, il tempo di viaggio in maniera sensibile, senza però considerare le elevate fluttuazioni di traffico tra due alternative simili a causa, appunto, del congestionamento.

## **9. CREAZIONE DELLO SCENARIO**

---

Una volta terminate tutte le operazioni di test e individuati i migliori metodi da utilizzare durante l'assegnazione della domanda alla rete, in modo da distribuire uniformemente i flussi, è possibile procedere con la creazione dello scenario definitivo sul quale verranno condotte tutte le analisi per il presente elaborato.

L'idea di base è quella di costruire una popolazione virtuale all'interno dell'area di studio individuata e completare lo scenario generando una domanda di trasporto per auto e bici che rappresenti gli spostamenti di scambio o di attraversamento della stessa e che abbia la funzione di creare una sorta di traffico di fondo sulla rete, indipendentemente dal comportamento tenuto dalla popolazione introdotta. Le operazioni eseguite a tale scopo sono le seguenti:

- Definizione dell'area di studio;
- Operazioni preliminari (creazione parcheggi e servizio di trasporto collettivo);
- Generazione della domanda di trasporto privato (autovetture e motocicli);
- Generazione della domanda di trasporto pubblico;
- Generazione della domanda ciclabile tramite tracce GPS;
- Generazione della domanda pedonale;
- Completamento della popolazione virtuale con veicoli e piani.

### **9.1. Definizione dell'area di studio**

L'operazione di individuazione del cordone che delimita la zona che si vuole analizzare rappresenta, senza dubbio, una delle fasi più delicate e importanti nell'ambito di una trattazione di questo genere.

Generalmente, il bordo dell'area di studio viene fatto coincidere con i confini amministrativi del territorio in esame, in modo da poter ipotizzare la trascurabilità degli effetti derivanti dall'esterno. Tuttavia, nel caso considerato, si è deciso di eseguire lo studio su un'area di dimensione inferiore rispetto al territorio comunale bolognese ed in particolare racchiusa all'interno di un confine ideale delimitato a nord dal tratto cittadino dell'asse autostradale, ad est e ovest dal confine con i comuni di San Lazzaro di Savena e Casalecchio e a Sud da una linea virtuale che collega questi ultimi, lasciando al di fuori dell'area di studio parte della zona collinare cittadina, per dare vita a una superficie di circa 54 km<sup>2</sup>.





*Figura 9.1 - Area di studio*

Questa scelta è dettata dalla volontà di escludere dal presente studio, tutte quelle aree che risultano essere troppo vicine al bordo del modello di rete, zone molto soggette ad errori di modellazione e problemi durante il routing o il map matching delle tracce GPS. Questi sono principalmente causati dall'assenza o dall'errata rappresentazione di alcune strade all'interno del modello che portano a errori durante la ricostruzione degli itinerari da tracce GPS o ad elevati livelli di traffico lungo le poche arterie riportate in conseguenza alla mancanza di itinerari alternativi, esistenti nella realtà, che potrebbero consentire di risolvere l'eccessiva congestione in tali archi. Chiaramente questo porterebbe a una notevole perdita di realismo dello scenario e per tali motivi si è deciso di effettuare lo studio solo sull'area appena presentata, sufficientemente lontana dal bordo per evitare di risentire di questi effetti.

## **9.2. Operazioni preliminari**

Prima di procedere con la generazione della domanda è stato necessario eseguire alcune operazioni preliminari, come la creazione dei parcheggi e del servizio di trasporto pubblico locale.

La prima operazione è di fondamentale importanza per poter creare i piani che si basano sulla strategia auto, utilizzati dalla popolazione virtuale, poiché il percorso effettuato a bordo dell'autovettura per completare lo spostamento tra le due attività successive necessita di un punto di partenza e uno di arrivo che coincidano con un parcheggio per il

veicolo, altrimenti, durante la fase di generazione dei piani, il software interrompe il processo, fornendo in output un errore.

Questi parcheggi vengono generati tramite un apposito comando:

*Landuse → Parking → Generate Parking*

in cui i parametri utilizzati, hanno lo scopo di governare il procedimento imponendo che essi vengano introdotti in corrispondenza della corsia, in cui deve essere consentito il transito ai taxi, più a destra possibile di quelle facenti parte dell'arco (il quale deve avere una lunghezza minima di almeno 42 m) in modo da creare i parcheggi anche all'interno del centro cittadino dove, come accennato, è vietata la circolazione alle autovetture "normali" su tutti gli archi che lo compongono.

Si fa presente che tali archi devono anche essere dotati di marciapiede, altrimenti i pedoni non riuscirebbero a raggiungere il proprio veicolo, avere priorità inferiore a 7 (perché su strade importanti a elevata velocità di scorrimento difficilmente si troveranno dei posti auto) e che i parcheggi creati hanno una lunghezza di 6 m, ma devono distare almeno 15 m dalle intersezioni.

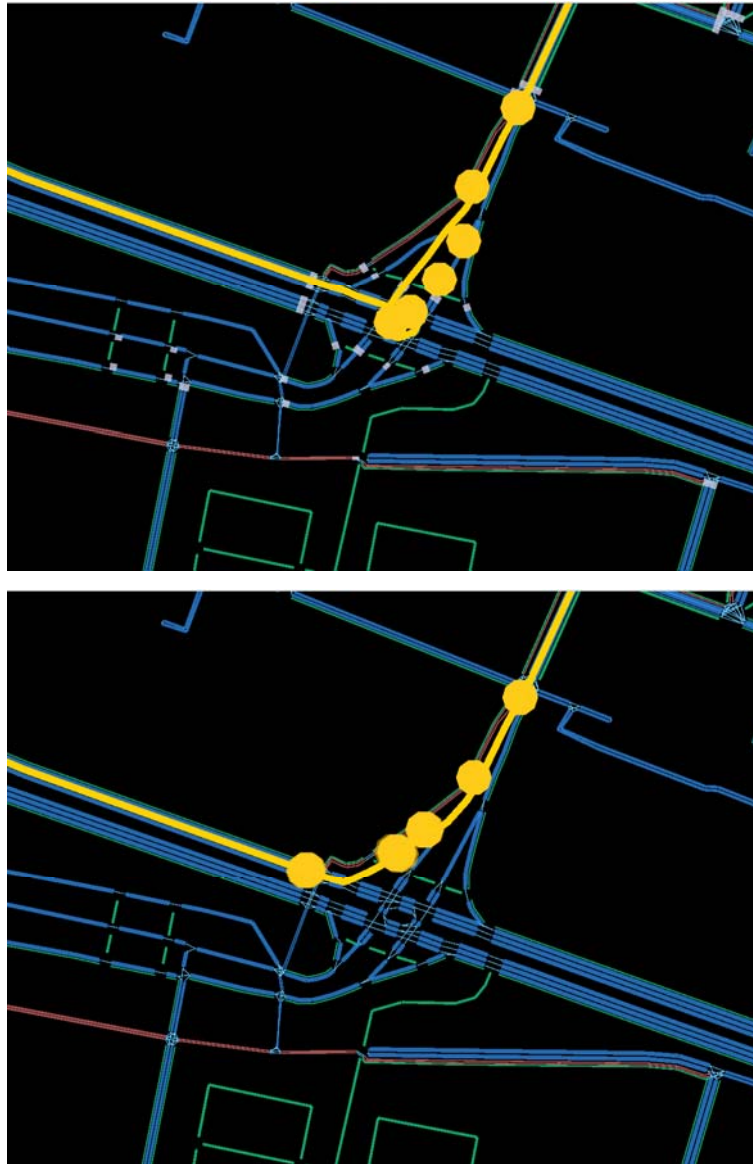
La seconda azione da eseguire è rappresentata dalla creazione dell'intero servizio di trasporto pubblico urbano secondo la tecnica ampiamente descritta nel paragrafo 6.3. L'unico appunto riguarda la necessità di correzione di alcune tracce GPS fornite dal file *Shapes* correlato ai dati GTFS di cui si è fatto uso.

In particolare, dopo l'import dei punti GPS, l'applicazione del filtro geometrico e il map matching delle tracce sulla rete, è stato possibile osservare che alcune delle ricostruzioni dei percorsi seguiti dalle linee urbane presentavano dei piccoli errori, riguardanti essenzialmente deviazioni rispetto al percorso realmente seguito, causate da errori di posizionamento dei punti GPS rispetto al modello di rete sottostante.

Si è quindi deciso di provvedere a uno spostamento manuale di tali punti in corrispondenza degli archi realmente percorsi dagli autobus, in modo che l'itinerario ricostruito dopo un nuovo matching fosse quello corretto.

Si è poi proseguito con l'import delle fermate e delle tabelle orarie, come consuetudine, completando la generazione del servizio di trasporto pubblico locale.

A questo punto è stato possibile avviare la creazione della domanda caratterizzante lo scenario.



*Figura 9.2 - Correzione manuale della posizione dei punti GPS relativi al percorso seguito dagli autobus*

### **9.3. Generazione della domanda di trasporto privato**

Come accennato precedentemente, l'idea è quella di creare una popolazione virtuale che riproduca gli spostamenti interni all'area di studio e poi generare una domanda di scambio e attraversamento (cioè che ha solo l'origine, solo la destinazione oppure entrambe, all'esterno del territorio identificato), che rappresenti il traffico di fondo presente su tutta la rete. A tale scopo si è fatto uso di matrici origine-destinazione derivanti dal 14° Censimento della Popolazione e delle Abitazioni svolto dall'Istat nel corso del 2001, aggiornate all'anno 2018 mediante i tassi di crescita della popolazione registrati dalla città metropolitana.

A differenza dell'operazione eseguita durante la fase di test della rete, descritta nel relativo capitolo, in questa sede sarà necessario procedere ad un diverso aggiornamento

della matrice in quanto i due indici precedentemente utilizzati facevano riferimento al territorio comunale e provinciale, mentre l'area di studio considerata coincide con una porzione del comune. Per tale motivo, si è deciso di utilizzare il parametro di crescita comunale, pari a 1.055, per tutti gli spostamenti interni all'area di studio (per la precisione 16419), mentre per quelli di scambio e attraversamento un indice ottenuto dalla media pesata dei valori comunali e provinciali (1.109) calcolata sulla base del numero di spostamenti interni al comune ma non completamente interni all'area individuata (30204) e di quelli non interni (quindi di scambio o attraversamento del territorio comunale, pari a 36755). Il valore ottenuto è uguale a 1.085 ed è stato applicato a tutti i 66959 spostamenti che non risultano essere interni all'area di studio.

Al termine del procedimento, dunque, sono state ottenute due distinte matrici origine-destinazione aggiornate: una da utilizzare per la generazione della popolazione virtuale, che rappresenta gli spostamenti in auto interni all'area di studio, costituita da 17337 viaggi e l'altra utile per creare il traffico di fondo, la cui somma degli elementi dà come risultato 71680 viaggi. Per un totale di 89017 spostamenti contro gli 83378 fatti registrare nel 2001.

Definite le matrici da utilizzare, è stata impiegata la tecnica di generazione della domanda da matrici OD descritta nel paragrafo riguardante la teoria, operativamente resa possibile dai comandi di import e creazione di flussi e popolazione virtuale presenti all'interno del software SUMOPy.

In particolare, entrambe le matrici sono state importate all'interno del software grazie al comando:

*Demand → Zone to Zone demand → Add Zone to Zone flows...*

scegliendo il relativo file origine in formato .csv e impostando i seguenti parametri:

- Start time = 25200 s (cioè le 7:00 del mattino);
- End time = 28800 s (cioè le 8:00 del mattino);
- Mode = passenger1 (cioè domanda relativa alle auto);
- Scale = 1.055 o 1.085 (parametro moltiplicativo a seconda che si tratti della matrice degli spostamenti interni o di scambio e attraversamento);
- Activity at origin = Home;
- Activity at destination = Work.

A questo punto le operazioni eseguite si sono differenziate. Nel caso di generazione del traffico di fondo è stato sufficiente trasformare i flussi OD in viaggi e individuare gli itinerari seguiti per il completamento di ciascuno di essi, rispettivamente secondo la

tecnica della disaggregazione della domanda e mediante la metodologia del pre-routing precedentemente illustrate, tramite i comandi:

*Demand → Zone to Zone demand → Generate trips from flows...*

*Demand → Trips and Routes → Trips to routes with duarouter*

Si fa presente che, proprio come nel caso descritto per il test della rete, è stato utilizzato il *Fallback Mode* per generare quei viaggi aventi origine o destinazione situati all'interno del centro cittadino del modello costruito, nel quale le generiche auto non hanno diritto di accesso, trasformando il veicolo utilizzato per tali spostamenti in un taxi, consentendo quindi il completamento del viaggio.

Per quanto riguarda la creazione della popolazione virtuale, invece, si è fatto uso del comando:

*Demand → Virtual Population → Configure virtual population → Create from zone to zone flows*

Esso ha la funzione di disaggregare la matrice OD di partenza e per ogni suo elemento creare una persona virtuale, dotata di caratteristiche proprie (edificio di residenza, mezzo preferito, età, genere,...), che compia proprio quello spostamento. L'intero funzionamento del procedimento è riportato nel paragrafo 2.3.1.

Terminata l'operazione è necessario assegnare alle singole persone il proprio mezzo e infine generare i piani che svolgeranno per eseguire il viaggio, tramite la costruzione di una serie di *stages* (per la strategia auto coincidono con seguente sequenza: svolgere l'attività origine, camminare dall'edificio in cui ci si trovava fino al parcheggio della macchina, guidare dal parcheggio origine fino a uno nelle vicinanze della destinazione, camminare da tale parcheggio all'edificio associato alla seconda attività e infine svolgere l'attività di destinazione) che formano una sorta di diario giornaliero della persona. Per fare ciò si è fatto uso dei seguenti comandi:

*Demand → Virtual Population → Configure vehicles → Provide vehicles*

fissando tutti i parametri pari a 0.0 e:

*Demand → Virtual Population → Plans → Generate plans*

fornendo in input i valori riportati nella figura 9.4.

Si fa notare che anche in questa situazione il *Fallback Mode* è stato attivato per lo stesso scopo descritto in precedenza.

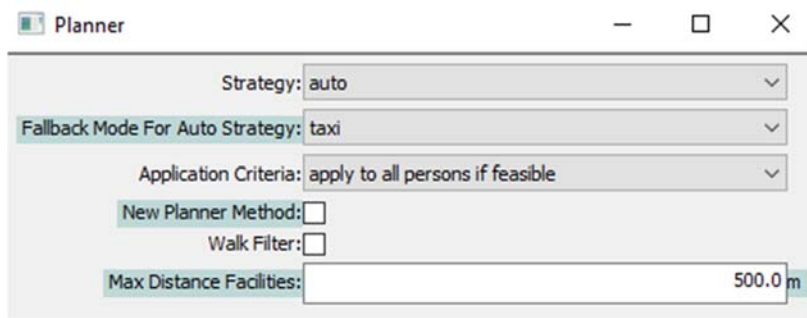


Figura 9.3 - Parametri Fallback mode

Un procedimento analogo è stato utilizzato per la creazione della sola popolazione virtuale avente come modo di trasporto prediletto il motociclo, senza considerare la relativa domanda di fondo, sfruttando la stessa procedura di aggiornamento, gli stessi comandi software e gli stessi coefficienti appena illustrati. Ciò ha portato alla generazione 6199 persone virtuali, aventi come strategia preferita quella denominata *Motorcycle*, partendo dai 5875 ricavati dalla matrice OD.

Terminata questa fase è possibile osservare che nello scenario è stata introdotta tutta la domanda di trasporto veicolare privata nell'intervallo orario mattutino compresa tra le ore 7:00 e le ore 8:00.

#### 9.4. Generazione della domanda di trasporto pubblico

Anche per questa operazione si è fatto uso della tecnica di creazione della domanda da matrice OD. La matrice impiegata è stata ricavata dalla medesima fonte utilizzata per le auto e dunque è stato necessario, anche in questo caso, eseguire un aggiornamento della stessa all'anno 2018. Siccome viene utilizzata unicamente per la creazione della popolazione virtuale avente l'autobus come modo di trasporto preferito, è stato sufficiente isolare le zone che descrivono spostamenti interni all'area di studio (per un totale di 16663 viaggi) e, utilizzando lo stesso comando impiegato per le matrici delle auto, procedere all'import della domanda applicando un parametro *Scale* pari a 1.055, dato che il tasso di crescita della popolazione reale all'interno all'area di studio è sempre del 5.5%, ricavando una nuova matrice caratterizzata da un totale di 17557 spostamenti.

Dopodichè sono stati generati la popolazione virtuale e i piani ad essa associati, fornendo in input al software gli stessi identici parametri di gestione già utilizzati precedentemente, secondo la tecnica illustrata nel paragrafo 2.3.1, dedicato all'approfondimento sul metodo di creazione della domanda per le varie modalità di trasporto.

La procedura è, pertanto, la medesima già richiamata nel paragrafo precedente ad esclusione della mancanza dell'assegnazione ad ogni persona di un veicolo, poiché avendo esse l'autobus come modo di trasporto preferito non necessitano, per il momento, di possedere altri mezzi.

Prima di proseguire nell'import della domanda di trasporto rimanente, si è deciso di eseguire un procedimento di assegnazione intermedia per cercare di distribuire in maniera più equa possibile i flussi di autoveicoli e motocicli su tutta la rete. Per fare ciò si è fatto uso della metodologia denominata *Dynamic User Equilibrium*, già descritta nella parte iniziale della trattazione, basata su 20 ripetizioni del processo di simulazioni iterative effettuate nell'intervallo temporale 25200-30000 s, comprendente l'ora di studio analizzata più ulteriori 20 minuti utili per consentire la conclusione dei viaggi iniziati verso la fine dell'ora, in modo che si riesca a determinare in maniera efficace il costo dei vari archi.

Tale procedimento ha portato alla modifica degli itinerari seguiti dagli automobilisti e motociclisti per molti viaggi, sia facenti parte della popolazione virtuale costruita per l'area di studio, sia rappresentanti la domanda esterna, riducendo notevolmente i fenomeni di congestione che si erano venuti a creare a seguito della prima assegnazione TON, realizzata secondo la tecnica del pre-routing.

Si fa presente che questa operazione è stata eseguita prima dell'import della domanda ciclabile in quanto l'algoritmo DUE, per come è attualmente configurato, consente la modifica degli itinerari seguiti dagli automobilisti e dai ciclisti, fatto che vuole essere ovviamente evitato perché vanificherebbe il processo di ricostruzione dei percorsi realmente effettuati dagli utenti tramite map matching, che invece rappresenta un punto focale nella creazione della popolazione. Sono invece stati inclusi nel procedimento iterativo gli autobus perché i loro itinerari non vengono modificati durante il processo e poiché, a differenza delle biciclette, costituiscono un importante ostacolo al deflusso veicolare privato contribuendo alla formazione di congestioni, che quindi devono essere considerati per ottenere una distribuzione dei flussi sufficientemente realistica.

## **9.5. Generazione della domanda ciclabile**

Questa fase si differenzia dalle precedenti perché la generazione della domanda si basa sulla ricostruzione dei percorsi seguiti dagli utenti reali, effettuata a partire dalle tracce GPS registrate in diversi database nell'ambito dell'European Cycling Challenge, tenutasi nel corso del mese di maggio 2016.

La tecnica del map matching è già stata ampiamente descritta nel corso dei precedenti paragrafi; in questo si concentrerà l'attenzione sul come è stata eseguita la generazione della domanda a partire dai tracciati ricostruiti.

Anche in questo caso, un po' come successo per le autovetture, si è pensato di suddividere la domanda in interna all'area di studio e "di fondo". Stavolta, però, risulta essere una operazione più complicata della precedente in quanto si ha la limitazione di dover mantenere il percorso seguito durante gli spostamenti interni esattamente uguale a quello ricostruito tramite map matching. Si è dunque fatto uso di uno speciale algoritmo in grado di isolare, tra le tracce selezionate dopo il filtro post matching, quelle che hanno origine e destinazione all'interno di una determinata zona, disegnata nel software e fatta coincidere con l'area di studio. Le tracce rimanenti sono poi state utilizzate per generare la popolazione virtuale avente la bicicletta come modalità di trasporto preferita tramite l'utilizzo dell'algoritmo *VpCreator*, governato dai parametri mostrati nella figura seguente.

Trips_Scale:	1.214
Mean Radius:	100.0 m
Standard Deviation Radius:	50.0 m
Activity Type At Orig.:	home
Activity Type At Dest.:	work
Vpcreator Selection Method:	<input checked="" type="checkbox"/>
Strategy:	bike
Vpcreator Selection Time:	<input checked="" type="checkbox"/>
Time Interval Start:	25200 s
Time Interval End:	28800 s
Delete Existing Virtual Population:	<input type="checkbox"/>

Figura 9.4 - Parametri *VpCreator*

Da notare la presenza di un parametro *Scale*, come nei casi precedenti, che però è stato ottenuto mediante analisi differenti. Esse sono incentrate sul confronto tra flussi misurati durante una approfondita campagna di rilievi tenutasi nel mese di maggio 2016 e flussi simulati dal software, durante la fascia oraria 8:30-10:30, in corrispondenza di un limitato numero di sezioni stradali, che consentono di rappresentare in maniera sufficientemente realistica la domanda di trasporto ciclabile su tutta la rete cittadina.

Quello che si è fatto, dunque, è stato ricercare un coefficiente moltiplicativo che si potesse applicare ai flussi simulati dal software, per ottenere una stima sufficientemente



precisa della reale domanda di trasporto ciclabile, dato che i percorsi ricostruiti tramite map matching rappresentano solo una piccola porzione di tutti gli utenti reali che utilizzano questo mezzo di trasporto.

Tale coefficiente è stato calcolato utilizzando la seguente relazione:

$$c = \frac{\sum_i (F_i \cdot P_i)}{\sum_i (P_i^2)}$$

dove  $F_i$  rappresenta il flusso medio orario misurato sulla  $i$ -esima sezione, mentre  $P_i$  indica i flussi simulati lungo l'arco coincidente con la sezione considerata, nell'intervallo di tempo fissato.

Si vuole, tuttavia, chiarire qualche aspetto legato alla metodologia utilizzata per ricavare queste due grandezze. Come è noto da lavori precedenti [16][24], i dati derivanti da rilievi manuali sono riferiti all'intervallo orario 8:30-10:30 e quindi comprendono tutti i ciclisti transitati anche pochi secondi dopo l'inizio di tale intervallo, ma che ovviamente hanno avviato il loro viaggio prima delle 8:30, ed escludono tutti quelli che, pur essendo partiti prima delle 10:30, non riescono a passare in corrispondenza della sezione di rilevazione prima di tale istante.

Meno noto, invece, è il funzionamento del software quando si tratta di isolare le tracce all'interno di un fissato intervallo temporale. Inserendo, all'interno della schermata di filtro post-matching, come estremi temporali mattutini i valori 8.5 e 10.5, il software considererà unicamente i viaggi che sono stati avviati dopo le 8:30 e prima delle 10:30, escludendo quindi dal conteggio dei flussi tutti quegli spostamenti che transitano dalla generica sezione di rilevazione, pochi istanti dopo l'inizio dell'intervallo e comprendendo invece quelli che vi passano molto tempo oltre la fine, ma il cui viaggio è iniziato all'interno della fascia oraria considerata.

Per cercare di ricondurre i dati derivanti dalla simulazione ad una condizione il più possibile simile a quella in cui si sono svolti i rilievi manuali e strumentali, si è deciso di anticipare l'intervallo temporale di qualche minuto. Per capire l'entità di questa anticipazione ci si è basati sulla stima della durata media di tutti i viaggi ricostruiti rispettando determinati valori di *length index* e *distance error*, rispettivamente pari a 80-120% e 15 m. Da una analisi approfondita è emerso che la durata media di tali spostamenti risulta essere pari a 1204 secondi, cioè 20 minuti. Ipotizzando che, in media, la sezione di rilevazione sia posizionata circa al centro dell'itinerario, si può assumere che l'utente medio transiti in corrispondenza di esso dopo 10 minuti dall'inizio del suo viaggio.

Pertanto, si è deciso di anticipare l'intervallo orario considerato per l'estrazione degli itinerari ricostruiti di 10 minuti esatti, utilizzando: 8:20-10:20.

Eseguendo il confronto utilizzando i dati descritti, si è ottenuto un parametro moltiplicativo  $c$  pari a 1.38. Come si può facilmente osservare dalla figura precedente, tuttavia, tale numero non coincide con il valore riportato all'interno del campo *Scale*.

Questo perché, il parametro  $c$ , non è altro che un coefficiente che ha lo scopo di trasformare il numero di viaggi ricostruiti che transitano per la generica sezione, all'interno della fascia oraria considerata, durante tutto il mese di maggio, in un flusso medio bi-orario giornaliero confrontabile con il valore ottenuto a seguito dei conteggi manuali o strumentali nella stessa sezione.

Per ottenere il parametro *Scale* questo coefficiente deve essere corretto tramite due ulteriori indici: il primo è un semplice x2 che permette di ricavare il flusso medio orario giornaliero, mentre il secondo è un valore che consente di trasformare i flussi rilevati nell'intervallo 8:20-10:20 in quelli relativi all'orario 7:00-8:00. Esso si ricava dal rapporto tra il numero complessivo di itinerari ricostruiti dal software per ciascuno dei due intervalli orari, rispettivamente pari a 2505 e 1104, per un coefficiente riduttivo di 0.44.

Effettuando una semplice moltiplicazione di questi 3 valori si ricava il parametro utilizzato per scalare i flussi all'interno dell'algoritmo *VpCreator*, ossia 1.214.

Si può inoltre notare la presenza di due campi denominati *Time Interval Start* e *Time Interval End* che vengono usati per fissare l'intervallo da cui estrarre casualmente l'orario di inizio del generico viaggio, nonostante esso sia stato effettuato in un momento della giornata differente, proprio per riuscire a ricostruire la domanda per la fascia oraria d'interesse.

Una volta che l'algoritmo *VpCreator* ha concluso il procedimento sarà possibile osservare, nella tabella relativa alla popolazione virtuale, la presenza di nuove persone a cui è già stata assegnata una bicicletta e un piano basato su tale strategia.

Per quanto riguarda la generazione della "domanda di fondo" sono stati sfruttati sempre gli itinerari ricostruiti tramite map matching, ma questa volta per realizzare una matrice origine-destinazione per tutti quegli spostamenti che hanno avuto origine o destinazione all'esterno dell'area di studio.

Per effettuare questa operazione si è fatto uso di un apposito comando:

*Plugins* → *Mapmatching* → *Demand Generation* → *Zone to zone demand generation*

che richiede in input l'intervallo orario da analizzare (8:20-10:20), la tipologia di attività d'origine e di destinazione (rispettivamente *Home* e *Work*) e il tipo di veicolo a cui fare riferimento (in questo caso la bicicletta).

La matrice che si ricava presenta tutte le zone riportate all'interno dello scenario, ed ha quindi un lato costituito da 177 elementi, da cui vengono rimosse, tramite algoritmo esterno, tutte quelle interne all'area di studio, già utilizzate per generare la popolazione virtuale. Ciò che rimane viene importato all'interno di SUMOPy con lo stesso comando già utilizzato per autovetture e autobus, imponendo gli stessi valori per gli indici di gestione ad eccezione del parametro *Scale* per cui viene utilizzato il coefficiente ricavato per la popolazione virtuale, cioè 1.214.

Da tale matrice si potranno generare i viaggi e gli itinerari che costituiscono la domanda ciclabile di fondo tramite il solito comando, già utilizzato anche per le autovetture:

*Demand* → *Zone to Zone demand* → *Generate trips from flows...*

In questo caso viene ignorato il percorso ricostruito in precedenza e per collegare l'arco di origine con quello di destinazione si utilizza la metodologia del pre-routing.

Così si conclude la generazione della domanda ciclabile, costituita da 2424 persone virtuali più circa 600 viaggi di fondo.

## 9.6. Generazione della domanda pedonale

L'ultima categoria per cui importare la domanda riguarda i pedoni. Per essi si è tornati a fare riferimento alle matrici origine-destinazione fornite dal 14° Censimento della Popolazione e delle Abitazioni svolto dall'Istat nel corso del 2001.

Siccome non è presente una matrice unicamente dedicata ai pedoni ma solamente una mista sotto la voce "altro", in cui si è dedotto fossero compresi tutti gli spostamenti a piedi e in bici, dato che per tutti gli altri mezzi di trasporto (autobus, treno, auto, moto) era presente una tabella dedicata, è stato necessario eseguire una rapida manipolazione.

Tramite un algoritmo esterno sono state, innanzitutto, escluse tutte le zone esterne all'area di studio poiché si è ritenuto sufficiente creare i pedoni per la popolazione virtuale e non anche per una domanda di fondo che comunque non avrebbe influito particolarmente sulla simulazione, e poi è stato fatto un ragionamento riguardante la lunghezza degli spostamenti compiuti. In particolare, si è fatta l'ipotesi che qualora i centroidi di due zone fossero situati ad una distanza in linea d'aria inferiore a 1.5 km, tutti gli spostamenti effettuati tra le due sarebbero stati effettuati a piedi, mentre nel caso di distanza superiore: in bicicletta. Chiaramente questa ipotesi risulta essere molto forte

perché potrebbero esserci persone che effettuano uno spostamento a piedi anche di lunghezza superiore a 1.5 km, così come molti spostamenti di lunghezza inferiore potrebbero essere effettuati in bicicletta; si è tuttavia supposto, in assenza di dati aggiuntivi, che tali spostamenti si equilibrassero e quindi che tale ipotesi fosse tutto sommato realistica.

All'interno della matrice sono quindi state mantenute solo coppie origine-destinazione interne all'area di studio e la cui distanza in linea d'aria tra i centroidi non fosse superiore a 1.5 km, per un totale di 12626 spostamenti.

Il procedimento successivo ricalca in tutto e per tutto quanto già illustrato per i modi di trasporto precedenti e quindi: aggiornamento all'anno 2018 con coefficiente pari a 1.055, import della matrice all'interno del software, generazione della popolazione virtuale, a partire da essa, avente come modo di trasporto preferito la camminata (costituita da 13320 elementi) e dei piani associati.

## **9.7. Creazione dei piani alternativi**

Questo lunghissimo procedimento ha portato alla creazione dell'intera popolazione virtuale abitante l'area di studio individuata, dando vita, come diretta conseguenza, ad una ripartizione modale di partenza su cui basare l'intero studio. Essa risulta essere così suddivisa:

- 30.50% automobile;
- 30.89% trasporto pubblico;
- 4.26% bicicletta;
- 23.44% pedoni;
- 10.91% motocicli.

Tale distribuzione ricalca in maniera piuttosto soddisfacente i dati forniti dalla città metropolitana di Bologna [28] (riportati nella figura 9.5), ricalcolati in base alle 5 modalità di trasporto considerate, poiché in essi era presente anche le modalità auto (passeggero), utilizzata dal 7.2% della popolazione, che causava una generale riduzione della ripartizione modale.

Il passo successivo per il completamento della costruzione dello scenario consiste nell'attribuzione di veicoli (automobili, biciclette e motocicli) a tutte le persone della popolazione virtuale rispettando alcune percentuali di possesso, ottenute anch'esse dal sito della città metropolitana [25], da cui è emerso che il 53% delle persone possiede

almeno un'auto, il 20% un motociclo e che il 40% delle persone è proprietaria di una bicicletta.

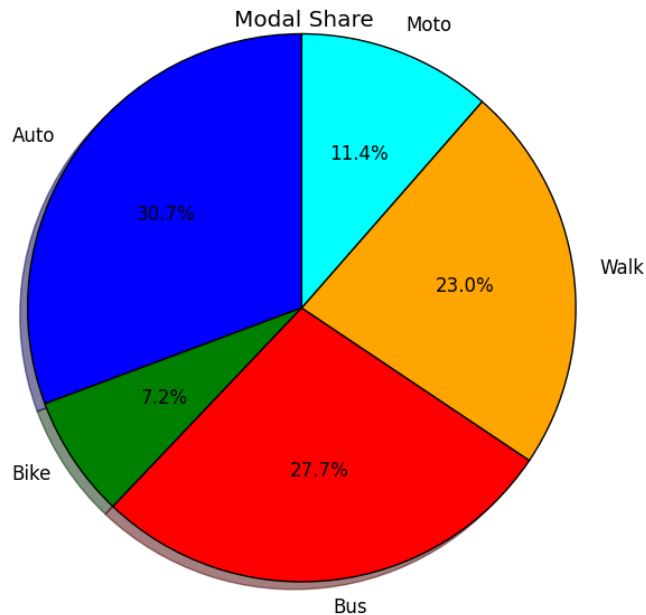


Figura 9.5 - Ripartizione modale nel comune di Bologna fornita dal PGTU 2007

Tramite il *Vehicle Provider* sono quindi stati assegnati questi veicoli in maniera casuale, tenendo però in considerazione che quota parte di tali percentuali erano già state assegnate durante la creazione della popolazione. Dunque, sono state attribuite solamente le percentuali di mezzi mancanti, escludendo dalle possibili persone destinatarie tutte quelle possedevano già un veicolo di quel tipo.

Per chiarire il concetto si propone un esempio: si ipotizzi, su una popolazione di 100 persone, che 30 abbiano come modo di trasporto preferito l'auto e quindi un unico piano che viene portato a termine con il mezzo che gli è stato assegnato; se viene avviato un procedimento di assegnazione delle auto in modo che il 50% della popolazione ne possieda una, esso andrà ad assegnare soltanto 20 ulteriori vetture a 20 persone estratte casualmente tra le 70 che non disponevano già di tale veicolo.

Dopodichè sono stati creati tutti i "possibili" piani utilizzabili dalle varie persone virtuali per portare a compimento il proprio spostamento, che non fossero basati sul *preferred mode* precedentemente assegnato. Per fare ciò si è fatto uso del comando:

*Demand* → *Virtual Population* → *Plans* → *Generate plans*

in cui è stato attivato il *New Planner Method*, che consente di creare i piani associati ad una certa strategia per tutte quelle persone che possono utilizzarla (nel caso della strategia auto, bici o moto, devono possedere uno di questi due veicoli, mentre le

strategie bus o camminata sono sempre considerate possibili) ma che non vedono tale strategia come la preferita.

Si fa presente che, durante la creazione dei piani pedonali mancanti, nella apposita finestra (Fig. 9.3), è stato attivato il *Walk Filter* con un parametro *Max Distance Facilities* pari a 1800 m. Esso consente di creare i piani pedonali per tutte le persone che ancora non lo avevano all'interno dell'elenco di quelli possibili, ma la cui distanza in linea d'aria tra edificio di origine ed edificio di destinazione risulti inferiore a quella stabilita. Questo poichè pare ovvio che una persona che deve eseguire uno spostamento di più di 2 km di lunghezza, difficilmente scelga di effettuarlo a piedi e quindi non gli si da neanche la possibilità di provare tale alternativa.

Al termine di tale operazione sono stati ottenuti, in aggiunta ai piani preesistenti:

- 13923 piani auto, per un totale di 31260;
- 39280 piani autobus, per un totale di 56837;
- 20310 piani bicicletta, per un totale di 22734;
- 5168 piani moto, per un totale di 11367;
- 12467 piani camminata, per un totale di 25787.

Sono, dunque, stati creati complessivamente 147985 piani di trasporto, distribuiti su una popolazione virtuale composta da 56837 persone, ciascuna avente un modo di trasporto preferito, coincidente con la prima strategia di mobilità utilizzata.

Infine, l'operazione che ha concluso la creazione dello scenario è rappresentata dalla selezione, tra tutti i piani disponibili per ogni persona, di quello associato al metodo di trasporto preferito, tramite il comando:

*Demand* → *Virtual Population* → *Plans* → *Select current plans* → *Plan with preferred mode*

in modo da poter avviare il procedimento di prova di tutti i piani creati, mantenendo costante la ripartizione modale tra iterazioni successive, mediante l'algoritmo *Exchange-Plans*, che verrà presentato nel prossimo capitolo.

## 10. ALGORITMO EXCHANGE-PLANS

---

Allo scopo di consentire a tutte le persone facenti parte della popolazione virtuale creata di provare tutte le possibili strategie di trasporto disponibili per poi selezionare la migliore in base ai diversi criteri che verranno illustrati nel seguito, è stato necessario creare un algoritmo che consenta di selezionare uno dei tanti piani di viaggio associati alle diverse strategie di trasporto utilizzabili dalla generica persona considerata.

Con la dicitura “possibile” si intende una strategia che possa essere eseguita dalla generica persona presa in esame, per esempio la strategia camminata e la strategia trasporto pubblico saranno sempre *possibili*, perché non richiedono il possesso di un mezzo, diversamente da quanto accade per le strategie automobile, bicicletta e motociclo per cui è di fondamentale importanza che le persone possiedano il veicolo per poterle utilizzare. Caratteristica fondamentale richiesta a tale algoritmo era quella di fare in modo che ad ogni iterazione fosse mantenuta la ripartizione modale introdotta all’inizio del procedimento. La motivazione risiede nel fatto che i tempi di viaggio effettivi, ottenuti al termine delle simulazioni, devono essere tutti associati alle medesime condizioni di traffico, cioè a scenari in cui il numero di veicoli di ogni categoria sia sempre costante, altrimenti si potrebbero avere dei valori inferiori o superiori rispetto a quelli misurati nelle altre iterazioni, proprio a causa della scarsa o eccessiva presenza di persone utilizzando una certa strategia.

### 10.1. Metodo sequenziale

Per la realizzazione dell’algoritmo si è, inizialmente, proceduto con l’impiego di un metodo sequenziale all’interno del quale i vari piani di viaggio venivano assegnati alle persone della popolazione virtuale in un certo ordine prestabilito. In particolare, i primi piani assegnati erano quelli relativi alla strategia auto, seguiti da quelli legati alle strategie bici e moto ed infine da bus e pedoni. La particolarità di questo metodo riguarda il fatto che come primo passo veniva estrapolata, dal database contenente tutti i dati relativi ai singoli utenti, la lista delle persone in grado di utilizzare la strategia indicata (quindi tutti i proprietari di un’automobile, di un motociclo o di una bicicletta), da cui veniva estratto, casualmente, un numero di elementi pari alla ripartizione modale della strategia in esame. Ad essi veniva assegnato il piano collegato e infine erano rimossi dall’elenco di tutte le persone analizzate, passando poi alla strategia successiva. È immediato comprendere perché le strategie camminata e trasporto pubblico fossero le

ultime dell'elenco, ovvero poiché tutti gli elementi della *Virtual Population* possono utilizzare tali strategie, dato che non richiedono il possesso di alcun tipo di mezzo. Queste ultime, in pratica, venivano utilizzate per riempire i buchi lasciati dalle prime tre strategie. Inoltre, la presenza di persone sprovviste di qualunque mezzo ha spinto a lasciarle come ultime, in quanto non si poteva rischiare che alcuni utenti, proprietari di un mezzo, occupassero un posto tra i piani basati sulle strategie autobus o pedone, che invece dovevano essere ad essi garantiti.

Il maggior problema di questo metodo, tuttavia, è legato alla grande dipendenza dalla ripartizione modale imposta. È chiaro che se il 50% degli utenti, ad ogni iterazione della simulazione, dovesse utilizzare la bicicletta e solo il 20% l'auto, si potrebbe venire a creare una situazione simile a quella appena descritta ovvero che, siccome per primi vengono assegnati i piani associati alla strategia auto, a qualche utente proprietario sia di auto che di bici potrebbe essere assegnato il piano auto, facendo sì che non si riesca a raggiungere un numero di piani bici (assegnati per secondi) pari a quello necessario per rispettare la ripartizione modale richiesta. Chiaramente lo stesso ragionamento vale anche nel caso in cui le strategie camminata e trasporto pubblico abbiano delle ripartizioni modali superiori alle altre. Un ulteriore problema è quello legato alla velocità di convergenza. Con il metodo appena illustrato sarebbero necessarie un elevatissimo numero di iterazioni (circa 50) per fare in modo che tutti i piani vengano utilizzati almeno una volta. Ovviamente questo si ripercuoterebbe sull'efficienza dell'algoritmo, specialmente sui tempi di calcolo, e dunque ha obbligato a cercare soluzioni alternative.

## 10.2. Metodo dello scambio dei piani

Per risolvere tale problematica si è dunque pensato di eseguire uno scambio di piani tra persone della popolazione virtuale aventi le stesse strategie tra quelle disponibili.

Per chiarire il concetto: si consideri la *persona1*, dotata di 4 piani di viaggio (auto, bici, bus e camminata, dei quali è già stato utilizzato soltanto il primo, che risulta essere anche quello attivo) e la *persona2*, dotata di 3 piani di viaggio (auto, bus e camminata, con solo l'ultimo utilizzato e attivo). Con questo nuovo metodo, l'idea è quella di scambiare i piani alle persone, mantenendo dunque invariata la ripartizione modale e quindi far sì che, nell'esempio proposto, al termine della prima iterazione, la *persona1* abbia come piano attivo quello legato alla strategia camminata, mentre la *persona2* abbia quello legato alla strategia auto.



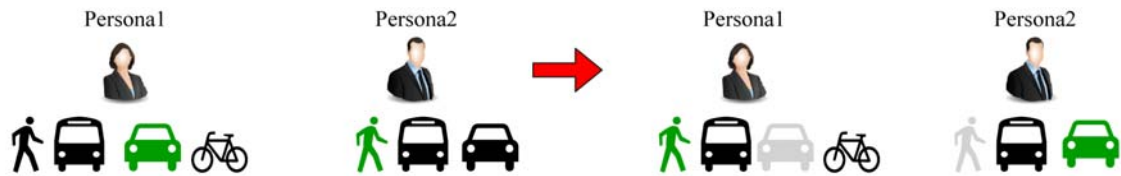


Figura 10.1 - Funzionamento scambio piani

Ovviamente ad ogni iterazione vengono scambiati tutti i piani possibili tra le varie coppie di strategie considerate (nel caso in esame 10: camminata-auto, camminata-bici, camminata-bus, camminata-moto, auto-bici, auto-bus, auto-moto, bici-bus, bici-moto, bus-moto) in quantità pari al numero minimo di piani inutilizzati associati a una delle due strategie formanti la coppia. Tradotto mediante un secondo esempio: ipotizziamo che la prima coppia di strategie sia camminata-auto. Le persone utilizzando il piano camminata siano 10, delle quali 7 possedenti un'auto (ma solo 5 che ancora non hanno provato il piano legato a tale strategia, cioè 2 utenti l'hanno già utilizzata), siano poi 15 le persone utilizzando il piano auto, tutte in grado di utilizzare il piano camminata (ma solamente 8 che ancora non l'hanno provato). Si può capire se un certo piano è già stato utilizzato o meno dal tempo effettivo ad esso associato nel database dei piani: se è nullo significa che esso non è ancora stato utilizzato, altrimenti sì. Nel caso ipotizzato, dunque, verranno scambiati solamente 5 piani (pari al minimo numero di piani inutilizzati associati alla strategia non corrente) e quindi i 5 pedoni che non avevano ancora usato l'auto diventeranno automobilisti, mentre altri 5 rimarranno pedoni; viceversa 5 automobilisti che non avevano ancora provato la strategia camminata (estratti casualmente tra gli 8) diventeranno pedoni e altri 10 rimarranno automobilisti, mantenendo invariata la ripartizione modale.

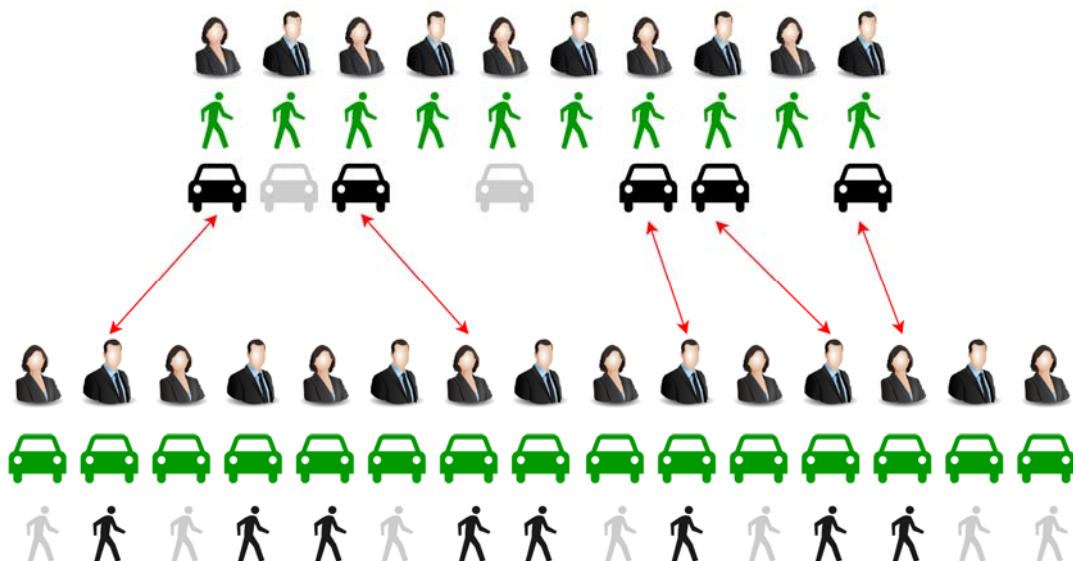


Figura 10.2 – Illustrazione dell'esempio di scambio piani

Questi scambi sono stati fatti eseguire per ogni coppia di strategie, per ogni iterazione (sempre nel medesimo ordine), allo scopo di fare annullare il numero di piani inutilizzati nel minor numero possibile di ripetizioni. Tuttavia, l'obiettivo non veniva mai raggiunto, col numero di piani rimasti inutilizzati che dopo qualche iterazione tendeva asintoticamente ad un valore circa pari a 1/3 dei piani complessivi.

Una prima miglioria introdotta per cercare di ottimizzare l'algoritmo fu quella di fare in modo che venissero scambiati tutti i piani scambiabili tra le 2 strategie, anche se alcuni di essi fossero già stati utilizzati. Nell'esempio precedente, dunque, tutti e 7 i pedoni che possiedono una vettura diventano automobilisti, mentre solo 7 dei 15 automobilisti diventano pedoni (questi 7 sono estratti casualmente tra gli 8 che non avevano mai usato tale strategia).

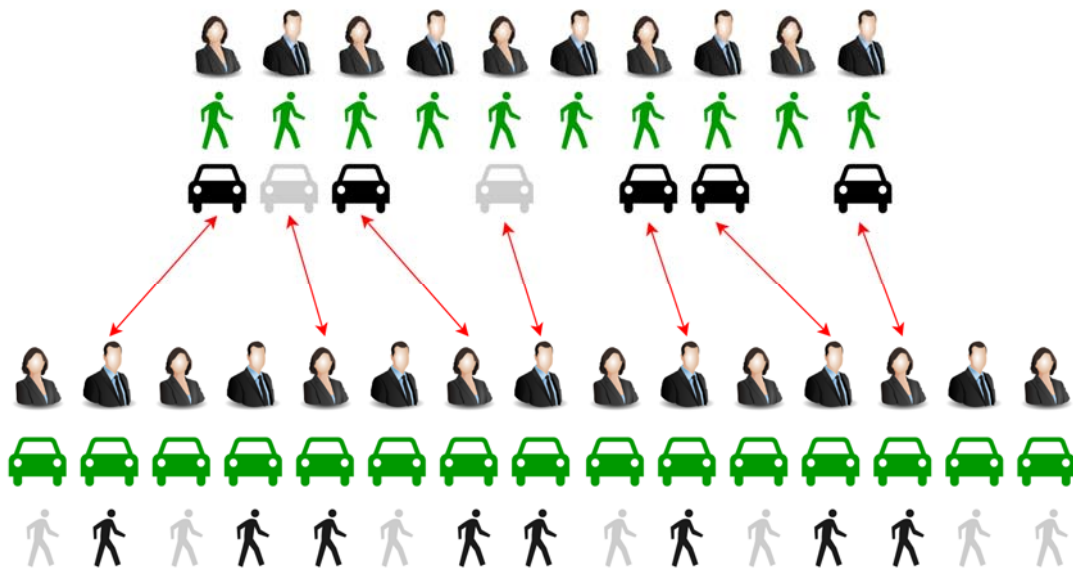


Figura 10.3 – Illustrazione della variante dell'esempio di scambio piani

In questo modo, mantenendo il medesimo ordine delle coppie di strategie, il numero di piani inutilizzati tende a ridursi progressivamente fino a raggiungere l'annullamento dopo circa 40 iterazioni.

Tuttavia, anche questa metodologia è risultata troppo lenta e inefficiente per raggiungere in maniera ottimale la convergenza.

Si è dunque pensato di implementare una ulteriore miglioria: questa si basava sul forzare, una volta che il numero di piani inutilizzati fosse stato circa pari al 20% del totale (soglia in genere raggiunta dopo una decina di iterazioni), la costituzione della ripartizione modale, utilizzando il primo metodo esposto, quello sequenziale. In sintesi, raggiunto un numero di piani inutilizzati pari al 20%, si interrompeva la procedura di scambio di piani, troppo lenta per essere considerata efficiente, e si faceva in modo che i

piani scelti dalle varie persone costituenti la popolazione virtuale fossero esattamente quelli inutilizzati. Chiaramente, se il numero di piani inutilizzati associati ad una certa strategia fossero risultati insufficienti per il raggiungimento della ripartizione modale, essa sarebbe stata completata da piani associati alla medesima strategia già utilizzati in precedenza, estratti in maniera casuale. Le persone a cui era stato assegnato un piano venivano rimosse dall'elenco e si proseguiva assegnando i piani associati alla strategia successiva. Tale metodo era in grado di garantire una rapida convergenza (in un paio di iterazioni aggiuntive a quelle necessarie per il raggiungimento della soglia del 20% citata in precedenza), ma risultava troppo specifico per il caso in esame e fortemente influenzato dalla ripartizione modale.

Si è dunque deciso di continuare a percorrere la strada degli scambi di piano, provando a modificare l'ordine delle coppie di strategie da scambiare. In primis sono state ordinate in base al numero di piani totali associati alla coppia di strategie, poi in base alla ripartizione modale complessiva della coppia di strategie (in entrambi i casi sia in ordine crescente sia decrescente), senza però ottenere alcun risultato soddisfacente.

Come ultimo tentativo è stato utilizzato un ordine random delle coppie di strategie per ogni iterazione, pertanto le 10 coppie di strategie da scambiare sono state ordinate in maniera casuale ad ogni ripetizione del ciclo di assegnazione dei piani.

Quest'ultimo caso ha portato a un notevole miglioramento della velocità di convergenza che si è ridotta da circa 40 iterazioni a un numero variabile tra le 15 e le 25, senza essere però influenzato dalla ripartizione modale come il metodo precedente.

Grazie a questa nuova formulazione è dunque possibile fare in modo che tutti gli utenti appartenenti alla popolazione virtuale dello scenario generato provino tutte le strategie disponibili per eseguire gli spostamenti previsti durante l'ora di punta del mattino, facendo registrare, per ciascuna di esse, un tempo effettivo di completamento che, al termine del processo iterativo, verrà confrontato con quello rilevato per le altre strategie a disposizione per individuare quello che produce l'utilità maggiore, a parità di ripartizione modale. Questa strategia sarà quella che il generico utente prediligerà per eseguire il proprio spostamento.

Di seguito viene riportato un diagramma di flusso che riassume le fasi di funzionamento dell'algoritmo di scambio dei piani e una sintetica spiegazione dello stesso.

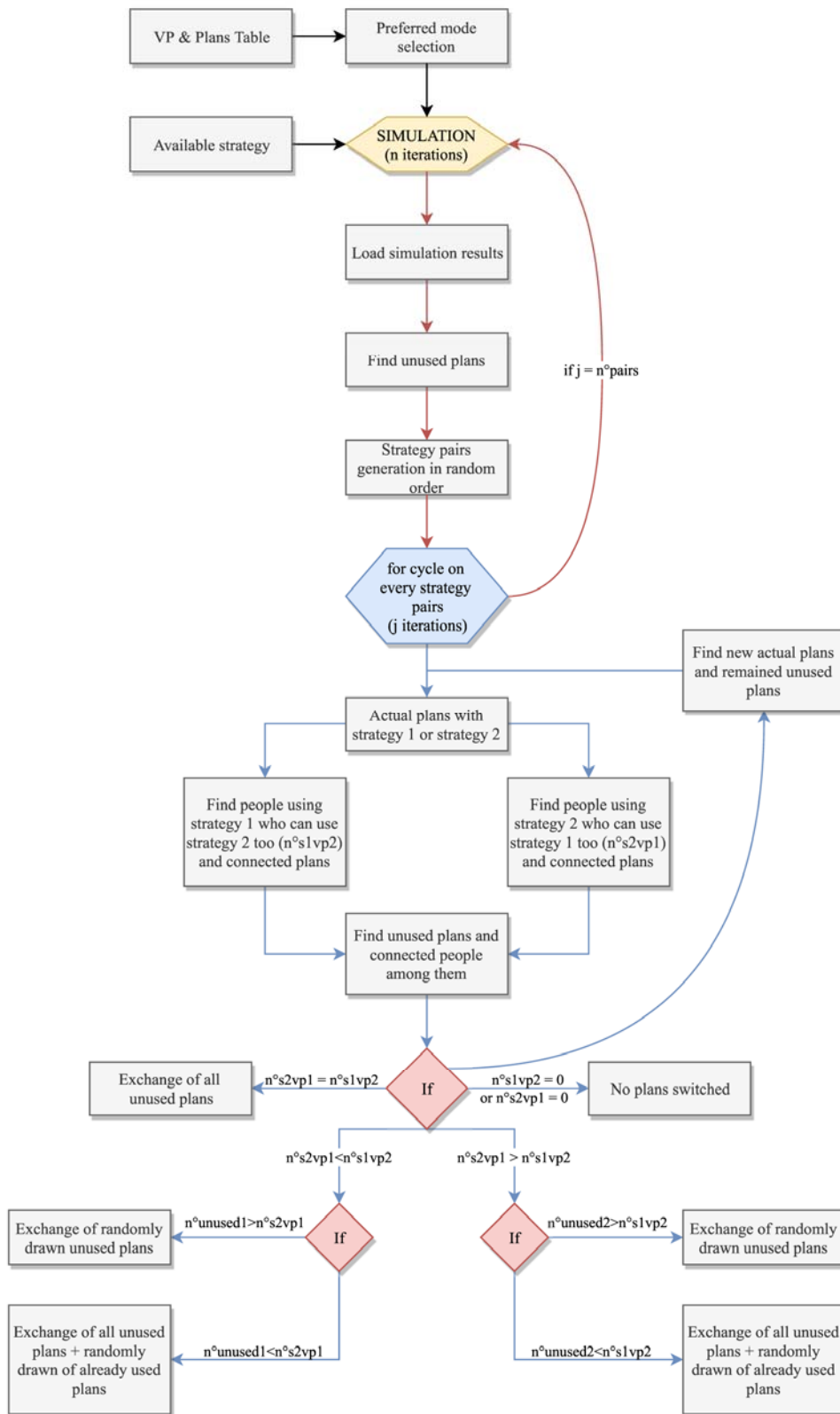


Figura 10.4 - Diagramma di flusso algoritmo scambio di piani

I dati di input dell'algoritmo sono la popolazione virtuale e la tabella dei piani creati per ogni persona e per ciascuna strategia possibile, seguendo le metodologie descritte nel corso del capitolo 9. Come passo iniziale viene eseguita una prima selezione dei piani basandosi sul metodo del mezzo preferito; essi vengono poi utilizzati come base della

prima di  $n$  (parametro fornito in input dall'utilizzatore del software) simulazioni. Al termine della simulazione vengono caricati i risultati della stessa contenenti i dati relativi ai tempi effettivi di viaggio necessari per completare ciascun piano.

Dalla tabella globale dei piani è possibile individuare quali siano già stati utilizzati e quali no, grazie alla colonna denominata *effective time* in cui viene riportato il tempo richiesto, durante la simulazione, per portare a compimento il piano associato. Se tale tempo fosse nullo allora quel piano risulterebbe non ancora utilizzato.

Dopodichè viene generata una lista contenente tutte le possibili coppie di strategie tra cui scambiare i piani, secondo le modalità descritte in precedenza, ordinate in maniera casuale al termine di ogni simulazione eseguita. Su questa viene avviato un ciclo *for* per ogni coppia di strategie (quindi nel caso considerato 10 iterazioni) all'interno del quale vengono eseguiti diversi passaggi illustrati nel seguito: prima di tutto viene estratto l'elenco di tutti i piani attualmente in uso per entrambe le strategie costituenti la coppia considerata e le persone ad essi associate. Tra queste persone vengono poi individuate coloro che tra i piani disponibili presentano anche quello dell'altra strategia della coppia considerata e non unicamente quello attualmente in uso; da questa sottolista, infine, vengono estratte le persone che ancora non hanno utilizzato il piano dell'altra strategia e inserite, insieme ai piani associati, in un nuovo vettore.

A questo punto viene avviato un ciclo *if* per riconoscere in quale delle numerose casistiche che possono verificarsi, ricada la generica iterazione  $i$  della  $j$ -esima simulazione. Di seguito vengono elencate le varie casistiche riscontrabili:

- Se il numero delle persone attualmente utilizzanti la strategia 1 e che può impiegare anche la strategia 2 (o viceversa) è pari a 0: nessun piano viene scambiato tra le due strategie;
- Se il numero delle persone attualmente utilizzanti la strategia 1 e che può impiegare anche la strategia 2 ( $n^{\circ}s2vp1$ ) è maggiore del numero di persone attualmente utilizzanti la strategia 2 e che può impiegare anche la strategia 1 ( $n^{\circ}s1vp2$ ): esistono due sottocasi:
  - Se il numero di persone attualmente utilizzanti la strategia 2 e che può impiegare anche la strategia 1 è minore del numero di piani inutilizzati (e quindi scambiabili) associati alla strategia 2: vengono scambiati  $n^{\circ}s1vp2$  piani estratti casualmente dal vettore dei piani inutilizzati;
  - Se il numero di persone attualmente utilizzanti la strategia 2 e che può impiegare anche la strategia 1 è maggiore del numero di piani inutilizzati

(e quindi scambiabili) associati alla strategia 2: vengono scambiati tutti i piani inutilizzati associati alla strategia 2 e poi vengono aggiunti dei piani già utilizzati dalle persone che attualmente hanno in uso la strategia 1, estratti casualmente dall'elenco delle persone che possono usare entrambe le strategie confrontate.

Nel caso opposto vale lo stesso ragionamento, ovviamente invertendo le strategie in uso e quelle da scambiare.

- Se il numero delle persone attualmente utilizzanti la strategia 1 e che può impiegare anche la strategia 2 è esattamente uguale al numero di persone attualmente utilizzanti la strategia 2 e che può impiegare anche la strategia 1: vengono scambiati tutti i piani inutilizzati di entrambe le strategie in maniera reciproca, pertanto tutti gli utenti che utilizzavano la strategia 1 diventano utilizzatori della strategia 2 e viceversa.

Terminato il procedimento di scambio piani per tutte le coppie di strategie, l'algoritmo esegue una nuova simulazione e ripete nuovamente tutta la sequenza di operazioni appena descritte per un numero di volte pari al numero di iterazioni che si vogliono eseguire affinché tutti i piani creati vengano utilizzati almeno una volta (in genere sono sufficienti una ventina di ripetizioni).

## 11. FUNZIONE DI UTILITÀ

---

Concluso il procedimento di scambio dei piani (dopo 22 iterazioni dell'algoritmo *Exchange-Plans*), che ha consentito a tutte le persone facenti parte della popolazione virtuale di provare tutte le possibili strategie a loro disposizione per eseguire il proprio spostamento, si ottiene un file contenente un elevato numero di informazioni sulle caratteristiche di ognuno di questi piani, ciascuno svolto nelle medesime condizioni di ripartizione modale, la cui più rilevante risulta essere il tempo di viaggio effettivo.

Su tale parametro si concentreranno tutte le analisi seguenti, volte a determinare i coefficienti che caratterizzano la funzione di utilità che verrà associata a ciascun modo di trasporto.

### 11.1. Procedimento

Come accennato all'interno del capitolo 2, la generica persona reale residente in una qualunque città del mondo, per scegliere il modo di trasporto e l'itinerario da utilizzare per il proprio viaggio, effettua delle valutazioni basate sull'utilità prodotta da ciascuna alternativa che ha a disposizione. In particolare, considera il tempo necessario per completare lo spostamento, il costo monetario del trasferimento (per esempio legato al biglietto dell'autobus oppure alla tariffa di parcheggio e al consumo di carburante dell'auto), il costo legato al possesso di un veicolo (costo iniziale, manutenzione, assicurazione, tasse) e altre caratteristiche che possono far preferire o svantaggiare un certo modo di trasporto rispetto agli altri, riassunte nella Tabella 11.1.

Per tenere in considerazione tutte queste caratteristiche all'interno di un modello statistico-matematico in cui ogni persona è rappresentata da una sua controparte virtuale, è necessario costruire delle funzioni di utilità che schematizzino nella maniera più realistica possibile il comportamento dei vari utenti della rete stradale.

In generale, la funzione di utilità presenta una forma piuttosto complessa per considerare tutti gli elementi che potrebbero influenzare le scelte eseguite dalla generica persona, come descritto nel paragrafo 2.3.4. Nella presente trattazione, tuttavia, si è deciso di semplificare il problema e ricondurre tale funzione ad una forma piuttosto elementare:

$$f_U = \alpha - \beta \cdot t_{eff}$$

dove:

- Il coefficiente  $\alpha$  rappresenta una sintesi di tutti gli elementi contenuti nella Tabella 11.1, sia tra i pro che tra i contro, risulta essere differente per ciascuno dei 5 modi di trasporto ed esprimibile come un guadagno monetario, quindi in €;
- Il parametro  $\beta$ , invece, indica il valore monetario del tempo (VOT [€/min]) con cui si va a moltiplicare il tempo effettivo necessario per completare il viaggio  $t_{eff}$ , espresso in minuti; tale parametro è sempre il medesimo per ogni strategia.

L'obiettivo è, dunque, quello di riuscire a stimare i 5 coefficienti  $\alpha$  (uno per ogni modo di trasporto) e il parametro  $\beta$  in modo che la funzione di utilità riesca a rappresentare le scelte effettuate dalla popolazione reale nel modo più veritiero possibile.

	<b>PRO (rispetto a...)</b>	<b>CONTRO (rispetto a...)</b>
<b>AUTO (A)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Privacy (TPL)</li> <li>• Poca fatica (B, C)</li> <li>• Elevata velocità di punta</li> <li>• Climatizzazione a piacere</li> <li>• Elevate percorrenze (B, C, M)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condizionamento del traffico (B, C, M)</li> <li>• Bassa velocità media in città (B, M)</li> <li>• Necessità di cercare parcheggio</li> <li>• Stress da traffico (B, C)</li> <li>• Costi elevati</li> <li>• Emissioni inquinanti</li> </ul>
<b>BICICLETTA (B)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevata velocità media (TPL, A)</li> <li>• Spostamento door-to-door (TPL, A)</li> <li>• Attività fisica</li> <li>• Impatto zero (TPL, A, M)</li> <li>• No stress da traffico (A, M)</li> <li>• Costi contenuti (TPL, A, M)</li> <li>• Accesso ZTL (A)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esposizione meteorologica (TPL, A)</li> <li>• Fatica</li> <li>• Utenti deboli su strada (TPL, A)</li> <li>• Esposizione allo smog (TPL, A)</li> </ul>
<b>AUTOBUS (TPL)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevata velocità di punta (B, C)</li> <li>• Minor inquinamento (A, M)</li> <li>• No esposizione meteorologica (B, C, M)</li> <li>• Costi contenuti (A, M)</li> <li>• Accesso ZTL (A)</li> <li>• Poca Fatica (B, C)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sovraffollamento</li> <li>• Condizionamento del traffico (B, C, M)</li> <li>• Sosta alle fermate</li> <li>• Spostamento non door-to-door (B,C,M)</li> <li>• Bassa velocità media in città (B, M)</li> <li>• Orari prefissati</li> </ul>
<b>MOTO (M)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Privacy (TPL)</li> <li>• Poca fatica (B, C)</li> <li>• Elevata velocità media e di punta</li> <li>• Accesso ZTL (A)</li> <li>• Spostamento door-to-door (TPL, A)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esposizione meteorologica (TPL, A)</li> <li>• Utenti deboli su strada (TPL, A)</li> <li>• Stress da traffico (B, C)</li> <li>• Esposizione allo smog (TPL, A)</li> <li>• Costi non trascurabili (TPL, B, C)</li> <li>• Emissioni inquinanti (TPL, B, C)</li> </ul>
<b>CAMMINATA (C)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impatto zero (TPL, A, M)</li> <li>• No stress da traffico (A, M)</li> <li>• Attività fisica (TPL, A, M)</li> <li>• Spostamento door-to-door (TPL, A)</li> <li>• Zero costi</li> <li>• Accesso ZTL (A)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fatica (TPL, A, M)</li> <li>• Esposizione meteorologica (TPL, A)</li> <li>• Utenti deboli su strada (TPL, A)</li> <li>• Esposizione allo smog (TPL, A)</li> </ul>

Tabella 11.1 – Pro e Contro di ciascun modo di trasporto



A tale scopo, è stato implementato nel codice del software SUMOPy un algoritmo che fosse in grado di selezionare il piano con l'utilità maggiore, in funzione dei 6 parametri forniti in input.

Il suo funzionamento è piuttosto semplice e riassumibile come segue: dallo scenario analizzato viene estratto il vettore dei tempi esecutivi associati ad ogni piano provato (quindi con valore non nullo) dalla singola persona e, dopo avergli assegnato un "rumore" del tutto casuale che rappresenta l'aleatorietà della congestione stradale, mediante un ciclo *for* ne valuta l'utilità tramite la funzione introdotta basandosi, appunto, sul VOT e sulle 5 differenti costanti inserite, selezionando quello caratterizzato dal valore maggiore. Questo procedimento si ripete per tutte le persone della popolazione virtuale e al termine fornisce in output il vettore contenente il piano più vantaggioso per ogni utente.

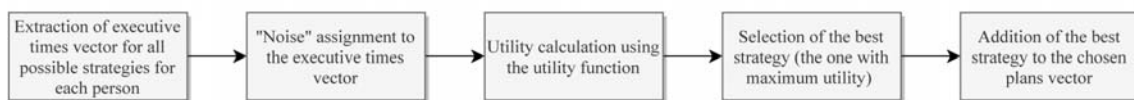


Figura 11.1 - Funzionamento del selettore di piani basato sulla funzione di utilità

La difficoltà risiede proprio nello stimare i 6 indici in modo tale che il vettore fornito dall'algoritmo sia sufficientemente realistico da poter riprodurre le scelte della popolazione.

Per valutare il grado di accuratezza dei risultati ottenuti è stata introdotta una funzione obiettivo, strutturata in modo tale che la somiglianza tra output del modello e realtà sia manifestata da un valore prossimo allo 0 e viceversa.

Sono state considerate diverse varianti: la prima è rappresentata da una sommatoria delle differenze tra ripartizione modale di partenza, cioè quella ottenuta al termine della creazione dello scenario (riportata all'inizio del paragrafo 9.7), e finale, ossia quella derivante dai risultati ricavati al termine del procedimento di selezione del piano più vantaggioso per ogni utente, che fa uso della funzione di utilità appena descritta; in pratica, rappresenta la somma delle differenze tra lo share modale relativo a ciascuna strategia di mobilità quando a ogni individuo viene assegnato il piano associato al modo di trasporto preferito e la stessa grandezza quando, invece, all'utente viene attribuito il piano relativo alla strategia più conveniente, determinata in base all'utilità. La seconda è del tutto simile alla precedente, ma si differenzia da essa per i valori di ripartizione modale iniziali, che in questo caso non sono più strettamente correlati ai dati utilizzati

per la generazione della domanda, ma sono assunti pari alla ripartizione modale derivante dalle analisi effettuate dal comune di Bologna e convertiti in base ai mezzi di trasporto utilizzati nella trattazione (Fig. 9.5); la terza, ed ultima, invece, indica il numero di persone che, dopo il processo di scelta basato sulla funzione di utilità, hanno cambiato piano rispetto a quello inizialmente attribuito loro.

In ogni caso, l'idea è quella di individuare una serie di coefficienti in grado di minimizzare il risultato della funzione obiettivo e quindi riprodurre realisticamente il comportamento degli utenti, nonostante essi abbiano a disposizione diverse alternative tra cui scegliere.

Delle tre funzioni, probabilmente, la più rappresentativa risulta essere l'ultima in quanto maggiormente legata alla scelta effettuata da ogni singolo utente, ma è anche la più difficoltosa da minimizzare poiché è pressoché impossibile trovare una combinazione di parametri che consenta ad ogni individuo di tornare a scegliere l'alternativa iniziale. Pertanto, nel proseguo della trattazione, è stato fatto uso principalmente delle altre due funzioni obiettivo, anche se meno specifiche rispetto alla terza, dato che risulta molto più facile l'individuazione di un set di coefficienti che ne consenta la minimizzazione, proprio per il loro carattere globale.

Per individuare i parametri che minimizzino la funzione obiettivo scelta si è fatto uso di un algoritmo al cui interno è stato implementato un procedimento iterativo di ottimizzazione stocastico, denominato *Evolutionary*, che richiede in input un intervallo all'interno del quale ricercare ogni parametro incognito, la funzione da minimizzare e il metodo da utilizzare per portare a conclusione tale operazione (ne sono stati analizzati 4: Differential Evolution (DE), Particle Swarm Optimization (PSO), Competitive Particle Swarm Optimization (CPSO) e Covariance Matrix Adaptation – Evolution Strategy (CMAES); a seguito di una serie di analisi basate sui risultati ottenuti sfruttando i vari metodi, si è scelto di utilizzare proprio quest'ultimo, poiché è risultato il più preciso e affidabile).

Inizialmente, ad ogni iterazione esso estrae casualmente i coefficienti dagli intervalli fissati e determina il valore della funzione obiettivo, successivamente tali valori vengono scelti casualmente ma sempre con una globale tendenza a spostarsi nella direzione dei possibili minimi della funzione obiettivo, proseguendo fino a quando non viene completata la minimizzazione. Al termine del procedimento, si ottiene in output un vettore contenente i parametri ricercati. Di seguito viene proposto un diagramma di flusso che sintetizzi il funzionamento dell'algoritmo utilizzato.

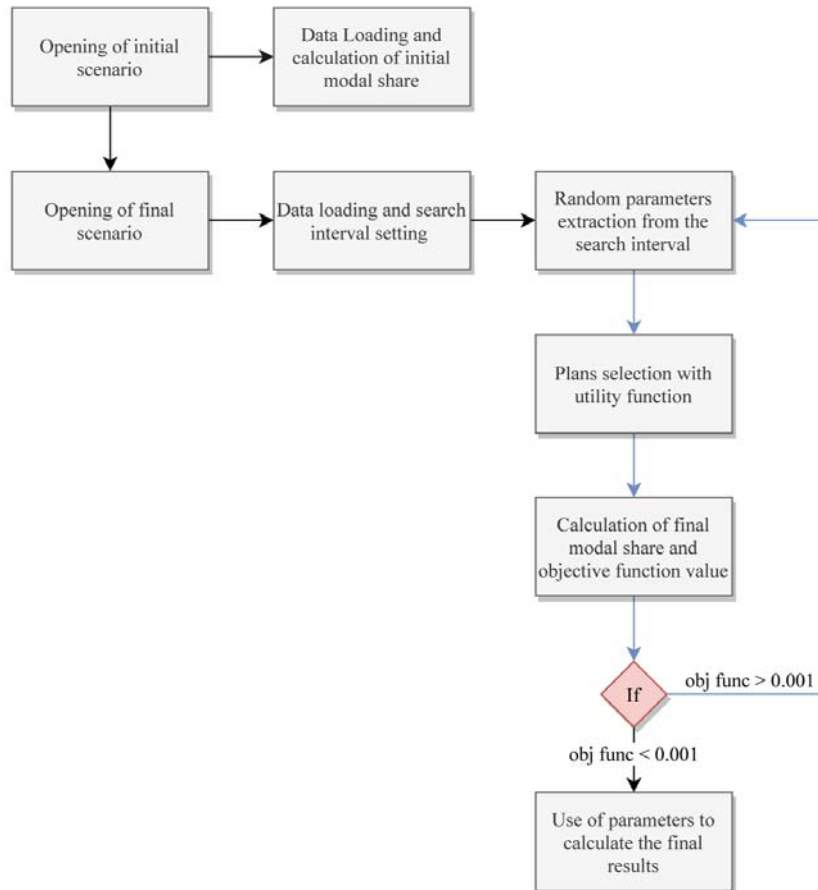


Figura 11.2 - Diagramma di flusso del processo di ricerca dei parametri

In primo luogo, esso carica i dati relativi alla ripartizione modale dello scenario di partenza e poi apre lo scenario ottenuto al termine del processo di scambio di piano, che ha portato all'individuazione dei tempi esecutivi di ogni alternativa disponibile per ciascun utente, e definisce gli intervalli all'interno dei quali ricercare gli indici incogniti. A questo punto prende il via il procedimento iterativo, vero e proprio, di ottimizzazione: estraendo casualmente i parametri dagli intervalli fissati, procede con la selezione dei piani tramite il metodo basato sulla funzione di utilità, introdotto in precedenza, ed esegue il calcolo della ripartizione modale finale e del valore della funzione obiettivo, che nel caso in esame risulta essere la seguente:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^5 |rip_{in,i} - rip_{fin,i}|}{n_{pop}}$$

Dove:

- $rip_{in,i}$  = ripartizione modale, nello scenario di partenza o ricavata dai dati del comune, del modo di trasporto i-esimo;
- $rip_{fin,i}$  = ripartizione modale, nello scenario finale, del modo di trasporto i-esimo;
- $n_{pop}$  = numero di elementi della popolazione virtuale considerata.

Se quest'ultimo non risulta soddisfacente, l'algoritmo di ottimizzazione propone una nuova combinazione di parametri da andare a sostituire a quelli inizialmente introdotti, proseguendo nelle iterazioni fino a quando non viene ottenuto il valore minimo della funzione obiettivo.

I parametri associati a tale condizione vengono impiegati per il calcolo della ripartizione modale finale, sempre passando attraverso il selettore di piani basato sulla funzione di utilità, per il confronto con la situazione di partenza e per le analisi dei risultati ottenuti.

## 11.2. Applicazione al caso di studio

Nel caso in esame si è deciso di fissare il valore del VOT a 7 centesimi di euro al minuto e limitare il processo di ottimizzazione alla ricerca dei 5 parametri costanti per ciascuna modalità di trasporto, all'interno dell'intervallo [-5,5].

Tali scelte sono dovute al fatto che, fissando il VOT, la minimizzazione è stata disgiunta dalla variabile temporale, riducendo notevolmente il numero di possibili combinazioni che potevano portare all'annullamento della funzione obiettivo. Inoltre, il valore introdotto ha fatto sì che il secondo addendo della funzione di utilità fosse dell'ordine di grandezza delle unità, consentendo di limitare considerevolmente lo spazio di ricerca delle 5 costanti rimanenti, all'interno dei confini imposti.

Per ridurre ancora di più le possibili combinazioni, si è deciso di fissare anche uno dei 5 coefficienti, in modo che gli altri 4 tendessero ad assumere un valore unico, anche a seguito di diverse ripetizioni, in grado di minimizzare la funzione obiettivo. La costante fissata risulta essere quella associata alla strategia auto che, come di consuetudine in trattazioni di questa tipologia, è stata imposta pari a 0.0, in modo da poter valutare come quelle legate alle strategie rimanenti varino rispetto ad essa.

Al termine del procedimento, le combinazioni di parametri ottenute per le due funzioni obiettivo analizzate, risultano essere le seguenti.

$\alpha$ auto	$\alpha$ bici	$\alpha$ bus	$\alpha$ piedi	$\alpha$ moto
0.0000	-1.1034	0.5011	-0.0381	-0.0364

Tabella 11.2 - Parametri ricavati usando la prima funzione obiettivo

$\alpha$ auto	$\alpha$ bici	$\alpha$ bus	$\alpha$ piedi	$\alpha$ moto
0.0000	-0.5604	0.3727	-0.0556	-0.0161

Tabella 11.3 - Parametri ricavati usando la seconda funzione obiettivo

Interessante notare come, fissando un altro coefficiente al posto di quello associato alla strategia auto, la proporzionalità tra i parametri relativi ai diversi modi di trasporto risulti completamente invariata, evidenziando quindi che il vero aspetto cruciale per la minimizzazione della funzione obiettivo non riguardi tanto il valore assoluto di ogni parametro, ma la differenza relativa tra le varie coppie di costanti.

Questa caratteristica è facilmente osservabile nelle tabelle riassuntive seguenti, nelle quali sono riportate le diverse combinazioni di parametri, ottenute assumendo come costanti fisse (sottolineate in Tab. 11.4 e Tab. 11.5) valori differenti per strategie diverse, e il valore finale assunto dalla funzione obiettivo  $f$ .

	$\alpha$ auto	$\alpha$ bici	$\alpha$ bus	$\alpha$ piedi	$\alpha$ moto	$f$
[-5,5] , 20 iter	<u>0.0000</u>	-1.1245	0.5123	-0.0294	-0.0316	0.0013
[-5,5] , 50 iter	<u>2.0000</u>	0.8966	2.5012	1.9619	1.9635	0.00011
[-5,5] , 50 iter	2.1031	<u>1.0000</u>	2.6044	2.0654	2.0672	0.00011
[-5,5] , 50 iter	1.7312	0.6275	2.2325	1.6931	1.6949	0.00011
[-5,5] , 50 iter	0.4988	-0.6042	<u>1.0000</u>	0.4609	0.4622	0.00011
[-5,5] , 50 iter	<u>0.0000</u>	-1.1034	0.5011	-0.0381	-0.0364	0.00011

Tabella 11.4 - Risultati della minimizzazione con la prima funzione obiettivo

	$\alpha$ auto	$\alpha$ bici	$\alpha$ bus	$\alpha$ piedi	$\alpha$ moto	$f$
[-5,5] , 20 iter	<u>0.0000</u>	-0.5596	0.3725	-0.0559	-0.0168	0.00102
[-5,5] , 50 iter	<u>2.0000</u>	1.4397	2.3729	1.9447	1.9839	0.00087
[-5,5] , 50 iter	1.5602	<u>1.0000</u>	1.9334	1.5050	1.5442	0.00087
[-5,5] , 50 iter	1.3597	0.7994	1.7324	1.3042	1.3434	0.00095
[-5,5] , 50 iter	0.6274	0.0669	<u>1.0000</u>	0.5717	0.6114	0.00087
[-5,5] , 50 iter	<u>0.0000</u>	-0.5604	0.3727	-0.0556	-0.0161	0.00087

Tabella 11.5 - Risultati della minimizzazione con la seconda funzione obiettivo

Da esse, dunque, è possibile osservare che la relazione esistente tra i vari coefficienti  $\alpha$  risulti essere sempre pressoché la medesima anche quando, come riportato nella quarta riga di entrambe le tabelle, non è stato imposto alcun valore fisso, lasciando le variabili libere di combinarsi al meglio tra loro.

	<b>Differenza (Prima funzione obiettivo)</b>	<b>Differenza (Seconda funzione obiettivo)</b>
<b>Auto – Bici</b>	± 1.1034	± 0.5604
<b>Auto – Autobus</b>	± 0.5011	± 0.3727
<b>Auto – Moto</b>	± 0.0364	± 0.0161
<b>Auto – Camminata</b>	± 0.0381	± 0.0556
<b>Bici – Autobus</b>	± 1.6045	± 0.9331
<b>Bici – Moto</b>	± 1.0670	± 0.5443
<b>Bici – Camminata</b>	± 1.0653	± 0.5048
<b>Moto – Autobus</b>	± 0.5375	± 0.3888
<b>Moto – Camminata</b>	± 0.0017	± 0.0395
<b>Autobus - Camminata</b>	± 0.5392	± 0.4283

*Tabella 11.6 - Differenza tra i vari coefficienti*

La combinazione di proporzionalità tra i vari coefficienti individuata risulta essere quella ottimale per lo scopo della minimizzazione, tanto che la funzione obiettivo proposta assume sempre valori inferiori a  $10^{-3}$ , toccando anche un minimo di 0.00011.

Un'altra interessante osservazione riguarda il VOT, al quale sono strettamente legati tutti i risultati finora presentati. Come detto, inizialmente esso è stato imposto pari a 0.07 €/min, ma se si decidesse di utilizzare un valore differente? La risposta a questo quesito è piuttosto interessante poiché, in realtà, tutte le analisi finora effettuate rimangono completamente valide. Si ipotizzi, infatti, di fissare il valore del VOT a 0.17 €/min (circa 10 €/h) ed eseguire lo stesso procedimento già illustrato in precedenza per la stima degli altri parametri  $\alpha$ . Al termine della minimizzazione, eseguita basandosi sulla prima delle due funzioni obiettivo proposte, si ottengono i seguenti risultati.

<b><math>\alpha</math> auto</b>	<b><math>\alpha</math> bici</b>	<b><math>\alpha</math> bus</b>	<b><math>\alpha</math> piedi</b>	<b><math>\alpha</math> moto</b>
0.0000	-2.6794	1.2168	-0.0927	-0.0882

*Tabella 11.7 - Parametri ricavati usando la prima funzione obiettivo e VOT = 0.17 €/min*

Confrontando i valori riportati nella tabella 11.7 con quelli della tabella 11.2 non sembrerebbe che ci fosse nessuna correlazione tra i valori riportati. Tuttavia, calcolando il rapporto tra le coppie di parametri della stessa categoria (ad eccezione della strategia auto, per la quale il parametro è stato fissato in entrambe le occasioni a 0.0, quindi  $\alpha_{bici1}$ -

$\alpha_{bici2}$ ,  $\alpha_{bus1}-\alpha_{bus2}$ ,  $\alpha_{piedi1}-\alpha_{piedi2}$ ,  $\alpha_{moto1}-\alpha_{moto2}$ ) e confrontandoli con il rapporto tra i due valori di VOT è possibile notare come tutte queste grandezze siano circa pari alla stessa quantità, ossia 2.43.

È, dunque, possibile evincere che le costanti siano direttamente proporzionali al valore del VOT fissato e che, quindi, qualunque sia l'entità di tale grandezza, la relazione esistente tra le diverse variabili sarà sempre la medesima, scalata in base ad esso.

A conferma di ciò, si fissi l'attenzione sui parametri bici e bus: nel primo caso la differenza tra essi era pari a 0.5011, mentre nel secondo a 1.2168; facendo il rapporto tra queste due grandezze si ricava, nuovamente, un quoziente pari a 2.43, che sottolinea la perfetta proporzionalità delle due diverse combinazioni di parametri proposte.

Le seguenti coppie di diagrammi mostrano, invece, l'evoluzione del processo di convergenza seguito dall'algoritmo appena descritto, per ciascuna delle due funzioni impiegate nelle analisi, evidenziando che, nella fase iniziale, l'estrazione dei parametri avviene in maniera completamente casuale, come si può evincere dalla presenza di numerosi picchi sia nel grafico relativo all'andamento del valore della funzione obiettivo, sia in quello riguardante la ripartizione modale.

È poi possibile osservare una stabilizzazione dei valori riportati sull'asse delle ordinate, con una tendenza progressiva verso il valore di convergenza, fatto che evidenzia il raggiungimento del valore ottimo della funzione obiettivo.

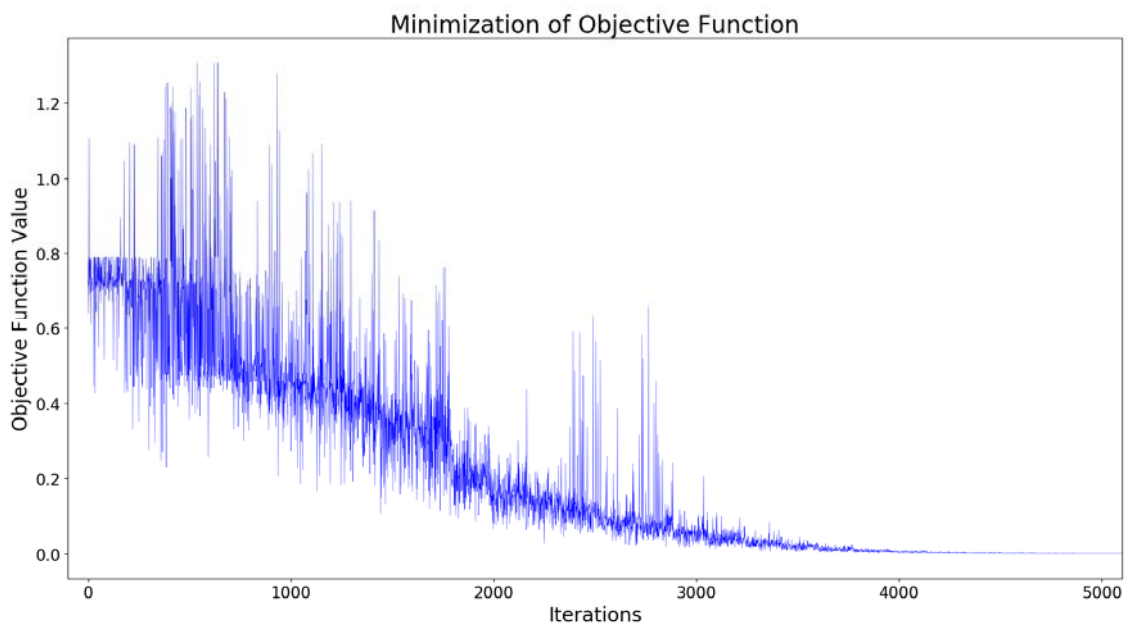


Figura 11.3 - Minimizzazione della funzione obiettivo (prima funzione)

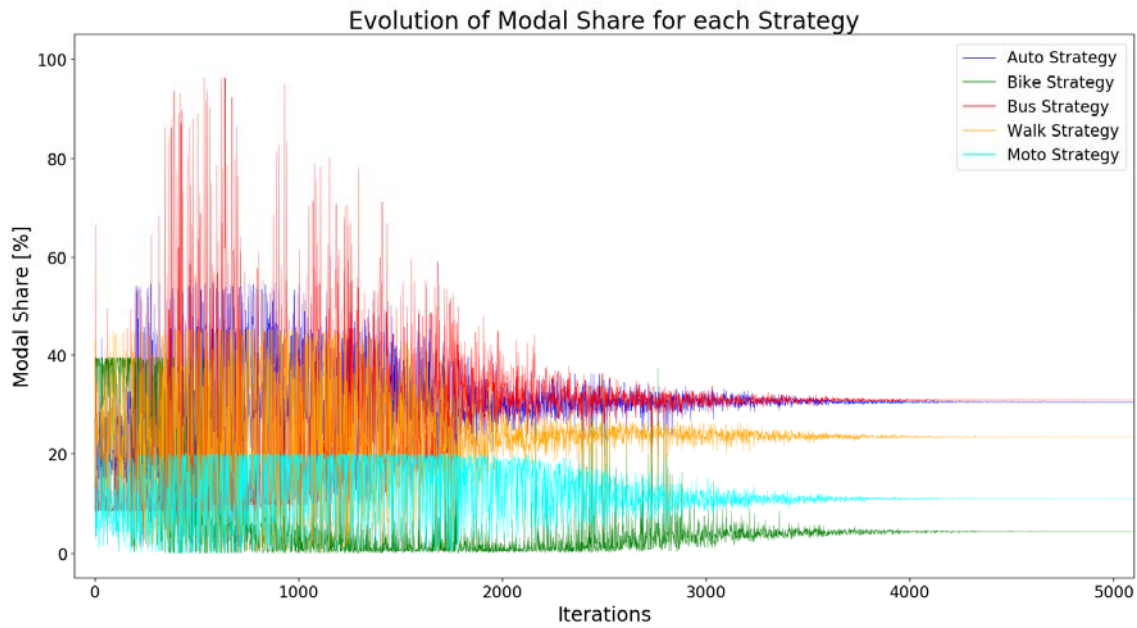


Figura 11.4 - Evoluzione della ripartizione modale durante il processo di minimizzazione (prima funzione)

Concentrando l'attenzione unicamente sul primo diagramma, si può percepire un andamento globalmente discendente del valore della funzione obiettivo (individuabile nella fascia blu centrale, più definita), al netto di alcuni picchi fatti registrare sia in positivo sia in negativo, che indica come in generale l'algoritmo di ottimizzazione proceda sempre verso la direzione decrescente, anche se piuttosto lentamente.

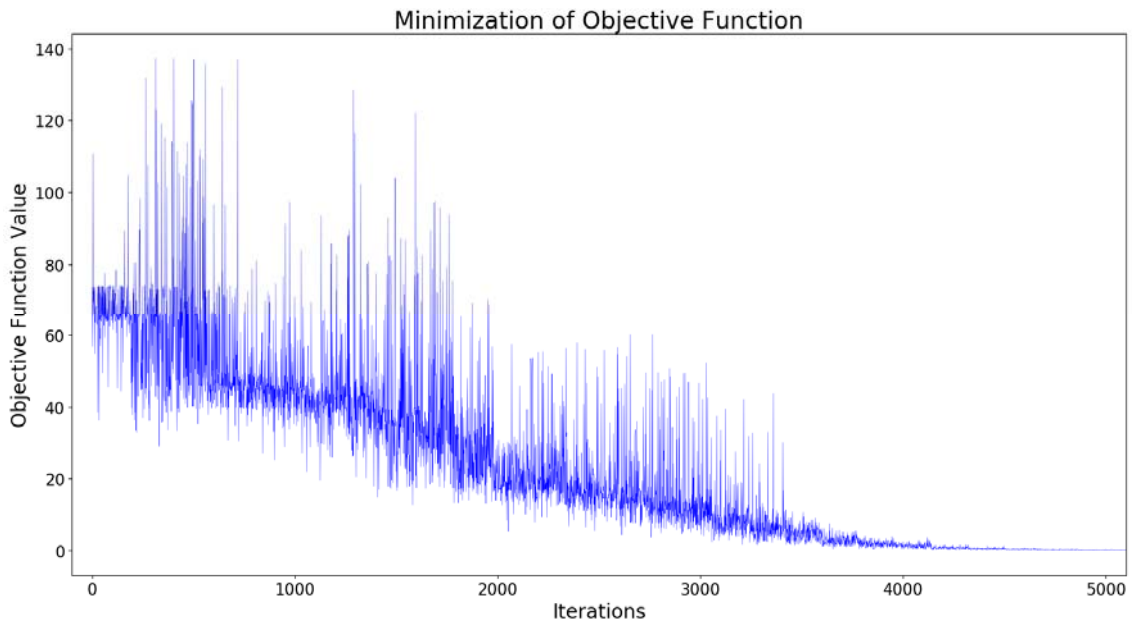


Figura 11.5 - Minimizzazione della funzione obiettivo (seconda funzione)



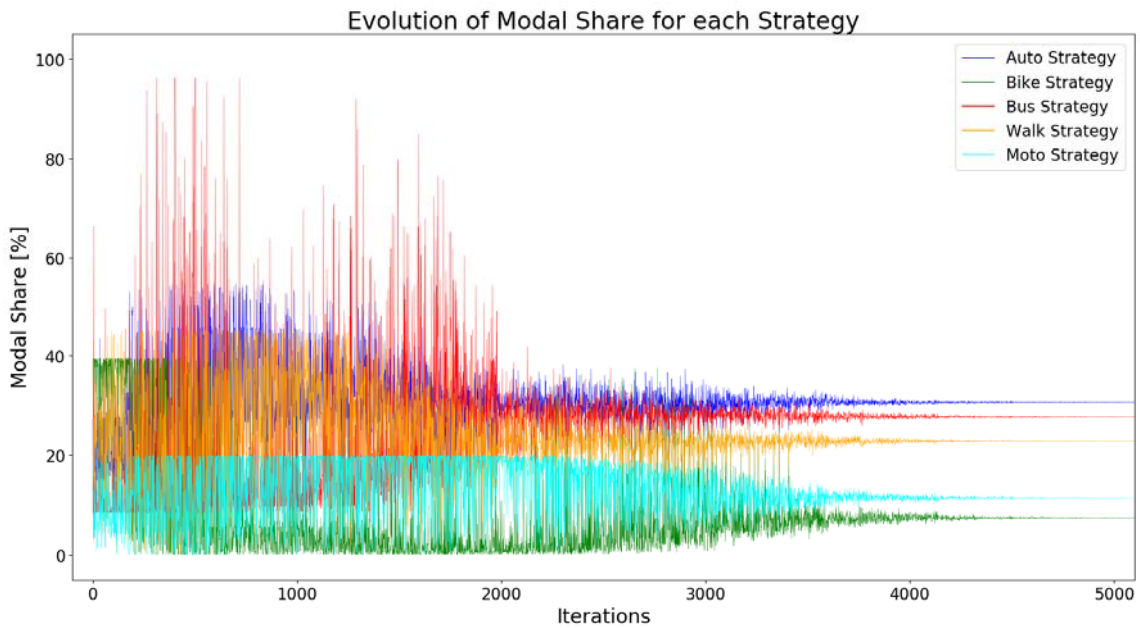


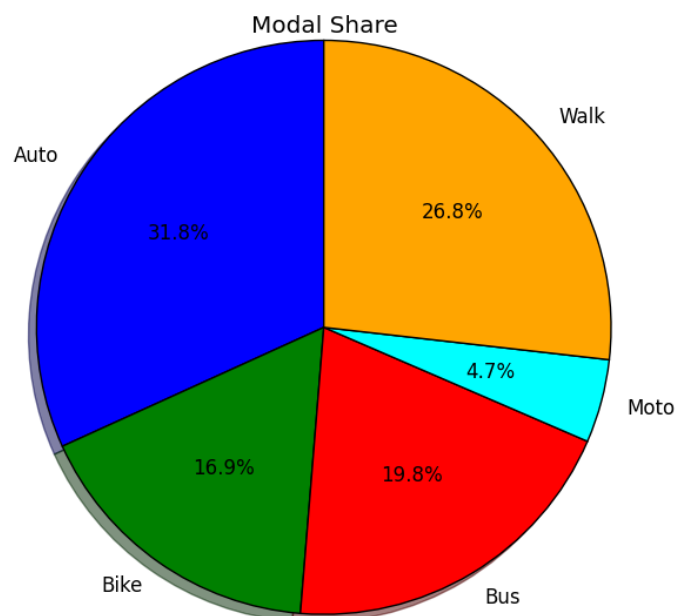
Figura 11.6 - Evoluzione della ripartizione modale durante il processo di minimizzazione (seconda funzione)

In conclusione di questo capitolo, è possibile effettuare alcune analisi riguardanti i parametri ottenuti al termine dei procedimenti di ottimizzazione.

In particolare, si osserva che i coefficienti associati alle strategie auto, moto e camminata sono molto simili tra loro, mentre quelli legati ai modi bicicletta e autobus sono, rispettivamente, il maggiore e il minore.

Una spiegazione di questo comportamento può essere ricercata nel confronto con la ripartizione modale che si ottiene quando tutti i parametri  $\alpha$  vengono imposti pari a 0, in modo che l'unica componente della funzione di utilità che viene considerata durante la selezione dei piani risulti essere quella legata al fattore temporale, riportata nel diagramma a torta seguente (Fig. 11.7).

È evidente che, siccome entrambe le ripartizioni modali obiettivo presentano valori simili a questi ultimi per quanto concerne le strategie auto e camminata, ma piuttosto differenti per bici, moto e autobus, l'unico modo per raggiungere la minimizzazione delle funzioni obiettivo introdotte risulta quello di correggere l'addendo relativo alla variabile temporale di queste strategie, con una costante in forte contrasto con esso. Da qui nasce la necessità di un parametro bici elevato e di un parametro autobus molto piccolo, che genera una differenza relativa molto marcata tra i due mezzi di trasporto.



*Figura 11.7 – Ripartizione modale, nel caso sia tenuta in considerazione solo la componente temporale della funzione di utilità*

Allontanandosi, momentaneamente, dall'aspetto prettamente matematico della questione e volendo chiarire meglio il significato di questa analisi, si può pensare che, considerando unicamente il tempo come discriminante della scelta di un piano piuttosto che di un altro da parte del generico individuo, la bicicletta rappresenti l'alternativa migliore per molte persone che inizialmente utilizzavano un'altra strategia, infatti si passa da poco più del 4% di ciclisti ad oltre il 16%, mentre l'autobus viene abbandonato in massa, proprio a causa della scarsa competitività dal punto di vista temporale (riduzione dal 31% al 20%). Dunque, per fare in modo che la popolazione torni ad usare l'autobus, in quantità paragonabili a quelle iniziali, è necessario fornire un incentivo a questo modo di trasporto e penalizzare la bicicletta.

Per fare ciò, l'unica strada percorribile, da un punto di vista pratico, è quella di tenere in considerazione anche altre variabili, ad eccezione di quella temporale, che nella funzione di utilità sono tutte condensate nel parametro  $\alpha$ .

Per esempio, per la bicicletta le maggiori penalizzazioni sono rappresentate, come riportato in Tab. 11.1, da: sforzo fisico, esposizione alle condizioni atmosferiche e agli inquinanti rilasciati dai mezzi a motore, fattori che, allo stesso tempo, risultano essere anche i maggiori incentivi per i mezzi di trasporto pubblico nei confronti delle bici, i cui pregi sono messi in secondo piano proprio da queste caratteristiche.

Pertanto, l'unica azione eseguibile all'interno del modello per tenere in considerazione tutti questi aspetti è rappresentata proprio da quella descritta in precedenza e riassunta nella seguente tabella, insieme a tutte le altre strategie di trasporto.

	<b>Ripartizione modale, solo tempo [%]</b>	<b>Ripartizione modale obiettivo [%]</b>	<b>Correzione da eseguire</b>
<b>Auto</b>	31.78	30.50	Piccolo incentivo
<b>Bicicletta</b>	16.90	4.26	Grande penalizzazione
<b>Moto</b>	4.67	10.91	Medio incentivo
<b>Autobus</b>	19.81	30.89	Grande incentivo
<b>Camminata</b>	26.85	23.44	Piccola penalizzazione

*Tabella 11.8 - Ripartizione modale e correzioni*

Per quanto concerne le strategie auto e camminata, le due ripartizioni modali sono molto simili e dunque non è necessario adottare coefficienti correttivi dell'addendo temporale troppo marcati, ma solo tali da rendere minimo il valore della funzione obiettivo.

In altre parole, chi usa l'auto oppure decide di andare a piedi in genere lo fa per il tempo che impiega a raggiungere la propria destinazione, senza tenere più di tanto in considerazione tutti gli altri pro e contro riportati nella tabella 11.1.

Infine, i valori di ripartizione modale della strategia moto presentano una differenza intermedia rispetto alle due coppie precedentemente analizzate. In questo caso, la correzione applicata all'addendo temporale della funzione di utilità è più modesta rispetto ai casi di bici e autobus e più simile a quella legata alla strategia camminata. La spiegazione può essere ricercata nel minor numero di individui proprietari di un motociclo, rispetto a tutti gli altri mezzi, e quindi una maggiore facilità nel condizionare tali persone ad utilizzare questi veicoli, anche grazie alla penalizzazione della strategia bici, che probabilmente risulta essere la prima scelta di chi abbandona la moto quando viene preso in considerazione solo il tempo.

## 12. RISULTATI

Nel corso di questo capitolo saranno presentati i risultati di maggior rilievo ottenuti al termine dello studio eseguito, partendo da quelli relativi alla popolazione virtuale per arrivare fino a quelli riguardanti la rete nel suo complesso.

### 12.1. Popolazione virtuale

Al termine del procedimento di scambio dei piani, consentito dall'algoritmo *Exchange-Plans*, è stata ottenuta una tabella contenente tutte le principali caratteristiche di ognuno di essi. Tra tutte, quelle di maggior interesse per la trattazione riguardano i tempi stimati e quelli effettivamente necessari per il completamento di ciascuno spostamento.

Da questi dati è stato possibile ricavare i valori medi dei tempi di viaggio per ciascuna tipologia di modo di trasporto, il confronto tra tempi stimati e tempi effettivi e la distribuzione di frequenza di quest'ultimi, riportati in Tab. 12.1, Figg. 12.1 e 12.2.

	Tempi medi stimati [s]	Tempi medi effettivi [s]
<b>Automobile</b>	419.84	1088.69
<b>Bicicletta</b>	536.41	1290.10
<b>Autobus</b>	1603.03	2627.00
<b>Motociclo</b>	419.92	979.83
<b>Camminata</b>	908.66	595.72

Tabella 12.1 - Tempi medi di viaggio per categoria

Dall'analisi della tabella e della prima figura è immediato osservare che, coerentemente con le attese, i tempi stimati risultano essere nettamente inferiori a quelli effettivi, in quanto i primi vengono calcolati da un algoritmo che non tiene in considerazione le reali condizioni di traffico ma effettua una stima basata sull'ipotesi di rete decongestionata, fattore che invece influisce fortemente sui tempi effettivi.

Per questo motivo, nel primo grafico, i punti risultano essere più schiacciati verso l'asse dei tempi effettivi.

L'unica eccezione è rappresentata dai tempi registrati per la strategia *camminata* per la quale i tempi effettivi risultano essere i minori, realisticamente poiché i pedoni, che possono spostarsi solo su marciapiedi o archi ciclopedonali, non sono mai condizionati dal traffico veicolare, se non quando hanno la necessità di attraversare la carreggiata.

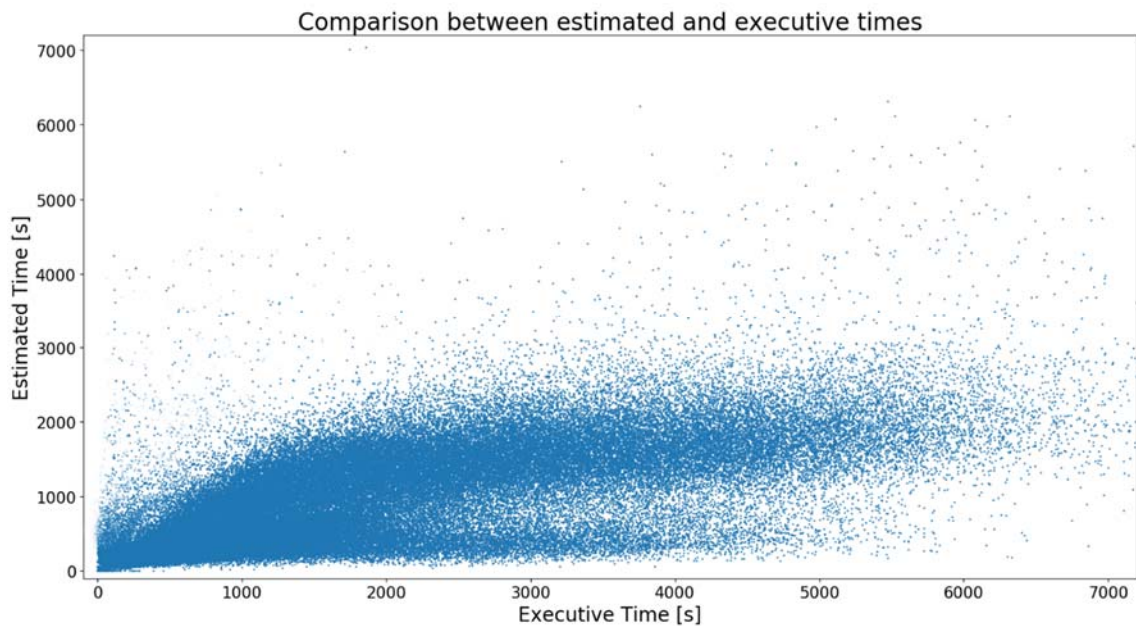


Figura 12.1 - Confronto tra tempi stimati e tempi effettivi per ogni piano provato

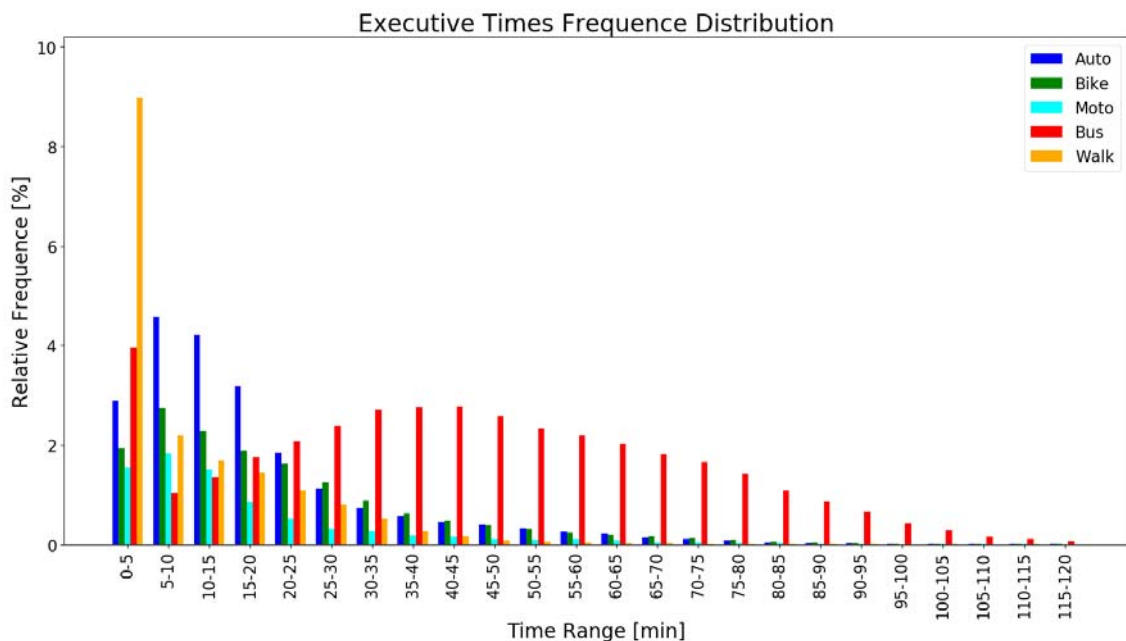


Figura 12.2 - Distribuzione di frequenza dei tempi effettivi per ogni modo di trasporto

Concentrando l'attenzione sui valori dei tempi medi effettivi riportati in Tab. 12.1, è possibile notare come essi risultino essere molto veritieri se confrontati con la comune esperienza di spostamento all'interno della rete cittadina. Infatti, escludendo momentaneamente la camminata dalla lista, il mezzo più veloce risulta essere il motociclo (circa 15 minuti), seguito da auto e bicicletta (entrambe attorno ai 20 minuti) e infine dall'autobus, che rappresenta il veicolo più lento del lotto con i suoi 45 minuti di media.

Secondo diversi studi, la bicicletta dovrebbe essere il mezzo più veloce in ambito urbano, tuttavia si fa presente che, nel corso del presente studio, potrebbe essere stata assegnata la proprietà della bicicletta anche a persone che inizialmente eseguivano spostamenti in auto di decine di chilometri di lunghezza, magari anche percorrendo la tangenziale (o comunque strade ad elevata velocità di percorrenza), facendo incrementare notevolmente il valore medio dei tempi di viaggio con tale mezzo di trasporto.

Per quanto riguarda i viaggi eseguiti tramite trasporto pubblico, invece, i tempi registrati appaiono molto realistici, proprio perché comprendono oltre al trasferimento a bordo del mezzo, intervallato dalle numerose soste, anche i tempi di attesa alle fermate e gli spostamenti a piedi per raggiungerle, pertanto una media di circa 45 minuti risulta essere piuttosto veritiera.

Infine, i tempi medi di viaggio relativi agli spostamenti effettuati camminando risultano così bassi rispetto alle altre strategie, che sulla carta dovrebbero essere più veloci, poiché la strategia camminata, che teoricamente dovrebbe essere disponibile per tutte le persone della popolazione virtuale creata, è stata assegnata solo agli individui i cui edifici origine e destinazione distano, in linea d'aria, meno di 1800 m, andando quindi ad escludere gran parte della popolazione che, per eseguire spostamenti più lunghi, non prenderebbe mai in considerazione tale alternativa.

Proprio per questo motivo si è ottenuto, come risultato medio, un tempo effettivo di viaggio di poco inferiore ai 10 minuti, fatto supportato anche dal grafico relativo alla distribuzione di frequenza di tali grandezze (Fig. 12.2), in cui è evidente il picco di spostamenti a piedi di durata inferiore ai 5 minuti.

Passando, ora, ad una analisi dettagliata di quest'ultimo diagramma è possibile osservare come ogni mezzo, escludendo il primo intervallo, sia caratterizzato da un picco nel valore della frequenza relativa in prossimità dell'asse y, per poi andare a diminuire allontanandosi da esso, ad eccezione della strategia bus, il cui picco è situato attorno ai 40/45 minuti.

Si vuole far presente che il primo range temporale presenta delle percentuali di frequenza poco veritiere in quanto, in genere, quando il software percepisce una distanza ridotta tra edificio di origine e destinazione, decide di far compiere l'intero spostamento a piedi, anche se in realtà sarebbe classificato sotto un altro modo di trasporto. Pertanto, gran parte degli spostamenti che hanno tempi di viaggio effettivi

inferiori ai 5 minuti solitamente sono eseguiti tramite camminata e non realmente mediante la metodologia di trasporto associata.

Un'altra caratteristica molto interessante che è possibile trovare nella tabella relativa ai piani, citata precedentemente, riguarda i valori di utilità di ciascuno di essi.

Per ricavarli si è fatto uso del selettore dei piani basato sulla funzione di utilità, descritto nel paragrafo 11.1, in cui sono stati inseriti i parametri ottenuti a seguito del processo di calibrazione incentrato sulla prima delle tre funzioni obiettivo proposte, che sono sinteticamente riproposti nella tabella seguente.

$\alpha$ auto	$\alpha$ bici	$\alpha$ bus	$\alpha$ piedi	$\alpha$ moto	VOT
2.0000	0.8966	2.5012	1.9619	1.9635	0.07

*Tabella 12.2 - Parametri utilizzati per la selezione dei piani*

Esso, oltre a selezionare il piano più vantaggioso tra quelli a disposizione di ciascun individuo facente parte della popolazione virtuale, consente di completare la colonna della sopracitata tabella relativa alle utilità dei vari piani, calcolate proprio per poter stabilire quale fosse il migliore per ogni utente.

Da questi valori è stato possibile rappresentare su un piano cartesiano la distribuzione di frequenza dell'utilità. Sull'asse delle ascisse sono stati riportati diversi range di utilità normalizzata, mentre su quello delle ordinate la frequenza relativa (o assoluta) associata a ciascun intervallo e strategia di trasporto.

La normalizzazione delle utilità è stata eseguita andando a considerare tutte le utilità associate alla lista di piani disponibili per ogni utente e dividendo ciascuna di esse per quella con il valore massimo. Il piano selezionato, quindi quello con l'utilità maggiore, avrà un valore normalizzato pari a 1, mentre tutti gli altri saranno caratterizzati da valori compresi tra 0 e 1.

Per chiarire meglio il concetto viene proposto il seguente esempio: si consideri la generica persona virtuale avente a disposizione 4 possibili alternative (auto, moto, bus e camminata), ciascuna di esse associata ad un preciso piano e con un diverso valore di utilità; i relativi valori normalizzati di utilità sono proposti nella tabella seguente.

Strategia	Auto	Moto	Autobus	Camminata
Utilità	1.0864	0.9725	0.5376	0.8491
Utilità Normalizzata	1.0000	0.8949	0.4948	0.7816

*Tabella 12.3 - Esempio di normalizzazione dell'utilità*

Sull'asse delle ordinate, come detto, è stata riportata la frequenza relativa dei piani, associati ad un certo modo di trasporto, aventi un valore normalizzato di utilità ricadente all'interno dei vari intervalli riportati sull'asse x. Questa frequenza è stata calcolata andando a dividere il numero assoluto di piani della strategia considerata ricadenti nel range per il numero totale di piani associati a quella categoria, in modo da poter confrontare i risultati ottenuti per le strategie con un diverso numero assoluto di piani. In particolare, sono stati plottati 6 grafici relativi a 3 scenari e 2 configurazioni diverse, tra loro combinate:

- Scenario 1: Comprende i piani disponibili all'intera popolazione virtuale;
- Scenario 2: Comprende solo i piani disponibili ai proprietari di un'automobile;
- Scenario 3: Comprende solo i piani disponibili ai proprietari di una bicicletta, ad eccezione di quelli legati alla strategia auto;
- Configurazione 1: Utilità percepita calcolata con la funzione proposta;
- Configurazione 2: Utilità percepita calcolata solo considerando l'addendo temporale (imponendo tutte le costanti  $\alpha$  pari a 0.0 e il VOT pari a 0.07).

Questo per poter confrontare le scelte eseguite dalla stessa categoria di utenti quando viene considerato solo il tempo come variabile discriminante e quando invece vengono contemplati anche quei parametri che rappresentano tutte le altre caratteristiche, positive e negative, di un certo modo di trasporto.

I primi grafici che vengono riportati sono quelli relativi al primo scenario proposto, per entrambe le configurazioni.

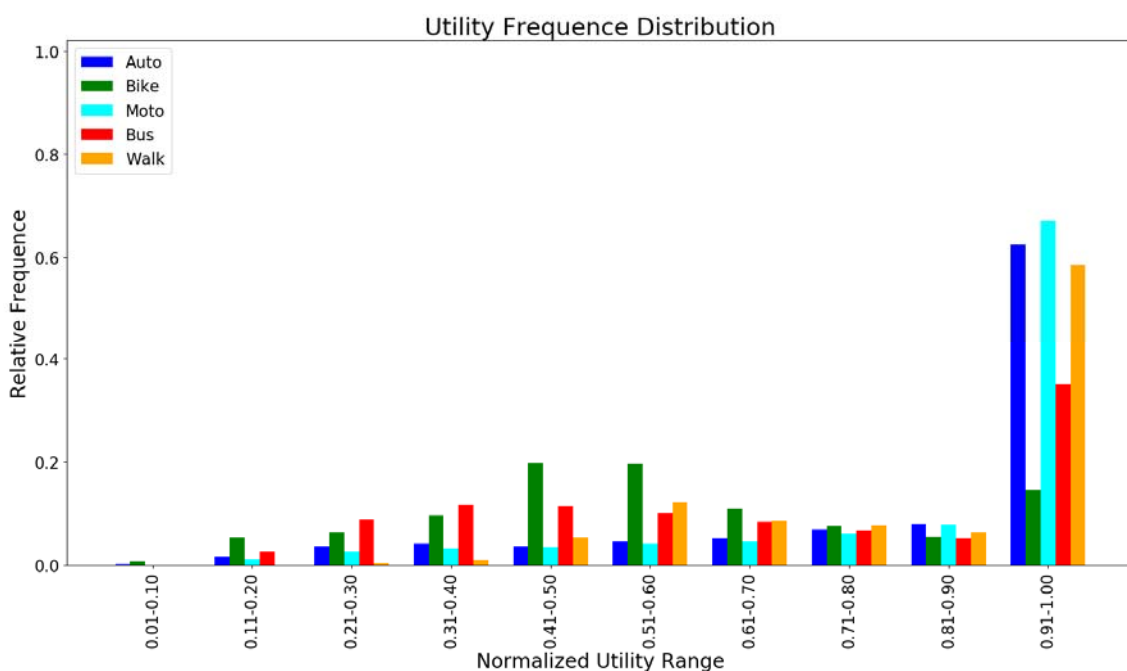


Figura 12.3 - Distribuzione frequenza utilità (S1: Tutti i piani, C1: Utilità con costanti)



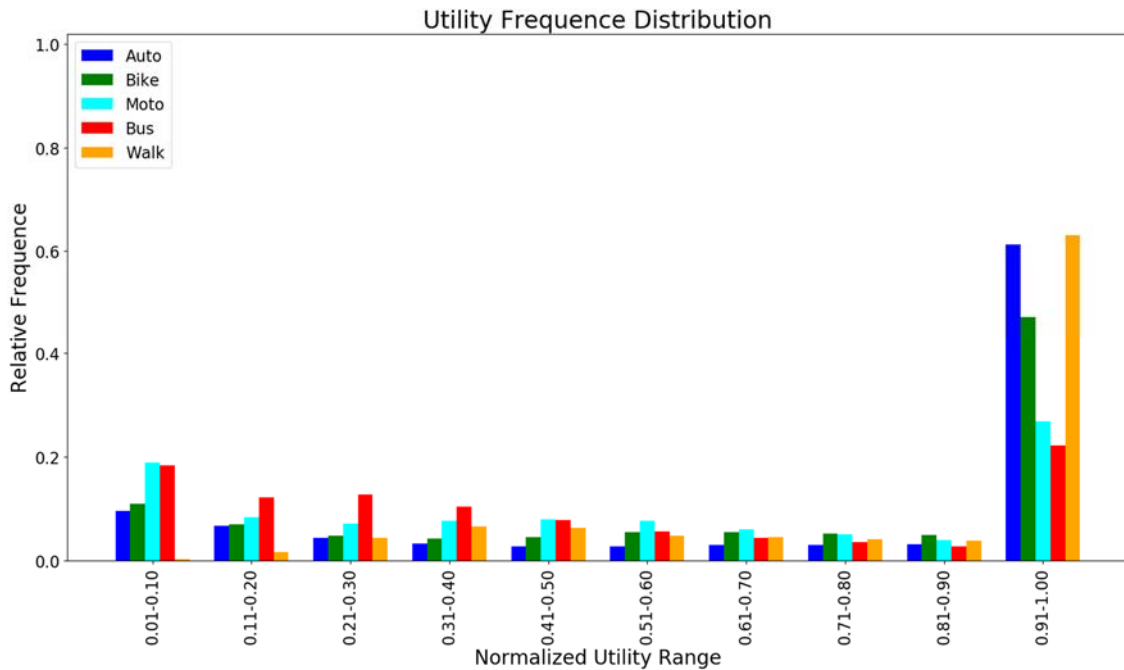


Figura 12.4 - Distribuzione frequenza utilità (S1: Tutti i piani, C2: Utilità uguale al tempo)

Dai diagrammi appena riportati è possibile evincere che, considerando unicamente il tempo come variabile discriminante nella scelta della strategia da utilizzare (Fig. 12.4), i piani con le utilità maggiori risultano essere quelli legati alle strategie auto, bici e camminata, anche se quest'ultima, come accennato in precedenza, rappresenta un caso a parte per la modalità di assegnazione dei piani ad essa associata.

Il modo di trasporto "peggiore" è invece rappresentato dall'autobus, in quanto presenta i tempi medi di viaggio più elevati, come osservato anche nella tabella 12.1 e nella figura 12.2, e le frequenze maggiori per i range di utilità normalizzata più bassi.

Quando invece l'utilità viene calcolata tramite la funzione completa, l'appel di motocicli e autobus cresce a dismisura, grazie anche alla presenza di costanti che vanno ad incentivare l'utilizzo di questi mezzi di trasporto, che altrimenti sarebbero spesso ignorate causa tempi di viaggio piuttosto elevati rispetto alle alternative.

Si fa, inoltre, presente che il modo di trasporto bicicletta, subisce notevolmente la penalizzazione assegnata con la costante trovata a seguito del processo di calibrazione, tanto che i range temporali con la frequenza relativa più elevata risultano essere quelli centrali, ossia: 0.41-0.50 e 0.51-0.60.

Infine, interessante notare come l'introduzione dei parametri faccia praticamente rimanere invariata la frequenza relativa alle strategie auto e camminata all'interno dell'intervallo 0.91-1.00, mentre cambi significativamente la distribuzione delle frequenze negli altri intervalli, probabilmente proprio a causa del sensibile peggioramento dell'utilità dei piani associati alla strategia bici.

Per quanto riguarda il secondo scenario, i relativi grafici sono riportati nelle figure seguenti.

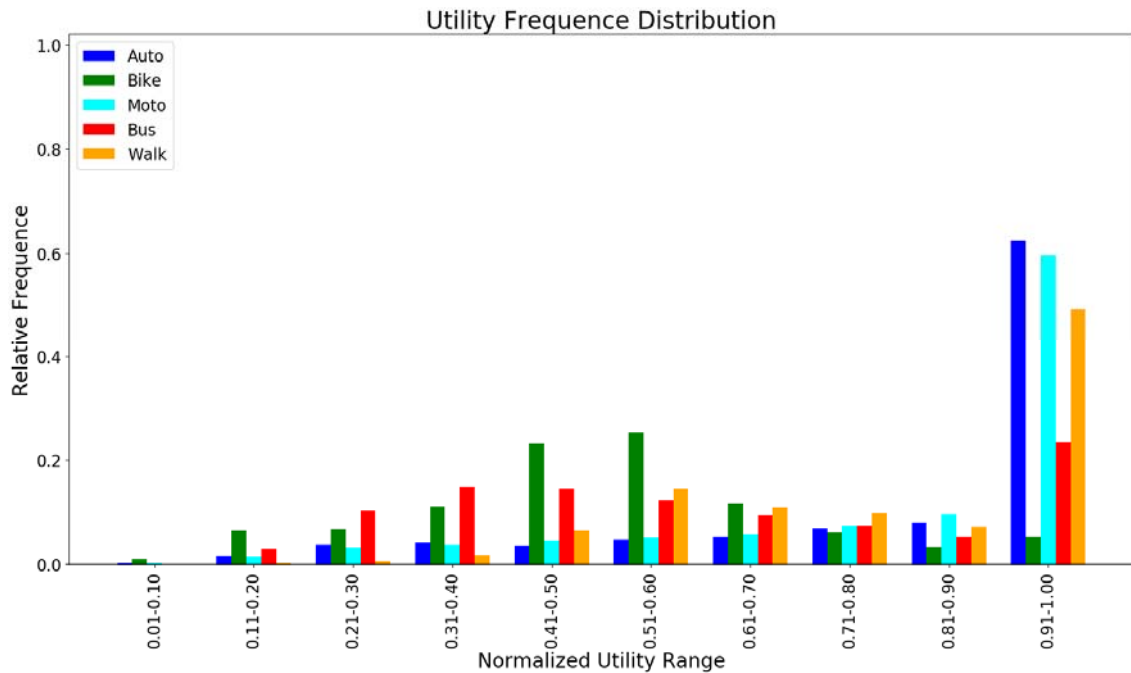


Figura 12.5 - Distribuzione frequenza utilità (S2: Solo piani auto, C1: Utilità con costanti)

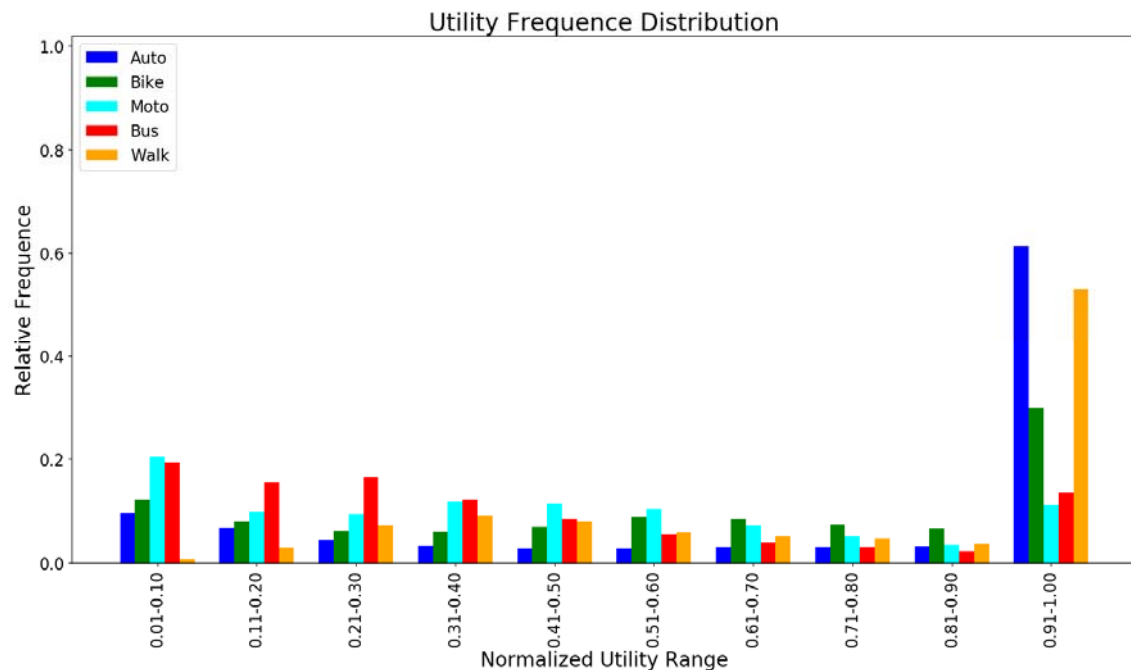


Figura 12.6 - Distribuzione frequenza utilità (S2: Solo piani auto, C2: Utilità uguale al tempo)

In questo caso sono stati rimossi tutti i piani associati alle persone non proprietarie di un'automobile, ma la forma dei due grafici risulta essere molto simile ai precedenti, confermando che i soli possessori di auto riescono a riprodurre in maniera sufficientemente precisa il comportamento dell'intera popolazione considerata. Le uniche differenze con lo scenario precedente sono legate a qualche piccola variazione

percentuale della frequenza di alcuni mezzi di trasporto, per esempio, nella figura 12.4 le moto avevano una frequenza relativa di poco superiore a quella dell'autobus, mentre nella figura 12.6 la situazione si è invertita.

Per quanto riguarda l'andamento della distribuzione, questo risulta essere pressoché identico, così come le analisi presentate per i due grafici precedenti.

Vengono, infine, riportati i grafici relativi al terzo ed ultimo scenario presentato.

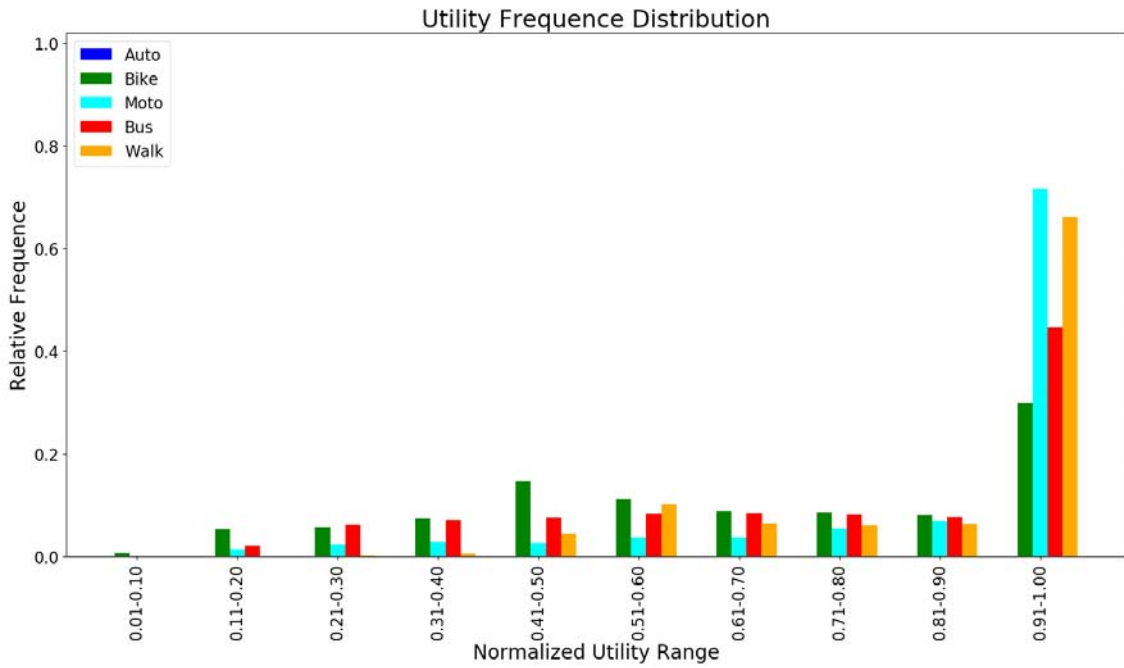


Figura 12.7 - Distribuzione frequenza utilità (S3: Solo piani bici, C1: Utilità con costanti)

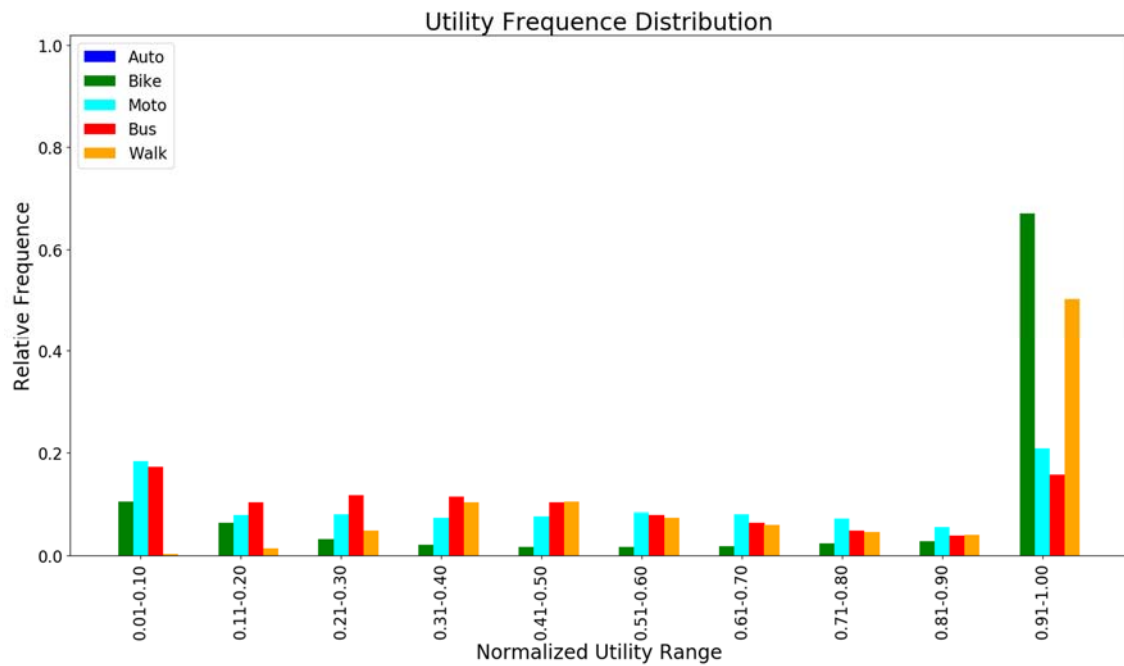


Figura 12.8 - Distribuzione frequenza utilità (S3: Solo piani bici, C2: Utilità uguale al tempo)

Quest'ultimo scenario è stato riportato per studiare le scelte eseguite unicamente dai proprietari di biciclette, qualora venisse negata l'alternativa automobile a chi la possiede, in modo da poter valutare quali sono i mezzi migliori per eseguire gli spostamenti programmati, escludendo appunto l'auto.

Tenendo in considerazione solamente l'addendo temporale della funzione obiettivo (Fig. 12.8) è evidente come le strategie che prevedono l'uso della bicicletta o della camminata, siano quelle che presentano i valori di utilità nettamente più elevati, fatto che significa che sono le strategie che mediamente consentono di concludere più velocemente lo spostamento, qualora non fosse disponibile l'automobile come alternativa. Questo risultato era in parte prevedibile in quanto ciclisti e pedoni risultano essere influenzati in minima parte dal traffico veicolare stradale, diversamente da quanto accade per autobus e motocicli, e dunque riescono a completare i loro viaggi risparmiando parecchio tempo rispetto alle alternative disponibili.

La situazione, ovviamente, cambia con l'introduzione dei parametri riportati in Tab. 12.2, appositamente calibrati per riprodurre la ripartizione modale di partenza dello scenario creato (capitolo 9), caratterizzato da una piccola percentuale di biciclette e circa il 30% di autobus. La frequenza relativa associata alla strategia bici per l'ultimo range di utilità normalizzata, infatti, ha subito un brusco calo, mentre sono state registrate delle impennate di quelle legate ai motocicli e agli autobus, proprio grazie all'introduzione di parametri incentivanti verso queste ultime e penalizzanti nei confronti della prima.

Discorso a parte va eseguito per i pedoni, che fanno registrare un incremento della frequenza relativa, ma non molto marcato come per le altre due categorie di veicoli. Come per gli scenari precedenti, i piani camminata presentano coefficienti correttivi pressoché nulli e sono stati assegnati a un numero limitato di persone, che tendono a preferirli a tutte le altre alternative sia che vengano considerati i coefficienti correttivi, sia che si tenga conto unicamente del tempo di viaggio.

In sintesi, l'alternativa che prevede il completamento dello spostamento in bicicletta sarebbe la più vantaggiosa per tutti coloro che sono dotati di questo mezzo, qualora venisse eliminata la possibilità di utilizzare l'auto e quindi la scelta fosse ristretta a metodi di spostamento "green" (tra virgolette poiché in questa categoria non dovrebbero essere compresi i motocicli), nel caso il fattore discriminante della scelta fosse unicamente il tempo di viaggio. Tuttavia, includendo anche le costanti trovate

all'interno della funzione di utilità, questa strategia viene fortemente penalizzata a vantaggio del trasporto pubblico locale e dei motocicli, per le motivazioni esposte sopra. Terminata l'analisi delle distribuzioni di utilità normalizzata per i vari scenari proposti, si vuole concentrare l'attenzione su un altro aspetto piuttosto interessante, ossia come si sono comportate le varie persone virtuali dopo aver provato tutti i piani a loro disposizione, quando è arrivato il momento di scegliere quale fosse il migliore per ognuna di esse.

Come detto, per effettuare questa scelta è stato utilizzato un algoritmo di selezione dei piani basato sulla funzione di utilità, all'interno del quale sono stati introdotti i parametri riportati nella tabella 12.2. Ora, si vuole indagare quante persone abbiano confermato la scelta iniziale, coincidente anche col modo di trasporto preferito, e quante di esse abbiano optato per una diversa alternativa e in particolare, in quest'ultimo caso, in quali direzioni siano avvenuti questi cambi. Il tutto è stato riassunto nella tabella seguente.

		Strategia Finale					Tot Iniziale
		Auto	Bici	Moto	Bus	Piedi	
Strategia Iniziale	Auto	10384	217	714	3445	2579	17339
	Bici	531	379	158	918	435	2421
	Moto	642	59	3634	1009	855	6199
	Bus	3880	1618	1120	8235	2705	17558
	Piedi	1902	148	573	3951	6746	13320
Tot Finale		17339	2421	6119	17558	13320	56837

Tabella 12.4 - Scelte eseguite dalla popolazione virtuale

Dalla tabella 12.4 si evince che la maggioranza della popolazione, dopo aver provato tutte le alternative a disposizione, continua ad utilizzare la strategia scelta inizialmente, coincidente con il modo di trasporto preferito; infatti, fatta eccezione per la strategia bici, per la quale soltanto il 16% conferma la scelta di partenza, oltre il 50% delle persone continua ad utilizzare la modalità di trasporto preferita.

In generale, è possibile osservare un cospicuo scambio di piani tra persone inizialmente utilizzanti la bicicletta, l'autobus e la camminata, mentre è molto ridotto il numero di utenti che passano alla bici partendo da auto o moto, molto probabilmente a causa del

fattore molto penalizzante nei confronti dei velocipedi introdotto nella funzione di utilità, che fa risultare questo modo di trasporto molto meno vantaggioso rispetto ai veicoli motorizzati. Questi, tuttavia, cedono utenti alle strategie autobus e camminata, anche grazie agli incentivi in tale direzione realizzati dalle costanti utilizzate.

Concludendo questa breve analisi si può, dunque affermare che i mezzi confermati più spesso risultano essere le automobili e i motocicli (con circa il 60% delle conferme), le persone che inizialmente usavano il servizio di trasporto pubblico o la camminata vengono ripartiti, in percentuali variabili, tra tutte le altre strategie, con comunque una buona fetta di utenti che continua ad utilizzare la strategia inizialmente scelta; l'unico modo che perde molti utenti iniziali è la bicicletta, ma ne acquista altrettanti dalle strategie camminata e autobus.

Con quest'ultima disamina si conclude il paragrafo dedicato ai risultati riguardanti la popolazione virtuale ed è possibile passare a quelli relativi alla rete stradale.

## **12.2. Flussi ed emissioni inquinanti**

Nel corso di questo paragrafo verranno illustrati i risultati riguardanti flussi ed emissioni inquinanti caratterizzanti l'intero *digital twin* della città di Bologna, ottenuti a seguito di una microsimulazione svolta durante l'orario di punta del mattino (7:00-8:00).

Tale simulazione, tuttavia, presenta alcune peculiarità: la prima riguarda lo scenario utilizzato, che riprende quello descritto nel corso del capitolo 9, quindi con la stessa domanda di fondo e la stessa popolazione virtuale, per la quale però sono stati selezionati i piani da utilizzare tra le varie alternative a disposizione tramite la funzione di utilità governata dai parametri calibrati nel corso del capitolo 11 e riportati nella tabella 12.2.

La seconda caratteristica è legata al fatto che di questa ora di simulazione sono stati registrati solamente i dati riguardanti la seconda mezz'ora, in modo da permettere il caricamento di buona parte della domanda sulla rete nella prima metà dell'intervallo scelto (*warm up time*) e analizzare lo scenario in condizioni di traffico realistiche, proprio per evitare che i primi veicoli in ingresso sulla rete scarica possano influenzare la veridicità dei risultati ottenuti; per ulteriori dettagli si veda l'appendice A.9.

I primi grafici che vengono presentati nel seguito riguardano i flussi in ingresso ai vari archi della rete, prima rappresentati con una visione d'insieme (Fig. 12.9) e poi nel dettaglio per alcune zone significative, come il tratto centrale della tangenziale nord, il nodo autostradale di Casalecchio e il centro cittadino (Figg. 12.10 - 12.12).

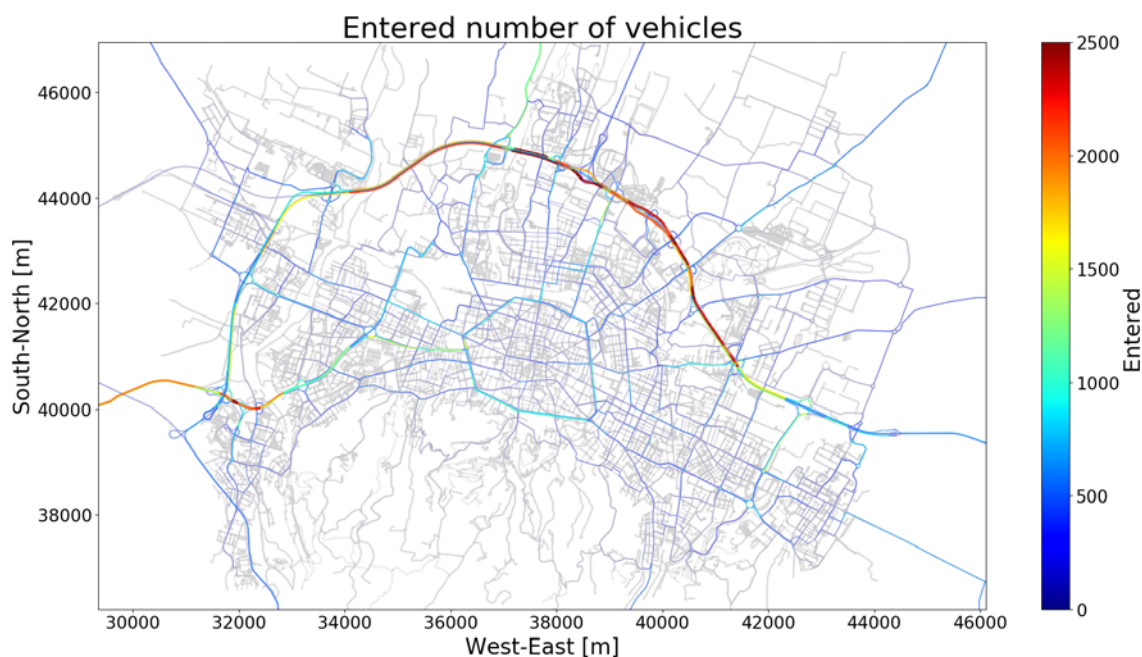


Figura 12.9 – Flussi sugli archi della rete di tutta la città di Bologna (riferiti alla mezzora simulata)

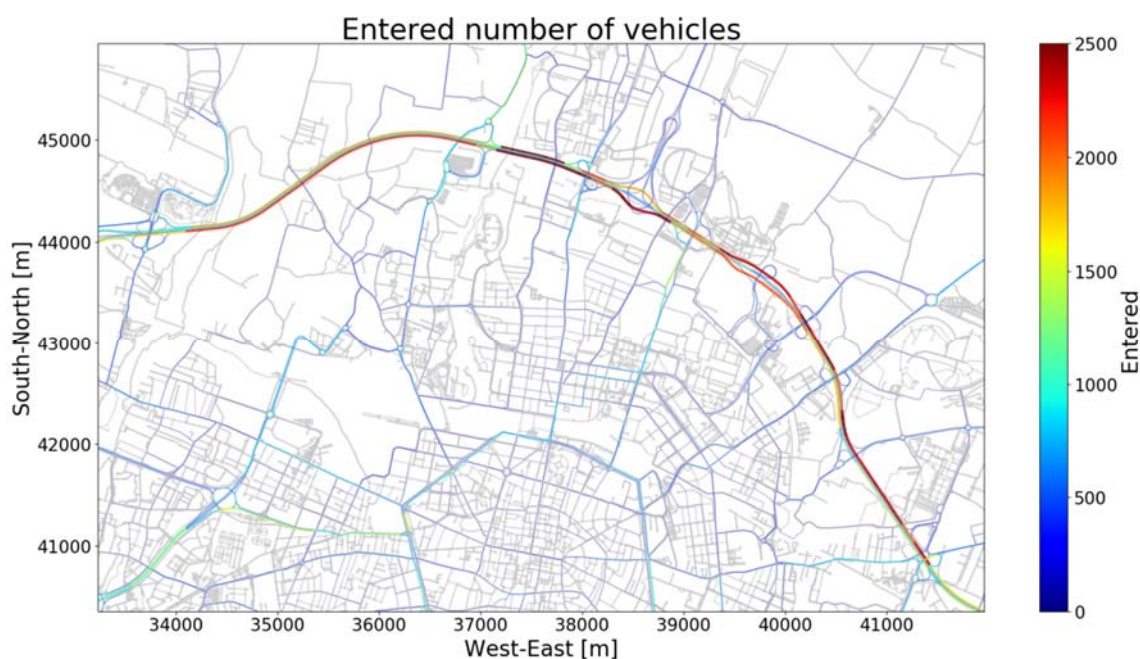


Figura 12.10 – Flussi sugli archi della zona nord della città (riferiti alla mezzora simulata)

Da questi primi due grafici è interessante osservare come il flusso sulla tangenziale, in entrambe le direzioni, risulti essere molto elevato e prossimo ai valori limite di capacità di tali archi stradali, con circa 2500 veicoli in mezzora, distribuiti su entrambe le corsie. Se riportati all'ora, tramite un semplicistico raddoppio dei risultati, questi flussi dovrebbero essere dell'entità dei 2500 veicoli/h per corsia, valori molto elevati, ma sicuramente sovradimensionati se si tiene conto della variabilità dei flussi di traffico all'interno del generico intervallo orario e del fatto che la mezzora considerata rappresenta il periodo più carico dell'ora di punta mattutina. Pertanto, il flusso orario

massimo sugli archi costituenti la tangenziale è, verosimilmente, riducibile rispetto al valore ottenuto mediante il mero raddoppio dei flussi associati alla mezzora.

Inoltre, i risultati presentati risultano essere pressoché accettabili se paragonati con le proiezioni di traffico transitante su tale arteria all'anno 2018, basate sulle misurazioni eseguite nel corso del 2016, eseguite in un precedente studio dei flussi veicolari circolanti lungo il sistema autostradale cittadino [29], in cui è stato ipotizzato un incremento annuo dei flussi pari al 2%, basandosi sulle crescite documentate negli anni precedenti mediante dati statistici. In tale trattazione emerge come, nel 2018, il flusso orario nel tratto più carico di tale infrastruttura risulti essere di circa 4800 veicoli (quindi 2400 veicoli/h per corsia), valore del tutto assimilabile a quello ottenuto al termine della microsimulazione eseguita sulla mezzora considerata.

Un altro dettaglio interessante riguarda la differenza tra flussi registrati lungo gli archi costituenti il Raccordo Autostradale RA1 (che collega le autostrade A1, A13 e A14) e quelli sulla tangenziale.

Dalla Fig. 12.10 si può, infatti, notare che gli archi dell'autostrada, diversamente da quelli della tangenziale, risultano colorati con colore azzurro tendente al celeste, indice che i flussi sono nell'ordine del migliaio di veicoli nel periodo di tempo considerato. Questa significativa differenza è dovuta all'assenza della domanda veicolare (leggera e pesante) di attraversamento della città proveniente da altre province della regione e non solo, che in genere rappresenta la porzione più corposa dei flussi circolanti su questi archi, proprio a causa del metodo di generazione della domanda esterna all'area di studio riportata nel modello, che è stata ricavata a partire da una matrice OD relativa alla zonizzazione della sola provincia bolognese.

Nonostante sia stata trascurata una notevole fetta della domanda di attraversamento, il tratto autostradale cittadino risulta essere comunque mediamente trafficato in quanto utilizzato da gran parte degli utenti che effettuano spostamenti della città da un capo all'altro della provincia, che la vedono come prima alternativa ad una tangenziale prossima ai limiti di capacità.

Una ulteriore zona caratterizzata da flussi piuttosto elevati e strettamente correlata all'asse autostradale cittadino è riportata in Fig. 12.11, in cui è rappresentato il nodo tra A1, A14, tangenziale e SP569 (denominata via Nuova Bazzanese) situato nel comune di Casalecchio di Reno.

In particolare, i valori più marcati sono stati registrati sulla strada provinciale in direzione periferia, poiché essa rappresenta una delle principali arterie ad elevata



velocità di scorrimento che consente di raggiungere la tangenziale provenendo dal centro cittadino. Interessante notare la presenza di un arco in cui i flussi risultano essere più elevati rispetto ai precedenti e successivi. La spiegazione di tale fenomeno è da ricercare nella conformazione della rete, la quale prevede che su tale arco confluiscono i veicoli provenienti dalla zona centrale del comune di Bologna e dal comune di Casalecchio, che vogliono immettersi in tangenziale o proseguire verso Modena, creando un breve tratto di congestione piuttosto intensa, ma completamente auto controllata e che non causa code sulle due arterie convergenti.

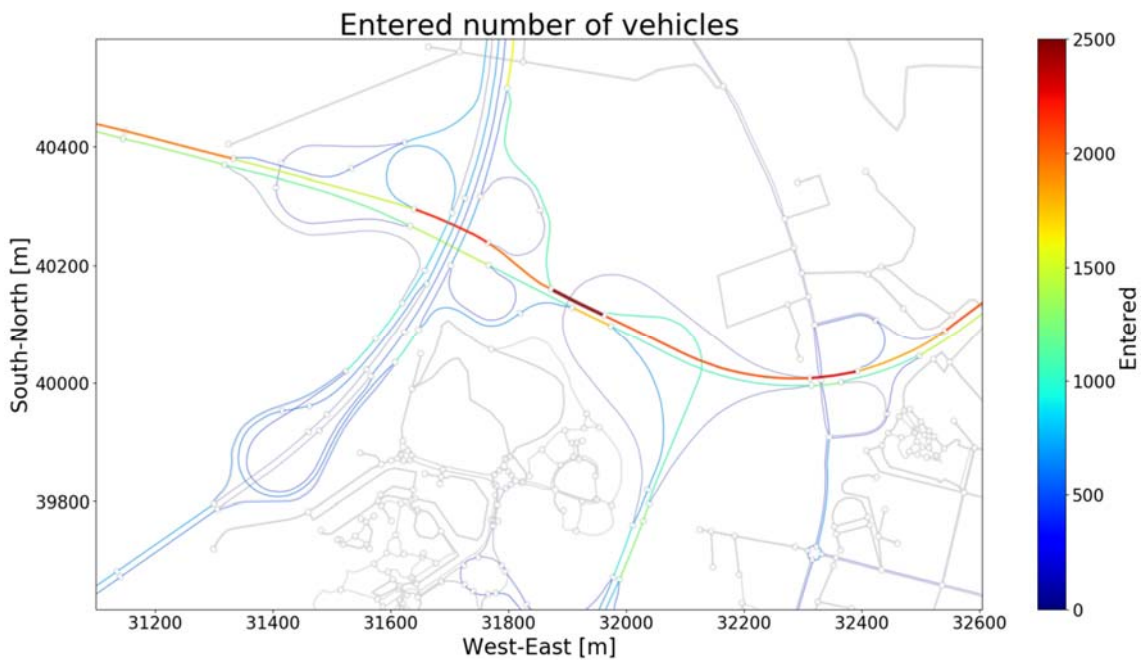


Figura 12.11 - Flussi sugli archi in prossimità del nodo di Casalecchio (riferiti alla mezzora simulata)



Figura 12.12 - Flussi sugli archi nel centro città (riferiti alla mezzora simulata)

Infine, è stato riportato il diagramma dei flussi relativi al centro città, comprendente anche i viali di circonvallazione e la prima periferia, dal quale è possibile osservare dei flussi di entità modesta rispetto a quelli osservati nelle figure precedenti, ma comunque piuttosto significativi, nell'ordine dei 1000/1500 veicoli transitati lungo le strade principali (su tutte: l'anello dei viali, via A. Costa, via Sabotino, via Saffi, via Matteotti, via San Donato e via Massarenti), durante la mezzora considerata.

Molti di questi valori sono stati confermati mediante un confronto tra i flussi misurati da dispositivi rilevatori sparsi per la città e flussi registrati nel corso della simulazione, operazione descritta nel dettaglio all'interno del capitolo 13, dedicato alla validazione del modello.

Per concludere il discorso relativo ai flussi transitati per i vari archi della rete, prima di presentare i diagrammi riguardanti le emissioni inquinanti calcolate per il periodo di simulazione eseguito, si riportano i grafici delle velocità medie mantenute su ciascuno di essi, che consentono di percepire eventuali presenze di congestioni e rallentamenti del deflusso.

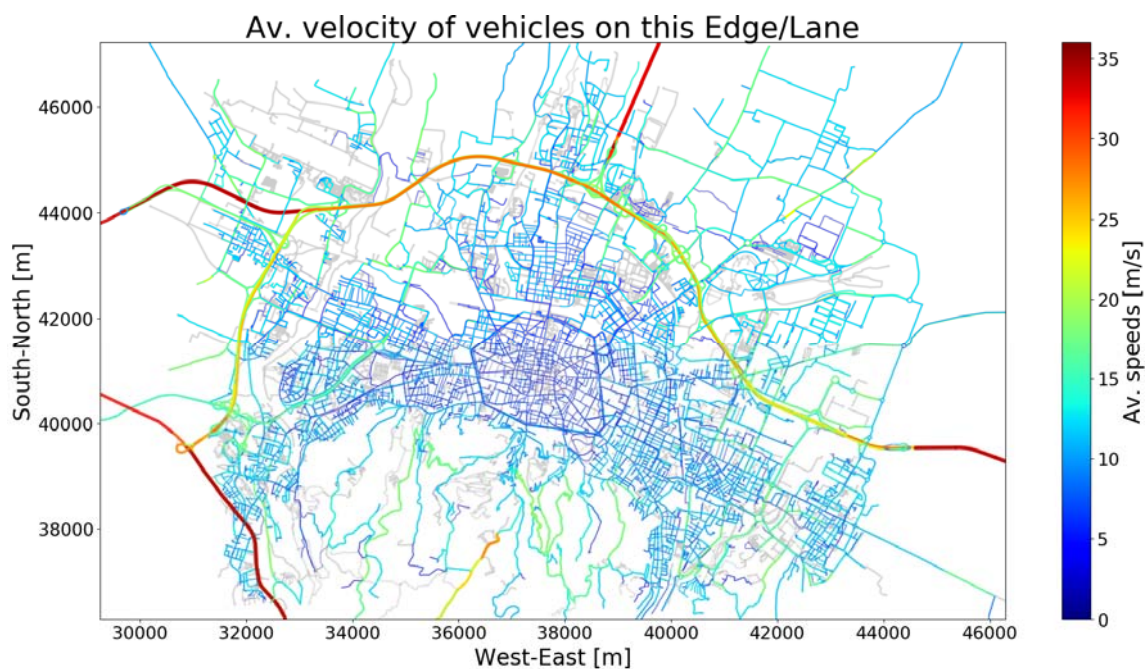


Figura 12.13 - Velocità medie tenute lungo i vari archi della rete (riferite alla mezzora simulata)

La figura 12.13 è piuttosto auto esplicativa e consente di percepire come le strade in cui si mantengono le velocità medie più basse sono quelle posizionate all'interno del confine tracciato dalle antiche mura della città, in cui si registrano valori nell'ordine dei 30 km/h. Mano a mano che ci si allontana da questa zona, le velocità medie iniziano a crescere fino a raggiungere i valori massimi lungo tangenziale e autostrada, contraddistinte da colori tendenti al giallo/verde e rosso.

Dalla semplice osservazione di tale diagramma, quindi, pare evidente la quasi totale assenza di rallentamenti significativi, a conferma della bontà del modello realizzato.

Seguono infine i grafici relativi al consumo di carburante e alle emissioni inquinanti e acustiche, nei quali le grandezze rappresentate sono, rispettivamente, espresse in litri o grammi per kilometro all'ora e decibel.

Osservando le figure 12.14 – 12.16 si evince che i consumi e le emissioni più elevate si verificano in corrispondenza degli incroci di porta S. Vitale, porta Saragozza e ponte Matteotti dove, verso la fine dell'ora simulata, sono state osservate alcune code dovute all'elevato flusso in transito, che ha causato una significativa riduzione delle velocità.

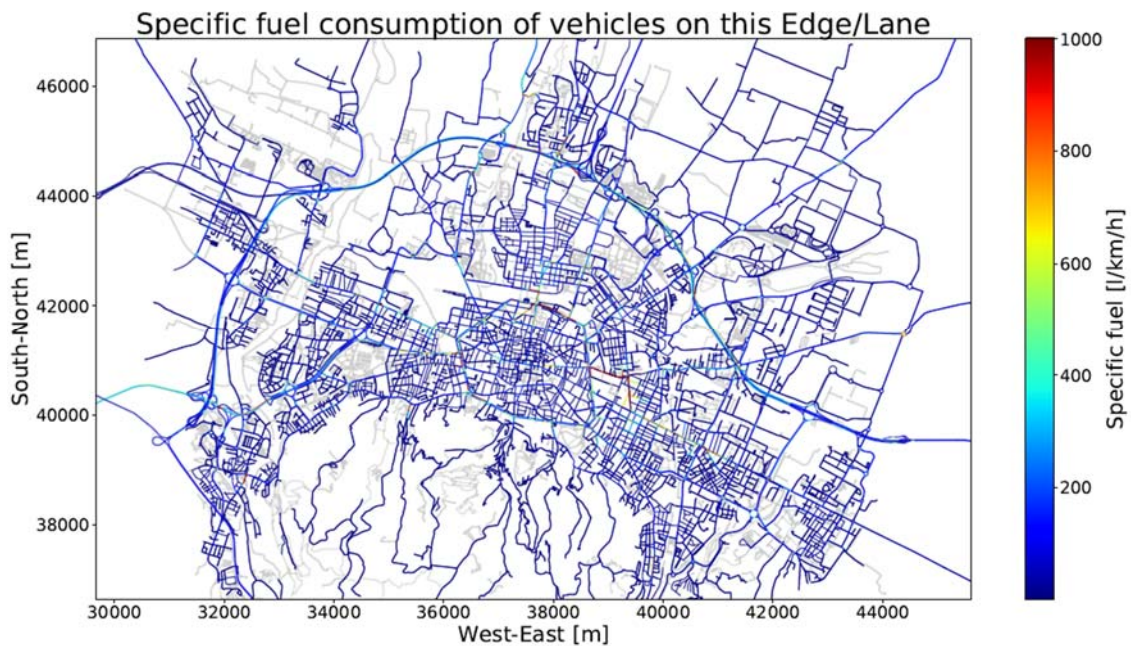


Figura 12.14 – Consumo specifico di carburante (riferito alla mezzora simulata)

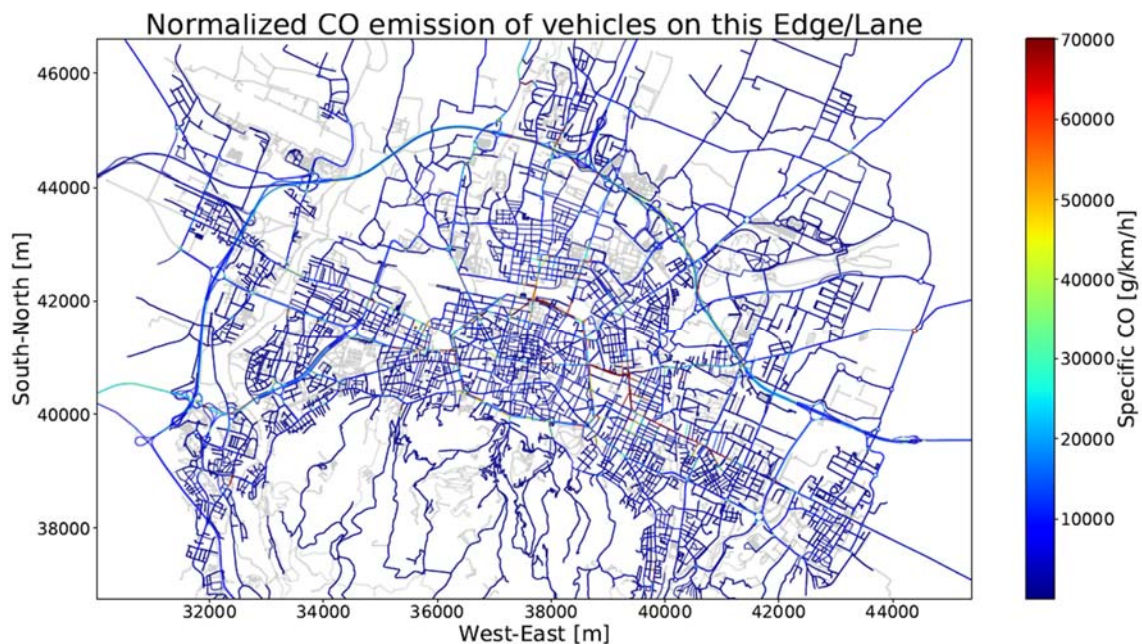


Figura 12.15 – Emissioni specifiche di CO (riferite alla mezzora simulata)

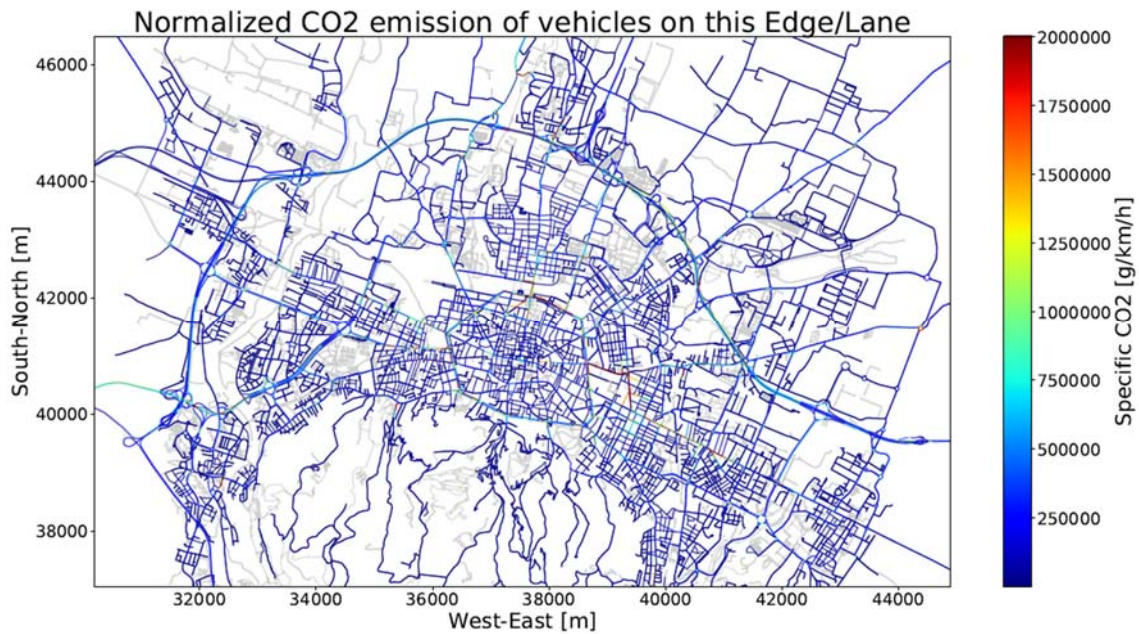


Figura 12.16 – Emissioni specifiche di CO2 (riferite alla mezzora simulata)

Sul resto della rete, invece, le grandezze riportate risultano essere relativamente modeste, anche grazie alle elevate velocità di percorrenza che hanno consentito di limitare le emissioni di inquinanti, in accordo con il concetto teorico, più volte confermato da analisi sperimentali, secondo il quale le maggiori produzioni si verificano a basse velocità di regime e diminuiscono mano a mano che esse aumentano.

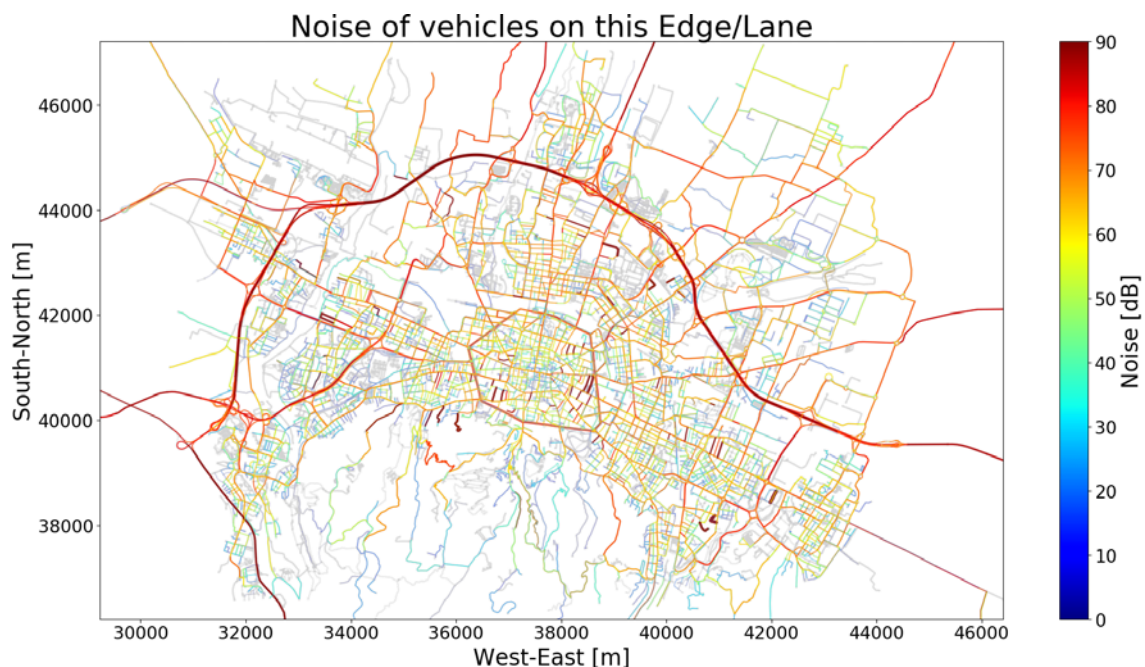


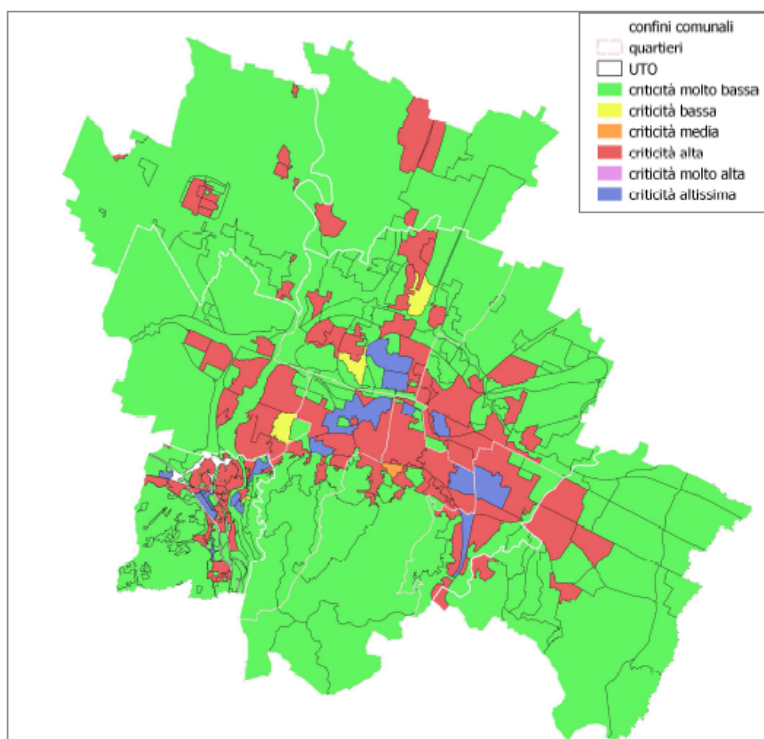
Figura 12.17 – Emissioni di rumore (riferite alla mezzora simulata)

L'ultima figura proposta, riporta una riproduzione della mappa del rumore prodotto sulla rete bolognese nella mezzora di simulazione in cui sono stati registrati i dati. Coerentemente con le attese, i valori più elevati sono stati rilevati in corrispondenza

delle arterie maggiormente trafficate e con la velocità di transito consentita più elevata, come il raccordo autostradale, i viali di circonvallazione, la strada provinciale 569, seguite a ruota dalle strade che si dipartono radialmente dal centro cittadino e quelle maggiormente percorse dai mezzi che svolgono il servizio di trasporto pubblico all'interno del centro storico.

Le emissioni acustiche più modeste invece si hanno in prossimità della zona pedonale circostante Piazza Maggiore, lungo le strade secondarie in cui vigono limiti di velocità più restrittivi (zone 30) sia interne che esterne alle mura cittadine e, più in generale, in tutte le vie meno trafficate della città.

Di grande interesse risulta essere il confronto con la mappa acustica (Fig. 12.18) pubblicata dal comune di Bologna, nell'ambito dell'aggiornamento del piano di azione per la riduzione del rumore ambientale nelle zone di maggior criticità, eseguito nel corso dell'anno 2018. [30]



*Figura 12.18 - Mappa acustica del comune di Bologna*

Sebbene quest'ultimo grafico sia rappresentato "a zone" e quindi meno dettagliato rispetto alla mappa ricavata a seguito della microsimulazione, e derivi da analisi riguardanti non solo il rumore prodotto dal traffico veicolare, è possibile notare una certa corrispondenza tra zone critiche, come nel caso del centro storico, percorso da un elevato numero di autobus, e di tutte le aree attraversate dalle strade radiali citate in precedenza. Pertanto, i risultati ottenuti sono in parte confermati da tale documento, anche se in maniera piuttosto grossolana.

## 13. VALIDAZIONE

---

Conclusa la fase di presentazione dei risultati ottenuti al termine dell'ultima microsimulazione, lanciata per descrivere il funzionamento del modello di rete, è stato possibile utilizzare alcuni dei dati ricavati per procedere alla validazione del lavoro eseguito.

In particolare, si è proseguito con un confronto tra i flussi transitati, nel corso della simulazione, per quegli archi lungo i quali, nella rete reale, sono posizionati dei dispositivi di conteggio di veicoli leggeri, e i flussi orari medi per il mese di Febbraio 2014 rilevati da tali strumenti di misurazione durante la fascia oraria 7:00-8:00.

Al termine della procedura di associazione dei rilevatori al *digital twin*, descritta nel dettaglio all'interno del paragrafo A.10 dell'appendice, è stato dunque possibile procedere al confronto tra flussi misurati e flussi simulati, su un totale di 459 archi sparsi per il comune di Bologna, il cui posizionamento è riportato nell'immagine seguente.



Figura 13.1 - Distribuzione spire nel comune di Bologna

Siccome i flussi simulati sono stati ricavati al termine di una simulazione della durata di 30 minuti (per le motivazioni esposte all'inizio del paragrafo 12.2), prima di procedere con il plot del grafico di confronto, si è deciso di riportare all'ora i risultati ottenuti, mediante un semplicistico raddoppio dei flussi sugli archi considerati, pur consci che con questa operazione si stia parzialmente trascurando la variabilità del traffico all'interno dell'intervallo orario.

Il diagramma risultante da questo confronto è riportato in Fig. 13.2, in cui è stata rappresentata anche la retta di regressione lineare, forzata a transitare per il punto (0,0).

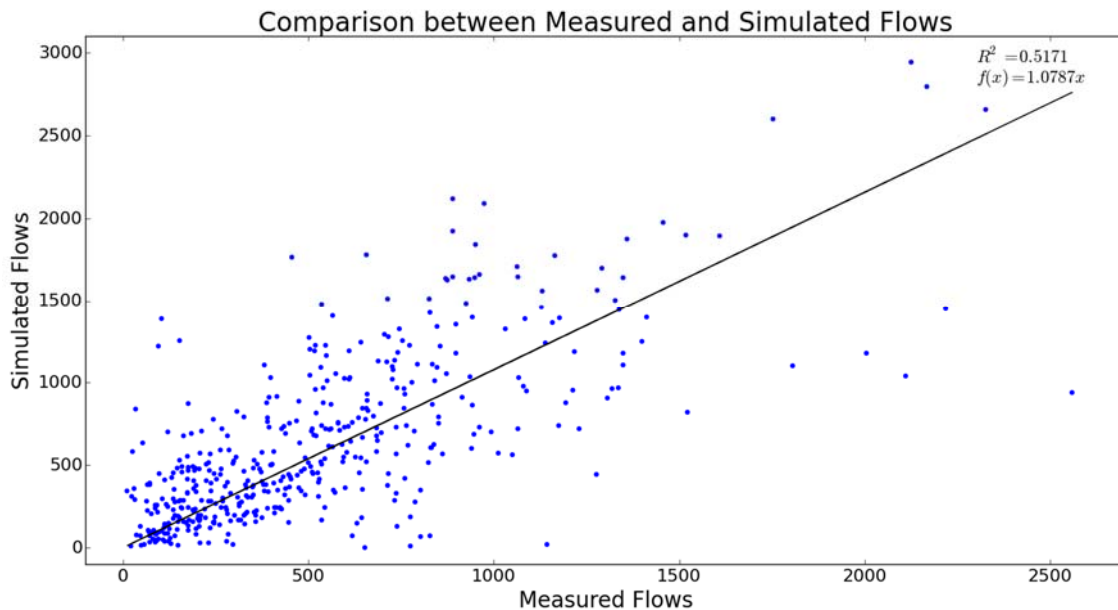


Figura 13.2 - Confronto tra flussi misurati e flussi simulati

Da esso è possibile osservare l'esistenza di una certa correlazione tra le grandezze riportate sui due assi coordinati; infatti, si nota subito un nucleo di punti molto compatti a ridosso della prima metà della retta di regressione, che rappresentano i risultati più precisi, ma sono presenti anche alcuni punti isolati molto distanti dalla linea di tendenza e disposti casualmente in prossimità dei due assi, causando una dispersione piuttosto marcata mano a mano che ci si allontana dall'origine.

I due indicatori riportati sul grafico riguardano il coefficiente di determinazione  $R^2$ , calcolato con la seconda delle due formulazioni proposte nel paragrafo 2.3.5, e il coefficiente angolare della retta di regressione. Quest'ultimo, essendo prossimo all'unità, precisamente pari a 1.0787, indica una buona corrispondenza tra le grandezze riportate sui due assi, secondo le limitazioni proposte nel medesimo paragrafo, mentre il valore  $R^2$  così calcolato, pari a 0.5171, si colloca circa a metà dell'intervallo di definizione, ma comunque risulta ben rappresentante la dispersione dei punti sul grafico, che non è pessima, ma neanche perfettamente allineata e raggruppata lungo la linea di tendenza.

Si è, dunque, deciso di indagare la natura di questi punti dispersi ed è emerso che appartengono a due categorie distinte di dati:

- I punti situati nelle vicinanze dell'asse x, o comunque piuttosto al di sotto della retta di regressione, cioè quelli per cui sono dominanti i flussi rilevati rispetto a quelli simulati, derivano principalmente da errori di posizionamento dei detector

sul modello di rete, manifestatisi durante la procedura di matching. Si è verificato, infatti, che molti punti appartenenti a questa categoria sono associati a rilevatori che, nella realtà, sono posizionati su arterie molto trafficate, ma che sul modello sono stati associati a strade secondarie, ad esse trasversali, in cui il flusso risulta essere chiaramente minore.

Un esempio lampante è quello del detector erroneamente posizionato in via Jacopo Barozzi, piuttosto che lungo viale Angelo Masini, in prossimità dell'autostazione, per cui i flussi rilevati erano 803, mentre quelli simulati solamente 66.

Di casi simili a quest'ultimo ne sono stati individuati circa una decina, sparsi per tutta la rete, ma non è stato possibile intervenire con una correzione in quanto sarebbe necessaria una revisione della modalità di matching dei detector con il *digital twin*, di per sé molto complicata perché facente riferimento a sistemi di coordinate locali differenti.

- I punti disposti in prossimità dell'asse y e molto al di sopra della retta di tendenza, cioè caratterizzati da valori maggiori per i flussi simulati rispetto ai rilevati, sono, invece, correlati a probabili difetti di funzionamento dei dispositivi contatori.

Sono, infatti, numerosi i flussi misurati lungo importanti arterie cittadine che hanno riportato dati del tutto irrealistici, in quanto molto sottodimensionati rispetto alle attese, che portano ad affermare con buon grado di sicurezza che tali strumenti fossero mal funzionanti.

Due esempi significativi a supporto di tale ipotesi riguardano: il tratto di via S. Donato in prossimità del cavalcavia della ferrovia in direzione centro, lungo il quale gli strumenti hanno rilevato flussi molto modesti, pari a 34 veicoli/h, contro gli 842 simulati, e la porzione centrale di via Aurelio Saffi in direzione periferia, notoriamente molto trafficata, e su cui i conteggi parlano di 105 veicoli/h a dispetto dei 1390 simulati.

In questi casi, e in altre situazioni simili individuate, risulta difficile credere che su strade di questa rilevanza per il traffico cittadino siano transitati così pochi veicoli in una intera ora di rilevazione ed è quindi scontato pensare a problemi derivanti dal conteggio.

Si fa, inoltre, presente che i flussi misurati dai detector comprendono al loro interno, essenzialmente, i transiti di automobili, van e furgoncini, che sono veicoli con



dimensioni molto simili e quindi difficilmente differenziabili da parte dei dispositivi radar, mentre ne sono esclusi i mezzi a due ruote (biciclette e motocicli) e i mezzi pesanti (autobus e camion), che invece riescono ad essere distinti dal primo gruppo di veicoli citati. I flussi transitati per gli archi del modello durante la simulazione, invece, considerano indistintamente tutte le categorie di veicoli, quindi, coerentemente con la domanda generata, includono: automobili, motocicli, biciclette e autobus. Vi è dunque una certa disuniformità tra i gruppi di mezzi considerati per le due tipologie di dati, che chiaramente andrà ad inficiare la precisione degli indicatori calcolati; nonostante ciò, tuttavia, è stata comunque fatta l'ipotesi che le diverse componenti di traffico considerate in eccesso o in difetto possano all'incirca equivalersi.

Siccome sono stati identificati circa una ventina di detector problematici, tramite un accurato controllo del posizionamento di ciascun rilevatore, è stato possibile rimuovere i punti ad essi associati dal confronto tra i flussi e ottenere un nuovo grafico in cui il coefficiente di determinazione ha assunto un valore migliore rispetto al precedente, pari a 0.6107, scontando, però, un leggero peggioramento del coefficiente angolare della retta di tendenza, cresciuto a 1.1301 e quindi leggermente al di fuori dei limiti di accettabilità imposti.

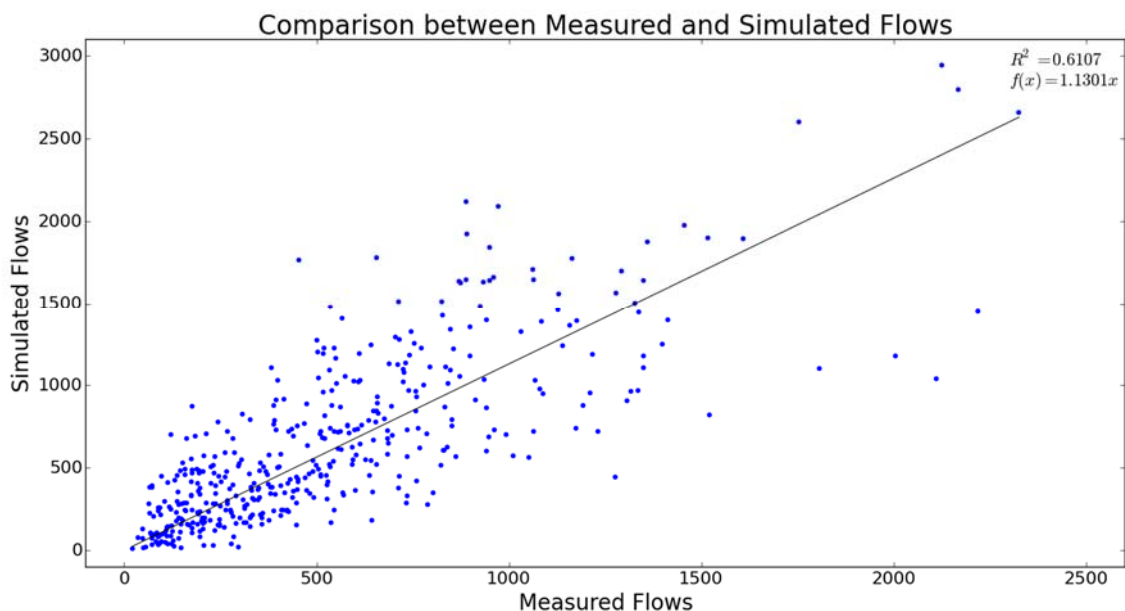


Figura 13.3 - Confronto tra flussi misurati e flussi simulati (senza i detector mal funzionanti)

Il coefficiente  $R_{GoF}^2$  assume un valore soddisfacente se si pensa che è variabile all'interno dell'intervallo  $[0,1]$ , dove 1 indica l'ottimo e 0 rappresenta l'assenza di correlazione tra le grandezze confrontate. Si fa presente, per esempio, che lo stesso indicatore è stato calcolato sia nell'ambito di un confronto tra flussi misurati dai

medesimi rilevatori in due giorni distinti appartenenti ai mesi di febbraio e settembre 2014, sia per un paragone tra flussi relativi a un giorno specifico e flussi giornalieri mediati su tutto il mese, ed è risultato, rispettivamente, pari a 0.9347 e 0.9885, valori molto elevati che sottolineano la robustezza dei dati a disposizione.

Per questa nuova configurazione, priva dei rilevatori per cui è stato ipotizzato il mal funzionamento, sono stati calcolati una serie di ulteriori indici utili per la validazione del modello, utilizzando le formule riportate nel paragrafo 2.3.5, tra cui la versione alternativa del coefficiente di determinazione  $R_{rlin}^2$ , pari a 0.875 e quindi, contrariamente al valore ottenuto con la formulazione precedente, ricadente al limite del campo di accettabilità previsto.

Nella tabella seguente si propone un riassunto dei principali indicatori calcolati.

<b>Indicatore</b>	<b>Valore</b>	<b>Limite di accettabilità</b>
$R_{GoF}^2$	0.6107	-
$R_{rlin}^2$	0.8750	> 0.88
MAE	238	-
MSE	109987	-
RMSE	52.37	< 15
MSEP	0.8828	-
RMSEP	0.9396	-

*Tabella 13.1 - Indicatori per la validazione*

Un particolare commento è da dedicare all'indice RMSE, il quale non rispetta le limitazioni teoriche proposte per l'accettabilità dei risultati e, anzi, risulta essere più di tre volte maggiore rispetto al valore limite per le reti urbane. Va detto che tali vincoli hanno un carattere molto teorico, in quanto spesso risulta problematico il loro soddisfacimento dal punto di vista pratico, come dimostrato anche da diversi studi svolti in passato; pertanto tale valore non è per forza sinonimo di una cattiva modellazione, soprattutto se sono presenti anche altri indicatori che, invece, confermano la bontà della ricostruzione della realtà.

Osservando poi il valore assunto dall'indice MAE è emerso che l'errore medio assoluto rilevato nel confronto tra flussi misurati e simulati risulta essere superiore ai 200 veicoli/h. Questo valore è del tutto accettabile quando il confronto è eseguito su

dispositivi contatori che hanno registrato il passaggio di migliaia di veicoli, quindi essenzialmente per quelli disposti lungo le arterie principali lavoranti in condizioni prossime alla capacità, ma lo è molto meno nel caso di detector situati in strade secondarie in cui il flusso in transito è molto basso, indicativamente inferiore ai 500 veicoli per ora.

Si è dunque deciso di indagare ulteriormente questo aspetto provvedendo alla separazione dei flussi (simulati e misurati) inferiori alle 500 unità da quelli maggiori a tale limite e valutarne nuovamente gli indicatori proposti nella tabella 13.1 (ad eccezione di  $R_{rlin}^2$ ) ottenendo i risultati riportati nella tabella 13.2.

Indicatore	Valore ( < 500 veicoli/h)	Valore ( > 500 veicoli/h)	Limite accettabilità
$R_{GoF}^2$	0.1903	0.2997	-
MAE	105	341	-
MSE	18996	181270	-
RMSE	55.41	45.79	< 15
MSEP	1.0252	0.6097	-
RMSEP	1.0125	0.7808	-

Tabella 13.2 - Indicatori per la validazione (separazione dei flussi)

Da queste ulteriori analisi, è emerso che la maggioranza degli indicatori subisce un peggioramento quando vengono considerati solo i flussi inferiori a 500 unità e un miglioramento nel caso opposto. Tale fenomeno è molto probabilmente legato alla buona modellazione dei flussi circolanti sulle strade principali e scarsa precisione per quanto riguarda le vie secondarie. Ciò è in parte dovuto al fatto che gli algoritmi di routing, utilizzati per assegnare gli itinerari da seguire per i vari spostamenti, tendono a veicolare la maggior parte dei mezzi sulle arterie principali, generalmente le più convenienti da utilizzare, e solo una volta prossime al raggiungimento del limite di saturazione (quindi a seguito del notevole incremento del loro costo), a distribuirli sulle secondarie; questa procedura risulta ottimale per la fluidità della circolazione nel corso della simulazione, ma certamente meno precisa nell'ambito della validazione, che comprende solo un numero molto limitato di archi rispetto al totale presente nel modello.

Infatti, si è osservata una buona corrispondenza dei flussi simulati con quelli misurati dai dispositivi contatori sulle strade con un elevato numero di veicoli in transito, in cui l'errore mediamente commesso (circa 340 transiti) è significativamente inferiore a quello registrato lungo le strade di minore importanza (105), per cui la proporzionalità è nettamente peggiore, se confrontato con i valori di flusso massimi registrati per ciascuna categoria, rispettivamente 2600 e 500 veicoli (rapporto 1:10, contro 1:5).

Ciò sembrerebbe, dunque, confermare l'ipotesi di modellazione corretta dei flussi circolanti lungo le arterie ad elevata capacità e di minor precisione per le strade di inferiore importanza.

Si vuole inoltre far presente che il miglioramento registrato per molti indicatori nel caso di esclusione dei dati registrati su strade con flussi inferiori alle 500 unità, avviene anche nei confronti della configurazione iniziale, a conferma del fatto che la presenza dei dati meno precisi influenzi i risultati complessivi della validazione, tanto che uno degli indici più significativi come l'RMSE subisce una riduzione non trascurabile che lo porta ad avvicinarsi ai limiti di accettabilità prefissati, ma sempre rimanendone al di fuori per le motivazioni esposte precedentemente.

Per quanto riguarda il coefficiente  $R^2$ , invece, si ha una notevole peggioramento rispetto alla situazione iniziale poiché rimuovendo alcuni punti dal grafico (diversi a seconda del caso considerato) si provoca uno squilibrio all'interno della formula che viene usata per la sua determinazione, di tipo non additivo, che quindi restituisce valori molto bassi; pertanto, proprio per questa motivazione, tale indicatore non dovrebbe essere tenuto in considerazione in questa seconda parte di analisi.

Infine, si propone un confronto con il grafico di validazione del modello ottenuto in un lavoro precedente a quello presentato, in cui è stata considerata unicamente la domanda veicolare privata. [15]

Confrontando le figure 13.3 e 13.4 è evidente, per la prima, il miglioramento dei risultati della validazione, sia per quanto riguarda il coefficiente  $R^2$ , per cui si ha quasi un raddoppio del valore, ma soprattutto per quel che concerne il coefficiente angolare della retta di regressione lineare, molto al di sotto del limite di accettabilità.

Si fa presente che i risultati riportati in Fig. 13.3 fanno riferimento a un modello in cui il routing non è stato effettuato con il metodo DUE, come nella presente trattazione, e quindi, nonostante le fonti da cui sono state ricavate la domanda di spostamento tramite auto e i conteggi di traffico siano le medesime, pur non avendo considerato le altre 3 tipologie di veicoli che sono state incluse nel corrente studio, questo aspetto può aver

significativamente contribuito al netto miglioramento degli indici di correlazione tra flussi misurati e simulati.

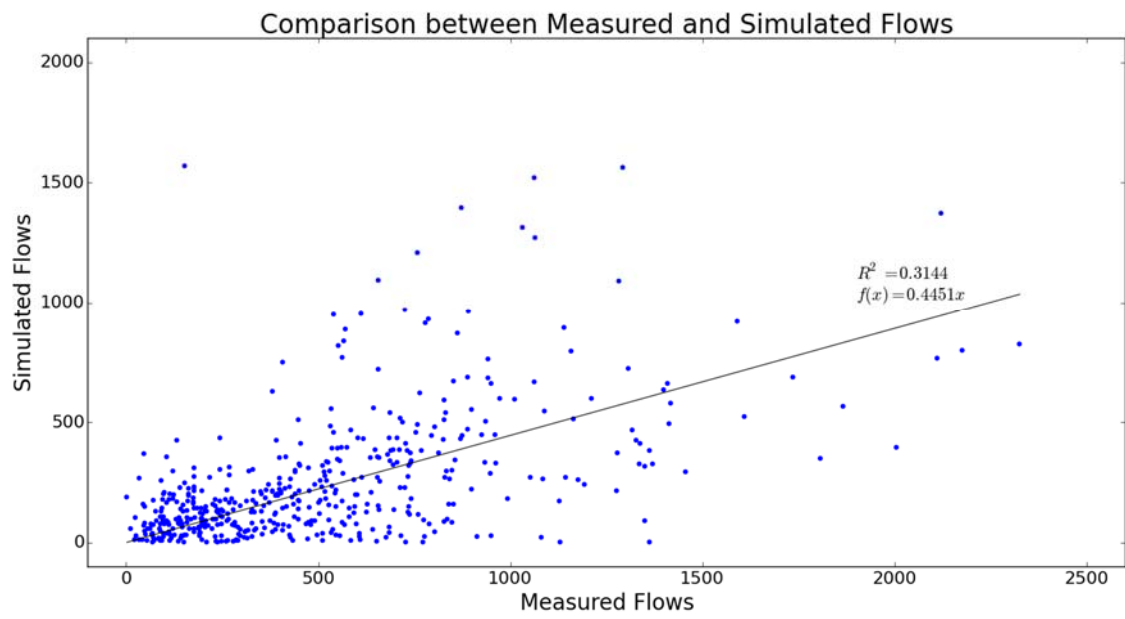


Figura 13.4 - Confronto tra flussi misurati e simulati, ricavati da un lavoro precedente

## 14. CONCLUSIONI

---

Nel corso del presente elaborato è stata illustrata, in maniera approfondita, la procedura seguita per la generazione di una popolazione virtuale che potesse riprodurre realisticamente il comportamento delle persone residenti all'interno dell'area di studio individuata, con particolare attenzione alle scelte da esse eseguite nella fascia oraria 7:00-8:00 del giorno feriale medio, per motivazioni legate alla necessità di compiere spostamenti sistematici (es. casa-scuola o casa-lavoro).

Per il raggiungimento dello scopo prefissato è stata generata una popolazione virtuale composta da 56837 individui, sulla base dei numerosi dati a disposizione, descrittivi della domanda di spostamento all'interno dell'intervallo orario considerato. Dopodichè, a ciascuna persona è stata assegnata la proprietà di alcuni veicoli (in maniera casuale, ma rispettando i dati pubblicati dal PRA per il comune di Bologna) e un piano di viaggio associato a ogni alternativa a disposizione, comprese quelle caratterizzate dall'uso di mezzi di trasporto pubblico o da spostamenti effettuati a piedi.

Mediante l'algoritmo *Exchange-Plans*, basato sullo stringente vincolo del rispetto, ad ogni iterazione, della ripartizione modale inizialmente fissata, sono state fatte provare tutte le possibili alternative disponibili per ciascun individuo, in modo da ottenere tempi effettivi di viaggio successivamente paragonabili. Questi valori sono stati utilizzati nell'ambito della calibrazione delle costanti caratterizzanti la funzione di utilità introdotta, le quali, a loro volta e insieme alla medesima funzione, sono successivamente state impiegate per l'individuazione del piano di viaggio più conveniente per tutte le persone facenti parte della popolazione.

Quello che è emerso dall'analisi delle scelte compiute al termine di tale procedimento è che le strategie più utilizzate per compiere gli spostamenti siano quelle che fanno uso di auto e moto, per chi possiede uno di questi due veicoli, sostituite dalla camminata e dai mezzi pubblici, qualora la persona non sia proprietaria di alcun mezzo, mentre la bicicletta rappresenta il mezzo meno utilizzato, da entrambe le categorie di utenti.

Tutto ciò ricalca alla perfezione quanto previsto dalla ripartizione modale ottenuta al termine della creazione dello scenario, anche grazie ai parametri introdotti nella funzione di utilità, calibrati proprio con l'obiettivo di ricreare tale configurazione.

Tuttavia, se le scelte venissero effettuate unicamente basandosi sulla componente temporale della funzione di utilità, si potrebbe osservare che la bicicletta risulterebbe molto più utilizzata degli altri mezzi di trasporto disponibili, e sarebbe seconda solamente all'automobile. Qualora quest'ultima categoria di veicoli fosse rimossa

dall'elenco, la bicicletta rappresenterebbe il mezzo ecosostenibile più utilizzato tra i proprietari di velocipedi, seguito dalla strategia camminata e molto distanziata dai piani di viaggio che prevedono lo spostamento in moto o in autobus. La motivazione è essenzialmente legata alla rapidità di spostamento, di tipo door-to-door, consentita dalla bicicletta nei confronti degli altri modi di trasporto che invece risultano fortemente influenzati dalla congestione stradale e dunque dai ritardi che ne conseguono.

Dato che la ripartizione modale ottenuta considerando solo il fattore tempo è molto diversa da quella di partenza e da quella pubblicata dal comune di Bologna, risulta di fondamentale importanza la considerazione di quei coefficienti correttivi che consentono di riportare lo share modale in condizioni tali da riprodurre la composizione di traffico reale nella maniera più veritiera possibile.

La ricerca sistematica della fedele rappresentazione della realtà è dovuta alla possibilità di riuscire a riprodurre gli effetti della circolazione veicolare in maniera molto precisa sotto diversi aspetti, su tutti la distribuzione dei flussi di traffico all'interno della rete, l'emissione di sostanze inquinanti e la produzione di rumore atmosferico in zone sensibili della città.

Tali risultati sono stati ottenuti al termine di una microsimulazione di traffico della durata di 30 minuti, eseguita al termine del processo di scelta della migliore alternativa per ogni individuo, in cui oltre alla popolazione virtuale è stato considerato anche un certo quantitativo di veicoli provenienti dall'esterno dell'area di studio e rappresentante la domanda di scambio e attraversamento, non soggetta alle analisi svolte precedentemente. Essi sono stati confrontati con alcuni dati derivanti da misurazioni e studi svolti in passato per validare gli esiti della trattazione.

Il confronto di maggior importanza è stato eseguito paragonando i flussi derivanti dalla simulazione (raddoppiati per riportarli all'ora di riferimento) e transitati lungo specifici archi ben individuati, con i flussi misurati da dispositivi contatori situati nelle strade reali ad essi corrispondenti, durante la fascia oraria 7:00-8:00 e mediati su tutti i giorni feriali del mese di febbraio 2014. Esso ha dimostrato una buona corrispondenza tra dati simulati e rilevati sul campo grazie ai diversi indicatori di qualità che sono stati calcolati, e pertanto si può affermare che l'intera trattazione ha fornito risultati del tutto soddisfacenti e abbastanza prossimi alla realtà, con la precisazione che la maggior accuratezza è stata registrata in corrispondenza delle arterie di maggior capacità, mentre lungo le strade secondarie essa cala leggermente, anche a causa di problematiche legate all'algoritmo utilizzato durante la fase di routing.

In futuro sarà possibile ottenere dei risultati ancora più interessanti, andando a migliorare diversi aspetti del lavoro appena presentato, come: la distribuzione dei flussi sulla rete tramite algoritmo DUE, per cui probabilmente servirebbe un numero maggiore di iterazioni e quindi lunghi tempi a disposizione per il completamento di tale procedura; una maggiore precisione e aggiornamento dei dati a disposizione per la generazione della domanda (dato che quelli utilizzati fanno riferimento all'anno 2001) e per lo svolgimento delle simulazioni; una correzione dell'algoritmo di associazione dei rilevatori reali alla rete virtuale, poiché questa procedura ha fatto registrare alcuni problemi durante la validazione del modello.

Interessanti sviluppi futuri, invece, potrebbero riguardare: la determinazione di ulteriori coefficienti per la funzione di utilità in modo da renderla sempre più precisa e simile al processo di scelta realmente effettuato dal generico utente, la possibilità di eseguire simulazioni di traffico della durata di 24 ore, l'introduzione della domanda legata a spostamenti non sistematici o al trasporto merci, ad ora inesistenti nel modello, ma anche di quella associata agli spostamenti eseguiti in treno e provenienti dall'esterno dell'area di studio, che causerebbe un notevole incremento di persone circolanti all'interno di essa tramite le diverse strategie di mobilità presentate, dando vita ad una importante componente di domanda multi-modale, attualmente trascurata a vantaggio di spostamenti completamente eseguiti tramite un solo modo di trasporto, a causa della mancanza di dati sufficientemente dettagliati.



## APPENDICE

In questa appendice verranno approfonditi alcuni aspetti che nel corso della trattazione sono stati solamente accennati, ma che meritano una descrizione più dettagliata.

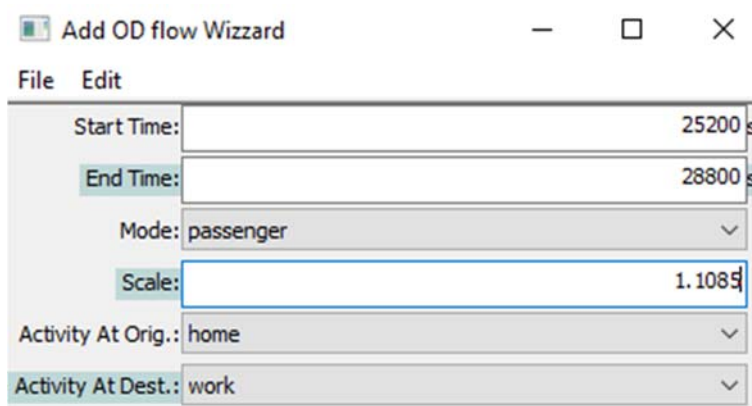
### A.1. Generazione Trips&Routes

Di seguito viene illustrata la procedura utilizzata per la generazione dei *Trips&Routes* relativi alla componente di domanda legata al mezzo di trasporto auto. Essi sono stati impiegati sia come base per il test della rete (paragrafo 6.1), sia come “domanda di fondo” all’interno dello scenario studiato, descritto nel capitolo 9.

Nota la matrice OD da cui estrarre i dati di domanda, il primo passo consiste nell’import della stessa all’interno del software, tramite un apposito comando:

*Demand* → *Zone to Zone demand* → *Add Zone to Zone flows...*

imponendo i seguenti parametri e selezionando il file (in formato .csv) contenente la matrice:



Field	Value
Start Time:	25200 s
End Time:	28800 s
Mode:	passenger
Scale:	1.1085
Activity At Orig.:	home
Activity At Dest.:	work

Figura A.1 - Parametri per import matrice OD

Dopodichè è necessario procedere con la disaggregazione della domanda al fine di poter ottenere i dati da fornire in ingresso al microsimulatore. A tale scopo si utilizza il comando:

*Demand* → *Zone to Zone demand* → *Generate trips from flows...*

fornendo in input i coefficienti riportati in Fig. A.2, che ne governano il procedimento. Tra essi è presente anche la funzione *fallback mode*, il cui scopo è già stato ampiamente descritto all’interno del paragrafo 6.1.

Infine, è fondamentale applicare un modello di assegnazione del percorso, che consenta di individuare un itinerario che colleghi punto di origine e destinazione di ogni spostamento riportato sulla matrice OD. Per farlo si è fatto uso del comando:

*Demand* → *Trips and Routes* → *Trips to routes with duarouter*

che sfrutta un algoritmo basato sulla tecnica del Pre-Routing (paragrafo 2.3.2.1).

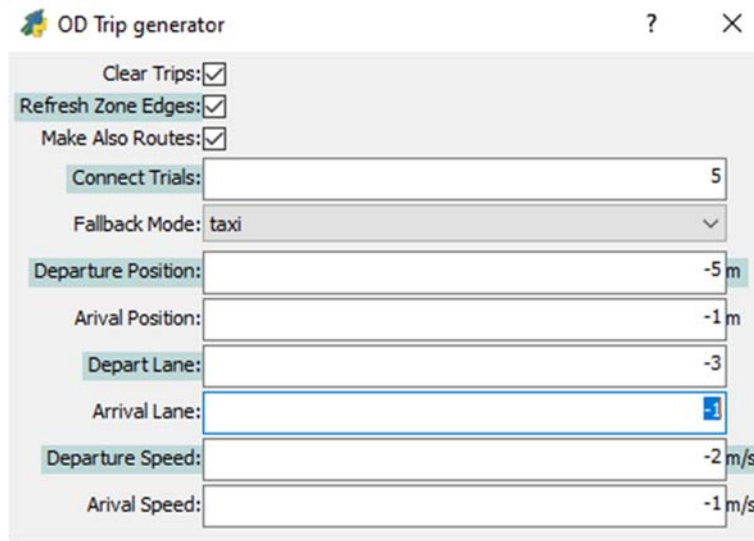


Figura A.2 - Parametri per disaggregazione matrice OD

## A.2. Generazione del servizio di trasporto pubblico

Prima di creare una popolazione virtuale che sfrutti i mezzi pubblici per i propri spostamenti, è di fondamentale importanza procedere con la riproduzione, sul *digital twin* della città, dell'intero servizio di trasporto pubblico erogato, ricostruendo tutti i percorsi seguiti dalle varie linee urbane ed extraurbane, posizionando correttamente tutte le fermate e generando le tabelle orarie.

Per eseguire tale operazione è possibile fare affidamento sui dati GTFS, descritti nel paragrafo 3.2.

Il primo step prevede l'import nel modello di rete di tutti i punti GPS contenuti in tali file che, come per il caso delle tracce relative alle biciclette, rappresentano una sequenza ordinata di posizioni occupate dai mezzi assegnati alle varie linee nel corso del loro servizio. Lo scopo è quello di ricostruire il percorso da essi seguito tramite map matching. Per fare ciò si fa uso dei seguenti comandi:

*Plugins* → *Mapmatching* → *GTFS* → *GTFS Shapes...*

selezionando il modo di trasporto *Bus*, la directory all'interno del quale è situato il file contenente le informazioni di interesse (file *Shapes*) e mantenendo tutti gli altri parametri riportati nella finestra di dialogo, pari a quelli settati di default (Fig. A.3).

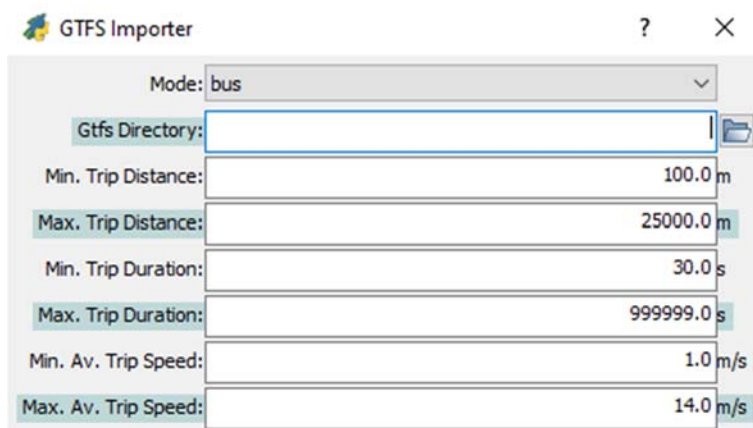


Figura A.3 - Parametri import file GTFS

Dopodichè si procede con l'applicazione di un filtro geometrico applicato sulle tracce e sui punti GPS importati. Questo ha lo scopo di cancellare i punti all'esterno dell'area desiderata e non aventi determinate caratteristiche. Nello specifico, viene utilizzato:

*Plugins* → *Mapmatching* → *Filter and Select* → *Select traces by geometry...*

inserendo i seguenti parametri governanti l'operazione:

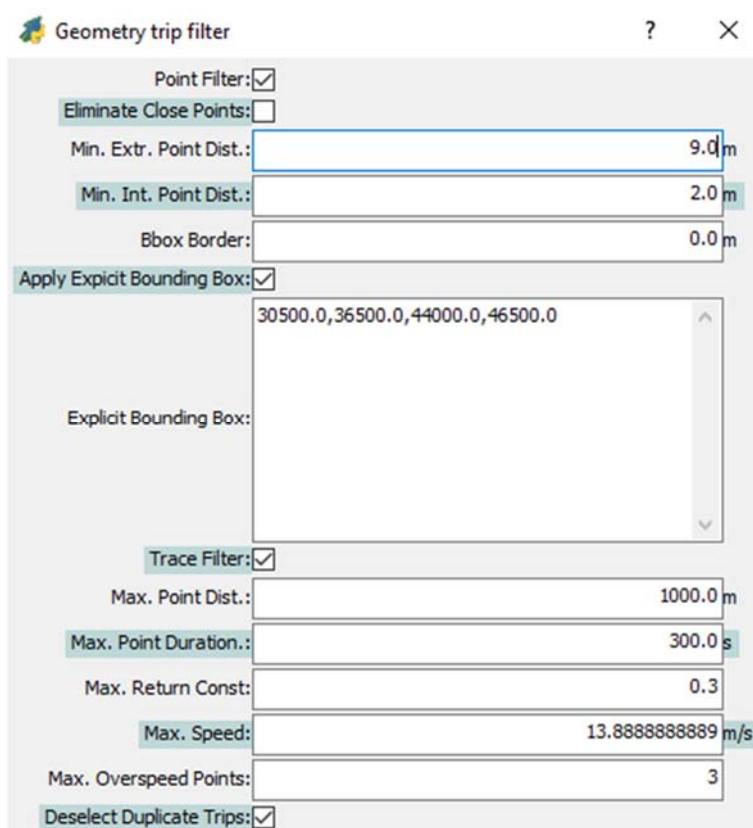


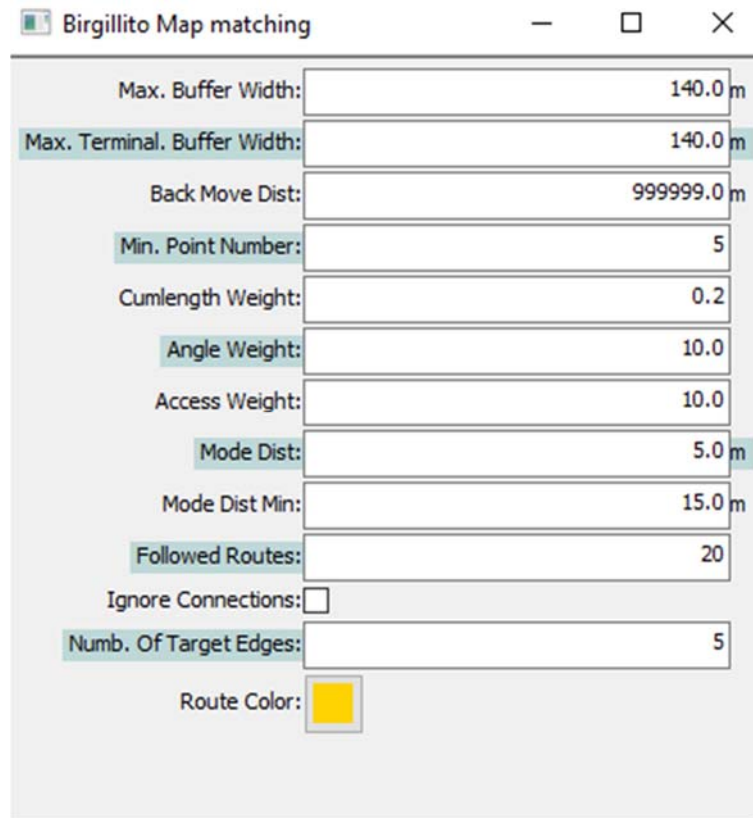
Figura A.4 - Parametri geometry filter

Nella figura precedente, i numeri riportati nel campo *Explicit Bounding Box* rappresentano le due coppie di coordinate (x, y) degli angoli Sud-Ovest e Nord-Est del box rettangolare di selezione, all'interno del quale mantenere i punti GPS. Avviando

l'operazione, infatti, tutti i punti che si troveranno all'esterno di quest'ultimo saranno eliminati.

Applicato il filtro, viene effettuato il map matching, imponendo i parametri che governano l'operazione riportati nella figura seguente:

*Plugins* → *Mapmatching* → *Match point to road network*



The image shows a software dialog box titled "Birgillito Map matching". It contains several input fields and a checkbox, each with a corresponding parameter name and a value. The parameters and their values are:

Parameter	Value
Max. Buffer Width:	140.0 m
Max. Terminal. Buffer Width:	140.0 m
Back Move Dist:	999999.0 m
Min. Point Number:	5
Cumlength Weight:	0.2
Angle Weight:	10.0
Access Weight:	10.0
Mode Dist:	5.0 m
Mode Dist Min:	15.0 m
Followed Routes:	20
Ignore Connections:	<input type="checkbox"/>
Numb. Of Target Edges:	5
Route Color:	Yellow

Figura A.5 - Parametri map matching tracce autobus

Al termine di questa procedura saranno stati ricostruiti circa 900 itinerari relative alle diverse linee di autobus. La loro presenza è di fondamentale importanza per l'import delle fermate all'interno del modello, che vengono posizionate lungo gli archi del *digital twin* più vicini alle coordinate georeferenziate ad esse associate per cui transita l'itinerario matchato, grazie all'utilizzo del comando:

*Plugins* → *Mapmatching* → *GTFS* → *Generate stops from GTFS*

per cui deve essere selezionata la cartella contenente il file in cui sono elencate tutte le informazioni riguardanti le fermate degli autobus (*GTFS Directory*), mentre in tutti i campi associati ai parametri vengono lasciati i valori preimpostati, riportati in figura A.6.

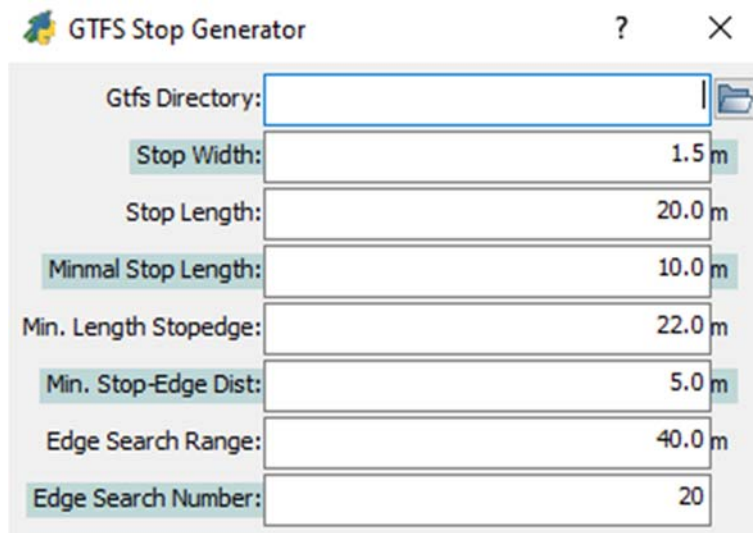


Figura A.6 - Parametri import fermate

L'ultima operazione riguarda la generazione della tabella oraria relativa alla generica giornata di servizio che si vuole riprodurre. Per farlo si utilizza:

*Plugins* → *Mapmatching* → *GTFS* → *Generate services from GTFS*

e si deve selezionare, all'interno della finestra di dialogo, un generico giorno dell'anno in modo da consentire l'import delle tabelle orarie per tutte le linee circolanti in quella giornata. È anche possibile settare un intervallo orario da riprodurre e fissare il tempo di sosta dell'autobus alla fermata, da cui vengono esclusi i tempi necessari alla salita e alla discesa dei passeggeri; nel caso specifico, esso è stata imposto pari a 5 secondi, che è circa il tempo necessario per l'apertura e la chiusura delle porte del mezzo ad ogni fermata.

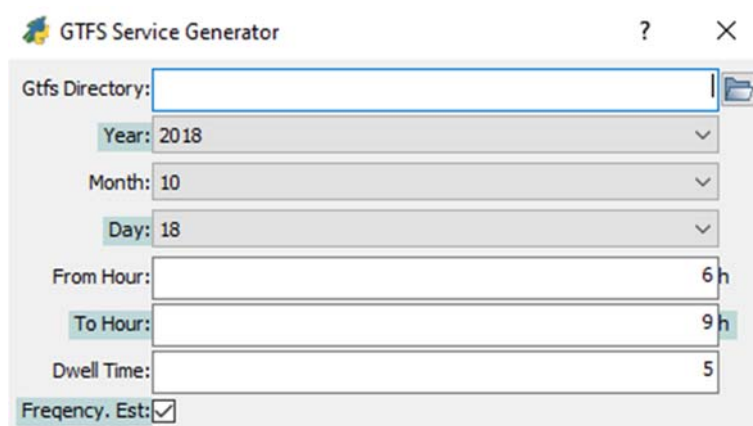


Figura A.7 - Parametri import tabella oraria servizio

Prima di procedere con la creazione dei piani per la popolazione virtuale è necessario effettuare la creazione della *PT-Network*, ampiamente descritta nel prossimo paragrafo, tramite il comando:

*Demand* → *Public Transport* → *Build links*

Si fa presente che tale operazione non risulta essere compresa all'interno del procedimento da eseguire per la ricostruzione del servizio di trasporto pubblico all'interno del modello di rete, ma è fondamentale per consentire alle persone virtuali generate di poter usufruire dei mezzi pubblici per completare gli spostamenti programmati.

### A.3. PT-Network

Per chiarire il funzionamento della rete denominata *PT-Network*, viene riportato un diagramma esplicativo (Fig. A.8) la cui estensione è limitata alla singola fermata.

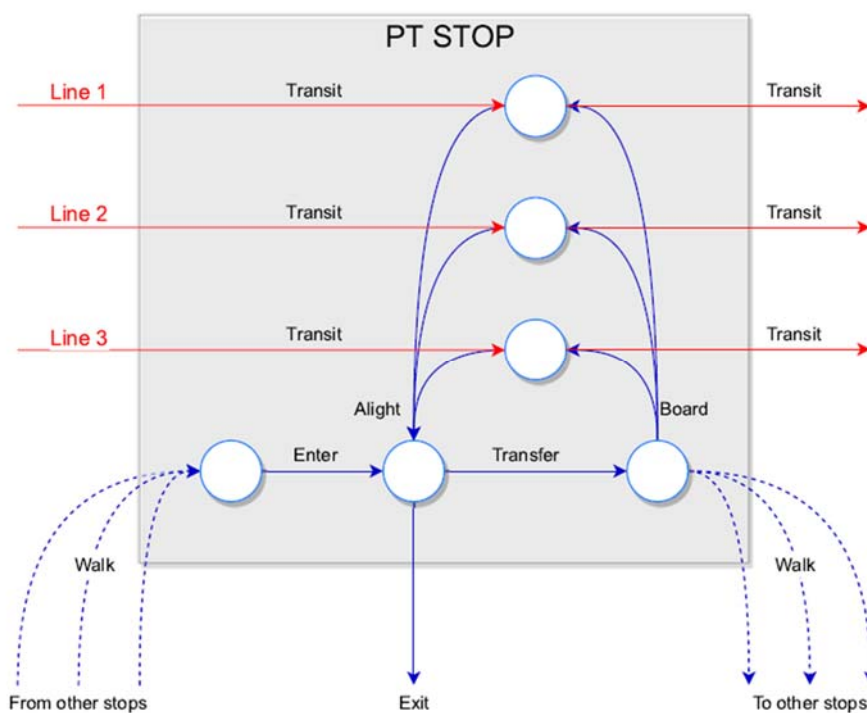


Figura A.8 – Schema funzionamento PT Stops

Andando a esplodere un generico nodo della PT Network, che rappresenta una fermata casuale della rete, è possibile osservare come, al suo interno, essa sia composta da un elevato numero di archi e nodi.

Innanzitutto, sono presenti tanti nodi quante sono le linee di trasporto collettivo che fanno sosta in corrispondenza di quella fermata; da essi partono e arrivano tanti archi che rappresentano lo spostamento a bordo del mezzo compiuto dagli utenti tra due fermate successive della linea considerata, indicati con il termine *transit* nella figura. Esso viene compiuto su archi reali della rete stradale che connette le fermate che servono la linea considerata.

Chiaramente, ogni utente deve poter essere libero di salire o scendere dall'autobus in una qualunque fermata della linea e, dunque, a contorno dei primi sono inseriti altri 3 nodi.

Il primo, in ordine di logistica delle operazioni eseguite dagli utenti alle fermate, è quello di avvicinamento alla fermata: ad esso, i passeggeri, giungono camminando provenendo da altre fermate della *PT-Network* oppure dalla rete stradale classica. Una volta giunti alla fermata, gli utenti possono decidere se “entrarci” oppure proseguire a piedi fino a quella successiva. Qualora decidessero di entrarci, tramite un piccolo arco si sposterebbero fino al nodo successivo, da cui l'unica operazione possibile è quella di attendere il passaggio della linea voluta per il tempo necessario, operazione schematizzata dalla percorrenza di un piccolo arco, individuabile dalla dicitura *transfer*. Terminata l'attesa, l'utente percorre un nuovo arco (*board*) che gli consente di salire sul mezzo, il quale poi si sposterà lungo la rete fino alla fermata successiva.

Una volta raggiunta l'ultima fermata dell'itinerario previsto, l'utente utilizzerà un altro arco, denominato *alight*, che gli consente di scendere dal bus ed entrare all'interno della fermata di destinazione. Da qui, le possibilità sono diverse: la prima è quella di attendere il passaggio di una nuova linea di autobus alla stessa fermata, percorrendo nuovamente un arco *transfer*; la seconda è quella di un trasferimento a piedi ad una fermata nelle vicinanze per utilizzare una linea che fa sosta in essa per completare lo spostamento; la terza, ed ultima, possibilità è quella di uscire dalla fermata, abbandonare la *PT-Network* e concludere l'itinerario a piedi sulla rete stradale tradizionale.

Questo schema viene ripetuto per ogni fermata facente parte della rete, in modo da consentire agli utenti del servizio di trasporto collettivo di muoversi liberamente all'interno della *PT-Network*.

#### **A.4. Problematiche riguardanti la domanda**

Come accennato all'inizio del capitolo 8, sono stati riscontrati alcuni problemi nel corso delle operazioni di generazione della domanda di trasporto ciclabile e utilizzante il servizio di trasporto pubblico locale, necessarie per poter avviare il test del modello.

La prima riguarda l'impossibilità di alcune persone di usare la bicicletta per il proprio spostamento. Tale problema è dovuto al fatto che, per fare in modo che l'utente salga sulla bicicletta ed esegua il viaggio, è necessario che il mezzo venga creato in prossimità di un arco provvisto di marciapiede per consentire al pedone di raggiungere

l'arco stesso e, una volta salito sul velocipede, intraprendere il proprio itinerario da una sua corsia in cui è permesso il transito delle biciclette.

Se l'arco su cui viene creato il mezzo (che coincide con quello di inizio del percorso generato tramite la procedura del map matching) è sprovvisto di marciapiede o, genericamente, di una corsia su cui è consentito l'accesso ai pedoni (situazione tipica di parcheggi, piste ciclabili, strade private senza marciapiede), la persona si ferma sull'arco più vicino ad esso senza, però, poterlo mai raggiungere, rimanendo immobile nella stessa posizione fine al termine della simulazione e quindi non completando il proprio viaggio. Stessa sorte per quelle persone che riescono a raggiungere l'arco di partenza, sul quale, però, non è permesso il transito delle biciclette (principalmente percorsi pedonali nei parchi o nelle ZTL) e quindi non viene generato il mezzo.

Questo problema è stato risolto sfruttando un algoritmo di ricerca (basato su un massimo di 10 passi all'indietro) che, a partire dall'arco di effettivo inizio della traccia GPS, cerca un arco precedente avente sia una corsia in cui è consentito il transito dei pedoni sia una in cui è permessa la circolazione delle biciclette, correttamente collegato all'arco di partenza, su cui avviare lo spostamento.

Il secondo problema è, invece, legato al trasporto pubblico e consiste nel fatto che alcune persone si rechino alla fermata dell'autobus e attendano per un tempo infinito il transito della linea prevista per il completamento del loro viaggio, nonostante possano sfruttare altre linee che seguono il medesimo percorso e che transitano ripetutamente alla fermata in esame. Le motivazioni possono essere essenzialmente due. La prima criticità risiede nella articolata concezione delle linee di trasporto pubblico all'interno del software utilizzato, per le quali, se una linea possiede diverse cadenze a seconda della fascia oraria (solitamente differenti tra orario di punta e orario di morbida) oppure più ramificazioni della parte finale della tratta (per esempio la linea 27 che, in direzione Corticella, presenta 3 possibilità: 27A, 27B, 27C), vengono generati più identificativi differenti, che dagli utenti vengono percepiti come linee diverse, nonostante seguano lo stesso percorso e passino per la stessa fermata in cui deve scendere la persona virtuale in esame, e quindi viste come "linee sbagliate" rispetto a quella che è stata imposta in fase di creazione del viaggio. La seconda riguarda il processo di assegnazione delle linee da utilizzare: la probabilità di scelta, da parte della generica persona virtuale, di una linea piuttosto che un'altra è inversamente proporzionale alla sua cadenza. Questo significa che, se una linea presenta una cadenza molto elevata (per esempio un mezzo all'ora), la probabilità di scelta risulterà essere molto bassa anche nel caso in cui



percorra una parte di itinerario comune ad altre linee con frequenza elevata (per esempio un veicolo ogni 5 minuti), che potrebbe essere sfruttata dall'utenza per ridurre il tempo di attesa alla fermata.

Quello che succede, dunque, è che alle persone virtuali che devono compiere uno spostamento con i mezzi pubblici viene assegnata una certa linea da utilizzare, caratterizzata da un certo percorso, una certa cadenza e quindi un identificativo ben preciso. Pertanto, una volta giunto alla fermata esse aspettano che transiti la linea di bus assegnata, ignorando tutte le altre, magari aventi stesso percorso ma con cadenza differente e quindi con identificativo diverso da quello imposto in fase di costruzione degli stages. Potrebbe capitare che l'utente debba prendere una linea, caratterizzata da una cadenza fissata (e quindi da un identificativo ben preciso), che non transita più da quella fermata perché il servizio ha modificato la cadenza (per esempio a causa del passaggio alla tabella oraria del periodo di morbida) e quindi anche l'identificativo; di conseguenza la generica persona virtuale percepisce che il suo autobus non stia passando e rimane ferma ad aspettare, senza modificare la propria scelta.

Nello scenario definitivo, centrale per questa trattazione, fortunatamente, quest'ultima situazione non si è mai verificata in quanto, simulando l'ora di punta mattutina, tutti gli autobus circolanti possiedono sempre la stessa cadenza all'interno della fascia oraria e pertanto tutti gli utenti riescono a salire a bordo del bus desiderato, entro tempi massimi di attesa alla fermata ritenuti accettabili, tenendo anche in considerazione il congestionamento della rete.

Tuttavia, una possibile soluzione potrebbe essere quella di estendere l'istante di termine del servizio di tutte le linee ricreate ad un orario tale che consenta a tutte le persone virtuali circolanti sulla rete di completare i propri spostamenti, quindi all'esterno dell'intervallo analizzato. Questa è una soluzione valida solo nel caso di studio di brevi fasce temporali, che dovrebbe essere accompagnata da una revisione più profonda del metodo di assegnazione delle linee alla popolazione, facendo in modo che esso venga basato sul tempo di attesa compreso tra l'istante di arrivo della persona alla generica fermata e l'orario di sosta previsto per le varie linee che possono essergli utili per completare lo spostamento, piuttosto che su una probabilità calcolata come l'inverso della frequenza di transito di tali linee, riproducendo più fedelmente il reale comportamento tenuto dagli utenti.

L'unico grosso problema riguarda l'enorme complessità computazionale che si verrebbe a generare che porterebbe a un notevole rallentamento delle operazioni di simulazione.

## A.5. Correzione del modello di rete

### A.5.1. Controllo dei permessi di transito

Come accennato nel capitolo 8, soprattutto nel caso di bici e bus, su molti archi era vietato l'accesso ad alcune categorie di veicoli, che quindi erano impossibilitati a completare il proprio itinerario. In corrispondenza di essi è stato consentito il transito a tali mezzi e la circolazione è tornata a scorrere in maniera fluida. In altri casi si veniva a manifestare la situazione opposta, con auto che potevano transitare all'interno di corsie preferenziali, anch'essi corretti.

### A.5.2. Correzione/Creazione dei cicli semaforici

In corrispondenza di sistemi semaforici ben identificati è stata effettuata una correzione del ciclo preesistente per renderlo più simile possibile alla realtà e ottimizzare la circolazione. Ne sono un esempio gli impianti situati in corrispondenza di Porta Lama, Porta S.Felice e dell'incrocio tra via Indipendenza, via Matteotti, viale Pietramellara e viale Masini. A ciascuno di essi è stata modificata sia la durata del ciclo, sia la lunghezza e la sequenza delle varie fasi, in modo da riprodurre fedelmente la situazione esistente. In particolare, nell'intersezione accanto alla stazione sono anche state aumentate il numero di corsie afferenti alla stessa in modo da migliorare il deflusso veicolare, nonché eliminati alcuni permessi di svolta che nella realtà non esistono.

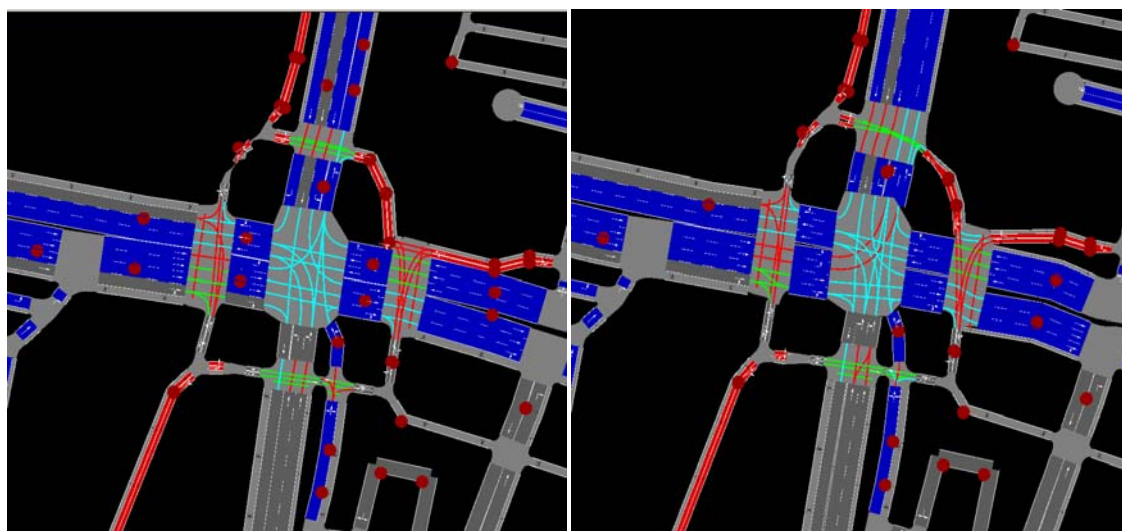
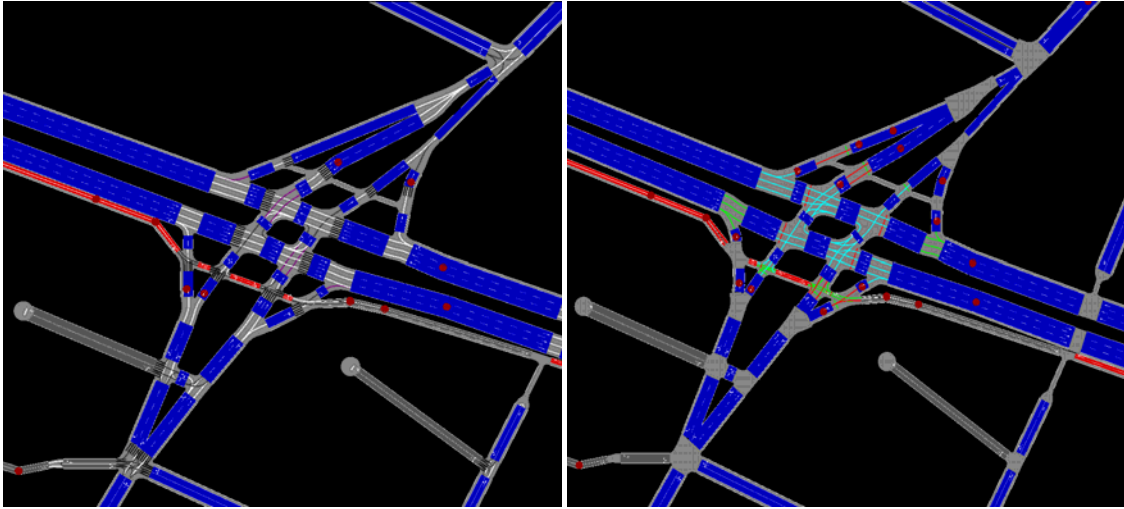


Figura A.9 - Correzione geometria e fasatura semaforo stazione

Altri impianti semaforici, invece, erano del tutto assenti all'interno della rete ed è dunque stato necessario procedere alla loro realizzazione per regolare al meglio il transito dei veicoli. Due casi su tutti sono rappresentati dal complesso incrocio tra viale Togliatti e via Battindarno e da quello situato al crocevia tra via Emilia Levante, viale Lenin e via Po. In entrambe le intersezioni, prima dell'introduzione del sistema

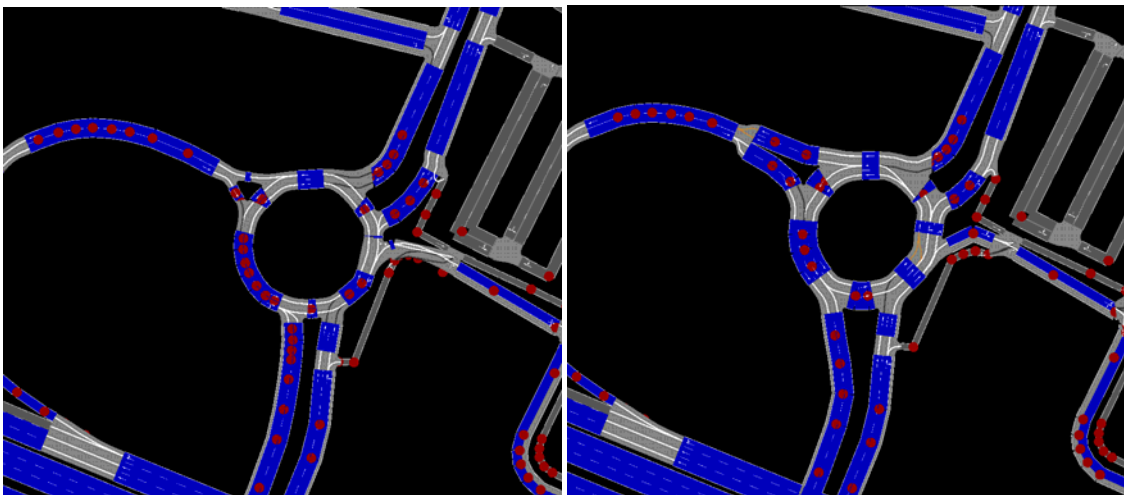
semaforico, il deflusso veicolare risultava molto rallentato e caotico, problemi prontamente risolti grazie all'intervento eseguito a seguito di una attenta ricostruzione della corretta fasatura.



*Figura A.10 - Creazione impianto semaforico intersezione viale Togliatti - via Battindarno*

### **A.5.3. Correzione del disegno delle rotatorie**

Numerosi problemi sono stati riscontrati anche in corrispondenza di questa tipologia di intersezione, poiché risulta difficile riuscire a modellare correttamente il comportamento tenuto dai vari utenti della strada quando approssicano una rotatoria, sia in quanto le traiettorie consentite sono molteplici, sia perchè all'interno del software di microsimulazione è molto facile generare dei conflitti che in realtà si verificano di rado. Per questo motivo è stato necessario ridurre notevolmente il numero di connettori presenti tra i vari archi costituenti le rotatorie e in particolare semplificarne le procedure di accesso e uscita, proprio per evitare che più traiettorie si intersecassero laddove meno opportuno e causassero rallentamenti della circolazione.



*Figura A.11 - Correzione della geometria e dei connettori delle rotatorie*

#### A.5.4. Eliminazione di connettori errati

La maggior parte dei connettori rimossi fa riferimento a manovre impedito dalla segnaletica verticale o orizzontale, che erano in grado di causare notevoli rallentamenti al deflusso (per esempio le svolte a sinistra in conflitto con un'altra corrente veicolare portavano una significativa diminuzione di velocità lungo entrambe le direzioni), oppure a manovre di inversione del senso di marcia, talora consentite nella realtà, ma che causavano svariati problemi durante la microsimulazione di uno scenario cittadino, altre volte completamente vietate (per esempio in corrispondenza degli accessi alla tangenziale).

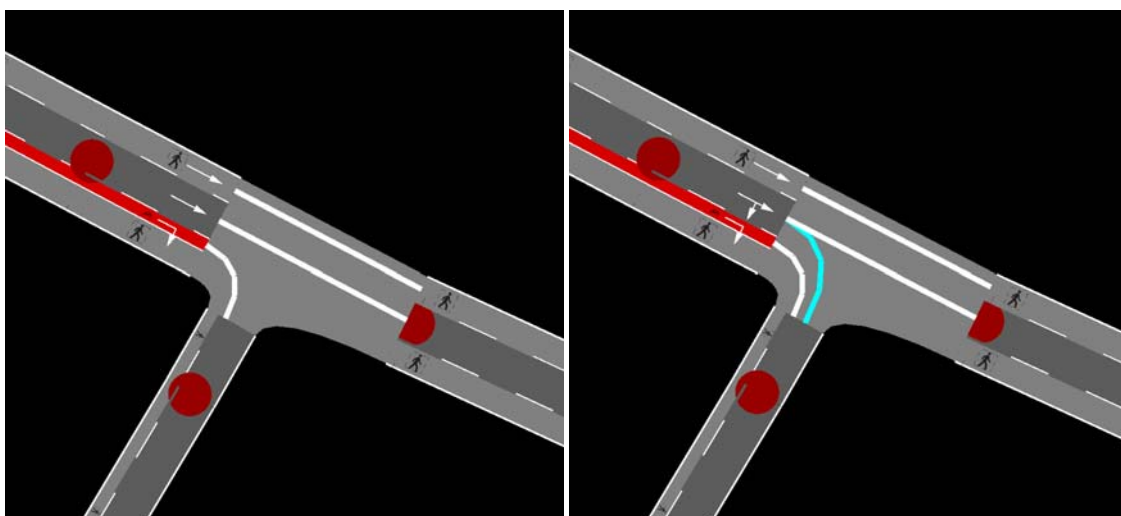


Figura A.12 - Correzione dei connettori errati

#### A.5.5. Modifica della posizione di alcune corsie ciclabili

Tramite l'analisi dei viaggi in bici si è notato che alcuni di essi si interrompevano a metà di un certo arco, con la bici che si bloccava in mezzo alla strada senza consentire al pedone di scendere e completare lo spostamento. Il problema, in questo caso, era legato alla rete in quanto la sequenza di corsie prevedeva, dal bordo verso il centro della carreggiata: ciclabile, marciapiede, strada. Tale configurazione non è riconosciuta come valida dal software di simulazione per consentire al pedone di scendere dalla bicicletta, poiché il marciapiede non rappresenta la corsia più esterna possibile della strada. Si è dunque proceduto con lo scambio di posizione di ciclabile e marciapiede su tutti quegli archi aventi tale caratteristica (per esempio: via Stalingrado e via Carracci) per risolvere la problematica.

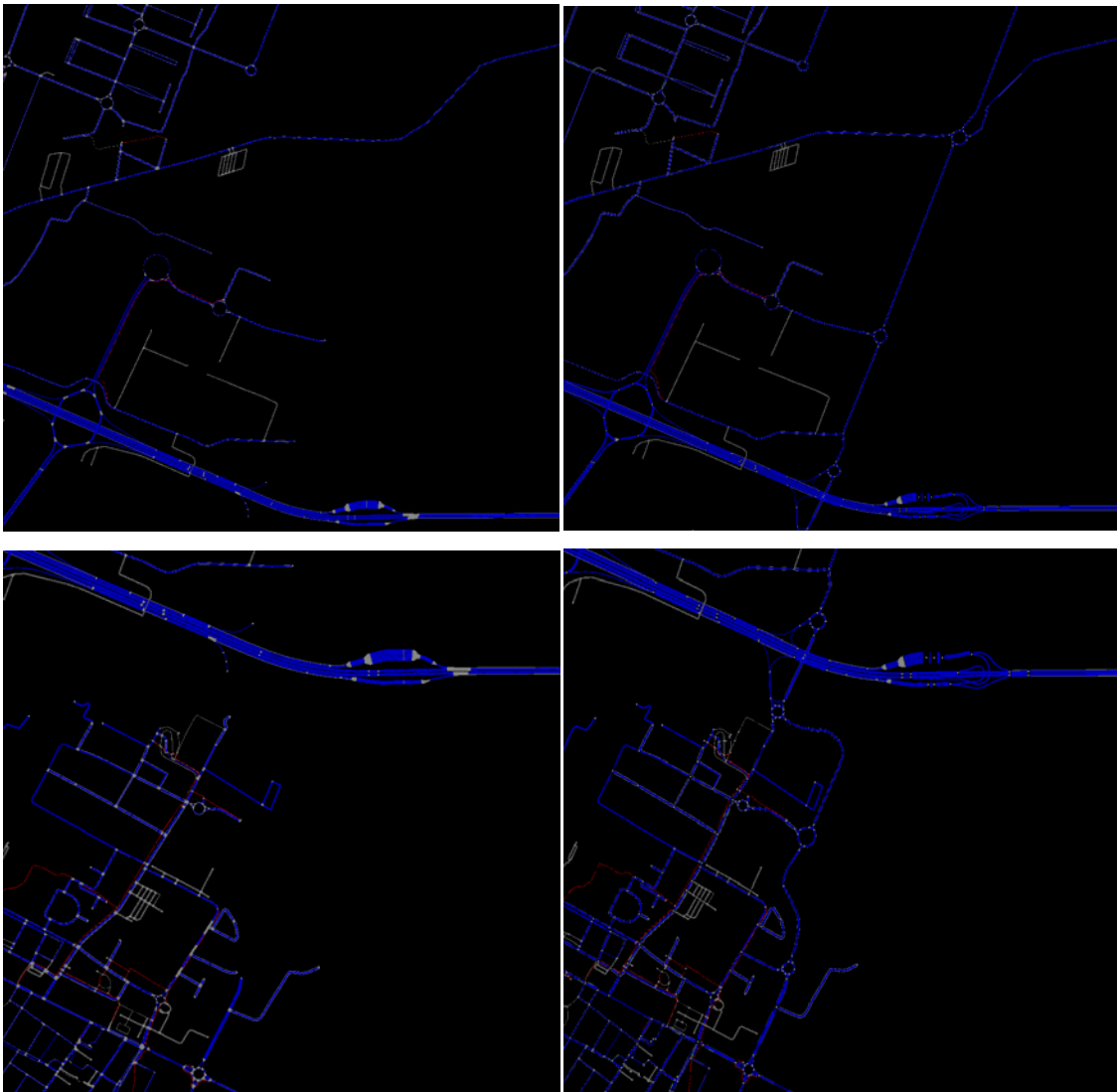
#### A.5.6. Completamento di alcune zone di bordo della rete

Gli interventi più significativi hanno riguardato la realizzazione di tutte le arterie che collegano la città di S. Lazzaro di Savena alla tangenziale e al comune di Castenaso (in

corrispondenza della rotatoria Falcone e Borsellino) e l'aggiunta degli svincoli di ingresso e uscita dall'autostrada A14 in corrispondenza dei caselli di S. Lazzaro e Casalecchio.

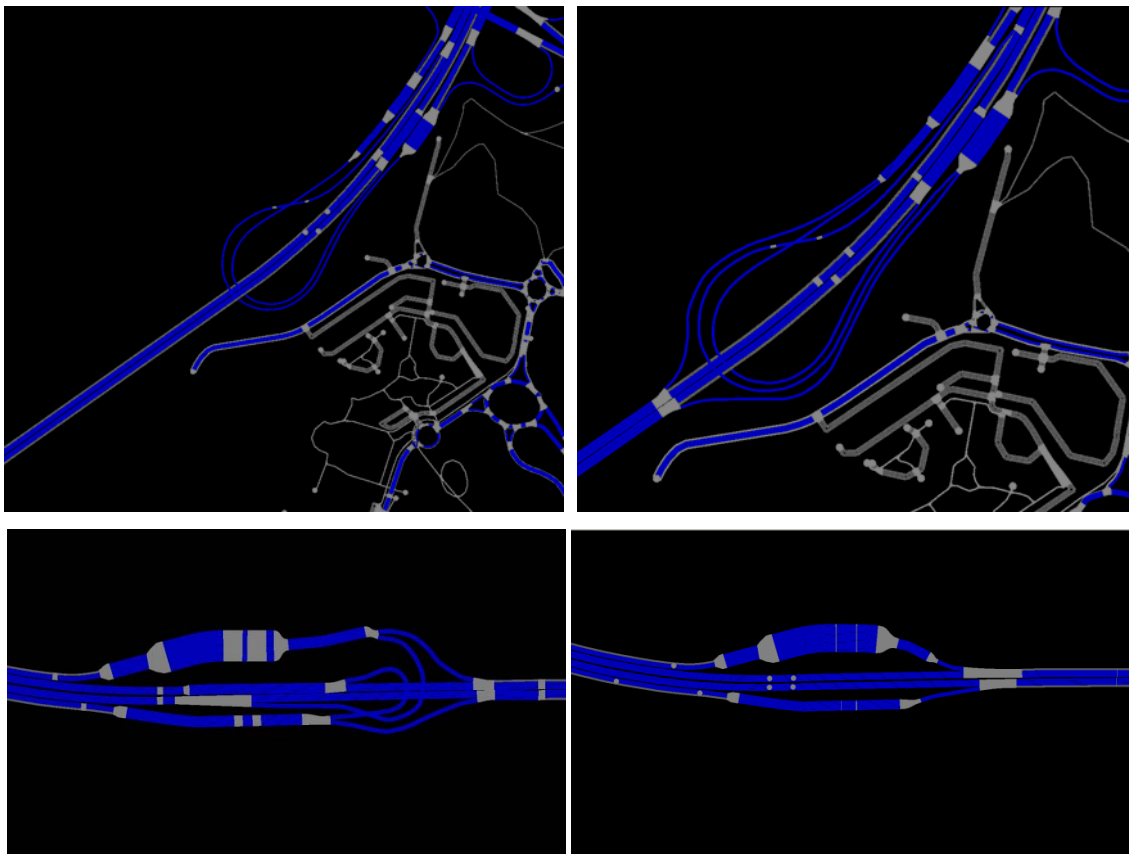
Il primo si è reso necessario poiché, osservando la dispersione dei veicoli sulla rete nel corso di diverse simulazioni, sono stati notati comportamenti anomali tenuti dai conducenti, i quali andavano spesso a saturare gli archi che congiungono via Massarenti con Castenaso, in corrispondenza di quella che sarebbe via Mattei, e gli archi colleganti S. Lazzaro a Bologna (tramite la via Emilia) proprio a causa della mancanza di valide alternative che consentissero di evitare il tratto maggiormente congestionato.

Con l'aggiunta di tale tratto stradale, gli automobilisti hanno avuto a disposizione più alternative e si sono ripartiti in maniera differente su ciascuna di esse, evitando di congestionare gli archi che in precedenza rappresentavano l'unica possibilità di collegamento alla città di Bologna.



*Figura A.13 – Aggiunta delle arterie di collegamento tra San Lazzaro, Castenaso e tangenziale*

La realizzazione degli svincoli della A14, invece, potrebbe sembrare di minore importanza, in quanto il tratto cittadino dell'autostrada è rappresentato da archi che corrono paralleli a quelli della tangenziale, che quindi ne forniscono una più che valida alternativa. Tuttavia, l'impossibilità di accedere agevolmente all'autostrada, se non in corrispondenza del casello di Bologna Fiere o di Borgo Panigale, portava un elevato numero di automobilisti a percorrere itinerari spesso ridondati proprio per entrarvi e completare il proprio spostamento, andando così a congestionare archi non dimensionati per accogliere tali moli di traffico. Con questa modifica è dunque stato possibile abbreviare i percorsi di un gran numero di utenti abituali dell'autostrada e consentire a quelli occasionali di sfruttarla con maggiore facilità nel caso di congestionamento della tangenziale o del generico itinerario da essi utilizzato.



*Figura A.14 - Correzione della geometria degli svincoli autostradali di Casalecchio e San Lazzaro*

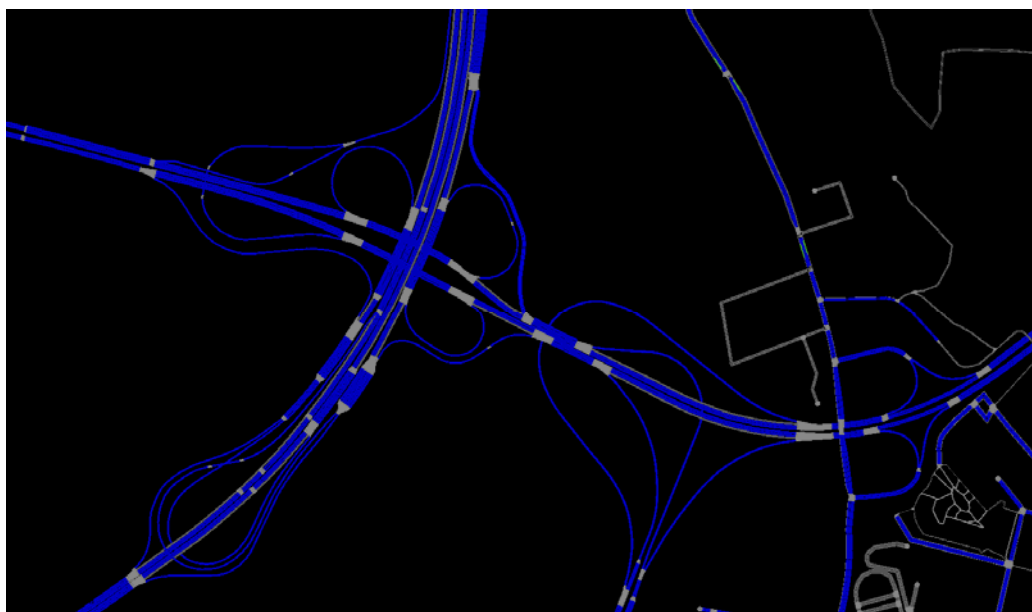
### **A.5.7. Incremento della velocità sulle corsie di immissione**

L'ultima, ma non per importanza, categoria di modifiche eseguite sull'intera rete di Bologna è stata eseguita a seguito dello svolgimento di numerose analisi sulle microsimulazioni aventi come protagonisti il traffico veicolare privato, durante le quali si è notato che il flusso di veicoli accedenti a tangenziale, autostrada e strade a

scorrimento veloce (tutte dotate di corsie di accelerazione e decelerazione) risultava molto rallentato e congestionato.

Il problema principale risiedeva nel fatto che, su tali corsie, coerentemente con i limiti imposti dal codice della strada, era stata fissata una velocità massima di 40 km/h, che risultava essere troppo bassa rispetto a quella degli archi circostanti (almeno 50 km/h negli archi precedenti e 90 km/h su quelli successivi per le corsie di immissione e viceversa per quelle di decelerazione), creando un notevole rallentamento della circolazione, proprio dove in realtà, in normali condizioni di traffico, non si verifica quasi mai.

Si è dunque deciso di modificare tale velocità massima, aumentandola fino a 70 km/h, in modo di consentire ai veicoli di accelerare o decelerare gradualmente proprio secondo le funzioni delle corsie stesse, consci del fatto che ciò vada in contrasto con le limitazioni imposte dal codice della strada.



*Figura A.15 - Sistema di svincoli presso il nodo autostradale di Casalecchio*

Siccome, quello realizzato, è un modello che deve rappresentare il più fedelmente possibile la realtà per riuscire a ricavare importanti informazioni riguardanti flussi veicolari, emissioni inquinanti e tempi di percorrenza e di attesa, in questo caso, è di fondamentale importanza trascurare le regole che gli utenti dovrebbero rispettare a favore della riproduzione del loro reale comportamento, per quanto errato, lungo le strade cittadine. Si è pertanto giunti alla conclusione che un incremento della velocità massima di transito lungo le corsie in oggetto fosse un buon compromesso tra il reale comportamento degli utenti, certe volte esageratamente al di sopra del limite consentito (anche oltre i 100 km/h), e le limitazioni imposte dalla segnaletica verticale, forse

persino troppo limitanti in quanto nessun conducente, durante la circolazione in normali condizioni di traffico, percorrerebbe mai tali archi alla velocità di 40 km/h, poiché si troverebbe ad immettersi all'interno di una corrente veicolare con differenza di velocità troppo elevata, rispetto a quella tenuta nella corsia di accelerazione, per poterlo fare in sicurezza.

Tutte queste osservazioni hanno portato a concludere che fosse del tutto ragionevole incrementare la velocità massima di transito a 70 km/h sulle corsie di accelerazione e decelerazione nel modello utilizzato, tanto che, nelle successive simulazioni, il problema del deflusso congestionato in corrispondenza di tali archi è risultato completamente assente, coerentemente con la realtà.

## A.6. Implementazione del rerouting

Il procedimento di rerouting, descritto nel paragrafo 8.3.1, è gestito da una serie di parametri che devono essere forniti in input all'algoritmo implementato nel software:

- *Rerouting Probability*: rappresenta la probabilità che un generico veicolo circolante abbia a disposizione il *Rerouting device*, che si può immaginare come una sorta di navigatore satellitare che consente al conducente di individuare gli itinerari alternativi, di minimo costo, a quello intrapreso, che gli permettono di concludere lo spostamento nella maniera più veloce ed economica possibile. Questo parametro può variare da 0 a 1: l'estremo inferiore indica l'assenza di veicoli dotati di questo dispositivo e dunque ci si riconduce alla situazione iniziale, l'estremo superiore invece indica che tutti i veicoli sono dotati di questo dispositivo e possono, potenzialmente, tutti trovare itinerari alternativi. Un valore prossimo all'unità, tuttavia, è fortemente sconsigliato in quanto potrebbe generarsi l'effetto ping-pong descritto in precedenza, in cui tutti gli utenti di un certo arco percepiscono la presenza di un rallentamento e si trasferiscono in massa sul primo itinerario alternativo di minimo costo, congestionando anche quello. Valori troppo bassi, d'altro canto, non consentirebbero di risolvere i problemi sorti utilizzando i metodi precedentemente descritti. Pertanto, è consigliabile imporre dei valori compresi nell'intervallo [0.35, 0.65], in modo che circa la metà dei veicoli possa sfruttare il dispositivo di rerouting per evitare le congestioni, ma senza che si verifichi l'effetto indesiderato del trasferimento di tutta la corrente veicolare su altri percorsi, poiché i veicoli sprovvisti di tale accessorio rimarranno accodati lungo l'arteria congestionata.



- *Rerouting interval*: indica la frequenza con cui deve essere eseguito il processo di rerouting descritto al punto precedente. Questo parametro, combinato con i successivi, consente di modificare la rapidità con cui le correnti veicolari si adattano alle situazioni di congestione.
- *Rerouting start interval*: parametro utilizzato per stabilire dopo quanto tempo dall'ingresso sulla rete, gli utenti eseguono il primo rerouting.
- *Rerouting cost analysis*: indica la frequenza di aggiornamento del vettore dei costi dei vari archi della rete, in genere, è buona norma imporlo pari al parametro di *Rerouting interval*.
- *Rerouting step*: parametro che definisce il numero di componenti facenti parte del vettore dei costi sugli archi che vengono utilizzati per effettuare una media mobile di tali grandezze, che verranno poi utilizzati dal *rerouting device* per stabilire il nuovo itinerario da seguire.

Nella figura A.16 è possibile osservare i parametri impostati per l'utilizzo del procedimento di rerouting nella simulazione eseguita.

Tale combinazione permette, ad ogni utente che può avvalersi del dispositivo (cioè la metà di tutti i veicoli circolanti), di eseguire un rerouting appena entrato sulla rete basandosi su un costo degli archi mediato su due valori, aggiornati nei due minuti immediatamente precedenti al suo ingresso.

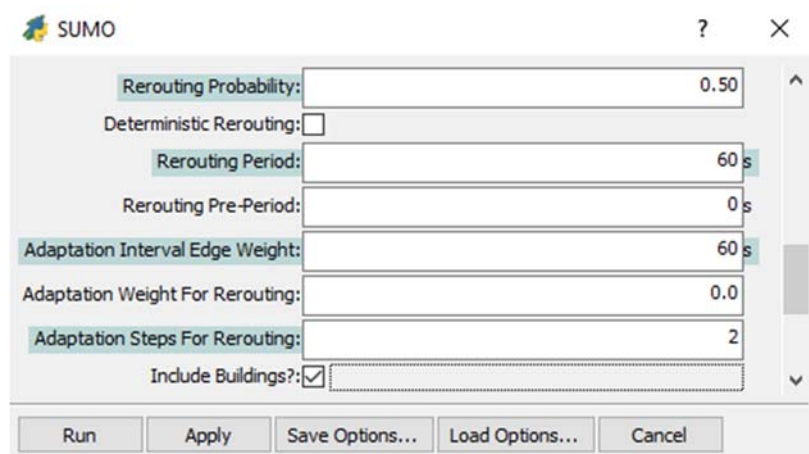


Figura A.16 - Parametri che governano il Rerouting

Dopodichè, ogni minuto controlla la disponibilità di itinerari che gli consentano di completare il viaggio con un costo minore rispetto a quello che sta sostenendo, sempre basandosi su una media mobile a due valori del costo degli archi.

In sintesi, questa combinazione di parametri, consente a metà degli automobilisti di modificare il proprio percorso ogni 60 secondi, qualora quello scelto originariamente

risultati congestionato, mentre l'altra metà continuerà ad impiegare quello scelto prima di iniziare lo spostamento.

## A.7. Introduzione dei semafori attuati

Questa diffusa tipologia di impianti semaforici consente di modificare la durata delle fasi in base al flusso veicolare transitante per gli archi afferenti all'intersezione.

All'interno del software utilizzato, tale flusso viene monitorato da dispositivi chiamati *detector*, il cui funzionamento è simile a quello delle spire elettromagnetiche poste in prossimità degli incroci semaforizzati reali e cioè basato sul time headway tra veicoli successivi: se è inferiore a un certo valore soglia fissato, la fase viene prolungata finché tale headway non risulta superiore oppure finché non viene raggiunta la durata massima prefissata.

L'attivazione di tale opzione richiede la configurazione di alcuni parametri tramite apposita finestra interattiva, in cui viene richiesto di fornire la massima variazione percentuale consentita della fase semaforica e la durata minima che deve avere una fase per poter applicare l'attuazione, che compare seguendo il percorso:

*Network → Tools → Set actuated tls...*

Si introduce un esempio per chiarire il funzionamento di tale comando: si consideri un semplice impianto semaforico statico a 2 fasi, in corrispondenza di una intersezione a 4 rami, in cui la lanterna è disposta al verde prima nella direzione Nord-Sud e poi in quella Est-Ovest per 30 secondi ciascuna, intervallate da 3 secondi di giallo e 2 di tutto rosso, per un ciclo complessivo della durata di 70 secondi.

Fissando il primo parametro richiesto in input pari a 50% e il secondo a 5 secondi, il sistema semaforico si trasformerà in attuato e tutte le fasi con durata superiore a 5 secondi (quindi solamente le 2 di verde) potranno essere allungate o accorciate del 50% a seconda delle condizioni di traffico. Pertanto, se lungo una certa direzione è presente un elevato flusso veicolare anche superata la durata prefissata della fase, essa potrà essere estesa al massimo per altri 15 secondi (per un totale di 45 secondi), dopodiché scatterà il giallo e infine il rosso. Viceversa, se il flusso nella direzione è piuttosto scarso, tanto che per gran parte del tempo non transita nessun veicolo attraverso l'intersezione, la fase potrà essere ridotta al massimo di 15 secondi e quindi la durata minima di verde garantito sarà pari a 15 secondi, dopodiché, se sono rispettate le condizioni di time headway tra veicoli consecutivi descritte in precedenza, si passerà alla fase successiva.

## A.8. Calibrazione dei parametri V-Types

Tali parametri riguardano essenzialmente le caratteristiche meccaniche e dinamiche dei veicoli e il comportamento dell'utente e sono racchiusi all'interno delle schede relative ai *vehicle types* (*vtypes*).

Per quanto riguarda i coefficienti legati al veicolo, per ottenere dei miglioramenti nella fluidità della simulazione, operativamente sono stati modificati alcuni parametri che descrivono la dinamica dei veicoli, come:

- *Minimum gap*: che indica la distanza minima che viene mantenuta dal veicolo precedente (pari a 0.5 m);
- *Reaction time*: tempo di reazione del conducente (ridotto da 1.0 s a 0.6 s);
- *Max acceleration*: rappresenta la massima accelerazione che può raggiungere il veicolo (incrementato da 3.0 m/s<sup>2</sup> a 4.5 m/s<sup>2</sup>);
- *Max emergency deceleration* e *max apparent deceleration*: indicano la massima decelerazione eseguibile dal veicolo in caso di frenata di emergenza e quella che gli altri utenti si aspettano da esso (rispettivamente 8 m/s<sup>2</sup> e 4.5 m/s<sup>2</sup>). Con questi valori si riesce a modellizzare al meglio il comportamento degli utenti, cioè si aspettano che quelli davanti frenino con una certa intensità, ma in realtà essi possono farlo in maniera molto più decisa se necessario e quindi i veicoli si mantengono il più possibile vicini.

Sotto l'aspetto dei parametri relativi al comportamento dell'utente, come possibile osservare nella figura seguente, sono presenti alcuni attributi generali (i primi 4 al di sotto della proprietà *color*), il cui valore (pari a quelli riportati nell'immagine) è stato mantenuto invariato sia nel caso di utilizzo di *lane-change model* sia di *sublane model*, e altri relativi unicamente al secondo; i più significativi sono sicuramente i seguenti:

- *Sublane eager*: un valore elevato tende a far sacrificare la velocità per mantenere un corretto allineamento con la corsia in base a quanto impostato (per esempio le auto al centro della corsia, le bici a destra,...);
- *Sublane assertive*: consente all'utente di accettare dei gap spaziali ridotti rispetto ad altri veicoli nel caso di esecuzione di una manovra o di elevato grado di congestione;
- *Sublane pushy*: rappresenta l'aggressività di un utente nell'eseguire una manovra di cambio corsia o in corrispondenza di una intersezione non semaforizzata (il valore unitario indica la massima aggressività);

- *Sublane impatient*: indica l'impazienza che caratterizza gli utenti di quella categoria di veicoli; più il valore è elevato e meno pazienti saranno gli utenti, tanto da assumersi dei rischi pur di portare rapidamente a compimento determinate manovre, specialmente in corrispondenza degli incroci.

Dialog for: Vehicle Types


Mode:	passenger
Share In Mode:	1.0
Length:	4.3 m
Width:	1.8 m
Height:	1.5 m
Passengers:	1
Capacity:	4
Containers:	0
Max. Speed:	50.0 m/s
Speed Factor:	1.0
Speed Dev.:	0.1
Max. Accel.:	4.5 m/s <sup>2</sup>
Decel.:	3.0 m/s <sup>2</sup>
Apparent. Decel.:	8.0 m/s <sup>2</sup>
Emergency. Decel.:	8.0 m/s <sup>2</sup>
Reaction:	0.6 s
Driver:	0.5
Min. Gap:	1.0 m
Boarding Time:	15.0 s
Loading Time:	180.0 s
Has Reroute Device:	<input type="checkbox"/>
Emission:	average passenger car (all fuel types)
Impatience:	1.0
Gui Shape:	passenger
Color:	
Lane Strategy:	99999.0
Lane Coop:	1.0
Lane Gain:	99999.0
Lane Right:	1.0
Sublane Alignment:	center
Sublane Max. Speed:	1.0 m/s
Sublane Accel:	2.5 m/s <sup>2</sup>
Sublane Min. Gap:	0.12 m
Sublane Eager:	99999.0
Sublane Assertive:	1.0
Sublane Pushy:	1.0
Sublane Impatience:	1.0
Sublane Time To Impatience:	1 s

Figura A.17 – Parametri che governano dinamica del veicolo e comportamento dell'utente

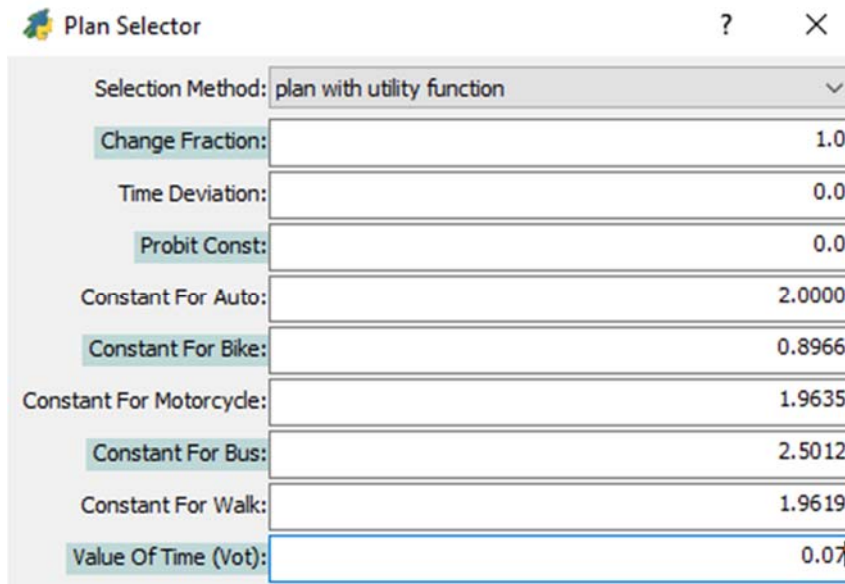
## A.9. Parametri per la microsimulazione finale

Una volta concluso il procedimento di calibrazione dei parametri da inserire all'interno della funzione di utilità, per ricavare alcuni dati riguardanti la rete come flussi transitati, emissioni prodotte e velocità medie tenute sui vari archi, si è deciso di avviare un'ultima simulazione basata sui parametri individuati.

Dunque, come prima cosa è stato selezionato il piano rappresentante la migliore alternativa in base all'utilità prodotta, per ciascuna persona appartenente alla popolazione virtuale. Per fare ciò, dopo aver fatto registrare i tempi effettivi di viaggio per tutti i 147985 viaggi, è stato utilizzato il comando:

*Demand* → *Virtual Population* → *Plans* → *Select current plans*

e nella maschera derivante, introdotti gli indici riportati nella figura seguente.



The screenshot shows a dialog box titled "Plan Selector" with a question mark and a close button (X) in the top right corner. The dialog contains a list of parameters for plan selection, each with a text input field and a numerical value. The parameters are:

Parameter	Value
Selection Method:	plan with utility function
Change Fraction:	1.0
Time Deviation:	0.0
Probit Const:	0.0
Constant For Auto:	2.0000
Constant For Bike:	0.8966
Constant For Motorcycle:	1.9635
Constant For Bus:	2.5012
Constant For Walk:	1.9619
Value Of Time (Vot):	0.07

Figura A.18 - Parametri Plan Selector

Dopodichè, è stata avviata la microsimulazione:

*Simulation* → *Microscopic simulation* → *Sumo...*

ed introdotti i parametri proposti nella finestra seguente che governeranno l'intero processo di simulazione del traffico.

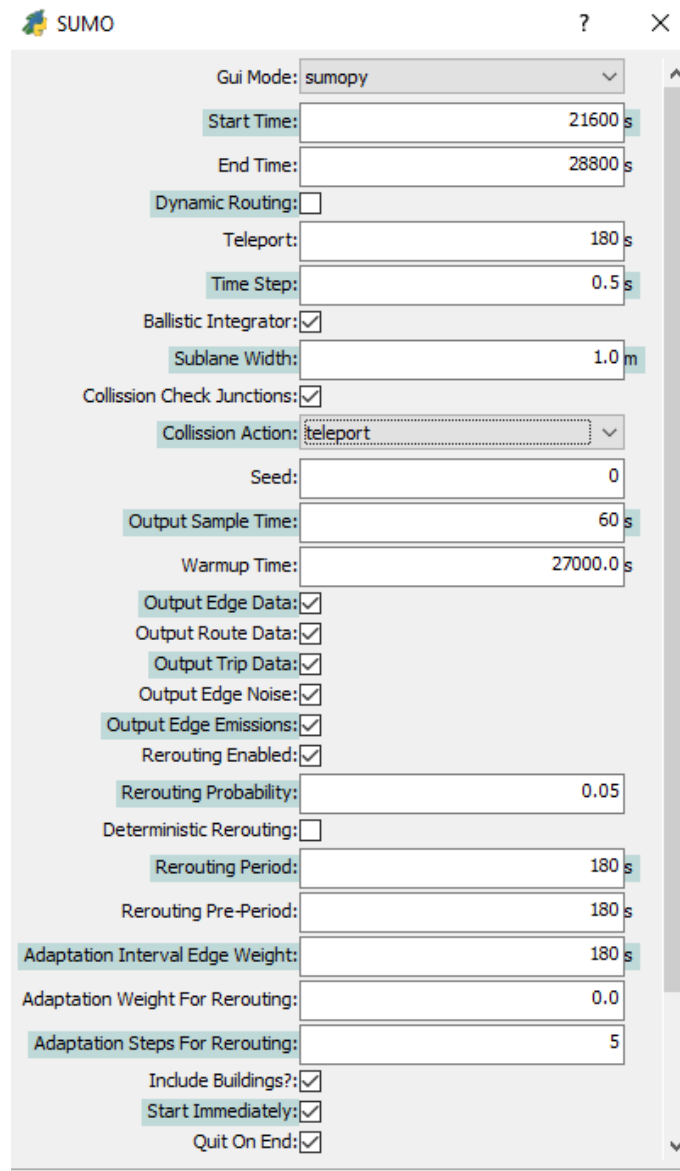


Figura A.19 - Parametri microsimulazione

Nella figura precedente si possono apprezzare i parametri che governano la microsimulazione, in particolare:

- *Start Time* (espresso in secondi), coincide con le ore 6:00, in cui prende il via il servizio di trasporto pubblico, in modo che alle ore 7:00, istante di inizio dell'ora di punta simulata, esso fosse già a regime e pronto a soddisfare la richiesta della popolazione virtuale;
- *End Time* corrisponde alle ore 8:00, termine dell'ora di punta studiata;
- *Teleport*, *Ballistic Integrator* e *Time Step* consentono di rendere più veloce la simulazione, riducendo la complessità computazionale;

- *Collision Action = Teleport*, consente di evitare la generazione di lunghe code a seguito di scontri tra veicoli, che nella realtà difficilmente si verificano, e quindi semplificare e velocizzare il processo;
- *Warm Up Time* è stato introdotto e fissato pari a 27000 s, in modo tale che fino alle ore 7:30 possa essere caricata sulla rete gran parte della domanda generata e solo nella mezz'ora successiva registrare i dati di traffico;
- È stata attivata la possibilità di eseguire il rerouting per una piccola percentuale di utenti, in base alle prove effettuate in precedenza e descritte nel capitolo 8 e nel paragrafo A.6, pari al 5%, i quali possono modificare il loro itinerario ogni 3 minuti, basandosi sui costi calcolati per i vari archi della rete mediante una media mobile su 5 valori.

Conclusa la microsimulazione, con i risultati derivanti, sono poi state eseguite tutte le analisi presentate nei capitoli 12 e 13.

## A.10. Procedura per il caricamento dei flussi misurati (spire)

Per eseguire l'operazione di validazione del modello è necessario procedere al caricamento dei detector sulla rete, in modo da poter individuare correttamente quali siano gli archi da cui estrarre i dati riguardanti i veicoli transitati da confrontare con i rilievi effettuati.

Per fare ciò si deve fare uso di un apposito comando:

*Demand* → *Detector Flows* → *Import detector from shapes*

inserendo i seguenti parametri nella finestra che appare.

The screenshot shows the 'Detectors from Shapefile importer' dialog box with the following parameters:

- Shape File: /home/student/scenarios/bo\_spire/shape\_spire/RilFluPub.shp
- Field For Direction: angolo
- Field For Id Detector: codriflu
- Field For Name: nomevia
- Shape Projection: (empty)
- Target Projection: +proj=utm +zone=32 +ellps=WGS84 +datum=WGS84 +units=m +no\_defs
- Use Shapefile Projection?:
- Use Target Projection?:
- Probe Offset?:
- Probed X Coord Of Shape: 685065.5 m
- Probed Y Coord Shape: 930174.2 m
- Probed X Coord Of Target: 36229.609 m
- Probed Y Coord Target: 41387.07 m
- Auto Offset?:
- Offset: [-679244. -4924610.]
- Limit To Boundaries?:
- Boundaries: 0.0, 1.58, 14107.5, 11395.7

Figura A.20 - Parametri per l'import dei detector sul modello

I primi 6 campi riguardano il file *shape* contenente le informazioni per il matching dei detector sul modello di rete e le modalità di import all'interno del software, ossia tenendo in considerazione la direzione (rispetto al nord magnetico) del rilevatore per poter individuare correttamente l'arco a cui associarlo nel modello, in aggiunta alle coordinate georeferenziate e ad informazioni riguardanti il nome e l'identificativo dei detector.

Gli altri 4 campi sono invece dedicati all'adattamento del sistema locale di coordinate relativo al file *shape* su Q-GIS a quello a cui fa riferimento SUMOPy, tramite un offset che appunto consenta di far coincidere i due modelli e permettere un corretto abbinamento dei dispositivi di rilevazione dei flussi agli archi.

Procedendo poi con una serie di comandi da eseguire in sequenza:

- Collegamento dei detector alle corsie:

*Demand* → *Detector Flows* → *Match detectors to lanes*

- Import dei flussi rilevati dagli strumenti di misurazione:

*Demand* → *Detector Flows* → *Flows measurement importer*

selezionando il file csv contenente queste informazioni e fissando l'intervallo orario di interesse (0 – 3600 s);

- Caricamento dei risultati della simulazione:

*Simulation* → *Results* → *Open...*

- Aggiunta della colonna di flussi misurati alla tabella degli *edgeresults*:

*Simulation* → *Results* → *Add detector flow measurements to edgeresults*

Al termine di questa procedura è stato possibile estrarre la tabella contenente i risultati sugli archi e completare le analisi illustrate.



## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] E.T. Mtoi, R. Moses, E.E. Ozguven: *An alternative approach to network demand estimation: Implementation and Application in Multi-Agent Transport Simulation (MATSim)*. *Procedia Computer Science*, 37 (2014): 382-389.
- [2] V.R. Melnikov, V.V. Krzhizhanovskaya, M.H. Lees, A.V. Boukhanovsky: *Data-driven travel demand modeling and agent-based traffic simulation in Amsterdam urban area*. *Procedia Computer Science*, 80 (2016): 2030-2041.
- [3] Y. Zaho, A.W. Sadek: *Large-scale Agent-based traffic micro-simulation: Experiences with model refinement, calibration, validation and application*. *Procedia Computer Science*, 10 (2012): 815-820.
- [4] M. Balmer, K. Axhausen, K. Nagel: *Agent-based demand-modeling framework for large-scale microsimulation*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (Vol 1985)*, pp. 125-134.
- [5] G. Flotterod, Y. Chen, K. Nagel: *Behavioral calibration and analysis of a large-scale travel microsimulation*. Springer Science + Business Media, LCC2011.
- [6] B. Raney, N. Cetin, A. Vollmy, M. Vrtic, K. Axhausen, K. Nagel: *An agent-based microsimulation model of Swiss travel: First results*.  
<http://www.are.admin.ch/imperia/md/content/are/are/medienmitteilungen/2001/1.pdf>
- [7] J. Kamel, R. Vosooghi, J. Puchinger, F. Ksontini, G. Sirin: *Exploring the impact of user preferences on shared autonomous vehicle modal split: A multi-agent simulation approach*. *Transportation Research Procedia*, 37 (2019): 115-122.
- [8] S. Yagi, A.K. Mohammadian: *An activity-based microsimulation model of travel demand in the Jakarta metropolitan area*. *Journal of Choice Modelling*, 3(1), pp. 32-57, 2009.
- [9] X. Pi, W. Ma, Z.S. Qian: *A general formulation for multi-modal dynamic traffic assignment considering multi-class vehicles, public transit and parking*. *Transportation Research Part C*, 104 (2019): 369-389.
- [10] J.L. Bowman, M.E. Ben-Akiva: *Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules*. *Transportation Research Part A*, 35 (2000): 1-28.
- [11] K. Axhausen, K. Meister, M. Balmer, F. Ciari, A. Horni, M. Rieser, R. Waraich: *Large-scale agent-based travel demand optimization applied to Switzerland, including mode choice*. In 12<sup>th</sup> World Conference on Transportation Research, Lisbon, 2010.
- [12] J. Schweizer, F. Rupi, C. Poliziani, F. Filippi: *Generating activity-based, multi-modal travel demand for SUMO*. SUMO 2018.

- [13] C. Poliziani: *Sviluppo di un modello di domanda basato sulle attività tramite micro-simulazioni di reti di trasporto multi-modali*. Università di Bologna, 2018.
- [14] C.Y. Leksono, T. Andriyana: *Roundabout microsimulation using SUMO: A case study in Idrottsparken roundabout Norrkoping, Sweden*. Linkoping University, 2012.
- [15] M. Magi: *Modello di microsimulazione di traffico sull'intera area urbana di Bologna*. Università di Bologna, 2019.
- [16] C. Ciabatti: *Analisi di tracce GPS mediante map matching finalizzata alla simulazione della scelta del percorso dei ciclisti in area urbana*. Università di Bologna, 2018.
- [17] M. Brunelli: *Studio delle tracce GPS riferite a spostamenti su trasporto pubblico a Bologna: confronto con rilievi manuali*. Università di Bologna, 2019.
- [18] J. Schweizer, C. Poliziani: *Dispense del Laboratorio di Infrastrutture Viarie e Trasporti*. Università di Bologna, 2018.
- [19] M.J. Alam, M.A. Habib: *Mass evacuation of Halifax, Canada: A dynamic traffic microsimulation modeling approach*. Procedia Computer Science, 151 (2019): 535-542.
- [20] X. Chen, J.W. Meaker, F. B. Zhan: *Agent-based modeling and analysis of hurricane evacuation procedures for the Florida Keys*. Natural Hazards, 38 (2006): 321-338.
- [21] M.B. Ulak, E.E. Ozguven, R. Moses, T. Sando, W. Boot, Y. AbdelRazig, J.O. Sobanjo: *Assessment of traffic performance measures and safety based on driver age and experience: A microsimulazione based analysis for an unsignalized T-intersection*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2019: 6(5): 455-469.
- [22] K.K. Osei, C.A. Adams, W. Ackaah, Y. Oliver-Commey: *Signalization options to improve capacity and delay at roundabouts through microsimulation approach: A case study on arterial roadways in Ghana*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2019.
- [23] M. Gastaldi, C. Meneguzzer, R. Rossi, L. Della Lucia, G. Gecchele: *Evaluation of air pollution impacts of a signal control to roundabout conversion using microsimulation*. Transportation Research Procedia, 3 (2014): 1031-1040.
- [24] S. Castaldini: *Analisi dei dati GPS raccolti dai ciclisti nell'area urbana di Bologna mediante l'applicazione del metodo di map matching*. Università di Bologna, 2017.
- [25] I Numeri di Bologna Metropolitana: [inumeridibolognametropolitana.it/studi-e-ricerche/il-parco-veicolare-di-bologna-al-31122017](http://inumeridibolognametropolitana.it/studi-e-ricerche/il-parco-veicolare-di-bologna-al-31122017)

- [26] E. Cascetta: *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*. Kluwer Academic Publisher, 2001
- [27] E. Cascetta: *Modelli per i sistemi di trasporto*, UTET, Torino, 2006
- [28] Osservatorio PUMS: <https://www.osservatoriopums.it/bologna>
- [29] M. Sermasi: *Micro-simulazione dei flussi veicolari sul sistema autostradale e della tangenziale di Bologna*. Università di Bologna, 2019.
- [30] Mappa acustica strategica e Piano d'Azione: <http://www.comune.bologna.it/ambiente/servizi/6:3457/40260/>