

Università degli Studi di Catania



*Corso di Dottorato in ‘Ingegneria delle Infrastrutture  
Idrauliche, Sanitario-Ambientali e dei Trasporti’  
- XXVI ciclo -*

**“Microsimulazione di Reti Stradali in presenza di  
Sistemi di Infomobilità”**

*Tutor*

Prof. Ing. *S. Leonardi*

*Cotutor*

Prof. Ing. *G. Inturri*

*Corsista*

Dott. Ing. *S. Marletta*

*A tutte le persone di valore  
incontrate lungo il tratto di  
vita fin qui percorso,  
a quelle che avrò la ventura  
di conoscere ancora.*

*A mia madre Laura.*

# Indice degli Argomenti

1.	Obiettivi della ricerca ed inquadramento teorico .....	5
1.1	Quesito di ricerca.....	5
1.2	Stato dell'arte .....	6
1.3	Inquadramento teorico.....	12
1.3.1	Simulazione dinamica del traffico.....	12
1.3.2	Modelli di assegnazione in presenza d'informazione .....	16
1.3.2.1	Funzioni, struttura e componenti.....	16
1.3.2.2	Caratteristiche dell'informazione somministrata .....	28
1.3.2.3	Interazioni dinamiche in presenza di sistemi informativi .....	36
1.3.3	Breve panoramica sui principali softwares di assegnazione .....	42
	Bibliografia di capitolo.....	44
2.	Modelli.....	49
2.1.	Modellazione dell'informazione in Aimsun.....	49
2.1.1.	Inquadramento.....	49
2.1.2.	Procedure di gestione dei flussi - <i>Traffic Management</i> - .....	52
2.1.3	Assegnazione della Domanda di Trasporto - <i>Traffic Assignment</i> - .....	59
2.1.3.1.	Inquadramento.....	59
2.1.3.2	Dynamic User Equilibrium - <i>DUE</i> - .....	63
2.1.3.3	Dynamic Traffic Assignment - <i>DTA</i> - .....	70
2.1.3.3.1	Inquadramento.....	70
2.1.3.3.2	Rappresentazione della rete e classificazione dei percorsi.....	71
2.1.3.3.3	Definizione della Funzione di Costo di un arco .....	74
2.1.3.3.4	Algoritmo di calcolo dei percorsi - <i>Shortest Path Algorythm</i> -.....	82
2.1.3.3.5	Modelli di Assegnazione .....	86
2.2	Modellazione della condotta di guida in ambiente Aimsun .....	109
2.2.1	Car-Following Model.....	110
2.2.1.1	Single-Lane Car-Following Model .....	110
2.2.1.2	Calcolo della Velocità Massima Desiderata.....	115
2.2.1.3	Two-Lanes Car-Following Model.....	116
2.2.2	Lane-Changing Model.....	118
2.2.2.1	Standard Lane-Changing Model .....	118
2.2.2.2	Gap-Acceptance nel modello Lane-Changing .....	123

2.2.2.3 On-Ramp Lane Changing Model .....	124
2.2.3 Gap-Acceptance Model .....	126
Bibliografia di Capitolo .....	130
3. Metodologie .....	133
3.1 Selezione dei modelli e loro combinazione .....	133
3.1.1 Formulazione dei modelli di assegnazione in funzione informativa .....	133
3.1.2 Generazione dei veicoli - <i>Vehicle Arrival</i> - .....	143
3.1.3 Modelli di comportamento - <i>Vehicle Behavioural Models</i> - .....	145
3.2 Strutturazione del processo di simulazione .....	151
3.3 Configurazione dei risultati e modalità di analisi .....	157
3.3.1 Inquadramento .....	157
3.3.2 Grandezze di risposta e livello di aggregazione .....	157
3.3.3 Precisazione della modalità di analisi dei risultati .....	162
3.4 Analisi di sensibilità del modello .....	169
3.4.1 Robustezza dei modelli di scelta del percorso .....	169
3.4.1.1 Metodologia .....	169
3.4.1.2 Risultati .....	174
3.4.1.3 Considerazioni .....	178
3.4.2 Sensibilità dei modelli comportamentali degli utenti .....	180
3.4.2.1 Metodologia .....	180
3.4.2.2 Risultati e considerazioni .....	182
Bibliografia di Capitolo .....	210
4. Caso Studio .....	213
4.1 Inquadramento .....	213
4.2 Topologia .....	215
4.2.1 Contestualizzazione .....	215
4.2.2 Implementazione .....	215
4.3 Domanda di Trasporto .....	221
4.3.1 Contestualizzazione .....	221
4.3.2 Implementazione .....	225
4.4 Analisi dei risultati .....	234
4.4.1 Inquadramento .....	234
4.4.2 Analisi per Soglie ‘Critiche’ .....	235
4.4.2.1 Statistiche di sistema .....	235

4.4.2.2 Statistiche per coppie O/D.....	246
4.4.3 Analisi Trasversale - <i>Traversal Analysis</i> - .....	253
4.4.3.1 Statistiche di sistema .....	253
4.4.3.2 Statistiche per coppie O/D.....	254
4.4.4 Conclusioni.....	259
Bibliografia di Capitolo.....	261
APPENDICE A .....	263
Elaborazione statistica dei risultati in Aimsun .....	263
A.1 Inquadramento .....	263
A.2 Statistiche di sistema - <i>System Statistics</i> - .....	264
A.2.1 Definizioni.....	264
A.2.1 Misure relative ai singoli veicoli .....	266
A.2.2 Calcolo delle statistiche di sistema.....	267
A.3 Statistiche di tragitto - <i>Stream Statistics</i> - .....	270
A.3.1 Definizioni.....	270
A.3.2 Misure relative ai singoli veicoli .....	272
A.3.3 Calcolo delle statistiche di tragitto .....	274



# 1. Obiettivi della ricerca ed inquadramento teorico

## 1.1 Quesito di ricerca

Come espresso sinteticamente dal titolo “*Microsimulazione di Reti Stradali in presenza di Sistemi di Infomobilità*”, il presente studio si propone di esaminare l’effettiva capacità dei moderni softwares di simulazione del traffico di implementare la presenza di sistemi di disseminazione dell’informazione in tempo reale ed al contempo indagare, attraverso la simulazione, gli effetti dell’informazione sull’utenza del sistema di trasporto, con riferimento al solo modo di trasporto su veicolo privato. Pare subito evidente come tali obiettivi siano mutuamente correlati: la stima attendibile dell’impatto dell’informazione sull’utenza di un dato sistema di trasporto presuppone, infatti, l’efficacia dei modelli e delle procedure elaborati per la sua implementazione.

L’interesse della presente ricerca non è dunque rivolto alla discettazione sulle diverse soluzioni applicative, che pur hanno avuto un notevole impulso specialmente nell’ultima decade, sull’onda dello sviluppo incipiente delle tecnologie wireless e della diffusione di dispositivi palmari (smartphones, tablets), accanto alla digitalizzazione della strumentazione in dotazione ai veicoli (computers di bordo, sensori di guida assistita etc.). Essa si concentra invece sull’altro aspetto, complementare a quello applicativo appena menzionato, concernente la modellazione dell’informazione ai fini della sua efficace riproduzione in ambienti virtuali di simulazione. Dato il suo recente emergere nell’ambito della pur giovane Teoria dei Sistemi di Trasporto (se confrontata con settori di ben più consolidata tradizione scientifica), la formulazione di modelli analitici idonei a descrivere le diverse componenti del processo informativo ed i diversi fenomeni da esso ingenerati nel funzionamento del sistema di trasporto in cui opera, è tuttora una branca in continua evoluzione.

Il livello di dettaglio richiesto dalla natura del fenomeno stesso in esame, ha determinato la necessità di ricorrere a strumenti di simulazione in ambito microscopico, orientando in particolare la scelta sul software *Aimsun* prodotto dalla società catalana TSS-Transport Simulation Systems, che emerge nel panorama della simulazione delle reti di trasporto, per accuratezza e rigoroso fondamento teorico dei modelli d’interazione dinamica dei singoli veicoli e dei meccanismi che governano le scelte degli utenti di un sistema di trasporto.

Si è così scelto di affidarsi ad un software di simulazione specificamente elaborato per impieghi trasportistici tralasciando i simulatori ad agenti.

A differenza dei programmi di simulazione ad agenti, che, progettati per le applicazioni più disparate, mancano da un lato di una specifica modellazione dei fenomeni tipicamente trasportistici, demandata di volta in volta al tecnico specializzato, ma consentono dall'altro di simulare con estrema efficacia la risposta spontanea degli agenti ad un evento secondo un dato sistema di regole; i moderni software di simulazione specificatamente dedicati alla modellazione delle reti di trasporto, al contrario, prevedono modelli e procedure che riproducono rigorosamente i diversi fattori che intervengono nel funzionamento di una rete di trasporto (dall'interazione tra i veicoli lungo la rete, alle modalità di scelta dei percorsi), ma proprio per la loro struttura rigida, costruita sui fondamenti matematici della teoria delle reti di trasporto, non sembrano essere in grado di cogliere l'estemporaneità della risposta dell'utenza stradale ad un evento, in generale, ed all'informazione in tempo reale sullo stato della rete attraverso sistemi *ATIS*, in particolare.

Nel corso della trattazione svolta dal presente studio, esamineremo le procedure appositamente predisposte nell'ambiente di microsimulazione di Aimsun, e tenteremo di forzare i meccanismi più reconditi potenzialmente funzionali alla riproduzione dell'interazione informazione/utenza.

### 1.2 Stato dell'arte

Lo studio della letteratura ha permesso di constatare lo stato di avanzamento della ricerca di settore. La molteplicità degli aspetti che concorrono alla modellazione di sistemi di infomobilità ha determinato la necessità di attingere a fonti altrettanto diversificate, spaziando attraverso i diversi ambiti di trattazione che definiscono i contorni di questa materia; di seguito è tratteggiato a grandi linee un breve excursus attraverso i diversi contributi ad essa apportati nel corso della sua evoluzione.

A causa dell'onerosità di campagne di indagine ed esperimenti su scala reale, non sono numerosi gli studi che indagano l'influenza dell'informazione in un contesto reale, tra essi spiccano i lavori prodotti da Kawashima, Durand et al., Sparmann<sup>1</sup>, che esaminano il grado di risposta degli utenti all'informazione trasmessa attraverso pannelli a messaggio variabile - VMS -. Tali studi, sebbene forniscano un utile riferimento per la stima della propensione degli utenti di un sistema di trasporto a seguire le indicazioni recepite, ovvero a modificare

---

<sup>1</sup> Cfr. Bibliografia: Kawashima H., [27], pag.46; Durand Y., [19], pag. 45; Sparmann J., [39], pag. 47.

le scelte di viaggio assunte preventivamente prima di intraprendere lo spostamento, non propongono una chiave di lettura per interpretare le motivazioni delle reazioni osservate utile alla comprensione dei meccanismi di scelta.

Molti studi affrontano invece l'analisi dell'impatto dell'informazione sugli utenti di una infrastruttura di trasporto attraverso la simulazione di situazioni reali in un contesto virtuale, ed il presente contributo va annoverato fra questi.

L'osservazione dei comportamenti di scelta in un contesto virtuale si è connotata classicamente attraverso tre approcci sperimentali alternativi:

- a. indagini motivazionali di tipo *Stated Preferences* - SP -;
- b. uso di simulatori di guida in scala reale;
- c. simulatori artificiali di scelta del percorso.

Al primo si riconducono studi prettamente descrittivi: dalle analisi pionieristiche di Gordon e Wood (1970), Mast e Ballas (1976), Kobayashi (1979), e Jeffrey (1981)<sup>2</sup>, ai primi lavori sistematici prodotti a partire dalla metà degli anni '80 del secolo scorso, fra cui i contributi di Tsuji et al. (1985), Ben-Akiva et al. (1986), Al-Deek et al. (1989)<sup>3</sup>. Più recentemente, approcci di tipo sperimentale basati su indagini motivazionali di tipo SP sono l'oggetto dei lavori di Hato et al., Zhao et al., Bonsall e Whelan<sup>4</sup>.

Spyridakis et al.<sup>5</sup> conducono un'indagine motivazionale che descrive qualitativamente la correlazione fra la probabilità di modifica delle scelte di percorso e la frequenza dello spostamento, la motivazione, il grado di conoscenza di percorsi alternativi, la presenza di informazione, concludendo che essa cresce per spostamenti di tipo sistematico di ritorno a casa, se i percorsi alternativi sono familiari ed in presenza d'informazione.

Mahmassani e Jayakrishnan<sup>6</sup>, dimostrano come la propensione dell'utente a mantenere la scelta assunta preventivamente, proseguendo lungo il percorso stabilito prima di intraprendere il viaggio, prevalga fino ad una certa soglia limite superiore di risparmio del tempo di viaggio (percepito o ottenuto attraverso informazione), superata la quale cresce la disposizione a modificare percorso.

---

<sup>2</sup> Cfr. Bibliografia: Mast T. et al., [38], pag. 47; Kobayashi F., [29], pag. 46; Jeffrey D. et al., [26], pag. 46.

<sup>3</sup> Cfr. Bibliografia: Tsuji H. et al., [41], pag.47; Ben-Akiva M. et al., [8], pag.44; Al-Deek H. et al., [1], pag.44.

<sup>4</sup> Cfr. Bibliografia: Hato E. et al., [24], pag. 46; Zhao S. et al., [47], pag. 48; Bonsall P. et al., [14], pag. 45.

<sup>5</sup> Cfr. Bibliografia: Spyridakis J. et al., [40], pag.47.

<sup>6</sup> Cfr. Bibliografia: Mahmassani H. S. et al., [32], pag. 46.

## Obiettivi ed Inquadramento Teorico

Ancora Mahmassani insieme a Calice<sup>7</sup>, evidenzia l'incidenza di variabili socio-economiche sull'attitudine a modificare scelte di viaggio, nonché la maggiore propensione a modificare congiuntamente, anziché separatamente, più scelte di viaggio (i.e. cambiare sia l'orario di partenza che il percorso nello stesso contesto di funzionamento del sistema, anziché in maniera differita con riferimento dunque a due contesti diversi).

Sempre Mahmassani et al.<sup>8</sup>, nell'ambito di un'indagine sperimentale condotta nella città di Austin, rilevano come il 46% del campione intervistato si dichiara certamente disponibile ad acquisire informazioni prima d'intraprendere lo spostamento - *pre trip* - o durante il viaggio - *en route* -, mentre il 44% solo possibilmente. Lo stesso studio fornisce poi utili indicazioni sulla *compliance* degli utenti al contenuto informativo, indicando che il 47% del campione si dimostri favorevole a modificare percorso in accordo all'informazione ricevuta, mentre il 34% si dichiara indeciso qualora riportato ad un contesto reale. Sono altresì investigate le motivazioni di maggior incentivo alla modifica del percorso prescelto, ovvero i contenuti informativi dalla stessa utenza ritenuti più influenti sulle proprie scelte di viaggio, con i seguenti esiti: l'83% del campione identifica nel risparmio del tempo di viaggio l'informazione determinante ai fini della modifica del percorso, seguita dall'informazione sulla presenza di incidenti (81%), notizie sul livello di congestionamento delle arterie a valle (68%), informazioni sul tempo di viaggio che l'utente sperimenterà lungo il percorso preabilitato all'origine (55%).

Wardman et al.<sup>9</sup>, sempre attraverso gli strumenti propri di indagini *SP*, indagano il comportamento degli utenti in presenza di pannelli a messaggio variabile, sottoponendo ad un campione del sistema (rete extra-urbana della città di Manchester), possibili scenari di traffico e corrispondenti messaggi che riportano informazioni di tipo *descrittivo*, *qualitative* o *quantitative*, relative alle possibili alternative disponibili a partire dal nodo a valle del punto di somministrazione dell'informazione. Tenendo conto della segmentazione dell'utenza in relazione a variabili socio-economiche significative, i risultati evidenziano come la scelta del percorso possa essere fortemente condizionata da stringhe informative riportate su VMS, rilevando in particolare: la significatività statistica tanto delle informazioni qualitative che quantitative; la maggiore influenza sulle scelte di diversione di informazioni sulla presenza di incidenti rispetto ad altre cause di ritardo (e.g. congestione,

---

<sup>7</sup> Cfr. Bibliografia: Mahmassani H. S. et al., [31], pag. 46.

<sup>8</sup> Cfr. Bibliografia: Mahmassani H. S. et al., [34], pag. 46.

<sup>9</sup> Cfr. Bibliografia: Wardman M. et al., [43], pag. 47.

lavori); la correlazione fra impatto visivo più o meno accentuato del messaggio e probabilità di diversione.

Dai primi anni '90 del secolo scorso in poi, la sempre maggiore rilevanza delle problematiche legate all'informazione dell'utenza unita alle accresciute capacità computazionali dei computers ed al parallelo sviluppo di softwares di simulazione dinamica del traffico veicolare, hanno determinato il proliferare di studi incentrati sull'analisi dei comportamenti attuati dagli utenti in presenza d'informazione, riconducibili al secondo e terzo degli approcci menzionati in precedenza. Fra questi ci si limiterà a riportare di seguito alcuni dei contributi più rilevanti.

Barcelò et al.<sup>10</sup> confermano in diversi studi la centralità del meccanismo di assegnazione secondo modelli di scelta discreta di tipo stocastico in accordo ad un rinnovato paradigma della microsimulazione, rispetto a quello tradizionale di mera emulazione stocastica dei flussi di traffico in una rete stradale, sottolineando come questa evoluzione costituisca un requisito essenziale ai fini della corretta valutazione della gran parte dei *Sistemi ITS* attraverso lo strumento della microsimulazione.

Mahmassani e Stephan<sup>11</sup> suggeriscono, sulla base di evidenze sperimentali, l'assimilabilità dei comportamenti di modifica delle scelte preventive a comportamenti a *razionalità limitata*.

Brocken e Van der Vlist<sup>12</sup> analizzano i comportamenti di scelta avvalendosi di un simulatore di guida in scala reale.

Ben-Akiva et al.<sup>13</sup> offrono una descrizione dettagliata del processo decisionale dell'utente.

Yang et al.<sup>14</sup>, avvalendosi di un modello di *rete neurale artificiale* calibrato sulla scorta di esperimenti di laboratorio, tentano di individuare le variabili percepite come significative dagli utenti ai fini della formulazione delle scelte di viaggio e le modalità di elaborazione delle stesse da essi adottate. Gli esiti dello studio sembrano corroborare la tesi secondo cui le scelte attuate dagli utenti di un sistema di trasporto siano maggiormente influenzate da esperienze recenti che non da una conoscenza storica maturata su estesi intervalli di tempo.

---

<sup>10</sup> Cfr. Bibliografia: Barcelò J. et al., [3]-[7], pag. 44.

<sup>11</sup> Cfr. Bibliografia: Mahmassani H. S. et al., [30], pag. 46.

<sup>12</sup> Cfr. Bibliografia: Brocken M. G. et al., [17], pag. 45.

<sup>13</sup> Cfr. Bibliografia: Ben-Akiva M. et al., [9], pag. 44.

<sup>14</sup> Cfr. Bibliografia: Yang H. et al. [45], pag. 47.

KhattaK et al.<sup>15</sup> modellano il meccanismo di scelta attraverso una distribuzione di tipo *Logit Multinominale*, rilevando come la probabilità di diversione aumenti in presenza di informazione e precisando che, se qualitativa, l'informazione deve comunque essere estremamente precisa dal punto di vista topologico, se quantitativa deve riguardare anche i percorsi alternativi.

Mannering et al.<sup>16</sup> elaborano modelli di tipo *Ordered Logit* per indagare la propensione dei viaggiatori a modificare orario di partenza, modo di trasporto e percorso. Lo stesso Mannering<sup>17</sup> con un altro gruppo di ricerca, servendosi di modelli di tipo *ordered logit regressivo*, affronta la progettazione dell'informazione fornita all'interno del veicolo, con speciale riguardo al contenuto informativo ed alla tempistica di somministrazione. I risultati evidenziano la rilevanza di diversi fattori, fra i quali: caratteristiche socio-economiche degli utenti del sistema di trasporto, abitudinarietà, livello di congestione ordinariamente riscontrato lungo la rete, attitudine ad usufruire di tecnologie informative.

Simulatori virtuali di un sistema di trasporto reale, in cui l'utente è in grado di compiere scelte sia di tipo preventivo che adattivo, costituiscono l'oggetto dei lavori di Firmin, Bonsall e Merrall, Bonsall e Palmer<sup>18</sup>, prevalentemente improntati alla definizione delle variabili caratteristiche del fenomeno della scelta in presenza d'informazione, ed alla individuazione delle più efficaci tipologie di pannelli a messaggio variabile.

Emmerink et al.<sup>19</sup> propongono un'analisi empirica, attraverso modelli di scelta discreta di tipo *univariato* o *bivariato*, dei meccanismi di selezione del percorso in presenza di informazione somministrata secondo due modalità poste a confronto: via radio; tramite pannelli a messaggio variabile. I modelli, calibrati sulla scorta dei dati raccolti da campagne d'indagine sul comportamento attuato dagli utenti del ringroad della città di Amsterdam, sono appositamente formulati per cogliere le variabili caratteristiche dei fenomeni significativi: propensione all'acquisizione d'informazioni via radio; influenza delle notizie somministrate via radio sulla scelta del percorso; influenza delle informazioni trasmesse tramite VMSs sulla scelta del percorso; similitudine fra i due modi di somministrazione ai fini della percezione del contenuto informativo.

---

<sup>15</sup> Cfr. Bibliografia: Khattak A. J. et al., [28], pag. 46.

<sup>16</sup> Cfr. Bibliografia: Mannering F. L. et al., [36], pag. 47.

<sup>17</sup> Cfr. Bibliografia: Mannering F. L. et al., [37], pag. 47.

<sup>18</sup> Cfr. Bibliografia: Firmin P., [23], pag. 45; Bonsall P. et al., [15], pag. 45; Bonsall P. et al., [16], pag. 45.

<sup>19</sup> Cfr. Bibliografia: Emmerink R. H. et al., [22], pag. 45.

Al Deek et al.<sup>20</sup>, affrontano il problema della simulazione del comportamento di scelta al variare del livello di congestionamento distinguendo tre categorie di utenti in relazione al contesto informativo: utenti che dispongono di sistemi informativi avanzati (ATIS), utenti informati via radio, utenti non informati. Lo studio si avvale di un modello composito di assegnazione della domanda di trasporto, che combina un modello comportamentale di diversione di tipo probabilistico ed un modello delle code, al fine si valutare l'impatto di sistemi ATIS sulla performance di sistema. I risultati mostrano un miglioramento della risposta del sistema al crescere della penetrazione dei sistemi ATIS nella platea di utenti, che diventa tuttavia marginale qualora essi dispongano di informazioni desunte istantaneamente dall'esperienza diretta o via radio. Dallo studio emerge inoltre la significatività di tre variabili: inerzia al cambiamento, informazione *dummy*, risparmio di tempo di viaggio.

Naturalmente un ruolo chiave nel determinare l'impatto dell'informazione sugli utenti di un sistema di trasporto, è rivestito dall'*accuratezza* ed *affidabilità* del contenuto informativo. Il principale aspetto sul quale si concentra la letteratura è quello di unificare i criteri cui conformare detti parametri. In questa direzione sono rivolti gli sforzi di Mahmassani che calibra una soglia al di là della quale un'informazione sia da ritenersi inaffidabile (ovvero per scostamenti del 30% sul tempo totale di viaggio), e definisce analiticamente l'affidabilità come rapporto percentuale del numero di volte in cui detta soglia non viene superata ed il numero totale di esperienze.

Quanto più specificamente all'accuratezza dell'informazione, diversi studi concordano nell'asserire che tanto la sottostima quanto la sovrastima dei tempi di viaggio contribuiscono a deteriorare il grado di fiducia dell'utenza nel sistema informativo. Sempre in relazione ai requisiti di accuratezza ed affidabilità, emerge in generale l'importanza dell'informazione di tipo quantitativo.

In questo solco si collocano i lavori di Bonsall et al, Mahmassani e Liu, Vaughn et al.<sup>21</sup>, che, attraverso analisi empiriche, dimostrano come la qualità dell'informazione influenzi fortemente i comportamenti di scelta.

Zhao et al.<sup>22</sup> illustrano, in fine, come la varianza del *tempo di viaggio percepito* diminuisca all'aumentare dell'accuratezza dell'informazione.

---

<sup>20</sup> Cfr. Bibliografia: Al-Deek H. M. et al., [2], pag. 44.

<sup>21</sup> Cfr. Bibliografia: Bonsal P. W. et al., [12]-[13], pag. 45; Mahmassani H. S. et al., [34], pag. 46; Vaughn K. M. et al., [42], pag. 47.

## 1.3 Inquadramento teorico

### 1.3.1 Simulazione dinamica del traffico

Ai fini dell'analisi delle reti di trasporto, stante l'impossibilità di condurre esperimenti su scala reale, si ricorre sempre più spesso allo strumento della simulazione quale artificio idoneo a riprodurre le condizioni di deflusso che si instaurano in una rete in funzione delle caratteristiche intrinseche della rete stessa (capacità, capillarità o ridondanza, interoperabilità fra i diversi sistemi di trasporto, ect.), delle esigenze di mobilità (legate al grado di antropizzazione del territorio ed alla densità e distribuzione delle diverse attività, temi prettamente pertinenti alla pianificazione territoriale), e del comportamento che contraddistingue le diverse classi di utenza della rete.

A seconda dei contesti che si intende riprodurre e degli scopi specifici perseguiti attraverso la simulazione, vanno formulati appositi modelli dotati di funzionalità specifiche e basati su ipotesi (necessariamente semplificative), coerenti con il campo applicativo.

In accordo con il tema del presente studio, questo capitolo esamina la predisposizione di *basi informative* in tempo reale, ovvero di basi dati relative allo stato della rete, dinamicamente aggiornate, adoperate da applicazioni di informazione avanzata ai viaggiatori di tipo *ATIS - Advanced Traveller Information Systems* -.

I modelli di simulazione che intervengono più direttamente in questo contesto sono quelli preposti alla risoluzione del problema della *assegnazione* della domanda di trasporto. Si tratta di modelli in grado di riprodurre le modalità secondo le quali viene utilizzata una rete di trasporto, capaci, cioè, di restituire i flussi e le condizioni di scorrimento nei singoli archi generati da un'assegnata domanda di trasporto (definita matematicamente in termini di *matrici Origine/Destinazione*).

Per poter cogliere, però, l'interazione fra la distribuzione dei flussi e la disseminazione in tempo reale dell'informazioni sullo stato attuale della rete, e valutare così l'effettiva operabilità ed efficacia delle basi informative a servizio di sistemi *ATIS*, i modelli di assegnazione dovranno essere anche essi temporalmente caratterizzati (i.e. dinamici), e tali anche le matrici O/D che definiscono la domanda di trasporto (ritenuta, nelle considerazioni che seguono, nota).

---

<sup>22</sup> Cfr. Bibliografia: Zhao S. et al., [48], pag. 48.

Per molti anni, prima dell'avvento dei sistemi *ATIS*, ai fini della simulazione della risposta di reti di trasporto gli analisti hanno perlopiù impiegato modelli di assegnazione cosiddetti *stazionari*, basati sull'ipotesi che le condizioni di funzionamento della rete si ripetano, invariate, indefinitamente nel tempo. Più precisamente, stabilito un *periodo di osservazione*, tutti i fenomeni transitori devono essere trascorsi e le condizioni di funzionamento medie nel periodo (rispetto alle inevitabili fluttuazioni aleatorie), possono essere ritenute, con sufficiente approssimazione, rappresentative di quelle che si attingono in ogni istante del periodo medesimo. Con quest'ultimo enunciato si definisce più propriamente la *stazionarietà intraperiodale* relativa cioè ai singoli periodi di osservazione.

Ma per descrivere un altro aspetto tipico del funzionamento dei sistemi di trasporto in genere, è necessario introdurre un'altra categoria fisico-matematica: quella di *stazionarietà interperiodale* (o semplicemente di *periodicità*). Le condizioni che innescano i fenomeni di mobilità sono infatti caratterizzate da una intrinseca ripetitività, in quanto legate alle esigenze ed attività umane, per loro stessa natura ricorsive. A fini esemplificativi si pensi alla necessità, che sorge ogni giorno feriale, di spostarsi dalla propria abitazione al proprio luogo di lavoro. Accanto ad esigenze di questo tipo, che definiremo per brevità *esigenze sistematiche* (espressione di bisogni primari), vi sono poi anche *esigenze saltuarie* in termini individuali (legate a bisogni secondari, attinenti la sfera ludica e sociale: muoversi per acquisti o per svago), che però in termini aggregati di categorie di studio, possono determinare il ripetersi della relativa domanda di mobilità in giorni successivi.

L'insieme delle esigenze di spostamento di tutti gli utenti del sistema di trasporto determina il ripresentarsi di determinati livelli di domanda di mobilità in *periodi di osservazione omologhi* (ad esempio nell'intervallo orario compreso fra le 07:30 e le 08:30 di successivi giorni feriali).

Se lo stato del sistema si ripete invariato in successivi periodi di osservazione omologhi il sistema si dirà in condizioni di stazionarietà interperiodale. Se, poi, la risposta del sistema manifesta un andamento stazionario sia a livello intraperiodale che interperiodale, il sistema si dirà in *condizioni doppiamente stazionarie* in ognuno degli intervalli in cui viga un regime stazionario intraperiodale; solo interperiodalmente stazionario, invece, in tutti gli intervalli intermedi in cui riemerge un andamento variabile.

Adottando la terminologia consolidata nella cultura trasportistica anglosassone nella quale questi concetti sono originariamente maturati, si indica col termine *within-day-dynamics* la dinamica intraperiodale e con *day-to-day dynamics* quella interperiodale. A seconda che ai due livelli, *intra-* ed *inter-* periodale, si attingano condizioni di stazionarietà o di variabilità

## Obiettivi ed Inquadramento Teorico

(queste ultime dette anche, in taluna letteratura di settore, *dinamiche*), si possono distinguere quattro stati della risposta globale del sistema in campo dinamico, denominati in accordo con la terminologia invalsa nel gergo tecnico (non sempre felice e di chiara interpretazione), come di seguito:

- d. *Equilibrio Stazionario* - Il sistema si trova in condizioni stazionarie sia a livello interperiodale che intraperiodale.
- e. *Equilibrio Dinamico* - Il sistema si trova in condizioni stazionarie al livello interperiodale, intrinsecamente dinamiche a livello intraperiodale.
- f. *Processo Dinamico* - Il sistema si trova in condizioni prettamente dinamiche a livello interperiodale, stazionarie in ambito intraperiodale.
- g. *Processo Doppiaemente Dinamico* - Il sistema si trova in condizioni intrinsecamente dinamiche sia a livello interperiodale che intraperiodale.

Per maggiore chiarezza si veda la Tab. 1.1, di seguito riportata.

		Andamento Intraperiodale	
		Stazionario	Dinamico
Andamento Interperiodale	Stazionario	<i>Equilibrio Stazionario</i>	<i>Equilibrio Dinamico</i>
	Dinamico	<i>Processo Dinamico</i>	<i>Processo Doppiaemente Dinamico</i>

**Tab. 1.1 - Contesti di funzionamento dinamico di un sistema di trasporto.**

Distinti i due ambiti temporali di osservazione di un sistema di trasporto rispettivamente intraperiodale ed interperiodale, a seconda del regime di funzionamento stazionario o variabile attinto in ciascuno di essi, si definiscono i quattro contesti riportati in tabella.

Condizione necessaria ma non sufficiente affinché si instauri la stazionarietà intraperiodale è la costanza nel tempo, entro il periodo di osservazione, sia delle grandezze che definiscono la domanda di spostamento (i.e. *flussi di domanda*, ovvero le componenti delle matrici O/D), sia dei fattori che determinano l'offerta di trasporto (caratteristiche topologiche del sistema, proprietà geometrico-funzionali delle infrastrutture, condizioni di regolazione e gestione della rete, etc.). Qualsiasi sia lo stato attuale del sistema (fra i quattro testé elencati), una variazione della domanda di mobilità o dell'offerta di trasporto innesca fenomeni di transitorio che possono restare circoscritti all'interno del relativo periodo o, viceversa, propagarsi attraverso periodi successivi. D'altro canto, pur assumendo flussi di

domanda e configurazione dell'offerta costanti, condizioni di non stazionarietà del sistema possono discendere dalla formazione e propagazione, nello spazio e nel tempo, di *blocchi di traffico* generati da un eccesso di domanda rispetto all'offerta di trasporto; tale squilibrio determina, infatti, la nascita ed il progressivo estendersi di *code*, generando fenomeni intrinsecamente dinamici entro il periodo di riferimento (dunque a livello intraperiodale); inoltre il perdurare di tali fenomeni nella memoria degli utenti della rete, può talora far sì che le condizioni di dinamicità valichino l'ambito intraperiodale per estendersi a quello interperiodale, specialmente qualora i blocchi di traffico non si ripresentino egualmente in periodi omologhi.

Nel presente capitolo sarà descritta la struttura generale dei *modelli di assegnazione* della domanda di mobilità ad una rete di trasporto, rimandando ai capitoli successivi la trattazione delle specifiche funzionalità modellistiche che li compongono, quali i modelli di calcolo dei flussi di percorso (che rientrano fra i *modelli di domanda*), ed i modelli di congestione, propagazione dei flussi e calcolo dei costi di percorso (che rientrano fra i *modelli di offerta*). Per semplicità di trattazione si assumeranno profili di domanda con andamento spazio/temporale noto (*assegnazione a domanda rigida*), relativi esclusivamente al modo di trasporto individuale (*assegnazione monomodale*). Si assumeranno, inoltre, classi di utenti distinte solo rispetto alla coppia origine/destinazione (*assegnazione monoutente*). Per garantire altresì la congruenza della trattazione con le diverse formulazioni del modello di offerta esistenti in letteratura, si escluderanno diversificazioni della formulazione rispetto al modello di congestione ed a quello di propagazione dei flussi.

Il problema sarà formalizzato considerando regimi di funzionamento del sistema prettamente dinamici, con riferimento sia alla dimensione intraperiodale (*within-day dynamics*), che a quella interperiodale (*day-to-day dynamics*).

Saranno esaminate le principali problematiche di modellazione inerenti la simulazione del comportamento attuato dall'utenza nella scelta del percorso, con riguardo sia alle *scelte di tipo preventivo* effettuate prima della partenza (*pre-trip choices*), sia alle *scelte di tipo adattivo* effettuate durante il viaggio (*en-route* o *on-trip choices*). Verranno enucleati i problemi di congruenza tra le scelte operate dagli utenti, i profili temporali di caricamento della rete e quelli di variazione della congestione, tenendo conto della circolarità del processo (ovvero della dipendenza dello stato di congestione a sua volta dalla storia di carico del sistema e dalle scelte di percorso).

Partendo da tali considerazioni preliminari, si procederà quindi alla trattazione degli effetti prodotti dalla disseminazione dell'informazione sulle scelte sia preventive che adattive effettuate dall'utenza e delle conseguenti nuove esigenze di modellazione poste dalla necessità di simulare tali effetti. Verranno esaminati i requisiti di *congruenza e predittività* che l'informazione diffusa deve auspicabilmente possedere, ovvero rispettivamente le proprietà di essere coerente con le condizioni riscontrate successivamente dagli utenti durante il viaggio attraverso la rete e di inglobare nella previsione formulata gli effetti indotti dalla reazione stessa dell'utenza all'informazione somministrata. Infine si produrrà una panoramica dei più significativi software di assegnazione dinamica disponibili in commercio.

### **1.3.2 Modelli di assegnazione in presenza d'informazione**

#### **1.3.2.1 Funzioni, struttura e componenti**

##### **1.3.2.1.1 Relazioni fra parametri di costo e regimi di funzionamento del sistema.**

Per potersi considerare attendibile, un modello di assegnazione deve essere in grado di riprodurre i fattori salienti che concorrono alla formulazione delle *decisioni di viaggio* degli utenti del sistema di trasporto che si intende modellare, nonché i meccanismi essenziali attraverso i quali tali decisioni di estrinsecano.

Primo fra questi: il comportamento adottato dagli utenti nella scelta degli itinerari. Il generico utente che si appresti ad intraprendere uno spostamento (*journey* o *trip*), dalla origine alla destinazione di suo interesse, può in genere optare fra differenti *strategie di viaggio* o *itinerari* (*routing strategies*), ognuna delle quali suscettibile di opportuni adattamenti e correzioni da apportare in funzione delle condizioni riscontrate durante il viaggio, che determinano l'individuazione di altrettanti *percorsi*.

La procedura di scelta fra i possibili itinerari e percorsi può essere descritta matematicamente da appositi modelli - *Route Choice Models* -, in grado di riprodurre i risultati finali delle scelte operate dagli utenti nella realtà fisica, sulla scorta di opportune ipotesi relative ai principi che le orientano. Queste ultime consistono in un insieme di regole che costituiscono il paradigma di scelta degli utenti, non necessariamente coincidenti con quelle psico-comportamentali degli stessi (in genere difficili da estrapolare e tradurre in termini analitici), bensì elaborate dall'analista per ottenere la migliore rispondenza

possibile fra i risultati del modello e quelli delle scelte effettivamente adottate dagli utenti. I modelli basati su un simile impianto sono detti *modelli comportamentali* (o anche *deduttivi* o *di scelta esplicita*), poiché non si limitano a riprodurre in maniera statistica le scelte osservate durante il funzionamento reale del sistema, come fanno i modelli *descrittivi* (detti anche *induttivi* o *di scelta implicita*), ma lasciano che queste ultime discendano da espliciti meccanismi formali di scelta ovvero, in termini matematici, da appositi algoritmi di scelta.

Per quanto pertiene più strettamente al meccanismo di selezione dei percorsi, tutti i comuni modelli di scelta del percorso si basano sull'assunzione (alquanto pesante), che il generico utente attribuisca a ciascun itinerario un parametro di *utilità* (*Utility function*), espresso da un valore scalare, sulla scorta del quale operare la propria scelta. Tale ipotesi, ampiamente riconosciuta in letteratura, è indispensabile nel caso in cui il paradigma di scelta si avvalga dei principi propri della *Teoria delle Scelte Discrete* (*Discrete Choice Theory*), ma non è la sola possibile.

Ogni spostamento comporta un consumo di risorse (in termini di tempo, carburante, pedaggi, impatto ambientale, etc.), usualmente espresso analiticamente in maniera aggregata da un'apposito scalare denominato *costo generalizzato*. L'utilità associata a ciascun itinerario viene quindi identificata con l'opposto del relativo costo generalizzato (in genere a meno di una trasformazione lineare).

Per effettuare la scelta dell'itinerario da seguire, ogni utente deve quindi stimare all'origine il costo corrispondente a ciascun itinerario; potendo poi un itinerario articolarsi in più percorsi, l'utente valuta i costi dei singoli percorsi che lo compongono combinandoli opportunamente per ottenere una stima di massima del costo di itinerario.

Poiché inoltre lo stato del sistema di trasporto varia al trascorrere del tempo, l'utente deve essere anche in grado di determinare preventivamente l'evoluzione temporale dei costi che sosterrà durante il viaggio.

Le considerazioni appena svolte sottintendono, peraltro, una distinzione d'importanza capitale ai fini della corretta modellazione del funzionamento di una rete di trasporto, fra costi stimati dagli utenti del sistema e costi dagli stessi effettivamente sostenuti. Naturalmente gli utenti operano le proprie scelte sulla base dei costi stimati a partire dalle informazioni accumulate attraverso l'esperienza o tratte da osservazioni istantanee dirette sullo stato attuale della rete (limitate all'orizzonte spazio-temporale di percezione, e come tali di carattere puntuale), che si discostano da quelli corrispondenti allo stato effettivo del sistema.

## Obiettivi ed Inquadramento Teorico

Con riferimento alla dinamica dei costi reali, i valori dei costi di percorso nell'istante in cui l'utente accede al sistema (o in un qualunque altro istante di tempo durante il suo spostamento all'interno della rete), detti *costi istantanei* di percorso (*instantaneous costs*), non coincidono (a meno che vengano condizioni stazionarie), con i *costi effettivi* (*actual costs*), che risconterà durante il viaggio, esprimibili matematicamente attraverso una funzione della successione temporale dei costi istantanei del sistema rispetto alla progressione spazio-temporale del moto dell'utente attraverso la rete.

Dai costi di percorso è possibile poi desumere quelli di itinerario (in maniera diretta, per identità, se l'itinerario consta di un solo percorso, viceversa attraverso una procedura di combinazione dei costi dei percorsi afferenti al dato itinerario, demandabile ad un apposito modello analogo a quello di incidenza archi-percorso).

A seconda del regime dinamico di funzionamento del sistema, i costi istantanei ed effettivi di percorso e dunque di itinerario, presentano caratteristiche assai diverse.

Così in condizioni stazionarie in ambito intraperiodale (quindi in ambedue i casi di *Equilibrio Stazionario* e *Processo Dinamico*), costi istantanei e costi effettivi coincidono, poiché l'andamento temporale dei costi di percorso (e di itinerario), si mantiene costante durante tutto il viaggio, e dunque qualsiasi sia l'istante di partenza dall'origine (per quanto concerne le scelte *pre-trip*), o l'istante di viaggio (per quanto riguarda le scelte *en-route*), i costi che si attingono lungo la rete sono sempre gli stessi.

Qualora, invece, il sistema si trovi in uno stato caratterizzato da condizioni non stazionarie al livello intraperiodale (quindi in ambedue i casi di *Equilibrio Dinamico* e *Processo Doppia-mente Dinamico*), costi istantanei e costi effettivi differiscono fra loro. Se però il regime di funzionamento del sistema è interperiodalmente stazionario (i.e. *Equilibrio Dinamico*), i profili temporali dei costi si ripetono invariati nei periodi di simulazione omologhi, interessati cioè da stesse esigenze di mobilità (e.g. da un giorno all'altro nella stessa fascia oraria giornaliera di riferimento); in questo caso all'istante di partenza (o in qualunque altro istante durante il viaggio), gli utenti conoscono il profilo temporale degli costi effettivi corrispondente a quel dato istante, senza doverli sperimentare de novo lungo il tragitto. In fine, i costi riscontrati dagli utenti sono effettivamente dipendenti dalla dinamica di progressione dei loro spostamenti lungo la rete e non noti a priori, solo in contesti di funzionamento non stazionario in ambedue le dimensioni *intra-* ed *inter-periodale* (i.e. *Processo Doppia-mente Dinamico*).

### 1.3.2.1.2 Scelte Preventive e Scelte Adattive. Requisiti di modellazione.

La correlazione fra i diversi regimi di funzionamento del sistema e la cognizione che gli utenti possono acquisire del sistema stesso, assume rilevanza centrale sia sui fenomeni di *en route diversion* che sull'impatto dei sistemi di informazione all'utenza.

Una volta intrapreso l'itinerario corrispondente alla strategia di viaggio scelta all'origine, l'utente può essere indotto a modificare in itinere le scelte iniziali in relazione alle condizioni di traffico riscontrate durante il viaggio; la sequenza di tali adattamenti successivi determina il percorso effettivamente seguito entro il prestabilito itinerario.

I criteri che orientano tali scelte (*scelte adattive*) ed i fattori che le condizionano sono in genere intrinsecamente diversi da quelli che determinano le scelte effettuate prima di intraprendere il viaggio (*scelte preventive*), da ciò l'opportunità di mantenere, anche nella descrizione matematica del fenomeno, la distinzione fra queste due categorie di scelta.

Si può ad esempio assumere che l'utente mantenga gli stessi criteri nella formulazione sia delle scelte preventive che di quelle adattive, ed accresca invece la sua capacità di stima dei fattori che le influenzano (tipicamente i costi), man mano che procede lungo il proprio itinerario, potendo via via disporre di nuove o più aggiornate informazioni sullo stato della rete. Eventualità che non presuppone necessariamente la dotazione di un sistema di disseminazione dell'informazione, potendo il generico utente aggiornare le proprie valutazioni sulla base delle condizioni locali osservate o direttamente sperimentate. A tal proposito occorre precisare che affinché il modello possa cogliere a pieno tali interazioni, la simulazione deve essere condotta in campo prettamente dinamico, ovvero in regime di *Processo Doppiamente Dinamico*.

Più drasticamente la differenza fra scelte preventive ed adattive potrebbe anche derivare dall'intervento di meccanismi di scelta del tutto differenti fra loro (il che può manifestarsi in qualunque contesto di funzionamento dinamico). Ad esempio, le scelte preventive potrebbero essere governate da meccanismi di confronto tra i possibili itinerari alternativi in base alle rispettive utilità, mentre le scelte adattive potrebbero essere dettate da valutazioni locali effettuate in corrispondenza dei punti di diversione lungo l'itinerario, svincolate da espliciti riferimenti ad indicatori di utilità estesi all'intero percorso.

Risulta peraltro evidente come nel caso in cui i meccanismi di scelta che intervengono nelle due fasi *pre-trip* ed *en-route* siano gli stessi, basati cioè sui medesimi criteri e sugli stessi fattori di influenza, non sussisterebbe la distinzione fra le due tipologie di scelta rispettivamente *preventiva* ed *adattiva*, bensì il modello di scelta sarebbe univoco e gli itinerari coinciderebbero con i percorsi. Inoltre qualora, durante il dispiegarsi del percorso, i

valori dei fattori che hanno influenzato la scelta permangano invariati (uguali a quelli stimati all'inizio del viaggio), il percorso non subirebbe alcuna modifica. Viceversa, allorché durante il viaggio intervengano variazioni nella stima dei costi di percorso (i.e. dei fattori che influenzano la scelta), quest'ultimo potrebbe essere riadattato dinamicamente dall'utente a partire dal punto e dal momento in cui le anzidette variazioni siano state rilevate. La scelta del percorso verrebbe così dinamicamente riconsiderata nel tempo, in base ad un meccanismo che potrebbe o meno coincidere con quello che ha determinato le scelte iniziali.

Le considerazioni fin qui svolte suggeriscono, come ha ben evidenziato lo studio del Bifulco<sup>23</sup>, l'opportunità di indagare due aspetti della modellazione:

- la necessità o meno di predisporre un modello che simuli dinamicamente (i.e. al variare delle condizioni di viaggio), in maniera esplicita gli adattamenti apportati durante il viaggio alle scelte assunte all'origine dello spostamento (*en-route diversion*);
- l'approccio da utilizzare nella modellazione delle scelte *en-route* rispetto alle scelte *pre-trip*: quali scelte di *alternative semplici* (percorsi), entro *alternative composte* (itinerari), insieme di tutte le possibili alternative semplici; o quali modifiche apportate ad un *percorso di riferimento* già scelto all'origine.

A seconda della declinazione di questi due aspetti in relazione al contesto dinamico del sistema, i fenomeni di *en-route diversion* possono essere modellati in diversi modi, ovvero:

- a. simulando le *scelte adattive* contestualmente alle *scelte preventive*, assunte in fase *pre-trip* (indifferentemente nei tre contesti di funzionamento di *Equilibrio Stazionario*, *Equilibrio Dinamico*, *Processo Dinamico*), secondo i due approcci alternativi summenzionati:
  - come scelte condizionate di alternative semplici all'interno di alternative composte, ottenendo prima i flussi di itinerario e da questi quelli di percorso.
  - come modifiche apportate ab origo direttamente ad un percorso prestabilito (*percorso di riferimento*), così ottenendo immediatamente i flussi di percorso;

---

<sup>23</sup> Cfr. Bibliografia: Bifulco G. N. et al., [11], pag.44.

- b. simulando le *scelte adattive* contemporaneamente alla progressione dinamica dello spostamento (unica modalità valida in regime di *Processo Doppiamente Dinamico*), anche in questo caso secondo i due approcci alternativi noti, declinati adesso dinamicamente:
- come adattamenti en-route di una strategia di viaggio prefissata, ovvero come scelta reiterata nel tempo di una *alternativa semplice* all'interno di un insieme di configurazioni possibili (*alternativa composta* o *itinerario*), scelto preventivamente.
  - come modifica dinamica del *percorso di riferimento* già stabilito in origine.

Quanto al primo punto, in particolare, la riproduzione del fenomeno di *en-route diversion* non richiede necessariamente la formulazione ad hoc di un modello esplicito di scelta adattivo. Nel caso in cui si adotti un unico modello di scelta, per ambedue le condizioni *pre-trip* ed *en-route* (per cui i percorsi coincidono con gli itinerari), è comunque possibile utilizzare modelli dinamici di scelta del percorso, capaci, in alcuni punti ed istanti lungo lo svolgimento del percorso, di riconsiderare ed eventualmente modificare la scelta sulla parte residua del percorso, in tal caso avvalendosi dei medesimi criteri che hanno determinato la scelta preventiva. D'altro canto pur disponendo di un modello di scelta adattivo, ancorché esplicito e diverso da quello preventivo, non è detto che riproduca dinamicamente il fenomeno di *en-route diversion*, come nel caso di sistemi stazionari in contesto intraperiodale (*Within-day Static Systems*), o interperiodale (*Day-to-day Static Systems*), in cui la distribuzione dei costi effettivi (*actual costs*), che gli utenti sperimentano durante il viaggio è nota già all'origine<sup>24</sup>. In ultima istanza il problema della modellazione dinamica del fenomeno di *en-route diversion* si pone integralmente solo in condizioni di funzionamento doppiamente dinamiche. È intuitivo, in fine, riconoscere come qualora si adotti un unico modello di comportamento per simulare le scelte preventive ed adattive (qualsiasi sia il regime di funzionamento del sistema in ambito intraperiodale), ed il sistema si trovi in condizioni interperiodalmente stazionarie, non si ponga alcuna esigenza di modellazione dei due fenomeni di scelta adattiva ed *en-route diversion*.

---

<sup>24</sup> Nel primo caso (*Within-day Static Systems*), la distribuzione dei costi lungo il percorso è la stessa in ogni istante del periodo di osservazione; nel secondo caso (*Day-to-day Static Systems*), l'andamento dei costi è identico in periodi di riferimento omologhi di giorni successivi.

La Tab. 1.2 riassume le soluzioni modellistiche rintracciate in letteratura per riprodurre le scelte adattive ed i fenomeni di en-route diversion, in relazione ai contesti di funzionamento dinamico del sistema.

I modelli di assegnazione appositamente formulati per contesti di *Equilibrio Stazionario* od *Equilibrio Dinamico*, più ampiamente utilizzati e riscontrati in letteratura, ricorrono in genere a meccanismi di scelta adattivi di tipo A solo per il *sistema di trasporto collettivo*, ed esclusivamente a meccanismi di scelta preventivi per il *sistema di trasporto individuale*. Modelli di scelta adattivi di tipo A' sono invece adottati generalmente solo per sistemi di trasporto collettivo in condizioni di *Processo Dinamico*. Nel caso, invece, di *Processo Doppiaente Dinamico*, i modelli di assegnazione più diffusi per i sistemi di trasporto individuale sono di tipo B<sup>25</sup>, prediletti a quelli più generici di tipo A'' (cui peraltro possono essere formalmente ricondotti adottando meccanismi di scelta preventivi ed adattivi coincidenti).

---

<sup>25</sup> Cfr. Bibliografia: Mahmassani H. S. et al., [35], pag. 46.

## Obiettivi ed Inquadramento Teorico

		<b>Requisiti dei modelli di scelta adattivi</b>	
		Ad alternativa composta (scelta di un percorso entro un dato itinerario)	Ad alternativa di riferimento (modifica dinamica di un dato percorso)
<b>Contesti dinamici del Sistema</b>	<i>Equilibrio Stazionario</i>	<p><b>A)</b> Si mantiene la distinzione fra itinerari e percorsi. La scelta dei percorsi è operata fra le alternative possibili che formano l'itinerario, essa è indipendente dalla dinamica di propagazione dei flussi, oppure tale dinamica si ripete identicamente in periodi di riferimento omologhi potendosi dunque assumere nota all'origine dello spostamento. Le probabilità di scelta adattiva possono essere stimate a priori.</p>	<p>Ogni itinerario consta di un solo percorso (l'itinerario s'identifica col percorso). Tutte le scelte possono ricondursi a scelte pre-trip, per due ragioni alternative:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• gli andamenti dei costi sono identici in periodi di riferimento omologhi;</li> <li>• i costi si mantengono costanti all'interno del periodo di riferimento.</li> </ul>
	<i>Equilibrio Dinamico</i>		
	<i>Processo Dinamico</i>	<p><b>A')</b> Analogo al caso A), con la differenza che il modello si inserisce in un contesto interperiodalmente dinamico. Il meccanismo di scelta adattiva è indipendente dalla dinamica di propagazione dei flussi. Entro il periodo di riferimento, stimati i costi utili alla formulazione delle scelte preventive, restano definiti anche quelli che influenzano le scelte adattive.</p>	
	<i>Processo Doppiamente Dinamico</i>	<p><b>A'')</b> Permane la distinzione fra itinerari e percorsi. I percorsi sono selezionati, in accordo al modello di scelta adattivo, fra le alternative che costituiscono l'itinerario, sulla scorta degli actual costs stimati congruentemente alla dinamica di evoluzione dello spostamento.</p>	

**Tab. 1.2 - Requisiti dei modelli di scelta adattivi.**

A seconda dei contesti di funzionamento dinamico di un sistema di trasporto, si rintracciano in letteratura diverse formulazioni dei modelli di scelta adattivi deputati alla riproduzione del fenomeno di *en-route diversion*, riconducibili alle tipologie riassunte sinteticamente in tabella.

### **1.3.2.1.3 Ruolo dell'Informazione in funzione del contesto dinamico del sistema di trasporto.**

Le interazioni tra i diversi fattori che intervengono contestualmente nel funzionamento di un sistema di trasporto (scelte preventive ed adattive, modifica dinamica dei percorsi di riferimento, propagazione dei flussi, congestione, costi di percorso e di itinerario), e le stesse caratteristiche che li connotano, possono essere significativamente influenzate dalla presenza di *Sistemi Avanzati di Informazione all'Utenza (Advanced Traveller Information Systems - ATIS -)*. Questi sistemi possono essere utilmente impiegati in due ambiti principali:

- gestione di eventi inattesi (legati ad anomalie intrinseche al sistema o ad interventi di agenti ad esso esterni);
- gestione delle normali condizioni di funzionamento del sistema.

Eventi esterni che possono perturbare il funzionamento di un sistema di trasporto, sono quelli non ascrivibili al normale funzionamento del sistema o non modellizzabili, si tratta quindi di fenomeni che nella realtà fisica sono imputabili all'interazione del sistema con l'*ambiente esterno*, oppure fenomeni che, nella realtà virtuale del modello, non possono essere riprodotti mediante gli strumenti di simulazione e previsione disponibili.

Fra le possibili classificazioni proposte per gli eventi inattesi, la più idonea ai fini della definizione delle funzioni e degli obiettivi dei sistemi *ATIS* preposti alla loro mitigazione, è quella basata sulla rispettiva durata, che distingue:

- eventi inattesi di breve durata;
- eventi inattesi di lunga durata.

Fra i primi rientrano tutti gli eventi inattesi la cui durata non si protragga per due o più periodi di riferimento omogenei consecutivi, quali: cantieri e lavori in corso saltuari di modesta entità, incidenti, manifestazioni, etc. Si tratta di eventi la cui modellazione non richiede di modificare la struttura e le funzionalità del modello di simulazione, ma che una volta introdotti nel modello, sotto forma di eventi, innescano o accentuano tendenze di non stazionarietà già insite nel modello di partenza. In generale, qualunque sia lo stato del sistema antecedente all'intervento dell'anomalia, esso tenderà potenzialmente ad un regime doppiamente dinamico, poiché le anomalie determinano condizioni di funzionamento diverse da quelle riscontrate nei periodi omologhi dei giorni precedenti e quindi una

## Obiettivi ed Inquadramento Teorico

dinamicità in ambito interperiodale, cui si associano comunemente anche perturbazioni al normale funzionamento del sistema a livello intraperiodale.

In questi casi gli obiettivi principali che il sistema di informazione si prepone, tanto nella realtà fisica quanto nella rappresentazione modellistica, sono i seguenti:

- minimizzare l'impatto degli effetti prodotti dalle anomalie sugli utenti, supportandoli nella formulazione delle scelte (*informazioni descrittive*), o fornendo direttamente soluzioni alternative (*informazioni prescrittive*);
- evitare la propagazione delle anomalie ad altri elementi del sistema (quindi su scala spaziale);
- evitare la propagazione degli effetti su scala temporale, scongiurando che anomalie temporanee inneschino o accentuino (qualora già presenti), nel processo di scelta degli utenti, caratteri di dinamicità attraverso successivi periodi di riferimento omologhi.

I primi due obiettivi rispondono all'esigenza di mitigare gli effetti su scala intraperiodale (interesse preponderante nel caso di eventi di breve durata), mentre il terzo è rivolto a mantenere sotto controllo la dinamica interperiodale del sistema, evitando che detti effetti valichino i confini del periodo di riferimento. Per poter assolvere tali funzioni il sistema di informazione deve funzionare in regime doppiamente dinamico (i.e. *Processo Doppiamente Dinamico*).

Gli eventi esterni di lunga durata includono tutti quegli eventi in grado di determinare alterazioni dell'offerta di trasporto che si protraggono per più di due periodi di riferimento omologhi consecutivi o addirittura indefinitamente. Si tratta di cantieri o lavori in corso tali da modificare in modo permanente le caratteristiche infrastrutturali, di servizio e di regolazione del sistema di trasporto medesimo. In questi casi le funzioni cui il sistema d'informazione all'utenza deve precipuamente assolvere sono:

- informare adeguatamente gli utenti sulle modifiche intervenute nella configurazione della rete;
- minimizzare la durata dei fenomeni di transitorio generati o accentuati (qualora già presenti), dalle mutate condizioni del sistema;
- favorire la rapida evoluzione del sistema verso contesti di funzionamento stazionario, prediligendo, qualora siano egualmente possibili più configurazioni stazionarie alternative, quella che garantisce la massima efficienza del sistema di trasporto.

## Obiettivi ed Inquadramento Teorico

A tale scopo il sistema d'informazione deve poter funzionare in regime dinamico almeno in ambito interperiodale (i.e. *Processo Dinamico* o *Processo Doppiamente Dinamico*).

Dal punto di vista della simulazione, per poter cogliere correttamente gli effetti di tali eventi è necessario stavolta modificare la struttura stessa del modello, ad esempio intervenendo sulla topologia.

Come già anticipato, il ruolo di un sistema d'informazione all'utenza non si limita alla risoluzione di scenari *emergenziali* temporanei (e dei fenomeni di transitorio conseguenti), ma si estende proficuamente anche alla gestione *ordinaria* del sistema qualunque sia il suo regime di funzionamento.

Se il sistema, in condizioni ordinarie, si trova in *Equilibrio Stazionario*, la funzione principale affidata al sistema di informazione consiste nel mantenere stabilmente il sistema in tale contesto di funzionamento. In questo caso, infatti, la predisposizione di un sistema informativo, purché ritenuto dagli utenti affidabile, produce diversi effetti benefici mutuamente correlati:

- ridurre l'influenza delle fluttuazioni aleatorie dei costi di percorso sulla scelte degli utenti;
- mitigare le perturbazioni indotte sul regime di funzionamento stazionario del sistema dalla presenza di utenti non abituali (con un ridotto livello di conoscenza delle condizioni di funzionamento ordinarie del sistema);
- attenuare la differenza fra utenti abituali e non, permettendo a tutti di percepire correttamente le reali condizioni di funzionamento del sistema;
- rendere il comportamento di ciascun utente più deterministico.

Poiché l'equilibrio di un sistema di trasporto dipende dai livelli di aleatorietà che caratterizzano tanto il funzionamento del sistema stesso quanto la percezione che di questo hanno gli utenti, alla luce delle considerazioni appena svolte emerge come l'*equilibrio stazionario 'informato'* e l'*equilibrio stazionario 'non informato'* possano differire significativamente anche per uno stesso sistema di trasporto soggetto alle stesse condizioni al contorno.

Se il sistema si trova in condizioni di *Equilibrio Dinamico*, ovvero il suo funzionamento è connotato da una variabilità intraperiodale, il ruolo del sistema informativo non si discosta da quello relativo al caso di *Equilibrio Stazionario*, se non per il fatto che l'informazione disseminata sarà anch'essa soggetta ad una dinamicità intraperiodale, dovendo essere aggiornata in ogni istante del periodo di riferimento congruentemente allo stato della rete.

Se il sistema di trasporto si trova invece in regime di *Processo Dinamico*, compito dell'informazione disseminata è quello di governare la dinamica interperiodale, provvedendo a far sì che gli utenti effettuino le proprie scelte (sempre sottese da un criterio di *ottimo utente*), in modo stabile nel tempo. Obiettivo del sistema d'informazione è quello di ricondurre il funzionamento del sistema di trasporto all'*Equilibrio Stazionario*, innescando processi di stabilizzazione o accelerando eventuali tendenze già insite nella naturale evoluzione dinamica del sistema. Qualora fossero egualmente possibili diverse configurazioni alternative di equilibrio interperiodale (tutte rispondenti ad una logica di ottimo utente), il sistema d'informazione deve essere in grado di indirizzare il sistema di trasporto verso quella che assicura la migliore funzionalità complessiva del sistema, ovvero il più possibile prossima all'*ottimo di sistema*. Una volta ricondotto a regime stazionario il funzionamento interperiodale del sistema di trasporto, il sistema informativo deve iniziare a funzionare congruentemente alla ritrovata condizione di *Equilibrio Stazionario* della rete in cui si trova ad agire.

In fine, se il sistema di trasporto si trova in un contesto di *Processo Doppiamente Dinamico*, il ruolo del sistema informativo non si discosta da quello relativo al caso di *Processo Dinamico*, cambia il suo contesto di funzionamento che, parimenti a quello del sistema di trasporto servito, sarà connotato da una dinamicità anche intraperiodale oltre che interperiodale, ovvero l'informazione disseminata dovrà essere aggiornata in ogni istante del periodo di riferimento.

Qualunque siano il regime di funzionamento del sistema di trasporto e le concause che lo hanno determinato, l'introduzione di un sistema d'informazione in tempo reale può indurre dei cambiamenti nei criteri che orientano le scelte di viaggio degli utenti, e richiedere pertanto apposite modifiche strutturali al modello di simulazione per poterli cogliere appropriatamente<sup>26</sup>. Ragione ulteriore per cui un *equilibrio informato* può differire da uno *non informato*.

---

<sup>26</sup> A titolo esemplificativo si pensi ai modelli usualmente impiegati nella simulazione delle scelte adattive degli utenti alle fermate di un servizio di trasporto collettivo. In assenza di informazione, in genere si tratta di modelli basati su un approccio cosiddetto *indifferente*, il quale assume che ad una fermata, la probabilità di scelta di una tra tutte le linee di trasporto collettivo utili allo spostamento di un dato utente coincida con la probabilità che un mezzo di tale linea sia quello che si presenti per primo alla fermata, approccio tipico del *modello ad ipercammini* per il trasporto collettivo (Nguyen et Pallottino, 1986). In presenza di un sistema di informazione è più opportuno, invece, adottare modelli di scelta basati su approcci di tipo *intelligente* o a *confronto di costi*.

In definitiva, a seconda dello stato dinamico del sistema di trasporto, la somministrazione dell'informazione all'utenza può assolvere compiti diversi. La progettazione dell'informazione in funzione degli scopi che persegue in relazione al regime di funzionamento del sistema di trasporto in cui opera, esula dall'ambito della pura simulazione del sistema di trasporto. D'altro canto i modelli di simulazione devono essere in grado di riprodurre gli effetti dell'informazione sul funzionamento del sistema di trasporto. In altri termini, il modello di progettazione dell'informazione deve poter avvalersi di modelli di simulazione in grado di prevedere gli effetti dell'informazione stessa sul sistema di trasporto, ma è opportuno che i due modelli, pur interagenti fra loro, restino distinti (specie se già di per sé complessi)<sup>27</sup>. A parere di alcuni studiosi del settore, il ricorso non raro a soluzioni modellistiche unitarie che risolvano contestualmente ed indistintamente ambedue i problemi della progettazione dell'informazione e della simulazione/previsione dei suoi effetti, ha contribuito ad ingenerare la confusione in cui versa ad oggi il campo della modellistica dei sistemi *ITS* con particolare riguardo alle applicazioni *ATIS*.

### 1.3.2.2 Caratteristiche dell'informazione somministrata

Per definire compiutamente le esigenze modellistiche correlate alla simulazione di un sistema di trasporto dotato di un sistema di informazione all'utenza, in termini di attributi, fattori d'influenza e struttura del modello, è indispensabile descrivere le caratteristiche ed i requisiti che l'informazione deve possedere. A seconda degli aspetti privilegiati, possono essere proposte diverse classificazioni delle informazioni fornite agli utenti di una rete di trasporto. Una prima classificazione, in base ai destinatari dell'informazione, distingue fra:

- *informazioni di tipo collettivo;*
- *informazioni di tipo personale;*
- *informazioni di tipo intermedio.*

---

<sup>27</sup> Quello del rapporto fra modelli di progettazione e modelli di simulazione è un problema che non riguarda solo l'elaborazione dell'informazione, ma interessa diversi componenti di un sistema di trasporto. Si pensi, ad esempio ai modelli di progettazione delle intersezioni dotate di regolazione semaforica o a quelli di elaborazione della topologia di una rete di trasporto, che dovranno necessariamente avvalersi di modelli di simulazione in grado di cogliere gli effetti che le diverse soluzioni progettuali hanno sul funzionamento della rete stradale.

## Obiettivi ed Inquadramento Teorico

Per informazioni di tipo collettivo si intendono quelle fornite agli utenti in maniera diffusa e generalizzata, prescindendo cioè dal contesto specifico e dalle necessità particolari del singolo utente (o di gruppi di utenti simili per esigenze o profili comportamentali). Si tratta di informazioni che raggiungono indifferentemente tutti gli utenti (tramite ad esempio notiziari radio o televisivi), indipendentemente dalle diverse coppie origine/destinazione tra cui questi ultimi intendono spostarsi o dalla rispettiva localizzazione sulla rete al momento della somministrazione dell'informazione.

Per informazioni di tipo personale si intendono, per contro, quelle formulate in relazione al campo di interesse di uno specifico *profilo utente* (ovvero di uno specifico gruppo di utenti accomunati per esigenze informative). Informazioni di questo tipo sono ottenibili dal singolo utente servendosi di appositi call-center ai quali comunicare la propria posizione e/o la coppia O/D rispetto alla quale ottenere l'informazione, o di dispositivi palmari di navigazione dotati di tecnologie di localizzazione satellitare (GPS, GPRS), ed interfacce utente per l'impostazione delle diverse scelte di viaggio (destinazione, etc.).

Informazioni di tipo intermedio sono quelle specificamente formulate per singoli profili utente veicolate, però, attraverso mezzi di disseminazione di tipo collettivo. Sono, ad esempio, quelle ricavabili (prima di intraprendere il viaggio), dalla consultazione di siti internet dedicati, ove appositi meccanismi di navigazione assistita permettono all'utente stesso di estrarre dalla mole di informazioni generali ma di notevole dettaglio supportate, la specifica informazione di interesse; o ancora quelle riportate su *pannelli a messaggio variabile* (*Variable Message Signs - VMS -*), collocati a bordo strada, nel qual caso lo strumento di somministrazione dell'informazione è collettivo in quanto fruibile indistintamente da tutti gli utenti, mentre l'informazione è rivolta esclusivamente ad un determinato gruppo di utenti (ad esempio qualora riferita ad una sola delle destinazioni raggiungibili dalla sezione stradale in cui è installato il *VMS*).

La scelta del tipo d'informazione da somministrare secondo la classificazione testé introdotta (*collettiva, personale o intermedia*), influenza la quantità di notizie veicolabili (specialmente per quanto concerne le informazioni *en-route*), in relazione al livello di qualità che s'intende mantenere. Così ad esempio, la disseminazione di informazioni collettive ma dettagliate è difficilmente realizzabile a causa della mole di notizie che occorrerebbe trasmettere, tale da comprometterne la fruibilità.

Una seconda classificazione distingue le informazioni in base alla loro evoluzione temporale, contemplando rispettivamente:

## Obiettivi ed Inquadramento Teorico

- *informazioni di tipo statico*;
- *informazioni di tipo dinamico*.

Informazioni statiche sono quelle che non variano al variare delle condizioni del sistema di trasporto; esse non rispecchiano dunque il livello di servizio attuale della rete, ma si riferiscono a condizioni medie riscontrate in determinati periodo omologhi di riferimento. Esempi di questo tipo d'informazione sono (prescindendo dalla tecnologia a supporto della sua trasmissione): segnali indicatori di direzione, mappe stradali, alcuni servizi di navigazione *on board* o su dispositivo palmare<sup>28</sup>, tabelle orarie dei servizi di trasporto collettivo, etc. Tale modalità è più idonea alla trasmissione di notizie relative ad aspetti del sistema di trasporto soggetti ad una ridotta fluttuazione nel tempo, prevalentemente legati all'architettura ed alla topologia dello stesso; risulta per contro del tutto inadatta alla diffusione di contenuti informativi attinenti il regime di funzionamento del sistema (e.g. tempi di percorrenza della rete), anche qualora tarati con riferimento a contesti di equilibrio interperiodale ed in questo ambito utilizzati<sup>29</sup>.

In definitiva questo tipo d'informazione è finalizzata alla più ampia diffusione della conoscenza delle infrastrutture e dei servizi che costituiscono il sistema di trasporto, allo scopo di accrescere uniformemente il *grado di conoscenza* (essenzialmente topologica), della rete acquisito dalla platea di utenti, attenuando così la differenza, sotto questo aspetto, fra *utenti abituali* ed *utenti non abituali*.

Le informazioni di tipo dinamico, al contrario, aggiornano dinamicamente il proprio contenuto in maniera congruente al regime attuale di funzionamento del sistema di trasporto; sono pertanto intrinsecamente idonee a descrivere l'evoluzione delle condizioni di traffico in termini degli appositi parametri di performance (i.e. tempi di percorrenza e costi di viaggio).

Un compromesso equilibrato dovrebbe prevedere il ricorso contestuale ad informazioni statiche, cui demandare preminentemente la funzione di descrivere la configurazione della rete e dei servizi, ed informazioni dinamiche, cui affidare invece la descrizione delle

---

<sup>28</sup> Mappe elettroniche sulle quali è riportata la posizione del veicolo, aggiornata dinamicamente grazie alla interazione con sistemi di geolocalizzazione tipo *GPS* o *GPRS*, mentre le condizioni di traffico della rete in cui il veicolo si muove sono definite in maniera statica.

<sup>29</sup> In caso di scostamento del sistema dalle condizioni di equilibrio occorrerebbe, infatti, comunicare tempestivamente agli utenti la non attualità delle informazioni fornite, pena l'insorgere di rischiose situazioni di confusione e finanche *controinformazione* che potrebbero favorire la propagazione della perturbazione.

condizioni di funzionamento del sistema ed eventualmente l'indicazione di soluzioni di viaggio meglio rispondenti alle esigenze degli utenti.

È intuitivo riconoscere come le informazioni di tipo dinamico assumano una rilevanza assai maggiore di quelle statiche in relazione agli effetti sul funzionamento del sistema di trasporto; possono, del resto, essere utilizzate in qualsiasi contesto dinamico e spesso ormai integrano anche contenuti di tipo statico inerenti la topologia ed i servizi del sistema di trasporto.

Un'ulteriore classificazione, in relazione alla funzione assolta, distingue:

- *informazioni prescrittive;*
- *informazioni descrittive.*

Informazioni descrittive sono quelle tese a dare agli utenti una nozione sullo stato della rete migliore di quella che gli stessi trarrebbero facendo affidamento esclusivamente alla propria esperienza ed all'osservazione diretta. Esse contengono dunque notizie relative ai principali parametri di funzionamento della rete (tempi di viaggio, livelli di congestionamento, etc.), che influenzano le scelte degli utenti. Sulla scorta di tali informazioni, estese alle diverse alternative di viaggio possibili, ciascun utente effettuerà autonomamente la propria scelta.

Mentre le informazioni descrittive si limitano esclusivamente a fornire agli utenti i dati utili alla formulazione della propria scelta di viaggio, le informazioni prescrittive incorporano anche la fase di elaborazione dei dati ai fini della formulazione della scelta, non più demandata all'utente, per fornire direttamente una precisa indicazione di viaggio, che può talora assumere carattere prescrittivo.

La trasmissione agli utenti di informazioni descrittive e prescrittive pone, specialmente se en-route, difficoltà essenzialmente legate alla mole notevole di dati da veicolare, che può raggiungere soglie di criticità qualora l'informazione sia di tipo descrittivo e non abbia caratteristiche personalizzate bensì collettive; ma anche nel caso di informazioni collettive prescrittive, pur caratterizzate da un grado di sintesi maggiore rispetto a quelle descrittive.

Tali difficoltà sono correlate alla disponibilità di una adeguata tecnologia a supporto, che se fino ad appena qualche decennio addietro poteva costituire un ostacolo stringente, ad oggi risulta ampiamente superato alla luce del rapidissimo sviluppo che il settore dei dispositivi di navigazione personali o veicolari ha conosciuto in questo arco di tempo, rendendo di fatto possibile la diffusione capillare dell'informazione.

## Obiettivi ed Inquadramento Teorico

Le informazioni possono ancora essere classificate, in base alla tempistica di somministrazione, in:

- *informazioni pre-trip*;
- *informazioni en-route*.

Informazioni pre-trip sono quelle ottenute dagli utenti prima di intraprendere il proprio spostamento, informazioni en-route sono, invece, quelle acquisite durante lo svolgimento del viaggio.

In relazione alla tempistica di lettura ed elaborazione dell'informazione ai fini della formulazione della scelta di viaggio, le informazioni pre-trip possono essere ben più dettagliate di quelle en-route che devono essere tipicamente acquisite e vagliate dall'utente in tempi più ridotti e devono di conseguenza essere più mirate e sintetiche.

Le prime infatti possono essere esaminate dall'utente in contesti indipendenti dal regime di funzionamento del sistema di trasporto che si appresta ad utilizzare, le seconde, al contrario, sono ottenute nello stesso contesto temporale di funzionamento del sistema di trasporto nel quale si muove, dunque devono essere processate dall'utente con una dinamica condizionata da quella di evoluzione del sistema stesso. Per questo motivo le informazioni pre-trip possono essere di tipo descrittivo e collettivo senza comprometterne la fruibilità, mentre quelle en-route risultano più facilmente strutturabili ed efficacemente utilizzabili se prescrittive e personali.

Se nella realtà fisica le informazioni pre-trip influenzano le scelte preventive, mentre quelle en-route influenzano le scelte adattive, così nell'implementazione virtuale del sistema le prime devono essere contemplate dal modello di scelta preventivo, le seconde, invece, devono intervenire nel modello di scelta adattivo. La presenza di informazioni pre-trip, ed ancor più en-route, può infatti modificare i criteri e la strutturazione del processo decisionale degli utenti e conseguentemente dei modelli che lo rappresentano (basti pensare ai modelli di scelta *di tipo indifferente* o *a confronto di costi* per le scelte adattive alle fermate dei servizi di trasporto collettivo<sup>30</sup>).

Le informazioni pre-trip ed en-route hanno, poi, impatti diversi a seconda del contesto dinamico in cui si trova il sistema di trasporto nel momento in cui vengono trasmesse. In condizioni di *Equilibrio Stazionario* e di *Equilibrio Dinamico*, l'informazione pre-trip (se correttamente progettata rispetto ai requisiti di predittività e congruenza), si limita a

---

<sup>30</sup> Cfr. nota 26, pag. 27.

prospettare agli utenti uno stato del sistema in condizioni di equilibrio, confermando quanto gli utenti hanno già sperimentato in periodi omologhi precedenti e (qualora il sistema permanga in un contesto di stazionarietà interperiodale), sperimenteranno in periodi successivi. L'informazione in questo contesto assolve dunque preminentemente ad un compito di *stabilizzazione* del comportamento di scelta degli utenti.

La condizione di *equilibrio informato* potrebbe, però, discostarsi da quella che si attingerebbe in assenza di un sistema informativo, per l'effetto combinato di più fattori:

- modifica dei meccanismi di scelta (i.e. della struttura dei modelli di scelta);
- attenuazione dell'aleatorietà nella percezione delle condizioni di funzionamento del sistema da parte degli utenti;
- riduzione dell'aleatorietà nella dispersione delle scelte degli utenti.

È peraltro evidente come in questi contesti dinamici, informazioni pre-trip ed en-route relative ad una medesima strategia di viaggio devono avere lo stesso contenuto informativo e, nel caso di *Equilibrio Dinamico* (i.e. dinamicità intraperiodale), i medesimi profili temporali, giacché le condizioni di funzionamento del sistema sono note a priori (prima di intraprendere lo spostamento), essendo caratterizzate da stazionarietà al meno in ambito interperiodale. Dal punto di vista modellistico, quindi, sia le scelte pre-trip che quelle en-route possono essere elaborate contestualmente prima di immettere il veicolo nella rete.

In condizioni di *Processo Dinamico* l'informazione, sia essa pre-trip o en-route, è preminentemente finalizzata a governare la dinamica interperiodale, inducendo negli utenti scelte tese ad orientare il funzionamento del sistema di trasporto verso condizioni stabili di ottimo di sistema. In tale contesto di funzionamento il profilo temporale dell'informazione somministrata (descrittiva o prescrittiva), è costante in ambito intraperiodale, poiché lo stato del sistema se noto (in maniera predittiva e congruente), in un dato istante generico, lo è anche in tutti gli altri istanti del periodo di riferimento. Anche in questo caso, dunque, l'informazione, almeno da un punto di vista modellistico, può essere trasmessa interamente all'origine (pre-trip), ed eventuali informazioni somministrate durante il viaggio (en-route), avranno esclusivamente funzione di conferma.

In contesti di funzionamento doppiamente dinamici (i.e. *Processo Doppiamente Dinamico*), anche l'informazione, congruentemente con lo stato del sistema, varia dinamicamente rispetto ad ambedue i contesti di evoluzione temporale: intraperiodale ed interperiodale. *Actual-costs* ed *Istantaneous-costs* non coincidono ed il contenuto informativo da trasmettere agli utenti varia in funzione alla progressione spazio-temporale dello spostamento. La distinzione fra le due fasi di scelta pre-trip ed en-route è in questo

caso stringente, e l'informazione somministrata incide sia sulle scelte preventive che su quelle adattive, ovvero sugli adattamenti dinamici dei percorsi.

Affinché un sistema informativo assolva effettivamente alla funzione per la quale è concepito, ovvero regolare il funzionamento del sistema di trasporto nel quale opera, deve essere *credibile*, essere cioè percepito dall'utenza come uno strumento affidabile. A tal fine le informazioni da esso veicolate devono necessariamente rispettare due requisiti imprescindibili:

- a. *predittività* ;
- b. *congruenza*.

L'informazione è predittiva se in grado di descrivere le condizioni di funzionamento del sistema che gli utenti effettivamente riscontreranno durante la progressione del viaggio, ovvero se capace di fornire agli utenti una stima esatta dei costi effettivi (*actual costs*), attesi lungo i percorsi alternativi a loro disposizione. Non sono dunque predittivi sistemi informativi che trasmettano esclusivamente notizie relative ad:

- *istantaneous costs* (a meno della coincidenza fra questi ultimi ed *actual costs*, qual è il caso di regimi di funzionamento stazionari almeno in ambito intraperiodale);
- costi relativi a periodi omologhi precedenti (a meno che il sistema si trovi in contesti di funzionamento stazionari rispetto alla dinamica interperiodale).

L'informazione è congruente quando contempla gli effetti che essa stessa induce sul funzionamento del sistema di trasporto, ovvero quando è in grado di prevedere la configurazione spazio temporale dei costi e quindi dei flussi (in sistemi congestionati, quale quello del trasporto privato), ingenerati dalla sua presenza. Nel caso più generale, infatti, le informazioni disseminate inducono, direttamente o meno, nell'utenza del sistema di trasporto scelte diverse da quelle formulate in assenza di informazione. Al lettore attento non sfuggirà come la congruenza, nell'accezione qui assunta, costituisca un aspetto già implicito nella nozione di predittività (secondo la sua interpretazione più rigorosa). Stante però la relativa ambiguità che talora connota il lessico trasportistico, nonché l'importanza centrale di questo fattore, è opportuno non sottintenderlo.

L'elaborazione di informazioni *accurate*, cioè predittive e congruenti, è affidata ad appositi *modelli di progettazione dell'informazione*, mentre ai *modelli di simulazione* è demandato il compito di riprodurre gli effetti da essa prodotti. È intuitivo riconoscere come, pur afferendo ad ambiti semantici differenti, ovvero assolvendo a funzioni distinte, i due

modelli siano strettamente correlati fra loro in relazione anche al regime di funzionamento del sistema di trasporto. Ciò emerge con maggior limpidezza in contesti di equilibrio interperiodale (i.e. *Equilibrio Stazionario* ed *Equilibrio Dinamico*). In questi casi il contenuto dell'informazione è predeterminato (in termini qualitativi, non certo quantitativi), essendo il sistema informativo teso unicamente a veicolare notizie relative alla configurazione di equilibrio, quali:

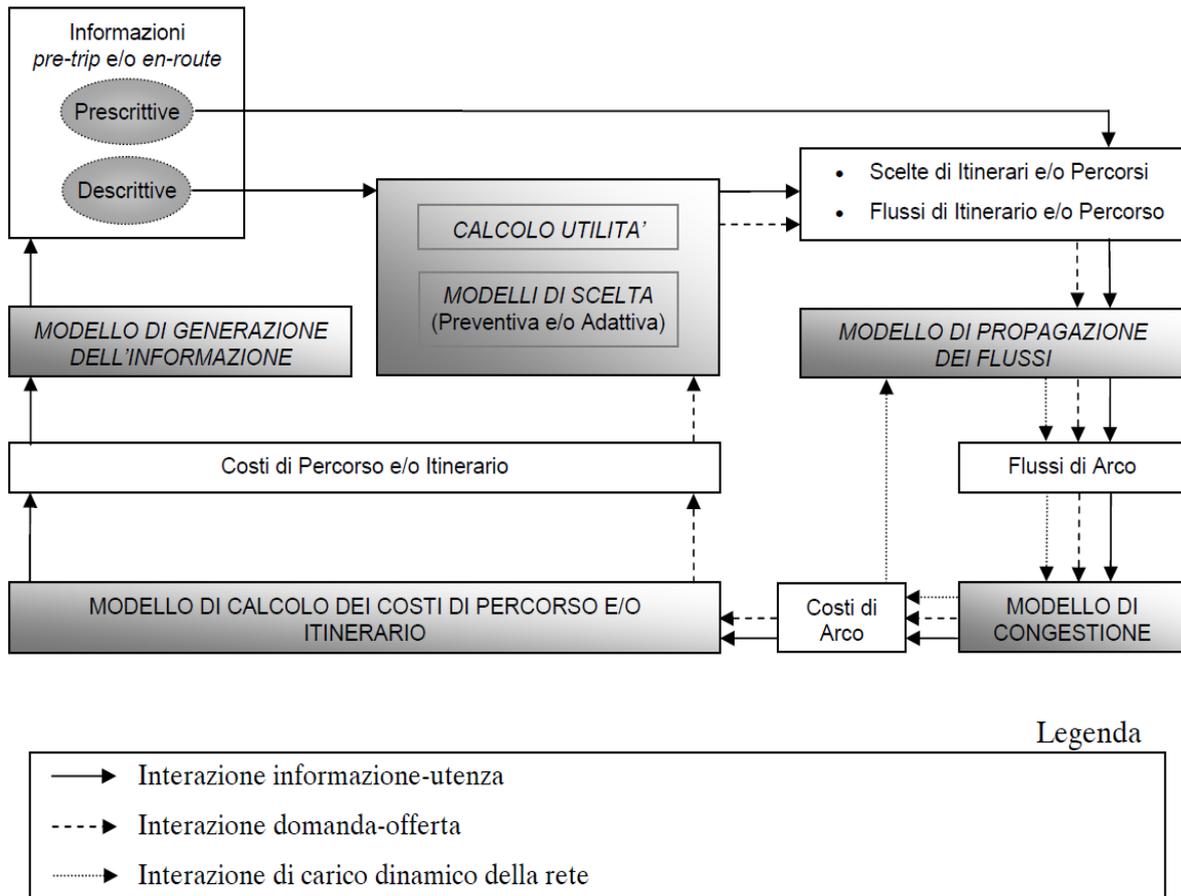
- descrizione degli *actual costs* che si attingono all'equilibrio;
- prescrizione di soluzioni di viaggio (preventive o adattive), coerenti con la configurazione di equilibrio.

In tali contesti, supponendo di disporre di un sistema di modelli di simulazione in grado di riprodurre gli effetti del sistema informativo (ovvero congruente con i contenuti che il sistema informativo può trasmettere); di poter ipotizzare che le informazioni diffuse dal sistema informativo (in questo stadio ancora non note), rispettino i requisiti di congruenza e predittività; di poter fissare, in accordo col grado di accuratezza ipotizzato, un determinato *livello di fiducia (confidence level)*, degli utenti nell'informazione e un corrispondente *livello di osservanza (compliance level)*, della stessa da parte dei medesimi; di poter stimare i valori dei parametri di dispersione aleatoria legati alla penetrazione commerciale dei dispositivi di veicolazione dell'informazione, ovvero all'incidenza di viaggiatori informati sull'intera popolazione di utenti del sistema di trasporto; si riscontra che i profili temporali dei costi ingenerati nel sistema di trasporto costituiscono l'unica incognita sia per il modello di simulazione che per il modello di progettazione dell'informazione. In altri termini, nei soli casi di *Equilibrio Stazionario* ed *Equilibrio Dinamico* e nel rispetto delle condizioni di predittività e congruenza, l'esigenza di includere nel modello la presenza dell'informazione e dunque di ricorrere ad un modello di progettazione della stessa, non introduce ulteriori incognite nel modello di simulazione. Se cioè il modello di simulazione è in grado di individuare la configurazione di equilibrio, è al contempo in grado di determinare la soluzione del problema di progettazione del contenuto informativo.

In contesti di funzionamento tipicamente dinamici (i.e. *Processo Dinamico* e *Processo Doppialemente Dinamico*), le considerazioni appena svolte perdono di validità ed il contenuto dell'informazione da trasmettere agli utenti costituisce un'ulteriore variabile determinando accresciuti livelli di complessità ed interazione nell'analisi di un sistema di trasporto in presenza di un sistema informativo.

### 1.3.2.3 Interazioni dinamiche in presenza di sistemi informativi

L'estrinsecarsi contestuale di fenomeni di congestione, meccanismi di scelta degli utenti, ed intervento di sistemi informativi, determina alcune interazioni tra le grandezze che descrivono i diversi fenomeni fisici che interessano il funzionamento di un sistema di trasporto e, dunque, tra gli stessi modelli predisposti per la rappresentazione di tali fenomeni.



**Fig. 1.1 - Principali interazioni fra i diversi sottomodelli che intervengono nel processo di assegnazione in presenza di informazione.**

Nel diagramma a blocchi sono rappresentati, in tonalità di grigio, i *modelli di domanda ed offerta* che governano il funzionamento del sistema, in bianco le grandezze che ne descrivono la performance. I circuiti tracciati rispettivamente in puntinato, tratteggio e tratto continuo, descrivono le interazioni fra i modelli anzidetti. Queste si manifestano in maniera concomitante solo nel più generale contesto di funzionamento di un sistema di trasporto, segnatamente in regime doppiamente dinamico.

In particolare, come lo studio del Bifulco<sup>31</sup> sembra corroborare, nel caso più generale di funzionamento in regime doppiamente dinamico, è possibile rintracciare contestualmente tre tipi d'interazione:

1. Interazione di carico dinamico della rete;
2. Interazione domanda-offerta;
3. Interazione informazione-utenza.

evidenziati nel diagramma a blocchi riportato in Fig. 1.1

### 1.3.2.3.1 Interazione di carico dinamico della rete.

In contesti di dinamicità intraperiodale, la distribuzione dei flussi lungo gli archi della rete (determinata attraverso il *modello di propagazione*), dipende sia dai flussi di percorso che dai costi di arco; questi ultimi, a loro volta, per effetto del fenomeno della congestione (attraverso il relativo modello), dipendono dai flussi di arco (quindi nuovamente dal modello di propagazione dei flussi), secondo una relazione ricorsiva che in termini modellistici si traduce in un'interazione reciproca fra i due modelli: di propagazione dei flussi e di congestione. Tale problema di interdipendenza fra profili temporali dei flussi e costi di arco è noto in letteratura col nome di *Problema di Caricamento Dinamico della Rete*, ed è rappresentato in Fig. 1.1 dal circuito chiuso tracciato dalle linee a punti fra i blocchi rappresentativi dei due modelli testé menzionati.

Tale circostanza non si verifica, per contro, in regimi di funzionamento del sistema caratterizzati da stazionarietà intraperiodale (i.e. *Equilibrio Stazionario* ed *Processo Dinamico*), nel qual caso il modello di propagazione dei flussi si particolarizza in una relazione lineare, invariante rispetto al tempo, governata dalla *Matrice di Incidenza Archi-Percorsi*, che dipende esclusivamente dalla topologia della rete e dai percorsi su di essa individuati<sup>32</sup>.

L'interazione dovuta al caricamento dinamico della rete viene risolta in maniera diversa ai tre livelli di simulazione ormai consolidati in letteratura:

---

<sup>31</sup> Cfr. Bibliografia: Bifulco G. N. et al. [11], pag.44.

<sup>32</sup> Metodo ampiamente riconosciuto in letteratura per la determinazione dei possibili percorsi alternativi esistenti in una rete di trasporto è, come noto, il *Label Correcting Algorhythm* sviluppato da Dijkstra (Cfr. Bibliografia [18], pag.45).

- *Micro*-simulazione
- *Meso*-simulazione
- *Macro*-simulazione

In breve, il primo approccio è, come noto, basato su tecniche di simulazione discreta che non trattano in maniera analitica le grandezze fin qui introdotte, né le rispettive interazioni, ma consentono di determinare a posteriori i costi ed i flussi di arco a partire da flussi di itinerario o percorso noti. I modelli di meso- e macro-simulazione sono, invece, esplicitamente formulati in maniera analitica rispetto ai flussi e costi di arco, dando luogo a sistemi di equazioni differenziali risolti in genere numericamente.

### 1.3.2.3.2 Interazione domanda-offerta.

Un'ulteriore interazione è quella che sussiste tra costi di percorso e flussi di arco.

I costi effettivi di percorso (*actual costs*), dipendono (attraverso le relazioni di incidenza archi/percorso), dai costi di arco, e tramite questi ultimi, per effetto del fenomeno della congestione, dai profili temporali dei flussi di arco; questi ultimi, a loro volta, discendono, attraverso il modello di propagazione dei flussi, dai flussi di itinerario e di percorso che scaturiscono dalle scelte determinate proprio dai costi effettivi di percorso. Questa relazione ricorsiva è nota con il nome di *Interazione Domanda-Offerta*, ed è rappresentata nel diagramma su riportato, dal circuito chiuso tracciato con linee tratteggiate. L'esistenza di questa interazione è correlata al fenomeno della congestione, ovvero alla dipendenza fra costi e flussi, nell'ipotesi che il comportamento di scelta della utenza sia influenzato dai costi effettivi. Quindi, in termini modellistici, detta interazione coinvolge, oltre ovviamente ai due modelli di propagazione dei flussi e di calcolo dei costi di percorso, anche il modello di scelta del percorso e quello di congestione. L'interazione tra domanda ed offerta è risolta seguendo due approcci alternativi, a seconda del regime di funzionamento del sistema:

1. *Equilibrio* - I flussi sono il risultato di scelte di percorso coerenti con i costi che essi stessi determinano. Tale approccio individua, così, lo stato del sistema cui corrispondono flussi perfettamente consistenti con i costi, ovvero quello *stato di equilibrio* rispetto al quale gli utenti non traggono alcuna utilità a derogare dalle proprie scelte, quindi *stabile*. Il modello di scelta che sottende questo approccio può essere stocastico o, viceversa, deterministico (coerente col *Primo Principio di*

*Wardrop*<sup>33</sup>). Quanto alla formulazione analitica, esso è descritto in genere da sistemi di equazioni non lineari (*problemi di punto fisso*), che, nel caso di comportamento deterministico, possono essere sostituiti da equivalenti sistemi di disequazioni variazionali.

2. *Processo Dinamico* - In contesti caratterizzati da dinamica interperiodale, tale approccio permette di considerare esplicitamente l'evoluzione nei giorni<sup>34</sup> successivi delle scelte di percorso e dei relativi costi, fino eventualmente a convergere verso uno stato di equilibrio del sistema detto *attrattore di punto fisso* (in cui costi e flussi diventano nuovamente consistenti). Esso è descritto da sistemi di equazioni non lineari ricorsive, che discendono da quelle menzionate al punto precedente, introducendo modelli di aggiornamento delle utilità e delle scelte fra periodi di riferimento omologhi consecutivi.

### 1.3.2.3.3 Interazione informazione-utenza.

L'interazione dovuta alla presenza di un sistema informativo scaturisce dal rispetto dei requisiti di predittività e congruenza che l'informazione prodotta deve imprescindibilmente possedere affinché sia percepita come attendibile dagli utenti. Condizione necessaria affinché ciò avvenga è che il contenuto informativo riguardi gli actual-costs che gli utenti sperimenterebbero lungo la rete qualora scegliessero quella data alternativa di viaggio (nel caso di informazioni descrittive), o le scelte migliori che gli utenti possono fare in funzione dei costi effettivi che riscontrerebbero sulla rete (nel caso di informazioni prescrittive). Emerge qui con chiarezza come il grado di affidabilità del sistema informativo percepito dagli utenti sia tanto più elevato quanto più l'informazione trasmessa risulti aderente alla prospettiva di *Ottimo Utente*. Giacché il funzionamento della rete, ovvero la distribuzione dei flussi ed i costi effettivi, dipendono dalle scelte degli utenti, e quest'ultime, in presenza di un sistema informativo, sono a loro volta influenzate dalle prescrizioni e/o descrizioni trasmesse (in relazione al grado di compliance degli stessi utenti), gli actual costs sulla scorta dei quali sono formulate le informazioni devono essere proprio quelli che

---

<sup>33</sup> Cfr. Bibliografia: Wardrop J. G., [44], pag. 47.

<sup>34</sup> Con il termine "giorno" s'intende qui un periodo di riferimento omogeneo rispetto alle condizioni di scelta, ovvero un periodo temporale in cui gli utenti si ritrovano in un determinato contesto di scelta, identico a quello del periodo di riferimento omologo precedente (giorno precedente), nel quale dunque potrebbero ripetere le medesime scelte (siano esse preventive o adattive).

l'informazione contribuisce a determinare. Di qui la relazione di circolarità tra informazione e costi, denominata *Interazione dell'Informazione* e rappresentata in Fig. 1.1 dal percorso chiuso tracciato dalla linea continua.

Il problema dell'interazione dovuta all'informazione è affrontato dal *modello di progettazione dell'informazione* (tranne nei casi di *Equilibrio Stazionario* ed *Equilibrio Dinamico* in cui, come già detto, il problema è risolto in seno allo stesso modello di simulazione<sup>35</sup>).

Al variare del contesto di funzionamento dinamico del sistema, cambiano le caratteristiche che connotano i diversi modelli che intervengono nella simulazione e con esse anche le reciproche interazioni, ed il problema dell'assegnazione assume, così, formulazioni diverse. Parte delle considerazioni fin qui prodotte sono riassunte sinteticamente nella Tab. 1.3 (mutuata dallo studio condotto dal Prof. G. Bifulco<sup>36</sup>), che riporta le diverse declinazioni del modello di assegnazione al variare dell'approccio simulativo.

Il primo elemento dirimente, ai fini della precisazione del modello, è dato dallo stato di congestionamento del sistema, cui è correlata l'*interazione domanda-offerta*, e richiede dunque la distinzione tra:

- a. *Rete non congestionata* - Nel qual caso i costi di arco non dipendono dai rispettivi flussi (dunque non interviene il *modello di congestione*), non si manifesta alcuna *interazione tra domanda ed offerta*, ed è possibile, in linea teorica, ottenere la soluzione del problema di assegnazione in termini di una relazione esplicita che esprima i flussi in funzione dei costi di arco, questi ultimi indipendenti dai flussi (modelli 1. e 2. a seconda della dinamica interperiodale);
- b. *Rete congestionata* - Nel qual caso i costi di arco variano in funzione dei rispettivi flussi (ovvero interviene il *modello di congestione*), e si manifesta dunque l'*interazione tra domanda ed offerta* che può essere riprodotta adottando uno dei due approcci già menzionati, a seconda del contesto di funzionamento interperiodale:
  - *Equilibrio* (modelli 3. e 4.)
  - *Processo Dinamico* (modelli 5. e 6.)

---

<sup>35</sup> Cfr. §1.3.2.2 *Caratteristiche dell'informazione somministrata*, pag. 28.

<sup>36</sup> Cfr. nota 31, pag. 37.

## Obiettivi ed Inquadramento Teorico

Rispetto poi all'*interazione di carico dinamico*, è inoltre opportuno distinguere i modelli di assegnazione a seconda del regime di funzionamento in ambito intraperiodale, tra:

- a. *Assegnazione in regime intraperiodale stazionario* - Nel qual caso non si manifesta alcuna *interazione di caricamento dinamico* della rete, e le *relazioni di congruenza* rispettivamente fra costi di arco e di percorso e flussi di arco e di percorso (espressione analitica del *modello di propagazione dei flussi*), si riconducono alle *relazioni di incidenza archi-percorso*, lineari e tempo-invarianti (modelli 1., 3. e 5.);
- b. *Assegnazione in regime intraperiodale dinamico* - Nel qual caso è necessario far riferimento ai profili temporali dei flussi e dei costi di arco ed adottare modelli non lineari di propagazione dei flussi e dei costi di percorso (modelli 2., 4. e 6.).

Ai fini della predisposizione di basi informative dinamiche funzionali ad applicazioni di tipo *ATIS (Advanced Traveller Information Systems)*, i modelli di assegnazione implementati devono riferirsi a condizioni di congestionamento preferibilmente in contesti doppiamente dinamici.

Modelli di Assegnazione			
Modello di Congestione	Interazioni		Denominazione
	Domanda-Offerta	Di Caricam. della Rete	
Rete non congestionata	No Interazioni	Statica	(1) Modello AoN - <i>All-or-Nothing Assignment</i> -
		Dinamica	(2) Modello di Caricamento Dinamico - <i>Dynamic Network Loading</i> -
Rete congestionata	Equilibrio	Statica	(3) Modello di Equilibrio Stazionario
		Dinamica	(4) Modello di Equilibrio Dinamico
	Processo Dinamico	Statica	(5) Modello di Processo Dinamico
		Dinamica	(6) Modello Doppiamente Dinamico.

**Tab. 1.3 - Denominazione dei modelli di assegnazione.**

A seconda dei contesti di funzionamento dinamico di un sistema di trasporto e delle interazioni che ne discendono, si rintracciano in letteratura diverse declinazioni del modello di assegnazione, riconducibili alle tipologie riassunte sinteticamente in tabella (cfr. nota 31, pag.37).

### 1.3.3 Breve panoramica sui principali softwares di assegnazione

All'orizzonte in costante espansione dei softwares di modellazione dei sistemi di trasporto è possibile distinguere fra i più evoluti pacchetti di assegnazione quelli di seguito elencati: TRANSCAD, TRIPS, EMME2, METACOR e METANET (ulteriormente sviluppati nella piattaforma unitaria denominata RENEISSANCE), DYNAMIT-P, DYNASMART-P, TSIS (evoluzione del modello CORSIM, a sua volta disceso dall'unione dei modelli FRESIM e NETSIM), GETRAM/AIMSUN, MITSILAB, VISSIM/VISUM.

Di questi, TRANSCAD, TRIPS ed EMME2 sono prevalentemente utilizzati nella simulazione di sistemi in regime di Equilibrio Stazionario; METACOR, METANET, TSIS e MITSILAB sono applicabili alla sola riproduzione di condizioni dinamiche in ambito intraperiodale, ovvero in contesti di Equilibrio Dinamico; DYNAMIT-P, DYNASMART-P e GETRAM/AIMSUN possono, invece, essere utilmente impiegati nella simulazione di contesti doppiamente dinamici. Sebbene nessuno dei pacchetti su elencati sia stato esplicitamente concepito per riprodurre tutte le possibili condizioni di funzionamento, DYNAMIT-P, DYNASMART-P e GETRAM/AIMSUN si prestano il linea teorica ad una simile applicazione, consentendo implicitamente all'utente di configurare condizioni doppiamente stazionarie (i.e. di Equilibrio Stazionario)<sup>37</sup>

Quanto al pacchetto VISSIM/VISUM, ancorché ben elaborato in termini di veste grafica, funzionalità di input e rappresentazione dati, a differenza degli altri pacchetti fin qui menzionati manca di una solida letteratura scientifica che costituisca la base teorica a supporto delle procedure e dei modelli computazionale che determinano i risultati della simulazione. Tali considerazioni portano il Bifulco a concludere che «[...] *il pacchetto tedesco è inaffidabile e sembra essere basato su avanzate tecniche di computer-science che, però, hanno scarse basi in termini di comprensione teorica e concettuale dei fenomeni che si vorrebbero simulare.*».

Un passaggio nevralgico nei diversi softwares di simulazione, risiede nell'interazione fra modello di offerta e modello di assegnazione. I più sofisticati modelli di offerta se, singolarmente usati, assolvono efficacemente alla propagazione dei flussi, inseriti, invece,

---

<sup>37</sup> Va precisato, per completezza, che contesti doppiamente stazionari, pur costituendo casi limite cui possono ricondursi condizioni di funzionamento dinamiche, sono risolvibili in forma robusta solo attraverso algoritmi e procedure di calcolo specifici.

come componenti di un modello di assegnazione danno luogo a difficoltà d'implementazione non

I modelli di propagazione del flusso e quelli di congestinamento che compongono il modello di offerta, possono essere formulati con diversi gradi di dettaglio, al crescere dei quali corrisponde un pari aggravio dell'onere di calibrazione e di calcolo. *Modelli macroscopici spazio-discreti* possono annoverarsi a ragion veduta fra i più semplici, richiedendo la sola taratura, sulla scorta di dati sperimentali, della *funzione di congestinamento* (che lega parametri di performance e flussi, i.e. tempi di percorrenza degli archi e numero di veicoli negli stessi transitati). D'altro canto, anche i *modelli macroscopici spazio-continui* del primo ordine, ricorrono ad un'unica relazione sperimentale, il *diagramma velocità-densità*, da calibrare a partire dai valori di grandezze macroscopiche (flussi e densità medi, o velocità e densità medie), desunti da basi dati costruite attraverso rilievi diretti.

Tornando alla combinazione con la domanda di trasporto, i modelli macroscopici analitici consentono una formulazione compatta del problema dell'assegnazione, che consente anche di condurre alcune riflessioni sulle proprietà teoriche del modello di assegnazione stesso. Quanto, invece, ai modelli microscopici di tipo simulativo, l'interazione domanda/offerta presenta difficoltà maggiori. I simulatori sviluppati, infatti, operano per lo più con dati di domanda di origine esogena (com'è il caso di MITSILAB), o aggiornando periodicamente le prestazioni di percorso sulla scorta degli *instantaneous costs* d'arco restituiti dalla simulazione, secondo un'*approccio di tipo feedback* (come nel caso del mesosimulatore INTEGRATION e del microsimitatore AIMSUN se impostato nella modalità DTA - *Dynamic Traffic Assignment* -). Un modello di scelta del percorso che si avvalga, invece, degli *actual costs* comporta l'innescio di un processo iterativo per risolvere la dipendenza circolare tra flussi e costi di arco, interna al modello di propagazione. Assegnazioni di tal sorta sono state implementate in ambito macroscopico e mesoscopico rispettivamente dai pacchetti METANET-DTA, DYNASMART e DYNAMIT; in ambito microscopico recentemente AIMSUN ha sviluppato un modulo di assegnazione basato su una stima dei costi attesi che intende anticipare gli *actual costs*, denominato *Dynamic User Equilibrium - DUE* -.

## Bibliografia di capitolo

- [1] Al-Deek, H. M., Kanafani, A., “Some Theoretical Aspects of the Benefits of En-route Vehicle Guidance (ERVG)”, *UCB-ITS-PRR*, 89, 2, 1989.
- [2] Al-Deek, H. M., Khattak, A. J., Thananjeyan, P., “A Combined Traveler Behaviour and System Performance Model with Advanced Traveler Information Systems”, *Transportation Research* 32A (7), 479-493, 1998.
- [3] Barcelò, J., Casas, J., Codina, E., Ferrer, L., Garcia, D., “Microscopic Traffic Simulation: A Toll for the Design, Analysis and Evaluation of Intelligent Transport Systems”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Kluwer Academic Publ., 41: 173-203, Netherlands, 2004.
- [4] Barcelò, J., Garcia, D., Kirschfink, H., “Scenario Analysis a Simulation Based Tool for Regional Strategic Traffic Management”, *Traffic Tchnology International*, 2001, Special Issue.
- [5] Barcelò, J., “The Role of Simulation ina Advanced Traffic Management Systems”, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> World Conference on ITS*, Torino, 2000.
- [6] Barcelò, J., Casas, J., “Dynamic Network Simulation with AIMSUN”, *Proceedings of the International Symposium on Transport Simulation*, Yokohama, Kluwer, 2003.
- [7] Barcelò, J., Casas, J., Ferrer, J. L., Garcia, D., “Modeling Advanced Transport Telematic Applications with Microscopic Simulators: The Case of AIMSUN2”, *Traffic and Mobility, Simulation, Economics, Environment*, Springer, Berlin, 1999b.
- [8] Ben-Akiva, M., Lerman, S. R., “Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand”, *MIT Press*, Cambridge, 1986.
- [9] Ben-Akiva, M., Bierlaire, M., Koutsopoulos, H. N., Mishalani, R., “Investigation of Route Guidance Generation Issues by Simulation with DynaMIT”, *Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 1999.
- [10] Ben-Akiva, M., De Palma, A., Kaysi, I., “Dynamic Network Models and Driver Information Systems”, *Transportation Research A*, Vol. 25, N° .5, 251-266, 1991.
- [11] Bifulco, G. N., Gallo, M., Punzo, V., Simonelli, F., Florio, L., Mussone, L., De Luca, S., Cantarella, G. E., “I Sistemi Stradali di Trasporto nella Società dell’Informazione. Monitoraggio, Simulazione e Predisposizione di Basi informative Dinamiche”, *Risultati del Congresso sulle Prospettive ed Avanzamenti Metodologici per l’Infomobilità*, Aracne Ed., 2004.

- [12] Bonsall, P. W., Parry, T., "Using an Interactive Route-choice Simulator to Investigate Drivers' Compliance with Route Guidance Information", *Transportation Research Record 1306*, 59-68, 1991.
- [13] Bonsall, P. W., Joint, M., "Driver Compliance with Route Guidance Advice: the Evidence and its Implications", *Proceedings of the VNIS '91*, SAE, IEEE, 47-60, Michigan, 1991.
- [14] Bonsall, P. W., Whelan, G., Page, M., "Stated Preference Experiments to determine the Impact of Information and Guidance on Drivers' Route Choice", *Proceedings of the European Transport Forum*, Seminar E, PTRC, London, 1995
- [15] Bonsall, P. W., Merrall, A. C., "Analysing and Modelling the Influence of Roadside Variable Message Displays on Drivers' Route Choice", *Proceedings of the 7<sup>th</sup> World Conference on Transport Research*, Ed.s Hensher, D. A., King, J., Oum, T., Vol.1, 11-26, 1997.
- [16] Bonsall, P. W., Palmer, I. A., "VMS Signs: The Importance of Phrasing the Message", *Behavioural and Network Impacts of Driver Information Systems*, Eds. Emmerink, R., Nijkamp, P., Wiley, J., London, 1998.
- [17] Brocken, M. G. M., Van der Vlist, "Trac Control with Variable Message Signs", *Proceedings of VNIS*, Part 1, IEEE, 1991.
- [18] Dijkstra, E. W., "A Note on Two Problems in Connection with Graphs", *Numerische Mathematic*, 1, 269-271, 1959.
- [19] Durand Raucher, Y., Yim, Y., Ygnace, Y., "Traffic Information and Driver Behaviour in Paris Region", *Proceedings of the Pacific Rim Transtech Conference*, Vol.1, 167-169, Seattle, 1993.
- [20] Emmerink, R. H. M., Axhausen, K. W., Nijkamp, P., Rietveld, P., "Effects of Information in Road Transport Networks with Recurrent Congestion", *Transportation* 22, 21-53, 1995.
- [21] Emmerink, R. H. M., Axhausen, K. W., Nijkamp, P., Rietveld, P., "The Potential of Information Provision in a Simulated Road Transport Network with Non-recurrent Congestion", *Transportation Research*, Vol. 3C, N° .5, 293-309, 1995.
- [22] Emmerink, R. H. M., Nijkamp, P., Rietveld, P., Ommeren, J. N. V., "Variable Message Signs and Radio Traffic Information: An Integrated Empirical Analysis of Drivers' Route Choice Behaviour", *Transportation Research 30A*, 135-153, 1996.
- [23] Firmin, P. E., "The Use of Simulated Travel Environments to Investigate Driver Route Choice Behaviour", *Ph.D. Thesis*, Dep. of Civil Engineering, University of Leeds, 1995.

- [24] Hato, E., Katsuki, S., Suigie, Y., Morita, I., "Simulation System predicting Influences of Driver Reaction to Real-time Information on Network Performance", *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> World Congress on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 4, 1865-1870, 1995.
- [25] Hato, E., Taniguchi, M., Sugie, Y., "Influence of Traffic Information on Drivers' Route Choice", *Proceedings of the 7th World Conference on Transport Research*, Vol. 1, 27-40, 1996.
- [26] Jeffrey, D., Russam, K., "Information Systems for Drivers", *Transportation Planning and Technology*, Vol. 10, 185-198, 1984.
- [27] Kawashima, H., "Informatics in Road Transport: an Overview of Examples in Japan and Future Issues", *4<sup>th</sup> German-Japanese Seminar on Transportation Systems*, 1991.
- [28] Khattak, A. J., Schofer, J., Koppelman, F. S., "Commuters' En-route Diversion and Return Decisions: Analysis and Implications for Advanced Traveler Information Systems", *Transportation Research 27A*, 101-111, 1993.
- [29] Kobayashi, F., "Feasibility Study of Route Guidance System", *Transportation Research Record 737*, 107-112, 1979.
- [30] Mahmassani, H. S., Stephan, D. G., "Experimental Investigation of Route and Departure Time Dynamics of Urban Commuters", *Transportation Research Record*, 1203, 69-84, 1988.
- [31] Mahmassani, H. S., Calice, C. G., Walton, C. M., "Characteristics of Urban Commuter Behaviour: Switching Propensity and Use of Information", *Transportation Research Record*, 1285, 57-69, 1990
- [32] Mahmassani, H. S., Jayakrishnan, R., "System Performance and User Response under Real-time Information in a Congested Traffic Corridor", *Transportation Research 25A*, 293-307, 1991.
- [33] Mahmassani, H. S., Peeta, S., "Network Performance under System Optimal and User Equilibrium Dynamic Assignments: Implications for Advanced Traveler Information Systems", *Transportation Research Record*, 1408, 83-93, 1993.
- [34] Mahmassani, H. S., Liu, Y. H., "Day-to-Day Dynamics of Commuter Behaviour under Real-Time Information", *Technical Report DTFH61-95-C-00017-F2*, Center for Transportation Research, Austin, Texas, 1997.
- [35] Mahmassani, H. S., Hu, T. Y., "Day-to-day Evolution of Network Flows under Real-time Information and Reactive Signal Control", *Transportation Research C*, Vol. 5, N°.1, 51-69, 1997.

- [36] Mannering, F. L., Kim, S. G., Barfield, W., Ng, L., “Statistical Analysis of Commuters’ Route, Mode and Departure Time Flexibility”, *Transportation Research C*, Vol. 2, N°.1, 35-47, 1994.
- [37] Mannering, F., Kim, S. G., Ng, L., Barfield, W., “Travelers Preferences for In-vehicle Information Systems: An Exploratory Analysis“, *Transportation Research C*, Vol. 3, N°.6, 339-351, 1995.
- [38] Mast, T. M., Ballas, J. A., “Diversionary Signing Content and Driver Behaviour”, *Transportation Research Report 600*, 1976.
- [39] Sparmann, J., “Benefits of Dynamic Route Guidance Systems as part of a Future Oriented City Traffic Management System”, *Proceedings of 2<sup>nd</sup> Vehicle Navigation and Information System Conference*, IEEE, 839-847, 1991
- [40] Spyridakis, J., Barfield, W., Conquest, L., Haselkorn, M., Isakson, C., “Surveying Commuter Behaviour: Designing Motorist Information System”, *Transportation Research A*, Vol. 25, N°.1, 17-30, 1991.
- [41] Tsuji, H., Kawashima, H., “Stochastic Models for Estimating the Effectiveness of a Route Guidance System”, *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Annual Conference of the International Federation of Automatic Control at Baden-Baden*, 349-356, Germany, 1984.
- [42] Vaughn, K. M., Abdel-Aty, M. A., Kitamura, R., Jovanis, P. P., Yang, H., Kroll, N. E., Post, R. B., Oppy, B., “Experimental Analysis and Modeling of Sequential Route Choice Behaviour under ATIS in a Simplistic Traffic Network”, *Transportation Research Record*, Vol. 1408, 75-82, 1993.
- [43] Wardman, M., Bonsall, P. W., Shires, J., “Stated Preference Analysis of Driver Route Choice Reaction to Variable Message Sign Information”, *Working Paper 475*, Institute for Transport Studies, University of Leeds, 1996.
- [44] Wardrop, J. G., “Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research”, *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, II, 325-378, 1952.
- [45] Yang, H., Kitamura, R., Jovanis, P., Vaughn, K. M., Abdel-Aty, M. A., “Exploration of Route Choice Behaviour with Advanced Traveler Information using Neural Network Concepts”, *Transportation* 20, 199-223, 1993.
- [46] Yang, H., Meng Qiang, “Modeling User Adoption of Advanced Traveler Information Systems: Dynamic Evolution and Stationary Equilibrium”, *Transportation Research A*, Vol. 35, 895-912, 2001.

- [47] Zhao, S. C., Marumachi, Y., Harata, N., Ohta, K., “A SP Model for Route Choice Behaviour in Responce to Travel Time Information with Marginal Error”, *World Conference on Transport Research*, Sydney, 1995.
- [48] Zhao, S., Harata, N., Ohta, K., “Assessing Driver Benefits from Information Provision: a Logit Model Incorporating Perception Band of Travel Time Information”, *Proceedings of 24th PTRC European Transport Forum*, Seminar E, Part 1, Brunel University, England, 1996.

## 2. Modelli

### 2.1. Modellazione dell'informazione in Aimsun

#### 2.1.1. Inquadramento

Scopo precipuo del presente studio è quello di indagare ed esaminare criticamente le modalità adottate dai moderni e più avanzati softwares di simulazione dei sistemi di trasporto, per implementare nell'ambiente virtuale di modellazione la disseminazione di informazione al fine di valutarne l'impatto sulle prestazioni complessive del sistema.

Lo studio preliminare delle letterature, di cui ai capitoli precedenti, ha orientato l'attenzione di chi scrive in particolare sul software *AIMSUN*, prodotto dalla società catalana *TSS - Transport Simulation Systems* -, che si distingue nel panorama dei softwares di simulazione trasportistica attualmente disponibili in commercio, per completezza dell'impianto procedurale complessivo e rigore nella rispondenza con i modelli matematici di riferimento sviluppati dalla più recente ricerca di settore.

L'obiettivo preposto, presupponendo la necessità di considerare la risposta degli utenti del sistema di trasporto all'informazione somministrata e dunque di modellare esplicitamente tutti i fenomeni che ad essa concorrono (i.e. meccanismi di scelta dei percorsi, comportamenti di guida), ha naturalmente condizionato la scelta della scala di dettaglio fra quelle classicamente consolidate nella Teoria della Simulazione dei Sistemi di Trasporto:

- *Microsimulazione*;
- *Mesosimulazione*;
- *Macrosimulazione*;

scelta coerentemente ricaduta sulla prima delle tre, determinando l'adozione del solo Modulo di Microsimulazione fra i tre anzidetti previsti in dotazione al software Aimsun.

L'attento esame di questo strumento di simulazione ha permesso di riconoscere essenzialmente due modalità più o meno esplicite di modellazione del funzionamento di sistemi informativi, che ricorrono rispettivamente a:

- a. procedure di assegnazione della domanda di trasporto;
- b. procedure di controllo dei flussi veicolari; articolate in opportune *Policies* e *Strategies* precisate entro più ampi Piani di Controllo del Traffico - *Master Control Plans* -.

Tali approcci alternativi corrispondono a due diversi paradigmi concettuali:

- funzionamento del sistema;
- gestione del sistema;

e conseguentemente ad altrettanti livelli nell'elaborazione del modello complessivo del sistema di trasporto, ovvero ai due sottomodelli di seguito riportati:

- a. Modelli di Assegnazione (*Assignment Models*);
- b. Modelli di Gestione dei Flussi (*Traffic Management Models*).

Con ciò s'intende che in un caso (a.), la riproduzione degli effetti della simulazione è affidata a modelli essenziali al funzionamento stesso del sistema, 'ingranaggi' primari dell'organismo del modello complessivo; nell'altro (b.), invece, il medesimo scopo è perseguito servendosi di procedure associate alla gestione del sistema, che non intervengono direttamente nel meccanismo fondamentale di funzionamento del modello.

Per quanto concerne il primo dei due ambiti, la simulazione degli effetti dell'informazione può ritenersi implicitamente racchiusa nella stessa procedura di assegnazione, qualora si adottino alcuni accorgimenti nella sua strutturazione, pur muovendosi entro i confini ristretti imposti dalle procedure e dagli algoritmi implementati nell'ambiente di simulazione Aimsun. A tal fine è utile fornire fin d'ora un quadro sintetico che riassume schematicamente le diverse procedure di assegnazione e loro possibili combinazioni. Il processo di assegnazione è infatti scandito in successivi passi temporali<sup>1</sup> - *Simulation Cycles* - di misurazione dei parametri di costo restituiti dalla simulazione e conseguente

---

<sup>1</sup> Il processo di simulazione complessivo in ambiente Aimsun prevede quattro scale temporali parallele che scandiscono altrettante procedure, rispettivamente: la prima, più piccola, suddivisa in *Simulation Steps* (valore di default: 0.75 sec), regola l'aggiornamento della posizione dei singoli veicoli, ad essa si conformano, dunque, i modelli di comportamento dei guidatori (*Vehicle Behavioural Models*); la seconda più grande, suddivisa in *Simulation Cycles* (valore di default: 15 min), scandisce invece l'aggiornamento dei parametri di performance del sistema (i.e. funzioni di costo), e delle probabilità di scelta dei diversi percorsi ad essi associate (qualora si sia preventivamente selezionato un modello di scelta discreta del percorso di tipo probabilistico), e dunque governa gli algoritmi di misurazione dei parametri di performance ed i modelli di scelta dei percorsi (*Route Choice Models*); la terza suddivisa in *Statistics Intervals* (che possono o meno avere la medesima estensione dei simulation cycles, a discrezione del programmatore), regola la raccolta ed eventuale memorizzazione in appositi database degli outputs forniti dal simulatore (*data gathering and storage*); la quarta suddivisa in *Detection Intervals* (anch'essi coincidenti o meno con i simulation cycles, a discrezione del programmatore), scandisce invece la tempistica di misurazione di prescelti parametri di performance attraverso detectors distribuiti lungo la rete, e dunque governa i modelli di detection (*Detection Models*).

ricalcolo delle percentuali di assegnazione ai diversi percorsi alternativi che collegano le singole coppie O/D. Tale schema procedurale presuppone la selezione di un modello di scelta discreta di tipo probabilistico fra quelli predisposti nell'apposito modulo software, poiché solo in questo caso il simulatore 'aggancia' la scelta dei percorsi all'aggiornamento dei costi di percorso.

Più precisamente, al termine di ogni simulation cycle, il modulo di assegnazione ricalcola, sulla scorta dei valori medi dei costi di percorso ottenuti nell'ultimo passo, le percentuali di assegnazione ai diversi percorsi da applicare ai veicoli in procinto di immettersi nel sistema nel passo temporale immediatamente successivo. Questa procedura implicitamente modella l'aggiornamento della nozione che gli utenti hanno del livello di servizio del sistema quando si apprestano ad intraprendere il proprio spostamento ( imputabile anche, a parere di chi scrive alla presenza di sistemi informativi), e con essa l'influenza dell'informazione sulle scelte di tipo *preventivo*. Il fatto che il modello di scelta sia probabilistico e non deterministico può essere reinquadrato nella prospettiva della riproduzione degli effetti dell'informazione, come espediente per modellare il *grado di compliance* dell'utente all'informazione (da combinarsi poi con le percentuali eventualmente preimpostate di distribuzione della domanda fra i tre modi di assegnazione contemplati dal simulatore, di cui si avrà modo di dire in seguito).

Nell'editor del modello di scelta del percorso è inoltre predisposta la possibilità di selezionare l'opzione di *reindirizzamento dinamico* dei veicoli - *Dynamic Rerouting* -, prevista per le sole funzioni di scelta discreta di tipo probabilistico. Questa opzione consente di applicare l'aggiornamento delle probabilità di scelta non solo ai veicoli in ingresso ma anche a quelli che si trovano già all'interno del sistema. Nel dettaglio: all'inizio di ogni simulation cycle, per una prestabilita aliquota di veicoli, sulla scorta dei costi di percorso ottenuti al termine del passo di simulazione precedente, viene aggiornata la probabilità di scelta dei diversi percorsi che dalla sezione correntemente occupata dal veicolo si diramano verso il rispettivo centroide di destinazione. Questa procedura riproduce la modifica della scelta del percorso durante lo spostamento sulla scorta di un'aggiornata cognizione delle condizioni di funzionamento del sistema, riconducibile alla presenza di un sistema informativo in tempo reale che somministri notizie ad una parte dell'utenza della rete di trasporto durante l'intera durata del viaggio. Come tale può essere riguardata come una modalità di modellazione dell'influenza dell'informazione sulle scelte di tipo *adattivo*.

Quanto invece al secondo approccio, la riproduzione degli effetti dell'informazione anziché essere 'nidificata' in uno dei sottomodelli indispensabili al funzionamento stesso del modello complessivo del sistema di trasporto (i.e. il Modello di Assegnazione), può essere invece affidata ad una procedura esplicitamente dedicata all'implementazione modellistica di piani di gestione del traffico (*Traffic Management Procedure*), che verrà esaminata dettagliatamente nel paragrafo seguente.

## **2.1.2. Procedure di gestione dei flussi -*Traffic Management*-**

Coerentemente all'architettura generale del simulatore, strutturata secondo moduli gerarchicamente concepiti, l'implementazione dei piani di gestione del traffico, predisposta all'interno della sezione *Traffic Management*, è articolata in Strategie - *Strategies* - formulate per la risoluzione di determinati Problemi - *Problems* - (enunciati a fini meramente illustrativi), e composte da una o più Politiche - *Policies* -, a loro volta organizzate in Azioni - *Actions* -.

Tale concezione rispecchia prevalentemente la prospettiva del gestore della rete e tende a riprodurre la stessa gerarchia organizzativa ed esecutiva riscontrata nelle applicazioni reali, che in taluni casi non rari (e.g. reti tanto estese da valicare i confini territoriali di competenza), può prevedere il concorso di più autorità su ambedue i livelli di coordinamento ed operativo appena menzionati:

- Autorità Organizzativa/Amministrativa (*Owner Authority*);
- Autorità Esecutiva (*Operating Authority*).

Così, nell'ambiente di simulazione Aimsun, a ciascuna Strategia - *Strategy* - è associata una *Owner Authority*, e ad ogni Politica - *Policy* - la relativa *Operating Authority* responsabile dell'attuazione dei diversi interventi - *Actions* - che compongono la *Policy*. La combinazione delle diverse Strategie (e dunque delle rispettive autorità responsabili), avviene a livello di Scenario, mentre la selezione delle Politiche e con esse delle autorità incaricate del loro espletamento, avviene a livello di Experiment. Con questo artificio il simulatore consente di riprodurre diverse configurazioni operative alternative.

L'attivazione delle *Policy*, e dunque delle azioni dalla stessa contemplate, può avvenire secondo tre modalità:

- a. all'avvio della simulazione e per l'intera sua durata (*Always*);
- b. ad un istante e per una durata prestabiliti (*Time*);
- c. al superamento di prefissate soglie d'ingresso (*Triggers*);

che corrispondono ad altrettante scelte operative da assumere coerentemente alle azioni che compongono la Policy.

A seconda del tipo di Azione, è inoltre possibile delimitare, in maniera più o meno raffinata, la platea di utenti cui la stessa è indirizzata, operando su alcuni criteri di scriminatura:

- classe di veicolo (*vehicle class*);
- origine e/o destinazione dello spostamento (*origin centroid & destination centroid*);
- grado di osservanza (*compliance level percentage*).

Ad ogni Azione è poi possibile associare una determinata stringa di testo da visualizzare, alla sua attivazione, sullo schermo di dispositivi VMS - *Variable Message Signs* - appositamente predisposti lungo le sezioni stradali di interesse ai fini dell'efficace disseminazione dell'informazione correlata all'azione in esame.

La procedura fin qui illustrata, sebbene più specificamente concepita per modellare gli effetti di ipotetiche strategie di controllo dei flussi all'occorrenza di determinati eventi, tanto prevedibili legati alla gestione dell'infrastruttura di trasporto (i.e. lavori di manutenzione o riprogrammazione del sistema di regolazione semaforica, riproducibili rispettivamente attraverso le azioni *Lane Closure* e *Control Plan Change*), quanto imprevedibili<sup>2</sup> (i.e. incidenti, appositamente modellabili tramite l'azione *Section Incident*), può essere a prima vista reinquadrata nella prospettiva dell'implementazione di sistemi informativi. La possibilità, infatti, di associare a ciascuna Action una stringa di testo restituita da oggetti che modellano pannelli a messaggio variabile, sembra suggerire tale possibilità. Ad un esame più approfondito ci si rende tuttavia conto della artificiosità di tale approccio.

Il microsimulatore non dispone infatti di un modello capace di riprodurre ex-post la reazione dell'utenza alla visualizzazione della informazione sul pannello, bensì consente di

---

<sup>2</sup> A differenza dei simulatori ad Agenti, nei softwares commerciali appositamente progettati per la Simulazione dei Sistemi di Trasporto, caratterizzati dai limiti imposti da una struttura e da procedure rigidamente prestabiliti, il concetto di imprevedibilità della risposta è falsato, o meglio limitato al solo aspetto della aleatorietà connaturata nei fenomeni trasportistici e riprodotto in ambiente artificiale attraverso la implementazione di algoritmi di tipo probabilistico. La configurazione del modello è invece interamente prestabilita dall'utente del software che ne definisce i diversi aspetti attraverso l'impostazione dei valori di appositi parametri. La simulazione consiste in questo caso nella mera riproduzione virtuale di contesti di funzionamento prestabiliti, imprevedibile nella misura in cui il gestore del modello non è in grado di prefigurare i risultati proprio per la aleatorietà di cui si è detto.

impostare ex-ante, operando sui parametri anzidetti, una possibile configurazione di risposta ad un dato evento (reso in ambiente virtuale attraverso la Action), limitandosi a riportare solo marginalmente la presenza dell'informazione associata all'evento stesso. Di fatto non viene replicato il *meccanismo di interazione* fra utenti della rete ed informazione, restando la simulazione del comportamento da essi attuato del tutto sganciata dalla implementazione della somministrazione dell'informazione.

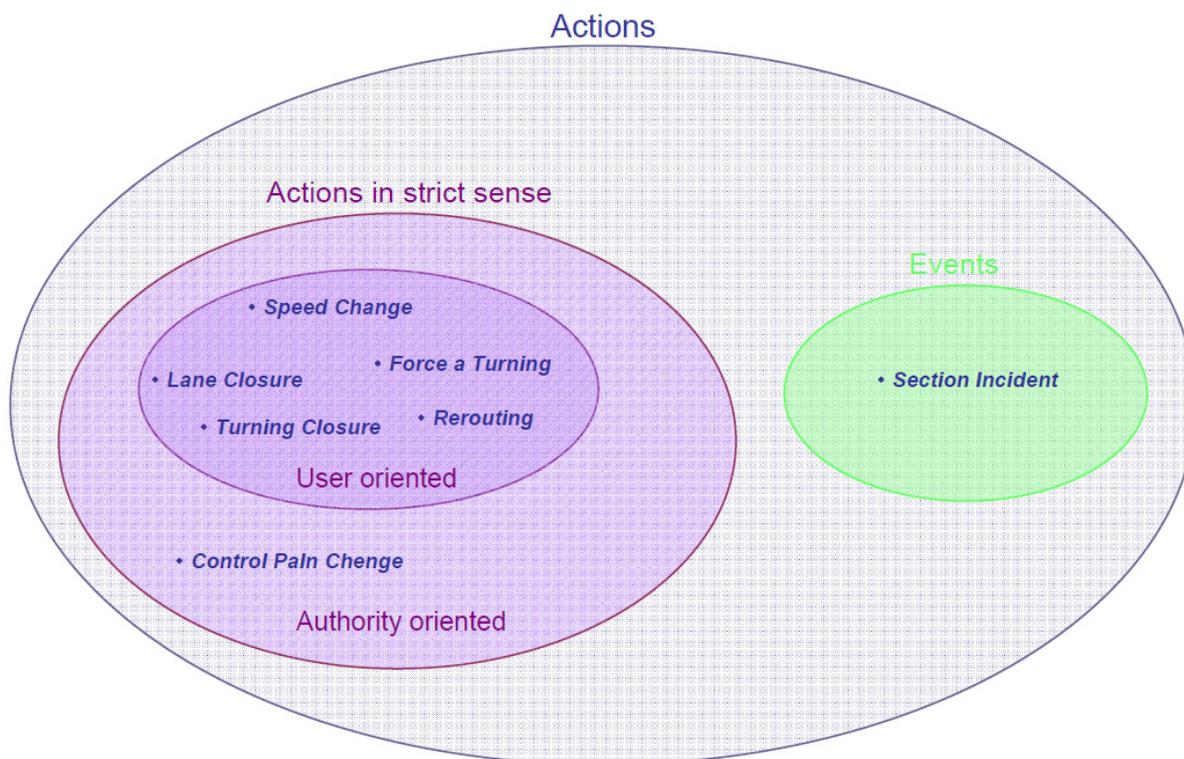
In breve, preordinata in questa maniera (entro i limiti dell'aleatorietà dei modelli e delle procedure che concorrono a determinare lo scenario di funzionamento del sistema nel suo complesso) la reazione degli utenti ad un dato evento, la simulazione si offre quale strumento di valutazione della performance del sistema in una condizione prestabilita, relegando l'implementazione dell'informazione attraverso pannelli VMS distribuiti lungo la rete, ad una mera 'funzione scenografica', che ha pur un suo valore nella promozione degli strumenti di simulazione presso la committenza nell'ambito della pratica professionale, ma riveste, invece, una funzione del tutto secondaria ai fini d'indagine scientifica che muovono il presente studio.

Pur mantenendo questa consapevolezza, si ravvisano però i margini entro i quali forzare la procedura anzidetta verso una simulazione esplicita più verosimile del sistema informativo. A tal fine bisogna avere chiari lo strumento di cui si dispone (in assenza come detto di un modello appositamente formulato per riprodurre la reazione degli utenti all'informazione), e l'obiettivo che ci si prepone, ovvero riprodurre l'effetto dell'informazione sugli utenti, il che significa determinare l'azione da essi posta in essere in risposta alla notizia acquisita riguardo lo stato della rete. Occorre dunque da un lato esaminare attentamente le Actions predisposte nel modulo software dedicato, dall'altro legare la generazione dell'informazione al funzionamento della rete.

Le Actions sono concepite per essere combinate all'interno della Policy al fine di riprodurre un determinato effetto sull'utenza, localizzato nello spazio e nel tempo. Coerentemente a questa concezione alcune *Actions* traducono un *evento*, nell'accezione più stringente del termine, come tale del tutto casuale ed indipendente dalla volontà degli attori che nel sistema interagiscono (utenti e gestore), altre invece riproducono un'*azione* vera e propria, come tale legata alla volontà degli attori, privilegiando, a seconda della tipologia, più la prospettiva del gestore o quella dell'utente. Questa distinzione, ravvisata da chi scrive, non è banale ed è strumentale all'opportuno reinquadramento della funzione assolta dall'informazione associata ad ogni azione; essa, altresì, non è da intendersi rigida e definitiva, soprattutto per quanto riguarda il punto di vista che l'azione stessa sottende

(utente o gestore), prestandosi di volta in volta ad una diversa interpretazione a seconda dell'effetto che s'intende tramite essa simulare. L'azione Lane Closure, ad esempio, può in linea generale intendersi come espressione della prospettiva del gestore, e come tale utilizzata per modellare gli effetti di una sua scelta (limitazione della capacità o soppressione temporanea o permanente di determinati archi della rete, parziali o totali chiusure al traffico per installazione di cantieri stradali, preclusioni al transito di veicoli di determinate categorie per limiti di sagoma), ma può anche essere utilizzata, in un'accezione più elastica, per modellare la decisione degli utenti di non servirsi più di un determinato ramo della rete.

Così a parere di chi scrive le Azioni contemplate nel modulo *Traffic Management* del microsimulatore Aimsun, possono essere classificate secondo il diagramma riportato in Fig. 2.1.



**Fig. 2.1 - Proposta di tassonomia delle Azioni predisposte nel modulo *Traffic Management* del microsimulatore Aimsun.**

Le actions contemplate dal modulo *Traffic Management* del microsimulatore Aimsun traducono opportune operazioni di governo dei flussi attivate in determinate circostanze 'tipo'. La figura propone una riclassificazione strumentale al loro inquadramento nell'ottica dell'interazione informazione/utenza, riconducendole alle prospettive dei due attori (utente e gestore), che interagiscono nel sistema di trasporto.

Tale schematizzazione suggerisce come alcune azioni possano riguardarsi nella duplice prospettiva del gestore e dell'utenza.

Scelte dunque quelle azioni che meglio si prestano a rappresentare la prospettiva utente e combinate opportunamente all'interno della Policy, è dunque possibile rendere, seppur come già detto in maniera prefissata, un'opportuna reazione ad una data informazione. Questo modo di procedere ribalta la prospettiva adottata nella concezione originaria della procedura di Traffic Management. Attraverso il *compliance level* è possibile, poi, stabilire la percentuale di utenti che osserveranno la singola Action.

Quanto alla necessità di correlare automaticamente l'informazione somministrata al funzionamento del modello ovvero alla performance del sistema, è possibile adottare alcuni stratagemmi. Va preliminarmente precisato che tale correlazione riguarda esclusivamente la tempistica di generazione dell'informazione e non la formulazione del contenuto della stessa<sup>3</sup>.

Come già accennato, la visualizzazione sui pannelli VMS delle stringhe informative è realizzata all'avvio delle singole *Actions* cui le stesse sono rispettivamente associate. A sua volta l'attivazione di ciascuna Action può avvenire secondo una delle tre modalità alternative già enunciate, predisposte al livello della Policy che la racchiude. Fra queste, l'unica che consente di correlare la tempistica di generazione dell'informazione all'evoluzione delle condizioni di funzionamento del sistema è quella che si avvale di prefissate soglie di innesco - *Triggers* -. Essa richiede la definizione per ciascuna *Policy* di due triggers rispettivamente di attivazione e disattivazione delle azioni che compongono la Policy stessa. Ognuno di questi consiste in una condizione o combinazione di più condizioni ciascuna riferita ad un determinato elemento della rete, selezionato dal grafo fra:

- a. archi stradali;
- b. detectors;

ed espressa in termini di una disequazione nella quale intervengono un attributo dell'elemento (ovvero una grandezza descrittiva dello stato dell'elemento), ed il rispettivo

---

<sup>3</sup> Il compito di correlare il contenuto dell'informazione allo scenario di funzionamento del sistema è implicitamente assolto dallo stesso modellatore che deve selezionare le azioni che meglio si prestano a cogliere la risposta attesa del sistema reale in relazione alle sue caratteristiche e degli utenti, e formulare un contenuto coerente con gli effetti della rispettiva azione. Appare evidente l'approssimazione di questo processo essendo l'accuratezza del contenuto informativo, in termini di predittività e congruenza (Cfr.§1.3.2.2 Caratteristiche dell'informazione somministrata pag.34), affidata alla sensibilità del modellatore.

valore soglia preliminarmente impostato dall'utente del software<sup>4</sup>. Il simultaneo verificarsi delle condizioni che definiscono il *Trigger* ne determina l'innesco, e dunque l'avvio o l'arresto della *Policy* da esso governata, a seconda che si tratti di un trigger di attivazione o disattivazione.

Coerentemente alla tipologia di elemento cui si riferiscono i diversi attributi, è inoltre possibile stabilire la cadenza con la quale il software procede alla valutazione dell'occorrenza delle diverse condizioni che definiscono ciascun trigger, scegliendo alternativamente fra tre scale temporali:

1. *Simulation Step*;
2. *Statistical Interval*;
3. *Detection Interval*.

Corrispondentemente, il valore dell'attributo da confrontare col relativo valore soglia è quello desunto dall'elaborazione statistica, secondo la prescelta scansione temporale, delle misure ricavate dalla simulazione, dunque rispettivamente aggregato in ciascun passo di simulazione - *Simulation Step* - (indipendentemente dal tipo di elemento di pertinenza dell'attributo), o nei successivi intervalli di raccolta dati *Statistical Intervals* o *Detection Intervals*, a seconda che si riferisca rispettivamente ad una arco o ad un detector.

In definitiva nell'ambito della procedura di *Traffic Management* implementata in ambiente Aimsun, fra le modalità di attivazione della visualizzazione di messaggi informativi su predisposti VMSs, la più efficace ai fini di riprodurre l'interazione informazione/utente è quella regolata da condizioni triggers governate da parametri di performance del sistema. Essa infatti consente di correlare la generazione dell'informazione al funzionamento del sistema di trasporto modellato e dunque, indirettamente, al comportamento degli utenti del sistema. In particolare, poiché i sistemi di rilevamento che supportano sistemi informativi di gestione del traffico a distanza, sono ad oggi ancora prevalentemente *puntuali* (spirali, piastre, detectors, videocamere), la scelta di criteri di innesco basati su misure restituite da detectors in ciascun successivo detection interval, appare la più idonea a riprodurre le condizioni più comunemente riscontrate nella realtà applicativa. Per contro, la scelta di

---

<sup>4</sup> Il valore soglia può essere precisato attraverso la definizione di un'apposita *Variable* (sebbene questa denominazione può indurre una certa confusione), a livello di Scenario o di singolo Experiment. Questa soluzione consente di modificare unitariamente, con un solo passaggio operativo, il valore d'innesco di più actions, senza dover singolarmente reimpostarlo per ciascuna di esse.

modellare in ambiente virtuale la disseminazione dell'informazione attraverso *VMS* attivati da condizioni triggers governate da parametri di performance relativi ad interi archi stradali, sottintende implicitamente l'installazione nell'infrastruttura reale di sistemi di rilevamento di tipo *continuo*. La tecnologia attuale consente, non più solo in linea teorica, di realizzare sistemi di questo tipo attraverso soluzioni, basate su tecnologia wireless, che sfruttando l'interazione veicolo-infrastruttura, sono capaci di generare flussi informativi che in un verso (veicolo → infrastruttura), assolvono per l'appunto alla funzione di monitoraggio in cui il compito di detection è espletato dal veicolo stesso (*floating car*), dotato di una strumentazione di bordo ormai comunemente reperibile (computer di bordo o anche smartphones); nel verso opposto (infrastruttura → veicolo), assolvono invece alla funzione di infomobilità e controllo di guida. Ciononostante le applicazioni concrete, specialmente nella realtà nazionale Italiana, sono limitate a pochi programmi pilota.

## **2.1.3 Assegnazione della Domanda di Trasporto - *Traffic Assignment* -**

### **2.1.3.1. Inquadramento**

A differenza dei programmi di simulazione ad agenti, che, progettati per le applicazioni più disparate, mancano da un lato di una specifica modellazione dei fenomeni tipicamente trasportistici, demandata di volta in volta al tecnico, ma consentono dall'altro di simulare con estrema efficacia la risposta spontanea degli agenti ad un evento secondo un dato sistema di regole; i moderni software di simulazione specificatamente dedicati alla modellazione delle reti di trasporto prevedono modelli e procedure che riproducono rigorosamente i diversi fattori che intervengono nel funzionamento di una rete di trasporto (dall'interazione tra i veicoli lungo la rete, alle modalità di scelta dei percorsi), ma proprio per la loro struttura rigida, costruita sui fondamenti matematici della teoria dei sistemi di trasporto, non sono in grado di cogliere l'estemporaneità della risposta dell'utenza stradale ad un evento, in generale, ed all'informazione in tempo reale sullo stato della rete, in particolare.

Nel caso del software *Aimsun* oggetto del presente studio, il comportamento attuato dagli utenti della rete stradale all'occorrenza di un dato evento può essere stabilito in maniera preordinata, come ampiamente discusso nei paragrafi precedenti, attraverso l'impostazione di opportune *Policies* e governato tramite un parametro di compliance - *Compliance Level Percentage* - che definisce il grado di osservanza dell'utenza stradale alle indicazioni imposte dalla policy, rigidamente fissato dal programmatore/gestore. In questa procedura è evidente come il carattere preordinato delle policies, che rispecchia la prospettiva del gestore più che dell'utenza della rete, non consenta di cogliere tramite la simulazione il reale comportamento attuato dagli utenti stradali nella sua eterogeneità ed aleatorietà, demandando tale funzione quasi esclusivamente al parametro di compliance, la cui calibrazione è, peraltro, ancora oggetto di dibattito controverso nella letteratura di settore. Per di più, la modellazione esplicita di dispositivi di infomobilità, esclusivamente puntuali quali VMS - *Variable Message Signs* - pur contemplata dal software, assume una funzione meramente rappresentativa che scaturisce dal seguente paradigma operativo: i veicoli vengono forzati, in accordo al preimpostato grado di compliance, a seguire le indicazioni previste dalla policy; a quest'ultima è possibile associare, poi, una stringa informativa visualizzata sul pannello a messaggio variabile a partire dall'istante di attivazione della

policy stessa. In questo modo il comportamento dell'utenza stradale resta del tutto sganciato dalla somministrazione dell'informazione tramite dispositivi *VMS* che assolvono, dunque, una funzione meramente scenografica.

In questo tipo di software l'effetto prodotto dalla diffusione dell'informazione sullo stato della rete può essere tuttavia introdotto, seppur in maniera implicita, attraverso la selezione oculata del meccanismo di scelta del percorso. A parere di chi scrive una simile soluzione risulta più efficace in quanto maggiormente svincolata dalla soggettività dell'utente del software e radicata, invece, nel meccanismo di funzionamento stesso del modello, permettendo, attraverso l'aleatorietà propria delle procedure di assegnazione, di cogliere l'estemporaneità ed eterogeneità della reazione dell'utenza all'informazione. Un passaggio fondamentale nella valutazione della capacità di un software di simulazione del traffico di riprodurre gli effetti di un sistema di informazione all'utenza stradale in tempo reale (sia esso puntuale o diffuso), consiste dunque nello studio preliminare delle diverse procedure di assegnazione della domanda di spostamento alla rete di trasporto. In questo solco, il presente studio si propone, per l'appunto di indagare le effettive potenzialità delle procedure anzidette ai fini della riproduzione dell'interazione informazione-utenza.

La trattazione esaustiva dei modelli di assegnazione, non può prescindere dall'esame dei fenomeni che concorrono alla formulazione delle scelte di viaggio degli utenti di un sistema di trasporto, di cui si è avuto modo di discutere ampiamente nel Capitolo 1.

In generale un utente che si appresti a compiere uno spostamento (*journey* o *trip*), da una data origine alla destinazione d'interesse, ha la possibilità di optare fra diverse *strategie di viaggio* (*routing strategy*), o *itinerari*, ognuno dei quali può o meno prevedere soluzioni e adattamenti alternativi, *percorsi* (*routes*), da adottare in relazione alle condizioni riscontrate durante il viaggio stesso, per lo più in corrispondenza di particolari diramazioni.

Il meccanismo complessivo di scelta degli itinerari e dei percorsi può essere riprodotto dall'analista attraverso appositi modelli che, sulla scorta di precise ipotesi circa il comportamento degli utenti, sono in grado di restituire, con buona approssimazione, i risultati delle scelte da questi operate nella realtà.

Col termine *Traffic Assignment* si indica il procedimento di assegnazione della domanda di trasporto, generalmente definita in termini di *Matrici Origine/Destinazione*, ai diversi percorsi di una rete di trasporto, ovvero in definitiva il calcolo dei flussi associati ai singoli archi stradali ed ai vari percorsi.

Le specifiche della procedura di assegnazione sono dettate dalle ipotesi sui criteri di scelta cui si conforma il comportamento degli utenti stradali.

Come noto dalla teoria, i criteri tradizionalmente riconosciuti in letteratura si riconducono essenzialmente a due approcci alternativi:

- Ottimo di Sistema (*System Optimum -SO-*);
- Equilibrio Utente (*User Equilibrium -UE-*).

Il primo persegue la minimizzazione del tempo totale di percorrenza della rete - *Total System Travel Time* - e traduce la prospettiva del gestore della rete di trasporto che mira al raggiungimento della configurazione ottimale per il sistema nel suo complesso, indipendentemente dalle preferenze individuali degli utenti. Questo criterio non viene contemplato dal Software di simulazione in esame.

Il secondo, al contrario, esprime il punto di vista degli utenti della rete di trasporto, che scelgono il percorso tentando di minimizzare il proprio tempo di viaggio sulla scorta della propria esperienza e della percezione individuale (circostanziata), sullo stato della rete. Tale criterio si richiama al *Primo Principio di Wardrop*, che stabilisce quanto segue:

*“I tempi di percorrenza lungo i percorsi effettivamente utilizzati sono uguali fra loro e minori di quello che il singolo veicolo sperimenterebbe lungo un qualsiasi percorso non utilizzato.”*

I modelli di assegnazione fondati su tale principio sono noti come *User Equilibrium Models*, in contrapposizione ai *System Optimum Models*.

Le analisi strategiche dei sistemi di trasporto, condotte tipicamente in campo statico e su scala macroscopica, si avvalgono di modelli di assegnazione - *Static Traffic Assignment Models* - basati quest'ultima formulazione.

L'avvento dei sistemi *ITS - Intelligent Transportation Systems* - in generale e, più propriamente, degli *ATMS - Advanced Traffic Management Systems* -, e degli *ATIS - Advanced Traveller Information Systems* -, quali applicazioni *ITS* di maggior rilevanza, ha posto l'esigenza di condurre le simulazioni a livello microscopico ed, in quest'ambito, elaborare modelli in grado di cogliere le variazioni dei flussi veicolari al trascorrere del tempo, ovvero *modelli dinamici* di assegnazione capaci di descrivere l'evoluzione temporale della configurazione spaziale dei flussi di traffico lungo la rete di trasporto - *flow pattern* -.

La variazione dei flussi di arco e di percorso col tempo è dovuta a due fenomeni spesso concomitanti:

- dipendenza della domanda di trasporto dal tempo - *Variable Demand* -;
- reindirizzamento dinamico dei veicoli - *Dynamic Rerouting* -;

ambidue legati ai sistemi ed alle strategie d'informazione all'utenza stradale e non sempre facilmente scindibili.

All'orizzonte della Teoria dei Sistemi di Trasporto è venuto dunque delineandosi, quale estensione del Problema di Assegnazione Statica della Domanda di Trasporto - *Static Traffic Assignment Problem* - il suo equivalente dinamico: *Dynamic Traffic Assignment Problem* - *DTA* -<sup>5</sup>.

Data la formulazione in fin dei conti assai recente della Teoria dei Sistemi di Trasporto ed il suo incipiente sviluppo associato alla concomitante evoluzione tecnologica di settore, la terminologia tecnica adottata è spesso suscettibile di interpretazioni non univoche. Così, nell'ambito della formalizzazione del problema di assegnazione proposta in ambiente Aimsun, con il termine *Dynamic Traffic Assignment* s'intende meramente l'assegnazione dei flussi veicolari ai diversi percorsi in condizioni dinamiche (cioè tenendo conto della dipendenza degli stessi dal parametro tempo), senza presupporre necessariamente il rispetto delle condizioni di equilibrio, richiesto invece nell'equivalente statico.

Affinché, anche in condizioni dinamiche, la procedura di assegnazione garantisca il conseguimento di una configurazione di equilibrio utente, le ipotesi circa il comportamento attuato dall'utenza nella scelta del percorso devono essere coerenti con l'estensione in campo dinamico del *Primo Principio di Wardrop*<sup>6</sup>:

*“Se, per ciascuna coppia origine-destinazione O/D, in ogni istante di tempo, i tempi di viaggio sperimentati dagli utenti sono tutti uguali fra loro e minimi, il sistema si trova in uno stato di Equilibrio Utente Dinamico - Dynamic User Equilibrium.”*

Che introduce, per l'appunto, la nozione di *Dynamic User Equilibrium* - *DUE*.

In definitiva il microsimulatore di Aimsun contempla due procedure di assegnazione della domanda di trasporto:

- *Dynamic Traffic Assignment* - *DTA*;
- *Dynamic User Equilibrium* - *DUE*.

oggetto della trattazione affrontata nei paragrafi seguenti.

---

<sup>5</sup> Cfr. Bibliografia: Mahmassani H.S., [23], pag.131.

<sup>6</sup> Cfr. Bibliografia: Friesz T. L. et al., [15], pag.131; Ran B. et al., [32], pag.132; Smith M. J. et al., [35], pag.132.

### 2.1.3.2 Dynamic User Equilibrium - *DUE* -

Come già accennato, affinché il processo di assegnazione dinamica della domanda di trasporto possa connotarsi quale *DUE*, la modalità di scelta del percorso attuata dagli utenti della rete stradale deve essere coerente con la formulazione in campo dinamico del *Primo Principio di Wardrop* enunciata da Ran e Boyce.

Questa formulazione è suscettibile di due interpretazioni a seconda che la si legga nella prospettiva dell'integrazione o meno con sistemi *ATIS*:

- la prima scaturisce dall'inquadramento nello scenario ipotetico in cui siano predisposti sistemi *ATIS* e *ATMS* in grado di fornire ai viaggiatori informazioni e previsioni attendibili sulle condizioni del traffico, permettendo loro di modificare il proprio comportamento coerentemente all'informazione di cui dispongono;
- la seconda discende dalla sua rilettura quale formalizzazione di un processo di apprendimento attuato "giorno dopo giorno" - *day to day learning process* - secondo il quale gli utenti modificano il proprio comportamento in accordo a congetture sulle condizioni di traffico formulate sulla scorta dell'esperienza pregressa, fin quando gli stessi ritengano di non poter conseguire ulteriori riduzioni dei tempi di viaggio.

Quest'ultima interpretazione ha suggerito l'implementazione nel Microsimulatore di Aimsun di una procedura numerica iterativa tesa ad imitare il processo di apprendimento *giorno-dopo-giorno*, fornendo una soluzione che può essere dunque intesa come *DUE*<sup>7</sup>.

#### 2.1.3.2.1 Approccio euristico all'assegnazione *DUE*

Il Microsimulatore di Aimsun consente di lanciare la simulazione un numero  $N$  di volte prestabilito dall'utente, di volta in volta con un *Random Seed* differente (per tenere conto dell'insorgere di fenomeni aleatori), ottenendo così  $N$  *Replications* del medesimo *Scenario*. In ogni replication,  $j=1..N$ , la simulazione procede per intervalli successivi di assegnazione della domanda,  $l=1..L$  (di ampiezza  $\Delta t$ ), in ciascuno dei quali vengono aggiornati i tempi di viaggio, e le percentuali di assegnazione della domanda ai vari percorsi coerentemente ricalcolate attraverso la preselezionata *Funzione di Scelta del Percorso* (*Route Choice Function -RCF-*). Per ciascun intervallo  $l$  di simulazione della

---

<sup>7</sup> Cfr. Bibliografia: Barcelò J. et al., [6], pag. 130; Liu H. X. et al., [21], pag. 131.

generica replication  $j$ , il software memorizza il costo  $c_a^{j,l}(x_a)$  (i.e. tempo di percorrenza - *travel time*-), associato a ciascun arco,  $a$ , della rete.

Il metodo euristico in esame sfrutta i valori dei costi di arco ottenuti nelle precedenti replications dello stesso scenario,  $m=1..j-1$ , per calcolare quelli attesi nell'iterazione successiva a quella corrente della replication  $j$  in corso di simulazione.

Per maggiore chiarezza, si supponga che il software stia eseguendo il passo  $l$ -esimo di simulazione della  $j$ -esima replication, a questo punto dispone, per ciascun arco della rete, dei costi ottenuti negli intervalli successivi a quello corrente ( $l+i$  con  $i=1..L-l$ ), nelle replications già simulate,  $m=1..j-1$ . Per ciascun passo successivo a quello corrente, dunque, il simulatore calcola la media sulle precedenti replications dei costi di arco in quel passo:

$$\bar{c}_a^{j,l+i} = \frac{1}{j-1} \sum_{m=1}^{j-1} c_a^{m,l+i}(x_a) \quad , \quad i=1..L-l \quad (2.1)$$

Quindi calcola il valore previsto del costo d'arco nel passo successivo della replication corrente - *Forecasted Link Cost* - come combinazione lineare dei valori dei costi ottenuti nello stesso arco in tutti i passi successivi mediati sulle precedenti replications:

$$\tilde{c}_a^{j,l+1} = \sum_{i=1}^{L-l} \alpha_i \bar{c}_a^{j,l+i} \quad (2.2.1)$$

ove:

$$\sum_{i=1}^{L-l} \alpha_i = 1 \quad (2.2.2)$$

$$\alpha_i \geq 1 \quad , \quad \forall i=1..L-l$$

sono i coefficienti o pesi della combinazione lineare - *Weighting Factors* -.

Servendosi poi delle *Relazioni di Incidenza Archi-Percorsi*, dai costi di arco il simulatore ricava quelli di percorso attesi - *Forecasted Path Costs* - come di seguito:

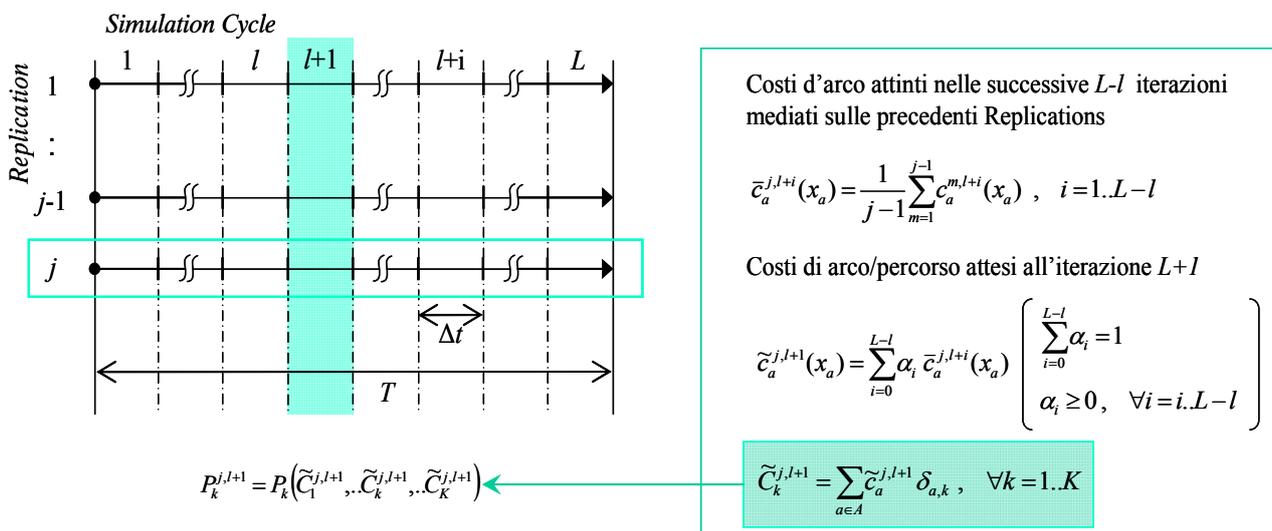
$$\tilde{C}_k^{j,l+1} = \sum_{a \in A} \tilde{c}_a^{j,l+1} \delta_{a,k} \quad (2.3)$$

ove con  $\delta_{a,k}$  sono state denotate le componenti della matrice booleana di incidenza archi-percorsi. Questi ultimi figurano, a loro volta, quali argomenti della preselezionata *Funzione di Scelta del Percorso* - *RCF* - (Logit, C-Logit, Proportional, etc.), in base alla quale il

simulatore assegna, nel passo  $l+1$ , ai diversi percorsi disponibili, la quota di domanda di trasporto destinata a ciascuna coppia O/D:

$$P_k^{j,l+1} = P_k(\tilde{C}_1^{j,l+1}, \dots, \tilde{C}_k^{j,l+1}, \dots, \tilde{C}_K^{j,l+1}) \quad (2.4)$$

Per maggiore chiarezza, la procedura fin qui descritta è illustrata nella Fig. 2.2 seguente.



**Fig. 2.2 - Approccio euristico alla risoluzione del problema di Dyanmic User Equilibrium in Aimsun.**

Secondo tale metodo, i costi d'arco (dunque di percorso), previsti nel passo seguente di simulazione della replication  $j$  corrente, sono ottenuti dalla combinazione lineare dei costi medi ottenuti in tutti i passi ad esso successivi delle precedenti replications.

### 2.1.3.2.2 Approccio algoritmico all'assegnazione DUE.

Il problema dell'equilibrio dinamico di una rete di trasporto - *DUE* - ammette la seguente formulazione matematica:

$$\left\{ \begin{array}{l} [C_k^{rs}(t) - C^{rs}(t)] f_k^{rs}(t) = 0 \quad (2.5.1) \\ C_k^{rs}(t) - C^{rs}(t) \geq 0 \quad (2.5.2) \\ C_k^{rs}(t), C^{rs}(t), f_k^{rs}(t) \geq 0 \quad (2.5.3) \\ \forall k \in K_{rs}, \forall (r,s) \in I, \forall t \in [0, T] \end{array} \right.$$

Cui si aggiunge la condizione di conservazione dei flussi:

$$\sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs}(t) = q_{rs}(t) \quad (2.6)$$

$$\forall (r,s) \in I, t \in [0, T]$$

ove si sono denotati rispettivamente con:

- $f_k^{rs}(t)$ , il flusso che si attinge all'istante  $t$  nel percorso  $k$ -esimo che collega l'origine  $r$  alla destinazione  $s$ ;
- $q_{rs}(t)$ , la domanda di trasporto (veh/h) dall'origine  $r$  alla destinazione  $s$  nell'istante di tempo  $t$ ;
- $C_k^{rs}(t)$ , il costo di percorso effettivo associato al percorso  $k$ -esimo fra l'origine  $r$  e la destinazione  $s$  all'istante  $t$ ;
- $C^{rs}(t)$ , il costo minimo fra tutti i percorsi che connettono l'origine  $r$  e la destinazione  $s$ , all'istante  $t$ ;
- $I$ , insieme di tutte le coppie O/D che costituiscono i centroidi di origine e destinazione dei flussi veicolari;
- $K_{rs}$ , insieme dei possibili percorsi che collegano la generica coppia di centroidi  $r/s$ .

È possibile dimostrare come la risoluzione di tale problema possa ricondursi a quella di una disequazione alle differenze finite - *finite dimensional variational inequality* -, che ammette la seguente formulazione vettoriale:

$$[\mathbf{f} - \mathbf{f}^*]^T \mathbf{C} \geq \mathbf{0} \quad (2.7.1)$$

e può a sua volta equivalentemente risciversi nella forma scalare di seguito riportata:

$$\sum_t \sum_{(r,s) \in I} \sum_{k \in K_{rs}} [f_k^{rs}(t) - f_k^{*rs}(t)] C_k^{rs}(t) \geq 0 \quad (2.7.2)$$

Molteplici sono gli algoritmi proposti in letteratura per la sua risoluzione, dai metodi del tipo *Projection Algorithms*, ai *Descent Direction Methods* (*Steepest Descent Directions Method*, *Alternating Directions Method*, etc.), fino a formulazioni alternative del *Metodo delle Medie Successive - Method of Successive Averages (MSA)* -.

Le diverse implementazioni del *MSA* in genere ridistribuiscono i flussi fra i diversi percorsi che collegano una data coppia O/D, secondo una procedura iterativa che al passo  $n$ -esimo, all'istante di tempo  $t$ , calcola un nuovo percorso  $k_{new}$ , da aggiungere al set di percorsi disponibili -*Available Shortest Paths*-, associato a quella coppia O/D, per procedere poi all'aggiornamento dei flussi di percorso, secondo la procedura di seguito riportata:

**caso a)**  $k_{new} \notin K_{rs}^n$

$$f_k^{rs,n+1} = \begin{cases} \alpha_n f_k^{rs,n} & \text{se } k \in K_{rs}^n \\ (1 - \alpha_n) q_{rs}(t) & \text{se } k \equiv k_{new} \end{cases} \quad (2.8.a-b)$$

$$\text{e } K_{rs}^{n+1} = K_{rs}^n \cup k_{new} \quad (2.8.c)$$

Il nuovo percorso non figura fra quelli già individuati al passo precedente per la coppia O/D in esame; non essendogli dunque stato ancora associato alcun flusso, gli viene assegnata una quota della domanda residua.

**caso b)**  $k_{new} \in K_{rs}^n$

$$f_k^{rs,n+1} = \begin{cases} \alpha_n f_k^{rs,n} & \text{se } k \neq k_{new} \\ \alpha_n f_k^{rs,n} + (1 - \alpha_n) q_{rs}(t) & \text{se } k \equiv k_{new} \end{cases} \quad (2.9.a-b)$$

$$\text{e } K_{rs}^{n+1} = K_{rs}^n \quad (2.9.c)$$

Le varie applicazioni del *MSA* differiscono fra loro per la definizione dei pesi,  $\alpha_n$ <sup>8</sup>; l'espressione tipicamente riportata in letteratura è la seguente:

$$\alpha_n = \frac{n}{n+1} \quad (2.10)$$

Uno dei principali svantaggi computazionali della particolarizzazione testé riportata del *MSA* consiste nel proliferare incontrollato del numero di percorsi alternativi, specialmente nel caso di reti notevolmente estese; per aggirare tale inconveniente la versione del *MSA* implementata in Aimsun contempla un parametro,  $K$ , che fissa il numero massimo di percorsi da mantenere in memoria in ogni passo di assegnazione della domanda di trasporto associata a ciascuna coppia O/D.

Fra le diverse rielaborazioni del *MSA* proposte in letteratura per contenere il numero di percorsi disponibili<sup>9</sup>, particolarmente efficace è quella proposta dal Florian<sup>10</sup>, versione attualmente implementata in Aimsun. Denotato con  $K$  il numero massimo di iterazioni disponibili per il calcolo di nuovi percorsi, la procedura seguita è quella di seguito riportata:

<sup>8</sup> Cfr. Bibliografia: Carey M. et al., [8], pag. 130.

<sup>9</sup> Cfr. Bibliografia: Peeta S. et al., [30], pag. 132; Sbayti H. et al. [33], pag. 132.

<sup>10</sup> Cfr. Bibliografia: Florian M. et al. [14], pag. 131; vedi anche: Mahut M. et al., [27]-[28], pag. 132.

**caso a)**  $n \leq K \implies k_{new} \notin K_{rs}^n$  i.e. è individuato un nuovo percorso più breve.

$$f_k^{rs,n+1} = \frac{1}{n+1} q_{rs}(t) \quad (2.11.a)$$

e  $K_{rs}^{n+1} = K_{rs}^n \cup k_{new}$  (2.11.b)

**caso b)**  $n > K \implies k_{new} \in K_{rs}^n$  i.e. Il nuovo percorso più breve è scelto fra quelli già individuati per la coppia O/D in esame, quindi l'insieme  $K_{rs}$  rimane inalterato attraverso i successivi passi di assegnazione.

$$f_k^{rs,n+1} = \begin{cases} \frac{n}{n+1} f_k^{rs,n} & \text{se } k \neq k_{new} \\ \frac{n}{n+1} f_k^{rs,n} + \frac{1}{n+1} q_{rs}(t) & \text{se } k \equiv k_{new} \end{cases} \quad (2.12.a-b)$$

Per maggiore chiarezza si consulti la Fig. 2.3, riportata più avanti.

### 2.1.3.2.3 Criterio di convergenza

Qualsiasi sia il metodo usato per il raggiungimento dell'equilibrio dinamico *DUE*, fra quelli iterativi testè descritti, poiché il processo di caricamento della rete - *Network Loading* - è effettuato attraverso una simulazione, il procedimento complessivo è comunque euristico per natura, conseguentemente non sussiste la certezza della sua effettiva convergenza ad una condizione di equilibrio dinamico, se non attraverso l'imposizione del rispetto di una condizione empirica di controllo tale da assicurare che la soluzione ottenuta possa effettivamente interpretarsi in termini di *DUE*.

La condizione di cui sopra è usualmente espressa da una *Funzione di Scarto Relativo - Relative Gap Function (RGF)* - che, nella versione di Aimsun oggetto del presente studio (Aimsun 6.1), assume la forma proposta dal Janson<sup>11</sup>, di seguito riportata:

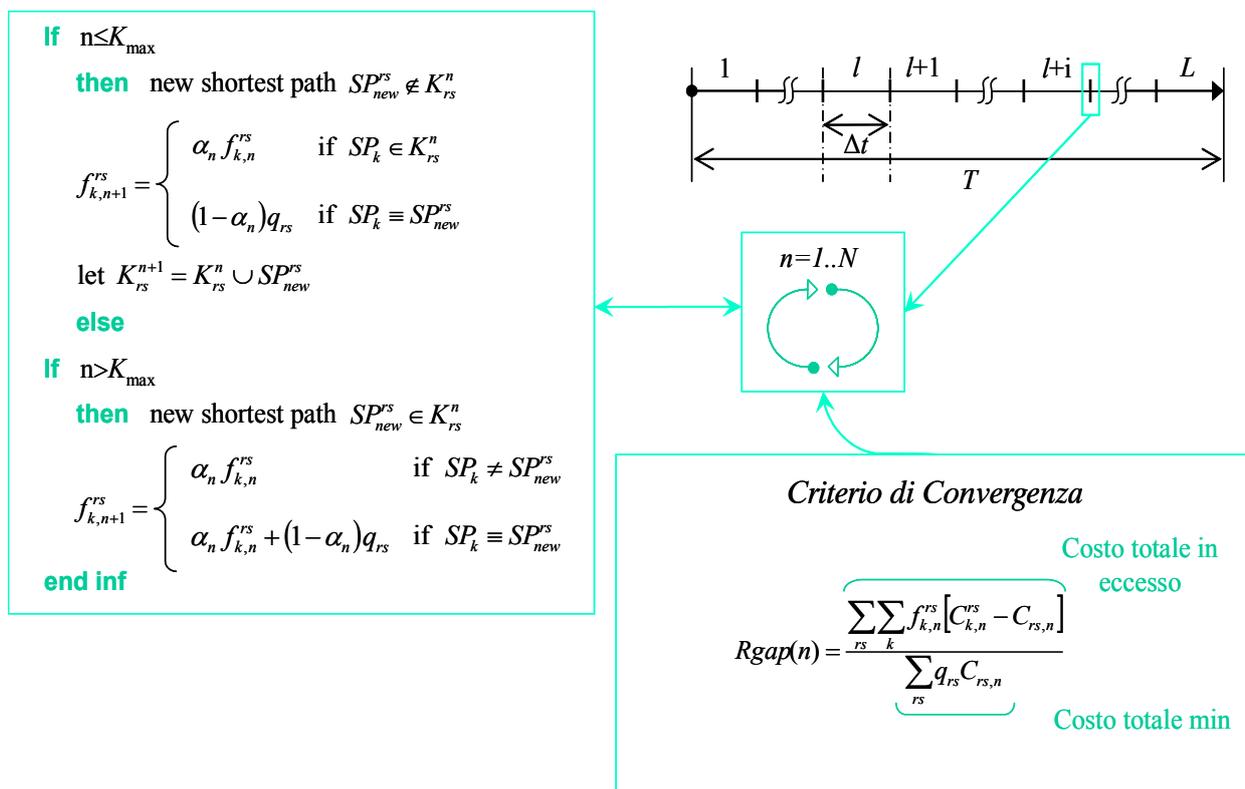
$$Rgap(n) = \frac{\sum_t \sum_{(r,s) \in I} \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs,n} [C_k^{rs,n} - C^{rs,n}]}{\sum_t \sum_{(r,s) \in I} q_{rs}(t) C^{rs,n}} \quad (2.13)$$

Con noto significato dei simboli.

<sup>11</sup> Cfr. Bibliografia: Janson B. N., [19], pag. 131.

Tale rapporto misura, ad ogni passo, il costo in eccesso sostenuto dall'utenza della rete nel suo complesso rispetto a quello minimo che avrebbe riscontrato qualora avesse utilizzato i percorsi più brevi disponibili per ciascuna coppia O/D.

In figura è illustrata la procedura di assegnazione iterativa secondo il metodo delle medie successive.



**Fig. 2.3 - Approccio algoritmico alla risoluzione del problema di Dyanmic User Equilibrium in Aimsun.**

Secondo tale criterio, il problema di assegnazione dei flussi è risolto ricorrendo al Metodo delle Medie Successive - *Method of Successive Averages* (MSA) -, rinunciando dunque all'applicazione di funzioni di scelta discreta di tipo probabilistico calcolate sulla scorta di costi desunti dalla simulazione. Il processo iterativo è interrotto allorquando il rapporto restituito dalla *Relative Gap Function* è inferiore ad una soglia ritenuta accettabile.

## 2.1.3.3 Dynamic Traffic Assignment - DTA -

### 2.1.3.3.1 Inquadramento

Nell'ambito del Metodo di Assegnazione Dinamica - *Dynamic Traffic Assignment* -, la Domanda di Spostamento, definita in termini di Matrici Origine/Destinazione<sup>12</sup>, viene assegnata per successivi passi incrementali di carico e distribuita, mediante appositi modelli di scelta, fra i diversi percorsi più brevi (*Shortest Paths*), calcolati nel passo sulla scorta dei valori di opportuni parametri di costo (*link mean travel time*), desunti dalla simulazione.

Il meccanismo generale di assegnazione dinamica si articola secondo la procedura ricorsiva di seguito riprodotta:

**Passo 0.** Calcolo degli iniziali shortest paths per ciascuna coppia O/D.

**Passo 1.** Esecuzione della simulazione per la durata preimpostata (*Simulation Cycle*), assegnando ai percorsi disponibili per ciascuna coppia O/D la frazione di domanda di trasporto ad essa destinata nel dato intervallo di tempo, in accordo col prestabilito modello di scelta del percorso. Registrazione dei nuovi valori dei parametri di costo restituiti dalla simulazione ed elaborazione dei relativi valori aggregati (i.e. *mean link travel time*).

**Passo 2.** Ricacolo degli shortest paths sulla scorta dei tempi medi di viaggio desunti dalla simulazione.

**Passo 3.** Se il modello di scelta selezionato contempla la possibilità di reindirizzamento dinamico (*Dynamic Rerouting*), vengono aggiornate le probabilità di scelta dei veicoli ad esso abilitati presenti all'interno del sistema (*Guided Vehicles*), con riferimento ai percorsi di cui al punto 2.

**Passo 4.** Ritorno al *Passo 1*.

Al suo interno si riconoscono due funzioni principali:

---

<sup>12</sup> Una matrice O/D ha per componenti il numero di spostamenti (trips), previsti fra l'origine e la destinazione associate rispettivamente alla riga ed alla colonna ad esse corrispondenti, in un prestabilito intervallo di tempo e per un dato tipo di veicolo (*vehicle type*). La Domanda di Spostamento complessiva può dunque essere espressa analiticamente da una combinazione di più matrici O/D definite su intervalli di tempo e per tipi di veicolo differenti, a seconda della composizione del traffico nelle diverse fasce orarie del periodo di osservazione che si intende simulare.

- a. calcolo ed aggiornamento in ciascun passo temporale di simulazione, dei percorsi alternativi fra le diverse coppie O/D;
- b. assegnazione di ciascun veicolo ad uno dei percorsi disponibili per raggiungere la rispettiva destinazione, sia per i veicoli che si apprestano ad immettersi nella rete sia eventualmente per quelli già presenti all'interno della stessa.

Tali funzioni sono affidate ad altrettanti modelli o algoritmi, rispettivamente:

- a. modello di calcolo dei percorsi (*Shortest Path Algorithm*);
- b. modello di scelta dei percorsi (*Route Choice Model*).

Nel seguito del presente capitolo verranno descritti i modelli anzidetti, ed esaminata più dettagliatamente la procedura di assegnazione propria del DTA; a tali scopi si ritiene preliminarmente opportuno trattare alcuni aspetti propedeutici alla loro piena comprensione, attinenti la rappresentazione della rete e la definizione delle funzioni di costo.

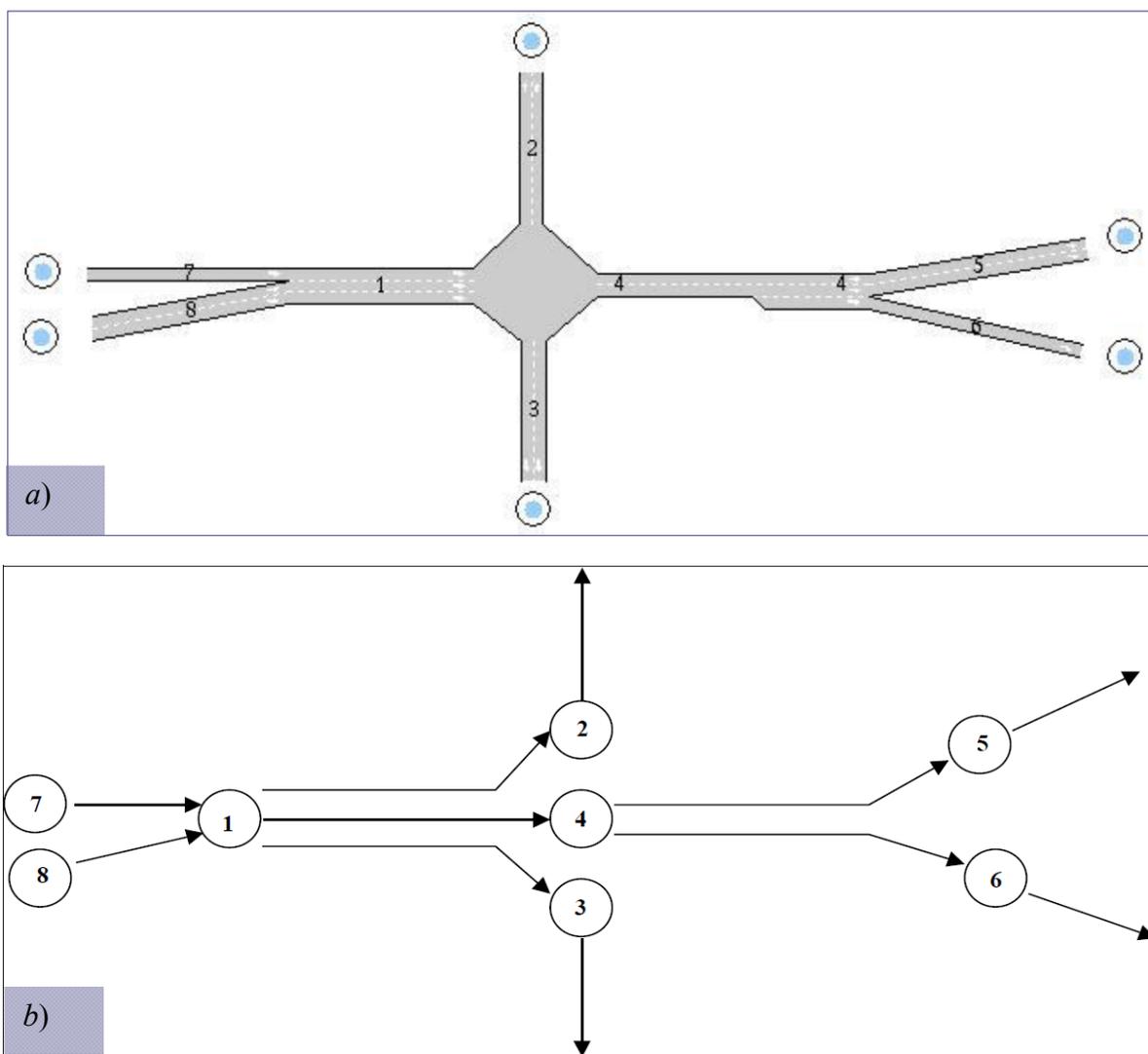
### 2.1.3.3.2 Rappresentazione della rete e classificazione dei percorsi

La rappresentazione della rete in termini di sezioni stradali ed intersezioni è inappropriata ai fini dell'applicabilità della procedura di calcolo dei percorsi. Quest'ultima richiede infatti una rappresentazione della stessa in forma di *grafo* (sequenza di segmenti e nodi). Nel tradurre la prima nella seconda, al fine di tenere in conto le manovre di svolta, in Aimsun un link che connetta due nodi modella al contempo la rispettiva sezione stradale ed una manovra di svolta, quindi ad una stessa sezione stradale corrisponderanno, nella trasposizione unidimensionale, tanti links quante sono le manovre di svolta ammesse all'estremità finale della sezione stessa. Poiché in accordo con l'algoritmo di calcolo dei percorsi implementato in Aimsun (particolarizzazione del *Label Correcting Method* elaborato da Dijkstra<sup>13</sup>), ad ogni link è associato un costo, parimenti a ciascuna manovra di svolta di una stessa sezione stradale, coerentemente alla definizione di link operata in Aimsun, è possibile assegnare un diverso costo. Il costo complessivamente associato a ciascun arco è dato a sua volta dalla somma di quelli relativi alla sezione stradale ed alla rispettiva manovra di svolta. Di seguito sono riprodotti rispettivamente uno stralcio di rete stradale secondo la visualizzazione offerta dall'interfaccia grafica di Aimsun, composta di

---

<sup>13</sup> Cfr. Bibliografia: Dijkstra E. W., [12], pag. 130.

sezioni ed intersezioni stradali (Fig. 2.4.a), e la corrispondente rappresentazione monodimensionale, composta da archi e nodi, utilizzata dall'unità software dedicata al calcolo dei percorsi - *Shortest Route Component* - (Fig. 2.4.b). Va osservato come per ogni sezione, in corrispondenza dell'estremità di origine, viene creato un nodo dal quale si dipartono tanti archi quante sono le manovre in curva previste all'estremità terminale della stessa sezione.



**Fig. 2.4. a)-b) - Rappresentazione grafica monodimensionale di una rete stradale in Aimsun.**

La figura illustra rispettivamente uno stralcio di rete stradale secondo la visualizzazione offerta dall'interfaccia grafica di Aimsun (a), e la corrispondente rappresentazione monodimensionale (b). In questa trasposizione ogni sezione stradale è scomposta in un numero di archi pari a quello delle manovre di svolta consentite alla sua estremità terminale; ogni arco -*link* o *edge*- si compone dunque della manovra di svolta e delle corsie ad essa ammesse, rappresentate sinteticamente da un'unica linea. Il parametro di costo associato all'arco compendia ambedue i costi sostenuti rispettivamente nel percorrere la sezione stradale e nel compiere la svolta.

L'individuazione dei percorsi che collegano le diverse coppie di centroidi O/D è affidata, in Aimsun, a tre procedure, da usare alternativamente o contestualmente a seconda delle scelte di modellazione. È così possibile distinguere tre tipologie di percorsi:

- a. *User Defined Routes (ODR)* - Si tratta di percorsi definiti dall'analista, attraverso un apposito editor, direttamente in ambiente Aimsun sulla scorta della conoscenza della rete e delle preferenze della sua utenza (ricavate da indagini tipo *Stated Preferences* o *Revealed Preferences*), o desunti quali output di modelli implementati su altri simulatori di traffico, siano essi microscopici o macroscopici (come nel caso di studi preliminari alla pianificazione dei trasporti). Questa tipologia corrisponde a percorsi ben noti all'utenza stradale o comunque è assai utile ed immediata per identificare i percorsi ad essa più familiari.
- b. *Path from Previous Assignment Results (PAR)* - Tali percorsi sono il risultato di una precedente assegnazione della domanda di trasporto effettuata in campo statico in ambito macroscopico, o anche in campo dinamico a livello micro- o mesoscopico. Questa categoria si discosta dalle *ODR* non tanto in termini concettuali (sebbene tenga maggiormente conto delle caratteristiche della rete, quale prodotto di un processo di assegnazione), quanto per la sua rappresentazione. Ambedue, dal punto di vista logico, sono 'percorsi da punto a punto' -*Point to Point Path*-, mentre però le *ODR* sono definite come una lista di links da un'origine ad una destinazione, i *PAR* hanno una struttura logica che definisce il percorso da ciascun link fino alla destinazione. Così nel primo caso se un veicolo salta una manovra di svolta, smarrisce definitivamente il percorso senza possibilità di recuperarlo (*Vehicle Lost In*); mentre, nel secondo, il veicolo è comunque in grado di riprendere un nuovo percorso dal link successivo.
- c. *Calculated Shortest Paths* - Percorsi individuati attraverso un apposito algoritmo - *Shortest Path Algorithm*- particolareggiato del procedimento di Dijkstra<sup>14</sup>, applicato ad una rappresentazione della rete in termini di nodi e links, a ciascuno dei quali è associata una *funzione di costo* (i.e. *tempo di viaggio*).

---

<sup>14</sup> Cfr. Bibliografia: Dijkstra E. W., [12], pag. 130.

### 2.1.3.3.3 Definizione della Funzione di Costo di un arco

Come già detto, nella rappresentazione della rete in forma di grafo impiegata nel calcolo dei percorsi, a ciascun arco è associata una *Funzione di Costo -Cost Function-*. In particolare Aimsun contempla due funzioni di costo, a seconda che si disponga o meno di dati generati dalla simulazione, rispettivamente denominate:

- a. *Dynamic Cost Function*;
- b. *Initial Cost Function*.

per ognuna delle quali ammette la possibilità di scelta fra una forma impostata di default ed una definita a piacimento dall'utente del software. Nel prosieguo della trattazione si affronterà la descrizione delle funzioni di costo testé menzionate, con riferimento alle espressioni implementate di default in Aimsun. Va subito chiarito come non si tratti di funzioni nel senso canonico del termine (ovvero di espressioni matematiche che a partire da opportune variabili indipendenti restituiscono i valori della grandezza d'interesse, i.e. costi di arco), bensì di opportune combinazioni di prestabiliti parametri di costo, rispettivamente:

- a. tempo di viaggio *-Link Travel Time-*;
- b. attrattività (o capacità) *-Link Attractivity-*;
- c. costi prestabiliti dall'utente del software *-User Defined Costs-*.

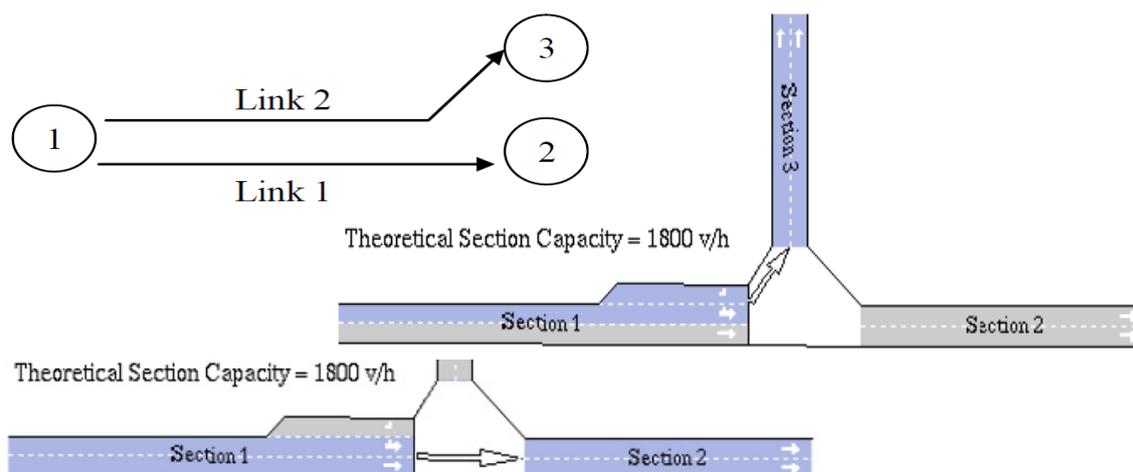
Mentre risulta d'immediata comprensione il significato fisico dei termini *a.* e *b.*, pare opportuno soffermarsi brevemente sulla definizione di *attrattività* dell'arco *-Link Attractivity-*. Questo parametro misura, per l'appunto, l'appetibilità di una fra più corsie in relazione alla successiva manovra di svolta prevista per il generico veicolo, in accordo col relativo percorso assegnato. Esso tiene conto del numero di corsie della sezione associate alla manovra di svolta corrispondente al link ed, al contempo, del numero di manovre di svolta ammesse a partire da una stessa corsia (ovvero il numero di links condivisi da una stessa corsia). La definizione dell'attrattività procede a cascata dalla sezione, alla corsia, al link. L'*attrattività della sezione* è espressa dal parametro  $C_s$  il cui valore è assegnato dal tecnico modellatore. Da questa discende poi l'attrattività media per corsia - *Generic per-Lane Attractivity* - attraverso la seguente espressione:

$$GCL_k^s = C_s \frac{WL_k}{\sum_{i \in L_s} WL_i}, \quad \forall k \in L_s \quad (2.14)$$

ove si sono denotati rispettivamente con  $L_s$  l'insieme delle corsie della sezione  $s$ , e con  $WL_k$  il peso della generica corsia  $k$ -esima ad essa appartenente. Quest'ultimo definisce la rilevanza del contributo della singola corsia nel calcolo dell'attrattività dell'arco, così mentre una corsia centrale -*central exit lane*- da un contributo pieno, ovvero con peso unitario  $WL_k = 1$ , una corsia laterale -*side exit lane*- da, invece, un contributo ridotto in ragione del 25%,  $WL_k = 0,75$ . In fine l'attrattività dell'arco è restituita dalla seguente espressione:

$$CL_j = \sum_{k \in L_s} \frac{GCL_k^s}{NTS_k} \quad (2.15)$$

ove  $NTS_k$  denota il numero di manovre di svolta consentite a partire dalla  $k$ -esima corsia -*Number of Shared Turnings*-. A vantaggio di chiarezza, in Fig. 2.5 è riportata un'applicazione numerica.



$$GCL_1 = C_1 / \sum_{i \in \text{exit lane}} WL_i = 1800 / (1 + 1 + 0.75) = 654,54$$

$$CL_1 = \sum_{k \in \text{exit lanes of link 1}} GCL_1 * WL_k / NTS_k = (654.54 * 1 / 1) + (654.54 * 1 / 2) = 981.81$$

$$CL_2 = \sum_{k \in \text{exit lanes of link 2}} GCL_1 * WL_k / NTS_k = (654.54 * 1 / 2) + (654.54 * 0.75 / 1) = 818,18$$

**Fig. 2.5 - Esempio di calcolo dell'attrattività di arco in Aimsun.**

Tradotto il tracciato della rete in forma grafica unifilare, l'attrattività di ciascun arco -*link attractiveness*- è calcolata a partire dalle corsie che lo compongono e dalle manovre di svolta da esse condivise -*shared turnings*-. Come si evince dai calcoli illustrati in figura, la condivisione di più manovre di svolta ha un'effetto deteriorativo ai fini dell'attrattività del link. Ciò costituisce un artificio per introdurre indirettamente nel meccanismo di scelta degli utenti di un sistema stradale, la predilezione delle corsie con il minor numero di manovre di svolta, interessate dunque da una ridotta interferenza e come tali meno affette da fenomeni di congestionamento.

Fatta questa premessa, si procede nel seguito alla disamina delle due funzioni di costo già menzionate.

## Initial Cost Function

Come suggerisce il nome stesso, la funzione di costo *Initial Cost Function* è necessariamente utilizzata all'avvio della simulazione, quando il modulo deputato all'elaborazione dei costi di arco non dispone ancora dei dati raccolti durante la simulazione (i.e. *Simulated Travel Times*).

La forma della funzione di costo implementata per default in Aimsun consta in generale (sia essa del tipo *Initial* o *Dynamic*), di tre termini ciascuno rispettivamente espressione dei contributi di:

- a. tempo di viaggio -*Link Travel Time*-;
- b. attrattività (o capacità) -*Link Attractivity*-;
- c. costi prestabiliti dall'utente del software -*User Defined Costs*-.

Nella fase iniziale, dunque, i tempi di viaggio che intervengono nella *Initial Cost Function* sono quelli calcolati in condizioni di *flusso indisturbato*, in assenza cioè di congestione -*Travel Time in Free Flow Conditions*-, che non richiedono per l'appunto alcuna simulazione, bensì sono desumibili da un calcolo analitico immediato. Si tratta, infatti, del tempo che il singolo veicolo impiegherebbe per attraversare il link (ovvero percorrere il tronco stradale ed eseguire la corrispondente manovra di svolta), viaggiando alla massima velocità consentita, rispettivamente lungo la sezione ed in curva, compatibilmente con le prestazioni del veicolo (in questo calcolo non sono tenute in conto ulteriori penalizzazioni derivanti da eventuali regolazione semaforica e segnaletica stradale).

Aimsun prevede inoltre, di default, due forme per ambedue le funzioni di costo *Initial* e *Dynamic*, a seconda che tengano o meno conto della tipologia di veicolo -*Vehicle Type*-. La presenza nella rete di corsie riservate a determinate tipologie di veicolo comporta automaticamente la diversificazione della funzione di costo fra la classe di veicoli cui le corsie sono riservate e quella dei veicoli ai quali ne è interdetto l'utilizzo, altrimenti il software adotta di default un'unica funzione di costo per tutte le tipologie di veicolo, di seguito riportata:

$$IniCost_j = TTF_j + \varphi \cdot \left(1 - \frac{CL_j}{CL_{max}}\right) \cdot TTF_j + \tau \cdot UDCost_s \quad (2.16.1)$$

con il seguente significato dei simboli:

$TTFF_j$  - *Travel Time under Free Flow Conditions* - Tempo di viaggio in condizioni di flusso indisturbato:

$$TTFF_j = \frac{\ell_s}{SpL_s} + \frac{\ell_t}{SpL_t} \quad (2.16.2)$$

ove  $\ell_k$  ed  $SpL_k$  rappresentano la lunghezza (in Km), ed il limite di velocità - *Speed Limit*- (in Km/h), rispettivamente della sezione ( $k \equiv s$ ), e della curva ( $k \equiv t$ ), associate al link  $j$ .

$\varphi$  - *Capacity Weight Parameter* - Coefficiente deputato a modulare l'influenza dell'attrattività sul costo d'arco.

$CL_{max}$  - *Maximum Link Capacity* - Capacità massima teorica fra tutti gli archi della rete.

$\tau$  - *User-Defined Cost Weight Parameter* - Coefficiente deputato a controllare l'influenza dei costi definiti dall'utente sul costo complessivo di arco.

$UDCost$  - *User-Defined Cost* - Termine che racchiude tutte le voci di costo previste dal gestore della rete (pedaggi, etc.), per la sezione stradale  $s$  corrispondente all'arco  $j$ , ed impostate dall'utente del software.

Qualora si tenga conto della tipologia di veicolo, la precedente espressione si particolarizza nella seguente:

$$IniCost_{j,vt} = TTFF_{j,vt} + \varphi \cdot \left(1 - \frac{CL_j}{CL_{max}}\right) \cdot TTFF_{j,vt} + \tau \cdot UDCost_s \quad (2.17.1)$$

con invariato significato dei simboli, ad eccezione del tempo di viaggio, adesso valutato per la singola tipologia di veicolo (si tratta cioè di un dato aggregato per classi di veicolo), attraverso l'espressione seguente:

$$TTFF_{j,vt} = \frac{\ell_s}{\text{Min}(SpL_s \cdot \theta_{vt}, \text{MaxSp}_{vt})} + \frac{\ell_t}{\text{Min}(SpL_t \cdot \theta_{vt}, \text{MaxSp}_{vt})} \quad (2.17.2)$$

ove si sono denotati con:

$MaxSp_{vt}$  - *Vehicle Type vt Maximum Speed* - Velocità massima prevista per la tipologia di veicolo  $vt$  (legata esclusivamente alle caratteristiche tecniche del veicolo).

$\theta$  - *Speed Limit Acceptance of vehicle type vt* - Tale parametro esprime il grado di disposizione degli automobilisti appartenenti alla categoria  $vt$ , a rispettare i limiti di velocità imposti lungo la rete stradale<sup>15</sup>.

## Dynamic Cost Function

La funzione di costo *Dynamic Cost Function* può essere utilizzata ogni qual volta si disponga di misurazioni delle prescelte voci costo (i.e. tempi di percorrenza), desunte da simulazioni sul modello, dunque solo nel caso in cui la simulazione sia stata già avviata e dati statistici opportunamente raccolti ed elaborati. Il parametro di costo adottato di default dal modulo di raccolta ed analisi dati per la valutazione della funzione di costo del  $j$ -esimo link, è il tempo di percorrenza medio (espresso in secondi), dei veicoli che hanno attraversato il link nell'ultimo intervallo temporale di raccolta dati -*Data Gathering Period*<sup>16</sup>-. Quest'ultimo, stante la definizione di link, tiene conto del tempo complessivamente impiegato dal singolo veicolo per percorrere la sezione stradale,  $s$ , e completare la manovra di svolta,  $t$ , corrispondenti al link medesimo.

Poiché nel corso della simulazione possono ricorrere periodi durante i quali nessun veicolo percorra il link, o all'opposto, i veicoli stazionino incolonnati, nell'espressione della funzione di costo interviene un parametro di costo più generico, denominato *Tempo di Viaggio Stimato -Estimated Travel Time-* che di volta in volta, a seconda della condizione intervenuta, si particularizza in voci di costo specifiche (secondo lo specchietto riportato in Fig. 2.6).

Anche la *Dynamic Cost Function* contempla due espressioni alternative a seconda che tenga conto o meno della tipologia di veicolo, rispettivamente denotate  $DynCost_{j,vt}$  e  $DynCost_j$ . Il ricorso all'una o all'altra è determinato dalla presenza o meno nella rete di corsie riservate a prestabilite classi di veicoli. Nel primo caso, in ciascun link  $j$ , verrà

---

<sup>15</sup> Il parametro *Speed Limit Acceptance* va precisato nell'editor di ciascun tipo di veicolo e come tale è unico lungo l'intera rete:  $\theta_{vt} \geq 1$  indica che la categoria di guidatori espressa dal vehicol type  $vt$  tenderà a derogare ai limiti di velocità, viceversa assumere  $\theta_{vt} \leq 1$  comporta che la stessa tenderà a rispettare detti limiti.

<sup>16</sup> Per una più approfondita disamina della scansione temporale che regola la simulazione in ambiente Aimsun si rimanda alla nota 1, a pag. 50.

stimata una funzione di costo per ciascuna tipologia di veicolo, nel secondo, invece, la funzione di costo sarà unica per tutti i tipi di veicolo e conforme alla seguente espressione:

$$DynCost_j = EstTT_j + \varphi \cdot \left(1 - \frac{CL_j}{CL_{max}}\right) \cdot EstTT_j + \tau \cdot UDCost_s \quad (2.18)$$

con noto significato dei simboli.

Il valore da assegnare di volta in volta al Tempo di Viaggio Stimato è individuato attraverso un apposito algoritmo, di seguito per completezza riportato.

```

if  $f_j > 0$ 
  then  $EstTT_j^* = MeanTT_j$ 
else
  if (there is any vehicle stopped)
    then  $EstTT_j^* = AvgTln_s$ 
  else  $EstTT_j^* = AvgSectTT_s$ 
  endif
endif
 $EstTT_j = Max(EstTT_j^*; TTFF_j)$ 
    
```

**Fig. 2.6 - Procedura di calcolo del Tempo di Viaggio Stimato.**

Il tempo di viaggio stimato -*Estimated Travel Time*- che interviene nell'espressione del costo istantaneo di un arco -*Dynamic Cost*-, viene calcolato in Aimsun secondo tre diverse modalità, corrispondenti a tre contesti di funzionamento alternativi: *arco debolmente congestionato*, *arco completamente congestionato*, *arco scarico*. Mentre nel primo caso il calcolo è circoscritto alle sole corsie che formano l'arco d'interesse (i.e. ai soli veicoli che transitano lungo di esse), negli altri due, invece, è esteso all'intera sezione stradale. Quest'ultima scelta operativa è giustificata da due ordini di ragioni, segnatamente: nel caso di arco completamente congestionato i regimi di marcia nelle varie corsie sono reciprocamente condizionati, pare dunque ragionevole identificare il tempo stimato di viaggio con la media dei tempi di attesa in colonna di tutti i veicoli transitati nella sezione stradale; nel caso di arco completamente scarico, non disponendo di alcun dato relativo al link in esame, si fa arbitrariamente riferimento ai tempi di viaggio ottenuti nei link adiacenti, ovvero relativi all'intera sezione stradale.

In accordo con quest'ultimo, qualora, durante l'intervallo di rilevamento dati, dei veicoli abbiano attraversato il link (dunque il flusso sia positivo  $f_j > 0$ ), il Tempo di Viaggio Stimato coinciderà col Tempo Medio di Viaggio -*Mean Travel Time* ( $MeanTT_j$ )-. Quando,

invece, non si rilevino veicoli in movimento lungo l'arco occorrerà distinguere due casi alternativi:

- a. arco completamente congestionato;
- b. arco completamente scarico.

Nel primo caso il Tempo di Viaggio Stimato coincide col *Tempo Medio di Attesa in Coda* dei veicoli che si trovano nella sezione  $s^{17}$  durante il periodo di rilevamento dati -*Average Waiting Time in Line* ( $AvgTln_s$ )-. Nel secondo caso, non disponendo di alcun dato relativo al link in esame, l'algoritmo di calcolo dei costi fa necessariamente riferimento ai dati ottenuti nei link adiacenti, adottando quale Tempo di Viaggio Stimato la media dei tempi di viaggio sull'intera sezione stradale  $s$  -*Average Section Travel Time* ( $AvgSectTT_s$ )- durante l'intervallo di rilevamento.

Come già accennato, in presenza di corsie riservate a prestabilite classi i veicoli, l'algoritmo provvederà automaticamente al calcolo di una funzione di costo per ciascuna tipologia di veicolo, servendosi della seguente espressione:

$$DynCost_{j,vt} = EstTT_{j,vt} + \varphi \cdot \left(1 - \frac{CL_j}{CL_{max}}\right) \cdot EstTT_{j,vt} + \tau \cdot UDCost_s \quad (2.19)$$

Anche in questo caso il valore da assegnare al Tempo di Viaggio Stimato viene individuato attraverso un'apposita procedura non dissimile da quella già descritta per la funzione di costo aggregata, sebbene resa più complessa dalla necessità di distinguere, adesso, le diverse tipologie di veicolo. Si veda lo specchietto riportato in Fig. 2.7.

---

<sup>17</sup> Nel caso di arco completamente congestionato, l'algoritmo di calcolo del tempo di viaggio fa riferimento ad una media estesa all'intera sezione stradale e non ristretta al solo link in esame, ciò perché in condizioni di congestionamento il tempo di viaggio lungo il link è condizionato anche dallo stato dei link adiacenti associati al medesimo tronco stradale.

```

if (flowi,vt > 0)
then
    EstimatedTravelTimei,vt = TravelTimei,vt
else
if (there is any vehicle vt stopped)
then
    EstimatedTravelTimei,vt = AvgTimeIns,vt
else
if (link j has reserved lanes of vehicle class cl)
then
if (vt belongs to cl)
then
if (FlowClassi,cl > 0)
then
    EstimatedTravelTimei,vt = TravelTimeClassi,cl
else
if (there is any vehicle belonging to cl stopped)
then
    EstimatedTravelTimei,vt = AvgTimeInClasss,cl
else
    EstimatedTravelTimei,vt = AverageSectionTravelTimes,cl
endif
endif
else
if (FlowClassi,not cl > 0)
then
    EstimatedTravelTimei,vt = TravelTimeClassi,not cl
else
if (there is any vehicle not belonging cl stopped)
then
    EstimatedTravelTimei,vt = AvgTimeInClasss,not cl
else
    EstimatedTravelTimei,vt = AverageSectionTravelTimes,not cl
endif
endif
endif
else
if (Flowi > 0)
then
    EstimatedTravelTimej = TravelTimej
else
if (there is any vehicle stopped)
then
    EstimatedTravelTimej = AvgTimeIns
else
    EstimatedTravelTimej = AverageSectionTravelTimes
endif
endif
endif
endif
EstimatedTravelTimej,vt = Maximum(EstimatedTravelTimej,vb, TravelFFj,vt)

```

**Fig. 2.7 - Procedura di calcolo del *Tempo di Viaggio* disaggregato per classi di veicolo.**

L'algoritmo riportato nello specchio discende dalla particolareggiata di quello già introdotto per la funzione di costo aggregata (cfr. Fig. 2.6). Tale procedimento è automaticamente innescato qualora siano state predisposte nel modello di rete corsie riservate a prestabilite classi di veicolo. La necessità di distinguere, adesso, diverse tipologie di veicolo comporta un'accresciuta complessità dello scripting.

### 2.1.3.3.4 Algoritmo di calcolo dei percorsi -*Shortest Path Algorhythm*-

Nell'ambiente di programmazione del microsimulatore Aimsun, l'individuazione dei percorsi alternativi che collegano le singole coppie O/D della rete implementata è affidata ad una procedura apposita che si avvale di due algoritmi deputati rispettivamente a:

- a. generare per ciascun centroide di destinazione l'*Albero dei Percorsi più Brevi - Shortest Path Tree*<sup>18</sup> - che ha in quest'ultimo la sua radice:

$$SPT_d, \forall d \in D \quad (2.20)$$

ove si è denotato con  $D$  l'insieme di tutti i centroidi di destinazione;

- b. definire per ciascuna coppia O/D l'*Insieme dei Percorsi Disponibili -Available Path Set-*:

$$K_i, \forall i \in I \quad (2.21)$$

avendo denotato con  $I$  l'insieme di tutte le coppie O/D.

Il primo consiste in una particolare implementazione del *Label-Correcting Method* elaborato da Dijkstra nel 1959<sup>19</sup>, e restituisce tanti *SPTs* quanti sono i centroidi di destinazione. Il secondo provvede, quindi, a costruire per ciascuna coppia O/D l'*insieme di scelta* dei percorsi disponibili per quella coppia, estraendo dallo *Shortest Path Tree* associato al centroide di destinazione corrispondente, gli *shortest paths*, *SPcon*, che si diramano dalle sezioni d'ingresso collegate al centroide di origine della stessa coppia O/D (dunque in numero pari a quello dei *connettori*<sup>20</sup> del centroide di origine).

---

<sup>18</sup> Nell'ambito dell'impostazione teorica adottata dal modulo di assegnazione di Aimsun, con la denominazione *Shortest Path Tree*, si indica un grafo che riporta, per un dato centroide di destinazione, i soli percorsi più brevi che si dipartono da ogni arco di ingresso (o centroide di origine, qualora connesso ad una sola sezione di ingresso), verso il prescelto centroide di destinazione.

<sup>19</sup> Cfr. Bibliografia: Dijkstra E. W., [12], pag. 130.

<sup>20</sup> In ambiente Aimsun la funzione di connessione di ciascun centroide di origine/destinazione alle rispettive sezioni di ingresso/uscita dalla rete, è assolta da appositi elementi monodimensionali denominati per l'appunto *connectors*, impostati nell'editor di ciascun centroide.

Qualora si adotti un modello di scelta del percorso di tipo probabilistico e dinamico<sup>21</sup>, il processo di assegnazione in Aimsun risulta scandito in successivi passi di aggiornamento (*Route Choice Cycle* o *Simulation Cycle*), delle probabilità di scelta dei percorsi disponibili fra le diverse coppie origine/destinazione. In questo contesto, coerentemente al carattere dinamico del modello di assegnazione, anche il modulo di calcolo dei percorsi provvede, in stretta sequenza, all'aggiornamento, secondo la medesima scansione temporale, degli *SPTs* associati ai centroidi di destinazione e degli insiemi di scelta,  $K_i$ , definiti per le diverse coppie O/D presenti nel sistema.

Esplicitando, dunque, la procedura di calcolo dei percorsi in esso annidata, lo schema generale del meccanismo di Assegnazione Dinamica - *Dynamic Traffic Assignment* - già delineato nelle pagine precedenti<sup>22</sup>, si precisa ulteriormente nel seguente:

**Passo 0. Initial Shortest Paths Calculation.**

Calcolo degli shortest paths iniziali per ciascuna coppia O/D, servendosi delle funzioni di costo iniziali.

**Passo 0.1. Inizialization.**

Calcolo della *Initial Cost Function* di ciascun arco  $j$ :

$$\forall j \in L: Cost_j = IniCost_j \longleftarrow TTF_j \quad (2.22)$$

**Passo 0.2. Shortest Path Tree Routine.**

Costruzione, sulla scorta dei costi di arco  $Cost_j$ , dell'albero dei percorsi -*Shortest Path Tree*- per ciascun centroide di destinazione  $d$ :

$$\forall d \in D: SPT_d$$

**Passo 0.3. Choice Path Set Routine.**

Per ciascuna  $i$ -esima coppia O/D, costruzione del relativo insieme di scelta dei percorsi  $K_i$ , estraendo dallo shortest path tree della destinazione corrispondente,  $SPT_d$ , i percorsi

<sup>21</sup> Con la qualificazione “dinamico” s’intende qui connotare un modello di scelta dei percorsi capace di aggiornare dinamicamente le percentuali di assegnazione in funzione dei valori istantanei dei parametri di performance del sistema (o parametri di costo, i.e. tempi di viaggio). In Aimsun gli unici modelli di assegnazione dinamici, secondo l’accezione testé precisata, sono *modelli di scelta discreta probabilistici - Discrete Route Choice Models* - complessivamente riuniti sotto la denominazione piuttosto generica di *Route Choice Models* suscettibile di ingenerare confusione nel lettore inesperto.

<sup>22</sup> Cfr. § 2.1.3.3.1 Inquadramento, pag. 70.

che si diramano dalla rispettiva origine,  $SPcon_{o,d}$  (in numero pari ai connettori del centroide di origine alla rete):

$$\forall i \in I : \text{extract } SPcon_{o,d} \text{ from } SPT_d \text{ to } K_i \quad (2.23)$$

**Passo 1. Simulation.**

Esecuzione della simulazione per la durata preimpostata (*Simulation Cycle*), assegnando ai percorsi disponibili,  $K_i$ , per ciascuna coppia O/D, la frazione di domanda di trasporto ad essa destinata nel dato intervallo di tempo, in accordo col prestabilito modello di scelta del percorso. Registrazione dei nuovi valori dei parametri di costo restituiti dalla simulazione ed elaborazione dei relativi valori aggregati (i.e. *mean link travel time*).

**Passo 2. Path Updating.**

Ricalcolo degli shortest paths sulla scorta dei tempi medi di viaggio desunti dalla simulazione.

**Passo 2.1. Link Cost Function Updating.**

Calcolo della *Dynamic Cost Function* di ciascun arco  $j$ :

$$\forall j \in L : Cost_j = DynCost_j \longleftarrow EstTT_j \quad (2.24)$$

**Passo 2.2. Shortest Path Tree Routine.**

Per ogni centroide di destinazione  $d$ , ricalcolo del relativo albero dei percorsi  $SPT_d$  avvalendosi degli aggiornati parametri di costo.

**Passo 2.3. Choice Path Set Routine.**

Aggiornamento dell'insieme di scelta dei percorsi,  $K_i$ , di ciascuna coppia O/D  $i$ -esima.

**Passo 3. Dynamic Rerouting.**

Se il modello di scelta selezionato contempla la possibilità di reindirizzamento dinamico (*Dynamic Rerouting*), aggiornare le probabilità di scelta dei veicoli ad esso abilitati presenti all'interno del sistema (*Guided Vehicles*), con riferimento ai percorsi di cui al punto 2.

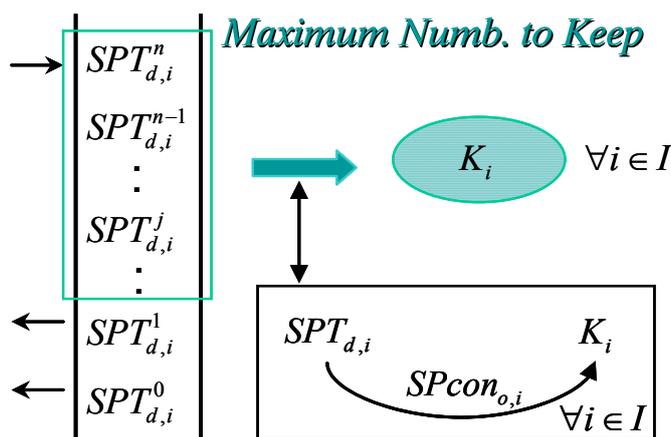
**Passo 4.** Ritorno al *Passo 1*

Al fine di evitare la proliferazione incontrollata dei percorsi durante il processo di assegnazione, in Aimsun sono stati appositamente introdotti due parametri:

- numero di percorsi calcolati all'inizio del processo di assegnazione - *Initial K-SP* -;
- numero massimo di percorsi memorizzati durante la simulazione - *Maximum Number to Keep* -.

Il primo stabilisce il numero di percorsi più brevi calcolati per ciascuna coppia O/D, e conseguentemente il numero di alberi dei percorsi individuati per ciascun centroide di destinazione, sulla scorta dei costi iniziali di viaggio *-Initial Cost Functions-* associati a ciascun arco. Il secondo determina, invece, il numero massimo di alberi dei percorsi mantenuti in memoria, per ciascun centroide di destinazione, durante la simulazione; esso interviene nella fase di costruzione ed aggiornamento dell'insieme di scelta dei percorsi,  $K_i$ , per ciascuna  $i$ -esima coppia O/D, stabilendo il numero massimo dei più recenti alberi dei percorsi da cui attingere per generare l'insieme dei percorsi alternativi per quella coppia O/D<sup>23</sup>. La predisposizione di questi due parametri risponde evidentemente all'esigenza di risparmiare spazio nella memoria del calcolatore durante la simulazione ed incrementare così le performance computazionali.

La Fig. 2.8 illustra sinteticamente il procedimento di aggiornamento dei percorsi fin qui descritto.



**Fig. 2.8 - Costruzione dell'insieme di scelta dei percorsi  $K_i$  per l' $i$ -esima coppia O/D.**

I percorsi racchiusi nell'insieme di scelta  $K_i$ , sono estratti dagli ultimi alberi dei percorsi calcolati in ordine di tempo. Nella sequenza di generazione degli alberi dei percorsi, quelli che non rientrano fra i più recenti (*Max Numb.to Keep*), sono cancellati dalla memoria in quanto obsoleti.

<sup>23</sup> Quando è raggiunto il numero massimo di alberi dei percorsi archiviabili in memoria, quelli più vecchi in ordine di tempo vengono rimossi non appena non siano più percorsi da alcun veicolo; questo procedimento modella implicitamente un comportamento di scelta orientato a prediligere percorsi di più recente scoperta tralasciando quelli di più antica memoria, divenuti obsoleti. Se, invece, il prodotto di questo parametro per l'intervallo di tempo che scandisce il processo di assegnazione ovvero il ricalcolo dei percorsi *-Simulation Cycle-* (cfr. nota 1, pag. 50), eccede la durata complessiva della simulazione, tutti gli alberi dei percorsi calcolati per i diversi centroidi di destinazione nel corso dell'intero periodo di simulazione vengono conservati in memoria.

### 2.1.3.3.5 Modelli di Assegnazione

In ambiente Aimsun, il meccanismo di assegnazione della domanda di trasporto denominato *Dynamic Traffic Assignment - DTA* -, è in realtà un processo composito nel quale possono intervenire metodi di assegnazione diversi fra quelli di seguito elencati:

1. *User Defined Methods*:
  - 1.1. *O/D Routes Method*;
  - 1.2. *Path Assignment Results Method*;
2. *Route Choice Models*:
  - 2.1. *Fixed Route Models*;
  - 2.2. *Variable Route Models*;

mutuamente combinati a discrezione dell'utente del software coerentemente alle istanze cui la modellazione deve rispondere. Essi differiscono per la metodologie di individuazione dei percorsi disponibili fra le diverse coppie O/D e di definizione delle relative percentuali di assegnazione.

I metodi anzidetti sono, a parere di chi scrive, a loro volta riconducibili essenzialmente a due criteri di assegnazione:

- a. Statico;
- b. Dinamico;

ove le due qualifiche si riferiscono alla possibilità o meno di aggiornare nel passo di simulazione i percorsi e le relative percentuali di assegnazione sulla scorta dei valori istantanei dei parametri di performance del sistema.<sup>24</sup>

Nella prima categoria rientrano i seguenti metodi di assegnazione:

- *User Defined Methods*;
- *Fixed Route Models*.

Nella seconda rientrano, invece, i *Modelli Probabilistici di Scelta Discreta* propriamente detti, indicati in ambiente Aimsun con la denominazione:

- *Variable Route Models*.

---

<sup>24</sup> Nella terminologia adottata in ambiente Aimsun le due modalità individuate sono denominate rispettivamente *Fixed Route Mode* e *Variable Route Mode*, ponendo l'accento esclusivamente sulla definizione dei percorsi, scelta fuorviante e riduttiva a parere di chi scrive.

Come si nota, i due metodi di assegnazione *Fixed Route Models* e *Variable Route Models*, riuniti in Aimsun nella stessa famiglia dei *Modelli di Scelta Discreta* sotto la denominazione generica di *Route Choice Models*, nell'ambito della presente trattazione sono stati, invece, scorporati fra le due classi *a.* e *b.* testé introdotte proprio per evidenziarne la diversa natura: deterministica e statica (nell'accezione qui precisata), per il primo; probabilistica e dinamica per il secondo.

In accordo col modo statico, durante la simulazione, i veicoli generati in corrispondenza del relativo centroide di origine sono assegnati a percorsi determinati univocamente in maniera definitiva per l'intera durata della simulazione secondo percentuali di assegnazione anch'esse costanti. Nel corso della simulazione non vengono ricalcolate nuove rotte: i veicoli in ingresso vengono assegnati sempre ai medesimi percorsi individuati fra le rispettive coppie O/D secondo percentuali di assegnazione invariate; quelli già in transito lungo la rete seguono lo stesso percorso cui sono stati assegnati in ingresso, senza possibilità di apportarvi alcuna modifica.

Nel modo Dinamico, invece, il processo di assegnazione procede per aggiornamenti successivi, attraverso i consecutivi passi della simulazione - *Simulation Cycles*<sup>25</sup> -, sia dei percorsi che delle relative percentuali di assegnazione, avvalendosi di un modulo deputato al calcolo iniziale ed al successivo aggiornamento degli insiemi di scelta dei percorsi più brevi che collegano le varie coppie O/D - *Shortest Routes Component* -, sulla scorta dei tempi medi di viaggio ottenuti dalla simulazione, e del preselezionato modello di scelta del percorso - *Route Choice Model* -. Ad ogni passo della simulazione, i veicoli in ingresso - *Initial Assignment* - vengono assegnati a percorsi e secondo probabilità di scelta aggiornati sulla base dei costi ricavati al termine del passo precedente; i veicoli già presenti all'interno del sistema possono essere parimenti reindirizzati - *En-Route Assignment* - a partire dall'arco correntemente occupato, in accordo ai nuovi percorsi calcolati ed alle rispettive probabilità di scelta (*Guided Vehicles*).

Lo schema articolato in passi successivi più volte riportato nei paragrafi precedenti, riproduce esclusivamente la procedura di assegnazione dinamica, omettendo per brevità di esplicitare anche i passaggi attinenti alla modalità di assegnazione statica. Il meccanismo complessivo di assegnazione è comunque il risultato di un'opportuna combinazione di diversi metodi selezionati, a discrezione dell'utente del software, fra quelli predisposti nei

---

<sup>25</sup> Cfr. nota 1, pag. 50.

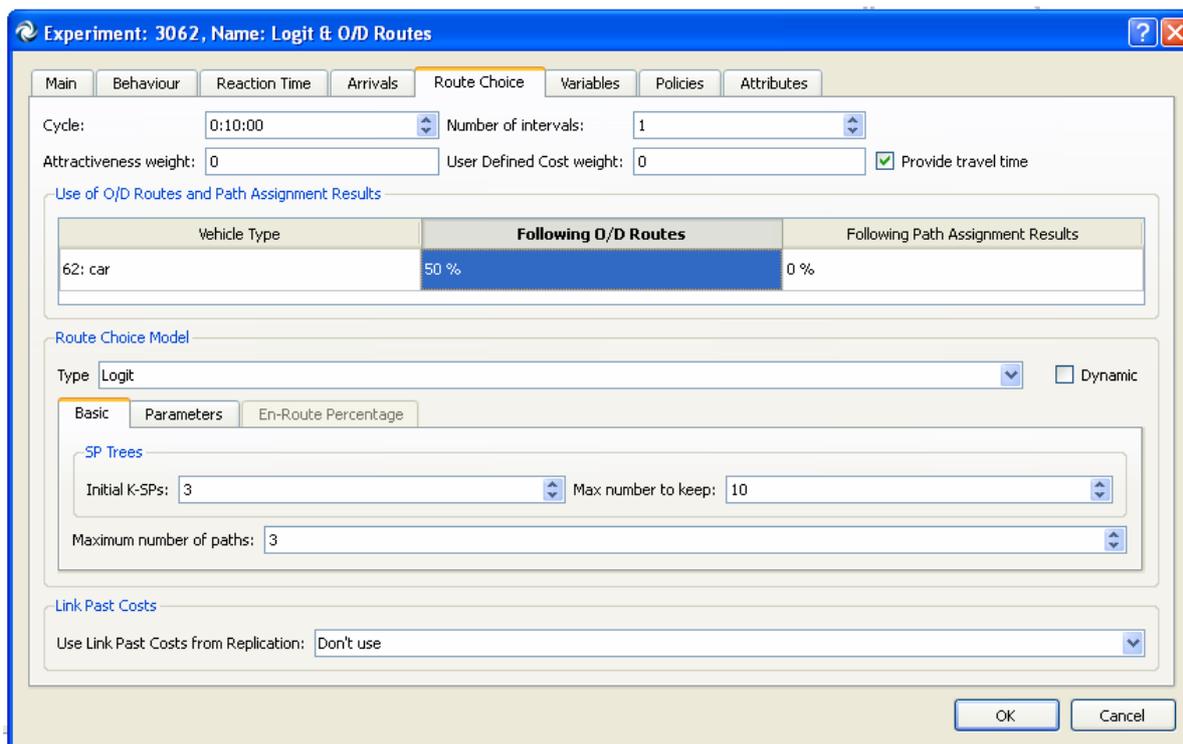
due contesti statico e dinamico fin qui descritti. Ciascuno dei metodi di assegnazione contemplati nell'ambito del DTA si caratterizza per i criteri di individuazione dei percorsi e calcolo delle relative probabilità di scelta. Come già accennato Aimsun prevede tre tipi di percorso, a seconda della procedura adottata per definirli:

- *O/D Routes* - ODR -. Definite manualmente dall'utente del software.
- *Paths from preavious Assignment Results* - PAR -. Desunti da precedenti assegnazioni condotte indifferentemente in ambito statico macroscopico, o dinamico mesoscopico o microscopico.
- *Calculated Shortest Paths* - CSP -. Restituiti dallo Shortest Path Alorythm in seno alla procedura di assegnazione dinamica, servendosi della *Initial Cost Function* all'avvio della simulazione, e della *Dynamic Cost Function* nel corso della simulazione, potendosi così distinguere rispettivamente fra *Initial Shortest Paths* - ISP -, e *Dynamic Shortest Paths* - DSP -.

Così il generico veicolo che si accinge ad entrare nella rete per spostarsi fra la  $i$ -esima coppia O/D, potrà essere assegnato in accordo ad uno dei modelli testè mensionati (*User Defined, RC Models*), ad uno dei seguenti percorsi:

$$\left\{ \begin{array}{l} ODR_n^i, n = 1..N_i \\ PAR_m^i, m = 1..M_i \\ ISP_p^i, p = 1..P_i \\ DSP_q^i, q = 1..Q_i \\ i \in I \end{array} \right. \quad (2.25)$$

Nell'apposito campo 'Use of O/D Routes and Path Assignment Results' predisposto nella tab folder 'Route Choice' dell'editor dell'Experiment (riprodotta in Fig. 2.9), lo stesso utente del software può impostare per ciascun vehicle type (i.e. per la relativa Matrice O/D), le aliquote percentuali della rispettiva domanda di trasporto da assegnare secondo i due metodi statici *User Defined* (*O/D Routes* e *PARs*). Per lo stesso vehicle type, il numero di veicoli che adotta invece un modello di scelta discreta - *RC Model* - (sia esso statico del tipo *Fixed*, o dinamico del tipo *Variable*), discende a sua volta dalla domanda complessiva come aliquota residua ottenuta a valle del processo di assegnazione che prevede l'applicazione a cascata dei due anzidetti modelli statici definiti dall'utente e solo in ultimo del modello di scelta discreta, nell'ordine: *ODR Assignment, PAR Assignment, RCM Assignment*.



**Fig. 2.9 - Definizione delle aliquote di domanda da assegnare a percorsi preordinati (ODR e PAR).**

In figura è riportata la tab folder 'Route Choice' dell'editor dell'Experiment, ove, nell'apposito campo 'Use of O/D Routes and Path Assignment Results', è possibile impostare per ciascun vehicle type, le aliquote percentuali della rispettiva domanda di trasporto da assegnare ai due insiemi di percorsi preordinati O/D Routes e PARs, in accordo alle rispettive percentuali di assegnazione a loro volta rispettivamente prestabilite dall'utente o desunte da un'assegnazione preliminare e mantenute invariate durante l'intera simulazione. Il numero di veicoli assegnato secondo il modello di scelta discreta RCM selezionato, scaturisce poi come aliquota residua della domanda complessiva a seguito dell'applicazione dei due modelli statici anzidetti.

Esplicitando la procedura di assegnazione fin qui delineata, lo schema generale del meccanismo di Assegnazione Dinamica - *Dynamic Traffic Assignment* -, si precisa ulteriormente nel seguente:

**Passo 0. Initial Shortest Paths Calculation.**

Calcolo degli shortest paths iniziali per ciascuna coppia O/D, servendosi delle funzioni di costo iniziali.

**Passo 0.1. Initialization.**

Calcolo della *Initial Cost Function* di ciascun arco  $j$ :

$$\forall j \in L: Cost_j = IniCost_j \longleftarrow TFF_j$$

**Passo 0.2. Shortest Path Tree Routine.**

Costruzione, sulla scorta dei costi di arco  $Cost_j$ , dello *Shortest Path Tree* per ciascun centroide di destinazione  $d$ :

$$\forall d \in D : SPT_d$$

**Passo 0.3. Choice Path Set Routine.**

Per ciascuna  $i$ -esima coppia O/D, costruzione del relativo insieme di scelta dei percorsi  $K_i$ , estraendo dallo shortest path tree della destinazione corrispondente,  $SPT_d$ , i percorsi che si diramano dalla rispettiva origine,  $SPcon_{o,d}$  (in numero pari ai connettori del centroide di origine alla rete):

$$\forall i \in I : \text{extract } SPcon_{o,d} \text{ from } SPT_d \text{ to } K_i$$

**Passo 1. Simulation.**

Esecuzione della simulazione per la durata preimpostata (*Simulation Cycle*), assegnando ai percorsi definiti per ciascuna coppia O/D, la frazione di domanda di trasporto ad essa destinata nel dato intervallo di tempo, in accordo col prestabilito modello di assegnazione. Registrazione dei nuovi valori dei parametri di costo restituiti dalla simulazione ed elaborazione dei relativi valori aggregati (i.e. *mean link travel time*).

**Passo 1.1. ODR Assignment.**

Assegnazione della prestabilita aliquota della domanda di trasporto destinata alle O/D Routes in accordo alle rispettive percentuali di assegnazione.

**Passo 1.2. PAR Assignment.**

Assegnazione della prestabilita aliquota della domanda di trasporto residua destinata ai percorsi PAR secondo le rispettive percentuali di assegnazione.

**Passo 1.2. RC Assignment.**

Assegnazione della domanda di trasporto residua all'insieme dei percorsi disponibili per ciascuna coppia O/D,  $K_i$ , secondo le rispettive percentuali di assegnazione calcolate dal modello di scelta discreta RCM selezionato.

**Passo 1.2.1. Choice Probability Calculation.**

Per ciascuna  $i$ -esima coppia O/D, calcolo della probabilità di scelta di ognuno dei percorsi appartenenti al rispettivo insieme di scelta,  $K_i$ , assemblato dal modulo di calcolo dei percorsi:

$$\forall i \in I, \forall k \in K_i : P_k \longleftarrow RC Model \quad (2.26)$$

**Passo 1.2.2. Assignment.**

Esecuzione della simulazione per il prefissato intervallo di tempo (*Simulation Cycle*), generando la frazione della domanda di spostamento associata a ciascuna coppia O/D nel dato intervallo di tempo, ed assegnando in maniera aleatoria ciascun veicolo ad uno fra i percorsi disponibili per la stessa coppia O/D, in accordo alle rispettive probabilità  $P_k$ ,  $k \in K_i$ .

**Passo 2. Path Updating.**

Ricalcolo degli shortest paths sulla scorta dei tempi medi di viaggio desunti dalla simulazione.

**Passo 2.1. Link Cost Function Updating.**

Calcolo della *Dynamic Cost Function* di ciascun arco  $j$ :

$$\forall j \in L: Cost_j = DynCost_j \longleftarrow EstTT_j$$

**Passo 2.2. Shortest Path Tree Routine.**

Per ogni centroide di destinazione  $d$ , ricalcolo del relativo  $SPT_d$  avvalendosi degli aggiornati parametri di costo.

**Passo 2.3. Choice Path Set Routine.**

Aggiornamento dell'insieme di scelta dei percorsi,  $K_i$ , di ciascuna coppia O/D  $i$ -esima.

**Passo 3. Dynamic Rerouting.**

Se il modello di scelta discreta RCM selezionato contempla la possibilità di reindirizzamento dinamico (*Dynamic Rerouting*), aggiornare le probabilità di scelta dei veicoli ad esso abilitati presenti all'interno del sistema (*Guided Vehicles*), con riferimento ai percorsi di cui al punto 2.

**Passo 4.** Ritorno al *Passo 1*.

Nel seguito dell'esposizione si procederà alla disamina dei diversi modelli di assegnazione introdotti nella trattazione fin qui svolta.

## Metodi di Assegnazione *User Defined*

Come già anticipato, con la denominazione *User Defined Assignment* Aimsun indica due modalità di assegnazione in cui la definizione dei percorsi e delle relative percentuali di assegnazione non sono l'esito di un calcolo aleatorio bensì prevalentemente di una scelta deterministica dell'utente del software (che traduce in questa veste la prospettiva del gestore della rete implementata nell'ambiente di simulazione virtuale), rispettivamente:

- *O/D Routes Method*;
- *Path Assignment Results Method*.

Lo stesso utente stabilisce per ciascun vehicle type, nell'apposito campo dell'editor 'Route Choice' del singolo Experiment, le aliquote percentuali della rispettiva domanda di spostamento da assegnare secondo i due metodi.

### **ODR Method**

In questo caso l'utente del software, per ciascuna coppia O/D d'interesse, servendosi di un apposito editor (Fig. 2.10), definisce manualmente i percorsi, denominati *User Defined Routes* ed indicati con la notazione ODR<sup>26</sup>:

$$ODR_n^i, n = 1..N_i \quad (2.27.1)$$

Corrispondentemente fissa le relative percentuali di assegnazione, distinte per le diverse tipologie di veicolo previste, nell'apposito campo predisposto nella tab folder 'Path Assignment' della Matrice O/D espressione della domanda di spostamento del singolo vehicle type vt (Fig. 2.11):

$$P(ODR_n^i, vt), n = 1..N_i, i \in I \quad (2.27.2)$$

con l'unica accortezza di rispettare la condizione di complementarità a 100:

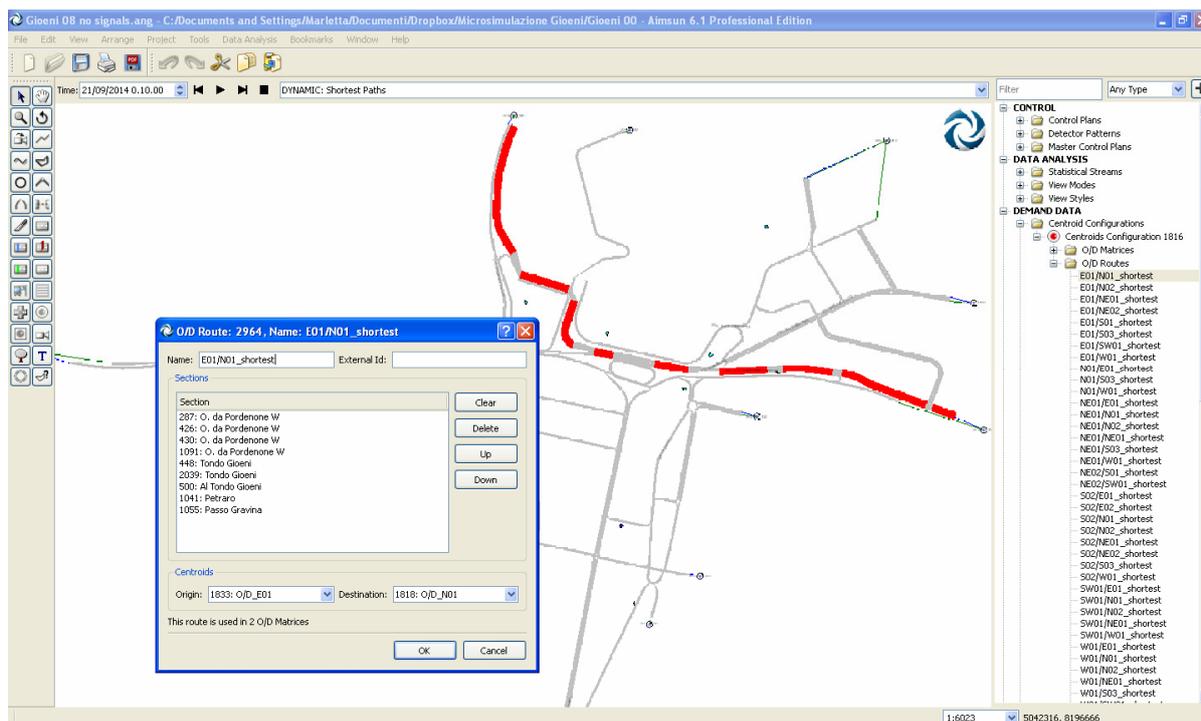
$$\sum_{n=1}^{N_i} P(ODR_n^i, vt) + \sum_{p=1}^{P_i} P(ISP_p^i, vt) \leq 1, \forall i \in I \quad (2.27.3)$$

ove con  $P(ISP_p^i, vt)$ ,  $p = 1..P_i, i \in I$ , si è denotata la probabilità di scelta degli *Initial Calculated Shortest Paths*, che può essere parimenti impostata dall'utente nell'apposito campo della medesima tab folder della Matrice O/D associata al vehicle type vt.

---

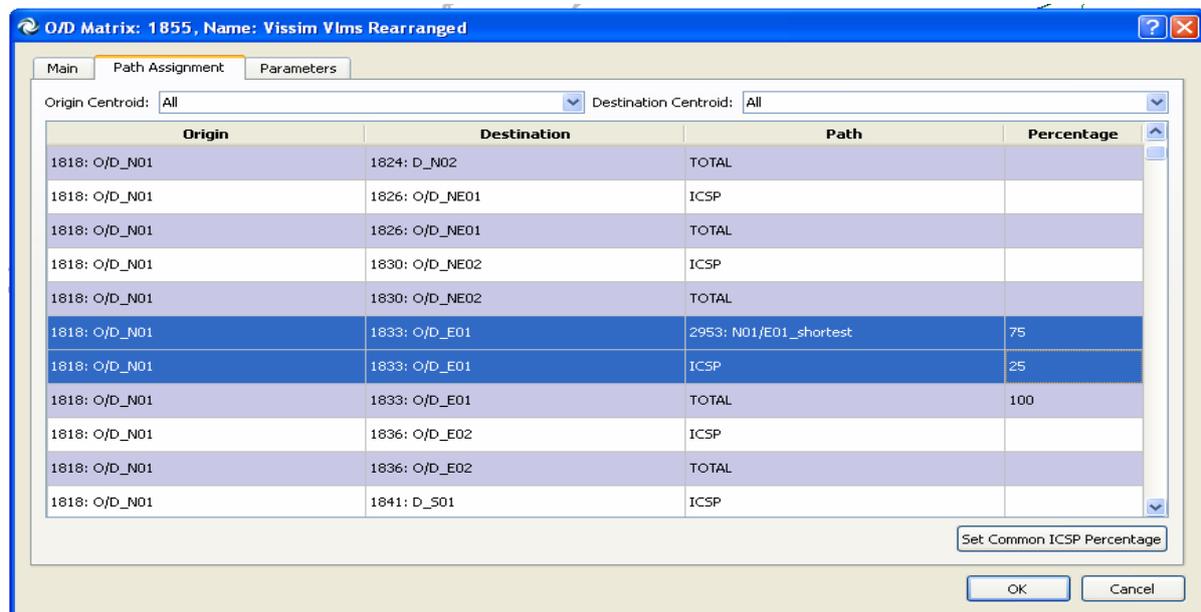
<sup>26</sup> Cfr. §2.1.3.3.2 Rappresentazione della rete e classificazione dei percorsi, pag. 73.

## Modelli Predisposti in Ambiente Aimsun



**Fig. 2.10 - Costruzione delle O/D Routes.**

Aimsun consente, attraverso un apposito editor, di costruire più percorsi user defined - O/D Routes - , selezionando manualmente nel tracciato della rete riprodotto nell'interfaccia grafica del software, le diverse sezioni stradali che li compongono.



**Fig. 2.11 - Impostazione delle percentuali di assegnazione associate alle singole O/D Routes.**

Nell'editor della matrice O/D espressione della domanda di trasporto associata a ciascun tipo di veicolo, è predisposta un'apposita tab folder che riporta l'elenco delle O/D Routes preliminarmente definite dall'utente, per ognuna delle quali nel rispettivo campo 'Percentage', lo stesso utente può precisare la relativa percentuale di assegnazione, avendo però cura che, sommata a quella impostata per l'ISP - Initial Shortest Path -, rispetti il vincolo di complementarietà a 100.

**PAR Method**

Questo metodo utilizza i percorsi e le rispettive percentuali di assegnazione ottenuti quali esiti di preliminari procedure di assegnazione di tipo statico in ambito Macroscopico (servendosi del modulo Macro del simulatore Aimsun), o alternativamente di tipo dinamico in ambito Mesoscopico o Microscopico (avvalendosi dei moduli corrispondenti predisposti in Aimsun). Col termine *Path Assignment Result* si indica, per l'appunto, l'insieme dei percorsi e delle relative percentuali di assegnazione discese da una procedura di assegnazione a se stante precedentemente condotta:

$$\left\{ \begin{array}{l} PAR_m^i \\ P(PAR_m^i, vt) \\ m = 1..M_i, i \in I \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (2.28.1) \\ (2.28.2) \end{array}$$

e tali comunque da soddisfare la condizione di complementarità:

$$\sum_{m=1}^{M_i} P(PAR_m^i, vt) \leq 1, \forall i \in I \quad (2.28.3)$$

A ben vedere, sebbene tale metodo venga annoverato fra gli *User Defined*, in esso la discrezionalità dell'utente interviene solo nella scelta della procedura di assegnazione dalla quale far discendere i Path Assignment Results e nella definizione dell'aliquota di domanda di trasporto da assegnare secondo lo stesso metodo. Percorsi e relative percentuali di assegnazione sono, sì, predeterminati e mantenuti invariati durante l'intera simulazione come per il metodo ODR, ma a differenza di quest'ultimo, in quanto risultato a loro volta di un processo di assegnazione, sono meno condizionati dalle scelte soggettive del modellatore, bensì correlati più al funzionamento del sistema (sebbene secondo prescelti modelli di assegnazione non necessariamente stocastici e dinamici).

## Modelli di Scelta Discreta - *Route Choice Models* -

I modelli di scelta complessivamente denominati in Aimsun *Route Choice Models*, mutuando i principi della *Teoria di Scelta Discreta - Discrete Choice Theory* -, emulano il procedimento di selezione del percorso operato da ciascun viaggiatore che si accinga a compiere uno spostamento da una data origine verso una prescelta destinazione, riconducendolo al calcolo delle probabilità di scelta fra un insieme discreto di alternative espressa come funzione delle rispettive *Utilità*. Nell'ambito applicativo specificamente trasportistico di nostro interesse e nel contesto di modellazione del microsimulatore Aimsun, l'insieme di alternative è rappresentato dall'insieme di percorsi disponibili  $K_i$  restituito in ogni passo di simulazione per ciascuna  $i$ -esima coppia O/D, dal modulo software deputato al calcolo dei percorsi - *Shortest Path Component* -, e l'utilità associata a ciascuna di esse è espressa dall'opposto del corrispondente *Costo di Percorso* CP, somma dei costi dei singoli archi che lo compongono:

$$U_k = -CP_k \quad (2.29.1)$$

$$CP_k = \sum_{j \in Path_k} Cost_j \quad (2.29.2)$$

Come anticipato, all'interno della categoria 'Route Choice Models', Aimsun distingue due classi a seconda che l'assegnazione proceda in maniera deterministica statica o stocastica dinamica, rispettivamente denominate:

- *Fixed Route Models*;
- *Variable Route Models*.

Nella prima rientrano metodi di assegnazione deterministici, più propriamente noti in letteratura con il nome di *Modelli di Carico Deterministici - Deterministic Network Loading Models (DNL)* -, caratterizzati dalla costanza dei parametri di costo (in questa accezione va intesa la connotazione di staticità), e dunque tali da non cogliere i fenomeni di congestione.

Nella seconda rientrano, invece, i *Modelli Stocastici di Scelta Discreta* propriamente detti, nei quali il fenomeno della congestione è reso attraverso l'aggiornamento nel passo dei parametri di costo sulla scorta dei dati raccolti durante la simulazione (*Data Gathering Cycle*). Si tratta di modelli che differiscono da quelli che nella Teoria delle Reti di Trasporto sono classicamente denominati *Modelli Stocastici di Equilibrio Utente - Stochastic User Equilibrium (SUE)* -, poiché i costi di arco non sono restituiti da

espressioni analitiche in funzione dei flussi (come invece in ambito statico macroscopico), bensì desunti dalla simulazione<sup>27</sup> del moto dei singoli veicoli (ambito dinamico microscopico). Detti modelli non assicurano dunque il conseguimento dell'*Equilibrio Utente* coerentemente al *Primo Principio di Wardop*, ma cercano entro certi margini di approssimarlo.

### Fixed Route Models

I modelli di assegnazione appartenenti a questa categoria, predisposti in ambiente Aimsun sono due:

1. *Fixed using Travel Times calculated under Free-Flow Conditions;*
2. *Fixed using Travel Times calculated at the end of a Warm-up Period.*

Si tratta come già detto, di modelli di carico della rete di tipo deterministico - *DNL* -, che procedono ad una *Assegnazione a Tutto o Niente - All or Nothing Assignment (AoN)* -, secondo la procedura di seguito sinteticamente descritta.

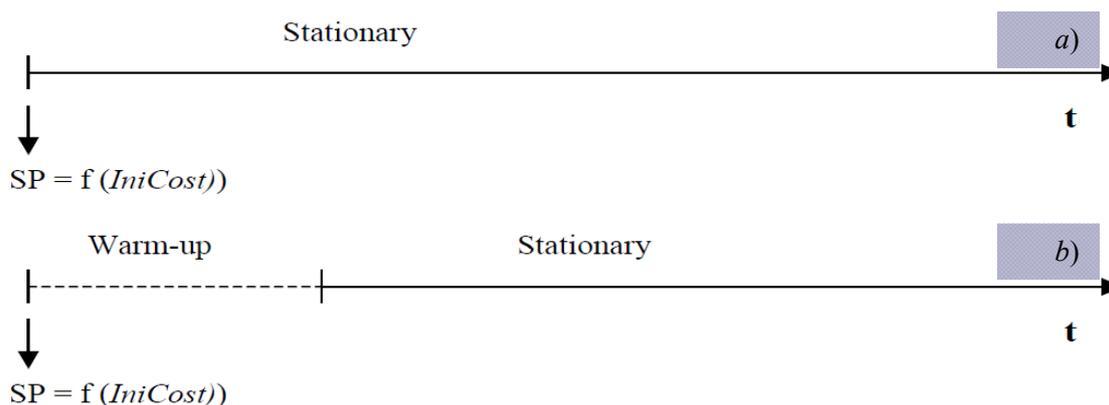
Ad un prescelto istante della simulazione (rispettivamente all'avvio della stessa o al termine del periodo di warm-up), vengono calcolati gli alberi dei percorsi - *Shortest Path Trees (SPT)* - associati a ciascun centroide di destinazione, da questi viene quindi estratto per ciascuna coppia O/D il percorso più breve e ad esso, infine, assegnato il 100% dello domanda di spostamento corrispondente alla rispettiva coppia O/D. I percorsi più brevi calcolati al prescelto istante vengono mantenuti per tutto l'orizzonte temporale della simulazione, e la domanda di trasporto viene sì caricata per gradi attraverso i successivi intervalli di simulazione (*Simulation Cycles*), ma sempre interamente assegnata al percorso più breve. I veicoli generati fra ciascuna coppia O/D seguono sempre lo stesso percorso che collega detta coppia, non è dunque prevista la possibilità di diversificare la scelta del percorso fra veicoli successivamente immessi nel sistema (*Initial Assignment*), ne tantomeno la possibilità da parte del singolo veicolo di modificare rotta durante il viaggio (*En-route Assignment*).

Sebbene rientrino fra i modelli di scelta discreta, essi non riproducono dunque verosimilmente il meccanismo di scelta realmente attuato dagli utenti di una rete di trasporto, bensì una sua estrapolazione ideale.

---

<sup>27</sup> Cfr '2.1.3.3.3 Definizione della Funzione di Costo di un arco', pagg.74-78.

Adottando il modello *Fixed using Travel Times calculated under Free-Flow Conditions*, i percorsi sono calcolati all'avvio della simulazione - *Initial Shortest Paths (ISP)* -, avvalendosi dei costi iniziali di ciascun arco - *Initial Costs*<sup>28</sup> -. Qualora sia prevista una fase preliminare di Warm-up, i percorsi non vengono ricalcolati al termine della stessa, bensì gli stessi initial shortest paths sono mantenuti per tutto il successivo periodo di simulazione. La Fig. 2.12.a-b di seguito riprodotta illustra la tempistica di aggiornamento delle funzioni di costo.

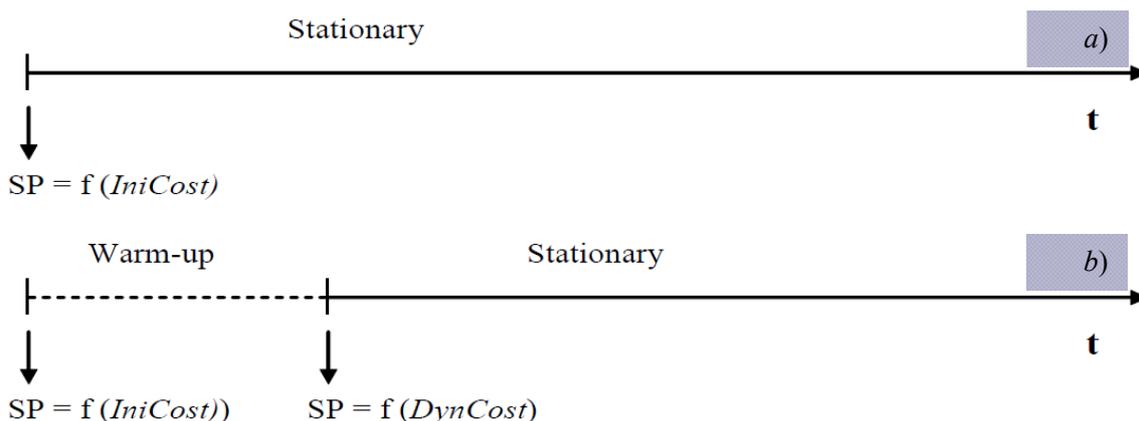


**Fig. 2.12.a-b - Scansione temporale che regola il calcolo dei percorsi secondo il modello *Fixed using travel times calculated under free-flow conditions*.**

Predisposto o meno un periodo di simulazione preliminare - *Warm-up Period* - (rispettivamente casi b. ed a.), il modulo software deputato provvederà al calcolo dei percorsi più brevi esclusivamente all'avvio della simulazione.

Il modello *Fixed using Travel Time calculated at the end of a Warm-up Period* opera in maniera analoga al precedente, ad eccezione del caso in cui sia predisposto un periodo di Warm-up. In questo caso i percorsi utilizzati durante la fase transitoria iniziale sono calcolati all'avvio della simulazione avvalendosi degli Initial Costs dei singoli archi, così come come per il modello *Fixed using Travel Times calculated under Free-Flow Conditions*. Al termine però del periodo di Warm-up, vengono calcolati nuovi shortest paths servendosi delle *Dynamic Cost Functions* ottenute a partire dai dati statistici raccolti durante la simulazione preliminare di warm-up. La Fig. 2.13.a-b di seguito riportata illustra la scansione temporale di calcolo degli shortest paths, in ambedue i casi di presenza o meno di un periodo di simulazione preliminare - *Warm-up Period* -.

<sup>28</sup> Cfr. 'Initial Cost Function', pagg. 76-78.



**Fig. 2.13.a-b - Scansione temporale che regola il calcolo dei percorsi secondo il modello *Fixed using travel times calculated at the end of a Warm-up Period*.**

Secondo questo modello di assegnazione, qualora sia predisposta una fase di simulazione preliminare - *Warm-up Period*-, alla sua conclusione i percorsi, inizialmente calcolati sulla scorta dei costi in condizioni di flusso nullo - *Initial Costs* -, vengono aggiornati servendosi dei costi misurati durante il transitorio iniziale - *Dynamic Costs* -. I nuovi percorsi così ottenuti vengono poi mantenuti invariati per il resto del processo di simulazione

Mentre il modello 1. è a tutti gli effetti un modello di carico che non tiene in alcun modo conto del livello di congestionamento della rete, poiché i tempi di viaggio sono calcolati in condizioni di flusso nullo, come tali del tutto sganciati dalle condizioni di deflusso del sistema<sup>29</sup>; il modello 2. può essere sì, ancora riguardato come un *modello di carico* dal punto di vista strettamente operativo, essendo anche in questo caso i parametri di costo costanti per l'intera durata della simulazione, ma, a differenza del precedente, essendo i tempi di viaggio ricavati dalla preliminare simulazione condotta nella fase di warm-up, riesce a tenere conto dei fenomeni di congestionamento<sup>30</sup>, siapur circoscritti al solo periodo di transitorio iniziale.

<sup>29</sup> I costi utilizzati in questo modello sono puramente teorici in quanto espressi esclusivamente in termini dei tempi di viaggio a flusso nullo e dell'attrattività, dunque prevalentemente basati sulle distanze e sulle velocità massime consentite.

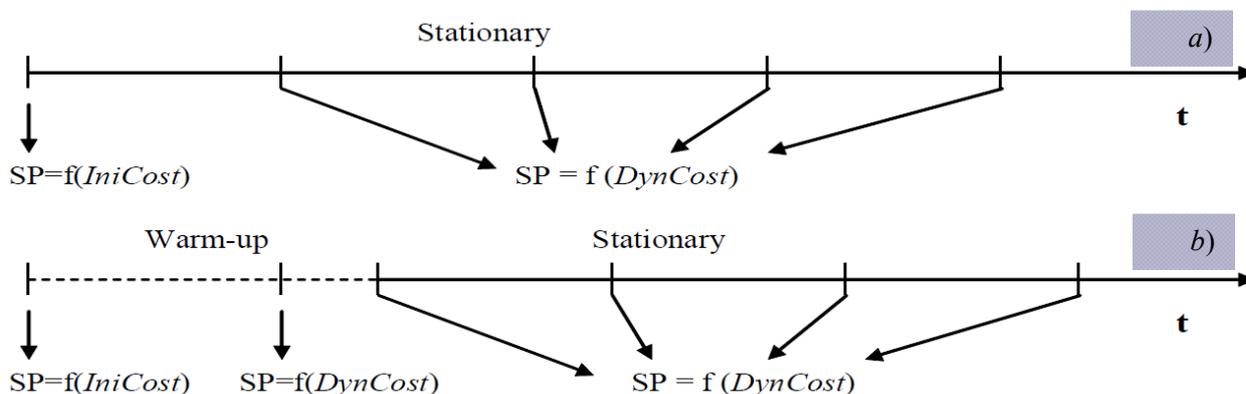
<sup>30</sup> In questo caso i costi, essendo calcolati a partire dai tempi di viaggio desunti dalla simulazione preliminare di warm-up, tengono conto dall'interazione fra i veicoli e dunque indirettamente delle condizioni di deflusso della rete sebbene per il solo lasso temporale di warm-up.

## Variable Route Models

Con la denominazione *Variable Route Models* Aimsun indica sinteticamente tutti i *Modelli Stocastici di Scelta Discreta* implementati nel modulo di scelta dei percorsi - *Route Choice Component* - del Microsimulatore, rispettivamente: *Binomiale*, *Proporzionale*, *Logit Multinominale*, *C-Logit Multinominale*.

Solo nel caso in cui venga selezionato uno di questi modelli, la procedura di assegnazione si articola effettivamente nelle quattro fasi riportate nello schema a pag.71, contemplando in particolare le fasi 1 e 2, ovvero l'aggiornamento dei percorsi e delle corrispondenti probabilità di scelta attraverso i successivi passi di simulazione, e la possibilità del reindirizzamento dinamico dei veicoli durante lo spostamento.

All'avvio della simulazione, che sia previsto o meno un periodo di Warm-up, gli shortest paths sono calcolati servendosi per ciascun arco delle *Initial Cost Functions*, ovvero dei tempi di viaggio a flusso libero - *Free-Flow Travel Times* - (Passo 0.). Durante la simulazione, nuovi percorsi vengono calcolati in ciascun successivo intervallo di assegnazione - *Route Choice Cycle* - avvalendosi, attraverso le *Dynamic Cost Functions*, dei tempi di viaggio raccolti per ciascun arco nell'intervallo precedente (Passi 1. e 2.). La scansione temporale che regola il calcolo degli shortest paths è illustrata nella Fig. 2.14 di seguito riportata.



**Fig. 2.14 - Scansione temporale che regola il calcolo dei percorsi secondo i *Variable Route Models*.**

Adottato uno dei modelli di scelta discreta raccolti complessivamente in Aimsun sotto la denominazione *Variable Routes Models*, il modulo software deputato provvede ad aggiornare l'insieme di scelta dei percorsi per ciascuna coppia O/D,  $K_i$ , attraverso i successivi intervalli di assegnazione, avvalendosi dei tempi di viaggio desunti nel passo precedente di simulazione. Qualora sia stato predisposto un periodo di warm-up, il simulatore provvede comunque a ricalcolare i percorsi al termine dello stesso, sia che esso coincida o meno con l'intervallo di assegnazione che scandisce per l'appunto il processo di aggiornamento dei percorsi (caso b.).

Nel seguito della trattazione si procede alla disamina dei singoli modelli di scelta discreta testè elencati.

### **1. Binomial Route Choice Model**

Nel modello di scelta Binomiale la probabilità di scelta di ciascun percorso è espressa per l'appunto da una distribuzione di tipo binomiale. Denotati dunque con  $k$  e  $p$  rispettivamente il numero di percorsi disponibili e la 'probabilità di successo', tale modello è descritto dalla *variabile aleatoria binomiale* di parametri  $(k, p)$ :

$$X(k, p) \quad (2.30.1)$$

e la relativa *funzione di massa di probabilità*:

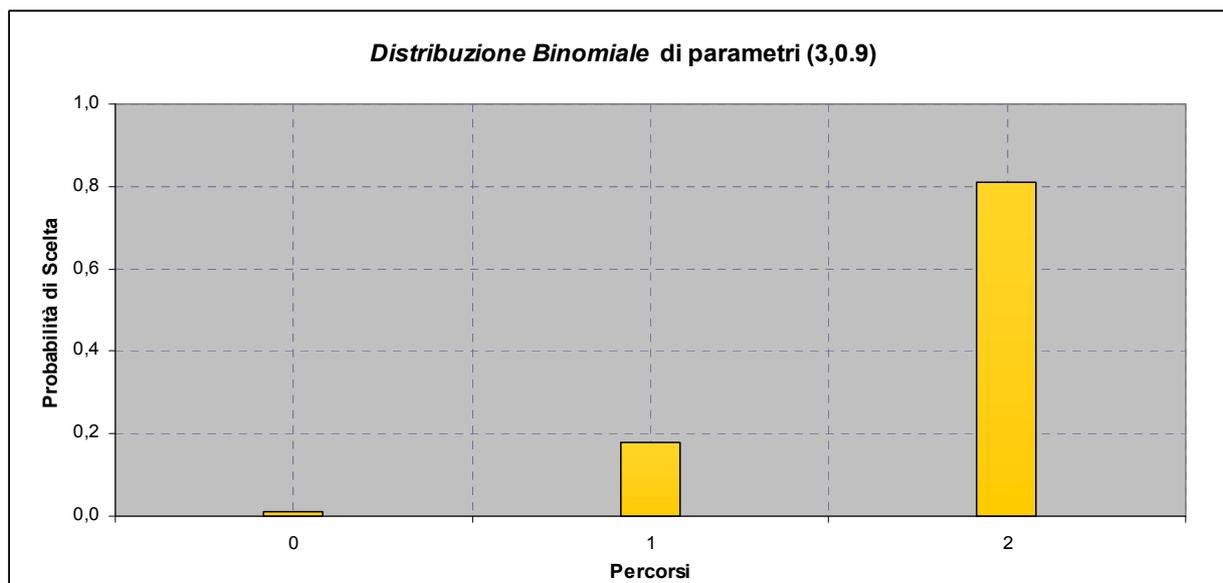
$$P(X = i) = \binom{k}{i} p^i (1 - p)^{k-i}, \quad i = 0, 1, \dots, k \quad (2.30.2)$$

Il modello binomiale non considera i costi di viaggio nel processo decisionale, bensì esclusivamente l'istante di tempo in cui il singolo percorso è stato calcolato. In quest'ottica, la scelta del valore da assegnare al parametro  $p$  gioca un ruolo determinante nella caratterizzazione del criterio di scelta degli utenti della rete, nella misura di seguito precisata:

- a. piccoli valori di  $p$  determinano una maggiore propensione alla scelta dei percorsi più vecchi;
- b. elevati valori di  $p$  comportano, invece, la scelta più frequente dei percorsi più recenti.

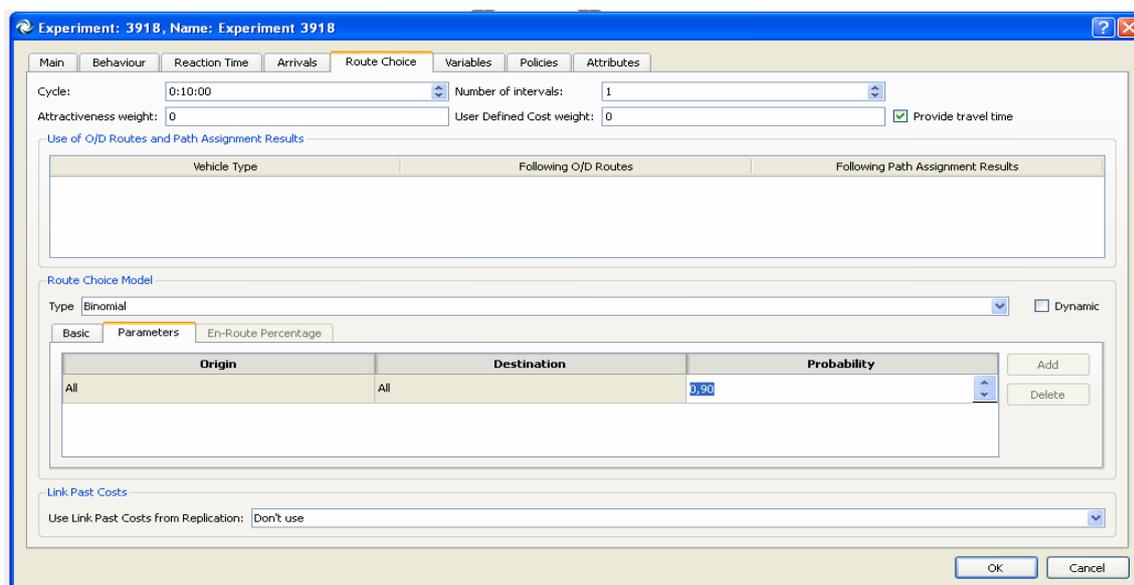
Un esempio esplicativo è riportato in Fig. 2.15.

Il valore di tale parametro può essere impostato dall'utente del software, separatamente per le diverse coppie O/D, nell'apposito campo della scheda '*Parameters*' predisposta nella tab folder '*Route Choice*' della finestra di dialogo dell'*Experiment*, qualora sia stato preliminarmente selezionato il RC model di tipo Binomial (Fig. 2.16).



**Fig. 2.15 - Probabilità di scelta fra tre percorsi secondo il Modello Binomiale.**

La figura riproduce la distribuzione della frequenza di scelta in una rete formata da tre percorsi,  $k=3$ . Volendo privilegiare la selezione dei percorsi di più recente individuazione, l'esempio fa riferimento ad un valore della *probabilità di successo* piuttosto elevato,  $p=0.9$ . I valori della *variabile binomiale*  $X(3,0.9)$ , rispettivamente  $X = 0$ ,  $X = 1$ ,  $X = 2$ , sono associati agli ultimi tre percorsi calcolati in ordine di tempo. Assumendo di aver impostato un *Simulation Cycle* di 5 min, e che siano trascorsi 45 min di simulazione: i tre percorsi saranno stati calcolati rispettivamente agli istanti 35:00, 40:00 e 45:00. In accordo con la distribuzione Binomiale, le probabilità di scelta dei tre percorsi, ordinati dal più vecchio al più recente, sono:  $P(X = 0) = 0.01$ ,  $P(X = 1) = 0.18$ ,  $P(X = 2) = 0.81$ .



**Fig. 2.16 - Impostazione del parametro di calibrazione del Modello di Scelta Binomiale in Aimsun.**

I valori del parametro di calibrazione della funzione di scelta discreta di tipo binomiale, possono essere impostati separatamente per le diverse coppie O/D, nell'apposito campo della scheda 'Parameters' del Route Choice Model, predisposta nella tab folder 'Route Choice' del singolo Experiment, qualora si sia preliminarmente selezionata la voce 'Binomial' nel campo 'Type' della stessa finestra di dialogo.

## 2. Proportional Route Choice Model

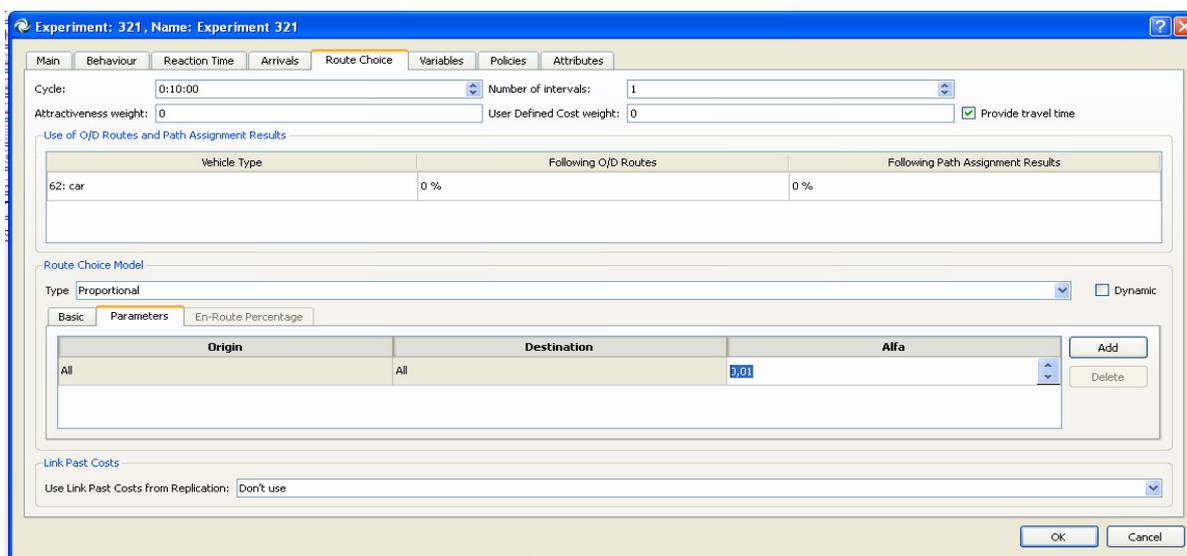
In accordo a questo modello di scelta discreta, la probabilità che il generico utente che si sposta fra la  $i$ -esima coppia O/D, scelga il  $k$ -esimo percorso fra quelli disponibili raccolti nell'insieme  $K_i$ , è espressa analiticamente dalla seguente formulazione:

$$P_k = \frac{CP_k^{-\alpha}}{\sum_{j \in K_i} CP_j^{-\alpha}} \quad (2.31)$$

avendo denotato con  $CP_j$  il costo del  $j$ -esimo percorso, generalmente identificato col tempo di viaggio espresso in secondi:

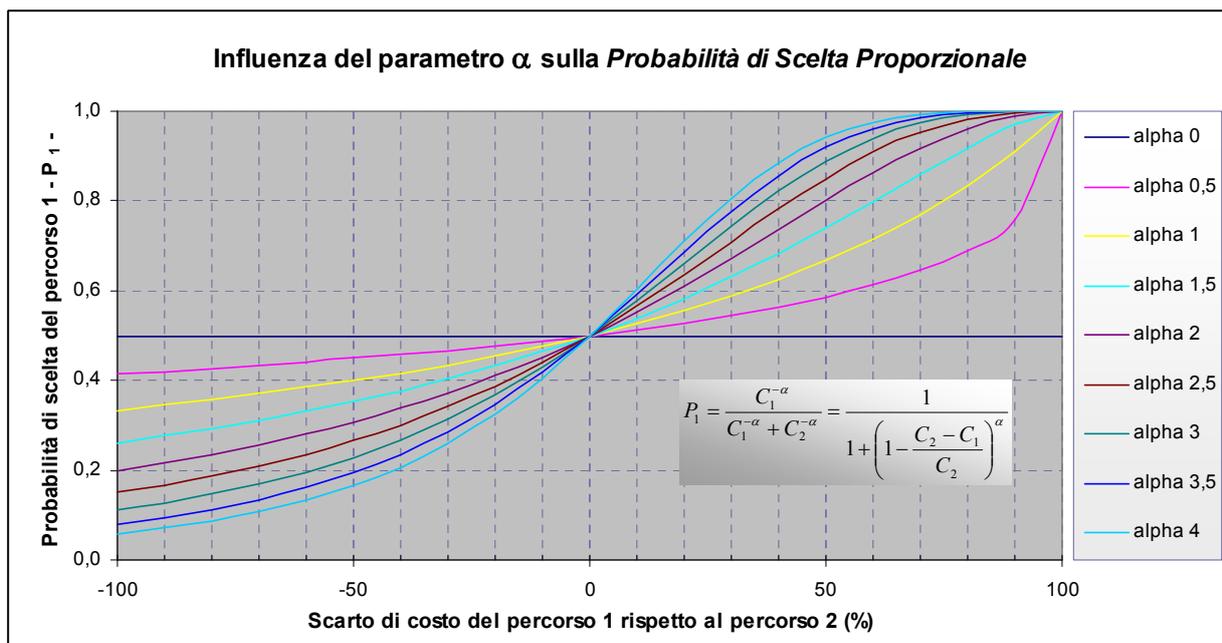
$$CP_j = tt_j \quad (2.32)$$

Il parametro  $\alpha$  tiene conto dell'accuratezza nella stima dei tempi di viaggio (ovvero dei costi), da parte degli utenti; può essere impostato dal gestore del software nell'apposito campo della tab folder 'Route Choice' di ciascun *Experiment* (Fig. 2.17), qualora sia stato preventivamente selezionato il RC model di tipo Proportional, ed opportunamente modificato per calibrare gli effetti che piccoli cambiamenti nei tempi di viaggio possono produrre nella scelta operata dai singoli viaggiatori (Fig. 2.18).



**Fig. 2.17 - Impostazione del parametro di calibrazione del Modello di Scelta Probabilistico in Aimsun.**

I valori del parametro di calibrazione della funzione di scelta discreta di tipo probabilistico, possono essere impostati separatamente per le diverse coppie O/D, nell'apposito campo della scheda 'Parameters' del Route Choice Model, predisposta nella tab folder 'Route Choice' del singolo Experiment, qualora si sia preliminarmente selezionata la voce 'Proportional' nel campo 'Type' della stessa finestra di dialogo.



**Fig. 2.18 - Sensibilità della Probabilità di Scelta Proporzionale al parametro di calibrazione  $\alpha$ .**

Con riferimento ad una configurazione che preveda due soli percorsi, il diagramma illustra come varia l'andamento della probabilità di scelta di tipo proporzionale in funzione del parametro di calibrazione  $\alpha$ , al crescere della differenza percentuale di costo fra i due percorsi. Come si evince, per  $\alpha=0$  vige l'equiprobabilità, gli utenti scelgono cioè il percorso indifferentemente; al crescere dello stesso parametro aumenta, invece, la sensibilità degli utenti alle differenze di costo fra le alternative disponibili (per  $\alpha=1$  s'instaura una proporzionalità inversa); per valori di  $\alpha$  molto elevati, scarti anche minimi nei costi di percorso producono differenze significative nelle probabilità di scelta.

Per  $\alpha = 1$  in particolare, la probabilità di scelta è inversamente proporzionale al costo del relativo percorso, mentre per  $\alpha = 0$  la scelta delle diverse alternative diventa *equiprobabile*, ovvero tutti i percorsi disponibili per la data coppia O/D hanno la stessa probabilità di essere selezionati.

### 3. Multinomial Logit Route Choice Model

Secondo tale modello di scelta discreta, la probabilità di scelta di un dato percorso,  $k$ , fra tutti i percorsi alternativi  $K_i$  che collegano una data coppia O/D,  $i$ , è espressa dalla distribuzione del tipo *logistic* di seguito riportata:

$$P_k = \frac{e^{\theta U_k}}{\sum_{j \in K_i} e^{\theta U_j}} \quad (2.33.1)$$

che può essere riscritta in maniera equivalente:

$$P_k = \frac{1}{1 + \sum_{j \neq k \in K_i} e^{\theta(U_j - U_k)}} \quad (2.33.2)$$

Ove con  $U_j$  si è denotata la *utilità percepita* associata al  $j$ -esimo percorso - *j-eth Path Perceived Utility* -, definita come l'opposto del costo di percorso ovvero del tempo di viaggio stimato dall'utente, espresso in ore:

$$U_j = -\frac{CP_j}{3600} = -\frac{tt_j}{3600} \quad (2.34)$$

E con  $\theta$  un parametro di calibrazione - *shape factor* - che assolve a due funzioni:

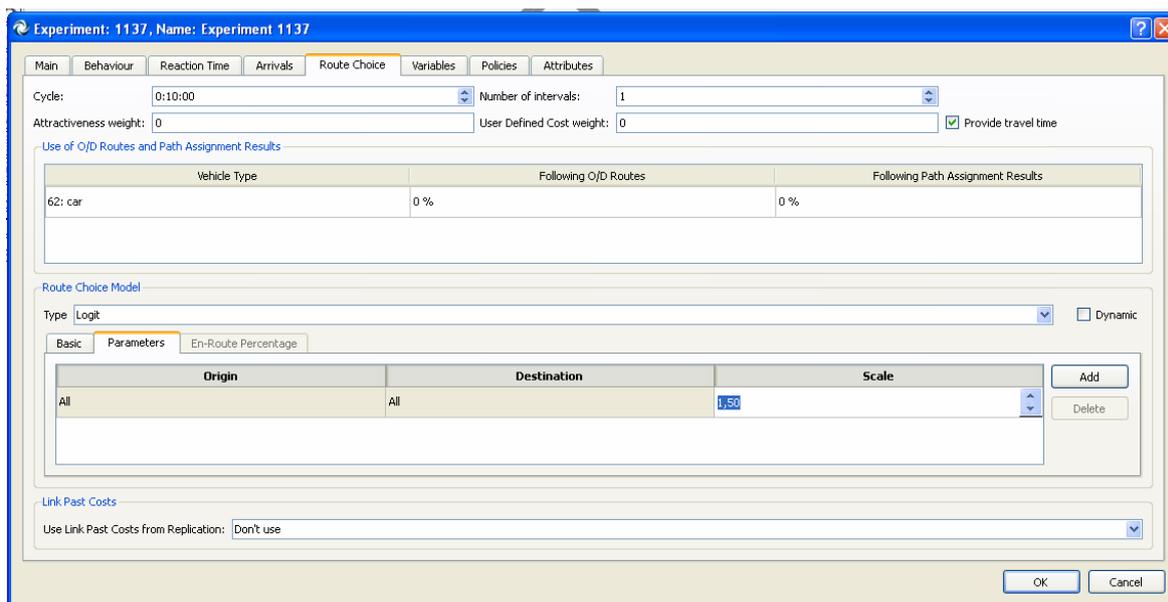
1. *fattore di scala* - Rende la probabilità di scelta indipendente dalle unità di misura dell'utilità;
2. *fattore di calibrazione della varianza dei tt* - Influenza la deviazione standard della distribuzione dei tempi di viaggio attesi lungo il generico percorso:

$$\text{var}(tt_j) = \frac{\pi^2}{6\theta^2} \quad (2.35)$$

per cui si distinguono due casi:

- 2.a.  $\theta < 1$ . La deviazione standard della distribuzione dei tempi di viaggio attesi è significativa, il che equivale ad assumere che gli utenti non sono in grado di stimare in maniera accurata i tempi di viaggio e dunque di cogliere le differenze fra i diversi percorsi, ovvero le probabilità di scelta delle varie alternative risultano paragonabili (*equiprobability*);
- 2.b.  $\theta > 1$ . La deviazione standard della distribuzione dei tempi di viaggio attesi è contenuta, la percezione che gli utenti hanno dei tempi di viaggio è più accurata, quindi la differenza fra le probabilità di scelta delle diverse alternative risulta più spiccata.

Il parametro può essere opportunamente impostato dal gestore del software nell'apposito campo della tab folder '*Route Choice*' di ciascun *Experiment* (qualora sia stato preventivamente selezionato il RC model di tipo Logit), per calibrare la portata degli effetti di piccoli cambiamenti nei tempi di viaggio sulla scelta operata dai singoli viaggiatori (Fig. 2.19).



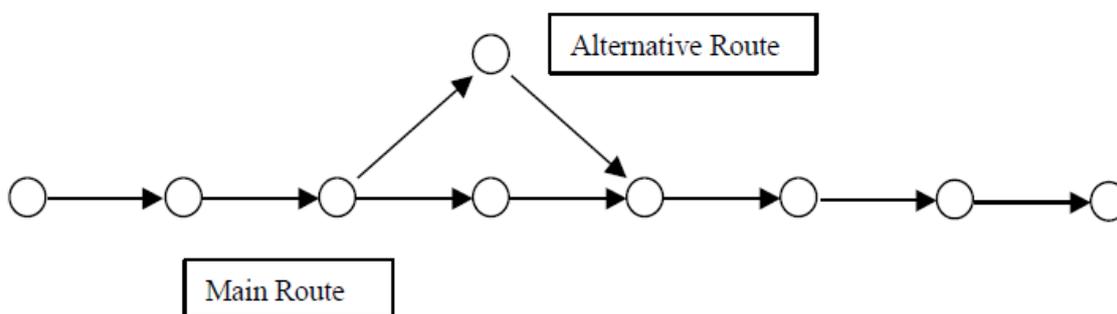
**Fig. 2.19 - Impostazione del parametro di calibrazione del *Modello di Scelta Logit* in Aimsun.**

I valori del parametro di calibrazione della funzione di scelta discreta di tipo logit, possono essere impostati separatamente per le diverse coppie O/D, nell'apposito campo della scheda 'Parameters' del Route Choice Model, predisposta nella tab folder 'Route Choice' del singolo Experiment, qualora si sia preliminarmente selezionata la voce 'Logit' nel campo 'Type' della stessa finestra di dialogo.

A differenza della funzione di scelta di tipo proporzionale, nella *Multinomial Logit* i costi dei vari percorsi non figurano direttamente come termini di una frazione, bensì quali argomenti di esponenziali a loro volta termini di un rapporto. Ciò significa che il tasso di variabilità della probabilità di scelta del percorso al variare dei tempi di viaggio stimati dall'utente è inferiore rispetto a quello che si attinge nel modello proporzionale, in quanto mitigato attraverso l'esponenziale; in altri termini la sensibilità di scelta degli utenti agli scarti dei costi stimati per le diverse alternative è più contenuta. Ciò significa anche che le probabilità di scelta sono meno suscettibili agli errori di stima dei tempi di viaggio commessi dagli utenti.

#### 4. Multinomial C-Logit Route Choice Model

Come evidenziato da alcuni studi condotti dalla equipe del Prof. Cascetta<sup>31</sup>, il modello Logit manifesta la tendenza a generare delle oscillazioni nella selezione dei percorsi, dando luogo ad un effetto “*flip-flop*” che determina un’instabilità nel funzionamento del sistema. Tale inconveniente è prevalentemente riconducibile alla incapacità della funzione *Logit* di distinguere due o più percorsi alternativi qualora sussista fra di essi un elevato *grado di sovrapposizione - overlapping degree* - (come nell’esempio riportato in Fig. 2.20).



**Fig. 2.20 - Rappresentazione grafica di due percorsi con elevato grado di sovrapposizione.**

L’instabilità nell’utilizzo delle rotte di viaggio può essere significativamente ridotta operando su due livelli: su scala topologica, qualora la rete consti di percorsi alternativi con grado di sovrapposizione ridotto o addirittura nullo; su scala procedurale, calibrando opportunamente il fattore di forma  $\theta$  e reiterando frequentemente il calcolo dei percorsi. Tuttavia, pur adottando gli accorgimenti procedurali appena menzionati, nel caso di reti molto estese con numerosi percorsi alternativi fra una stessa coppia O/D, alcuni dei quali possono inevitabilmente esibire un certo grado di sovrapposizione, il modello di scelta discreta *Logit* potrebbe ancora manifestare le carenze di cui sopra.

Per ovviare agli inconvenienti del modello *Logit*, a partire da quest’ultimo è stato sviluppato dal Cascetta<sup>32</sup> un modello più evoluto, denominato *C-Logit*, secondo il quale la probabilità di scelta di ciascun percorso  $k$  appartenente all’insieme di percorsi alternativi  $K_i$  che collegano la generica  $i$ -esima coppia O/D, è espressa da:

<sup>31</sup> Cfr. Bibliografia: Cascetta E., [10], pag. 130.

<sup>32</sup> Cfr. Bibliografia: Cascetta E., [9], pag. 130.

$$P_k = \frac{e^{\theta(U_k - CF_k)}}{\sum_{j \in K_i} e^{\theta(U_j - CF_j)}} \quad (2.36.1)$$

ove  $U_j$  rappresenta l'*utilità percepita* associata al generico percorso  $j$  che collega la  $i$ -esima coppia O/D e  $\theta$  il *fattore di forma*, così come nella formulazione *Logit*.

Come si nota, il modello *C-Logit* si distingue dal *Logit* per l'introduzione di un nuovo parametro  $CF_j$  denominato *fattore di comunanza - Commonality Factor* - definito, per ciascun percorso  $j$ , dalla seguente espressione analitica:

$$CF_j = \beta \cdot \ln \sum_{p \in K_i} \left( \frac{l_{pj}}{\sqrt{l_p l_j}} \right)^\gamma \quad (2.36.2)$$

con il seguente significato dei simboli:

- $l_j$  lunghezza del generico percorso  $j \in K_i$ ;
- $l_{pj}$  lunghezza del tratto di sovrapposizione fra i due percorsi  $p$  e  $j$  (i.e. somma della lunghezza degli archi comuni ai due percorsi);
- $\beta$  e  $\gamma$  parametri di calibrazione del commonality factor, ambedue non negativi.  $\gamma$  è dimensionale;  $\beta$  ha le dimensioni di un tempo, assolve infatti anche la funzione di fattore di scala del  $CF$ , traducendo quest'ultimo in una grandezza dimensionalmente omogenea ad un'utilità (come richiesto dalla stessa espressione in cui figura come addendo di una utilità).

Come si evince dalla stessa formulazione, il *commonality factor* interviene sotto forma di un costo (ha le stesse dimensioni di un'utilità ed è preceduto dal segno meno), ed assolve alla funzione di modulare l'utilità complessiva del percorso in relazione al grado di sovrapposizione con percorsi simili. Più in dettaglio il  $CF_j$  è direttamente proporzionale, secondo la relazione logaritmica su riportata, al grado di sovrapposizione del generico percorso  $j$  con gli altri percorsi alternativi; quindi percorsi significativamente sovrapposti hanno un commonality factor maggiore e dunque un'utilità minore rispetto a percorsi simili. In questo processo i due parametri  $\beta$  e  $\gamma$  consentono, attraverso il *commonality factor*, di modificare il peso del *grado di sovrapposizione* rispetto al costo del percorso nella formulazione della scelta di percorso. A valori più elevati di  $\beta$  ed, in misura minore, di  $\gamma$ , corrisponde un peso via via maggiore del grado di sovrapposizione fino alla condizione limite in cui quest'ultimo può esercitare una influenza sulla probabilità di scelta

maggiore della stessa utilità (i.e. tempo di viaggio), associata al percorso, determinando probabilità più elevate che gli utenti scelgano percorsi più lunghi non sovrapposti rispetto a percorsi più brevi ma sovrapposti.

Anche in questo caso il software consente di impostare i valori dei parametri  $\theta$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  negli appositi campi predisposti nella tab folder “Route Choice” di ciascun *Experiment*, qualora sia stato preventivamente selezionato il RC model di tipo C-Logit. Di norma, la letteratura suggerisce di adottare i seguenti range di valori:

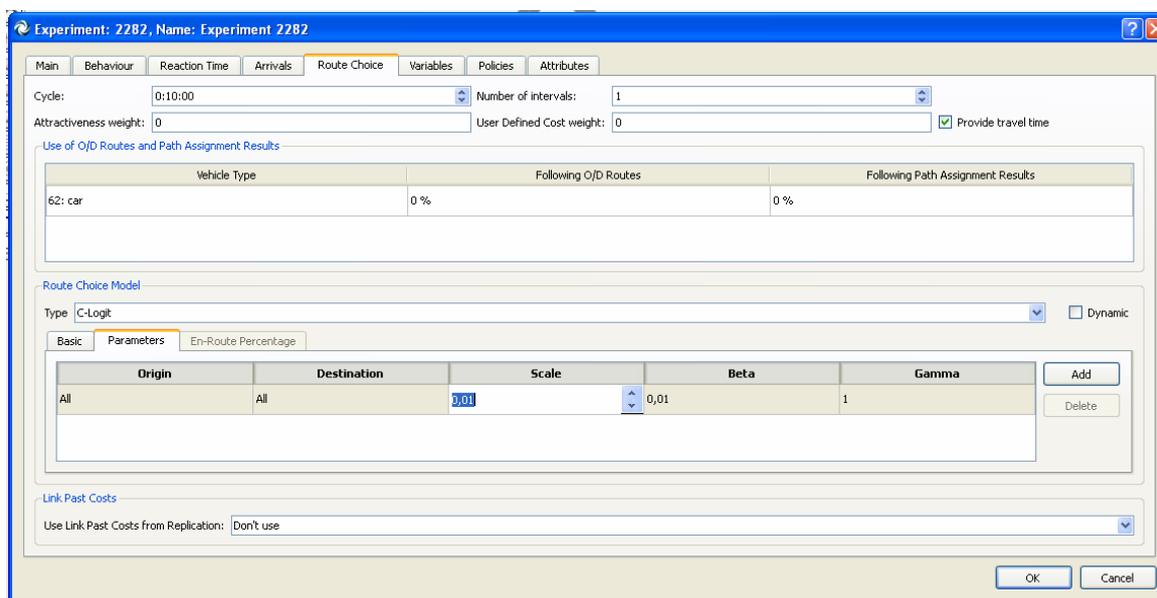
$$0 \leq \gamma \leq 2 \quad (2.37.1)$$

$$tt_{\min} \leq \beta \leq tt_{\max} \quad (2.37.2)$$

ove:

$$tt_{\min} = \min_{j \in K_i} \{CP_j\}, \quad tt_{\max} = \max_{j \in K_i} \{CP_j\} \quad (2.37.3)$$

rappresentano rispettivamente il minimo e massimo dei tempi di viaggio corrispondenti a tutte le possibili rotte alternative che collegano la generica coppia O/D,  $i$ , appartenente all’insieme  $I$  di tutte le coppie di centroidi O/D della rete.



**Fig. 2.21- Impostazione dei parametri di calibrazione del Modello di Scelta C-Logit in Aimsun.**

I valori dei parametri di calibrazione della funzione di scelta discreta di tipo C-logistic, possono essere impostati separatamente per le diverse coppie O/D, nell’apposito campo della scheda ‘Parameters’ del Route Choice Model, predisposta nella tab folder ‘Route Choice’ del singolo Experiment, qualora si sia preliminarmente selezionata la voce ‘C-Logit’ nel campo ‘Type’ della stessa finestra di dialogo.

## 2.2 Modellazione della condotta di guida in ambiente

### Aimsun

Lo stato dinamico (i.e. velocità), e la posizione dei singoli veicoli che attraversano la rete riprodotta in ambiente Aimsun, vengono aggiornati ad ogni passo della simulazione - *Simulation Step* - in accordo con i due algoritmi che costituiscono il nucleo fondamentale del modello complessivo di comportamento dei guidatori - *Vehicle Behavioural Model* - :

- a. *Car-Following Model*;
- b. *Lane-Changing Model*.

secondo la procedura di seguito per completezza riprodotta:

```

if (necessary lane changing)
  then apply Lane-Changing Model
else
  if (the vehicle has not changed lane)
    then apply Car-Following Model
endif

```

È opportuno chiarire fin d'ora che nella modellazione di un sistema di trasporto su mezzo privato, gli utenti della rete sono identificati con i veicoli, così l'eventuale distinzione in classi della popolazione di fruitori della rete in base ai diversi profili comportamentali (in termini di propensione al rispetto dei limiti di velocità, prontezza, aggressività etc.), viene approntata in termini di *classi di veicoli*. D'altronde l'estrinsecarsi delle capacità di guida del generico utente è intuitivamente legato alle prestazioni del veicolo stesso, di qui l'inevitabile tendenza, consolidata nella teoria dei sistemi di trasporto stradale, ad identificare le due entità in un'unica nozione più ampia di *tipo di veicolo - vehicle type* -, connotata attraverso caratteristiche specifiche dell'una (veicolo), e dell'altra (guidatore). Aimsun ripropone tale paradigma.

Gli utenti di una rete di trasporto tendono a viaggiare secondo la condizione di crociera che prediligono; più raffinato è il modello, più sono i fattori che intervengono nella definizione di tale condizione; tralasciando per il momento gli aspetti sia pur importanti legati al confort di viaggio ed alla sostenibilità ambientale, essa può descriversi in maniera esauriente in termini di *velocità desiderata - desired speed* -.

Tuttavia, l'interazione con i diversi agenti legati all'ambiente esterno (i.e. veicolo precedente, veicoli adiacenti, segnaletica stradale, regolazione semaforica, e, non ultimi,

dispositivi di informazione), condiziona il comportamento degli utenti, inducendoli a discostarsi dalla condizione ideale cui naturalmente tenderebbero in assenza di fattori di disturbo esogeni. I due modelli appena menzionati tentano, per l'appunto, di tradurre matematicamente in maniera efficace gli effetti dell'interazione con l'ambiente esterno, per riprodurre quanto più fedelmente possibile il comportamento effettivo attuato dagli utenti, che si discosta da quello ideale sintetizzato dalla *desired speed*.

La simulazione e con essa l'aggiornamento della posizione e della velocità dei veicoli, sono scanditi in intervalli di tempo, denominati *Simulation Cycles* o *Simulation Steps*, la cui durata (compresa, a discrezione del tecnico modellatore, fra 0.1 ed 1 secondi:  $0.1 \leq \Delta t \leq 1 \text{ sec}$ ), può incidere non solo sulle prestazioni computazionali del simulatore, ma anche sulla risposta stessa del sistema, determinando variazioni sensibili nei valori di alcune grandezze.<sup>1</sup>

## 2.2.1 Car-Following Model

### 2.2.1.1 Single-Lane Car-Following Model

Il modello *car-following* implementato nel microsimulatore di Aimsun è stato appositamente sviluppato sulla scorta del modello empirico proposto da Gipps<sup>2</sup>, introducendo opportuni parametri che traducono l'influenza di fattori locali legati alla categoria di guidatore ovvero alla classe del veicolo (i.e. attitudine al rispetto dei limiti di velocità - *vehicle speed limit acceptance* -, velocità massima desiderata - *maximum desired speed* -, etc.), alla geometria della sezione stradale occupata dal veicolo nel passo corrente di simulazione (limite di velocità nel tronco stradale - *section speed limit* -, limite di

---

<sup>1</sup> La capacità delle singole sezioni stradali, ad esempio, varia in ragione inversa alla durata dell'intervallo di simulazione (i.e. più l'intervallo è piccolo più la capacità è accresciuta), ciò dovuto al fatto che in Aimsun il *tempo di reazione* dei guidatori - *reaction time* - (che ne misura la prontezza di manovra), è correlato alla durata dell'intervallo di simulazione secondo una legge di proporzionalità diretta. Di conseguenza più breve è l'intervallo di simulazione più è piccolo il tempo di reazione dei guidatori, che risulteranno così più abili alla guida - *skilful driver* -, ovvero in grado di marciare a distanza più ravvicinata rispetto al veicolo precedente, di individuare e sfruttare più agevolmente gli intervalli spazio/temporali fra veicoli successivi, di accelerare o decelerare prima e più velocemente, di accedere più frequentemente alla rete, etc. . Di qui l'accresciuta densità di veicoli lungo la rete e dunque la maggiore capacità dei singoli archi.

<sup>2</sup> Cfr. Bibliografia: Gipps P. G., [16]-[17], pag. 131.

velocità in curva - *speed limit on turning* -, etc.), alla presenza di veicoli nelle corsie adiacenti. Tale modello si risolve nella definizione di un'opportuna velocità di crociera del generico veicolo e consiste essenzialmente di due componenti, ciascuna associata ad una delle due possibili fasi riscontrabili nella marcia di un veicolo:

a. *Velocità in fase di accelerazione* -  $V_a$  -

Massima velocità che il generico veicolo  $n$  può raggiungere in fase di accelerazione nell'intervallo di tempo  $[t, t + T]$ , lungo la sezione stradale corrente.

b. *Velocità in fase di decelerazione* -  $V_b$  -

Massima velocità che il medesimo veicolo  $n$  può raggiungere in fase di decelerazione nello stesso intervallo di tempo  $[t, t + T]$ , e nella stessa sezione stradale, in accordo col regime di marcia imposto dal veicolo che lo precede (*leading vehicle*).

La prima esprime in termini matematici l'aspirazione del guidatore a viaggiare alla *velocità desiderata* - *desired speed* -, tenendo dunque in conto esclusivamente le prestazioni del veicolo ed i limiti di velocità vigenti nel tronco stradale da esso occupato :

$$V_{a,n}(t+T) = V_n(t) + 2.5 a_{\max,n} T \left[ 1 - \frac{V_n(t)}{V_n^*} \right] \sqrt{0.025 + \frac{V_n(t)}{V_n^*}} \quad (2.38)$$

ove si è adottata la seguente notazione:

$T$  - *Tempo di reazione (Reaction Time)* - Tempo impiegato dal generico guidatore per adeguarsi ai cambi di velocità attuati dal veicolo precedente.<sup>3</sup>

$a_{\max,n}$  - *Accelerazione Massima Desiderata (Maximum Desired Acceleration)* - Massima accelerazione che il veicolo  $n$ -esimo può produrre. Si tratta, dunque, di un parametro di prestazione proprio della classe di appartenenza (*vehicle type*), del veicolo in esame, da impostare nel relativo editor.

$V_n^*$  - *Velocità desiderata (Desired Speed)* - Velocità di crociera desiderata dal conducente del veicolo  $n$ -esimo nella sezione corrente. Parametro legato sia alle caratteristiche di prestazione del veicolo, che alle restrizioni proprie della

---

<sup>3</sup> Tale parametro può essere impostato in maniera univoca per tutte le classi di veicoli definite, oppure singolarmente per ognuna di esse, a livello dell'*Experiment* e dunque globalmente per l'intera rete; può inoltre essere modificato localmente ed univocamente per le diverse classi di veicolo, nelle singole sezioni d'interesse.

categoria stradale di appartenenza del tronco in cui il veicolo transita nell'intervallo di tempo  $[t, t + T]$ .

La seconda componente esprime, invece, le limitazioni imposte al guidatore dal regime di marcia del veicolo  $(n-1)$ -esimo che lo precede; in essa intervengono dunque parametri prestazionali di ambedue i veicoli coinvolti (*follower* e *leader*), e dati di configurazione relativa, secondo la seguente formulazione:

$$V_{b,n}(t+T) = d_{\max,n}T + \sqrt{(d_{\max,n}T)^2 - d_{\max,n} \left\{ 2[x_{n-1}(t) - s_{n-1} - x_n(t)] - V_n(t)T - \frac{[V_{n-1}(t)]^2}{d'_{n-1}} \right\}} \quad (2.39)$$

Con il seguente significato dei simboli:

$d_{\max,n}$  - *Decelerazione Massima Desiderata (Maximum Desired Deceleration)* - Massima decelerazione che il veicolo  $n$ -esimo può produrre; parametro di prestazione proprio della classe di appartenenza (*vehicle type*), del veicolo in esame, da impostare nel relativo editor.

$d'_{n-1}$  - *Stima della Massima Decelazione Desiderata del veicolo precedente (Leading Vehicle Estimated Desired Deceleration)* - Tale parametro rappresenta la stima da parte del veicolo che segue (*follower*),  $n$ , della massima decelerazione desiderata dal veicolo che conduce (*leader*),  $n-1$ .

$x_n$  - *Posizione* del veicolo  $n$  - Coordinata spaziale che descrive la posizione del veicolo  $n$ -esimo lungo la sezione stradale all'istante  $t$  corrente.

$s_{n-1}$  - *Lunghezza Efficace* del veicolo che conduce (*Leading Vehicle Effective Length*) - Lunghezza d'ingombro del veicolo che conduce, utile ai fini del calcolo della distanza netta residua fra due veicoli consecutivi.

Il valore definitivo da assegnare alla velocità del generico veicolo  $n$  nell'intervallo di tempo  $[t, t + T]$ , in accordo col modello car-following, viene quindi calcolata come il minimo delle due componenti sopra definite:

$$V_n(t+T) = \min\{V_{a,n}(t+T); V_{b,n}(t+T)\} \quad (2.40)$$

Coerentemente la posizione occupata dal veicolo  $n$  lungo la sezione stradale è aggiornata introducendo nell'equazione del moto la velocità appena calcolata:

$$x_n(t+T) = x_n(t) + V_n(t+T)T \quad (2.41)$$

Aimsun contempla tre diverse declinazioni del modello car-following (da selezionare globalmente al livello di *Experiment*, nell'apposita tabfolder '*Behaviour*'), a seconda della

modalità di calcolo della *decelerazione stimata per il veicolo che conduce*,  $d'_{n-1}$ , rispettivamente:

1. *Deceleration estimation (Leader Deceleration)*.

Questa modalità assume quale stima della decelerazione del veicolo che conduce proprio la *decelerazione massima desiderata* dello stesso veicolo, presupponendo implicitamente che il guidatore che segue sia in grado di valutare con esattezza la capacità di decelerazione del leader :

$$d'_{n-1} = d_{\max, n-1} \quad (2.42)$$

Nel caso in cui il rapporto fra le decelerazioni rispettivamente del leader e del follower sia significativamente alto, questa assunzione comporta che la componente in fase di decelerazione del modello di car-following possa manifestare instabilità tali da portare talora i veicoli a viaggiare troppo vicini al veicolo che li precede.

2. *Deceleration estimation (Avg of Follower & Leader Decelerations)*.

Questa modalità prevede invece di stimare la decelerazione del veicolo che conduce, come la media fra la *massima decelerazione desiderata* di ambedue i veicoli, leader e follower :

$$d'_{n-1} = \frac{(d_{\max, n} + d_{\max, n-1})}{2} \quad (2.43)$$

Questa assunzione, attenuando lo scarto fra i valori di decelerazione che intervengono nella espressione della  $V_{b,n}$ , consente di ovviare in parte all'inconveniente che si presenta nel modello *I.*, riducendo la probabilità che si verifichino le anzidette instabilità. Sebbene in media ambedue i modelli restituiscano valori di intertempo - *headway* - paragonabili, nel caso in cui non si riscontrino differenze significative fra i valori di decelerazione massima dei diversi tipi di veicoli coinvolti nella simulazione, è possibile adottare il modello *a.*, viceversa è opportuno ricorrere al modello *b.* .

3. *Deceleration estimation (Sensitivity Factor)*.

Questo modello, infine, calcola la *decelerazione stimata* del veicolo in testa,  $d'_{n-1}$ , come multiplo della sua *decelerazione massima desiderata* secondo un apposito coefficiente, *a*, denominato *Fattore di Sensibilità - Sensitivity Factor* - (impostato singolarmente, per ciascun *vehicle type*, nel relativo editor):

$$d'_{n-1} = a \cdot d_{\max, n-1} \quad (2.44)$$

Assegnare ad  $a$  valore minore di uno,  $a < 1$ , significa assumere che il guidatore del veicolo  $n$ , che segue, sottostimi la capacità di decelerazione del veicolo che lo precede, adottando conseguentemente un comportamento di guida più aggressivo, caratterizzato da ridotte distanze di marcia rispetto al leader.

Viceversa assegnare ad  $a$  valore maggiore di uno,  $a > 1$ , equivale ad assumere che il guidatore del veicolo  $n$  sovrastimi la capacità di decelerare del veicolo che lo precede, ovvero la sua prontezza e rapidità nel ridurre la velocità di marcia; e dunque ad assegnare al follower una condotta di guida più prudente, con accresciute distanze di marcia rispetto al leader.

Il microsimulatore Aimsun consente inoltre di introdurre opzionalmente un'ulteriore restrizione nel calcolo della velocità in fase di decelerazione,  $V_b$ , rappresentata dal rispetto dell'*intertempo minimo* - *Minimum Headway* - fra leader e follower, inteso come il lasso di tempo minimo che deve intercorrere fra il passaggio di due veicoli consecutivi.

Il vincolo di minimum headway è espresso analiticamente dalla seguente disuguaglianza:

$$\left[ x_{n-1}(t+T) - s_{n-1} \right] - \left[ x_n(t) + T \cdot V_n(t+T) \right] > MinHW_n \cdot V_n(t+T) \quad (2.45)$$

dalla quale discende l'espressione della *velocità di minimo intertempo*:

$$V_{HW,n}(t+T) = \frac{\left[ x_{n-1}(t+T) - s_{n-1} \right] - x_n(t)}{MinHW_n + T} \quad (2.46)$$

ove si è denotato con  $MinHW_n$  l'intertempo minimo del generico veicolo  $n$  rispetto al veicolo che lo precede.

Sebbene il microsimulatore provveda alla verifica del rispetto della condizione di minimum headway immediatamente prima di aggiornare la posizione del veicolo secondo l'equazione del moto, sulla base della velocità restituita dal modello di car-following; dal punto di vista della trattazione teorica risulta più sintetico e comunque invariante ai fini del risultato finale, condensare questo passaggio nella stessa operazione di minimizzazione prevista dal modello di car-following:

$$V_n(t+T) = \min \left\{ V_{a,n}(t+T); V_{b,n}(t+T); V_{HW,n}(t+T) \right\} \quad (2.47)$$

## 2.2.1.2 Calcolo della Velocità Massima Desiderata

Il modello di car-following prevede che il generico utente della rete che viaggi in condizioni di *flusso libero*, in assenza di veicoli adiacenti che ne condizionino il comportamento di guida, tenda a procedere alla massima velocità possibile, compatibilmente con le sole prestazioni del veicolo e le limitazioni vigenti nel tronco stradale attraversato.

Coerentemente il modello definisce una *velocità massima desiderata* per un *dato veicolo* in un'assegnata sezione stradale, e ne calcola il valore a partire da tre parametri:

1. *Velocità Massima Desiderata (Vehicle Maximum Desired Speed)* -  $v_{\max,n}$  -

Massima velocità raggiungibile dal generico veicolo  $n$  (parametro di prestazione proprio della classe di appartenenza del veicolo in esame - *vehicle type* -, da impostare nel relativo editor).

2. *Osservanza dei Limiti di Velocità (Speed Limit Acceptance)* -  $\theta_n$  -

Grado di ottemperanza del guidatore  $n$  ai limiti di velocità vigenti nel tronco stradale in cui transita (anch'esso da specificare nell'apposito campo dell'editor della rispettiva tipologia di veicolo).

3. *Limite di Velocità (Section/Turning Speed Limit)* -  $S_{\lim}^s$  -

A seconda che il veicolo percorra una sezione stradale o compia una manovra in curva, tale parametro rappresenta rispettivamente:

- a. la velocità massima consentita nel tronco stradale,  $s$ , attraversato dal veicolo, conformemente alle prescrizioni di legge stabilite per la relativa categoria stradale (il cui valore va impostato nel campo '*Maximum Speed*' dell'editor della *Section*);
- b. la velocità limite per garantire la sicurezza della manovra in curva (calcolata automaticamente dal simulatore oppure impostata dall'utente del software, a seconda che, nell'editor del nodo, si spunti o meno la voce '*Automatic Speed*' nella riga corrispondente alla manovra in esame).

Così la massima velocità desiderata dal veicolo  $n$  nella sezione  $s$ , è calcolata come segue:

$$V_{\max,n}^s = \min\{v_{\max,n}; S_{\lim,n}^s\} \quad (2.48)$$

ove con  $s_{\text{lim},n}^s$  si è denotato il limite di velocità effettivamente adottato dal guidatore  $n$  in accordo con la sua attitudine al rispetto delle restrizioni di guida imposte nella sezione  $s$  (espresso dal parametro  $\theta_n$ ):

$$s_{\text{lim},n}^s = \theta_n \cdot S_{\text{lim}}^s \quad (2.49)$$

La velocità  $V_{\text{max},n}^s$  così definita, interviene nella componente in fase di accelerazione del modello di Gipps ove, per brevità, è denotata col simbolo  $V_n^*$ :

$$V_n^* \equiv V_{\text{max},n}^s \quad (2.50)$$

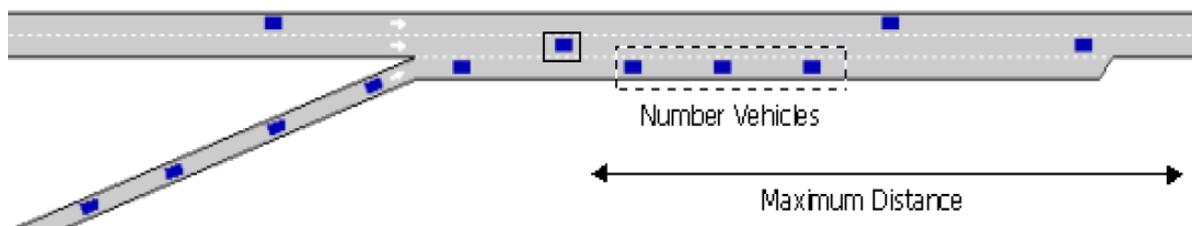
### 2.2.1.3 Two-Lanes Car-Following Model

Il modello di car-following fin qui esaminato, appropriatamente denominato *Single-Lane Car-Following Model*, non tiene conto dell'influenza dei veicoli che occupano le corsie adiacenti sul comportamento di guida del generico veicolo  $n$ . Questo aspetto è invece contemplato dal modello denominato *Two-Lanes Car-Following Model*, attraverso una nuova, più elaborata, definizione della *Desired Speed*,  $V_n^*$ , che interviene nella componente in fase di accelerazione del modello tradizionale.

Questo modello più evoluto tiene conto dell'influenza di un prefissato numero di veicoli - *Number of Vehicles* -, che procedono più lentamente a valle del veicolo  $n$  in esame, nella corsia ad esso adiacente (a destra o a sinistra a seconda del lato convenzionale di guida). In particolare solo i veicoli che ricadono entro una determinata distanza - *Maximum Distance* -, sono ritenuti in grado di condizionare la condotta di guida del veicolo  $n$  (Fig. 2.22).

Così il modello dapprima calcola la velocità media degli  $N = \text{Number of Vehicles}$  veicoli che procedono a valle del veicolo lungo la corsia più lenta entro la *maximum distance* - *Mean Speed Vehicles Downstream* -. Se il numero di veicoli che ricade entro questa distanza è minore di  $N$ , al fine di ottenere un valore più significativo il calcolatore provvede automaticamente a colmare il numero di termini mancanti nel calcolo della velocità media utilizzando la massima velocità desiderata dello stesso veicolo  $n$  nella sezione  $s$  corrente,

$$V_{\text{max},n}^s \cdot$$



**Fig. 2.22 - Veicoli coinvolti nel *Two Lane Car-following Model*.**

La figura illustra la configurazione spaziale tipica per la quale si applica il *Two Lane Car-following Model*. Il regime di marcia del generico veicolo (circoscritto dal riquadro nero), è condizionato dalla velocità di avanzamento dei primi  $N=NumbVeh$  veicoli situati immediatamente a valle, nella corsia adiacente entro la maximum distance.

Stabilito il numero di veicoli che condizionano il regime di marcia del veicolo  $n$  in esame, e calcolatane la velocità media - *Mean Speed Vehicles Downstream* -, la loro influenza su quest'ultimo è espressa matematicamente in termini di *massima differenza di velocità - Maximum Speed Difference* -. Nel definire il valore da assegnare a tale grandezza (nel relativo campo del riquadro '*Car Following*' della tabfolder '*Behaviour*' nella finestra di dialogo dell'*Experiment*), vengono distinti due casi:

- a. corsia adiacente del tipo *on-ramp*;
- b. corsia adiacente di un qualsiasi altro tipo.

cui rispettivamente corrispondono i parametri: *Max Speed Difference On-Ramp* e *Max Speed Difference* (in accordo con la terminologia adottata in ambiente Aimsun).

Quindi il simulatore provvede al calcolo di una nuova velocità massima (*Maximum Speed*), secondo l'algoritmo riportato nello specchio seguente.

```

if (the adjacent slower-lane is an On-Ramp)
    then MaximumSpeed = MeanSpeedVehDown + MaxSpeedDifferenceOn Ramp
else MaximumSpeed = MeanSpeedVehDown + MaxSpeedDifference
endif
    
```

In definitiva la *velocità desiderata - Desired Speed* -, del generico veicolo  $n$ , è data da:

$$V_n^* = \text{Min} \left\{ V_{\max,n}^s; \theta_n \cdot \text{MaximumSpeed} \right\} \quad (2.51)$$

Questa procedura assicura che la differenza di velocità fra veicoli che marcano lungo corsie adiacenti sia minore o uguale alla *Maximum Speed Difference*.

La principale lacuna di tale modello consiste nel fatto che, considerando esclusivamente i veicoli che ricadono entro la *Maximum Distance* dalla posizione corrente del veicolo che marcia nella corsia principale del tronco stradale occupato nel passo di simulazione, esso

non tiene conto delle condizioni di traffico nelle sezioni immediatamente a valle della sezione corrente. Ciò può comportare un cambiamento repentino del regime di marcia nel passaggio da un tronco stradale all'altro, qualora caratterizzati da condizioni di traffico differenti; ad esempio se un dato veicolo avanza verso una sezione stradale con una *on-ramp lane* completamente congestionata, esso adatterà la propria velocità a questa condizione solo quando, una volta immessosi nella sezione, i veicoli in stop nella *on-ramp lane* ricadono entro la maximum distance dal veicolo in esame.

## 2.2.2 Lane-Changing Model

### 2.2.2.1 Standard Lane-Changing Model

Il modello *Lane-Changing* implementato nel Microsimulatore di Aimsun è anch'esso mutuato dall'omonimo modello elaborato da Gipps<sup>4</sup>.

Il comportamento adottato dal guidatore nel cambio di corsia è ivi riprodotto attraverso un processo decisionale (*decision model*), che risponde, nell'ordine, a tre quesiti riguardanti:

1. necessità (*lane changing necessity*);
2. auspicabilità (*lane changing desirability*);
3. ammissibilità (*lane changing feasibility*);

il cui grado è determinato da fattori molteplici e spesso trasversali ai tre campi semantici.

Il primo è correlato alle manovre di svolta previste dal percorso cui il veicolo è stato assegnato e dipende dai seguenti fattori: la possibilità o meno di compiere la manovra di svolta seguente nella corsia attualmente occupata dal veicolo, la distanza che intercorre fra la posizione corrente ed il punto di svolta (estremità finale del tronco stradale), le condizioni di traffico nella corsia di marcia.

Il secondo esprime l'opportunità del cambio di corsia in relazione alla possibilità di migliorare le condizioni di marcia del veicolo, valutate in termini di velocità e lunghezza di coda; così se la velocità raggiungibile nella corsia di destinazione è maggiore di quella mantenuta nella corsia di marcia del veicolo e/o la lunghezza della coda è inferiore, allora è auspicabile cambiare corsia.

Il terzo, infine, verifica che la manovra di cambio corsia possa essere eseguita in assoluta sicurezza. L'algoritmo, a tal fine, calcola gli spazi di arresto - *braking distance* - ,

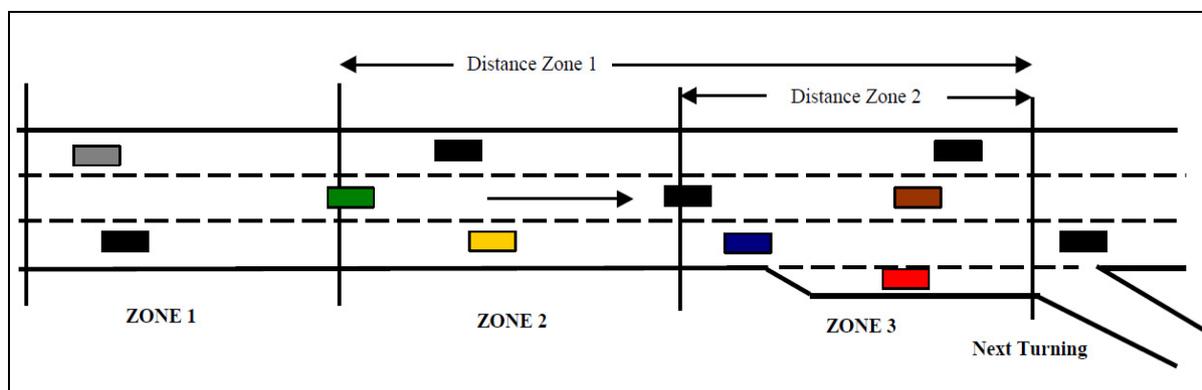
---

<sup>4</sup> Cfr. Bibliografia: Gipps P. G., [17]-[18], pag. 131.

rispettivamente imposti: l'uno al veicolo che cambia corsia dal veicolo che lo precederà nella corsia di destinazione (*future downstream vehicle*); l'altro dal veicolo che cambia corsia al veicolo che lo seguirà nella corsia di destinazione (*future upstream vehicle*).

Ad ogni passo di aggiornamento della posizione di ciascun veicolo presente all'interno del sistema, l'algoritmo verifica la sussistenza contestuale dei tre requisiti quindi, in caso affermativo, procede al cambio di corsia.

Al fine di conseguire una più accurata rappresentazione del processo decisionale che sottende al cambio di corsia, il modello distingue tre diverse zone all'interno di ciascuna sezione stradale (Fig. 2.23), ognuna delle quali caratterizzata dal prevalere di una delle tre motivazioni testé menzionate.



**Fig. 2.23 - Individuazione delle zone a diversa priorità di manovra nel *Lane-Changing Model*.**

La figura illustra la suddivisione in zone della generica sezione stradale operata dal modello di *lane-changing* implementato in Aimsun, in relazione al crescente grado di urgenza della manovra man mano che il veicolo si approssima all'intersezione stradale immediatamente successiva. Ciascuna zona è individuata dalla distanza che la separa dall'estremità finale della sezione di appartenenza; per determinare univocamente le tre zone è sufficiente definire due soli parametri: *Distanza dalla Zona 1 - Distance Zone 1 -*, *Distanza dalla Zona 2 - Distance Zone 2 -*.

Numerando le zone in ordine crescente man mano che ci si approssima all'estremità finale della sezione stradale (i.e., al successivo punto di svolta), si ha dunque:

**Zona 1.** Si tratta della zona più distante dalla manovra di svolta immediatamente successiva. Al suo interno le decisioni di cambio corsia sono influenzate prevalentemente dalle condizioni di traffico, e rispondono esclusivamente alle motivazioni di *auspicabilità* ed *ammissibilità*. In questa fase il guidatore non valuta ancora la compatibilità fra la posizione corrente occupata nella carreggiata e la manovra di svolta prevista dal relativo percorso alla estremità opposta della sezione stradale. I parametri che intervengono nella stima del miglioramento del regime di marcia del veicolo a seguito del cambio di corsia,

sono molteplici: la velocità desiderata del guidatore che si appresta a cambiare corsia - *Desired Speed* -, la velocità di viaggio e la distanza del veicolo che lo precede nella corsia corrente (*current preceding vehicle*), la velocità e la distanza del veicolo che lo precederà nella corsia di destinazione (*future preceding vehicle*).

**Zona 2.** Si tratta della zona intermedia del tronco stradale. Al suo interno le decisioni di cambio corsia sono prevalentemente orientate a raggiungere la corsia più idonea ad eseguire la manovra di svolta immediatamente seguente (*desired turning lane*). In questo tratto della sezione, i veicoli che procedano lungo corsie dalle quali non sia ammessa la svolta successiva prevista dal relativo percorso, tenderanno a portarsi sul lato della carreggiata ove la stessa manovra è consentita. In questa fase, però, il veicolo interessato a cambiare corsia valuterà l'ammissibilità della manovra limitandosi ad individuare uno spazio sufficiente fra due veicoli che viaggiano nella corsia adiacente di destinazione nel quale inserirsi senza condizionarne però il regime di marcia.

**Zona 3.** Si tratta della zona immediatamente prossima alla manovra di svolta. Al suo interno ciascun veicolo è forzato a raggiungere la corsia più idonea ad eseguire la manovra di svolta prevista dal relativo percorso, la decisione è quindi motivata esclusivamente dalla necessità; stavolta però, nel soddisfare il requisito di ammissibilità, il veicolo che si appresta a cambiare corsia è disposto a ridurre la propria velocità fino ad arrestarsi del tutto<sup>5</sup>, ed anche ad influenzare il regime di marcia dei veicoli che procedono lungo la corsia adiacente di destinazione, al fine di produrre lo spazio sufficiente a consentire la manovra in condizioni di sicurezza.

Ciascuna zona è individuata dalla distanza che la separa dall'estremità finale della sezione di appartenenza. In particolare per determinare univocamente le tre zone è sufficiente disporre di due soli parametri: distanza dell'estremità finale della zona 1 dall'estremità finale della sezione stradale - *Distance to Zone 1* -, distanza dell'estremità finale della zona 2 dall'estremità finale della sezione stradale - *Distance to Zone 2* -; ambedue definiti sotto forma d'intervalli di tempo e convertiti in lunghezze, di volta in volta per ciascun veicolo nelle diverse sezioni, avvalendosi della seguente trasformazione:

---

<sup>5</sup> Il parametro specifico del *vehicle type* che stabilisce il massimo intervallo di tempo che il conducente è disposto ad attendere in questa condizione prima di procedere al cambio di corsia è denominato *Maximum Give Way Time*, il cui valore può essere impostato dall'analista nell'apposito campo previsto nell'editor del *vehicle type*.

$$D_m = \frac{S_{\text{lim}}^s}{V_{\text{max},n}^s} \cdot S_{\text{lim}}^s \cdot D_t \quad (2.52)$$

ove si sono denotati con:

- $D_t$  distanza espressa in secondi;
- $D_m$  distanza espressa in metri;
- $S_{\text{lim}}^s$  limite di velocità vigente nella sezione  $s$ ;
- $V_{\text{max},n}^s$  velocità massima desiderata dal veicolo  $n$  nella sezione  $s$ .

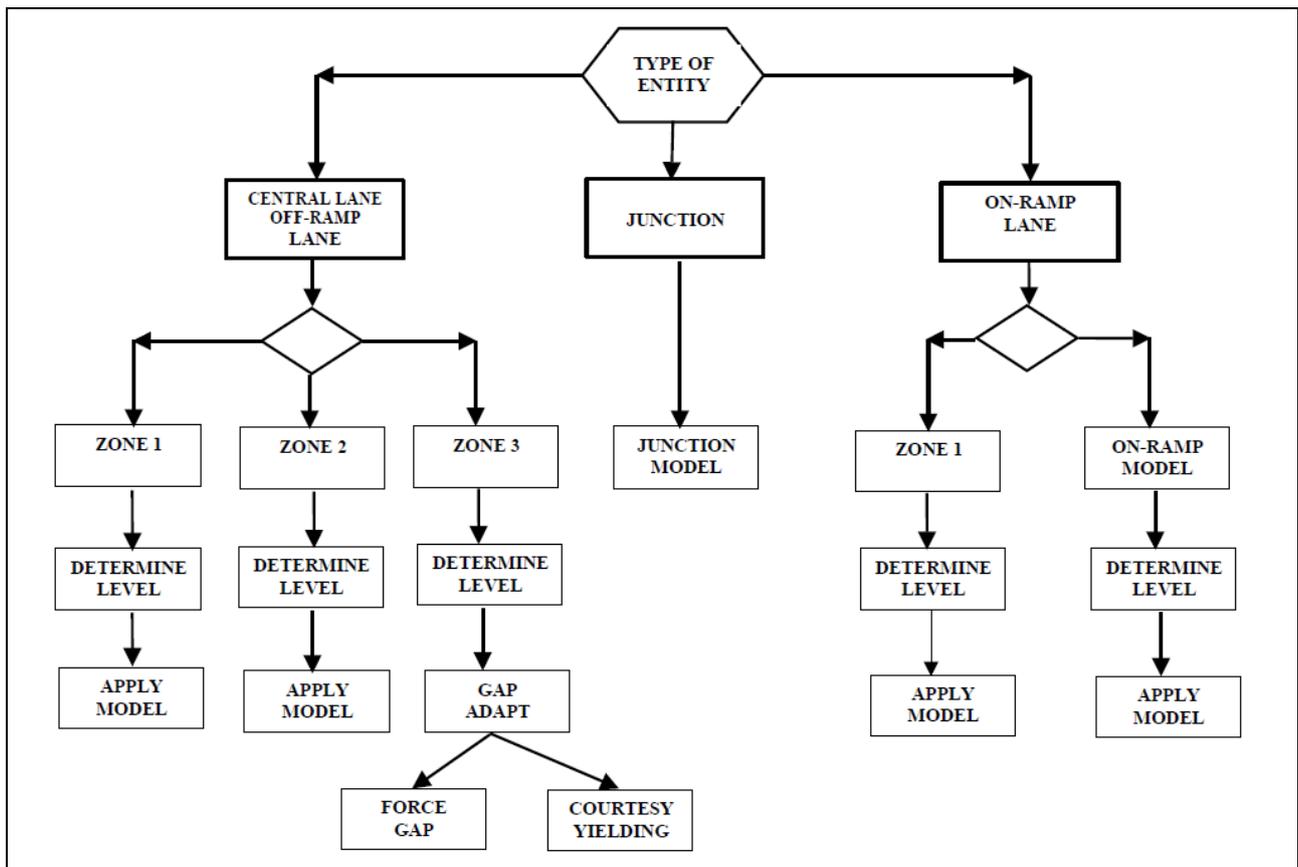
Ciò affinché l'estensione delle tre zone sia calibrata, più verosimilmente, sui regimi di viaggio dei singoli veicoli. In questo modo, infatti, ai veicoli che procedono a velocità più sostenuta (con riferimento al limite di velocità nella sezione corrente), corrisponderanno zone più corte rispetto a quelli che viaggiano più lentamente; ottenendo peraltro una maggiore variabilità del comportamento di guida da veicolo a veicolo, a vantaggio della realistica del modello.

Il Microsimulatore di Aimsun, adotta tre distinti *lane-changing models* in altrettante tipologie di oggetto (*entities*), dello schema di rete, rispettivamente:

- *Central Lane* ed *Off-Ramp Lane*;
- *Junction*;
- *On-Ramp Lane*.

Il modello fin qui descritto, che denomineremo per evitare confusione *Standard Lane Changing Model*, si applica agli oggetti del tipo *central lane* ed *off-ramp lane*; apposite particolarizzazioni sono previste, invece, per le altre tipologie di oggetto.

A tal proposito, una visione d'insieme utile ad inquadrare la logica che sovrintende l'applicazione del *lane changing model* è fornita dal diagramma di flusso di seguito riportato (Fig. 2.24).



**Fig. 2.24 - Schema logico di applicazione del *Lane-Changin Model* in Aimsun.**

Il modulo software deputato all'applicazione del *lane-changing model*, nell'ordine: identifica la tipologia di oggetto o *entità oggetto* (i.e., *central lane*, *off-ramp lane*, *on-ramp lane*, *junction*), ove transita il veicolo; procede alla suddivisione in zone; esamina le condizioni di traffico correnti (come già detto in termini di velocità e lunghezza delle code), individuandone il livello (*traffic level*, o semplicemente *level*), più idoneo all'espletamento della manovra; infine applica il modello di *lane-changing* appropriato all'*entità oggetto*.

### 2.2.2.2 Gap-Acceptance nel modello Lane-Changing

In seno al modello di *lane changing*, ai fini della valutazione dell'ammissibilità della manovra, è prevista un'apposita applicazione del modello di *gap acceptance*, in accordo con la procedura descritta nello specchietto seguente:

```

Get downstream and upstream vehicles in target lane
Calculate gap between downstream and upstream vehicles: TargetGap
if ((TargetGap>VehicleLength) & (Vehicle is aligned))
then
Calculate distance between vehicle and downstream vehicle in target lane: DistanceDown
Calculate speed imposed by downstream vehicle to vehicle,
    according to Car-Following Model: ImposedDownSpeed
if ((ImposedDownSpeed acceptable for vehicle, according to its deceleration rate)
then
Calculate distance between upstream vehicle in target lane and vehicle: DistanceUp
Calculate speed imposed by vehicle to upstream vehicle,
    according to Car-Following Model: ImposedUpSpeed
if (ImposedUpSpeed acceptable for upstream vehicle, according to its deceleration rate)
...then
    Lane Changing feasible
    Carry out Lane Change
else
    Gap not acceptable because of upstream vehicle
...endif
..else
..Gap not acceptable because of downstream vehicle
endif
else
no gap aligned with vehicle
endif
    
```

I parametri, fra quelli specifici della tipologia di veicolo, che influenzano direttamente il grado di *gap acceptance* che interviene nel *lane changing* sono elencati di seguito:

- *Percentage for Imprudent Lane Changing Cases*. Probabilità con la quale il generico veicolo di quel tipo effettua un cambio di corsia pur in assenza di un intervallo sufficiente a garantire condizioni di sicurezza (riducendo il gap alla lunghezza del veicolo stesso che si appresta ad eseguire la manovra);

- *Sensitivity for Imprudent Lane Changing Cases*. In maniera equivalente al *sensibility factor* del *Car-Following Model*, questo parametro interviene nella stima della decelerazione del veicolo a monte (*upstream vehicle*), nella corsia di destinazione (*target lane*), indispensabile alla valutazione dell'intervallo sufficiente all'attuazione del cambio corsia in assenza dei margini di sicurezza di manovra - *Imprudent Lane Changing* -. Se maggiore di uno, il veicolo che si appresta al cambio di corsia sovrastimerà la capacità di decelerazione del veicolo a monte nella corsia di destinazione, considerando un gap maggiore di quello effettivo, a svantaggio di sicurezza. Viceversa, se minore di uno, il gap stimato dal veicolo che si appresta a cambiare corsia sarà minore di quello effettivo, a vantaggio di sicurezza.

### 2.2.2.3 On-Ramp Lane Changing Model

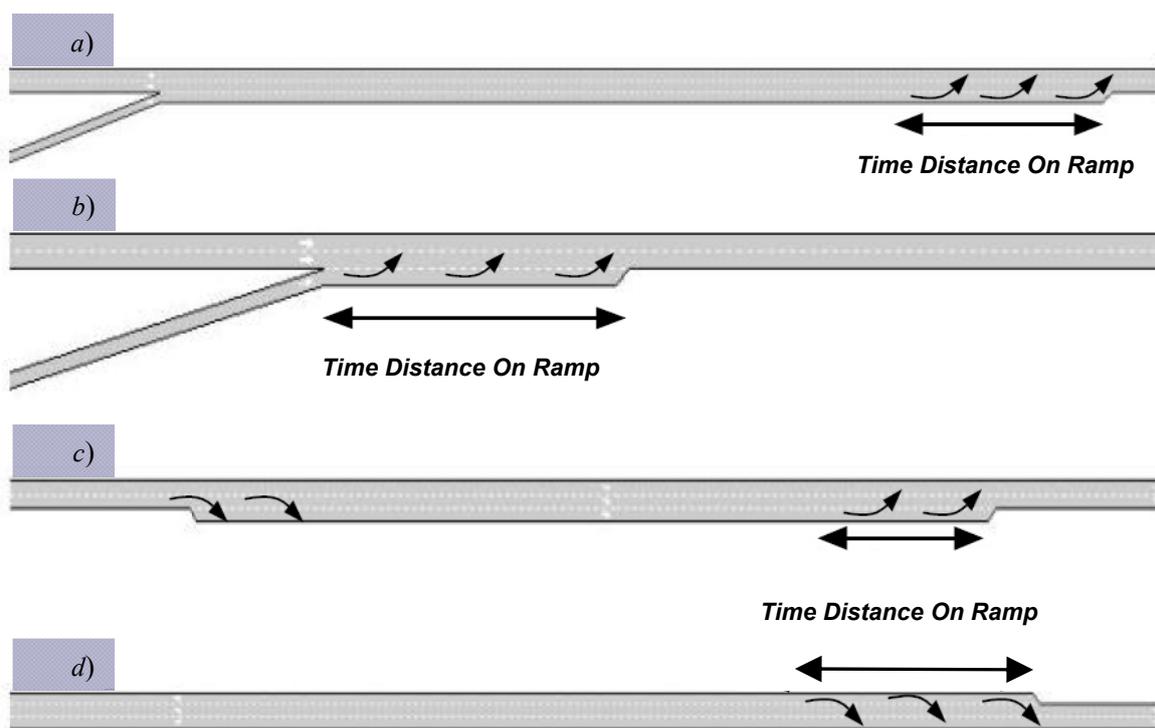
Il modello che riproduce il comportamento adottato dai veicoli, lungo le corsie del tipo *on-ramp*, per immettersi nel flusso principale, è un particolare istanza del *Modello di Confluenza - Merging Model* -, e ricorre ad un apposito adattamento dello *Standard Lane-Changing Model*.

In particolare rispetto a quest'ultimo, è qui introdotto un ulteriore parametro che interviene nella definizione delle diverse zone, denominato *Time Distance On Ramp*<sup>6</sup>, al fine di distinguere tra corsie *on-ramp* propriamente dette e corsie laterali destinate alla marcia rallentata (*slow lanes*), o al sorpasso (*overtaking lanes*), per le quali sarebbe inappropriato utilizzare un modello del tipo *on-ramp* lungo tutta la loro estensione. Il parametro *Time Distance On Ramp* rappresenta, dunque, la 'distanza', espressa in secondi, dall'estremità finale della corsia, entro la quale una corsia laterale può essere assimilata ad una *on-ramp lane* (Fig. 2.25).

I veicoli che marciano lungo una corsia laterale, quando si trovano ad una distanza dall'estremità finale della corsia maggiore della *Time Distance On Ramp*, adottano un comportamento coerente con quello previsto dal modello di lane-changing nella *Zona 1*; quando invece si trovano a distanza inferiore, si comportano come se provenienti da una corsia *on-ramp*, cercando di immettersi nel flusso principale; seguiranno quindi la procedura di lane changing prevista per la *Zona 3*.

---

<sup>6</sup> Tale parametro può essere impostato per ciascuna sezione stradale, inserendo il valore desiderato nell'apposito campo predisposto nel relativo editor.



**Fig. 2.25 - Contesti tipici di applicazione del modello *On-Ramp Lane Changing*.**

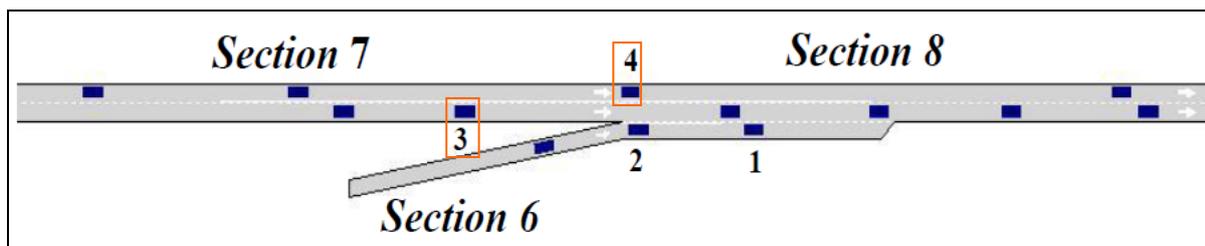
In figura sono riportate le diverse configurazioni cui si applica il modello di lane-changing formulato per le corsie di immissione - *on-ramp lanes* -. Sono raffigurati diversi casi tipici: corsie laterali di approdo di rampe di accesso (*a.* e *b.*), corsie laterali di rallentamento (*c.*), o di sorpasso (*d.*). Per ciascuno di essi è altresì indicata l'estensione spaziale dell'intervallo di applicazione del modello, convertito poi nell'equivalente temporale - *Time Distance On Ramp* -.

D'altro canto per modellare in maniera più accurata il comportamento dei veicoli che viaggiano lungo la carreggiata principale in prossimità della confluenza di una *on-ramp*, è stato implementato un modello di lane changing migliorato. Esso, mantenendo inalterata la logica che sottende il cambio di corsia, contempla soltanto un'ulteriore motivazione tale da indurre la manovra (*necessity*), con urgenza diversa a seconda della *zona* della sezione occupata dal veicolo. Si distinguono in particolare due casi:

- a.* il veicolo transita nel tratto terminale (*Zona 3*), della sezione precedente il nodo di confluenza della rampa d'immissione;
- b.* il veicolo transita nella zona iniziale (*Zona 1*), della sezione cui appartiene la corsia laterale che accoglie i veicoli provenienti dalla rampa d'immissione.

Un veicolo che proceda lungo la *Zona 3* di una sezione stradale prossima alla confluenza di una *on-ramp* (caso *a.*), verificherà la presenza di veicoli nella rampa in attesa di immettersi nella carreggiata principale, se così, riterrà *necessario* spostarsi nella corsia immediatamente a sinistra, con il livello di urgenza adeguato (veicolo 3 in Fig. 2.26). Se, invece, il veicolo si trova nella stessa sezione cui appartiene la corsia laterale d'immissione

(caso *b.*), nel tratto a monte della confluenza, ovvero prima della fine della corsia laterale (veicolo 4 in Fig. 2.26), adatterà la procedura di cambio corsia predisposta per la *Zona 1* (a più basso livello di urgenza); cercherà dunque di agevolare l'ingresso dei veicoli provenienti dalla *side lane*, senza però modificare il regime di marcia di quelli che procedono lungo la corsia adiacente più veloce, cambiando corsia solo qualora vi sia lo spazio sufficiente a compiere la manovra in sicurezza.



**Fig. 2.26 - Veicoli interessati dall'applicazione del modello di *On-Ramp Lane Changing*.**

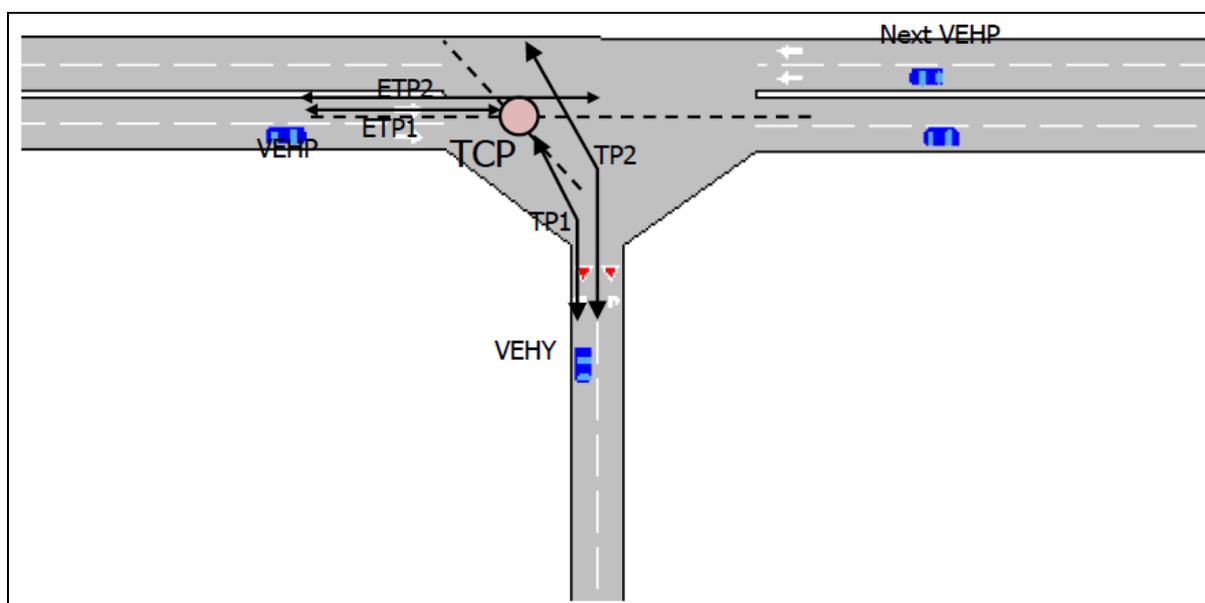
In figura sono circoscritti dal riquadro i veicoli che effettuano il cambio corsia secondo il modello appositamente formulato per i tratti prossimi alla confluenza di corsie d'immissione, - *On-Ramp Lane Changing Model* -. In particolare il veicolo 3 provvederà all'eventuale manovra di cambio corsia secondo il livello di urgenza pertinente alla *zona 3* della sezione 7; il veicolo 4, invece, secondo il livello proprio della *zona 1* della sezione 8.

### 2.2.3 Gap-Acceptance Model

Il modello di *Gap-Acceptance* governa gli attraversamenti delle intersezioni stradali nel rispetto delle regole di precedenza. Più specificamente stabilisce se un veicolo a ridotta priorità - *lower priority vehicle* -, che si appropinqui ad un'intersezione, possa o meno procedere al suo attraversamento, in relazione alle stato di moto (i.e. posizione e velocità), proprio e dei veicoli a più alta priorità - *higher priority vehicles* -, che si trovino in prossimità della stessa intersezione.

L'algoritmo, individuati i due veicoli in avvicinamento, determina il *punto teorico di collisione* (*Theoretical Collision Point - TCP*), calcola le distanze dei due veicoli da tale punto e, sulla scorta delle rispettive velocità ed accelerazioni, valuta i tempi ad essi necessari per attraversare l'itersezione stradale (Fig. 2.27); quindi produce la scelta assunta dal veicolo a ridotta priorità in funzione anche della relativa propensione al rischio. Tale procedimento è riassunto, in forma di scripting, nello specchio sotto riportato, avendo denotato con *VEHY - Yealding Vehicle* -, un veicolo che si approssimi ad un segnale di *Give Way*.

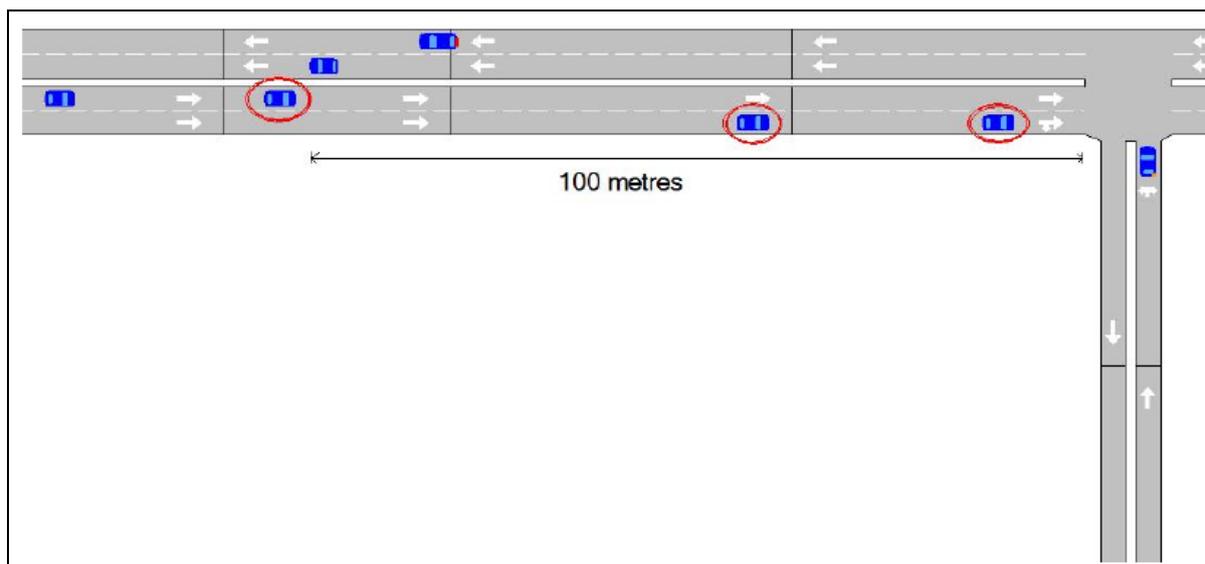
1. Get closest higher priority vehicle (VEHP)
  2. Calculate *Theoretical Collision Point* (TCP)
  3. Calculate time needed by VEHY to reach TCP (TP1)
  4. Calculate estimated time needed by VEHP to reach TCP (ETP1)
  5. Calculate time needed by VEHY to cross TCP (TP2)
  6. Calculate estimated time needed by VEHP to clear the junction (ETP2)
- if (TP2 + Safety Margin < ETP1)  
 then VEHY accelerate and cross  
 else  
 if (ETP2 + Safety Margin < TP1)  
 then search for next closest higher priority vehicle, rename it VEHP and go to step 2  
 else VEHY must give way (decelerating and stopping if necessary)



**Fig. 2.27 - Calcolo delle grandezze che intervengono nel *Gap-Acceptance Model*.**

In figura sono rappresentate graficamente le diverse grandezze calcolate in seno al *Gap-Acceptance Model*, rispettivamente: punto teorico di collisione (TCP); tempo impiegato dal veicolo a ridotta precedenza (VEHY), per raggiungere il punto di collisione (TP1); tempo stimato dal veicolo VEHY affinché il veicolo a più alta precedenza (VEHP), raggiunga il punto di collisione (ETP1); tempo impiegato dal VEHY per attraversare l'intersezione (TP2); tempo stimato dal veicolo VEHP, attraversi l'intersezione (ETP2).

Soltanto i veicoli ad elevata priorità che ricadono nelle sezioni stradali che convergono nel nodo entro una distanza di 100 metri dal medesimo, verranno tenuti in considerazione dal veicolo a priorità inferiore che si appresti ad attraversare il nodo, come illustrato in Fig. 2.28.



**Fig. 2.28 - Veicoli ad elevata priorità tenuti in conto dal *Gap-Acceptance Model.*, in prossimità di segnali di precedenza.**

La figura indica l'estensione del tratto in cui devono ricadono i veicoli ad elevata priorità di manovra (cerchiati in rosso), tenuti in conto dal veicolo a ridotta priorità che, approssimandosi ad un segnale di precedenza, si appresti ad attraversare l'intersezione stradale, secondo il modello di *Gap-Acceptance*.

Diversi parametri influenzano il funzionamento del modello *gap-acceptance*, in particolare fra quelli afferenti la tipologia di veicolo:

- *Maximum Acceleration*;
- *Maximum Desired Speed*;
- *Speed Limit Acceptance*;
- *Maximum Give-Way Time*;

mentre fra quelli specifici della sezione stradale e del nodo, rispettivamente:

- *Visibility Distance at Intersection*;
- *Turning Speed*.

Fra tutti, poi, quelli di maggior peso sono: maximum acceleration, maximum give-way time, visibility distance at intersections. Il primo esprime la capacità di accelerazione del veicolo, come tale incide direttamente sul margine di tempo richiesto per completare la manovra in sicurezza (*required safety gap*). Il secondo stabilisce l'intervallo di tempo massimo trascorso il quale il guidatore non è più disposto a dare la precedenza, riducendo

la soglia di accettabilità dell'intervallo utile ad eseguire la manovra in sicurezza<sup>7</sup>. Il terzo, in fine, rappresenta la distanza dall'estremità terminale della sezione entro la quale deve trovarsi il veicolo a ridotta priorità, affinché venga attivato il modello di gap-acceptance<sup>8</sup>.

---

<sup>7</sup> quando, cioè, il tempo di attesa del veicolo con grado di priorità inferiore, supera tale lasso di tempo, il margine di sicurezza (*safety margin*), che interviene nella definizione dell'intervallo ammissibile (di norma pari a due passi di simulazione, *simulation steps*), viene automaticamente ridotto alla metà.

<sup>8</sup> Va ricordato che il modello di gap-acceptance si applica solo a quei veicoli che si approssimano ad una intersezione stradale attraverso un arco alla cui estremità terminale sia posto un segnale di precedenza - *yield sign* o *give-way sign* -.

## Bibliografia di Capitolo

- [1] “Aimsun 6.1 Users’ Manual”, TSS-Transport Simulation Systems<sup>©</sup>, October 2009.
- [2] Barcelò, J., Casas, J., “Analysis of Dynamic Guidance Systems by Microsimulation with AIMSUN2”, *Proceedings of the 6<sup>th</sup> World Conference on ITS*, Toronto, 1999a.
- [3] Barcelò, J., Casas, J., Ferrer, J. L., Garcia, D., “Modeling Advanced Transport Telematic Applications with Microscopic Simulators: The Case of AIMSUN2”, *Traffic and Mobility, Simulation, Economics, Environment*, Springer, Berlin, 1999b.
- [4] Barcelò, J., “The Role of Simulation in Advanced Traffic Management Systems”, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> World Conference on ITS*, Torino, 2000.
- [5] Barcelò, J., Garcia, D., Kirschfink, H., “Scenario Analysis a Simulation Based Tool for Regional Strategic Traffic Management”, *Traffic Technology International*, 2001, Special Issue.
- [6] Barcelò, J., Casas, J., “Dynamic Network Simulation with AIMSUN”, *Proceedings of the International Symposium on Transport Simulation*, Yokohama, Kluwer, 2003.
- [7] Barcelò, J., Casas, J., Codina, E., Ferrer, L., Garcia, D., “Microscopic Traffic Simulation: A Tool for the Design, Analysis and Evaluation of Intelligent Transport Systems”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Kluwer Academic Publ., 41: 173-203, Netherlands, 2004.
- [8] Carey, M., Ge, Y. E., “Comparison of Methods for Path Flow Reassignment for Dynamic User Equilibrium”, *School of Management & Economics*, Queen’s University, Belfast, Northern Ireland, 2007.
- [9] Cascetta, E., “Transportation Systems Engineering: Theory and Methods”, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [10] Cascetta, E., “Transportation System Analysis. Models and Applications”, *Springer Optimization and Its Applications*, Vol. 29, Springer Eds., 2009.
- [11] Cowan, R. J., “Useful Headway Models”, *Transportation Research*, Vol. 9, 371-375, 1975.
- [12] Dijkstra, E. W., “A Note on Two Problems in Connection with Graphs”, *Numerische Mathematic*, Vol. 1, 269-271, 1959.
- [13] Florian, M., Hearn, D., “Network Equilibrium Models and Algorithms”, *Elsevier Science*, Vol. 8, 1995.

- [14] Florian, M., Mahut, M., Tremblay, M., “Application of a Simulation-based Dynamic Traffic Assignment Model”, *International Symposium on Transport Simulation*, Yokohama, 2002.
- [15] Friesz, T. L., Bernstein, D., Smith, T. E., Tobin, R. L., Wie, B. W., “A Variational Inequality Formulation of the Dynamic Network User Equilibrium Problem”, *Operations Research*, Vol. 41, N°.1, 179-191, 1993.
- [16] Gipps, P. G., “A Behavioural Car-following Model for Computer Simulation”, *Transportation Research Board*, Vol. 15B, 105-111, 1981.
- [17] Gipps, P. G., “A Model for the Structure of Lane-changing Decisions”, *Transportation Research B*, Vol. 20-B, N°.5, 403-414, 1986a.
- [18] Gipps, P. G., “MULTSIM: A Model for Simulating Vehicular Traffic on Multi-Lane Arterial Roads”, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 28, 291-295, 1986b.
- [19] Janson, B. N., “Dynamic Assignment for Urban Road Networks”, *Transportation Research B*, Vol. 25, N°.2/3, 143-161, 1991.
- [20] Law, A. M., Kelton, W. D., “Simulation, Modeling and Analysis”, *McGraw-Hill International Eds.*, 1991.
- [21] Liu, H. X., Ma, W., Ban, J. X., Michardani, P., “Dynamic Equilibrium Assignment with Microscopic Traffic Simulation”, *8<sup>th</sup> International IEEE Conference on Intelligent Transport Systems*, 2005.
- [22] Lo, H. K., Szeto, W. Y., “A Cell-based Variational Inequality Formulation of the Dynamic User Optimal Assignment Problem”, *Transportation Research B*, Vol. 36, 421-443, 2002.
- [23] Mahmassani, H. S., “Dynamic Network Traffic Assignment and Simulation Methodology for Advanced System Management Applications”, *Network and Spatial Economics*, Vol. 1, 267-292, 2001.
- [24] Mahut, M., “Speed-maximizing Car-following Models based on Safe Stopping Rules”, *Transportation Research Board 78<sup>th</sup> Annual Meeting*, 1999a.
- [25] Mahut, M., “Behavioural Car-following Models” *Report CRT-99-31*, Centre for Research on Transportation, University of Montreal, Canada, 1999b.
- [26] Mahut, M., Florian, M., Tremblay, N., “Space-Time Queues and Dynamic Traffic Assignment: A Model, Algorithm and Applications”, *Transportation Research Board 82<sup>nd</sup> Annual Meeting*, 2003a.

- [27] Mahut, M., Florian, M., Tremblay, N., “Traffic Simulation and Dynamic Assignment for Off-line Applications”, *10<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Transportation Systems*, Madrid, 2003b.
- [28] Mahut, M., Florian, M., Tremblay, N., Campbell, M., Patman, D., Krnic, Z., “Calibration and Application of a Simulation based Dynamic Traffic Assignment Model”, *Transportation Research Record*, 1876, 101-111, 2004.
- [29] “Microsimulator and Mesosimulator in Aimsun 6.1”, *User’s Manual*, TSS-Transport Simulation Systems<sup>©</sup>, October 2009.
- [30] Peeta, S., Mahmassani, H. S., “System Optimal and User Equilibrium Time-Dependent Traffic Assignment in Congested Networks”, *Annals of Operation Research*, Vol. 60, 81-113, 1995.
- [31] Pidd, M., “Computer Simulation in Management Science”, John Wiley Ed., 1992.
- [32] Ran, B., Boyce, D., “Modeling Dynamic Transportation Networks”, Springer-Verlag Eds., 1996.
- [33] Sbayti, H., Lu, C., Mahmassani, H. S., “Efficient Implementations of the Method of Successive Averages in Simulation-based DTA Models for Large-scale Network Applications”, *Transportation Research Board Annual Meeting*, 2007.
- [34] Sheffi, Y., “Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods”, Prentice-Hall INC., Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
- [35] Smith, M. J., “A New Dynamic Traffic Model and the Existence and Calculation of Dynamic User Equilibria on Congested Capacity-constrained Road Networks”, *Transportation Research Part B*, 27, 49-63, 1993.
- [36] Tong, C. O., Wong, S.C., “A Predictive Dynamic Traffic Assignment Model in Congested Capacity-constrained Road Networks”, *Transportation Research B*, Vol. 34, 625-644, 2000.
- [37] Varia, H. R., Dhingra, S. L., “Dynamic User Equilibrium Traffic Assignment on Congested Multidestination Network”, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 130, N°2, 211-221, 2004.

## 3. Metodologie

### 3.1 Selezione dei modelli e loro combinazione

#### 3.1.1 Formulazione dei modelli di assegnazione in funzione informativa

Il presente studio mira a valutare l'efficacia degli strumenti di modellazione della presenza di sistemi informativi ed al contempo indagare, attraverso la simulazione, gli effetti dell'informazione sull'utenza del sistema di trasporto, concentrandosi esclusivamente sul modo di trasporto su veicolo privato. Tali obiettivi sono mutuamente correlati: la stima attendibile dell'impatto dell'informazione sull'utenza di un dato sistema di trasporto presuppone, infatti, l'affidabilità dei modelli e delle procedure elaborati per la sua implementazione.

L'attenta disamina preliminare delle modalità di implementazione dell'informazione disponibili nell'ambiente di microsimulazione Aimsun<sup>1</sup>, ha individuato due possibili approcci non necessariamente alternativi:

- a. Modelli di Assegnazione dei Flussi - *Assignment Models* -;
- b. Modelli di Gestione dei Flussi - *Traffic Management Models* -.

evidenziandone vantaggi e limiti.

Il primo passo è consistito, dunque, nella scelta della modalità d'implementazione dell'informazione fra le due ravvisate in ambiente Aimsun, testé menzionate.

Stante l'artificiosità della simulazione dell'informazione predisposta in seno alle procedure di *Traffic Management*, è stata prediletta quella basata sui *Modelli di Assegnazione* della domanda di trasporto. Il primo approccio appare infatti viziato, ai fini della riproduzione dell'interazione utenza/informazione, da vincoli estranei al meccanismo essenziale di funzionamento del sistema, predeterminati dal modellatore e come tali prevalentemente condizionati dalla soggettività dello stesso, quindi in certo senso "esogeni". Per contro si è ritenuto che la struttura stessa delle procedure di assegnazione della domanda di spostamento (articolata in successivi passi di *aggiornamento* delle funzioni di costo),

---

<sup>1</sup> Cfr. § 2.1. Modellazione dell'informazione in Aimsun, pag.49.

associata all'adozione di opportuni algoritmi di scelta del percorso di tipo *aleatorio*, racchiuda implicitamente la modellazione dell'informazione che così legata, per l'appunto, alle procedure che regolano l'organismo stesso del modello, ovvero a fattori *endogeni*, mantiene più marcatamente quegli aspetti di aleatorietà ed oggettività richiesti ad un modello capace di cogliere la "estemporaneità" della reazione dell'utenza all'informazione.

Il modulo software deputato all'assegnazione della domanda di trasporto contempla, come discusso dettagliatamente nell'apposito capitolo<sup>2</sup>, due modi di assegnazione che abbiamo denominato rispettivamente:

- a. *Modo Statico*;
- b. *Modo Dinamico*;

ove le connotazioni di staticità o dinamicità non vanno intese secondo l'accezione tradizionalmente consolidata nella studio dell'equilibrio dei sistemi di trasporto (*Static Equilibrium* vs. *Dynamic Equilibrium*), poiché la simulazione avviene comunque in campo dinamico, ma riguardano esclusivamente le procedure di calcolo delle aliquote di domanda da assegnare ai diversi percorsi, denotando rispettivamente l'aggiornamento o meno nel passo - *Simulation Cycle*<sup>3</sup> -, delle relative percentuali di assegnazione. Queste considerazioni hanno suggerito la scelta dei metodi più idonei a riprodurre i due contesti informativi prefigurati:

- a. Assenza di Informazione;
- b. Presenza di Informazione.

Il *modo statico*, infatti, mantenendo invariati durante l'intero periodo di simulazione sia gli insiemi di scelta dei percorsi che le relative percentuali di assegnazione, appare adeguato alla simulazione del sistema in assenza d'informazione<sup>4</sup>, tanto in fase pre-trip quanto in fase en-route. Viceversa il *modo dinamico* si presta più propriamente alla simulazione di sistemi

---

<sup>2</sup> Cfr. "2.1.3 Assegnazione", pag. 59.

<sup>3</sup> Cfr. nota 1, pag.42.

<sup>4</sup> A ben vedere il *modo statico* potrebbe anche utilizzarsi per simulare un sistema informativo di tipo statico (cfr."1.3.2.2 Caratteristiche dell'informazione somministrata", pag. 30), in contesti di funzionamento stazionari, tuttavia di scarso interesse tanto ai fini teorici di studio degli effetti dell'informazione, quanto ai fini delle applicazioni reali. L'utilità del ricorso ad un sistema informativo risiede, infatti, nella funzione di ricondurre un sistema di trasporto da condizioni di spiccata variabilità a condizioni stabili, quindi l'interesse applicativo e gli sforzi di modellazione sono prevalentemente rivolti ai sistemi d'informazione in tempo reale, come tali necessariamente dinamici.

informativi, provvedendo all'aggiornamneto nel passo degli insiemi di scelta dei percorsi alternativi e delle misure di performance del sistema da cui dipendono le percentuali di assegnazione. In particolare esso consente di modellare ambedue gli scenari informativi, preventivo ed adattivo, attraverso due opzioni di assegnazione alternative, rispettivamente:

- senza reindirizzamento dinamico (di default), secondo cui le probabilità di scelta vengono ricalcolate (sulla scorta delle misure di performance raccolte nel passo precedente), per i soli veicoli che nel passo corrente si immettono nel sistema;
- con reindirizzamento dinamico - *dynamic rerouting* -, che prevede l'aggiornamento nel passo corrente delle probabilità di scelta relative non solo ai veicoli in ingresso ma anche ad un'aliquota dei veicoli già all'interno del sistema, per i percorsi che dalla sezione correntemente occupata dal veicolo si diramano verso il rispettivo centroide di destinazione.

In seno al modo statico, come dettagliatamente descritto nell'apposito capitolo<sup>5</sup>, si possono distinguere quattro metodi di assegnazione:

1. *O/D Routes based*;
2. *Path Assignment Results based*;
3. *Fixed using Travel Times calculated under Free-flow Condions*;
4. *Fixed using Travel Times calculated at the end of a Warm-up Period*.

Si tratta di metodi *deterministici*, in quanto sia l'insieme di scelta dei possibili percorsi alternativi compresi fra le diverse coppie O/D, che le rispettive percentuali di assegnazione, sono determinati univocamente, secondo modalità specifiche per completezza di seguito brevemente richiamate: nel primo caso lo stesso modellatore definisce le *O/D Routes* (come sequenze di archi consecutivi che si svolgono da una data origine ad una destinazione), e fissa le relative percentuali di assegnazione (con l'unico vincolo di rispettare il complemento a cento fra le diverse alternative disponibili per una stessa coppia O/D); nel secondo caso, percorsi e relative percentuali di assegnazione discendono da una preliminare procedura di assegnazione in genere condotta in ambito macroscopico o mesoscopico<sup>6</sup>; nel

---

<sup>5</sup> Cfr. § 2.1.3.3.5 Modelli di Assegnazione, pag. 86.

<sup>6</sup> Il metodo *PARs based* è dunque sì deterministico nell'ambito della simulazione in cui viene utilizzato, ma, avvalendosi di risultati ottenuti da precedenti assegnazioni che possono essere a loro volta basate su algoritmi probabilistici, risulta comunque più prossimo al funzionamento effettivo della rete modellata, mantenendo una radice aleatoria.

terzo, percorsi e relativi flussi sono determinati attraverso un processo di *Assegnazione a Tutto o Niente - All or Nothing Assignment* - basato sui *tempi di viaggio a flusso libero - free flow travel times* - determinati univocamente all'avvio della simulazione; nel quarto caso, percorsi e relativi flussi discendono anch'essi da un processo di assegnazione a tutto o niente che si avvale però dei tempi di viaggio desunti da una simulazione preliminare "di riscaldamento" - *Warm-up Period* - la cui durata è stabilita dallo stesso modellatore<sup>7</sup>. Emerge chiaramente, da queste considerazioni, il carattere statico del processo di assegnazione proprio di questi approcci, in quanto percentuali di assegnazione e relativi percorsi rimangono inalterati durante l'intera simulazione. Ai fini delle analisi condotte nel presente studio, per l'implementazione dello scenario privo di sistemi informativi, fra i quattro metodi appena elencati, si è escluso il ricorso al solo basato sui *Path Assignment Results*, non disponendo dei moduli software di macrosimulazione o mesosimulazione indispensabili alla elaborazione di tali risultati.

In seno al modo dinamico, l'assegnazione è governata invece da algoritmi di scelta del percorso - *Route Choice Models* - di tipo discreto e *probabilistico*, già ampiamente discussi nell'apposito capitolo<sup>8</sup>, e di seguito per completezza elencati:

1. *Binomial*;
2. *Proportional*;
3. *Multinomial Logit*;
4. *Multinomial C-Logit*.

Di questi, il primo non tiene conto dei costi di viaggio, bensì calcola le probabilità di scelta dei diversi percorsi in funzione dell'istante d'individuazione del percorso stesso; ricorrere a questo modello equivale ad assumere l'ipotesi che gli utenti della rete adottino quale criterio principale di scelta la memoria anziché una stima comparata dei costi percepiti,

---

<sup>7</sup> Sebbene il *Warm-up period* sia inferiore all'intero orizzonte temporale di simulazione, per cui il modulo software deputato non è in grado di assegnare l'intera domanda di trasporto, e conseguentemente venga esplorato un minor numero di alternative di viaggio fra quelle possibili, purtuttavia, legando le percentuali di assegnazione ai tempi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare e quindi al funzionamento del sistema, questo metodo, a differenza del modello basato sui tempi di viaggio a flusso libero, restituisce un quadro di risposta più verosimile.

<sup>8</sup> Cfr. "2.1.3.3 Dynamic Traffic Assignment", pg. 70.

privilegiando i percorsi sperimentati più di recente o viceversa quelli maggiormente consolidati nella propria esperienza<sup>9</sup>.

I restanti algoritmi assumono, invece, quale fattore predominante nella formulazione delle scelte di percorso da parte degli utenti del sistema di trasporto, il costo sostenuto per compiere lo spostamento, essenzialmente riconducibile al tempo di viaggio.

Nell'ambito degli scopi del presente studio, data la consapevolezza che il contenuto informativo per potere essere efficace deve riguardare i parametri che gli utenti reputano determinanti nella formulazione delle scelte di viaggio, e riconosciuto nel costo di viaggio quello fra di essi prevalente, si è escluso il ricorso alla funzione di scelta di tipo binomiale - *Binomial Route Choice Function* - concentrando l'interesse ai soli algoritmi espressi da funzioni dei costi di viaggio. Fra questi poi, la scelta è ricaduta sul modello *Multinomial Logit*, per i motivi qui brevemente esposti.

Nell'espressione analitica della distribuzione di tipo *Proporzionale*, i costi di percorso figurano direttamente come argomenti di potenze, ciò comporta che piccoli cambiamenti dei tempi di viaggio determinano variazioni significative delle probabilità di scelta, traducendo una marcata sensibilità delle scelte alle oscillazioni di costo, pur attenuabile operando sul parametro di calibrazione  $\alpha$ . Nella distribuzione di tipo *Logit*, le probabilità sono invece legate ai costi tramite esponenziali; in questo modo la variabilità delle scelte con i costi è più contenuta rispetto al modello *Proporzionale*, permettendo di cogliere meglio il carattere aleatorio delle scelte operate dall'utenza, ovvero il concorso di molteplici fattori alla formulazione della scelta, che possono anche esulare da esclusive valutazioni di costo sia pure generalizzate. In altri termini, pur ammettendo che gli utenti abbiano tutti una nozione esatta (deterministica), dei costi di viaggio associati ai diversi percorsi che collegano una data coppia O/D (i.e. *perceived travel times* coincidenti con gli *actual travel times*)<sup>10</sup>, il modello *Logit* restituirà probabilità di scelta comunque più uniformi rispetto al modello *Proporzionale*, il che indica la sua più spiccata capacità di tenere conto di altre concause di natura aleatoria non riconducibili ai soli errori di valutazione dei costi.

Si è poi escluso il ricorso al modello *C-Logit*, per la maggiore complessità del processo di calibrazione.

---

<sup>9</sup> Il prevalere dell'uno o dell'altro orientamento può essere determinato dal modellatore assegnando un valore appropriato al parametro  $p$  - *success probability* - della *distribuzione binomiale* (a valori più elevati di  $p$  corrispondono maggiori probabilità di scelta dei percorsi più recenti).

<sup>10</sup> Escludendo così l'aleatorietà nella stima dei tempi di viaggio.

Individuati come sopra i modelli di scelta più idonei agli scopi del presente studio, si è proceduto alla loro opportuna combinazione al fine di riprodurre diversi contesti informativi, secondo le modalità qui descritte. Si è inteso riprodurre da un lato diversi tassi di somministrazione preventiva dell'informazione (o equivalentemente diversi gradi di penetrazione commerciale dei dispositivi di infomobilità), dall'altro diversi livelli di reindirizzamento. Per non complicare ulteriormente la procedura di simulazione, evitando un'inutile proliferazione di scenari - *Scenarios* - e la conseguente moltiplicazione delle repliche del processo di simulazione - *Replications* -, ed al contempo consentire una lettura più chiara dei risultati evitando la sovrapposizione degli effetti prodotti dai due fattori, si è preferito esaminare separatamente i due contributi di:

- a. tasso di disseminazione pre-trip;
- b. tasso di reindirizzamento en-route.

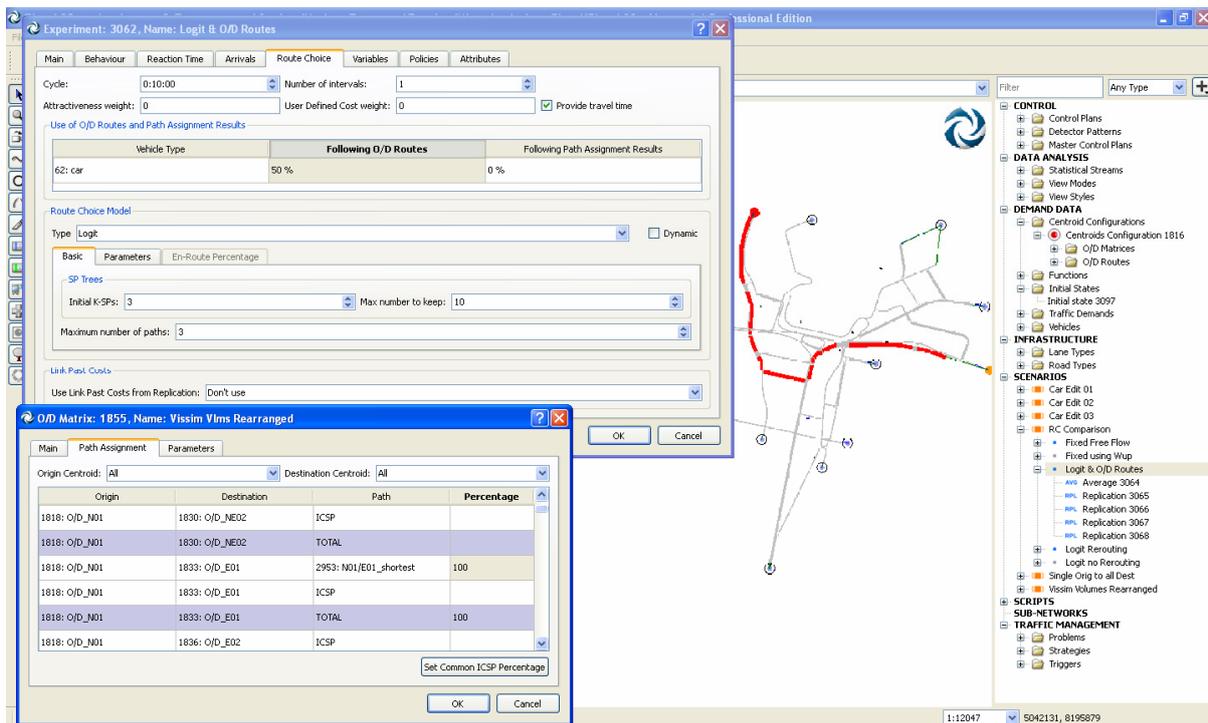
In altri termini rispettivamente: sono state considerate diverse percentuali di disseminazione in fase preventiva per un unico prestabilito grado di reindirizzamento, pari a zero, ovvero nell'ipotesi di assenza di reindirizzamento dinamico dei veicoli; viceversa, mantenendo invariato il tasso di disseminazione pre-trip, pari al 100%, sono stati impostati diversi gradi di reindirizzamento.

La prima condizione è stata ottenuta combinando il modello di scelta discreta probabilistico di tipo Logit (senza la selezione dell'opzione "Dynamic" di reindirizzamento), con il modello di precarico della rete basato su preordinate O/D Routes. Questa scelta operativa è consentita in Aimsun dalla particolare struttura della procedura di assegnazione che ammette la possibilità di impostare la percentuale della domanda di traffico complessiva, generata in ciascun passo di simulazione, da assegnare secondo i *modelli di precarico* (PAR e/o ODR), ricavando per differenza quella da assegnare invece attraverso il preselezionato *modello di scelta discreta*. Peraltro, come dettagliatamente descritto nel capitolo dedicato ai modelli di assegnazione, il numero di veicoli effettivamente assegnati, in ogni passo di simulazione, a ciascuna predefinita O/D Route che collega la generica coppia O/D, è il risultato dell'applicazione alla domanda di spostamento generata nel passo per quella coppia O/D, di due percentuali, nell'ordine: quella, impostata al livello di Experiment<sup>11</sup>, che stabilisce la quota di veicoli che segue

---

<sup>11</sup> Nel campo '*Vehicles following O/D Routes*', predisposto nella tab folder '*Route Choice*', dell'editor di ciascun *Experiment*.

l'assegnazione basata su O/D Routes; e quella, impostata distintamente per ciascuna coppia O/D nell'editor della Matrice O/D<sup>12</sup>, che precisa la quota di veicoli da destinare specificatamente alla data O/D Route (Fig. 3.1). Così, si è deciso di assegnare alla prima il valore definitivo del 50% ed alla seconda valori comuni a tutte le O/D Routes implementate per le diverse coppie O/D, via via crescenti attraverso le successive simulazioni, rispettivamente del 25%, 50%, 75% e 100%. In definitiva (come è agevole desumere moltiplicando di volta in volta le due aliquote), ciò è equivalso a considerare livelli di precarico rispettivamente del 12,5%, 25%, 37,5% e 50%.



**Fig. 3.1 - Impostazione dei tassi che regolano l'assegnazione secondo il modello di precarico O/D Routes based in Aimsun.**

Il modello di assegnazione basato su prestabilite O/D Routes, contemplato dal microsimulatore Aimsun, richiede la definizione di due tassi di assegnazione: uno generale, da impostare a livello di Experiment, che stabilisce la quota dell'intera domanda di trasporto assegnata secondo il modello O/D Routes based; l'altro, da impostare nell'editor della Matrice O/D per ciascuna delle O/D Routes che collegano le coppie O/D d'interesse, che stabilisce nel dettaglio la percentuale di veicoli (estrpolata dalla domanda di trasporto destinata alle sole O/D Routes), da assegnare a quella specifica O/D Route.

<sup>12</sup> Tale valore percentuale va precisato nell'apposito campo predisposto nella tab folder 'Path Assignment', della matrice O/D.

Poiché nella prospettiva interpretativa proposta dal presente studio, il precarico della rete lungo O/D Routes, riproduce un'utenza che effettua le proprie scelte di viaggio sulla scorta di una conoscenza storica pregressa (quindi priva di un supporto informativo in tempo reale che prescindere dalla mera esperienza diretta), mentre l'assegnazione dinamicamente aggiornata secondo modelli di scelta discreta probabilistici basati su parametri di costo, quale in particolare il Logit, rappresenta invece l'utenza informata in tempo reale<sup>13</sup> prima di intraprendere il viaggio e che non modifica adattivamente le proprie scelte lungo il percorso, discende immediatamente che il complemento a cento delle percentuali di precarico anzidette rappresenta proprio il tasso di disseminazione dell'informazione preventivamente somministrata all'utenza del sistema, dunque pari rispettivamente allo 87,5%, 75%, 62,5% e 50%. Nel resto della trattazione ci si riferirà al modello misto così assemblato col nome "*Logit Static & O/D Route x%*", ove la qualificazione 'static' denota l'assenza di reindirizzamento dinamico, ovvero la fedeltà dell'utente alla scelta assunta in fase preventiva su base informativa, mentre la variabile x% precisa di volta in volta l'aliquota della domanda di trasporto assegnata alle O/D Routes.

Per riprodurre un tasso di disseminazione dell'informazione somministrata in fase pre-trip del 100%, sempre in assenza di reindirizzamento, si è adottato il solo modello di scelta discreta Logit ancora una volta senza la spunta dell'opzione 'Dynamic', escludendo la fase di precarico della rete. Ciò è stato ottenuto attribuendo valore nullo alla percentuale di veicoli assegnati a prestabilite O/D Routes attraverso il modello di carico deterministico a tutto o niente - *Vehicle following O/D Routes %* -, così da assicurare che il 100% della domanda di trasporto venisse assegnata esclusivamente in accordo al preselezionato modello di scelta discreta.

Il modello di assegnazione così formulato è stato denominato "*Logit Static*" ad indicare sinteticamente la funzione di scelta discreta che lo sorregge (Logit per l'appunto), l'assenza di reindirizzamento dinamico (ovvero d'informazione somministrata durante la fase di viaggio), e l'assenza di quote di precarico e dunque di gradi di disseminazione diversi dal 100%.

La seconda configurazione informativa, tesa a riprodurre diversi gradi di reindirizzamento dinamico, è stata ottenuta attraverso il modello di scelta Logit 'puro', senza cioè alcun

---

<sup>13</sup> Secondo il paradigma interpretativo proposto dal presente studio, la frequenza di somministrazione dell'informazione all'utenza si identifica con l'inverso del passo di aggiornamento delle probabilità di scelta del percorso - *RC Cycle* -.

precarico della rete, selezionando adesso però l'opzione 'Dynamic', che attiva la procedura di riassegnazione dinamica in itinere dei veicoli già immessi nel sistema, ed attribuendo alla percentuale di reindirizzamento - *En-Route Percentage* -, valori via via crescenti, attraverso le successive simulazioni, rispettivamente pari al 25%, 50%, 75% e 100%.

In questo modo l'intera domanda di trasporto viene assegnata esclusivamente secondo il preselezionato modello di scelta discreta, ed un'aliquota dei veicoli, secondo la prefissata percentuale, può essere reindirizzata durante il suo spostamento in accordo al modello probabilistico di scelta del percorso. Poiché, fra l'altro, ciascun veicolo che risulti idoneo al reindirizzamento (secondo la procedura di estrazione aleatoria governata dal parametro *En-Route Percentage*), è effettivamente assegnato ad un nuovo percorso solo qualora più vantaggioso rispetto a quello attuale e comunque in accordo alla relativa probabilità di scelta, consegue che il numero di veicoli effettivamente reindirizzati durante l'intero periodo di simulazione non coincida esattamente con la preimpostata percentuale di reindirizzamento.

In accordo con questo modello, tutti i veicoli che durante ciascun passo di simulazione si accingono ad immettersi nel sistema, vengono assegnati a percorsi e secondo probabilità di scelta aggiornati nel passo sulla scorta dei tempi di viaggio desunti nel corso della simulazione, un'aliquota degli stessi è inoltre ammessa alla possibilità di essere riassegnati durante il viaggio al percorso più breve a partire dalla posizione correntemente occupata lungo la rete.

I primi possono riguardarsi come utenti che prima d'intraprendere il viaggio dispongono dell'informazione sullo stato della rete, potendo però attenervisi o meno (essendo comunque il modello di selezione dei percorsi di tipo probabilistico), secondo un livello di compliance per l'appunto in parte espresso dalla stessa aleatorietà insita nel modello di scelta discreta (dunque non esplicitato).

I secondi, invece, rappresentano utenti costantemente informati sullo stato della rete che durante il viaggio possono o meno adattare le proprie scelte di percorso all'informazione ricevuta, secondo un comportamento di scelta contrassegnato dall'aleatorietà risultante dalla combinazione delle due procedure che governano il reindirizzamento (rispettivamente la selezione del veicolo abilitato alla diversione in itinere, e la sua riassegnazione), e che ingloba in maniera difficilmente discernibile la compliance all'informazione.

Questo modello di assegnazione consente, dunque, di riprodurre contestualmente la somministrazione d'informazione sia in fase *pre-trip* all'intero bacino di utenza, che in fase di viaggio - *er-route* - con diversi tassi di disseminazione corrispondenti alle prefissate

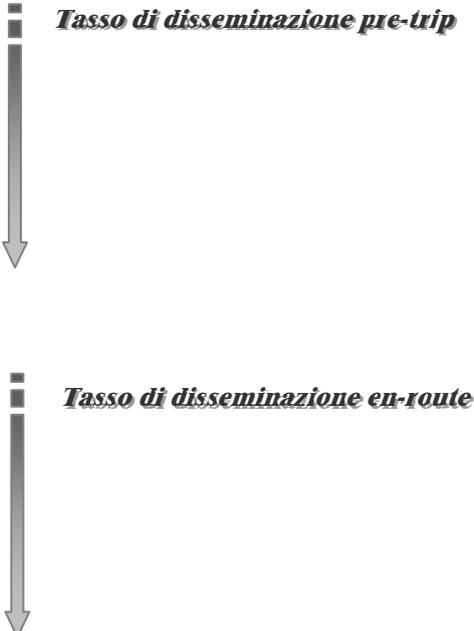
percentuali di reindirizzamento. Nel seguito della trattazione esso verrà sinteticamente denotato col nome “*Logit Dynamic y% Rerouting*”, ove la variabile  $y\%$  precisa di volta in volta la percentuale di veicoli abilitati alla diversione, ovvero di utenti che attingendo costantemente alla fonte informativa possono adattare continuamente le proprie scelte di percorso durante tutto il viaggio.

In fine ma non in ordine d'importanza, è stato implementato un ultimo modello di assegnazione che si caratterizza, anch'esso come il precedente, per l'adozione di un unico criterio di selezione del percorso cui si conforma l'intera utenza del sistema, stavolta identificato nel modello di scelta discreta di tipo deterministico *Fixed using Travel Times calculated at the end of a Warm-up Period*, che opera un'assegnazione *a Tutto o Niente* sulla scorta dei tempi di viaggio desunti da una preliminare simulazione di Warm-up. Questo modello riproduce la condizione limite ideale in cui tutti gli utenti del sistema di trasporto abbiano una cognizione deterministica dello stato della rete ed operino coerentemente le proprie scelte di percorso; essendo però i tempi di viaggio che supportano tali scelte, riferiti ai soli confini temporali del periodo di Warm-up, l'anzidetta nozione non è a rigore relativa allo stato attuale del sistema bensì circoscritta al suo funzionamento durante il periodo iniziale, come tale caratterizzato certamente da ridotti se non del tutto assenti fenomeni di congestione.

È ragionevole attendersi dunque, per estensione, che questo modello consenta di riprodurre bene la condizione teorica ideale in cui gli utenti hanno esatta conoscenza dello stato attuale del sistema (cui tendere attraverso le diverse strategie informative implementate attraverso i modelli di assegnazione fin qui elencati), fino a livelli di carico tali per cui i fenomeni di congestione possano ritenersi trascurabili, superati i quali perde tale connotazione di efficienza.

Le caratteristiche appena descritte hanno suggerito l'apposita introduzione di quest'ultimo modello come utile riferimento rispetto al quale istituire il confronto fra i diversi modelli di assegnazione implementati. Nel seguito della trattazione ci si riferirà sinteticamente ad esso con la denominazione “Fixed using W-up”.

Riassumendo brevemente, sono stati implementati quattro modelli di assegnazione, con le relative declinazioni parametriche, per riprodurre altrettante configurazioni informative:

1. *Fixed using W-up*
  2. *Logit Static & O/D Routes x%*
    - 2.1. *Logit Static & O/D Routes 50%*
    - 2.2. *Logit Static & O/D Routes 37,5%*
    - 2.3. *Logit Static & O/D Routes 25%*
    - 2.4. *Logit Static & O/D Routes 12,5%*
  3. *Logit Static*
  4. *Logit Dynamic y% Rerouting*
    - 4.1. *Logit Dynamic 25% Rerouting*
    - 4.2. *Logit Dynamic 50% Rerouting*
    - 4.3. *Logit Dynamic 75% Rerouting*
    - 4.4. *Logit Dynamic 100% Rerouting*
- 

### 3.1.2 Generazione dei veicoli - *Vehicle Arrival* -

Fra le diverse distribuzioni aleatorie di intertempi<sup>14</sup> predisposte in seno al microsimulare Aimsun per generare i veicoli in ingresso nel sistema, di seguito elencate:

- *Esponenziale;*
- *Normale;*
- *Uniforme;*
- *Costante;*
- *ASAP - As Soon As Possibile -;*

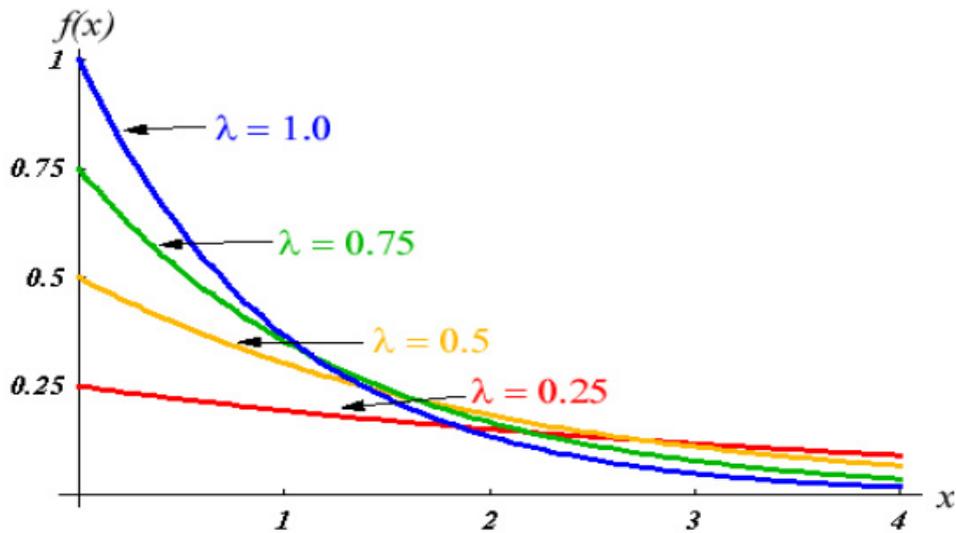
si è scelto di adottare quella Esponenziale<sup>15</sup>, indifferentemente per tutti i centroidi di origine - *Global Arrival* - (il software consentirebbe, infatti, anche di impostare algoritmi di generazione diversi per ciascun centroide di origine). In generale tale distribuzione si presta bene, infatti, a rappresentare il tempo di attesa prima che si verifichi un certo evento

---

<sup>14</sup> Nel caso specifico dei *modelli di generazione dei veicoli*, per 'Intertempo' - *Headway* - s'intende l'intervallo di tempo, espresso in secondi, che intercorre fra due successivi ingressi nella rete.

<sup>15</sup> Cfr. Bibliografia: Cowan R. J., [4], pag. 210.

casuale, quale, in particolare nel campo trasportistico d'interesse, l'ingresso nella rete di un veicolo.



**Fig. 3.2 - Distribuzione Esponenziale di Intertempi al variare del parametro  $\lambda$ .**

Al crescere del flusso medio di veicoli in ingresso nel sistema, espresso dal parametro  $\lambda$ , la *Distribuzione Esponenziale* diventa via via più ripida, indicando l'accresciuta probabilità di attingere intertempi sempre più piccoli.

In accordo con questo modello di generazione, denotati con  $\lambda$  il flusso di domanda (veh/sec), e dunque con  $1/\lambda$  l'intertempo medio (sec), l'algoritmo di calcolo dell'intertempo,  $t$ , assume la formulazione seguente:

```

u = random (0,1)
if  $\lambda > 0$ 
     $t = -\frac{1}{\lambda} \cdot \ln(u)$ 
else
    t = max_float
endif
    
```

### 3.1.3 Modelli di comportamento - *Vehicle Behavioural Models* -

Come si è avuto già modo di descrivere dettagliatamente nel'apposito capitolo<sup>16</sup>, in seno al Microsimulatore Aimsun il moto dei veicoli, le manovre da essi attuate e la loro reciproca interazione dinamica sono governati da tre modelli:

- *Car Following Model*;
- *Lane Changing Model*;
- *Gap-Acceptance Model*;

ognuno di essi funzione di opportuni parametri da precisare su tre scale:

- a. singolarmente per ciascun tipo di veicolo, consentendo di diversificare il comportamento per classi di utenza - *Vehicle Attributes* -;
- b. localmente ma indifferentemente per tutte le tipologie di veicolo, al livello dei singoli archi stradali della rete - *Local Network Parameters* -;
- c. globalmente, per tutti i tipi di veicolo e sull'intera rete, a livello di Experiment - *Global Network Parameters* -.

Fra i più importanti appartenenti al primo gruppo *a.*, rientrano i seguenti (Fig. 3.3):

- *Maximum Desired Speed*.  
Massima velocità (km/h), a cui può viaggiare il veicolo conformemente alle proprie caratteristiche prestazionali.
- *Maximun Acceleration*.  
Massima accelerazione ( $m/s^2$ ), raggiungibile dal veicolo conformemente alle proprie caratteristiche prestazionali.
- *Normal Deceleration*.  
Massima decelerazione ( $m/s^2$ ), conseguibile in condizioni di marcia normali.
- *Maximum Deceleration*.  
Massima decelerazione ( $m/s^2$ ), che può esser prodotta da un veicolo in condizioni speciali (e.g. frenata di emergenza).
- *Speed Acceptance*.  
Parametro adimensionale (non negativo), che esprime la correttezza del comportamento di guida del viaggiatore in termini di grado di ottemperanza ai limiti

---

<sup>16</sup> Cfr. § 2.2 Modellazione della condotta di guida in ambiente Aimsun, pag. 109.

di velocità vigenti nell'arco stradale in cui transita. Assumere  $\theta \geq 1$  comporta che il veicolo considererà come velocità massima di crociera un valore maggiore del limite effettivo imposto nell'arco stradale attraversato; viceversa  $\theta \leq 1$  comporta che il veicolo si manterrà ad una velocità di marcia inferiore al limite massimo consentito.

- *Minimum Distance Between Vehicles.*

Distanza minima (m), mantenuta da ciascun veicolo rispetto a quello che lo precede, quando si arrestano.

- *Maximum Give-way Time.*

Tempo massimo (sec), che il generico guidatore è disposto ad attendere in arresto per dare la precedenza ai veicoli a più elevata priorità, ad esempio quando si trovi in prossimità di uno stop o di un segnale di precedenza in attesa di attraversare un'intersezione stradale o di immettersi nel flusso veicolare principale. In questi casi il veicolo applica rispettivamente i modelli gap-acceptance o lane-changing, e qualora rimanga fermo per un periodo di tempo superiore al Max Give-way Time, riduce i margini di accettabilità che garantiscono la sicurezza della manovra, adottando dunque un comportamento più aggressivo.

- *Guidance Acceptance.*

Grado di osservanza (%), alle prescrizioni di manovra o indicazioni di guida fornite attraverso VMSs o Vehicle Guidance Systems, associate a specifiche Azioni - *Actions* - predisposte nell'ambito di Strategie di Gestione del Traffico - *Traffic Management Strategies* -. Esso esprime la probabilità che il generico veicolo segua le raccomandazioni fornite.

- *Sensitivity Factor.*

Fattore adimensionale che esprime la capacità del guidatore di stimare la decelerazione del veicolo che lo precede. In particolare assumere  $a < 1$  comporta che il generico guidatore sottostimi la capacità di decelerazione del veicolo che lo precede, adottando conseguentemente un comportamento di guida più aggressivo, caratterizzato da ridotte distanze di marcia rispetto al veicolo leader. Viceversa  $a > 1$  implica che lo stesso sovrastimi la capacità di decelerare del veicolo che lo precede, ovvero la sua prontezza e rapidità nel ridurre la velocità di marcia, e dunque assuma una condotta di guida più prudente, con accresciute distanze di marcia rispetto al leader.

- *Minimum Headway.*

Tempo minimo (sec), che intercorre fra il passaggio di due successivi veicoli.

Per ciascuno di questi parametri è possibile precisare, nell'editor dello specifico vehicle type: valore medio, valore massimo, valore minimo e deviazione standard; il valore assegnato automaticamente a ciascun veicolo, di quel tipo, immesso nel sistema è quindi estrapolato stocasticamente secondo la corrispondente Distribuzione Normale.

Fra i secondi  $b$ , i più rilevanti sono invece:

- *Section Speed Limit.*

Velocità massima (km/h), consentita nell'arco stradale in relazione alla rispettiva categoria di appartenenza.

- *Visibility Distance at Junctions.*

Qualora l'arco stradale confluisca in un'intersezione, tale parametro rappresenta la distanza (m), dall'estremità finale dell'arco stradale entro la quale è applicato il modello di gap-acceptance.

- *Distance Zone  $i$ ,  $i=1,2$ .*

Distanze che intercorrono rispettivamente fra le estremità terminali dell'arco stradale e delle zone 1 e 2 a più ridotta urgenza di manovra al suo interno individuate. Espresse in unità di tempo (sec), intervengono nel modello di lane-changing nel quale sono convertite, per ciascun veicolo, in lunghezze avvalendosi di un opportuno parametro di velocità (funzione del *limite di velocità* dell'arco stradale e della *velocità desiderata* del singolo veicolo). Ciò consente di correlare l'estensione delle zone oltre che alla categoria stradale dell'arco, anche alle caratteristiche del veicolo, ottenendo valori diversi per i diversi tipi di veicolo a vantaggio di una riproduzione più realistica del meccanismo di cambio corsia.<sup>17</sup>

- *Reaction Time Variation.*

Fattore adimensionale intero algebrico che, moltiplicato per l'intervallo di simulazione - *Simulation Step* -, introduce un'alterazione locale, additiva o sottrattiva, del *Tempo di Reazione* (impostato univocamente per tutti i tipi di veicolo a livello di Experiment), in accordo all'espressione:

$$RT_{V,S} = RT_V + RTV_S \cdot SimStep \quad (3.1)$$

---

<sup>17</sup> L'estensione della *Zona 1* (la più distante dall'estremità terminale dell'arco), è ottenuta per differenza fra la lunghezza dell'arco e la *Distance Zone 1*; quella della *Zona 2* intermedia, è fornita dalla differenza fra i parametri *Distance Zone 1* e *Distance Zone 2*; l'estensione della *Zona 3*, più prossima all'estremità terminale dell'arco stradale, coincide con *Distance Zone 2*.

con la seguente notazione dei simboli:

- $RT_{V,S}$ , Tempo di Reazione del generico veicolo  $v$  lungo l'arco  $s$ ;
- $RT_V$ , Tempo di Reazione del generico veicolo  $v$ ;
- $RTV_S$ , Variazione del Tempo di Reazione attinta nell'arco  $s$ ;
- $SimStep$ , Intervallo di Simulazione.

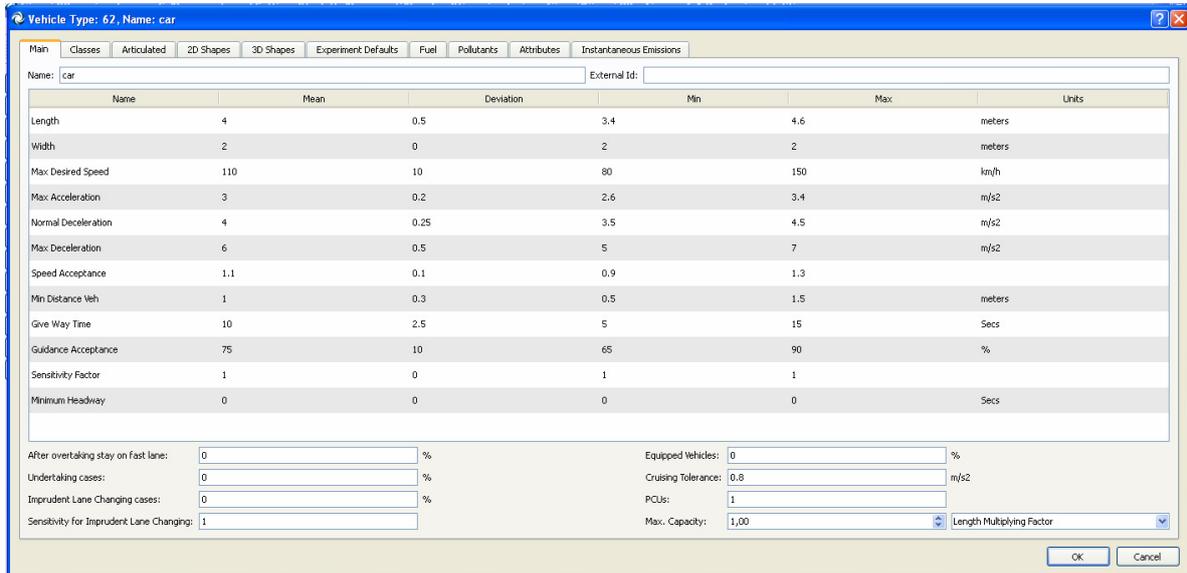
- *Maximum Give Way Time Variation.*

Alterazione locale del *Maximum Give-way Time* del generico veicolo, espressa attraverso un termine intero algebrico (in sec), che incrementa o riduce il tempo di reazione impostato per il rispettivo vehicle type, in accordo alla seguente espressione:

$$GwT_{V,S} = GwT_V + GwTV_S \quad (3.2)$$

con evidente significato dei simboli.

Questi parametri influenzano il comportamento del veicolo solo localmente, lungo l'arco di pertinenza.



**Fig. 3.3 - Impostazione dei parametri prestazionali del singolo *Vehicle Type* in Aimsun**

In figura è rappresentato l'editor del generico vehicle type, nel quale è possibile impostare i valori dei diversi parametri -*Vehicle Attributes*- che determinano il comportamento di guida degli utenti da esso esemplificati.

Infine i parametri appartenenti al terzo gruppo *c.*, da impostare globalmente a livello di experiment, sono:

- *Reaction Time.*

Tempo di Reazione (sec), impiegato dal generico guidatore per adeguare il regime di marcia del proprio veicolo ai cambiamenti di velocità del veicolo che lo precede. Nell'apposito editor sono contemplate due opzioni: *Fixed, Variable*. Nel primo caso il RT è lo stesso per tutti i veicoli di qualsiasi tipologia. Nel secondo caso può invece definirsi, singolarmente per ciascun vehicle type, attraverso un'opportuna funzione di massa di probabilità, dalla quale verrà poi estrapolato il valore assegnato al singolo veicolo di quel determinato tipo. Trattandosi di un parametro 'globale', impostato al livello di Experiment, per ciascun veicolo esso è costante durante l'intero spostamento, a meno di modifiche locali - *Reaction Time Variation* -, impostate in prescelte sezioni, che intervengono ivi in maniera uniforme su tutti i veicoli che vi transitano, indipendentemente dalla tipologia.

- *Queuing Up Speed / Queuing Leaving Speed.*

Soglie di velocità (m/s), al di sotto ed al di sopra delle quali il generico veicolo è considerato rispettivamente in stasi e dunque in coda, o in moto, dunque non più in coda. Questi parametri oltre ad influenzare i criteri di raccolta dei dati relativi alle fasi di arresto (e.g. *number of stops, stop time, queue lenght, etc.*), concorrono a precisare la definizione di *condizione di arresto*, indispensabile all'applicazione del lane changing model nella Zona 3.

- *Percentage Overtake / Percentage Recover.*

Percentuali della Velocità Desiderata al di sotto ed al di sopra delle quali il generico guidatore rispettivamente è indotto ad intraprendere il sorpasso o a rientrare nella corsia più lenta. In altri termini, ogni qual volta il veicolo leader viaggia ad una velocità inferiore alla Percentage Overtake della Velocità Desiderata del veicolo che segue, quest'ultimo tenterà di occupare la corsia di sorpasso; viceversa ogni volta che il veicolo che lo precede marcia ad una velocità superiore alla Percentage Recover della Velocità Desiderata, il veicolo che segue tenterà di rimettersi nella corsia immediatamente a destra.

Questi ultimi parametri valgono per tutti i veicoli di qualsiasi tipo, in un qualsiasi punto del sistema durante l'intera simulazione, di qui la denominazione di *Global Parameters*.

Ancora, un ultimo parametro globale che, pur non intervenendo esplicitamente nei modelli di comportamento dei veicoli, li influenza comunque indirettamente, è la durata dell'intervallo di simulazione - *Simulation Step* o *Simulation Cycle* -, che scandisce l'aggiornamento dello stato di tutti gli elementi del sistema (veicoli, traffic lights, etc.). Scelta l'opzione 'Fixed', il Reaction Time è infatti definito come multiplo del Simulation Step, quindi tanto più piccolo è il valore assegnato a quest'ultimo (comunque compreso nell'intervallo 0.1÷1.0 sec), tanto più piccolo risulta il Reaction Time, ovvero tanto maggiore la prontezza degli utenti del sistema, che dimostreranno dunque una guida più esperta.

Sebbene il Microsimulatore adottato consenta, come ampiamente evidenziato, di diversificare la composizioni dell'utenza del sistema di trasporto a discrezione del modellatore in relazione alle specifiche esigenze di analisi, consentendo l'implementazione di una molteplicità di tipologie di veicolo - *Vehicle Types* -, purtuttavia agli scopi del presente studio si è ritenuto sufficiente considerare un bacino di utenza costituito esclusivamente da automobili aventi le stesse caratteristiche prestazionali, tralasciando mezzi pesanti e mezzi pubblici. Si è dunque implementato un solo tipo di veicolo denotato col nome "Car". Quanto ai parametri che ne governano il comportamento, non potendo disporre, come a rigore necessario, di dati statistici inerenti le prestazioni medie di veicoli di media cilindrata ed i comportamenti di guida attuati dall'utenza del sistema di trasporto privato su autoveicolo in un contesto assimilabile a quello del caso studio adottato, sono stati mantenuti i valori proposti di default dal Microsimulatore. Tali valori non sono stati, però, accettati in maniera acritica, provvedendo a condurre opportune analisi preliminari di sensibilità dei modelli di comportamento dei veicoli rispetto ad alcuni parametri chiave individuati fra i numerosi testè per completezza elencati, e precisamente:

1. *Reaction Time*;
2. *Maximum Give-way Time*;
3. *Minimum Headway*;
4. *Maximum Acceleration*.

Gli esiti di tali analisi saranno illustrati dettagliatamente più avanti nel corso delle trattazioni.

## 3.2 Strutturazione del processo di simulazione

Il software di simulazione Aimsun contempla tre modalità alternative di caricamento del modello, ovvero tre meccanismi di simulazione della propagazione dei flussi attraverso il sistema, corrispondenti a livelli di dettaglio via via crescenti, conformi ai tre approcci alla simulazione tradizionalmente riconosciuti in ambito trasportistico:

- a. *Statico Macroscopico*;
- b. *Dinamico Mesoscopico*;
- c. *Dinamico Microscopico*.

Nell'ambito dell'approccio microscopico prescelto ai fini del presente studio, quale il più consono a riprodurre il comportamento dei singoli utenti del sistema in presenza di informazione, il software prevede poi due tipi di assegnazione, come dettagliatamente descritto nell'apposito capitolo, rispettivamente:

1. *Dynamic Traffic Assignemt - DTA -*;
2. *Dynamic User Equilibrium - DUE -*;

la cui scelta determina l'assetto procedurale che governa la simulazione.

In particolare in corrispondenza dell'assegnazione DTA qui adottata, detta procedura si articola secondo un'architettura gerarchica composta da:

1. *Scenarios*;
2. *Experiments*;
3. *Replicactions*;

ad ognuno dei quali competono specifici ambiti di definizione del modello complessivo.

Nella concezione che ispira tale architettura, lo 'Scenario' equivale in ambito virtuale ad un determinato contesto di funzionamento del sistema reale. Nel relativo editor vanno precisati gli aspetti essenziali che lo caratterizzano:

- *Domanda di Trasporto - Travel Demand -*;
- *Piano di Regolazione Semaforica - Master Control Plan -*;
- *Schema di Rilevamento del Traffico - Detection Pattern -*;
- *Frequenza di Rilevamento - Detection Cycle -*;
- *Piano di Trasporto Collettivo - Public Transport Plan -*;
- *eventuali Variabili funzionali alle Strategie di Gestione del Traffico - Variables -*;
- *Strategie di Gestione dei Flussi Veicolari - Strategies -*;

- modalità di campionamento ed archiviazione dei dati restituiti dalla simulazione e gradi di aggregazione spaziale e temporale per la loro elaborazione statistica.

L'Experiment consiste invece in una specifica particolarizzazione dello Scenario, con linguaggio più connotante potremmo definirlo una sua 'concretizzazione'; nel relativo editor è possibile, infatti, precisare parametri e variabili che governano i diversi sottomodelli che partecipano alla composizione del modello complessivo del sistema implementato nell'ambiente virtuale di simulazione, e precisamente:

- Modello Comportamentale dei Guidatori - *Vehicle Behavioural Model* -;
- Tempi di Reazione - *Reaction Time* -;
- Modelli di Generazione dei Veicoli - *Vehicle Arrival* -;
- Modelli di Scelta del Percorso - *Route Choice Models* -;

nonché impostare:

- la modalità di Carico della Rete (Macro-, Meso- o Microscopica) - *Network Loading* -;
- l'Approccio di Assegnazione - *Assignment Approach* - (DTA o DUE);
- la durata del periodo di Warm-up, se previsto, o alternativamente una prestabilita Condizione Iniziale - *Warm-up/Initial State* -;
- la durata del Passo di Simulazione - *Simulation Step* -;
- eventuali Variabili funzionali alle Strategie di Gestione del Traffico - *Variables* -;
- le Politiche di gestione del traffico da attivare fra quelle che rientrano nelle Strategie selezionate a livello di Experiment - *Policies* -;

Per ogni Experiment è infine possibile creare un numero arbitrario di Repliche ciascuna corrispondente ad un diverso valore del *Random Seed*, assegnato automaticamente da un generatore aleatorio di numeri interno al simulatore. La simulazione vera e propria viene, quindi, lanciata separatamente al livello della singola Replication. In definitiva ciascuna Replication corrisponde ad una simulazione dello stesso Experiment di riferimento, per un diverso valore del Random Seed, come tale stocasticamente indipendente dalle altre.

Ai fini del presente studio, gli strumenti e le procedure predisposti nel microsimulatore Aimsun fin qui discussi, sono stati opportunamente forzati, sfruttando i pur ristretti margini di manovra individuati in seno alla sua ben strutturata architettura, per riprodurre i diversi contesti informativi prefigurati. Ricapitolando, dunque, brevemente le scelte inerenti la

modellazione dell'informazione, come ampiamente descritto nell'apposito capitolo<sup>18</sup>, si è deciso di procedere elaborando opportunamente i *modelli di assegnazione*. Così, per riprodurre il contesto privo d'informazione, si è scelto di adottare il modello di assegnazione basato su *O/D Routes*, tra quelli predisposti in seno al *modo statico*, escludendo il *PARs* per le motivazioni ivi già esposte. Nell'ambito dello stesso modo di assegnazione, il modello *Fixed using Travel Times calculated at the end of a Warm-up Period*, è stato invece impiegato per implementare la condizione limite teorica di una conoscenza esatta dello stato della rete per livelli di congestione ridotti, prediligendolo al *Fixed using Travel Times calculated under Free-flow Conditions*, proprio perché correlato al funzionamento effettivo del sistema sebbene entro le anzidette soglie di congestionamento.

Per riprodurre il contesto in presenza d'informazione ci si è rivolti, invece, ai modelli probabilistici di scelta discreta contemplati in seno al *modo dinamico* di assegnazione, ed in particolare alla distribuzione multinominale di tipo *Logit*, tralasciando gli altri (*Binomial*, *Proportional*, *Multinomial C-Logit*), per le ragioni già espresse.

Combinando opportunamente tali modelli, secondo le modalità già diffusamente descritte, sono stati implementati quattro metodi di assegnazione, con le relative declinazioni parametriche, di seguito per completezza riprodotti:

1. *Fixed using W-up*
2. *Logit Static & O/D Routes x%*
  - 2.1. *Logit Static & O/D Routes 50%*
  - 2.2. *Logit Static & O/D Routes 37,5%*
  - 2.3. *Logit Static & O/D Routes 25%*
  - 2.4. *Logit Static & O/D Routes 12,5%*
3. *Logit Static*
4. *Logit Dynamic y% Rerouting*
  - 4.1. *Logit Dynamic 25% Rerouting*
  - 4.2. *Logit Dynamic 50% Rerouting*
  - 4.3. *Logit Dynamic 75% Rerouting*
  - 4.4. *Logit Dynamic 100% Rerouting*

---

<sup>18</sup> Cfr. § 3.1.1 Formulazione dei modelli di assegnazione in funzione informativa, pag.133.

Secondo il paradigma interpretativo che regge l'impostazione del presente studio, ognuno di essi corrisponde ad un preciso contesto informativo, secondo la seguente analogia:

1. Esatta conoscenza dello stato del sistema prima di intraprendere lo spostamento.
2. Informazione preventiva aggiornata in tempo reale.
 

2.1. 50%		<b>Tasso di disseminazione pre-trip</b>	}	<b>Disseminazione en-route 0%</b>
2.2. 62,5%				
2.3. 75%				
2.4. 87,5%				
3. Informazione preventiva aggiornata in tempo reale somministrata al 100% dell'utenza.
4. Informazione preventiva ed informazione adattiva aggiornate in tempo reale.
 

4.1. 25%		<b>Tasso di disseminazione en-route</b>	}	<b>Disseminazione pre-trip 100%</b>
4.2. 50%				
4.3. 75%				
4.4. 100%				

Adottando dunque un'impostazione operativa conforme alle procedure ed all'architettura proprie dell'ambiente di microsimulazione Aimsun, testé descritte, per ognuno dei quattro modelli di assegnazione menzionati è stato definito un corrispondente Experiment<sup>19</sup>, nell'ambito di uno stesso *Scenario* denominato "RC Comparison". Per evitare di ingenerare confusione ed indurre errori grossolani nella successiva fase di trattamento dei dati di output, si è deciso di mantenere un'unitarietà formale denotando ciascun Experiment con lo stesso nome del corrispettivo modello di assegnazione:

1. Fixed Using W-up;
2. Logit Static & O/D Routes;
3. Logit Static;
4. Logit Dynamic Rerouting.

Sebbene per maggiore chiarezza si sarebbe potuto definire in maniera didascalica uno *Scenario* per ogni modalità di implementazione dell'informazione ovvero per ogni contesto informativo, ottenendo così quattro Scenari ciascuno formato da un solo Experiment, la

---

<sup>19</sup> Le specifiche attinenti la procedura di assegnazione vanno infatti precisate nell'apposita tab folder "Route Choice", predisposta nell'editor dell'Experiment.

possibilità di istituire in Aimsun confronti fra gli output di diversi Experiments (sia in termini di singole Replications che di Average di più Replications), solo nell'ambito dello stesso Scenario ha determinato la scelta della soluzione adottata che prevede per l'appunto un solo Scenario con quattro Experiments. D'altro canto, in accordo alle preordinate modalità di analisi di cui si avrà modo di parlare nel seguito della trattazione, detti confronti fra le diverse soluzioni informative devono essere istituiti a parità di domanda di trasporto, precisata a sua volta a livello di Scenario. L'anzidetta scelta operativa è apparsa, dunque, coerente e, seppur sacrifici qualcosa in termini di chiarezza, ha comportato un significativo snellimento in termini procedurali.

Per assicurare poi un'adeguata consistenza statistica ai risultati ottenuti, di ogni Experiment sono state condotte quattro Replications, ognuna caratterizzata da un diverso *random seed*. Poiché però, ai fini dell'analisi proposta, il confronto fra i vari Experiments, deve consentire di mettere in luce le sole modifiche intervenute nella risposta del sistema per effetto del cambiamento di strategia informativa, ovvero di modello di assegnazione (in accordo con l'ipotesi modellistica di fondo), escludendo l'intervento di fattori aleatori estranei, per ogni Experiment è stata adottata la stessa serie di random seeds: 5937, 16895, 28613, 31892. Per lo stesso motivo, nella costruzione di ciascun Experiment si è posta particolare cura nel riportare gli stessi valori dei parametri che governano tutti gli altri modelli che, insieme a quello di assegnazione, concorrono al funzionamento del sistema complessivo (*vehicle behavioural model*, *vehicle generation model*), influenzandone la risposta.

Le quattro declinazioni parametriche previste per i due modelli 2. e 4., allo scopo di riprodurre rispettivamente altrettanti tassi di disseminazione e di reindirizzamento, hanno inoltre richiesto l'iterazione della simulazione dei rispettivi Experiments, ovvero il lancio ripetuto di tutte le Replications definite per ciascuno di essi, per ognuno dei quattro valori percentuali stabiliti, avendo cura di volta in volta di andarli a reimpostare negli appositi campi.

Così in definitiva, per un dato livello carico del sistema, sono state condotte nell'insieme 40 simulazioni, così ripartite:

1. Exp.1 → n° 4 simulazioni (i.e. lancio singolo delle 4 Replications)
2. Exp.2 → n° 16 simulazioni (i.e. lancio ripetuto delle 4 Replications per 4 volte)
3. Exp.3 → n° 4 simulazioni (i.e. lancio singolo delle 4 Replications)
4. Exp.4 → n°16 simulazioni (i.e. lancio ripetuto delle 4 Replications per 4 volte).

## Metodologie e Procedure Adottate

Per indagare, poi, l'evoluzione della risposta del sistema al crescere del livello di congestionamento, il procedimento appena descritto è stato replicato per ognuno dei sette livelli di carico considerati (25%, 50%, 70%, 75%, 80%, 90%, 100%), giungendo in definitiva a condurre complessivamente 280 simulazioni.

## 3.3 Configurazione dei risultati e modalità di analisi

### 3.3.1 Inquadramento

Il presente studio non si avvale di dati attinti dalla realtà fisica tramite apposite campagne di misurazione, bensì ricorre allo strumento della simulazione con lo scopo specifico di valutarne le potenziali capacità di riprodurre contesti di infomobilità. Il principale vantaggio ottenuto dal ricorso a strumenti di tal sorta risiede proprio nella possibilità di disporre di una mole notevole di dati in uscita sui quali condurre le opportune analisi, senza dover ricorrere di volta in volta ad esperimenti e rilevamenti su scala reale.

In questo capitolo saranno descritte le scelte inerenti la configurazione, il trattamento e l'analisi dei dati prodotti dalla simulazione.

### 3.3.2 Grandezze di risposta e livello di aggregazione

Il software di microsimulazione Aimsun adottato è in grado di produrre una molteplicità di dati statisticamente elaborati secondo diversi livelli di aggregazione, rispettivamente su due scale:

- a. spaziale;
- b. temporale.

Quanto all'aggregazione operata su scala spaziale, Aimsun contempla, secondo un grado di dettaglio via via crescente, i livelli di seguito elencati:

1. *System Statistics*;
2. *O/D Statistics*;
3. *Sub-Path Statistics*;
4. *Section Statistics*;
5. *Turning Statistics*;
6. *Detectors Statistics*.

in accordo ai quali l'elaborazioni statistiche sono effettuate su platee di veicoli via via più ristrette in base alla loro dislocazione spaziale.

Se il Software, al termine del processo di simulazione, dispone infatti dei valori istantanei dei diversi parametri di performance, per ognuno dei veicoli transitati nel sistema durante l'intero periodo di simulazione, dunque col massimo grado di disaggregazione ottenibile; in uscita è altresì in grado di restituire, per le stesse grandezze, i rispettivi valori mediati, in

ciascun intervallo di raccolta dati, sui veicoli transitati, in quell'intervallo, rispettivamente: attraverso l'intero sistema (massimo grado di aggregazione), fra singole coppie O/D, lungo specificati percorsi o porzioni di percorso, nei singoli archi, o attraverso predisposti detectors. Agli scopi del presente studio si è ritenuto più significativo descrivere la risposta del sistema in termini globali avvalendosi delle *Statistiche di Sistema*, per avere una visione unitaria dello stato del modello. Allo stesso tempo si è individuato nelle *Statistiche di Origine/Destinazione*, un'utile compromesso per osservare il modello da un'angolazione diversa e ricavare nuovi spunti interpretativi nel confronto fra le diverse configurazioni informative implementate per la rete assunta a Caso Studio.

Quanto alla dimensione temporale, per comprendere l'aggregazione operata dal software è indispensabile descrivere brevemente le scansioni temporali che regolano la generazione dei dati e la loro raccolta. In seno al microsimulatore Aimsun, il processo di simulazione vero e proprio evolve secondo due scale temporali parallele, caratterizzate da una diversa ripartizione rispettivamente in:

- *Simulation Steps* o *Simulation Cycles* (dell'ordine dei 0.1÷1 sec), che scandiscono l'aggiornamento dello stato di tutti gli elementi che compongono il modello (veicoli, traffic lights, VMSs, etc.), ed ai quali si conformano dunque tutti i sottomodelli che governano la dinamica di detti elementi (i.e. *Vehicle Behavioural Models*, *Control Plans*, etc.);
- *Route Choice Cycles* (dell'ordine della decina di minuti), che regolano, invece, l'aggiornamento delle probabilità di scelta che governano il processo di assegnazione, sulla scorta dei parametri di costo restituiti dalla simulazione.

Al contempo, la raccolta dei dati prodotti durante la simulazione - *Data Gathering* -, ovvero la misurazione ed archiviazione dei valori delle diverse grandezze che descrivono la performance del sistema, può essere effettuata, secondo due procedure distinte ma non necessariamente alternative: in maniera estesa su tutti gli archi della rete implementata, o puntualmente attraverso appositi elementi che riproducono in ambiente virtuale dispositivi di rilevamento - *Detectors* -, in accordo a due scale temporali diverse rispettivamente scandite in:

- *Statistical Intervals*;
- *Detection Intervals*.

Fra di essi<sup>1</sup>, il parametro determinante ai fini dell'aggregazione su scala temporale degli outputs che descrivono la performance del sistema (ai diversi livelli di aggregazione spaziale), è lo *Statistical Interval* (il *Detection Interval* interviene solo qualora sia stato predisposto un insieme di detectors - *Detection Pattern* - e sia stata attivata l'opzione di archiviazione<sup>2</sup>). Conclusa la simulazione, il modulo appositamente dedicato provvede infatti, per ognuna delle grandezze di stima della risposta, all'elaborazione statistica dei valori raccolti in ciascuno *statistical interval*, restituendone media e deviazione standard.

Nel caso specifico della presente ricerca, avendo assunto univocamente per tutte le simulazioni condotte uno *Statistical Interval* di 10 minuti ed un periodo di simulazione di 1 h, di ogni grandezza sono state così ottenute, per ogni simulazione (i.e. Replication), serie di 6 valori medi e relative deviazioni standard, corrispondenti ai sei intervalli di raccolta dati. Chiaramente per grandezze di natura deterministica, il software si limita a riportarne in ogni intervallo il valore corrispondente.

Al fine di ottenere, poi, una coerenza fra la scansione temporale delle *Path Statistics* prodotte per ciascuna Replication direttamente in ambiente Aimsun (consultabili nella corrispondente finestra di dialogo della singola replication), e quella invece delle statistiche di percorso<sup>3</sup> memorizzate nel prescelto database esterno (Excell o Access), rispettivamente determinate dal *Route Choice Cycle* e dallo *Statistical Interval*, si è deciso di assegnare anche al *Route Choice Cycle* valore pari a 10 min, permettendo così di operare, quando opportuno, un riscontro immediato tra foglio dati e finestra di dialogo Aimsun.

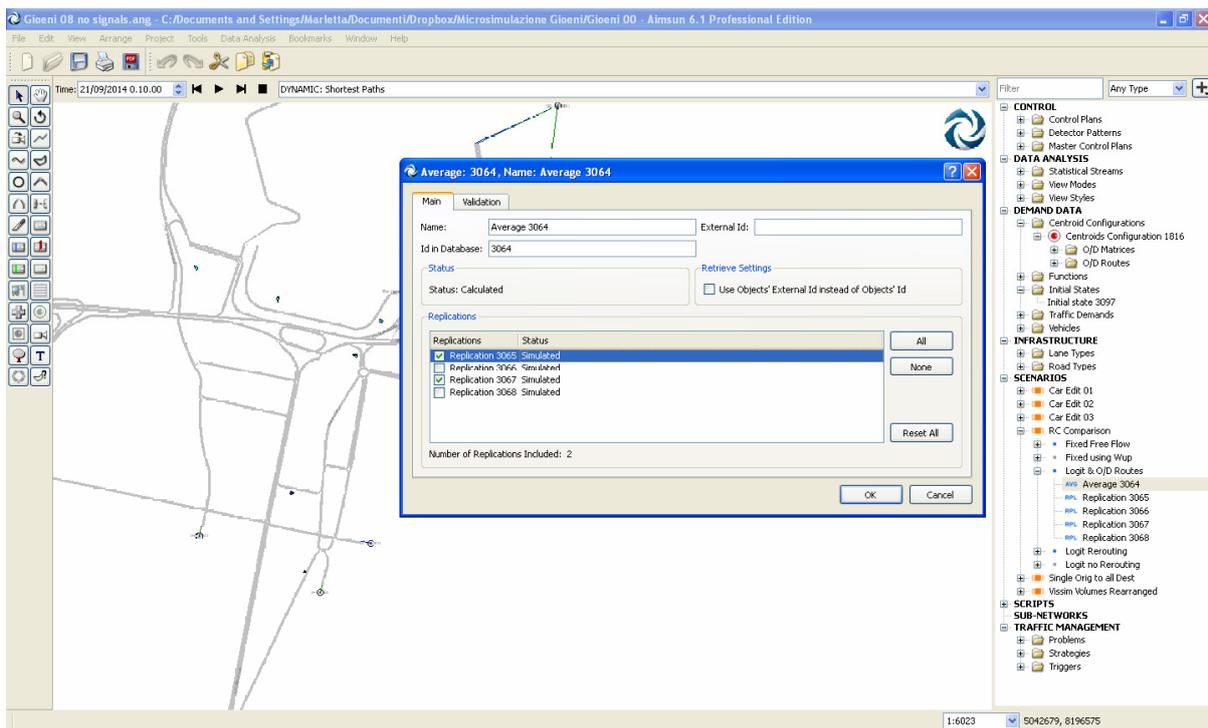
---

<sup>1</sup> I valori dei *Simulation Cycle* e *Route Choice Cycle* vanno impostati al livello di Experiment negli appositi campi predisposti rispettivamente nelle due tab folders 'Reaction Time' e 'Route Choice'. I valori degli *Statistical Interval* e *Detection Interval* vanno, invece, assegnati a livello di Scenario, negli appositi campi previsti nella tab folder 'Output'.

<sup>2</sup> In questo caso nel prescelto database di destinazione, verrà creata un'apposita cartella che raccoglie le statistiche relative ai soli detectors, accanto a quella dedicata alle statistiche di sistema.

<sup>3</sup> La versione 6.1 del software Aimsun cui il presente studio fa riferimento, restituisce le statistiche di percorso (elaborate in ciascun *Route Choice Cycle*), direttamente nell'ambiente di simulazione, attraverso l'apposita cartella "Path Statistics" della finestra di dialogo della singola Replication, ma non consente di memorizzarle automaticamente in un database esterno (Excell o Access). Tal esito può ottenersi ridefinendo fittiziamente i diversi percorsi come *Sub-Paths*, nel qual caso il software contempla l'esportazione delle relative statistiche in un'apposita cartella "Sub-Path Statistics" generata automaticamente nel prescelto database esterno.

Conformemente all'architettura propria del processo di microsimulazione (articolato in Scenarios, Experiments e Replications), l'elaborazioni statistiche degli outputs operate dall'apposito modulo software, possono essere condotte singolarmente per ciascuna Replication - *Replication Statistics* -, oppure per gruppi di Replications riunite in un'apposita Average - *Average Statistics* -. Nel primo caso il calcolo della media e della deviazione standard di ciascuna grandezza di risposta è effettuato (in accordo ai prescelti gradi di aggregazione spazio-temporale), sulla scorta dei valori desunti dalla singola simulazione del dato Experiment, ovvero sui dati prodotti dalla singola Replication. Nel secondo caso, invece, l'operazione di media è condotta attraverso più Replications dello stesso Experiment: il software provvederà infatti a calcolare per ciascuna grandezza, in ogni Statistical Interval, media e deviazione standard dei valori attinti in quell'intervallo di raccolta dati da più simulazioni dello stesso Experiment. La selezione delle Replications rispetto alle quali condurre le anzidette elaborazioni statistiche, va effettuata nell'interfaccia grafica dell'apposito modulo software dedicato, denotata col nome "Average" (Fig. 3.4).



**Fig. 3.4 - Selezione delle *Replications* di uno stesso *Experiment* per il calcolo della relativa *Average*.**

Aimsun consente di calcolare automaticamente media e deviazione standard di ogni grandezza di risposta in ciascun successivo *statistical interval*, su più ripetizioni della simulazione di un dato scenario, differenti fra loro per il *random seed*. Ciò è reso possibile dalla predisposizione, in ciascun *Experiment* di un dato *Scenario*, del modulo "Average" deputato all'elaborazione statistica, che consente di selezionare le *Replications* rispetto alle quali effettuare le operazioni di media.

Come già detto nell'apposito capitolo<sup>4</sup>, al fine di tenere conto in maniera statisticamente significativa dell'aleatorietà propria dei fenomeni trasportistici, di ogni scenario informativo sono state condotte più simulazioni, ovvero, nell'impostazione procedurale scelta, per ogni Experiment, predisposte più Replication. In quest'ottica, naturalmente, anche l'organizzazione dei risultati è stata conformata coerentemente all'obiettivo di rappresentatività statistica, si è così scelto di descrivere la risposta del sistema in termini di medie delle diverse Replications, ovvero su scala di Average. D'altro canto, data la numerosità delle simulazioni discesa dall'impostazione procedurale adottata, l'analisi dell'output su scala di Replication avrebbe comportato un'eccessiva dispersione a svantaggio di una sua agevole ed immediata lettura.

Quanto, infine, alla scelta delle singole grandezze in termini delle quali descrivere la risposta del sistema di trasporto, rimandando per approfondimenti all'appendice<sup>5</sup> ed al manuale a corredo del software<sup>6</sup>, pare qui opportuno rilevare come i due attori che interagiscono attraverso il sistema informativo sono, da un lato gli utenti del sistema quali fruitori dell'informazione, dall'altro il gestore della rete quale decisore del contenuto informativo e delle strategie di somministrazione. I parametri che principalmente condizionano le scelte di viaggio degli utenti sono i costi da essi direttamente sostenuti (secondo una prospettiva egoistica tipica dell'Equilibrio Utente - *User Equilibrium* -), di contro quelli che determinano le scelte del gestore esprimono la performance complessiva del sistema (coerente con la prospettiva di Ottimo di Sistema - *System Optimum* -). Per garantire un approccio compiuto alla descrizione dell'impatto dell'informazione sul funzionamento complessivo del sistema di trasporto, comprensivo di ambedue i punti di vista appena menzionati, appare dunque naturale la scelta di adottare quali parametri di risposta del sistema rispettivamente:

1. *tempo medio di viaggio per chilometro - Mean Travel Time, tt -*

Media sul numero di veicoli transitati nella rete durante l'intervallo di simulazione, dei rispettivi tempi di viaggio medi chilometrici;

2. *tempo totale di attraversamento della rete - Total Travel Time, TT -*

---

<sup>4</sup> Cfr. § 3.2 Strutturazione del processo di simulazione, pag. 151.

<sup>5</sup> Cfr. APPENDICE - A. Elaborazione statistica dei risultati in Aimsun, pag. 263.

<sup>6</sup> Cfr. Bibliografia: [13], pag. 210.

Somma dei tempi di viaggio di tutti i veicoli transitati nella rete durante l'intero periodo di simulazione;

riservandosi di considerare altre grandezze aggiuntive quando si renda necessario affinare la descrizione della risposta del sistema.

### 3.3.3 Precisazione della modalità di analisi dei risultati

Scelto l'approccio di modellazione dell'informazione, si è proceduto, con riferimento al caso studio adottato, alla valutazione vera e propria dell'impatto dell'informazione sugli utenti del sistema di trasporto, condotta nella forma di *analisi di criticità*.

Nell'ambito della Teoria dei Sistemi di Trasporto, per *soglia critica* s'intende, nell'accezione analitica rigorosa, il valore di un prescelto parametro descrittivo delle condizioni di funzionamento del sistema, superato il quale si attinge un brusco cambiamento nell'andamento tipico della risposta del sistema. È evidente, poi, come la risposta di un dato sistema fisico possa essere descritta in termini di diverse grandezze a seconda dell'aspetto che si vuole privilegiare, ciascuna delle quali risulterà a sua volta più o meno sensibile solo ad alcuni dei parametri che connotano il contesto di funzionamento del sistema. Così condurre una analisi di criticità su un dato sistema, significa indagare un aspetto della sua risposta in funzione di un possibile fattore d'influenza o parametro espressione, come detto, delle condizioni di funzionamento, per rintracciare eventuali repentini mutamenti di tendenza e le corrispondenti soglie d'innescio.

Tale impostazione, tradotta nella prospettiva dello studio degli effetti dell'informazione, può essere appropriatamente riformulata nei termini seguenti: considerati più contesti di funzionamento del sistema oggetto di studio, che differiscono esclusivamente per l'implementazione di alternative strategie informative, e scelto il parametro d'influenza rispetto al quale valutare l'andamento della risposta, s'individuano d'apprima le rispettive soglie critiche, sulla scorta delle quali istituire, quindi, il confronto per trarre le conclusioni sull'impatto, più o meno benefico, dell'informazione.

Poiché la risposta dell'utenza all'informazione somministrata è un fenomeno strettamente legato ai livelli di congestionamento del sistema di trasporto in cui entrambi gli attori interagiscono, appare appropriato assumere, quale parametro descrittivo del contesto di funzionamento del sistema, il *livello di carico* della rete, ovvero la *domanda di spostamento*, espressa analiticamente dalla Matrice O/D - *O/D Matrix* -. In dettaglio, a fronte di una domanda di trasporto complessiva stimata per il Caso Studio in esame pari a

13.099 viaggi in un periodo di osservazione di un'ora, sono stati fissati  $i = 1, 2, \dots, 7$  livelli di carico del sistema via via crescenti, espressi in termini di rapporti percentuali sul numero complessivo di spostamenti, rispettivamente: 25%, 50%, 70%, 75%, 80%, 90%, 100%.

Scelte opportunamente le grandezze in termini delle quali descrivere la risposta del sistema di trasporto riprodotto nell'ambiente virtuale di simulazione<sup>7</sup>, in definitiva l'analisi di criticità proposta nel presente studio si articola nei seguenti passi successivi:

1. definita, attraverso la relativa matrice O/D, la domanda di trasporto complessiva (in termini di volumi e distribuzione fra le diverse coppie O/D), si assegnano successivamente aliquote via via maggiori della stessa,  $i = 1, 2, \dots, 7$ ;
2. per ciascun incremento di carico di cui al passo 1. si valuta, mediante simulazione, la risposta del sistema in termini dei prescelti parametri di performance, ottenendone così l'andamento al crescere della domanda di spostamento;
3. s'individuano, quindi, eventuali soglie critiche di carico come i valori in corrispondenza dei quali si manifesta un cambiamento repentino nell'andamento della grandezza di risposta, sintomo del mutato regime di funzionamento del sistema.

Tale analisi è stata condotta separatamente per ciascuno dei contesti informativi contemplati, procedendo quindi al confronto fra le soglie di carico critiche rispettivamente attinte, sulla scorta del quale, in fine, è stata valutata l'utilità o meno della predisposizione di un dato sistema informativo fra quelli contemplati nello studio. In linea teorica è ragionevole attendersi che un opportuno grado di disseminazione dell'informazione produca un effetto benefico sul funzionamento complessivo di un dato sistema di trasporto.

Al contempo si è ritenuto utile istituire un confronto contestuale fra le diverse condizioni informative, ovvero a parità di livello di congestionamento. Tale approccio è stato declinato nella seguente procedura: per ogni livello di carico del sistema si effettua la simulazione successiva di tutti i diversi contesti informativi, e, raccolti i dati di output, viene istituito immediatamente il confronto in termini delle prescelte grandezze di risposta. Essenzialmente si risolve, poi, in una diversa organizzazione degli stessi dati di output utilizzati dall'analisi secondo il metodo precedentemente descritto. A differenza di quest'ultima, adesso non si è più interessati ad osservare, singolarmente per ognuna delle

---

<sup>7</sup> Cfr. 3.3.2 Grandezze di risposta e livello di aggregazione, pag. 157.

diverse condizioni informative, l'andamento di ciascuna grandezza di output al variare del livello di carico della rete, bensì a valutarne il rapporto reciproco per ogni aliquota della domanda di trasporto. A questo approccio si potrebbe associare, qualora si volesse, una mutata nozione di soglia critica, intesa adesso come quel livello di carico in corrispondenza del quale si attinge un'inversione nei rapporti relativi fra i diversi modelli d'informazione.

In definitiva i due criteri fin qui descritti, funzionali rispettivamente all'individuazione di soglie critiche di comportamento del sistema ed all'istituzione di confronti fra le diverse strategie informative, possono essere ricondotti più rigorosamente alle seguenti due modalità di analisi:

- a. *Analisi Longitudinale.* Per un prescelto modello di assegnazione, osserva l'andamento del parametro di risposta del sistema al crescere della domanda di trasporto, definita in termini di aliquote percentuali della domanda complessiva definita per il caso studio in esame;
- b. *Analisi Trasversale.* Per ciascun livello di domanda istituisce un confronto fra gli outputs restituiti dai diversi modelli di assegnazione.

Al fine di formulare valutazioni quantitative univoche, ciascuna delle due metodologie di analisi procede istituendo un confronto espresso in termini di scarti rispetto ad un valore di riferimento denominato rispettivamente:

- a. *Longitudinal Benchmark.* Valore assunto dalla prescelta grandezza di risposta in corrispondenza del primo livello di carico del sistema  $i = 1$  (i.e. 25% della *Travel Demand*), per lo specifico  $j$ -esimo modello di assegnazione in esame:

$$BenchLong_j = tt_{j,25\%TD} \quad (3.3)$$

$$j \in \mathcal{M}$$

avendo denotato con  $\mathcal{M}$  l'insieme dei modelli di assegnazione considerati.

- b. *Traversal Benchmark.* Valore assunto dal parametro di stima della risposta attinta con il modello di assegnazione *Fixed using Travel Times calculated at the end of a W-up Period*, in corrispondenza della  $i$ -esima soglia di carico esaminata:

$$BenchTrav_i = tt_{Fixed\ using\ W-up,i} \quad (3.4)$$

$$i = 1, 2, \dots, 7$$

In dettaglio, dunque:

- a. l'analisi longitudinale stima, per uno stesso modello di assegnazione, gli *incrementi* di risposta rispetto al benchmark longitudinale (*increments*,  $\Delta$ ), corrispondenti alle diverse soglie di carico, secondo la seguente formulazione:

$$\Delta_{j,i} = \frac{tt_{j,i} - BenchLong_j}{BenchLong_j} \quad (3.5)$$

$$j \in \mathcal{M}, \quad i = 1, 2, \dots, 7$$

è anche possibile valutare gli incrementi nel passo, ovvero fra due consecutive soglie di carico, come differenza degli scarti sul benchmark longitudinale corrispondenti alle stesse soglie:

$$\delta_{j,i} = \Delta_{j,i} - \Delta_{j,i-1} = \frac{tt_{j,i} - tt_{j,i-1}}{BenchLong_j} \quad (3.6)$$

$$j \in \mathcal{M}, \quad i = 2, \dots, 7$$

- b. l'analisi trasversale valuta, invece, per ciascun livello di carico, gli *scarti* (*deviations*, *dev*), in termini della grandezza di stima della risposta, dei diversi modelli di assegnazione sul benchmark trasversale di passo:

$$\Delta_{j,i} = \frac{tt_{j,i} - BenchTrav_i}{BenchTrav_i} \quad (3.7)$$

è inoltre possibile ottenere gli scarti relativi fra generiche coppie di modelli di assegnazione,  $(j, k)$ , operando la differenza fra i rispettivi scarti sul benchmark trasversale per il dato passo di carico  $i$ :

$$\delta_{jk,i} = \Delta_{j,i} - \Delta_{k,i} = \frac{tt_{j,i} - tt_{k,i}}{BenchTrav_i} \quad (3.8)$$

$$j \neq k \in \mathcal{M}, \quad i = 1, 2, \dots, 7$$

Fra questi due approcci, come già detto, l'analisi longitudinale consente più propriamente di rintracciare la *Soglia di Carico Critica* indicatrice del mutato regime di comportamento del sistema. È intuitivo desumere come tale soglia risulti sensibile al criterio di valutazione adottato e alla grandezza in termini della quale si valuta la risposta del sistema; ed è altrettanto ragionevole attendersi che vari a seconda del modello di assegnazione adottato per riprodurre i diversi contesti informativi. Tale analisi, nella sua impostazione originale, valutando gli incrementi della risposta nei successivi livelli di carico rispetto al relativo

benchmark longitudinale, individuato in corrispondenza di una soglia fissa di carico (25% della domanda di trasporto complessiva), non permette di leggere con immediatezza l'entità dei gradienti in ciascun successivo intervallo di carico. Come detto, questi ultimi possono però ottenersi semplicemente come differenza fra gli incrementi sul benchmark relativi alle due soglie di carico che delimitano superiormente ed inferiormente il passo. Un ulteriore affinamento dell'analisi deriverebbe dal riportare gli anzidetti incrementi nel passo all'ampiezza dell'intervallo di carico nel quale tali incrementi sono attinti, ottenendo così indicazioni sulle variazioni dei tassi di crescita della risposta del sistema - *increment rate*,  $r$  - nei successivi intervalli di carico:

$$r_{j,i} = \frac{\delta_{j,i}}{\delta TD_i} \quad (3.9)$$

$$j \in \mathcal{M} , i = 2, \dots, 7$$

A seconda della grandezza in termini della quale è espressa la risposta del sistema, i diversi criteri esposti risulteranno più o meno consoni alla rilettura dei grafici nell'ottica dell'analisi di criticità ai fini della efficace individuazione di soglie di carico per le quali si attingono effettivi mutamenti di tendenza nel comportamento del sistema. Ovvero si presteranno più o meno a cogliere le reali tendenze rivelate dai grafici, lasciando dunque alla sensibilità dell'analista la scelta del criterio più idoneo a tale scopo.

In una prima fase, al fine di trarre un'immediata indicazione di tendenza e con essa un primo quadro riassuntivo a supporto delle analisi più dettagliate di cui sopra, si è ritenuto opportuno adottare una procedura semplificata che consiste nella precisazione, per le diverse grandezze di risposta del sistema, di prestabiliti livelli soglia (ritenuti 'critici' ai fini di garantire adeguati livelli prestazionali del sistema), dai quali far discendere a ritroso intercettando gli andamenti ottenuti, i rispettivi livelli di carico di innesco nelle diverse configurazioni informative considerate (i.e. per i differenti modelli di assegnazione implementati).

Avendo peraltro legato gli esiti della presente indagine alle vicende del Caso Studio scelto, assurte all'attualità della cronaca cittadina, che hanno visto l'alterazione della configurazione geometrica originaria del nodo "Tondo Gioeni", a seguito della demolizione del sovrappasso stradale e successiva realizzazione di un'intersezione a raso, con conseguente riorganizzazione dei flussi stradali su scala di rete, le metodologie di analisi fin qui descritte si sono rivelate utili strumenti per indagare le potenzialità di applicazioni di infomobilità volte alla risoluzione di eventuali criticità intervenute. È stata, in altri termini,

## Metodologie e Procedure Adottate

condotta un'analisi che dovrebbe costituire uno strumento di pianificazione preliminare a supporto di scelte di riordino del sistema di trasporto di tale portata, avvalendosi dello strumento ideale della simulazione.



## 3.4 Analisi di sensibilità del modello

### 3.4.1 Robustezza dei modelli di scelta del percorso

#### 3.4.1.1 Metodologia

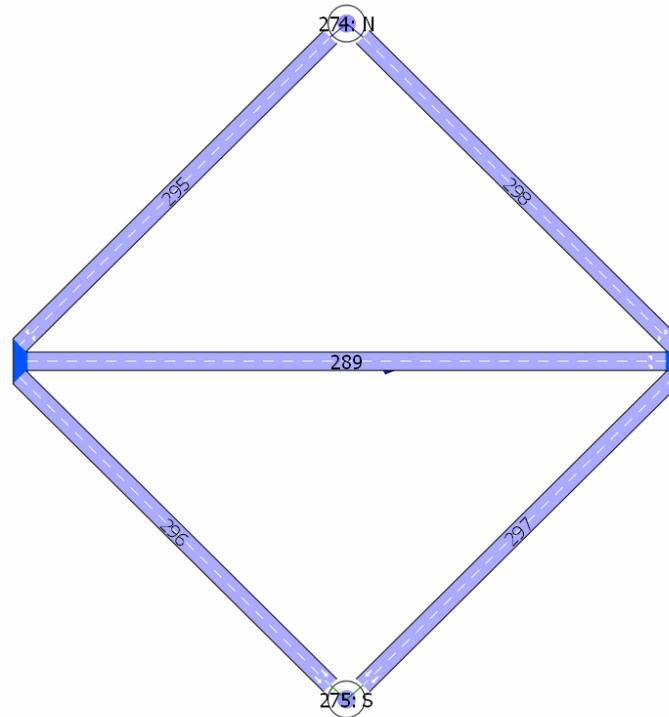
L'analisi di sensibilità dei diversi modelli di scelta del percorso implementati dal microsimulatore Aimsun è stata condotta su un modello di rete semplificato appositamente costruito che, dal punto di vista topologico, ricalca lo schema di rete con riferimento al quale D. Braess dimostrò nel 1959 l'omonimo paradosso<sup>1</sup>. Consta infatti di: quattro nodi, dei quali due fungono da centroidi di origine e destinazione (rispettivamente denotati con i simboli  $N$  e  $S$ ), due modellano invece altrettante intersezioni stradali; quattro archi di pari estensione, disposti secondo i lati di un parallelepipedo, ed un quinto arco orientato secondo la diagonale di collegamento fra i due nodi intersezione (Fig. 3.5).

In un simile schema di rete esistono solo tre percorsi che collegano l'unica coppia di centroidi O/D contemplata dal modello, per chiarezza evidenziati in rosso in Fig. 3.6.

Quanto alla procedura adottata, essa è scaturita dalla stessa architettura del software di simulazione scelto, d'altro canto uno degli obiettivi dichiarati del presente studio consiste proprio nel valutare se e come gli strumenti predisposti nei moderni software commerciali di simulazione del traffico si prestino a riprodurre in maniera efficace gli effetti dell'informazione, in raffronto a piattaforme di programmazione aperte 'a-specifiche' quali i software di *simulazione ad agenti*. In questo senso lo sforzo principale è consistito proprio nel conciliare le molteplici esigenze di simulazione ed analisi con i vincoli imposti dalle pur diversificate procedure predisposte in ambienti di simulazione rigidamente strutturati quali quelli per l'appunto di uso professionale.

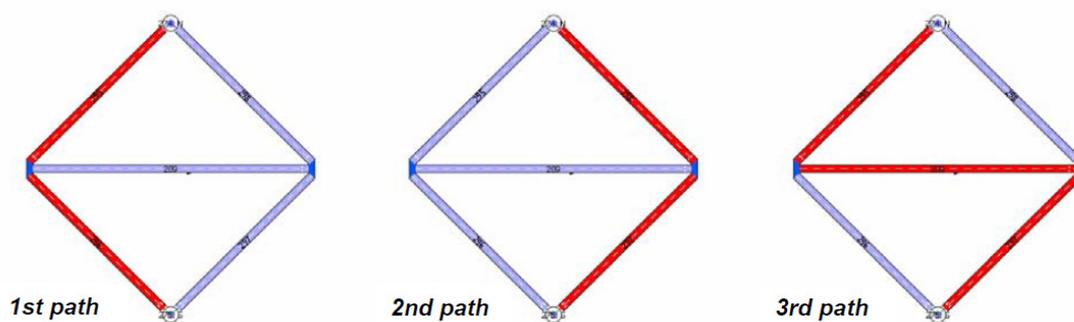
---

<sup>1</sup> Cfr. Bibliografia: Braess D., [2], pag. 210.



**Fig. 3.5 - Layout della rete implementata in Aimsun per l'analisi dei modelli di scelta del percorso.**

Lo schema di rete semplificato appositamente implementato nel microsimulatore Aimsun per testare il funzionamento dei modelli di scelta del percorso ed esaminarne la sensibilità ai rispettivi parametri di calibrazione, ricalca quello costruito da D. Braess per dimostrare l'omonimo paradosso. Quest'ultimo afferma che “[...] l'aggiunta di un arco in una rete può dar luogo ad un incremento dei tempi di viaggio” sia su scala globale di sistema che lungo i singoli percorsi, ed è stato originariamente dimostrato in contesti statici macroscopici.



**Fig. 3.6 - Percorsi alternativi esistenti nella Rete di Braess.**

La Rete di Braess si connota per l'eguale estensione degli archi che ne descrivono il perimetro, ciò assicura che i due percorsi esterni, più brevi, che collegano i due centroidi di origine e destinazione, sono esattamente equivalenti fra loro in termini di tempi di percorrenza. L'aggiunta dell'arco intermedio lungo la diagonale del parallelogramma e con esso di un terzo percorso 'ad S', altera il precedente equilibrio comportando un incremento dei costi di viaggio (queste considerazioni si riferiscono a contesti statici macroscopici di *Equilibrio Utente*).

Tornando al contesto specifico dell'analisi di sensibilità dei *RC models*, per illustrare compiutamente la procedura seguita occorre preliminarmente descrivere il paradigma teorico che la sorregge. Condurre un'analisi di sensibilità dei modelli di scelta del percorso significa esaminare la suscettibilità della risposta del sistema implementato ai parametri che governano detti modelli, più brutalmente: valutare come il comportamento del sistema varia al variare dei valori assegnati ai parametri di studio.

Si è dunque innanzi tutto individuata la grandezza rispetto alla quale valutare la risposta del sistema, segnatamente il *tempo medio chilometrico di attraversamento della rete*, denominato in ambiente Aimsun *Mean System Travel Time*<sup>2</sup> e denotano *tt*.

Quindi è stata precisata la serie di valori da assegnare a ciascun parametro di calibrazione, scegliendo di esaminare l'andamento della risposta rispetto ad una successione di dieci valori ragionevolmente scelti entro campi di ammissibilità desunti dalla letteratura.

Questa impostazione teorica si è tradotta nell'impianto procedurale descritto nel seguito, dettato dalla stessa architettura del microsimulatore adottato. Quest'ultima prevede tre livelli logico-procedurali cui corrispondono altrettante fasi d'impostazione dei parametri e delle specifiche dei diversi modelli che intervengono nella simulazione, nonché di elaborazione e restituzione dei dati di output:

1. *Dynamic Scenario*;
2. *Experiment*;
3. *Replication*.

Poiché le specifiche relative ai modelli di scelta del percorso vanno impostate al livello di *Experiment*, si sarebbe potuto operare nell'ambito di un unico *Scenario*; tuttavia, per maggiore chiarezza formale (finalizzata a contenere la proliferazione di errori operativi banali), si è preferito definire tre *Dynamic Scenarios* per ciascuno dei tre modelli di scelta esaminati, assegnando loro i nomi dei rispettivi *RC models*, rispettivamente: *ProportionalRC*, *LogitRC* e *C-LogitRC*.

Coerentemente con la scelta di adottare serie di dieci valori per ciascun parametro di calibrazione, per ogni *Scenario* sono stati definiti dieci *Experiments*, impostando in ognuno di essi lo stesso modello di scelta del percorso, conforme alla denominazione dello *Scenario*, ed un diverso valore del parametro di calibrazione specifico del prescelto

---

<sup>2</sup> Per una nozione più dettagliata si rimanda al capitolo specifico A.2 Statistiche di sistema - *System Statistics* pag. 264.

modello *RC*. In altri termini, per ognuno dei tre *RC models* considerati, sono stati definiti, nell'ambito dei tre rispettivi *Scenarios*, dieci *Experiments* corrispondenti ad altrettanti diversi valori del relativo parametro di calibrazione.

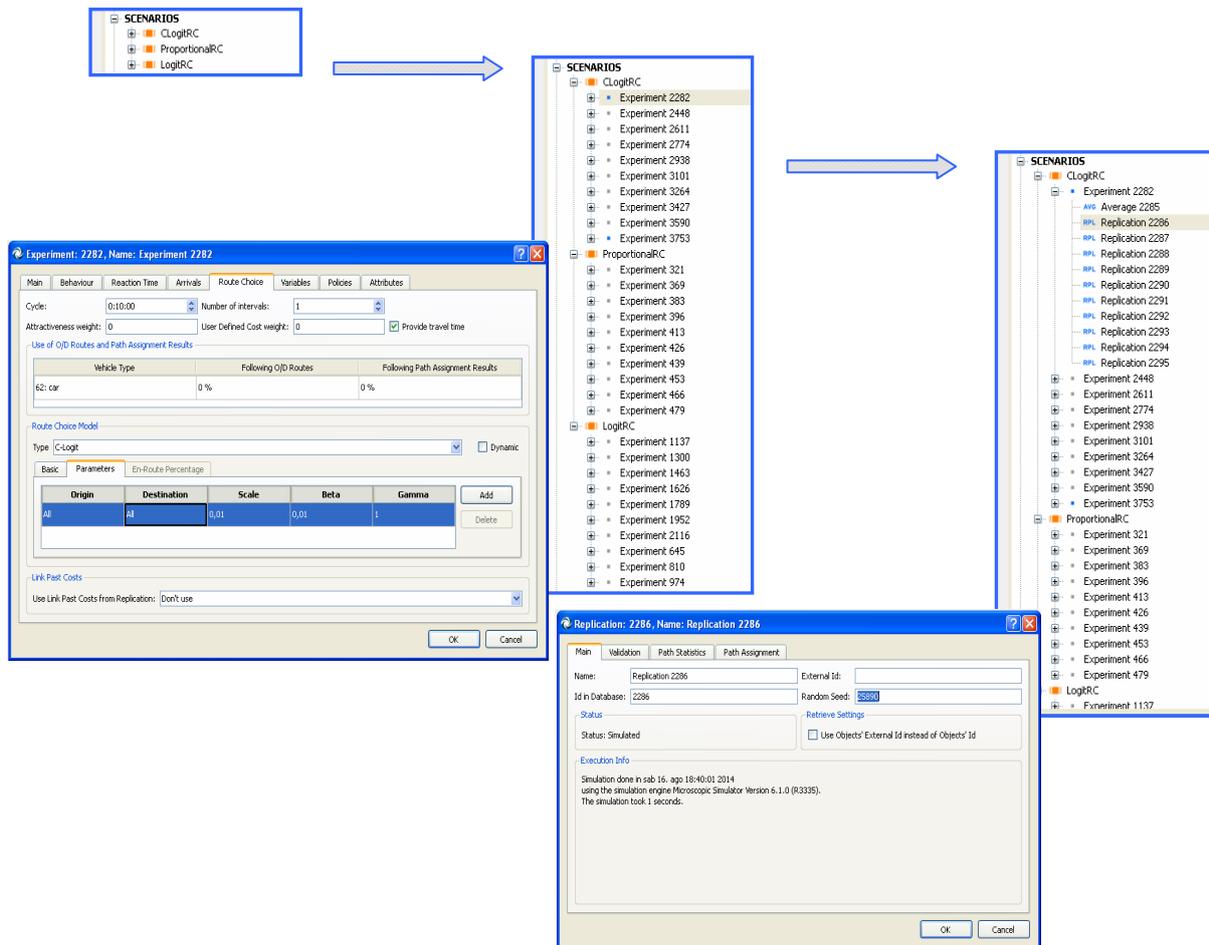
Per dare poi consistenza statistica ai risultati e tenere così conto dell'aleatorietà insita nei fenomeni di mobilità, sono state condotte dieci *Replications* di ogni *Experiments*, ognuna corrispondente ad un diverso *random seed* (*rs*). In questo modo, per ognuno dei dieci valori del parametro di calibrazione di ciascun *RC model*, sono state condotte dieci simulazioni ciascuna associata ad un diverso *random seed*, ottenendo così altrettanti valori della prescelta grandezza di stima della risposta del sistema, ovvero, in definitiva, dieci *tempi medi di viaggio*, *tt*, per ognuno dei dieci *Experiments* precedentemente impostati. Al fine di ottenere poi un valore sintetico, di questi ultimi valori sono state calcolate media e deviazione standard sulle dieci *Replications* (restituite dal modulo software deputato - *Average* -).

Al contempo per assicurare che le differenze riscontrate nella risposta fra i dieci *Experiments* di uno stesso *Scenario* fossero dovute esclusivamente alla modifica del valore assegnato al parametro di calibrazione, nelle dieci replications di tutti gli *experiments* dello stesso *RC Model* si è adottata la stessa sequenza di *random seeds* (per brevità parleremo di 'trasversalità' della sequenza di *rs* rispetto agli *Experiments*). Analogamente, per poter istituire un confronto fra i risultati ottenuti con i tre modelli di scelta escludendo gli scostamenti dovuti ad oscillazioni aleatorie estranee al meccanismo di scelta, e quindi riconoscere esclusivamente quelle variazioni nella risposta del sistema prodotte dalla sua modifica, per ciascun *Dynamic Scenario* (i.e. per ciascun *RC Model*), nelle dieci *Replications* di ogni *Experiment* è stata impiegata sempre la stessa sequenza di *random seeds* (trasversalità della sequenza di *rs* rispetto agli *Scenarios*).

Poiché poi la simulazione è stata scandita in sei intervalli di aggiornamento dei tempi di viaggio e conseguente ricalcolo delle probabilità di scelta dei percorsi, media e deviazione standard della grandezza di risposta adottata sono state calcolate per ognuno dei sei intervalli di simulazione delle dieci *Replications*.

Riassumendo (Fig. 3.7), per ciascun modello di scelta del percorso (i.e. *Dynamic Scenario*), sono stati definiti dieci *Experiments*, ciascuno caratterizzato da un diverso valore del parametro di calibrazione specifico del prescelto modello *RC*; di ciascun *Experiment* sono state condotte dieci *Replications*, ognuna corrispondente ad un diverso *random seed*. Per la grandezza prescelta ai fini della valutazione della risposta del sistema, sono stati quindi desunti i valori prodotti, in ognuno dei sei intervalli di simulazione, da ciascun *Replication* del dato *Experiment* (i.e. dieci valori per ogni *Experiment*), e di questi sono state calcolate:

media e deviazione standard sulle dieci *Replications*. Poiché, come già detto, ogni experiment corrisponde ad un dato valore del parametro che governa il relativo *RC model*, si sono così ottenuti gli andamenti della media e della deviazione standard della grandezza di risposta del sistema al variare del valore assegnato al parametro di calibrazione del modello di scelta *RC*. Avendo iterato tale procedura per ognuno dei sei passi temporali di simulazione, si sono ottenuti, per ciascun modello *RC*, altrettanti andamenti.



**Fig. 3.7 - Schema logico-procedurale adottato nella implementazione dell'analisi di sensibilità dei modelli *RC* nell'ambiente di microsimulazione di Aimsun.**

Lo schema procedurale adottato nell'analisi di sensibilità dei modelli di scelta del percorso - *Route-Choice Models* -, ha ricalcato l'architettura del microsimulatore Aimsun. Così, per non ingenerare confusione, per ogni modello *RC* è stato definito un apposito *Scenario*, per ogni *Scenario* sono stati creati 10 *Experiments* corrispondenti ad altrettanti valori del parametro di calibrazione del rispettivo modello *RC*, di ciascun *Experiments* sono state condotte 10 *Replications* ciascuna associata ad un diverso *random seed*.

Per esigenze di sintesi e senza compromettere la validità delle considerazioni svolte, ci si è qui limitati a riportare i soli andamenti relativi all'ultimo intervallo di simulazione, ritenuti

di maggior interesse in quanto capaci di cogliere contesti di funzionamento in cui si siano già palesati eventuali fenomeni di congestionamento.

### 3.4.1.2 Risultati

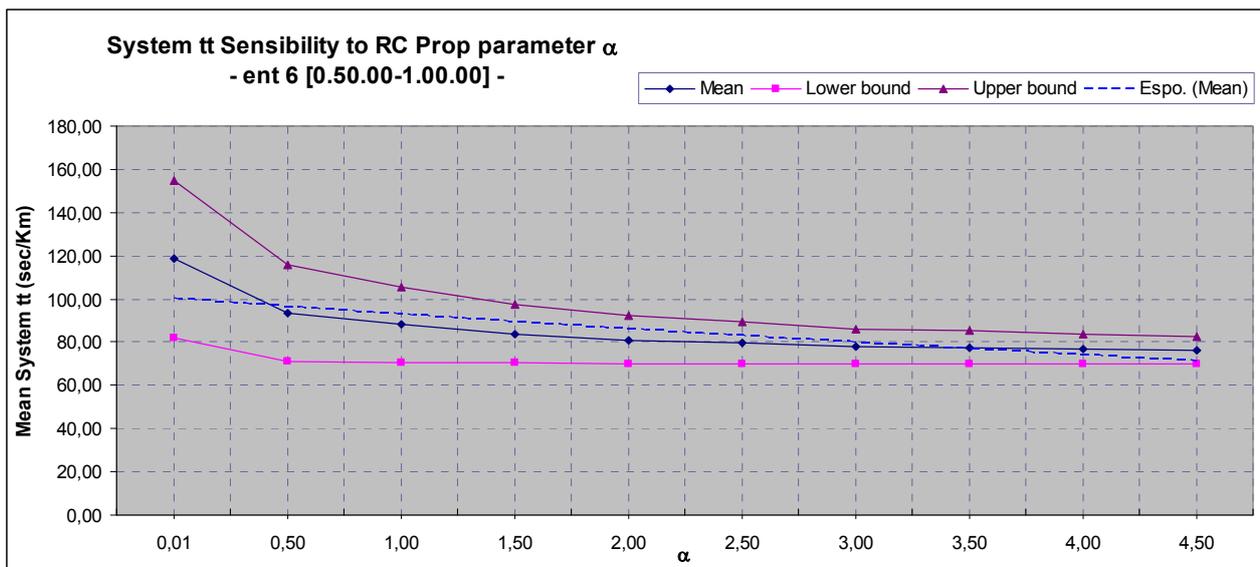
Nel caso dei due modelli di scelta *Proportional e Logit*, la procedura di analisi si è rivelata più snella, ricalcando esattamente quella testé illustrata, essendo essi governati da un unico parametro di calibrazione (rispettivamente  $\alpha$  e  $\theta$ )<sup>3</sup>.

Il modello *C-Logit*, governato da tre parametri rispettivamente  $\theta$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ , ha richiesto invece un approccio più articolato. Innanzi tutto si è deciso di esaminare la suscettibilità del modello rispetto al solo parametro  $\theta$ , lasciando invariati gli altri due; tale scelta motivata dalla più spiccata influenza dell'anzidetto parametro sulla probabilità di scelta del generico percorso, rispetto agli altri due,  $\beta$  e  $\gamma$ , che, annidati nel *Commonality Factor - CF* - attraverso un'espressione logaritmica, intervengono in maniera meno incisiva sulla formulazione della scelta. Prima di condurre l'analisi di sensibilità rispetto a  $\theta$ , si è reso, dunque, necessario definire appropriatamente i valori di questi ultimi due parametri. Per il parametro adimensionale  $\gamma$  si è deciso di mantenere il valore di default unitario, coerente al già indicato campo di ammissibilità  $[0;2]$ . Quanto, invece, a  $\beta$ , essendo il suo campo di ammissibilità definito dai tempi limite di attraversamento della rete  $[tt_{\min}; tt_{\max}]$ , con  $tt_{\min} = \min_{j \in K_i} \{CP_j\}$  e  $tt_{\max} = \max_{j \in K_i} \{CP_j\}$ , (rispettivamente definiti come il minimo e massimo dei tempi di viaggio lungo tutti i percorsi,  $\forall j \in K_i$ , che collegano le diverse coppie O/D, nel caso in esame ridotte ad una sola coppia origine/destinazione,  $i=1$ ), la sua definizione resta legata alle caratteristiche del modello implementato. Si è, dunque, reso preliminarmente indispensabile ricorrere ad una procedura di calcolo iterativa per tentativi che ha richiesto il lancio di più simulazioni successive associate a diversi valori di  $\beta$ , ed ha permesso in fine di individuare in  $\beta = 0.01$  il valore più adatto per il modello di prova semplificato sul quale è stata condotta l'analisi di sensibilità.

Non avendo riscontrato, nei tre casi, differenze qualitative fra gli andamenti ottenuti nei successivi passi di simulazione, per brevità si riportano esclusivamente i diagrammi relativi all'ultimo passo di simulazione compreso fra gli istanti 00.50.00 ÷ 01.00.00.

---

<sup>3</sup> Cfr. § Modelli di Scelta Discreta - *Route Choice Models* -, pag. 95.



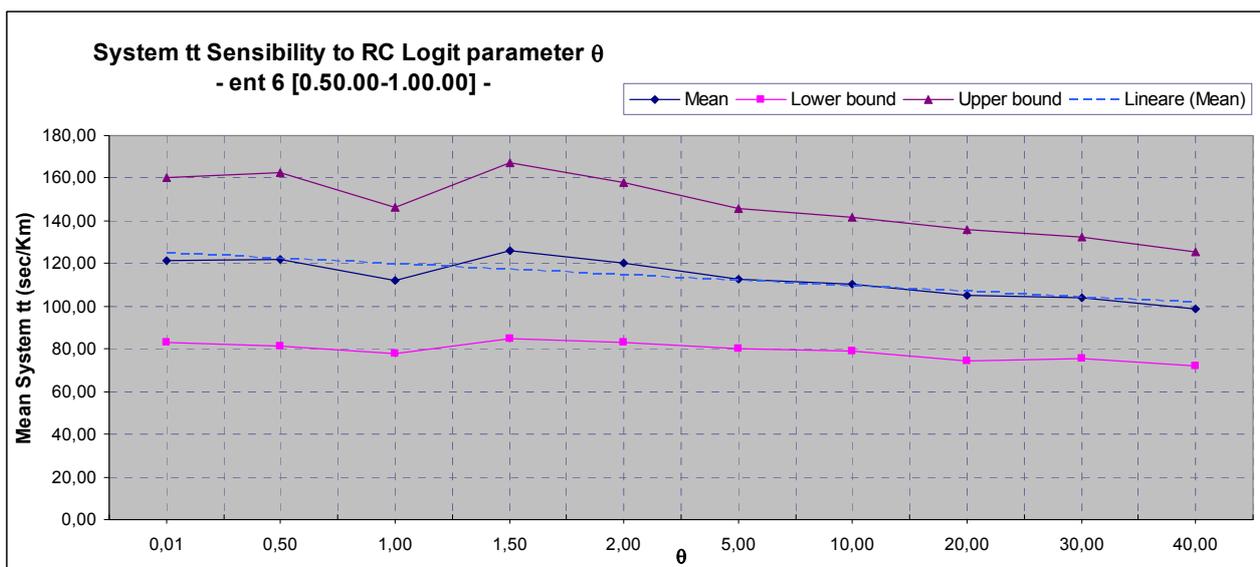
**Fig. 3.8 - Sensibilità della risposta del sistema al parametro di calibrazione  $\alpha$  del modello di scelta *Proportional*.**

Il diagramma riporta l'andamento del *tempo medio di viaggio - Mean System Travel Time (tt) -*, al variare del parametro  $\alpha$  di calibrazione del modello di scelta di tipo proporzionale - *Proportional RC Model -*. Esso risulta ben approssimato da una legge esponenziale decrescente al crescere di  $\alpha$ . Un'analogha tendenza si attinge per i valori limite superiore ed inferiore della stessa grandezza, determinati a partire dalla deviazione standard. Ciò comporta l'impossibilità di individuare il *valore ottimale* del parametro di calibrazione  $\alpha$ , come quello corrispondente alla minima deviazione standard sulla media.

Ent	Exp	$\alpha$	System tt (sec/Km)				
			MEAN	STAND. DEV.	Lower bound	Upper bound	Coeff. Var.
6	1	0,01	<b>118,49</b>	36,45	<b>82,04</b>	<b>154,94</b>	0,3076
	2	0,50	<b>93,45</b>	22,45	<b>71,00</b>	<b>115,90</b>	0,2402
	3	1,00	<b>88,06</b>	17,43	<b>70,63</b>	<b>105,49</b>	0,1979
	4	1,50	<b>83,90</b>	13,48	<b>70,42</b>	<b>97,38</b>	0,1607
	5	2,00	<b>81,03</b>	11,25	<b>69,78</b>	<b>92,28</b>	0,1388
	6	2,50	<b>79,55</b>	9,70	<b>69,85</b>	<b>89,25</b>	0,1219
	7	3,00	<b>77,87</b>	8,20	<b>69,67</b>	<b>86,07</b>	0,1053
	8	3,50	<b>77,67</b>	7,97	<b>69,70</b>	<b>85,64</b>	0,1026
	9	4,00	<b>76,76</b>	6,83	<b>69,93</b>	<b>83,59</b>	0,0890
	10	4,50	<b>76,25</b>	6,45	<b>69,80</b>	<b>82,70</b>	0,0846

**Tab. 3.1 - Layout tabellare della risposta del sistema in funzione del parametro  $\alpha$  di calibrazione del modello di scelta *Proportional*.**

La tabella, da leggersi a corredo della Fig. 3.8, riporta in dettaglio media e deviazione standard della grandezza di risposta - *Mean System Travel Time (tt) -*, calcolate sulle 10 *Replications* di ciascun *Experiment* corrispondente ad ognuno dei valori assegnati al parametro di calibrazione  $\alpha$ . I due valori limite inferiore e superiore (rispettivamente *lower-* ed *upper-* bound), sono ottenuti sottraendo e sommando alla media la rispettiva deviazione standard. La tabella riporta, altresì, il *coefficiente di variazione*, definito come il rapporto fra deviazione standard e media, i cui valori confermano per l'appunto l'andamento monotono decrescente indicato dal diagramma.



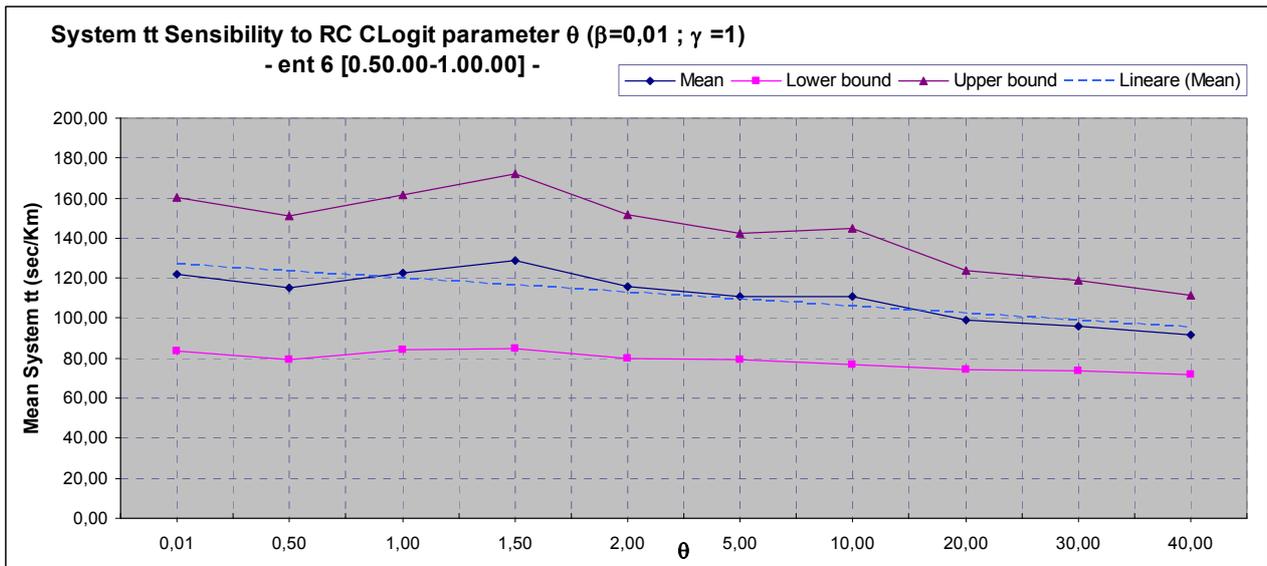
**Fig. 3.9 - Sensibilità della risposta del sistema al parametro  $\theta$  di calibrazione del modello di scelta *Multinomial Logit*.**

Il diagramma riporta l'andamento del *tempo medio di viaggio - Mean System Travel Time (tt) -*, al variare del parametro  $\theta$  di calibrazione del modello di scelta di tipo Logit multinominale - *Multinomial Logit RC Model* -. Come si nota, la prescelta grandezza di risposta decresce al crescere di  $\theta$  secondo un andamento pressoché monotono ben approssimato da una legge lineare. Così anche i valori limite superiore ed inferiore della stessa grandezza, determinati a partire dalla deviazione standard. Ciò comporta l'impossibilità di individuare il *valore ottimale* del parametro di calibrazione  $\theta$ , come quello corrispondente alla minima deviazione standard sulla media.

Ent	Exp	$\theta$	System tt (sec/Km)				Coeff. Var.
			MEAN	STAND. DEV.	Lower bound	Upper bound	
6	1	0,01	<b>121,62</b>	38,63	<b>82,99</b>	<b>160,25</b>	0,3176
	2	0,50	<b>121,91</b>	40,87	<b>81,04</b>	<b>162,78</b>	0,3352
	3	1,00	<b>111,85</b>	34,30	<b>77,55</b>	<b>146,15</b>	0,3067
	4	1,50	<b>125,93</b>	41,19	<b>84,74</b>	<b>167,12</b>	0,3271
	5	2,00	<b>120,41</b>	37,47	<b>82,94</b>	<b>157,88</b>	0,3112
	6	5,00	<b>112,88</b>	32,79	<b>80,09</b>	<b>145,67</b>	0,2905
	7	10,00	<b>110,30</b>	31,40	<b>78,90</b>	<b>141,70</b>	0,2847
	8	20,00	<b>105,25</b>	30,73	<b>74,52</b>	<b>135,98</b>	0,2920
	9	30,00	<b>103,93</b>	28,54	<b>75,39</b>	<b>132,47</b>	0,2746
	10	40,00	<b>98,79</b>	26,60	<b>72,19</b>	<b>125,39</b>	0,2693

**Tab. 3.2 - Layout tabellare della risposta del sistema in funzione del parametro  $\theta$  di calibrazione del modello di scelta *Multinomial Logit*.**

La tabella, da leggersi a corredo della Fig. 3.9, riporta in dettaglio media e deviazione standard della grandezza di risposta - *Mean System Travel Time (tt) -*, calcolate sulle 10 *Replications* di ciascun *Experiment* corrispondente ad ognuno dei valori assegnati al parametro di calobrazione  $\theta$  del modello di scelta discreta *Multinomial Logit*. La tabella riporta, altresì, il *coefficiente di variazione*, definito come il rapporto fra deviazione standard e media, i cui valori confermano per l'appunto l'andamento pressoché monotono decrescente indicato dal diagramma.



**Fig. 3.10 - Sensibilità della risposta del sistema al parametro  $\theta$  di calibrazione del modello di scelta *Multinomial C-Logit*.**

Il diagramma riporta l'andamento del *tempo medio di viaggio - Mean System Travel Time (tt)* -, al variare del parametro  $\theta$  di calibrazione del modello di scelta di tipo *C-Logit multinominale*, mantenendo invariati gli altri due parametri rispettivamente pari ad  $\beta=0,01$ ,  $\gamma=1$ . Come si nota, la prescelta grandezza di risposta decresce al crescere di  $\theta$  secondo un andamento pressoché monotono ben approssimato da una legge lineare. Così anche i valori limite superiore ed inferiore della stessa grandezza, determinati a partire dalla deviazione standard. Ciò comporta l'impossibilità di individuare il *valore ottimale* del parametro di calibrazione  $\theta$ , come quello corrispondente alla minima deviazione standard sulla media.

Ent	Exp	$\theta$	System tt (sec/Km)				
			MEAN	STAND. DEV.	Lower bound	Upper bound	Coeff. Var.
6	1	0,01	<b>121,87</b>	38,57	<b>83,30</b>	<b>160,44</b>	0,3165
	2	0,50	<b>114,95</b>	35,87	<b>79,08</b>	<b>150,82</b>	0,3120
	3	1,00	<b>122,76</b>	38,69	<b>84,07</b>	<b>161,45</b>	0,3152
	4	1,50	<b>128,55</b>	43,83	<b>84,72</b>	<b>172,38</b>	0,3410
	5	2,00	<b>115,78</b>	35,91	<b>79,87</b>	<b>151,69</b>	0,3102
	6	5,00	<b>110,74</b>	31,77	<b>78,97</b>	<b>142,51</b>	0,2869
	7	10,00	<b>110,74</b>	33,86	<b>76,88</b>	<b>144,60</b>	0,3058
	8	20,00	<b>99,14</b>	24,61	<b>74,53</b>	<b>123,75</b>	0,2482
	9	30,00	<b>96,10</b>	22,61	<b>73,49</b>	<b>118,71</b>	0,2353
	10	40,00	<b>91,71</b>	19,75	<b>71,96</b>	<b>111,46</b>	0,2154

**Tab. 3.3 - Layout tabellare della risposta del sistema in funzione del parametro  $\theta$  di calibrazione del modello di scelta *Multinomial C-Logit*.**

La tabella, da leggersi a corredo della Fig. 3.10, riporta in dettaglio media e deviazione standard della grandezza di risposta - *Mean System Travel Time (tt)* -, calcolate sulle 10 *Replications* di ciascun *Experiment* corrispondente ad ognuno dei valori assegnati al parametro di calobrazione  $\theta$  del modello di scelta discreta *Multinomial C-Logit*. La tabella riporta, altresì, il *coefficiente di variazione*, definito come il rapporto fra deviazione standard e media, i cui valori confermano per l'appunto l'andamento pressoché monotono decrescente indicato dal diagramma.

### 3.4.1.3 Considerazioni

L'esame dei tre andamenti evidenzia una significativa suscettibilità della risposta del sistema alla modifica del parametro di calibrazione del modello *RC* di scelta del percorso, per ciascuno dei tre modelli presi in considerazione.

In particolare in tutti e tre i casi si attinge un andamento del tempo medio di attraversamento della *rete prova* tendenzialmente decrescente al crescere del parametro di calibrazione: perfettamente monotono per il modello di scelta *Proportional* (i cui punti sperimentali sono ben interpolati da una regressione esponenziale); più frastagliato invece per i due modelli di scelta multinominali *Logit* e *C-Logit* (nel qual caso si è adottata più utilmente una regressione lineare per esplicitarne le tendenze).

Anche l'intervallo di variabilità, delimitato dai valori denominati rispettivamente *lower bound* ed *upper bound*, ottenuti a partire dalla deviazione standard sulla media, risulta sostanzialmente decrescente al crescere del valore assegnato al parametro di calibrazione del modello *RC*, con gli stessi caratteri di più o meno spiccata monotonia già evidenziati per le rispettive medie (come confermato dal *coefficiente di variazione*<sup>4</sup>).

È interessante osservare come, per la rete prova implementata, lo scostamento fra i tempi di viaggio ottenuti a partire dalle funzioni *Logit* e *C-Logit* sia piuttosto contenuto, ciò dovuto al valore ridotto assegnato al parametro  $\beta$  (seguendo la procedura iterativa già menzionata), che fa sì che il peso riconosciuto alla *sovrapposizione* rispetto al *costo* di percorso sia irrisorio.

Come già accennato, analisi di sensibilità del tipo qui descritto sono particolarmente utili qualora non si disponga di dati empirici funzionali alle procedure di calibrazione, consentendo d'identificare il modello più stabile al variare dei rispettivi parametri, ovvero più robusto e come tale più idoneo ad un'utenza più ampia (cui per l'appunto si rivolgono i softwares professionali).

In determinate condizioni, tali strumenti possono addirittura consentire di effettuare una prima, sia pur orientativa, calibrazione dei modelli; in presenza di andamenti tendenzialmente opposti della media e della varianza della grandezza. Nel caso in esame, ad esempio, si sarebbe potuto conseguire un simile risultato qualora, al variare del parametro che governa il modello *RC*, si fossero ottenuti valori medi del tempo di viaggio

---

<sup>4</sup> Si denota qui *coefficiente di variazione* il rapporto fra la deviazione standard e la media.

fra loro confrontabili e, viceversa, varianze spiccatamente diverse, circostanza che avrebbe permesso di identificare il *valore ottimale* del parametro di calibrazione in quello corrispondente alla più piccola deviazione standard dalla media dei tempi di viaggio. Una tale scelta avrebbe assicurato una maggiore precisione nella stima dei  $tt$  in ciascun passo della simulazione, risultando così equivalente all'assunzione implicita che gli utenti della rete siano in grado di valutare con accuratezza i costi di percorso<sup>5</sup>.

Gli andamenti tendenzialmente decrescenti ottenuti in questa sede per la media e la deviazione standard del tempo di attraversamento della rete, hanno impedito il ricorso ad una simile procedura.

Le osservazioni fin qui svolte confermano il ruolo cruciale che il processo di calibrazione dei modelli di scelta del percorso predisposti in Aimsun (ma più in generale in un qualsiasi simulatore del traffico), assolve ai fini di cogliere il reale funzionamento di una rete di trasporto, potendo piccole modifiche nei valori dei parametri che in tali modelli intervengono determinare sensibili alterazioni della risposta del sistema restituita dalla simulazione.

---

<sup>5</sup> La procedura descritta può essere riguardata come una calibrazione del modello di scelta del percorso coerente con una determinata ipotesi sul comportamento degli utenti, ovvero che siano in grado di valutare con la maggiore accuratezza possibile i costi di percorso, che non necessariamente coincide con il comportamento effettivo degli utenti della rete che ci si appresta a modellare.

## 3.4.2 Sensibilità dei modelli comportamentali degli utenti

### 3.4.2.1 Metodologia

Nel condurre l'analisi di sensibilità del modello ai parametri che governano l'interazione dinamica fra i singoli veicoli, si è deciso di descrivere la risposta del sistema in termini di sei grandezze d'interesse, valutate in maniera aggregata su scala spaziale considerando la rete nel suo complesso<sup>6</sup>, rispettivamente:

- densità media (*System Density*);
- flusso (*Flow*);
- tempo medio di viaggio (*Mean System Travel Time, tt*);
- tempo totale di attraversamento della rete (*Total System Travel Time, TT*);
- tempo medio trascorso in arresto (*Mean System Stop Tyme, st*);
- ritardo medio accumulato (*Mean System Delay Time, dt*).

Quanto al livello di aggregazione su scala temporale, si è preferito considerare l'intero orizzonte di simulazione - *Simulation Period* -.

Tra i parametri che governano il modello di comportamento dei veicoli<sup>7</sup>, rispetto ai quali condurre l'analisi di sensibilità, sono stati scelti in particolare:

- tempo di reazione (*Reaction Time, RT*);
- intertempo minimo (*Minimum Headway, MH*);
- tempo massimo di attesa per dare precedenza (*Max Give-Way Time, gwt<sub>max</sub>*);
- massima accelerazione (*Maximum Acceleration, a<sub>max</sub>*).

Come già precisato nell'apposito capitolo dedicato ai modelli di comportamento, il tempo di reazione - *Reaction Time (RT)* - esprime la prontezza del generico guidatore nel modificare il proprio regime di marcia in funzione della condotta di guida dei veicoli che lo

---

<sup>6</sup> Per maggiori dettagli sulla generazione delle statistiche su scala di sistema, si rimanda all'Appendice A, cfr.:A.2 Statistiche di sistema - *System Statistics* -, pagg. 264-270. Per coerenza e consentire al lettore un più agevole riscontro delle fonti, si è deciso di mantenere la stessa notazione adottata dal microsimulatore Aimsun. Secondo tale notazione, col prefisso 'System' si denotano tutti i valori delle diverse grandezze riferiti al sistema nel suo complesso.

<sup>7</sup> Per maggiori dettagli sul modo in cui tali parametri intervengono nel modello di comportamento dei guidatori, si rimanda al relativo capitolo, 2.2 *Modellazione della condotta di guida in ambiente Aimsun*, pagg. 109/126.

precedono e degli eventi inaspettati che intervengono durante il viaggio. Ai fini dell'analisi di sensibilità, attingendo alla letteratura di riferimento<sup>8</sup>, si è deciso di considerare i quattro valori di seguito indicati: (0,75; 1,50; 2,25; 3,00) sec.

L'intertempo minimo - *Minimum Headway* - è il più piccolo valore ammissibile per l'intervallo di tempo intercorso fra il sopraggiungere di due veicoli consecutivi. Sulla scorta della letteratura specifica<sup>9</sup>, agli scopi preposti sono stati scelti i seguenti quattro valori: (0; 2; 4; 8) sec.

In ambiente Aimsun si denota con *Maximum Give-Way Time*, il tempo massimo che il generico veicolo è disposto ad attendere prima di compiere una manovra in prossimità di un segnale di precedenza (i.e. attraversamento di un'intersezione stradale, cambio corsia etc.). Lo studio della letteratura ha suggerito la scelta della seguente serie di valori: (5; 7,5; 10; 12,5) sec.

Quanto alla massima accelerazione erogabile dal generico *vehicle type* - *Maximum Acceleration* -, attingendo alla letteratura di riferimento<sup>10</sup>, sono stati scelti i quattro valori di seguito riportati: (1,22; 2,45; 3,67; 4,90) m/s<sup>2</sup>.

Seguendo un'impostazione analoga a quella già delineata per l'analisi condotta sui modelli di scelta del percorso, i valori delle diverse grandezze che descrivono la risposta del sistema per ciascun assegnato valore del singolo parametro di calibrazione, sono stati calcolati come medie (*Average*), dei valori restituiti da più *Replications* del medesimo *Experiment* (associato al dato valore del parametro di calibrazione in esame), ciascuna delle quali caratterizzata da un diverso *random seed*.

In dettaglio, poiché tutti gli anzidetti parametri di calibrazione, ad eccezione fatta del *tempo di reazione*<sup>11</sup>, vanno precisati nell'editor del singolo *vehicle type*, ed avendo scelto, per esigenze di brevità, di adottare per ognuno di essi serie di soli quattro valori, sono stati coerentemente definiti altrettanti *vehicle types*, ognuno associato ad un diverso valore del

---

<sup>8</sup> Cfr. Bibliografia: Fitch G. et al., [5], pag. 210; Kosinski J., [8], pag. 210; Triggs T. et al., [15], pag. 211.

<sup>9</sup> Cfr. Bibliografia: Luttinen R., [10], pag. 210; Pueboobpaphan R., [14], pag. 210.

<sup>10</sup> Cfr. Bibliografia: Long, G., [9], pag. 210; Maurya A. K. et al., [11], pag. 210; Mehar A. et al., [12], pag. 210.

<sup>11</sup> Il *Reaction Time* è impostato dall'utente del software nell'apposita tab folder predisposta nell'editor dell'*Experiment*, come multiplo del *Simulation Cycle*. Può stabilirsi un valore univoco per tutti i *vehicle types* e costante durante l'intera simulazione, oppure, più verosimilmente, definirne empiricamente una distribuzione di frequenza per ciascun *vehicle type*.

prescelto parametro di calibrazione. Essendo, poi, la domanda di trasporto definita in termini di matrici O/D, associate ad uno specifico tipo di veicolo, conseguentemente si è reso necessario definire quattro matrici O/D, una per ciascuno degli anzidetti *vehicle types* (ovvero in definitiva per ognuno dei quattro valori del dato parametro di calibrazione), ma con uguale numero di viaggi. Poiché la domanda di trasporto va impostata a livello di *Scenario*, sono stati quindi predisposti quattro scenari. Essendo, in questo modo, ogni *Scenario* associato ad uno dei quattro valori del parametro di calibrazione scelto, è stato sufficiente definire un solo *Experiment* dello stesso *Scenario*. Al fine, poi, di conferire una maggiore consistenza statistica ai risultati ottenuti, di ogni *Experiment* sono state condotte quattro *Replications*, ognuna associata ad un diverso *random seed*. In fine, per escludere l'influenza dei fenomeni aleatori estranei al modello di comportamento, e poter valutare l'effetto dei singoli parametri di calibrazione al netto degli altri fattori che influenzano la risposta del sistema, sicuri che le differenze attinte siano così imputabili esclusivamente ai mutati valori del parametro in esame, tutti gli altri modelli che concorrono a definire il sistema sono stati mantenuti inalterati e nelle quattro *Replications* dei differenti *Experiments* sono state adottate serie identiche di *random seeds*. Quale *rete test* impiegata nell'analisi di sensibilità dei modelli di comportamento è stata assunta la stessa *rete caso studio*, nella sua configurazione attuale *a.* (i.e. in assenza del sovrappasso).

### 3.4.2.2 Risultati e considerazioni

Dal confronto degli esiti dell'analisi di sensibilità del modello condotta per ciascuno dei parametri precedentemente elencati, si evince quanto segue.

Il tempo di reazione - *Reaction Time (RT)* -, e l'intertempo minimo - *Minimum Headway (MH)* -, sortiscono effetti analoghi su: tempo medio di viaggio - *Mean Travel Time (tt)* -, tempo medio in arresto - *Mean Stop Time (st)* -, ritardo medio accumulato - *Mean Delay Time (dt)* -. Queste grandezze subiscono infatti incrementi sensibili al crescere degli anzidetti parametri di calibrazione con tassi medi<sup>12</sup> compresi fra il 45÷55% circa, in particolare marcatamente monotoni in funzione del *RT*, ben spiegati da regressioni

---

<sup>12</sup> Con questa denominazione si è qui inteso sinteticamente indicare lo scarto percentuale fra i valori massimo e minimo attinti per la grandezza di risposta *y* esaminata in funzione del prescelto parametro di

calibrazione:  $\bar{\nabla}_{\%} = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{y_{\max}} \cdot 100$  .

polinomiali del 2° ordine caratterizzate da *coefficienti di determinazione*  $R^2$  prossimi al 100% per il  $RT$  e superiori allo 85% per il  $MH$ , a suggerire nel complesso l'esistenza di forti correlazioni fra questi parametri di calibrazione e la risposta del sistema.

Quest'ultima, ancora, se espressa attraverso il tempo totale di viaggio di tutti i veicoli che attraversano la rete durante l'intero periodo di simulazione - *Total System Travel Time (TT)* -, la densità veicolare - *Vehicle Density* -, ed il flusso lungo la rete - *System Flow* -, manifesta una decrescita sensibile al crescere dell'intertempo minimo, con tassi medi del 40÷69% circa, in particolare marcatamente monotona in termini del flusso, ben interpolata rispettivamente da una regressione esponenziale per quest'ultimo ed ancora una volta da leggi polinomiali del 2° ordine per le prime due grandezze, con valori di  $R^2$  prossimi al 100%, a suggerire anche in questi casi una forte correlazione fra le grandezze interessate. La stessa risposta in funzione del tempo di reazione risulta sensibilmente decrescente in termini di flusso (con un gradiente medio del 46%), secondo una relazione polinomiale del 2° ordine con  $R^2$  poco discosto dal 100%; una variabilità ben più contenuta, con gradiente medio inferiore al 10%, si attinge invece se espressa in termini del tempo totale di viaggio e della densità veicolare, nel qual caso le curve d'interpolazione (polinomiali del 2° ordine con  $R^2$  rispettivamente pari al 81% ed al 100%), si presentano appiattite ad indicare una ridotta suscettibilità di queste grandezze al suddetto parametro di calibrazione.

Quindi un aumento del  $RT$  e del  $MH$  determina, com'è intuitivo, una riduzione dei flussi e del numero di veicoli per chilometro.

La massima accelerazione - *Maximum Acceleration* ( $a_{max}$ ) -, esprime la capacità del guidatore (in relazione alla performance del veicolo), di modificare la velocità di marcia; anch'esso dunque, come il tempo di reazione, concorre a determinare la prontezza dell'utente, secondo però una relazione inversa a quella che sussiste fra quest'ultima ed il  $RT$ . Al crescere della massima accelerazione erogabile dal generico veicolo,  $a_{max}$ , si dovrebbero, quindi, registrare andamenti delle diverse grandezze tendenzialmente opposti a quelli determinati dall'aumento del tempo di reazione,  $RT$ .

In effetti i risultati dell'analisi di sensibilità, sembrano confermare le aspettative, suggerendo anche in questo caso l'esistenza di una forte correlazione fra il parametro di calibrazione anzidetto e le diverse grandezze di risposta considerate. Così il tempo medio di viaggio, il tempo medio in arresto, il ritardo medio, decrescono sensibilmente, pressoché monotonamente, al crescere dell'accelerazione massima, secondo andamenti ben spiegati

da regressioni logaritmiche<sup>13</sup> (con valori di  $R^2$  superiori al 95%), e con tassi medi di decremento superiori al 50%; tendenze analoghe si riscontrano anche per il tempo totale di viaggio e la densità veicolare lungo la rete, ben descritte rispettivamente da leggi logaritmiche e polinomiali del 2° ordine (ancora con *coefficienti di determinazione*  $R^2$  superiori al 95%), sebbene con tassi medi di decrescita più contenuti, rispettivamente del 40% e 28% circa. Come atteso per il flusso si registra una crescita altrettanto regolare, con un tasso medio del 19%, anch'essa ben espressa da una legge polinomiale del 2° ordine (con  $R^2$  prossimo al 94%).

Rispetto, infine, al *Maximum Give-Way Time (GWT)*, gli andamenti attinti per le diverse grandezze di risposta indicano comunque una variabilità mediamente più contenuta, con gradienti mai superiori al 20% circa, e sono descritti da regressioni polinomiali del 2° ordine meno aderenti al campione, caratterizzate per lo più da coefficienti  $R^2$  non superiori al 69% (ad eccezione fatta del tempo totale di viaggio e del flusso attraverso la rete, per i quali si può ottenere una rispondenza del 100% e del 95% circa), ad indicare in generale una correlazione meno evidente ed al contempo una più ridotta sensibilità di queste grandezze al prescelto parametro di calibrazione.

Un quadro unitario delle considerazioni appena svolte è fornito dallo specchio riassuntivo di seguito riportato (Tab. 3.4), per una disamina più puntuale dei singoli andamenti si rimanda invece alle figure riprodotte più avanti (Fig. 3.11-Fig. 3.34).

---

<sup>13</sup> Regressioni polinomiali del 2° ordine od esponenziali interpolano altrettanto bene il campione.

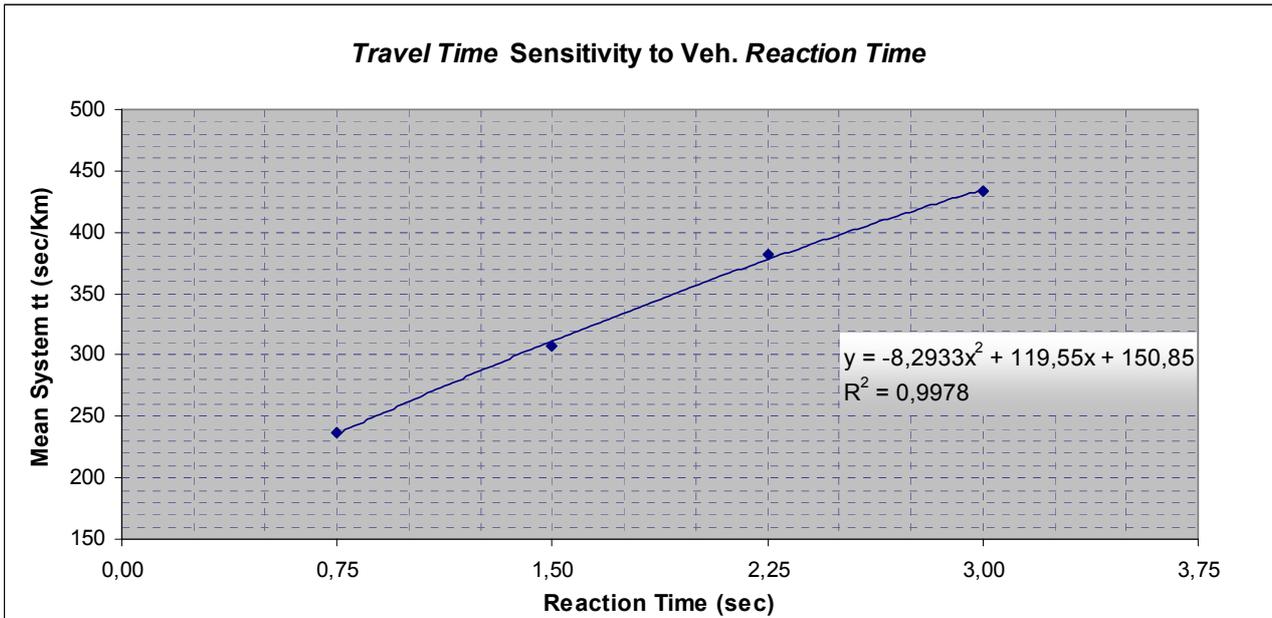
System Response Trend as a function of Vehicle Behavioural Parameters							
		Travel Time	Stop Time	Delay Time	Tot. Trav. Time	Density	Flow
Reaction Time	Trend	Increase	Increase	Increase	Almost steady	Almost steady	Decrease
		$\bar{V}\% = 45,2\%$	$\bar{V}\% = 54,1\%$	$\bar{V}\% = 51,9\%$	$\bar{V}\% = 8,2\%$	$\bar{V}\% = 6,0\%$	$\bar{V}\% = 46,4\%$
	Regression	Polinomial 2°					
		$R^2 = 99,8\%$	$R^2 = 99,8\%$	$R^2 = 99,8\%$	$R^2 = 81,4\%$	$R^2 = 100\%$	$R^2 = 99,9\%$
Headway	Trend	Increase	Increase	Increase	Decrease	Decrease	Decrease
		$\bar{V}\% = 46,1\%$	$\bar{V}\% = 54,8\%$	$\bar{V}\% = 52,4\%$	$\bar{V}\% = 43,9\%$	$\bar{V}\% = 39,8\%$	$\bar{V}\% = 68,9\%$
	Regression	Polinomial 2°	Polinomial 2°	Power	Polinomial 2°	Polinomial 2°	Exponential
		$R^2 = 86,9\%$	$R^2 = 85,3\%$	$R^2 = 87,0\%$	$R^2 = 99,2\%$	$R^2 = 97,9\%$	$R^2 = 97,9\%$
Give-Way Time	Trend	Increase	Increase	Increase	Decrease	Increase	Decrease
		$\bar{V}\% = 13,3\%$	$\bar{V}\% = 20,1\%$	$\bar{V}\% = 17,0\%$	$\bar{V}\% = 15,7\%$	$\bar{V}\% = 14,1\%$	$\bar{V}\% = 18,6\%$
	Regression	Polinomial 2°					
		$R^2 = 61,3\%$	$R^2 = 65,7\%$	$R^2 = 61,6\%$	$R^2 = 99,9\%$	$R^2 = 68,8\%$	$R^2 = 95,0\%$
Max Acceleration	Trend	Decrease	Decrease	Decrease	Decrease	Decrease	Increase
		$\bar{V}\% = 52,8\%$	$\bar{V}\% = 65,2\%$	$\bar{V}\% = 62,7\%$	$\bar{V}\% = 40,7\%$	$\bar{V}\% = 28,3\%$	$\bar{V}\% = 19,0\%$
	Regression	Logarithmic	Logarithmic	Logarithmic	Logarithmic	Polinomial 2°	Polinomial 2°
		$R^2 = 96,5\%$	$R^2 = 95,9\%$	$R^2 = 96,6\%$	$R^2 = 98,8\%$	$R^2 = 97,2\%$	$R^2 = 93,6\%$

**Tab. 3.4 - Tendenze delle grandezze di risposta al variare dei parametri di calibrazione del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -.**

Quale indice sintetico di variabilità è stato adottato lo scarto percentuale fra i valori massimo e minimo attinti per la singola grandezza  $y$  in funzione del prescelto parametro di calibrazione:

$$\bar{V}\% = \frac{y_{\max} - y_{\min}}{y_{\min}} \cdot 100$$

Questo dato è stato integrato dalla individuazione della legge di regressione che meglio approssima il campione, col relativo *coefficiente di determinazione*  $R^2$ , a rilevare l'entità della correlazione fra le grandezze interessate. La lettura contestuale di questi indicatori consente di trarre indicazioni orientative circa la suscettibilità più o meno spiccata della singola grandezza in funzione del dato parametro di calibrazione.



**Fig. 3.11 - Sensibilità del tempo medio di viaggio rispetto al tempo di reazione del generico utente del sistema.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei tempi medi di viaggio restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Reaction Time* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

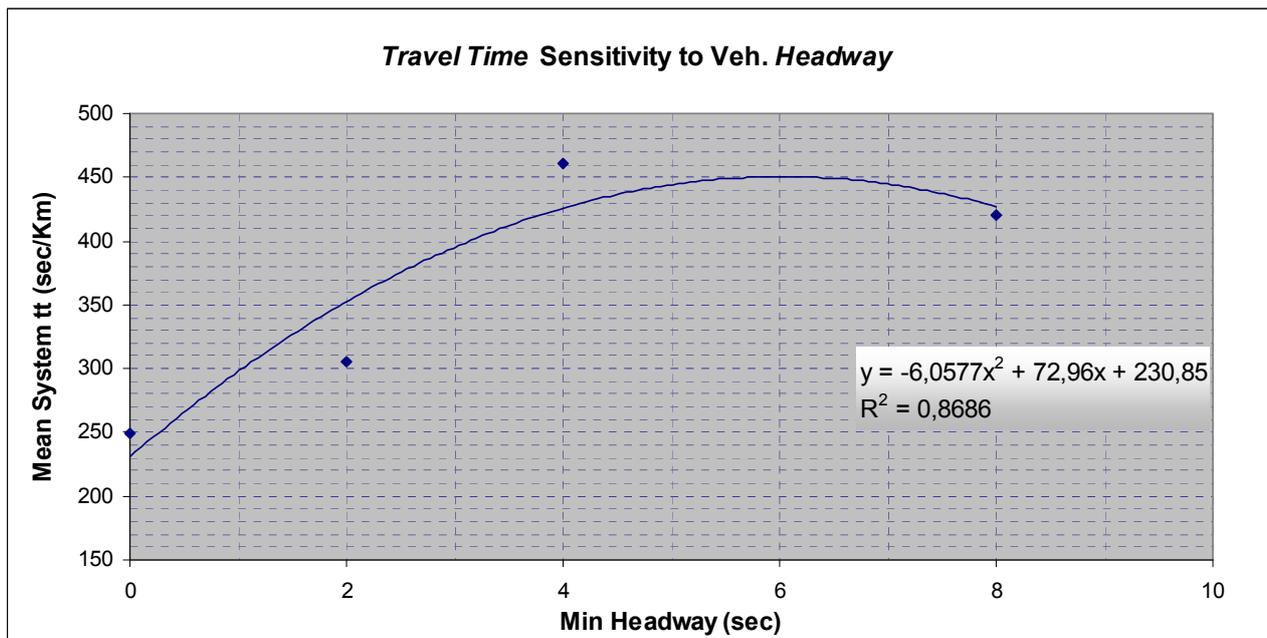
Regression	$R^2$
Linear	0,9939
Logarithmic	0,9755
Polinomial 2°	0,9978
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,9931
Exponential	0,9784

Alternative altrettanto valide sono rappresentate anche dalla legge lineare di equazione  $y = 88,451x + 174,18$ , o dalla potenza  $y = 265,47 x^{0,4382}$ . Tutte queste regressioni indicano una crescita monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del tempo medio di viaggio al crescere del tempo di reazione del generico utente della rete.

Experiment		Simul. Step	Reaction Time (sec)	Travel Time (sec/Km)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	1641	global period	0,75	237,40	-----	-----	-----
2	2343		1,50	306,86	-----	-----	-----
3	2411		2,25	382,51	-----	-----	-----
4	2419		3,00	433,31	-----	-----	-----

**Tab. 3.5 - Layout tabellare dell'andamento del tempo medio di viaggio al variare del tempo di reazione.**

La tabella a corredo della Fig. 3.11, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Mean System Travel Time (tt)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Reaction Time* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.12 - Sensibilità del tempo medio di viaggio rispetto all'intervallo minimo fra veicoli consecutivi.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei tempi medi di viaggio restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Minimum Headway* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

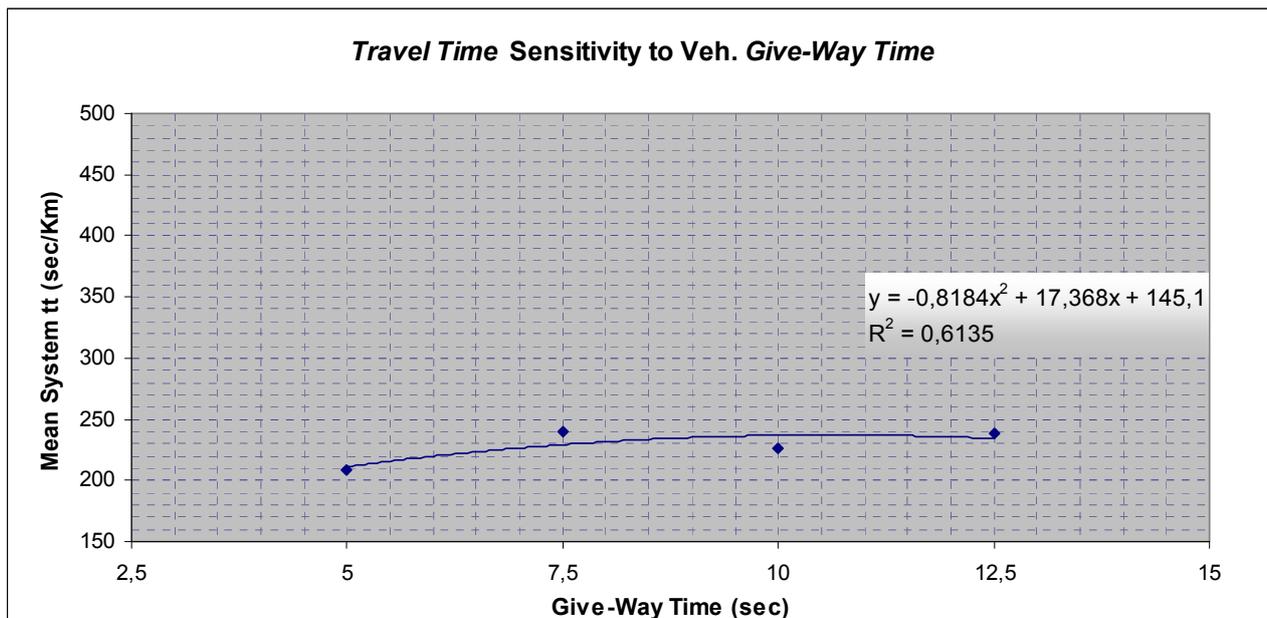
Regression	$R^2$
Linear	0,6174
Logarithmic	0,8127
Polinomial 2°	0,8686
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,8595
Exponential	0,6530

Un'alternativa utile a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, sia pur con un grado di accostamento minore, è rappresentata dalla legge lineare di equazione  $y = 22,768x + 279,31$ . Tutte queste regressioni indicano una crescita pressoché monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del tempo medio di viaggio al crescere dell'intervallo minimo fra veicoli consecutivi.

Experiment		Simul. Step	Min Headway (sec)	Travel Time (sec/Km)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	1641	global period	0	248,62	-----	-----	-----
2	2343		2	305,14	-----	-----	-----
3	2411		4	461,31	-----	-----	-----
4	2419		8	420,91	-----	-----	-----

**Tab. 3.6 - Layout tabellare dell'andamento del tempo medio di viaggio al variare dell'intervallo minimo fra veicoli consecutivi.**

La tabella a corredo della Fig. 3.12, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Mean System Travel Time (tt)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Minimum Headway* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.13 - Sensibilità del tempo medio di viaggio rispetto al tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei tempi medi di viaggio restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Give-Way Time* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

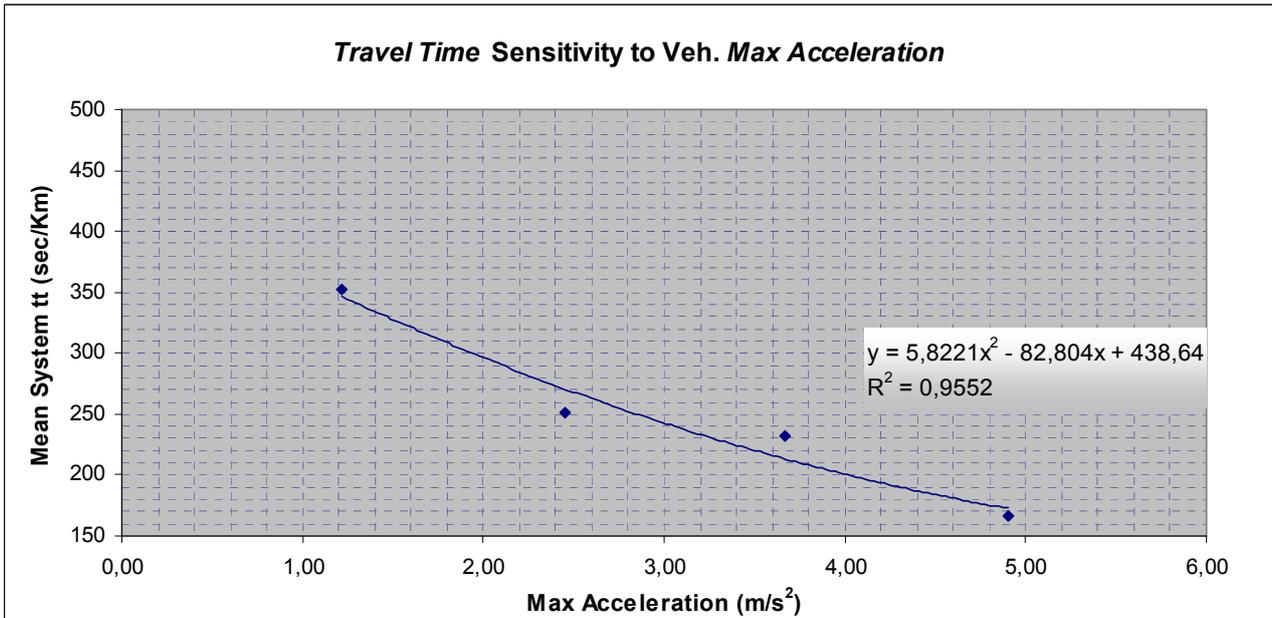
Regression	$R^2$
Linear	0,4508
Logarithmic	0,5326
Polinomial 2°	0,6135
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,5453
Exponential	0,4614

Ulteriori alternative, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, sia pur con un grado di accostamento minore, sono rappresentate dalla legge lineare di equazione  $y = 3,046x + 201,37$ , e dalla potenza  $y = 175,79 x^{0,1224}$ . Tutte queste regressioni indicano una crescita, sia pur contenuta, della risposta del sistema in termini del tempo medio di viaggio al crescere del tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di eseguire una manovra a priorità ridotta.

Experiment		Simul. Step	Give-Way Time (sec)	Travel Time (sec/Km)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	2343	global period	5	207,96	-----	-----	-----
2	2411		7,5	239,91	-----	-----	-----
3	1641		10	226,37	-----	-----	-----
4	2419		12,5	237,86	-----	-----	-----

**Tab. 3.7 - Layout tabellare dell'andamento del tempo medio di viaggio al variare del tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.**

La tabella a corredo della Fig. 3.13, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Mean System Travel Time (tt)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Give-Way Time* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.14 - Sensibilità del tempo medio di viaggio rispetto alla massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un R<sup>2</sup> pari ad 1, la dispersione dei tempi medi di viaggio restituiti dai quattro Experiments corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - Maximum Acceleration -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

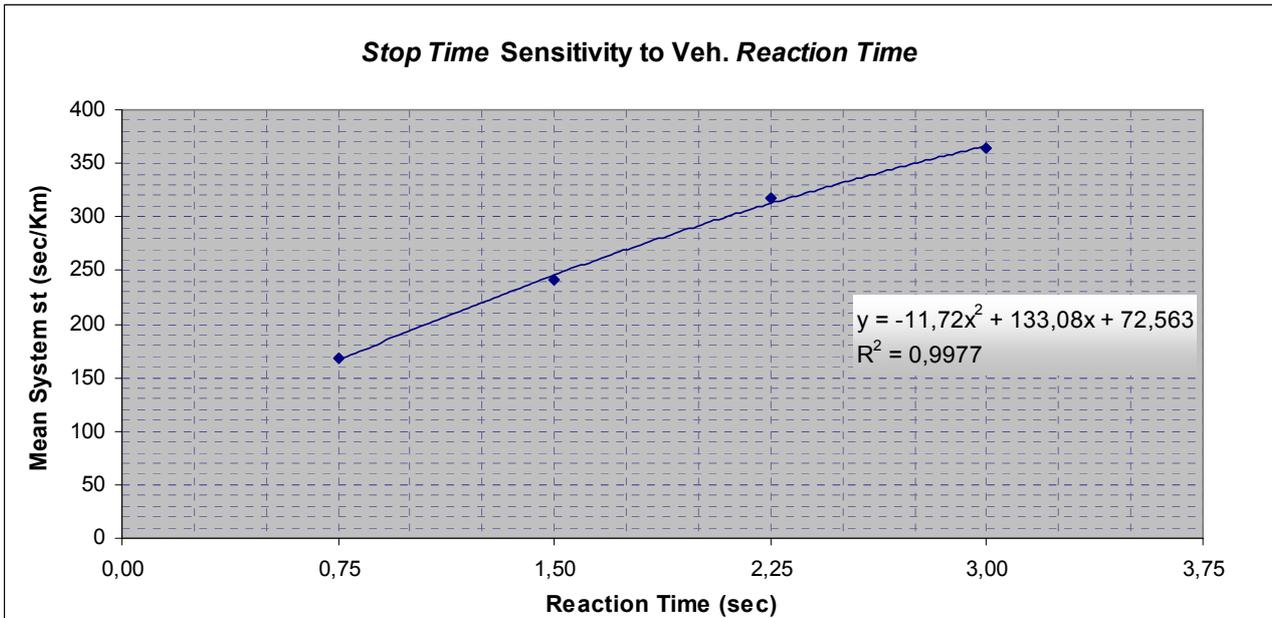
Regression	R <sup>2</sup>
Linear	0,9379
Logarithmic	0,9654
Polinomial 2°	0,9552
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,9339
Exponential	0,9554

Alternative altrettanto valide, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, con gradi di accostamento comunque paragonabili, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare di equazione  $y = -47,173x + 395,07$ , e dalla logaritmica  $y = -125,67 \ln(x) + 375,9$ . Tutte queste regressioni indicano una decrescita monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del tempo medio di viaggio al crescere della massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.

Experiment		Simul. Step	Max Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Travel Time (sec/Km)			
n	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	2343	global period	1,22	352,58	-----	-----	-----
2	2411		2,45	251,74	-----	-----	-----
3	2419		3,67	232,15	-----	-----	-----
4	1641		4,90	166,40	-----	-----	-----

**Tab. 3.8 - Layout tabellare dell'andamento del tempo medio di viaggio al variare della massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.**

La tabella a corredo della Fig. 3.14, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - Mean System Travel Time (tt) -, calcolati sulle 4 Replications di ciascuno dei 4 Experiments corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - Maximum Acceleration -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - Vehicle Behavioural Model -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - global period -.



**Fig. 3.15 - Sensibilità del tempo medio in arresto rispetto al tempo di reazione del generico utente del sistema.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei tempi medi in arresto restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Reaction Time* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

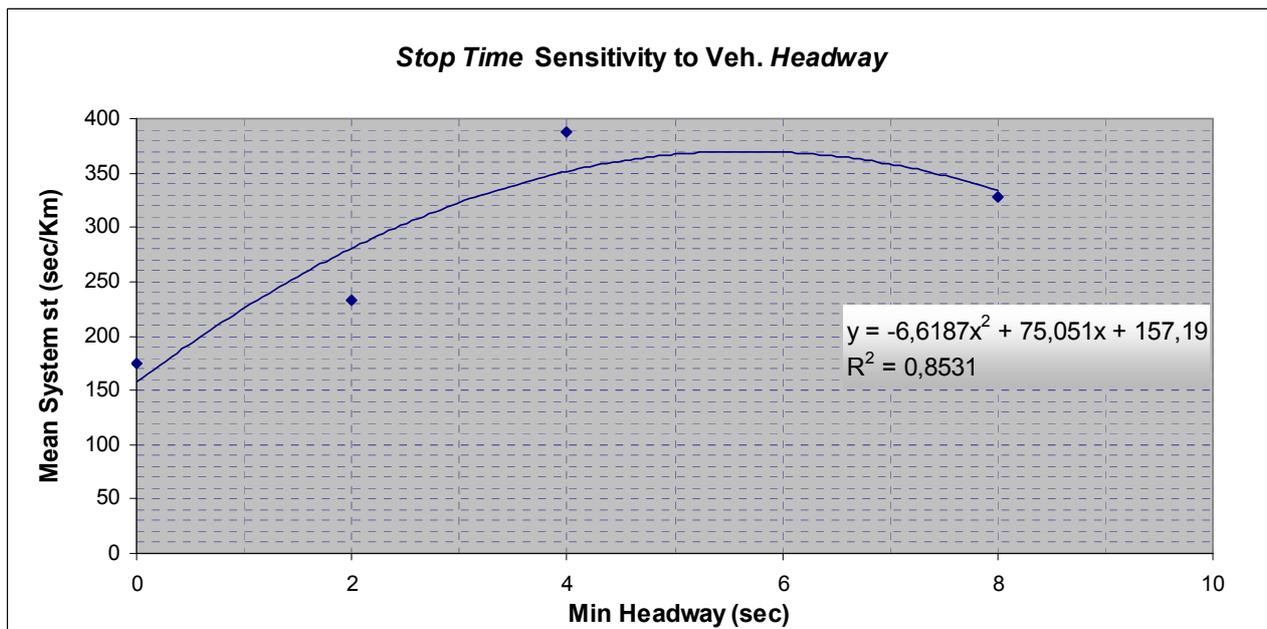
Regression	$R^2$
Linear	0,9899
Logarithmic	0,9812
Polinomial 2°	0,9977
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,9969
Exponential	0,9637

Alternative altrettanto valide, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, con gradi di accostamento comunque paragonabili, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare di equazione  $y = 89,132x + 105,53$  o dalla potenza  $y = 195,78 x^{0,5705}$ . Tutte queste regressioni indicano una crescita monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del tempo medio in arresto al crescere del tempo di reazione del generico utente della rete.

Experiment		Simul. Step	Reaction Time (sec)	Stop Time (sec/Km)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	1641	global period	0,75	167,41	-----	-----	-----
2	2343		1,50	240,93	-----	-----	-----
3	2411		2,25	317,55	-----	-----	-----
4	2419		3,00	364,70	-----	-----	-----

**Tab. 3.9 - Layout tabellare dell'andamento del tempo medio in arresto al variare del tempo di reazione.**

La tabella a corredo della Fig. 3.15, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Mean System Stop Time (st)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Reaction Time* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.16 - Sensibilità del tempo medio in arresto rispetto all'intervallo minimo fra veicoli consecutivi.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei tempi medi in arresto restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Minimum Headway* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

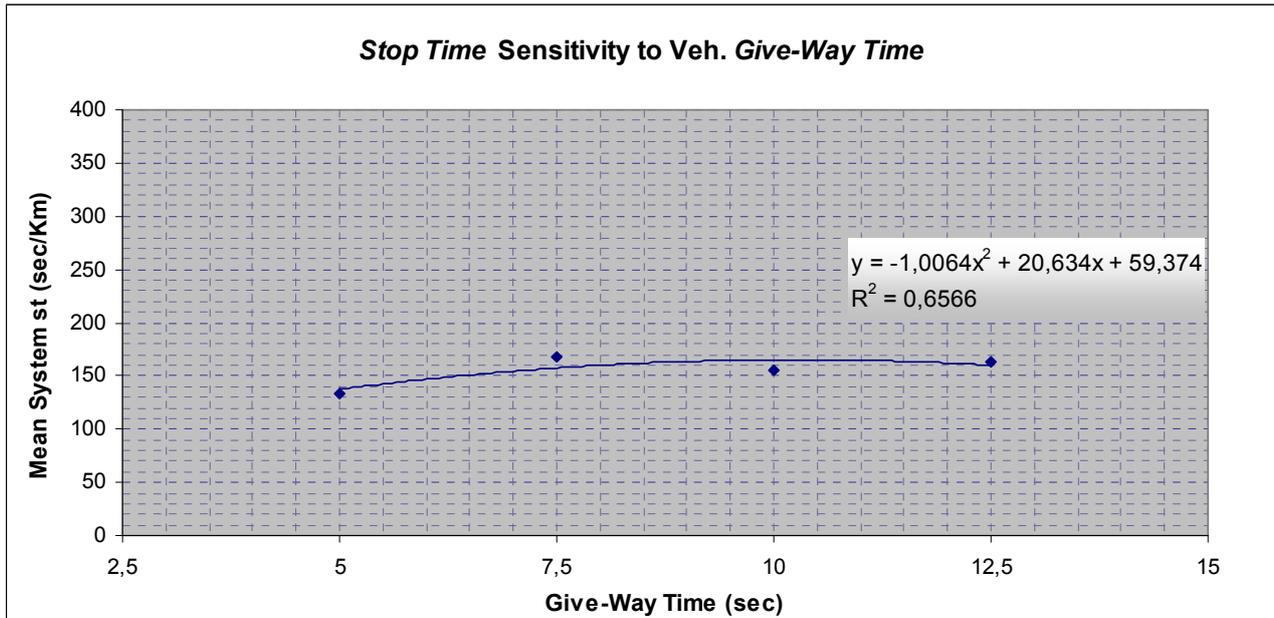
Regression	$R^2$
Linear	0,5278
Logarithmic	0,7574
Polinomial 2°	0,8531
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,8324
Exponential	0,5903

Un'alternativa utile a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, sia pur con un grado di accostamento minore, è rappresentata dalla legge lineare di equazione  $y = 20,21x + 210,14$ . Tutte queste regressioni indicano una crescita pressoché monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del tempo medio in arresto al crescere dell'intervallo minimo fra veicoli consecutivi.

Experiment		Simul. Step	Min Headway (sec)	Stop Time (sec/Km)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	1641	global period	0	175,24	-----	-----	-----
2	2343		2	232,70	-----	-----	-----
3	2411		4	387,59	-----	-----	-----
4	2419		8	327,99	-----	-----	-----

**Tab. 3.10 - Layout tabellare dell'andamento del tempo medio in arresto al variare dell'intervallo minimo fra veicoli consecutivi.**

La tabella a corredo della Fig. 3.16, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Mean System Stop Time (st)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Minimum Headway* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.17 - Sensibilità del tempo medio in arresto rispetto al tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei tempi medi in arresto restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Give-Way Time* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

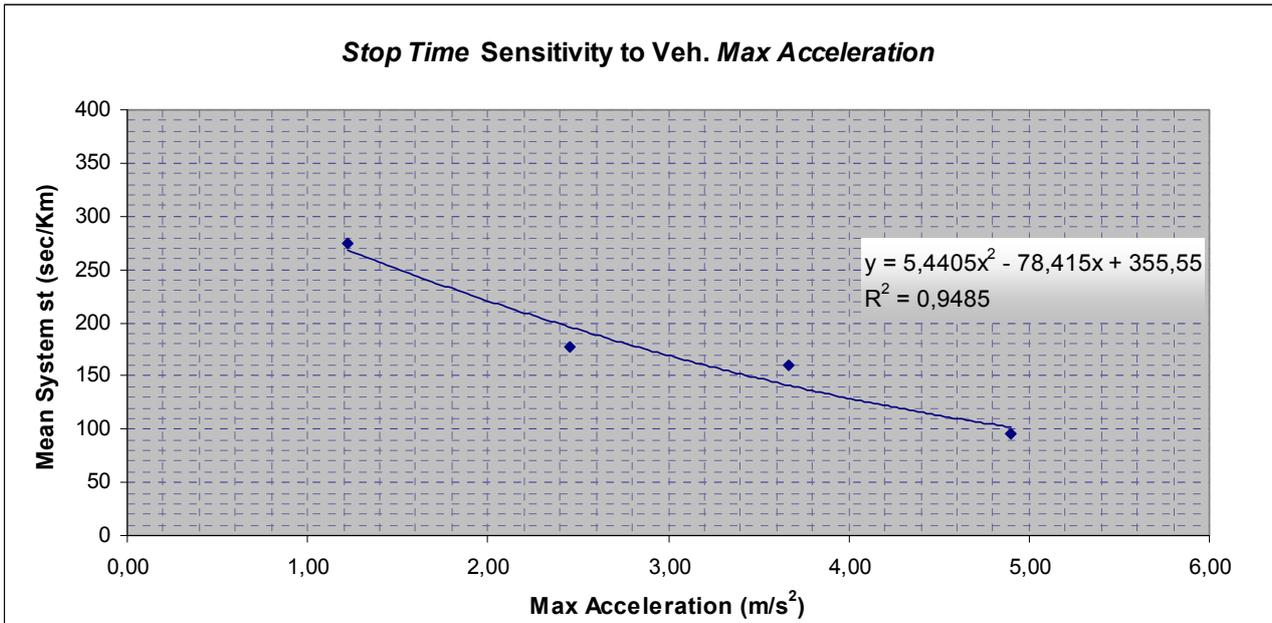
Regression	$R^2$
Linear	0,4224
Logarithmic	0,5165
Polinomial 2°	0,6566
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,5379
Exponential	0,4413

Ulteriori alternative, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, sia pur con un grado di accostamento minore, sono rappresentate dalla legge lineare di equazione  $y = 3,022x + 128,56$ , e dalla potenza  $y = 104,21 x^{0,1862}$ . Tutte queste regressioni indicano una crescita, sia pur contenuta, della risposta del sistema in termini del tempo medio in arresto al crescere del tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di eseguire una manovra a priorità ridotta.

Experiment		Simul. Step	Give-Way Time (sec)	Stop Time (sec/Km)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	2343	global period	5,0	133,98	-----	-----	-----
2	2411		7,5	167,74	-----	-----	-----
3	1641		10,0	154,86	-----	-----	-----
4	2419		12,5	163,46	-----	-----	-----

**Tab. 3.11 - Layout tabellare dell'andamento del tempo medio in arresto al variare del tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.**

La tabella a corredo della Fig. 3.17, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Mean System Stop Time (st)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Give-Way Time* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.18 - Sensibilità del tempo medio in arresto rispetto alla massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei tempi medi in arresto restituiti dai quattro Experiments corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - Maximum Acceleration -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

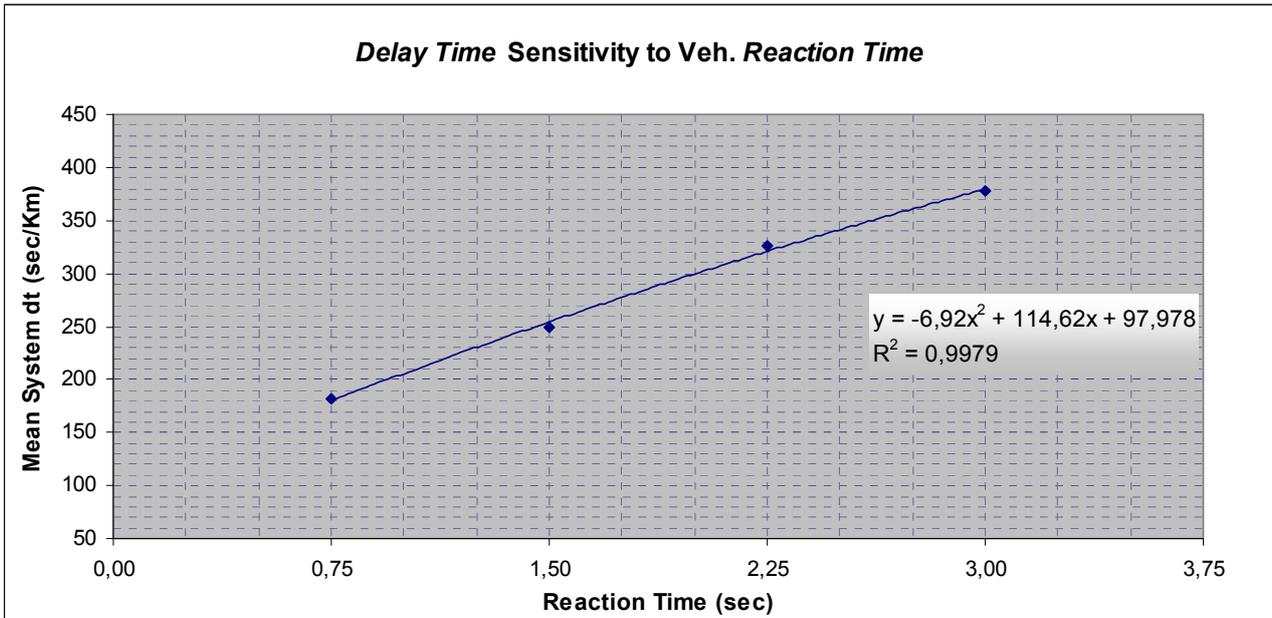
Regression	$R^2$
Linear	0,9321
Logarithmic	0,9594
Polinomial 2°	0,9485
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,9042
Exponential	0,9453

Alternative altrettanto valide, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, con gradi di accostamento comunque paragonabili, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare di equazione  $y = -45,119x + 314,83$ , e dalla logaritmica  $y = -120,20 \ln(x) + 296,49$ . Tutte queste regressioni indicano una decrescita monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del tempo medio in arresto al crescere della massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.

Experiment		Simul. Step	Max Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Stop Time (sec/Km)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	2343	global period	1,22	274,45	-----	-----	-----
2	2411		2,45	176,57	-----	-----	-----
3	2419		3,67	160,56	-----	-----	-----
4	1641		4,90	95,47	-----	-----	-----

**Tab. 3.12 - Layout tabellare dell'andamento del tempo medio in arresto al variare della massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.**

La tabella a corredo della Fig. 3.18, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - Mean System Stop Time (st) -, calcolati sulle 4 Replications di ciascuno dei 4 Experiments corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - Maximum Acceleration -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - Vehicle Behavioural Model -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - global period -.



**Fig. 3.19 - Sensibilità del ritardo medio rispetto al tempo di reazione del generico utente del sistema.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei ritardi medi restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Reaction Time* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

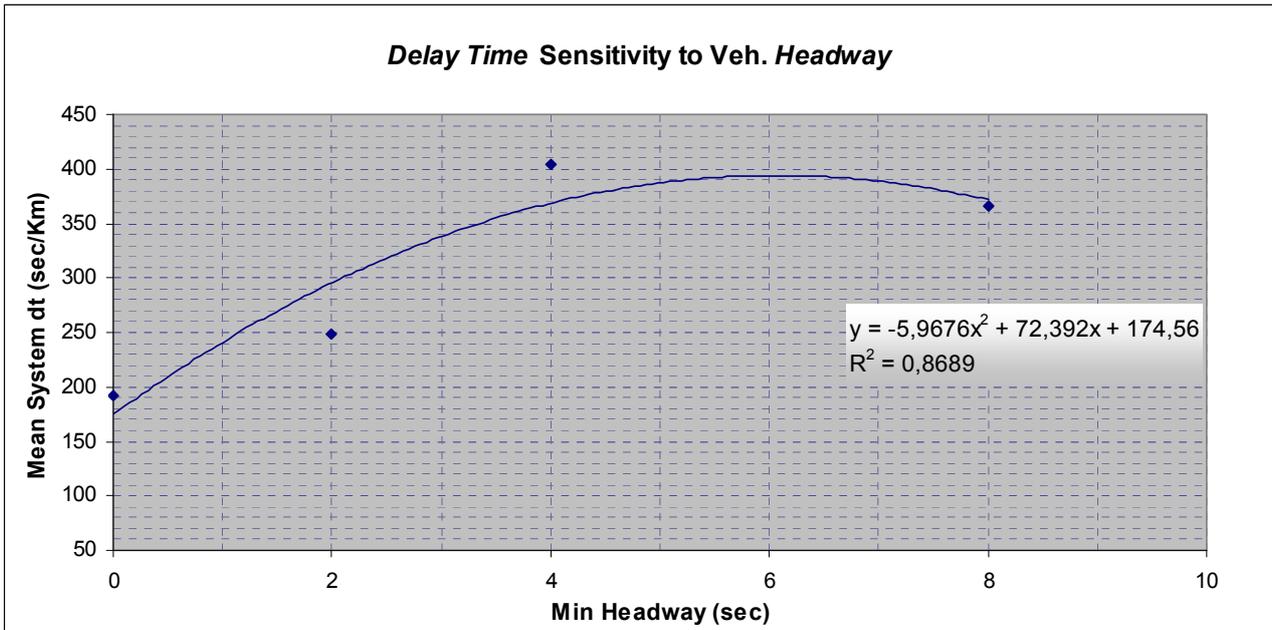
Regression	$R^2$
Linear	0,9952
Logarithmic	0,9729
Polinomial 2°	0,9979
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,9944
Exponential	0,9765

Alternative altrettanto valide, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, con gradi di accostamento comunque paragonabili, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare di equazione  $y = 88,671x + 117,44$  o dalla potenza  $y = 208,48 x^{0,5341}$ . Tutte queste regressioni indicano una crescita monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del *ritardo medio* al crescere del *tempo di reazione* del generico utente della rete.

Experiment n.	id	Simul. Step	Reaction Time (sec)	Delay Time (sec/Km)			
				Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	1641	global period	0,75	181,56	-----	-----	-----
2	2343		1,50	249,81	-----	-----	-----
3	2411		2,25	325,37	-----	-----	-----
4	2419		3,00	378,05	-----	-----	-----

**Tab. 3.13 - Layout tabellare dell'andamento del ritardo medio al variare del tempo di reazione.**

La tabella a corredo della Fig. 3.19, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Mean System Delay Time (dt)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Reaction Time* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.20 - Sensibilità del ritardo medio rispetto all'intertempo minimo fra veicoli consecutivi.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei ritardi medi restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Minimum Headway* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

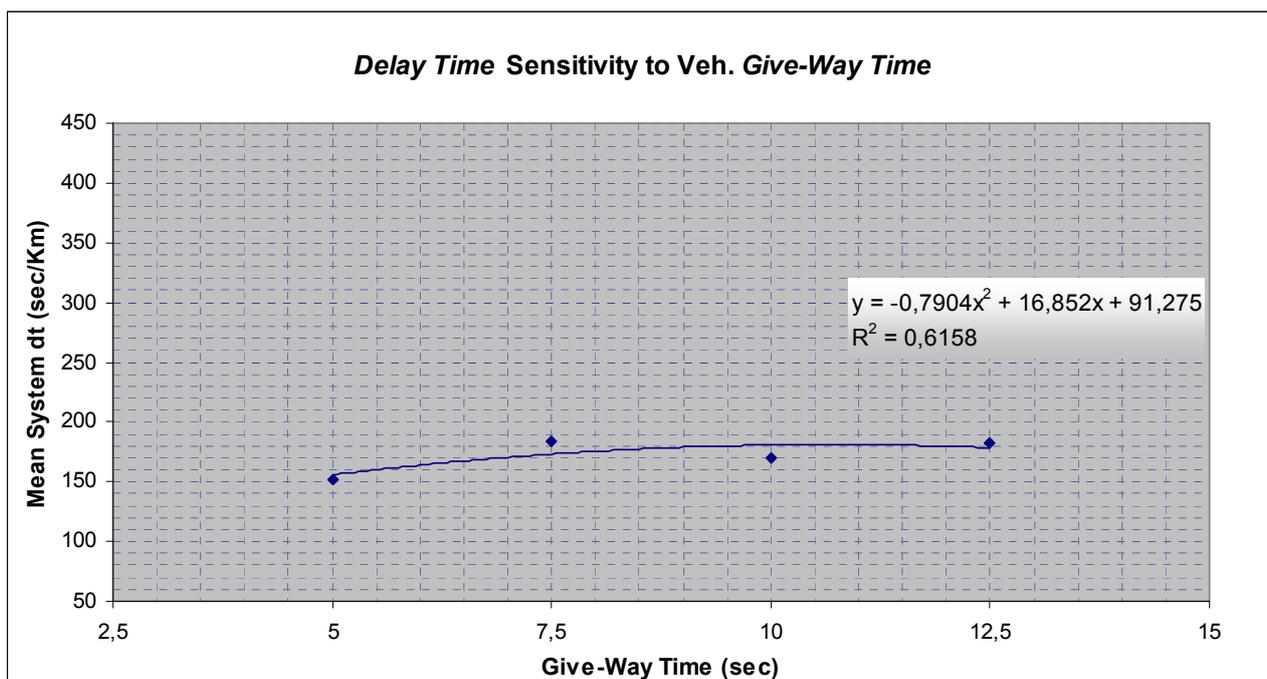
Regression	$R^2$
Linear	0,6257
Logarithmic	0,8163
Polinomial 2°	0,8689
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,8702
Exponential	0,6648

Un'alternativa utile a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, sia pur con un grado di accostamento minore, è rappresentata dalla legge lineare di equazione  $y = 22,946x + 222,30$ . Tutte queste regressioni indicano una crescita pressoché monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del ritardo medio al crescere dell'intertempo minimo fra veicoli consecutivi.

Experiment		Simul. Step	Min Headway (sec)	Delay Time (sec/Km)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	1641	global period	0	192,33	-----	-----	-----
2	2343		2	248,07	-----	-----	-----
3	2411		4	404,19	-----	-----	-----
4	2419		8	365,84	-----	-----	-----

**Tab. 3.14 - Layout tabellare dell'andamento del ritardo medio al variare dell'intertempo minimo fra veicoli consecutivi.**

La tabella a corredo della Fig. 3.20, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Mean System Delay Time (dt)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Minimum Headway* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.21 - Sensibilità del ritardo medio rispetto al tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei ritardi medi restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Give-Way Time* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

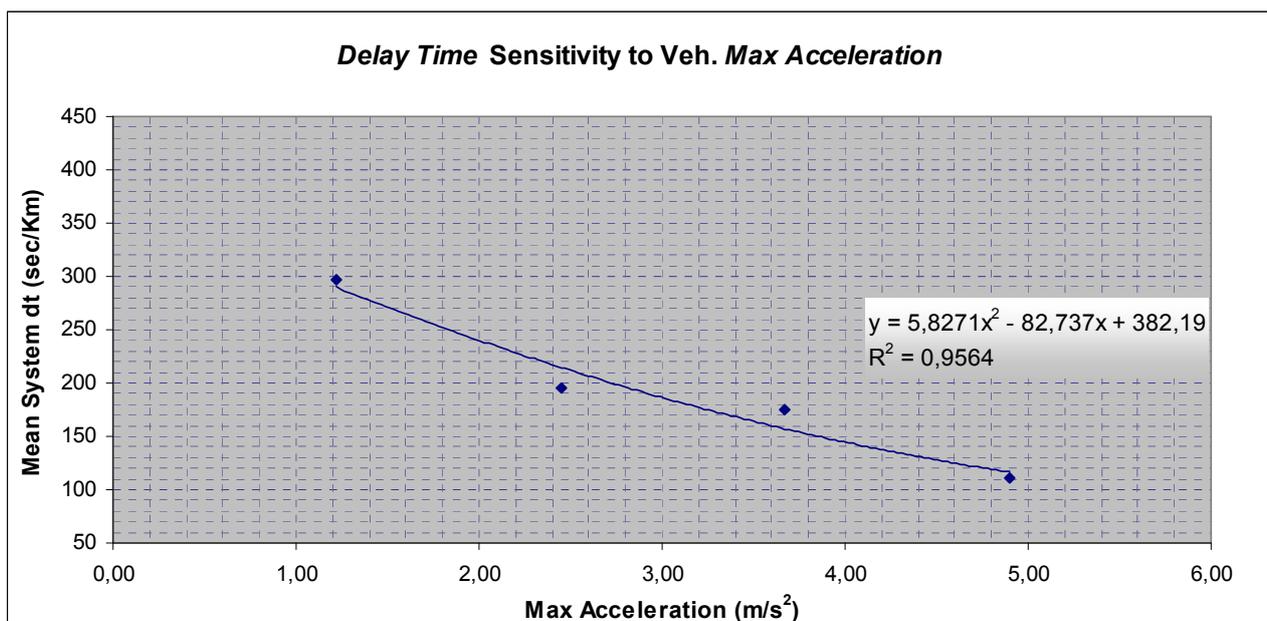
Regression	$R^2$
Linear	0,4587
Logarithmic	0,5397
Polinomial 2°	0,6158
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,5556
Exponential	0,4719

Ulteriori alternative, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, sia pur con un grado di accostamento minore, sono rappresentate dalla legge lineare di equazione  $y = 3,02x + 145,62$ , e dalla potenza  $y = 121,83 x^{0,162}$ . Tutte queste regressioni indicano una crescita, sia pur contenuta, della risposta del sistema in termini del ritardi medi al crescere del tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di eseguire una manovra a priorità ridotta.

Experiment n.	id	Simul. Step	Give-Way Time (sec)	Delay Time (sec/Km)			
				Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	2343	global period	5,0	152,32	-----	-----	-----
2	2411		7,5	183,57	-----	-----	-----
3	1641		10,0	170,39	-----	-----	-----
4	2419		12,5	181,88	-----	-----	-----

**Tab. 3.15 - Layout tabellare dell'andamento del ritardo medio al variare del tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.**

La tabella a corredo della Fig. 3.21, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Mean System Delay Time (dt)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Give-Way Time* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.22 - Sensibilità del ritardo medio rispetto alla massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un R<sup>2</sup> pari ad 1, la dispersione dei ritardi medi restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Maximum Acceleration* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

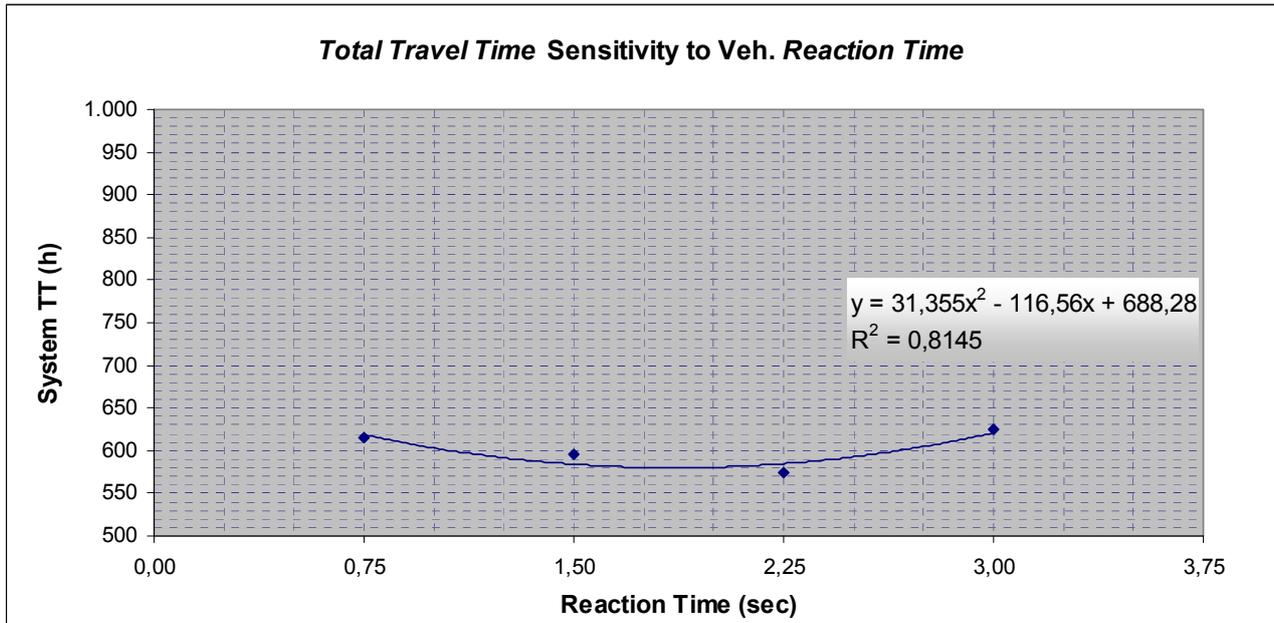
Regression	R <sup>2</sup>
Linear	0,9390
Logarithmic	0,9665
Polinomial 2°	0,9564
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,9186
Exponential	0,9551

Alternative altrettanto valide, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, con gradi di accostamento comunque paragonabili, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare di equazione  $y = -47,075x + 338,58$ , e dalla logaritmica  $y = -125,41 \ln(x) + 319,44$ . Tutte queste regressioni indicano una decrescita monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del *ritardo medio* al crescere della *massima accelerazione* erogabile dal generico veicolo.

n.	Exp id	Simul. Step	Max Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Delay Time (sec/Km)			
				Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	2343	global period	1,22	296,11	-----	-----	-----
2	2411		2,45	195,80	-----	-----	-----
3	2419		3,67	175,69	-----	-----	-----
4	1641		4,90	110,50	-----	-----	-----

**Tab. 3.16 - Layout tabellare dell'andamento del ritardo medio al variare della massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.**

La tabella a corredo della Fig. 3.22, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Mean System Delay Time (dt)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Maximum Acceleration* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.23 - Sensibilità del tempo totale di attraversamento della rete rispetto al tempo di reazione del generico utente del sistema.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei tempi totali di attraversamento della rete restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Reaction Time* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

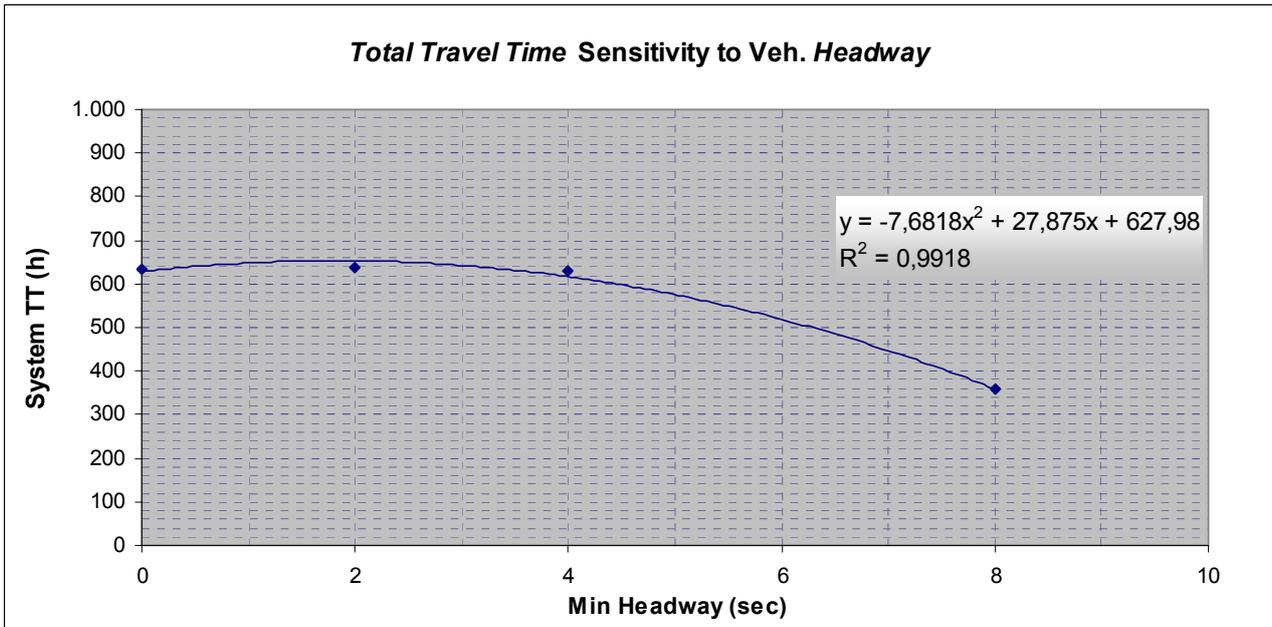
Regression	$R^2$
Linear	0,0019
Logarithmic	0,0137
Polinomial 2°	0,8145
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,0156
Exponential	0,0012

Le altre leggi di regressione non costituiscono valide alternative per individuare più chiaramente la tendenza insita nei dati, poiché caratterizzate da valori di  $R^2$  esigui. L'andamento appiattito della regressione che meglio si adatta ai dati, sembra suggerire la ridotta influenza del tempo di reazione degli utenti sulla risposta del sistema in termini di tempo totale di attraversamento della rete.

Experiment		Simul. Step	Reaction Time (sec)	Total Travel Time (h)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	1641	global period	0,75	614,73	-----	-----	-----
2	2343		1,50	595,29	-----	-----	-----
3	2411		2,25	573,45	-----	-----	-----
4	2419		3,00	624,56	-----	-----	-----

**Tab. 3.17 - Layout tabellare dell'andamento del tempo totale di attraversamento della rete al variare del tempo di reazione.**

La tabella a corredo della Fig. 3.23, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Total System Travel Time (TT)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Reaction Time* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.24 - Sensibilità del tempo totale di attraversamento della rete rispetto all'intertempo minimo fra veicoli consecutivi.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei tempi totali di attraversamento della rete restituiti dai quattro Experiments corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - Minimum Headway -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

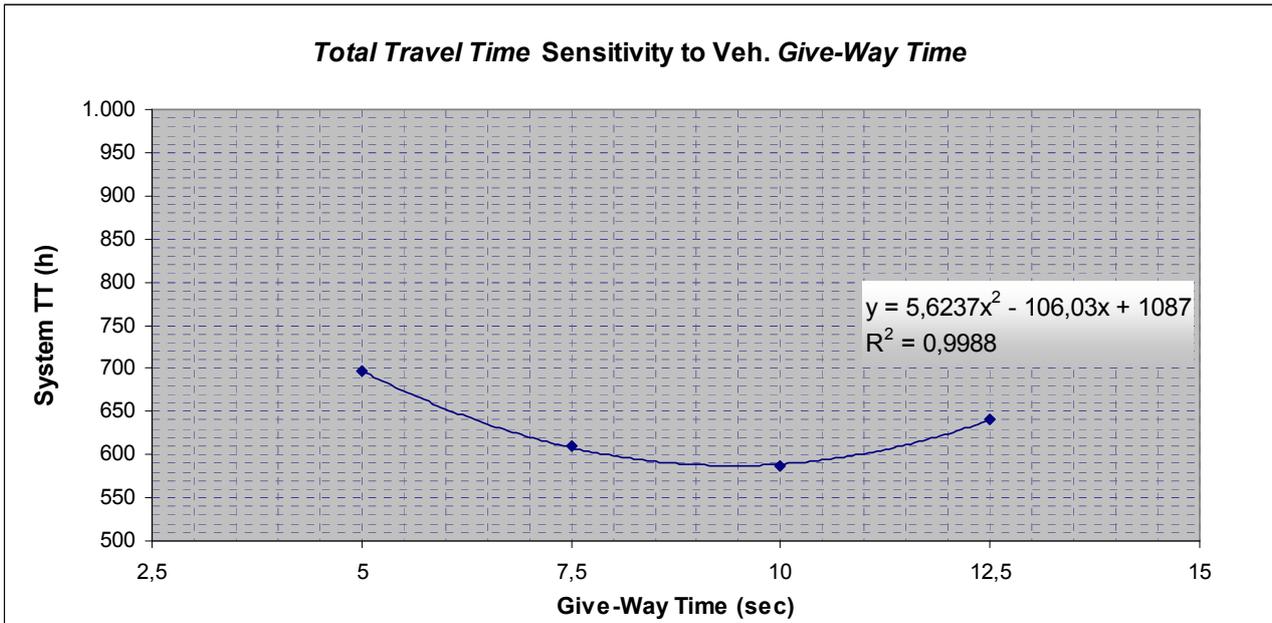
Regression	R <sup>2</sup>
Linear	0,7841
Logarithmic	0,4432
Polinomial 2°	0,9918
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,4402
Exponential	0,7811

Ulteriori alternative, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, sia pur con grado di accostamento minore, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare  $y = -35,774x + 689,44$ , e dall'esponenziale  $y = 711,16 e^{-0,074x}$ . Tutte queste regressioni sembrano indicare una decrescita pressoché monotona della risposta del sistema in termini del tempo totale di attraversamento della rete al crescere dell'intertempo minimo, meno spiccata per valori più contenuti di quest'ultimo parametro.

Experiment		Simul. Step	Min Headway (sec)	Total Travel Time (h)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	1641	global period	0	634	-----	-----	-----
2	2343		2	637	-----	-----	-----
3	2411		4	629	-----	-----	-----
4	2419		8	357	-----	-----	-----

**Tab. 3.18 - Layout tabellare dell'andamento del tempo totale di attraversamento della rete al variare dell'intertempo minimo fra veicoli consecutivi.**

La tabella a corredo della Fig. 3.24, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - Total System Travel Time (TT) -, calcolati sulle 4 Replications di ciascuno dei 4 Experiments corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - Minimum Headway -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - Vehicle Behavioural Model -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - global period -.



**Fig. 3.25 - Sensibilità del tempo totale di attraversamento della rete rispetto al tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei tempi totali di attraversamento della rete restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Give-Way Time* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

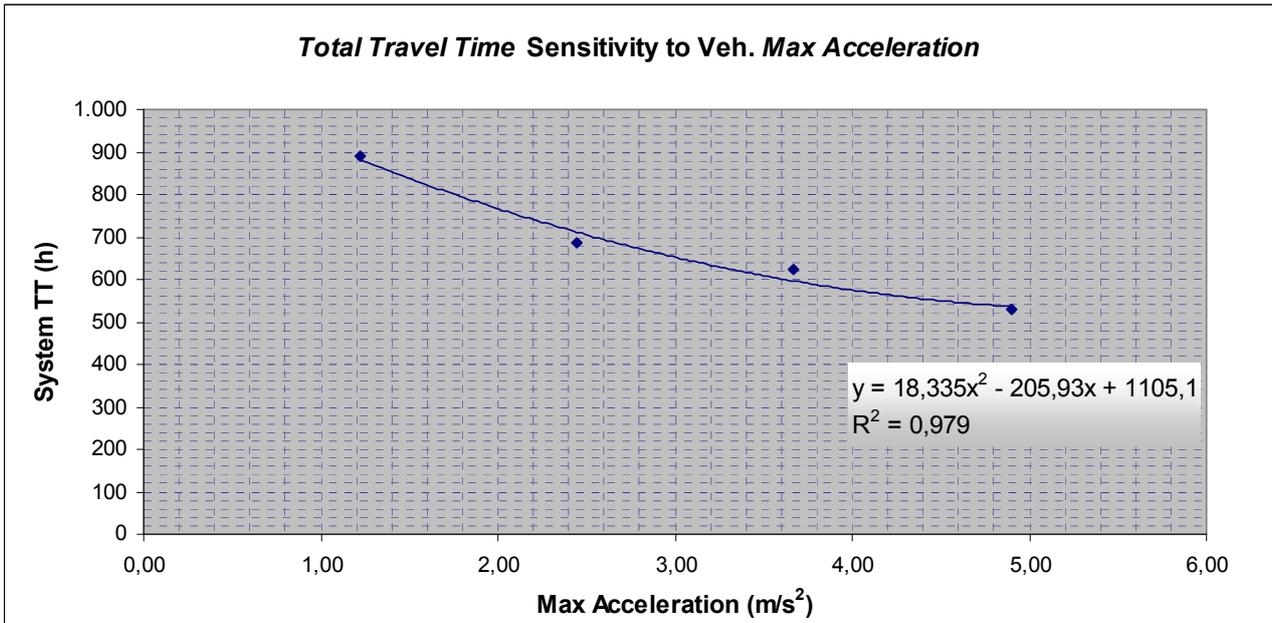
Regression	$R^2$
Linear	0,2679
Logarithmic	0,3919
Polinomial 2°	0,9988
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,3762
Exponential	0,2542

Ulteriori alternative, utili a cogliere in maniera più compiuta la tendenza insita nei dati, sia pur con un grado di accostamento ridotto, sono rappresentate dalla legge logaritmica di equazione  $y = -75,125 \ln(x) + 792,51$ , e dalla potenza  $y = 805,77 x^{-0,1146}$ . Tutte queste regressioni sembrano indicare una decrescita, sia pur contenuta, della risposta del sistema in termini del tempo totale di attraversamento della rete al crescere del tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di eseguire una manovra a priorità ridotta.

n.	Exp id	Simul. Step	Give-Way Time (sec)	Total Travel Time (h)			
				Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	2343	global period	5	697	-----	-----	-----
2	2411		7,5	610	-----	-----	-----
3	1641		10	587	-----	-----	-----
4	2419		12,5	641	-----	-----	-----

**Tab. 3.19 - Layout tabellare dell'andamento del tempo totale di attraversamento della rete al variare del tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.**

La tabella a corredo della Fig. 3.25, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Total System Travel Time (TT)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Give-Way Time* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.26 - Sensibilità del tempo totale di attraversamento della rete rispetto alla massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei tempi totali di attraversamento della rete restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Maximum Acceleration* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

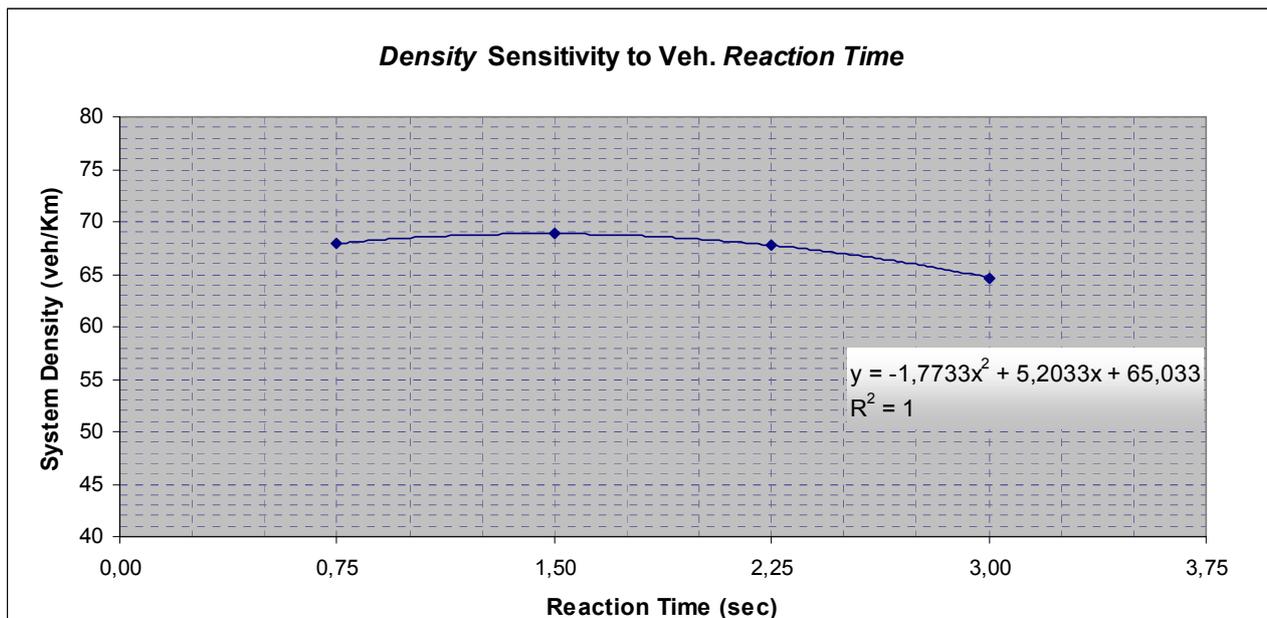
Regression	R <sup>2</sup>
Linear	0,9357
Logarithmic	0,9880
Polinomial 2°	0,9790
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,9855
Exponential	0,9648

Alternative altrettanto valide, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, con gradi di accostamento comunque paragonabili, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare di equazione  $y = -93,72x + 967,86$ , e dalla logaritmica  $y = -252,88 \ln(x) + 932,97$ . Tutte queste regressioni indicano una decrescita monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del tempo totale di attraversamento della rete al crescere della massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.

Experiment n.	id	Simul. Step	Max Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Total Travel Time (h)			
				Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	2343	global period	1,22	890	-----	-----	-----
2	2411		2,45	685	-----	-----	-----
3	2419		3,67	622	-----	-----	-----
4	1641		4,90	528	-----	-----	-----

**Tab. 3.20 - Layout tabellare dell'andamento del tempo totale di attraversamento della rete al variare della massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.**

La tabella a corredo della Fig. 3.26, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *Total System Travel Time (TT)* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Maximum Acceleration* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.27 - Sensibilità della densità veicolare lungo la rete rispetto al tempo di reazione del generico utente del sistema.**

La dispersione delle densità veicolari restituite dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Reaction Time* -, risulta perfettamente interpolata (con un  $R^2$  pari ad 1), già dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

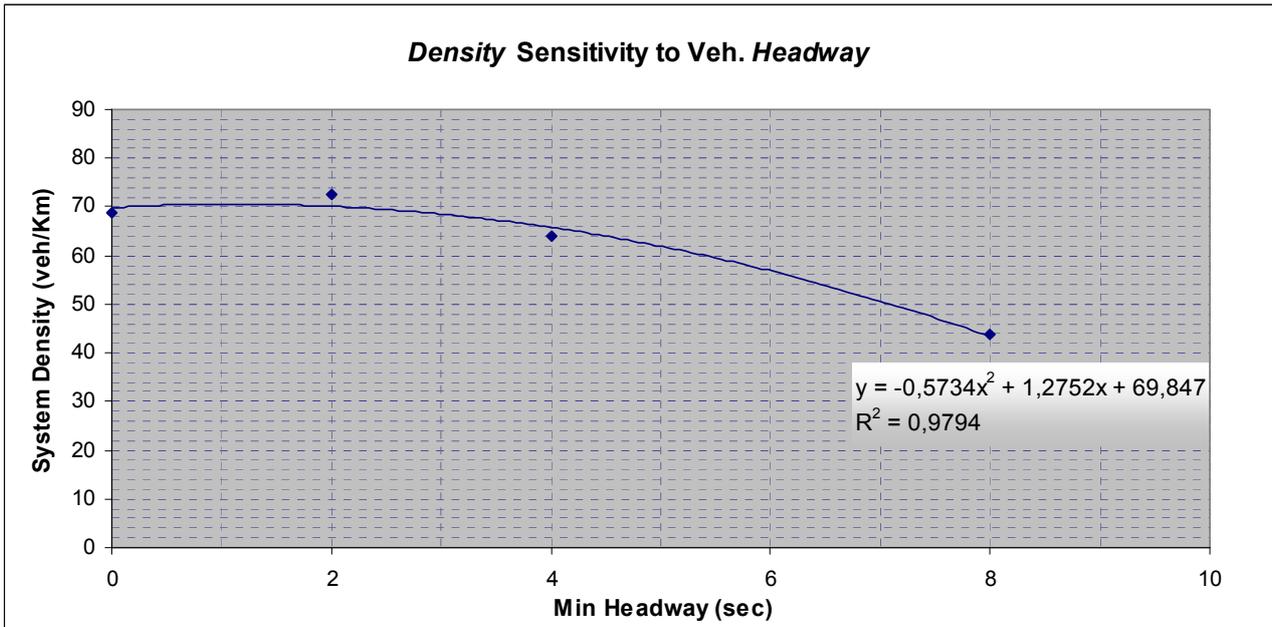
Regression	$R^2$
Linear	0,5966
Logarithmic	0,4014
<b>Polinomial 2°</b>	<b>1,0000</b>
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,4031
Exponential	0,5980

Valide alternative, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, sebbene con gradi di accostamento minori, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare  $y = -1,4467x + 70,02$  e dall'esponenziale  $y = 70,091 e^{-0,0218x}$ . Tutte queste regressioni sembrano indicare una decrescita pressoché monotona, sia pur contenuta, della risposta del sistema in termini della densità veicolare al crescere del tempo di reazione del generico utente della rete.

Experiment		Simul. Step	Reaction Time (sec)	Density (veh/Km)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	1641	global period	0,75	67,94	-----	-----	-----
2	2343		1,50	68,84	-----	-----	-----
3	2411		2,25	67,77	-----	-----	-----
4	2419		3,00	64,68	-----	-----	-----

**Tab. 3.21 - Layout tabellare dell'andamento della densità veicolare lungo la rete al variare del tempo di reazione.**

La tabella a corredo della Fig. 3.27, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *System Density* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Reaction Time* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.28 - Sensibilità della densità veicolare lungo la rete rispetto all'intertempo minimo fra veicoli consecutivi.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione delle densità veicolari restituite dai quattro Experiments corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - Minimum Headway -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

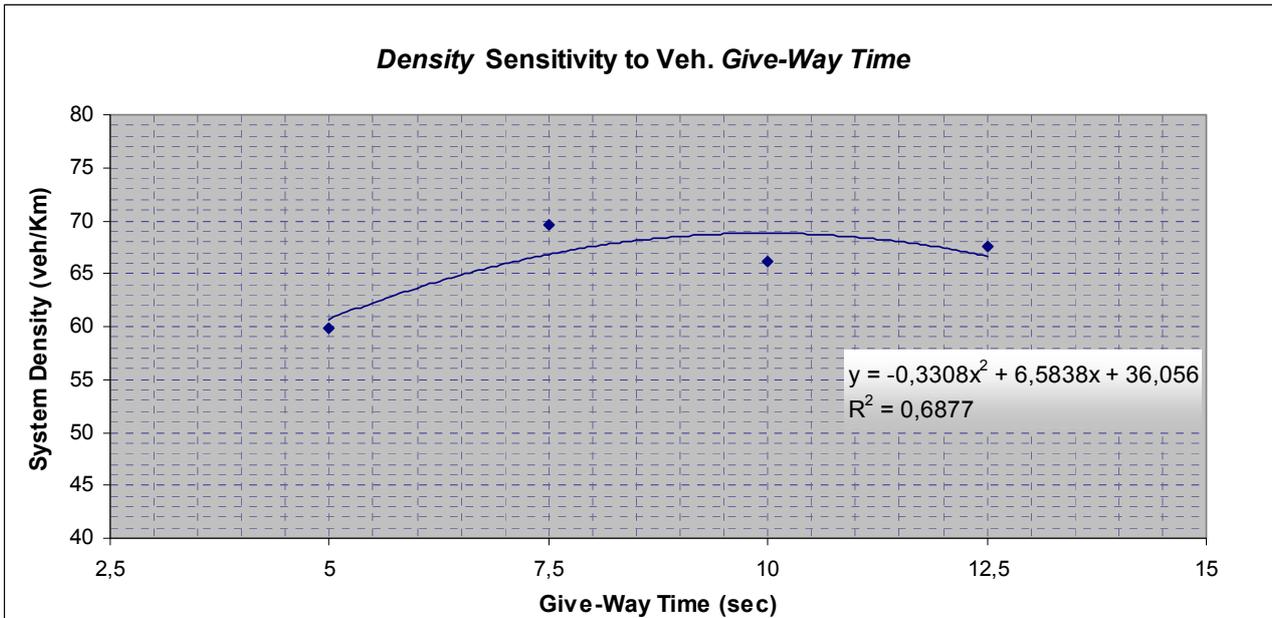
Regression	R <sup>2</sup>
Linear	0,8469
Logarithmic	0,5239
Polinomial 2°	0,9794
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,5159
Exponential	0,8453

Valide alternative, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, sia pur con grado di accostamento minore, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare  $y = -3,475x + 74,434$ , e dall'esponenziale  $y = 75,934 e^{-0,062x}$ . Tutte queste regressioni indicano una decrescita pressoché monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini della densità veicolare lungo la rete al crescere dell'intertempo minimo fra veicoli consecutivi.

Experiment		Simul. Step	Min Headway (sec)	Density (veh/Km)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	1641	global period	0	68,93	-----	-----	-----
2	2343		2	72,55	-----	-----	-----
3	2411		4	63,94	-----	-----	-----
4	2419		8	43,66	-----	-----	-----

**Tab. 3.22 - Layout tabellare dell'andamento della densità veicolare lungo la rete al variare dell'intertempo minimo fra veicoli consecutivi.**

La tabella a corredo della Fig. 3.28, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - System Density -, calcolati sulle 4 Replications di ciascuno dei 4 Experiments corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - Minimum Headway -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - Vehicle Behavioural Model -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - global period -.



**Fig. 3.29 - Sensibilità della densità veicolare lungo la rete rispetto al tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione delle densità veicolari restituite dai quattro Experiments corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - Give-Way Time -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

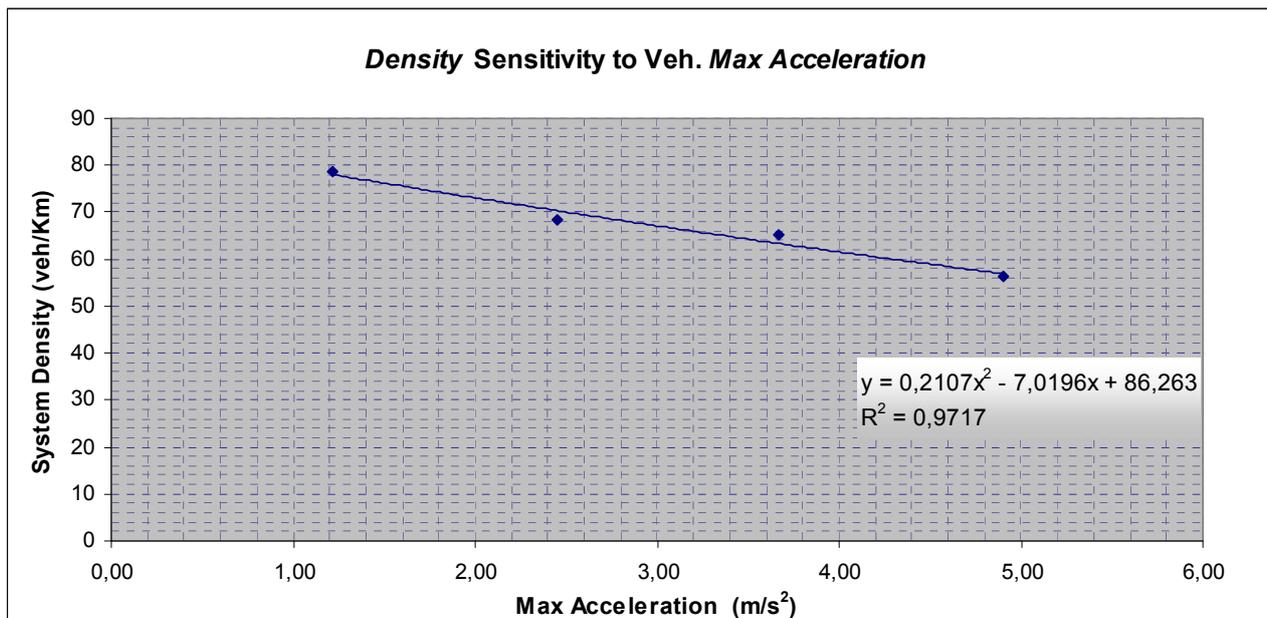
Regression	$R^2$
Linear	0,3685
Logarithmic	0,4712
Polinomial 2°	0,6877
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,4883
Exponential	0,3840

Ulteriori alternative, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, sia pur con grado di accostamento inferiore al 50% del campione, sono rappresentate dalla potenza  $y = 51,353 x^{0,1162}$ , e dalla legge logaritmica  $y = 7,332 \ln(x) + 50,258$ . Tutte queste regressioni indicano una crescita pressoché monotona, sia pur contenuta, della risposta del sistema in termini della densità veicolare al crescere del tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di compiere una manovra a priorità ridotta.

Experiment		Simul. Step	Give-Way Time (sec)	Density (veh/Km)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	2343	global period	5	59,79	-----	-----	-----
2	2411		7,5	69,57	-----	-----	-----
3	1641		10	66,07	-----	-----	-----
4	2419		12,5	67,58	-----	-----	-----

**Tab. 3.23 - Layout tabellare dell'andamento della densità veicolare lungo la rete al variare del tempo massimo di attesa del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.**

La tabella a corredo della Fig. 3.29, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - System Density -, calcolati sulle 4 Replications di ciascuno dei 4 Experiments corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - Give-Way Time -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - Vehicle Behavioural Model -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - global period -.



**Fig. 3.30 - Sensibilità della densità veicolare lungo la rete rispetto alla massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione delle densità veicolari restituite dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Maximum Acceleration* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

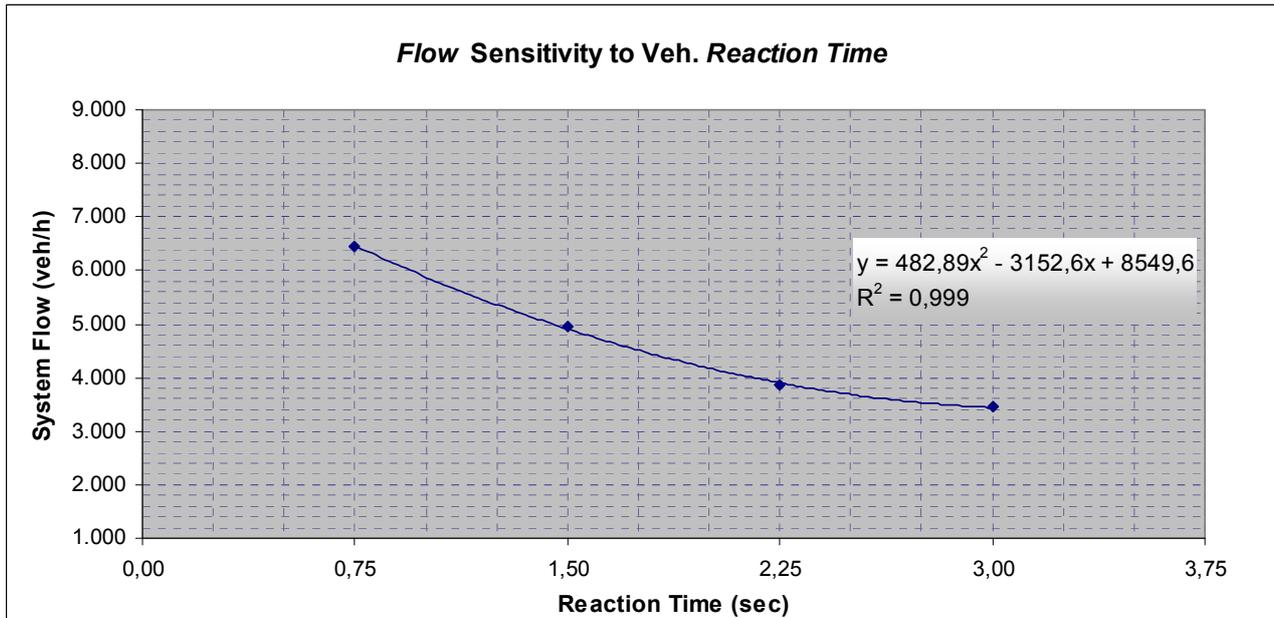
Regression	R <sup>2</sup>
Linear	0,9701
Logarithmic	0,9588
Polinomial 2°	0,9717
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,9385
Exponential	0,9714

Alternative altrettanto valide, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, con gradi di accostamento al campione comunque paragonabili, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare di equazione  $y = -5,73x + 84,686$ , e dall'esponenziale  $y = 86,675 e^{-0,0857x}$ . Tutte queste regressioni indicano una decrescita monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini della densità veicolare lungo la rete al crescere della massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.

Experiment n.	id	Simul. Step	Max Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Density (veh/Km)			
				Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	2343	global period	1,22	78,61	-----	-----	-----
2	2411		2,45	68,53	-----	-----	-----
3	2419		3,67	65,14	-----	-----	-----
4	1641		4,90	56,33	-----	-----	-----

**Tab. 3.24 - Layout tabellare dell'andamento della densità veicolare lungo la rete al variare della massima accelerazione erogabile dal generico veicolo.**

La tabella a corredo della Fig. 3.30, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *System Density* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Maximum Acceleration* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.31 - Sensibilità del *flusso veicolare* lungo la rete rispetto al *tempo di reazione* del generico utente del sistema.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei *flussi veicolari* restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Reaction Time* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

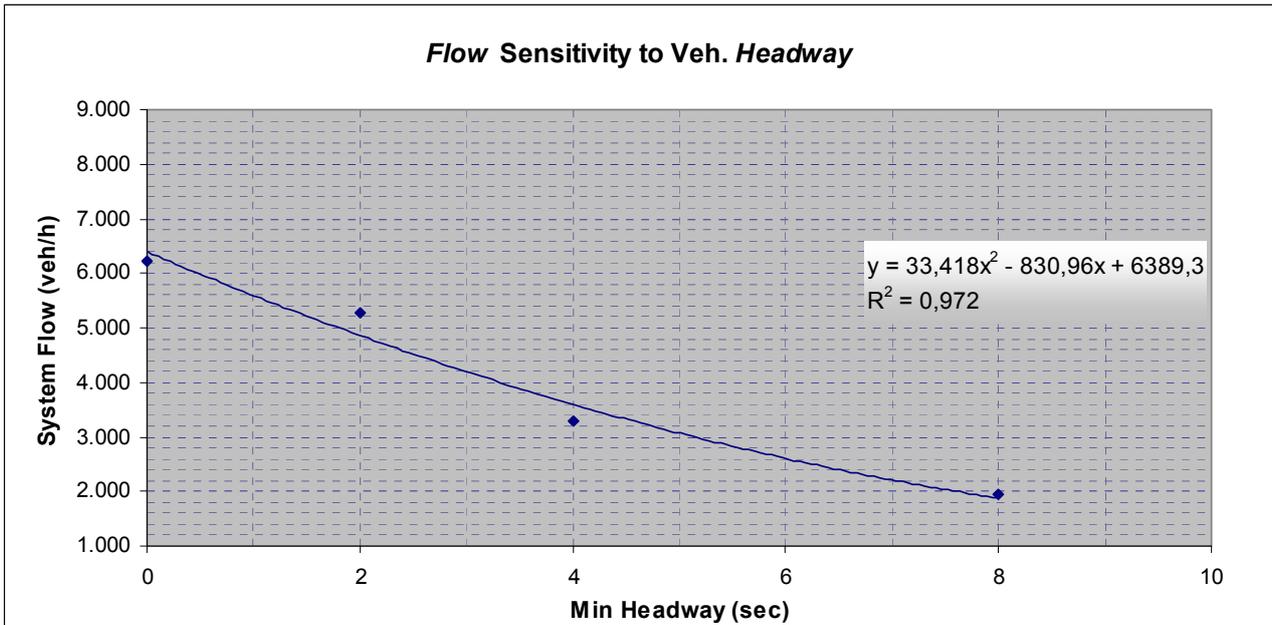
Regression	$R^2$
Linear	0,9440
Logarithmic	0,9937
Polinomial 2°	0,9990
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,9890
Exponential	0,9709

Alternative altrettanto valide, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, con gradi di accostamento al campione comunque paragonabili, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare  $y = -1341,7x + 7191,5$ , e da quella logaritmica  $y = -2217,2 \ln(x) + 5799,5$ , ma anche la potenza e l'esponenziale si prestano altrettanto bene allo scopo. Tutte queste regressioni indicano una decrescita monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del *flusso veicolare* attraverso la rete al crescere del *tempo di reazione* del generico utente.

Experiment		Simul. Step	Reaction Time (sec)	Flow (veh/h)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	1641	global period	0,75	6.440,50	-----	-----	-----
2	2343		1,50	4.956,25	-----	-----	-----
3	2411		2,25	3.852,00	-----	-----	-----
4	2419		3,00	3.454,25	-----	-----	-----

**Tab. 3.25 - Layout tabellare dell'andamento del *flusso veicolare* lungo la rete al variare del *tempo di reazione*.**

La tabella a corredo della Fig. 3.31, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *System Flow* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Reaction Time* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.32 - Sensibilità del *flusso veicolare* lungo la rete rispetto all'*intertempo minimo* fra veicoli consecutivi.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei *flussi veicolari* restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Minimum Headway* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

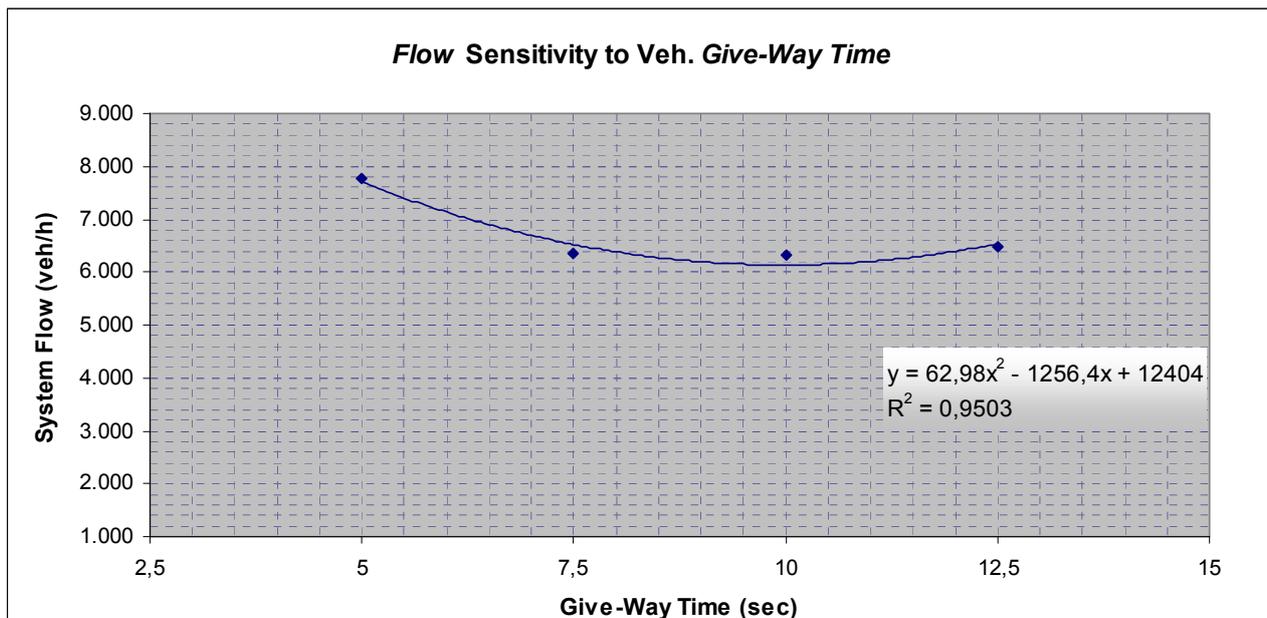
Regression	$R^2$
Linear	0,9521
Logarithmic	0,9135
Polinomial 2°	0,9720
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,8409
Exponential	0,9793

Valide alternative, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, con grado di accostamento al campione comunque paragonabile, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare  $y = -554,07x + 6122$ , e dall'esponenziale  $y = 6484,2 e^{-0,1525x}$ . Tutte queste regressioni indicano una decrescita pressoché monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del *flusso veicolare* attraverso la rete al crescere dell'*intertempo minimo* fra veicoli consecutivi.

Experiment		Simul. Step	Min Headway (sec)	Flow (veh/h)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	1641	global period	0	6.228,50	-----	-----	-----
2	2343		2	5.290,00	-----	-----	-----
3	2411		4	3.278,50	-----	-----	-----
4	2419		8	1.934,00	-----	-----	-----

**Tab. 3.26 - Layout tabellare dell'andamento del *flusso veicolare* lungo la rete al variare dell'*intertempo minimo* fra veicoli consecutivi.**

La tabella a corredo della Fig. 3.32, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *System Flow* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Minimum Headway* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.33 - Sensibilità del *flusso veicolare* lungo la rete rispetto al *tempo massimo di attesa* del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un  $R^2$  pari ad 1, la dispersione dei *flussi veicolari* restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Give-Way Time* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

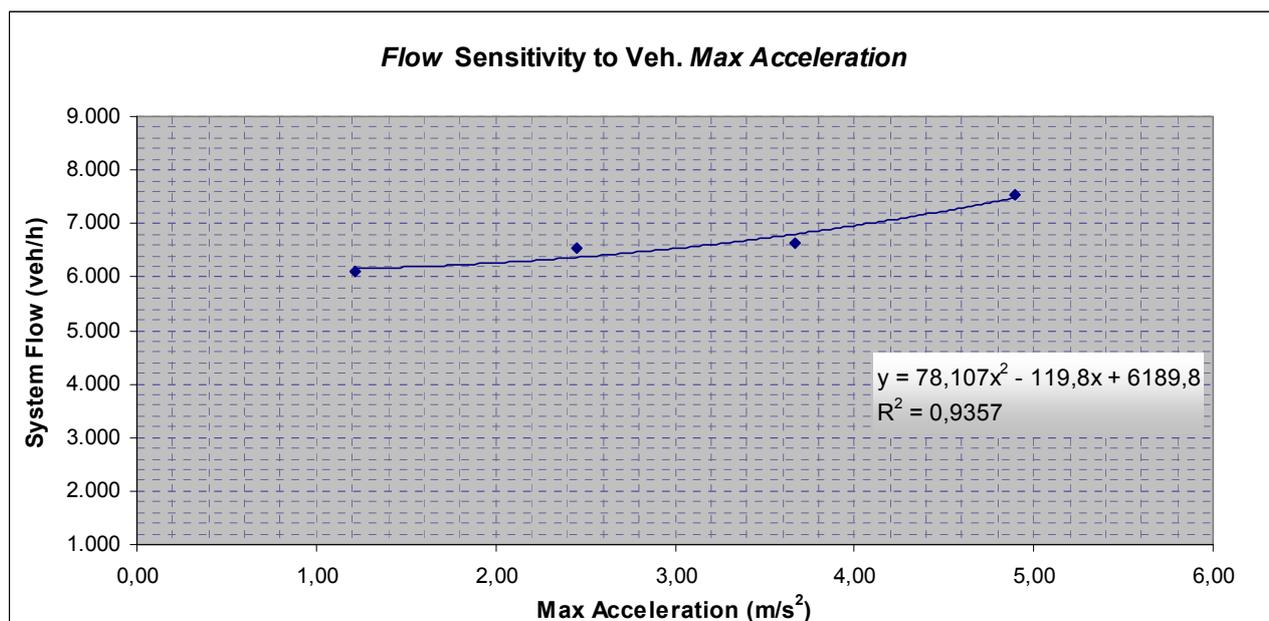
Regression	$R^2$
Linear	0,5184
Logarithmic	0,6477
Polynomial 2°	0,9503
<b>Polynomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,6400
Exponential	0,5101

Ulteriori alternative, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, sia pur con minor grado di accostamento al campione (comunque superiore al 50%), sono rappresentate fra le altre dalla legge lineare  $y = -154,28x + 8074,1$ , e da quella logaritmica  $y = -1407 \ln(x) + 9697,3$ . Tutte queste regressioni indicano una decrescita monotona, sia pur contenuta, della risposta del sistema in termini del *flusso veicolare* attraverso la rete al crescere del *tempo massimo di attesa* del generico veicolo prima di compiere una manovra a priorità ridotta.

Experiment		Simul. Step	Give-Way Time (sec)	Flow (veh/h)			
n.	id			Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	2343	global period	5	7.756,00	-----	-----	-----
2	2411		7,5	6.344,25	-----	-----	-----
3	1641		10	6.316,75	-----	-----	-----
4	2419		12,5	6.479,50	-----	-----	-----

**Tab. 3.27 - Layout tabellare dell'andamento del *flusso veicolare* lungo la rete al variare del *tempo massimo di attesa* del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.**

La tabella a corredo della Fig. 3.33, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *System Flow* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Give-Way Time* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.



**Fig. 3.34 - Sensibilità del *flusso veicolare* lungo la rete rispetto alla *massima accelerazione erogabile* dal generico veicolo.**

Fatta salva la legge polinomiale del terzo ordine cui corrisponde un R<sup>2</sup> pari ad 1, la dispersione dei *flussi veicolari* restituiti dai quattro *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Maximum Acceleration* -, risulta ben interpolata dalla regressione polinomiale del secondo ordine tracciata in figura a tratto continuo.

Regression	R <sup>2</sup>
Linear	0,8849
Logarithmic	0,7869
Polinomial 2°	0,9357
<b>Polinomial 3°</b>	<b>1,0000</b>
Power	0,8103
Exponential	0,8982

Alternative altrettanto valide, utili a cogliere in maniera più immediata la tendenza insita nei dati, con gradi di accostamento al campione comunque paragonabili, sono rappresentate rispettivamente dalla legge lineare  $y = 358,21x + 5605,2$ , e dall'esponenziale  $y = 5685,5 e^{0,0528x}$ . Tutte queste regressioni indicano una crescita monotona non trascurabile della risposta del sistema in termini del *flusso veicolare* attraverso la rete al crescere della *massima accelerazione erogabile* dal generico veicolo.

Experiment n.	id	Simul. Step	Max Acc. (m/s <sup>2</sup> )	Flow (veh/h)			
				Mean	Stand. Dev	Lower bound	Upper bound
1	2343	global period	1,22	6.101,00	-----	-----	-----
2	2411		2,45	6.542,75	-----	-----	-----
3	2419		3,67	6.624,50	-----	-----	-----
4	1641		4,90	7.537,00	-----	-----	-----

**Tab. 3.28 - Layout tabellare dell'andamento del *flusso veicolare* lungo la rete al variare della *massima accelerazione erogabile* dal generico veicolo.**

La tabella a corredo della Fig. 3.34, riporta in dettaglio i valori medi della grandezza di risposta - *System Flow* -, calcolati sulle 4 *Replications* di ciascuno dei 4 *Experiments* corrispondenti agli altrettanti valori assegnati al prescelto parametro di calibrazione - *Maximum Acceleration* -, del modello di comportamento degli utenti del sistema - *Vehicle Behavioural Model* -. Detti valori medi, restituiti dall'apposito modulo 'Average' predisposto nel microsimulatore Aimsun, si riferiscono all'intero periodo di simulazione - *global period* -.

## Bibliografia di Capitolo

- [1] Balci, O., “Verification, Validation and Testing”, *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice*, J. Banks & J Wiley Eds., 1998.
- [2] Braess, D., “Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung”, *Unternehmensforschung*, Vol. 12, 258-268, 1968.
- [3] Cascetta, E., “Transportation Systems Engineering: Theory and Methods”, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [4] Cowan, R. J., “Useful Headway Models”, *Transportation Research*, Vol. 9, 371-375, 1975.
- [5] Fitch, G. M., Blanco, M., Morgan, J. F., Wharton, A. E., “Driver Braking Performance to Surprise and Expected Events”, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 54<sup>th</sup> Annual Meeting*, 2010.
- [6] Iazeolla G., “Simulazione di Sistemi Continui e Discreti”, Editrice Tecnico Scientifica, 1975.
- [7] Kleijnen, J. P. C., “Theory and Methodology: Verification and Validation of Simulation Models”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 82, 145-162, 1995.
- [8] Kosinski, J. R., “A Literature Review on Reaction Time”, Clemson University, (2009)
- [9] Long, G., “Acceleration Characteristics of Starting Vehicles”, *Transportation Research Board 79<sup>th</sup> Annual Meeting*, Proceedings, Washington DC, 2000.
- [10] Luttinen, R. T., “Statistical Analysis of Vehicle Time Headways”, Doctorate Dissertation Thesis, Helsinki University of Technology, 1996.
- [11] Maurya, A. K., Prashant, S. B., “Study of Deceleration Behaviour of Different Vehicle Types”, *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 2 (3), 253-270, 2012.
- [12] Mehar, A., Chandra, S., Velmurugan, S., “Speed and Acceleration Characteristics of Different Types of Vehicles on Multi-lane Highways”, *European Transport*, 55(1), 2013.
- [13] “Microsimulator and Mesosimulator in Aimsun 6.1”, *User’s Manual*, TSS-Transport Simulation Systems<sup>©</sup>, October 2009.
- [14] Pueboobpaphan, R., Park, D., Kim, Y., Choo, S., “Time Headway Distribution of Probe Vehicles on Single and Multiple Lane Highways”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(4), 2013.

- [15] Triggs, T., Harris, W., "Reaction Time of Drivers to Road Stimuli", Human Factors Report, N° .HFR-12, 1982.



## 4. Caso Studio

### 4.1 Inquadramento

Per dare una veste di concretezza alle considerazioni ed analisi che il presente studio si prefigge e valutarne così l'applicabilità reale, si è deciso di adottare a Caso Studio il nodo stradale 'Tondo Gioeni' situato nella circonvallazione della Città di Catania.

Collocato in posizione strategica in seno alla rete stradale cittadina, esso assolve ad un ruolo essenziale di collegamento fra il nucleo urbano storico del Capoluogo, ove si concentra ancora gran parte delle attività commerciali e dei servizi, e le aree urbane periferiche e dei comuni limitrofi che formano la conurbazione che cinge la città storica, assumendo così un'importanza nevralgica per il funzionamento efficiente dell'intera rete stradale cittadina.

Al centro di un'annosa vicenda riguardante la precisazione del suo assetto definitivo, sull'onda dell'urgenza di interventi atti a garantirne la piena funzionalità, specialmente ai fini di protezione civile, all'occorrenza di calamità di natura sismica cui il capoluogo Etneo è peculiarmente esposto (data l'elevata vulnerabilità sismica che caratterizza il territorio in cui è situato), il nodo Gioeni è stato recentemente oggetto di significativi interventi di modifica della sua configurazione infrastrutturale risoltisi, nell'Agosto del 2013, nella demolizione del preesistente sovrappasso stradale e successiva realizzazione di una rotatoria, che hanno comportato una radicale redistribuzione dei flussi veicolari.



**Fig. 4.1 - Una fase della demolizione del sovrappasso stradale 'Gioeni'.**

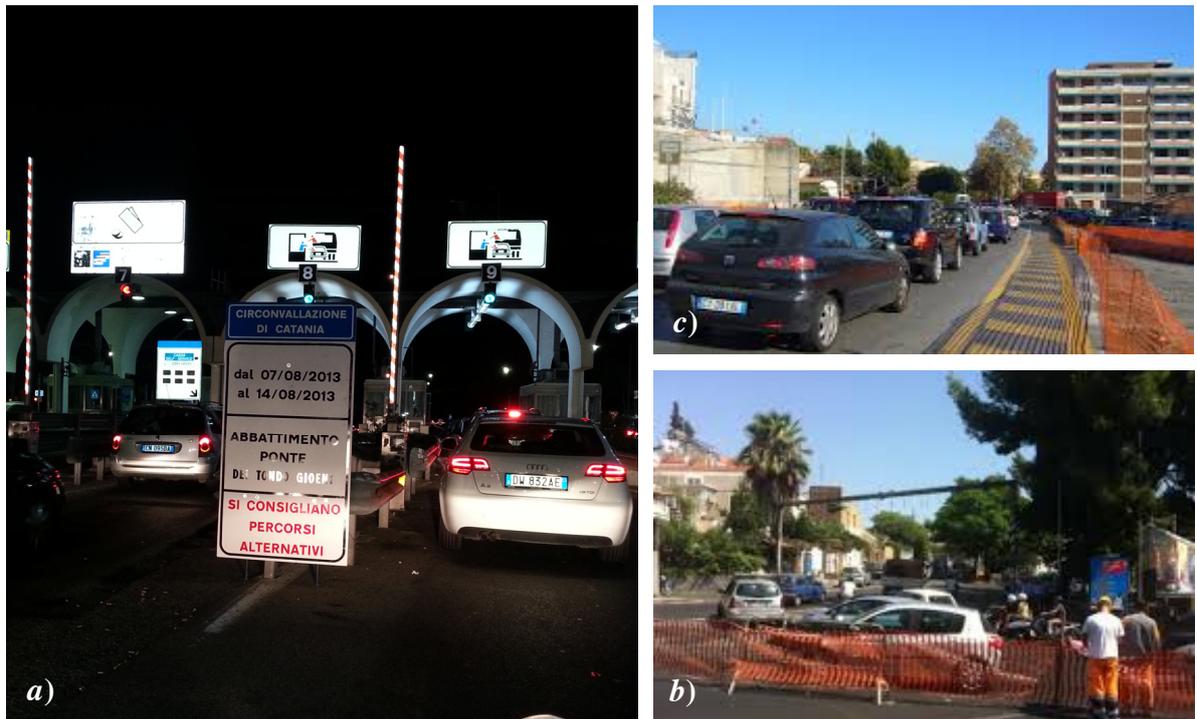
Tali interventi erano già previsti in un più generale "Progetto di Adeguamento della Circonvallazione di Catania", disposto con Legge n°.433 31.12.1991-Obiettivo h, che aveva già visto una sua parziale realizzazione.

Fornendo dunque l'opportunità di disporre di un esempio applicativo concreto su scala reale per valutare come la predisposizione di opportune strategie d'infomobilità possa sopperire ad eventuali carenze o deterioramenti dell'offerta di trasporto, quello del riassetto del Tondo Gioeni si è così presentato quale caso studio ideale ai fini della presente ricerca.



**Fig. 4.2.a-b - Configurazioni del nodo stradale 'Tondo Gioeni' ante e post i recenti lavori di riordino.**

La figura *a.* illustra la soluzione esistente fino all'Agosto del 2013, che prevedeva lo scavalcamento della circonvallazione attraverso un ponte a campata unica e sezione scatolare variabile in c.a., realizzato nel 1956. La fig. *b.*, riporta invece la soluzione attuale che ha ricondotto la configurazione a livelli sfalsati originaria ad una semplificata a raso, attraverso la realizzazione di una rotatoria e di due torna-indietro a monte ed a valle della stessa. Questa configurazione ha mantenuto pressoché invariata la continuità del tessuto viario lungo la direttrice Est-Ovest, modificando invece significativamente il collegamento lungo la direttrice Nord-Sud, originariamente risolto in maniera più immediata dal sovrappasso.



**Fig. 4.3.a-b-c - Gestione dei flussi veicolari durante i lavori stradali di riordino del nodo 'Tondo Gioeni'.**

La figura *a.* mostra un dispositivo d'*informazione statica*, collocato in corrispondenza del casello dell'autostrada A.18 Messina-Catania, che suggerisce agli utenti che si accingono ad immettersi nella tangenziale di Catania l'adozione di percorsi alternativi alla circonvallazione. Le figure *b.* e *c.* illustrano, invece, le misure di deviazione e convogliamento dei flussi veicolari poste in essere in prossimità del nodo Gioeni durante lo svolgimento dei lavori di demolizione del sovrappasso.

## 4.2 Topologia

### 4.2.1 Contestualizzazione

La città di Catania dispone di due grandi arterie di distribuzione dei flussi veicolari: la tangenziale e la circonvallazione. Ad esse è prevalentemente demandato il compito di ripartire la domanda di accesso ed i relativi carichi veicolari fra le direttrici di irrorazione del tessuto urbano più compatto. In particolare la circonvallazione è un'arteria a doppia carreggiata, ormai inglobata nella conurbazione immediatamente a nord della città storica, che assolve alla duplice funzione di redistribuzione nella rete cittadina (che si sviluppa su un'estensione lineare di 48.403 mt.), e di scavalco settentrionale del nucleo urbano più denso, assicurando da un lato gli spostamenti di scambio in ingresso ed in uscita dalla città, dall'altro quelli di attraversamento, rispettivamente secondo le due direttrici Nord/Sud ed Est/Ovest. Essa infatti si offre quale agevole bretella di collegamento fra la S.S. 114 (che costeggia il litorale cittadino per collegare gli altri due capoluoghi di provincia del versante ionico), sul versante Est, e la S.S. 121 di comunicazione con i grossi centri urbani che ricadono nel versante Nord/Ovest, ambedue caratterizzate da elevati livelli di congestione e da una geometria variabile spesso consistente in una sola corsia per senso di marcia.

Come tale la circonvallazione si colloca a buon diritto nel sistema di strade di categoria superiore (autostrade, strade statali, strade provinciali, e raccordi comunali), che, coerentemente all'assetto territoriale ed urbanistico che connota il bacino gravitante sul capoluogo etneo, costituisce l'asse principale che serve al contempo il tessuto d'innervamento dell'area metropolitana e la rete urbana.

In posizione baricentrica lungo tale asse viario, si colloca per l'appunto il nodo 'Tondo Gioeni' che, accogliendo le principali arterie di penetrazione delle aree urbane circostanti, assume importanza nevralgica ai fini della ripartizione dei flussi, permettendo alla circonvallazione di assolvere al duplice compito già precisato.

### 4.2.2 Implementazione

Seguendo l'approccio canonico alla riproduzione della topologia di un'infrastruttura viaria esistente in corso di adeguamento, quale il nodo viario assunto a caso studio, si è in prima istanza provveduto a reperire la documentazione disponibile relativa allo stato di fatto ed alla configurazione di progetto, costituita essenzialmente da:

- planimetrie generali catastali;
- tavole di progetto.

Si è quindi provveduto a delimitare opportunamente nelle mappe catastali il perimetro della rete da implementare (Fig. 4.4), in modo tale da includere sia le maggiori arterie che confluiscono nel nodo in esame, concorrendo a convogliare i flussi veicolari che lo attraversano, sia le principale alternative che consentono di bypassare il nodo stesso secondo le due principali direttrici, individuate principalmente nelle seguenti:

### **direttrice Est/Ovest**

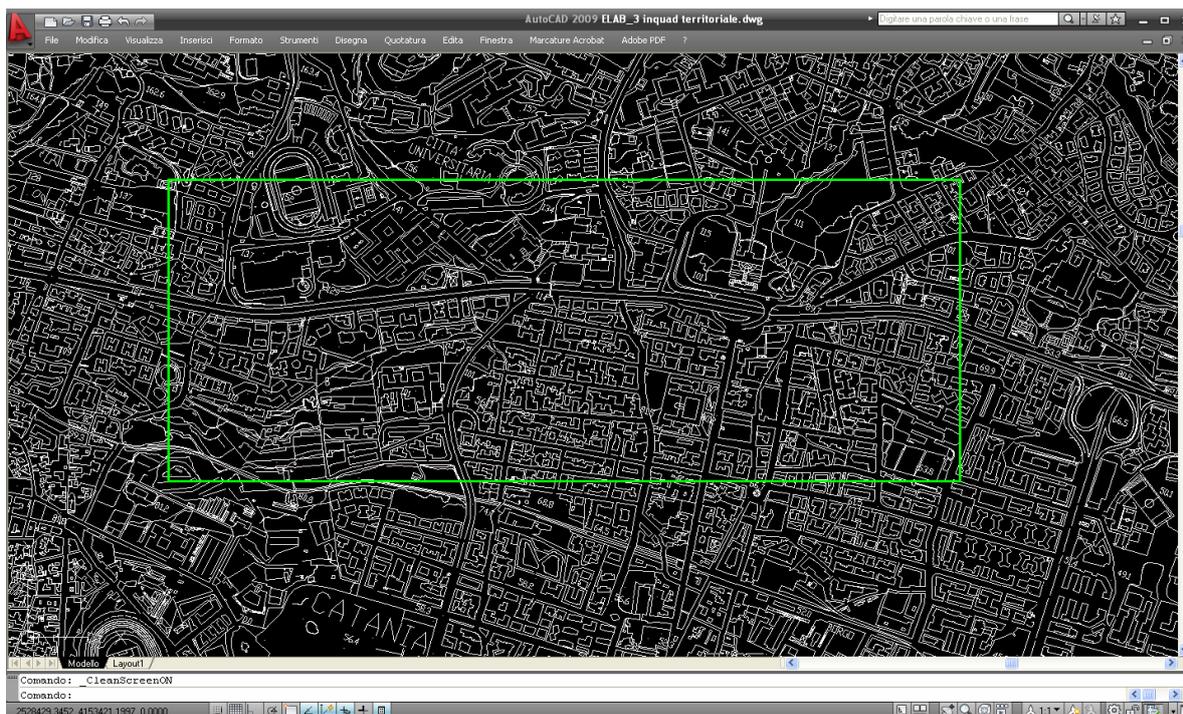
- Viale Odorico da Pordenone (Circonvallazione Est);
- Viale Andrea Doria (Circonvallazione Ovest);
- Via al Tondo Gioeni;
- Via Grassi Battista.

### **direttrice Nord/Sud**

- Via Etnea;
- Via Barriera del Bosco;
- Via Caronda;
- Via Pietra dell'Ova;
- Via Passo Gravina;
- Viale Fleming.

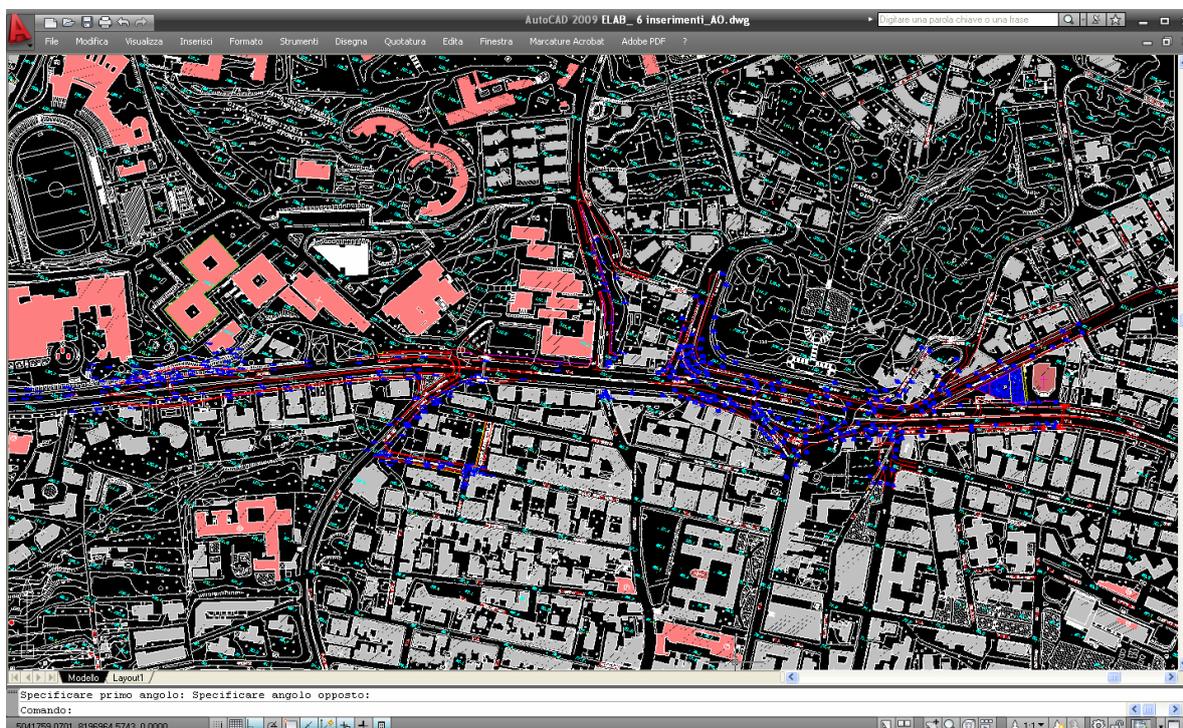
Per garantire l'effettiva rispondenza fra il layout della rete implementata nell'ambiente di simulazione virtuale e la configurazione attuale della stessa, si è reso inoltre necessario il ricorso a sopralluoghi di verifica e riscontro di tutte le componenti che concorrono a definire l'assetto topologico e, con esso, l'insieme dei diversi percorsi alternativi, quali: sensi di marcia, segnaletica, manovre di svolta ammesse in ciascuna delle intersezioni stradali incluse nel livello di rete considerato.

Servendosi, dunque, delle tavole di progetto (Fig. 4.5), attinenti il tratto d'interesse, integrate dalle informazioni desunte dai sopralluoghi, si è proceduto all'accurata e paziente riproduzione della topologia di rete nell'ambiente grafico del software di simulazione Aimsun, servendosi degli strumenti di modellazione disponibili.



**Fig. 4.4 - Delimitazione dell'area d'interesse nella planimetria catastale dell'area urbana circostante il nodo viario 'Tondo Gioeni'.**

Il riquadro verde indica il perimetro del tessuto urbano assunto come matrice di base per la costruzione della rete stradale più direttamente interessata dal riordino del nodo 'Gioeni'.



**Fig. 4.5 - "Progetto di Adeguamento della Circonvallazione di Catania", Legge n°.433 31.12.1991, Obiettivo h - Tavola 6: Linee di progetto su base aerofotogrammetrica.**

La tavola riporta in rosso sul tracciato originario, le modifiche più direttamente collegate al riordino della viabilità insistente sul nodo Gioeni, previste in seno al più ampio progetto di adeguamento complessivo della circonvallazione di Catania, disposto con *Legge n°.433 31.12.1991, Obiettivo h.*

In dettaglio il Software contempla tre elementi che concorrono alla formulazione della topologia di rete, distinti per caratteristiche geometriche e funzionali in:

- a. Archi stradali - *Sections* -;
- b. Nodi - *Nodes* -;
- c. Centroidi di origine e destinazione degli spostamenti - *Centroids* -.

La geometria di ciascun elemento va precisata manualmente, i relativi editor consentono invece d'impostare i diversi parametri che ne governano il funzionamento.<sup>1</sup>

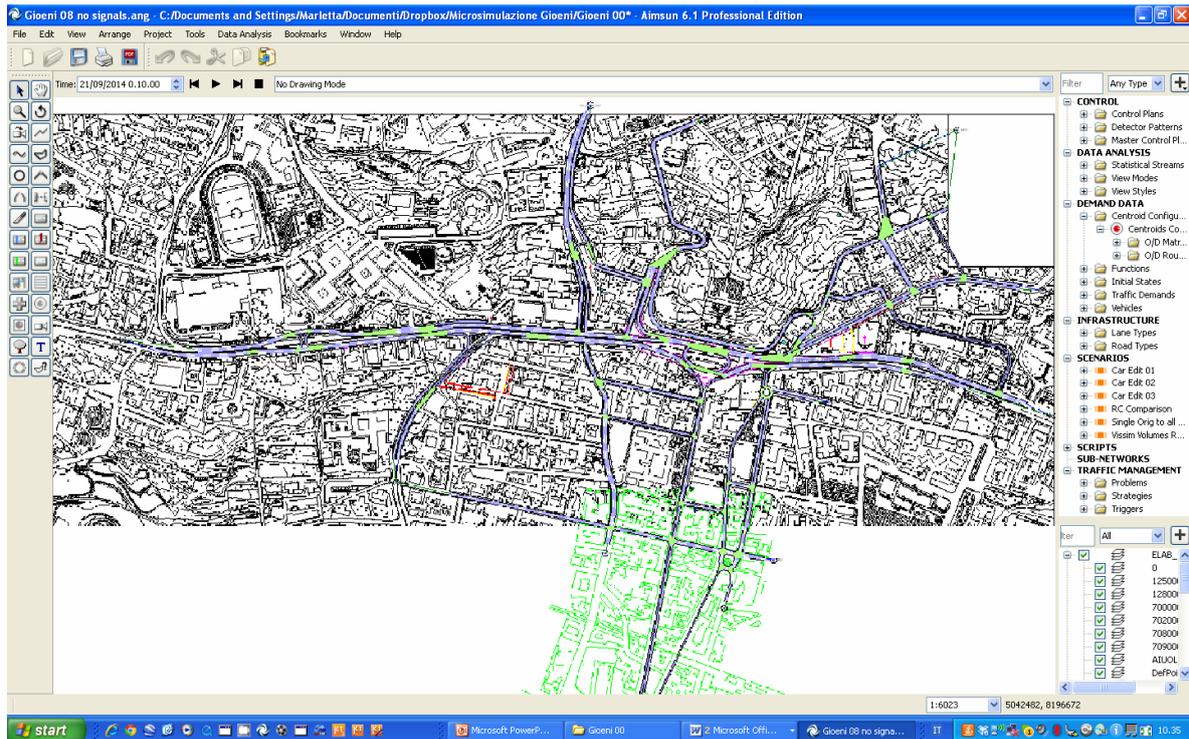
Mentre *archi* e *nodi* riproducono elementi infrastrutturali della rete reale, rispettivamente tronchi ed intersezioni stradali, i *centroidi* non rappresentano elementi fisici della rete, bensì elementi fittizi che condensano puntualmente le aree di generazione e destinazione degli spostamenti<sup>2</sup>. Questi ultimi sono, a loro volta, connessi alle sezioni d'ingresso ed uscita della rete attraverso elementi unidimensionali - *Connectors* - anch'essi fittizi, che sintetizzano sia pur in maniera brutale, la connessione fra rete stradale pertinente alle anzidette aree di origine e destinazione dei viaggi e la rete d'interesse esplicitamente modellata.

Così, importata in ambiente Aimsun la prescelta tavola di progetto, in formato CAD (Fig. 4.6), si è provveduto a: dislocare i diversi centroidi di origine e destinazione anche in relazione alla corretta implementazione della domanda di spostamento secondo le rilevate linee di desiderio; tracciare manualmente lo sviluppo planimetrico e precisare la geometria dei singoli archi stradali che costituiscono il tessuto formato dalle arterie precedentemente elencate; definire le connessioni (i.e. le manovre di svolta consentite), negli snodi di confluenza di più archi stradali.

---

<sup>1</sup> Cfr. Bibliografia: *Aimsun User's Manual*, [1], pag. 261.

<sup>2</sup> I *nodi* riproducono nel modello di rete elementi infrastrutturali reali, propriamente le *intersezioni stradali* di confluenza di più arterie viarie, che assolvono alla redistribuzione dei flussi veicolari all'interno della rete. A differenza dei *nodi* tuot court, i *centroidi* non rappresentano degli elementi infrastrutturali realmente esistenti, bensì condensano idealmente in un punto le aree di generazione e/o destinazione degli spostamenti che interessano la rete modellata, di cui le esigenze di analisi non richiedono la modellazione esplicita e dettagliata. La scelta dei centroidi corrisponde dunque alla porzione di rete che s'intende modellare, al livello funzionale del tessuto stradale considerato (principale, secondario, di penetrazione o di accesso), alla tipologia di spostamenti rispetto ai quali si vuole studiare la performance del sistema.



**Fig. 4.6 - Implementazione della topologia di rete nell'ambiente grafico del microsimulatore Aimsun.**

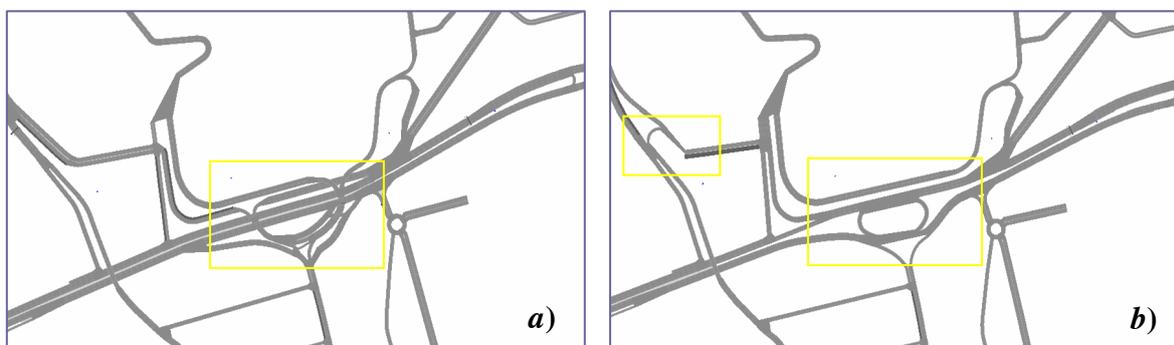
Importata nell'ambiente grafico di Aimsun la planimetria dell'area precedentemente delimitata, si è proceduto alla dislocazione dei centroidi di origine e destinazione, al tracciamento degli archi che formano la rete d'interesse ed alla loro interconnessione, servendosi dei moduli software appositamente predisposti in Aimsun, rispettivamente: *centroids*, *sections*, *nodes*.

Quanto alla distribuzione delle origini e destinazioni dei flussi veicolari, è stata considerata una sola configurazione di centroidi in grado di cogliere verosimilmente la dislocazione delle aree di generazione delle esigenze di spostamento che cimentano il nodo Gioeni. Quanto, invece, alla funzionalità della arterie stradali riprodotte, operando nell'editor di ciascuna *Section*, sono stati precisati valori di capacità e velocità limite coerenti al livello funzionale assoluto in seno alla gerarchia di rete, selezionando di volta in volta fra due delle diverse categorie stradali predisposte in Aimsun: *arterial*, *ringroad*. In particolare ci si è limitati ad assegnare la seconda categoria ai soli tratti stradali pertinenti alla Circonvallazione, che di fatto assolve ad un livello funzionale superiore rispetto alle vie di penetrazione del tessuto urbano cittadino immediatamente circostante. Sebbene consapevoli della forzatura così operata, essa è stata finalizzata a cogliere un comportamento degli utenti e condizioni di funzionamento più prossimi a quelli effettivamente riscontrati nella realtà. In fine, per ciascuna intersezione stradale sono state precisate le manovre di svolta ammesse, conformemente alla segnaletica rintracciata ed in modo da non ingenerare conflitti.

Come anzidetto, in questa fase ci si è avvalsi anche di mappe georeferenziate e di osservazioni dirette tramite sopralluoghi, da un lato per appurare la rispondenza fra tavole ed effettiva configurazione dei manufatti già realizzati, dall'altro per reperire ulteriori informazioni non desumibili dalle sole tavole, tanto di natura geometrica (ampiezza di carreggiata effettiva al netto delle aree destinate agli stalli), quanto funzionale (segnaletica stradale, regolazione semaforica).

I recenti interventi di modifica apportati all'assetto infrastrutturale del nodo Tondo Gioeni, che hanno comportato la demolizione del sovrappasso viario e la sua sostituzione con una rotonda e la conseguente riconduzione dell'intersezione da una configurazione complessa a livelli sfalsati ad una più semplificata a raso, hanno fornito l'opportunità di disporre di un caso applicativo concreto per valutare l'efficacia di strategie di infomobilità nella risoluzione di deficit dell'offerta di trasporto. Seguendo la procedura fin qui descritta, nell'incipiente evoluzione della configurazione del nodo sono state successivamente implementate, nell'ambiente grafico di Aimsun, le due soluzioni funzionali ante e post lavori (Fig. 4.7.a-b), corrispondenti ad altrettante topologie, per brevità denominate:

- a. Roundabout Configuration;
- b. Bridge Configuration.



**Fig. 4.7.a-b - Layout grafici dei due modelli implementati in ambiente Aimsun, corrispondenti alle configurazioni infrastrutturali del nodo 'Tondo Gioeni' ante e post i recenti lavori di riordino.**

I due modelli differiscono per la configurazione locale del nodo Gioeni (conseguente alla rimozione del sovrappasso ed alla realizzazione della rotonda), e la successiva realizzazione del tornaindietro di collegamento tra Via Petrarco e Via Passo Gravina, ambedue evidenziati in giallo. Le caratteristiche geometriche e prestazionali delle restanti sezioni stradali sono invece invariate.

In definitiva, i due modelli scaturiti dal procedimento appena descritto, presentano diverse caratteristiche in termini di numero di archi, numero di intersezioni e sviluppo lineare, riassunte nella tabella di seguito riportata.

Configurazioni	Caratteristiche Topologiche			
	N° di Archi	Estensione lineare tot. (km)	N° di Nodi	N° di Centroidi
<i>a. Roundabout</i>	117	12	58	12
<i>b. Bridge</i>	134	13	70	

**Tab. 4.1 - Caratteristiche topologiche dei due modelli corrispondenti alle configurazioni infrastrutturali del nodo 'Tondo Gioeni' ante e post i recenti lavori di riassetto.**

Conclusa la fase di definizione topologica, lanciate diverse simulazioni di prova, si è verificata la connettività dell'intera rete, accertandosi dell'assenza di archi disconnessi e di manovre di svolta reciprocamente conflittuali, appurando così il corretto funzionamento complessivo del sistema.

## 4.3 Domanda di Trasporto

### 4.3.1 Contestualizzazione

La domanda di spostamento a Catania risulta prevalentemente riconducibile a due modi di trasporto, rispettivamente su mezzo privato e mezzo collettivo, pur in percentuali nettamente squilibrate a favore del primo. A tal proposito dal confronto fra domanda di trasporto complessiva e su TPL si ricava, per complemento, una prima significativa indicazione su entità e peso relativo degli spostamenti effettuati servendosi di autovettura privata. Così, la tabella seguente (mutuata dagli studi a corredo del PGTU della Città di Catania<sup>3</sup>), descrive l'incidenza percentuale della domanda di trasporto su TPL rispetto a quella complessiva con riferimento alle diverse macro-relazioni origine/destinazione individuate rispettivamente tra nucleo urbano, comuni appartenenti alla sua Area Metropolitana, ed Area Metropolitana considerata nel suo complesso (unione dei due contesti urbani). I dati in essa riportati confermano come il sistema di trasporto della Città si regga essenzialmente sul modo di trasporto privato.

---

<sup>3</sup> Cfr. Bibliografia: [2], pag. 261.

## Caso Studio - Implementazione e Risultati

Origine \ Destinazione	Catania	Comuni Area Metropolitana	Area Metrop. complessiva
Catania	17%	2%	15%
Comuni Area Metropolitana	15%	15%	15%
Area Metrop. complessiva	16%	9%	15%

**Tab. 4.2 - Incidenza percentuale della domanda di trasporto su TPL rispetto a quella complessiva.**

Ciascuna casella indica il rapporto percentuale fra la domanda di trasporto su TPL e la domanda di trasporto complessiva associate alla macro-relazione origine/destinazione individuata dalla riga e dalla colonna corrispondenti. Per complemento a 100 è immediato ricavare la corrispondente incidenza della domanda di viaggio su mezzo privato.

A corroborare ulteriormente tale evidenza, contribuiscono anche i risultati di un'indagine statistica su scala territoriale (fonti ISTAT-ACI 2009), che rileva il numero di veicoli circolanti ogni 1000 abitanti nell'Area Metropolitana Etnea, e vede ancora una volta Catania, col dato di 70 vetture su 100 abitanti (i.e. due vetture ogni tre abitanti), collocarsi al di sopra della media nazionale. Guardando poi al dato allargato ad includere anche i motocicli, tale rapporto cresce ulteriormente per attestarsi poco al di sotto del veicolo per abitante, ribadendo ancora una volta come il veicolo privato costituisca pressoché l'unico mezzo di spostamento, considerata la scarsa rilevanza concorrenziale dell'alternativa rappresentata dal mezzo pubblico.

Aree Terr. \ Statistiche	Popolazione	Autovett./Abit.	Motocicli/Abit.	Veicoli/Abit.
Catania	<b>296.469</b>	<b>0,702</b>	<b>0,207</b>	<b>1,003</b>
Tot. Comuni Circondario	257.672	0,683	0,169	0,940
Provincia di Catania	1.084.977	0,670	0,145	0,911
Regione Sicilia	5.037.799	0,610	0,120	0,817
Italia	60.045.068	0,606	0,102	0,800

**Tab. 4.3 - Veicoli circolanti per abitante su diverse scale territoriali.**

Dal raffronto con i dati omologhi ottenuti su scale territoriali via via crescenti rispettivamente provinciale, regionale e nazionale, la Città di Catania si pone ai vertici della classifica per incidenza procapite di mezzi di trasporto privato.

Dal documento “*Spostamenti quotidiani per motivi di studio e di lavoro - Censimento 2001*” compilato dall'ISTAT e recante data 21.04.2004, integrato da un'indagine specifica condotta su 13 città italiane con più di 250.000 abitanti, fra cui Catania, possono trarsi

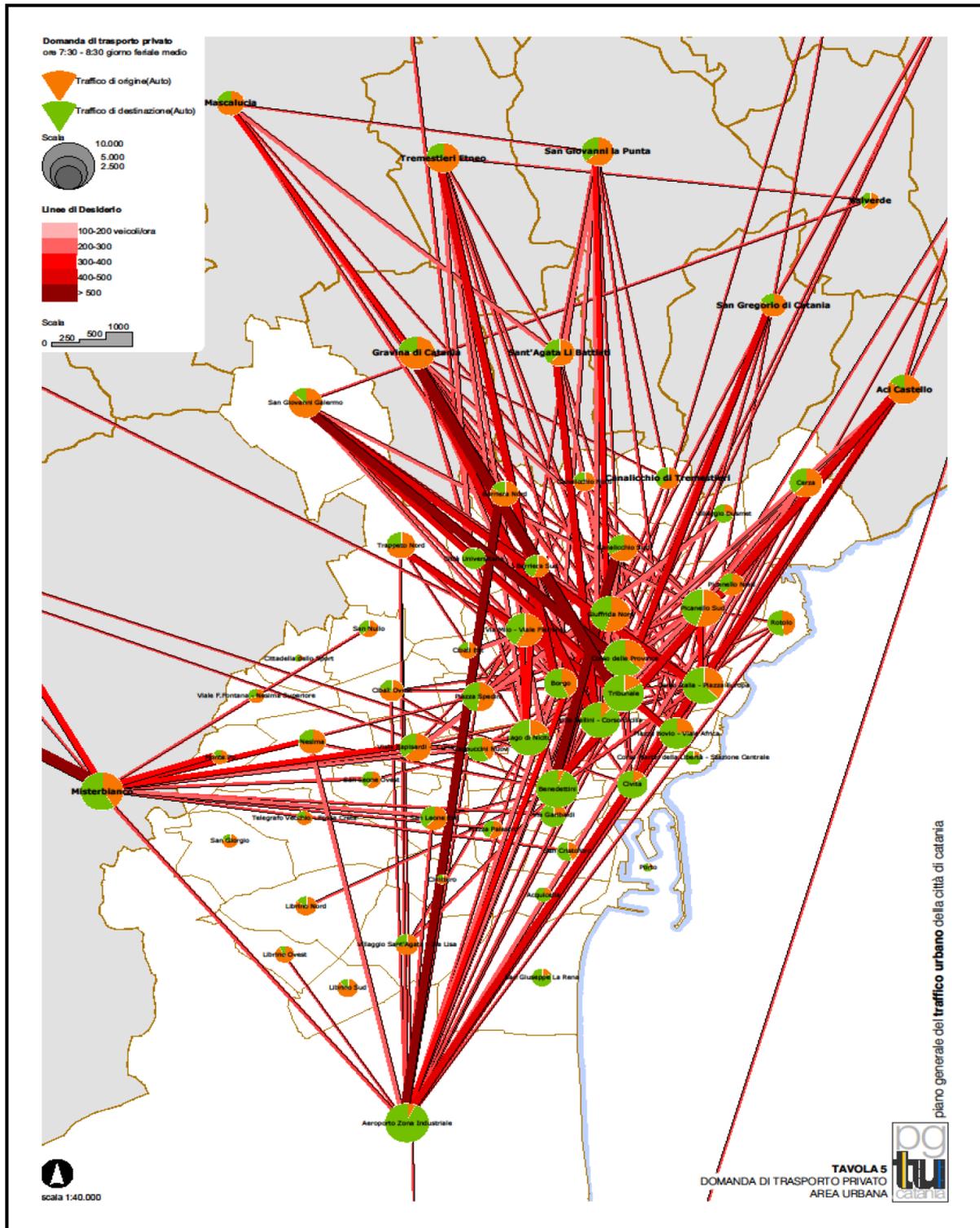
alcune interessanti considerazioni (Cfr. “piano di Bacino del TPL” - Provincia di Catania 2006). La circolazione delle autovetture private a Catania presenta caratteristiche corrispondenti, qualitativamente e quantitativamente, alle abitudini ed alle scelte generalizzate dei cittadini, e quindi alla natura stessa della domanda, particolarizzate però alla specifica morfologia urbanistica ed insediativa della città ed alle modalità di trasporto ad oggi offerte all’utente, fra cui, come dimostra il già citato dato di 70 vetture su 100 abitanti, quello privato è il modo quasi unico di spostamento, alla luce del ridotto potere concorrenziale dell’alternativa collettiva.

Dalla citata indagine ISTAT si evince, inoltre, come il 65% degli abitanti della provincia di Catania si sposti all’interno dello stesso comune di residenza, il 31,8% verso altri comuni ed il 16,2% sia diretto, invece, verso il Capoluogo. Quest’ultimo dato, il più elevato fra i corrispettivi riscontrati in tutte le altre province interessate dallo studio, attesta la città di Catania al primo posto in quanto ad attrazione di esigenze di spostamento, evidenziando la forza radiocentrica del capoluogo etneo rispetto al suo territorio provinciale. Ad ulteriore riprova di tale evidenza, la rilevazione della percentuale di movimenti interni (i.e. originati e terminati entro il perimetro del centro urbano), condotta in seno al medesimo sondaggio ISTAT, ha registrato per Catania quasi il 40% di spostamenti in entrata, ancora una volta fra i più alti nel raffronto con gli altri centri italiani.

Dagli studi a supporto del PGTU, emerge in particolare come le destinazioni urbane rappresentino il 70% di quelle totali, e di esse l’80% impegni l’autovettura, percentuale che sale ulteriormente al 90% per gli spostamenti verso destinazioni extraurbane.

La peculiare condizione dell’area Metropolitana di Catania, asseverata dai diversi studi sin qui menzionati, è in parte da imputare anche alla ridotta presenza di polarità alternative all’interno dello stesso bacino di afferenza.

Il verso dominante della domanda di spostamento e delle correnti veicolari, dunque, è radiale, e la massa di automobili provenienti dalle più estese aree periferie e dai comuni limitrofi si addensa quotidianamente nella più angusta area centrale, comportando, in quest’ultima, un abbassamento sensibile della velocità di deflusso delle correnti veicolari, con conseguente innalzamento dei livelli di inquinamento atmosferico, acustico e visivo.



**Fig. 4.8 - Linee di Desiderio relative al trasporto su mezzo privato.**

La figura rappresenta la distribuzione della della domanda di trasporto su mezzo privato fra la Città di Catania ed il bacino territoriale di afferenza, nell'intervallo orario compreso fra le 07:30 e le 08:30 del giorno ferialo medio. In dettaglio essa precisa: la direzione, rappresentata attraverso segmenti di retta che collegano i centri delle aree di origine e destinazione; l'entità in veicoli/ora, denotata con gradazioni di rosso via via più intense; il verso prevalente, suggerito da diagrammi a torta che indicano l'incidenza degli spostamenti in ingresso ed in uscita dalle aree collegate dalle linee di desiderio.

### 4.3.2 Implementazione

La domanda di trasporto è stata espressa in termini di una matrice O/D avente, per componenti il numero di spostamenti che interessano l'area di studio con origine e destinazione individuate in opportuni centroidi dislocati nelle zone interne ed esterne rispetto al cordone delineato dall'arteria principale della Circonvallazione, in cui il nodo Tondo Gioeni s'innesta. Si è cercato, così, di includere i percorsi più significativi lungo le principali direttrici di attraversamento del nodo stesso (i.e. Nord/Sud, Est/Ovest).

Data la prescelta distribuzione dei centroidi di origine e destinazione degli spostamenti rispetto al nodo Gioeni ed alla collocazione di quest'ultimo nel più ampio contesto della rete metropolitana della Città (a delimitare a settentrione l'ambito urbano storico), la matrice elaborata riproduce prevalentemente gli spostamenti di *scambio* in ambedue i versi (in ingresso ed in uscita), lungo la direttrice Nord-Sud, e quelli di *attraversamento* (esterni-esterni), lungo la direttrice Est-Ovest.

Alla luce, poi, delle evidenze prodotte nei paragrafi precedenti circa l'effettiva composizione del traffico che interessa la Città di Catania, pesantemente sbilanciata a favore del modo di spostamento privato, e coerentemente alle finalità che il presente studio si prepone ovvero identificare efficaci strumenti di valutazione dell'impatto di sistemi di infomobilità sull'utenza del sistema di trasporto assunto a caso studio, è discesa quasi naturalmente la scelta di caratterizzare la domanda di trasporto in termini del solo modo di spostamento su veicolo privato.

I dati numerici sono stati desunti da rielaborazioni delle matrici O/D a corredo della prima versione del PGTU di Catania (1995), ricalibrate su dati di traffico del 2004, cui gli stessi tecnici incaricati hanno attinto per la stesura della versione definitiva recentemente licenziata dall'Amministrazione cittadina (Settembre 2012).

Il Microsimulatore AIMSUN consente di definire contestualmente più matrici O/D, ognuna diversamente caratterizzata in relazione al modo di trasporto, alla fascia oraria di riferimento e conseguentemente al volume complessivo e distribuzione spaziale della corrispondente domanda di spostamento. Lo stesso, prevede poi un apposito modulo, denominato '*Traffic Demand*', nel quale è possibile combinare opportunamente le singole matrici O/D per creare contesti di domanda composti anche complessi.

Coerentemente alle motivazioni addotte nei capoversi precedenti, è stata implementata un'unica matrice O/D, associata al solo modo di trasporto privato, quest'ultimo caratterizzato,

a sua volta, in termini di una sola tipologia di autoveicolo - *vehicle type* - precisata secondo le specifiche indicate nell'apposito capitolo<sup>4</sup>, e denotata col nome 'car'.

Quanto alla connotazione temporale, la domanda di spostamento espressa dalla matrice O/D, è stata associata ad un orizzonte temporale di riferimento di 1 ora corrispondente al periodo di punta compreso fra le 7:30 e 8:30 del giorno ferialo medio, cui i dati di origine si riferiscono.

In dettaglio la matrice O/D utilizzata ai fini delle analisi qui condotte è stata assemblata, attraverso il procedimento a ritroso di seguito descritto, a partire dai flussi di percorso precisati in seno ad un preesistente modello di rete, implementato in ambiente VISSIM, adoperato per gli studi a supporto delle soluzioni di riordino della Circonvallazione e del Tondo Gioeni che di essa costituisce snodo nevralgico, previste nel già citato "*Progetto di Adeguamento della Circonvallazione di Catania*", ed accolte nella seguente elaborazione del PGTU della Città, poi concretizzatesi in successive tappe realizzative che hanno portato alla configurazione infrastrutturale attuale.

Nel file VISSIM di origine, la domanda di trasporto che cimenta la rete non era implementata in termini di matrici O/D associate ad una determinata configurazione di centroidi di origine e destinazione, bensì in termini di flussi di percorso preassegnati ad opportuni *Itinerari* diramantisi da 7 archi d'ingresso - *Archi Iniziali* - verso 11 *Archi di Destinazione*. Tale impostazione preludeva ad una simulazione che non prevedeva l'aggiornamento dinamico delle scelte di percorso operate dai singoli veicoli, limitandosi a riprodurre, sia pur dinamicamente, una condizione stazionaria di funzionamento del sistema, secondo un approccio (analogo a quello che in AIMSUN procede attraverso l'impostazione di *Traffic States*), contrapposto a quello basato su matrici O/D che permette, invece, un'assegnazione dei flussi dinamicamente aggiornata sulla scorta dei parametri di performance attuali del sistema - *Dynamic Traffic Assignment* -, più consoni al conseguimento degli obiettivi specifici del presente studio.

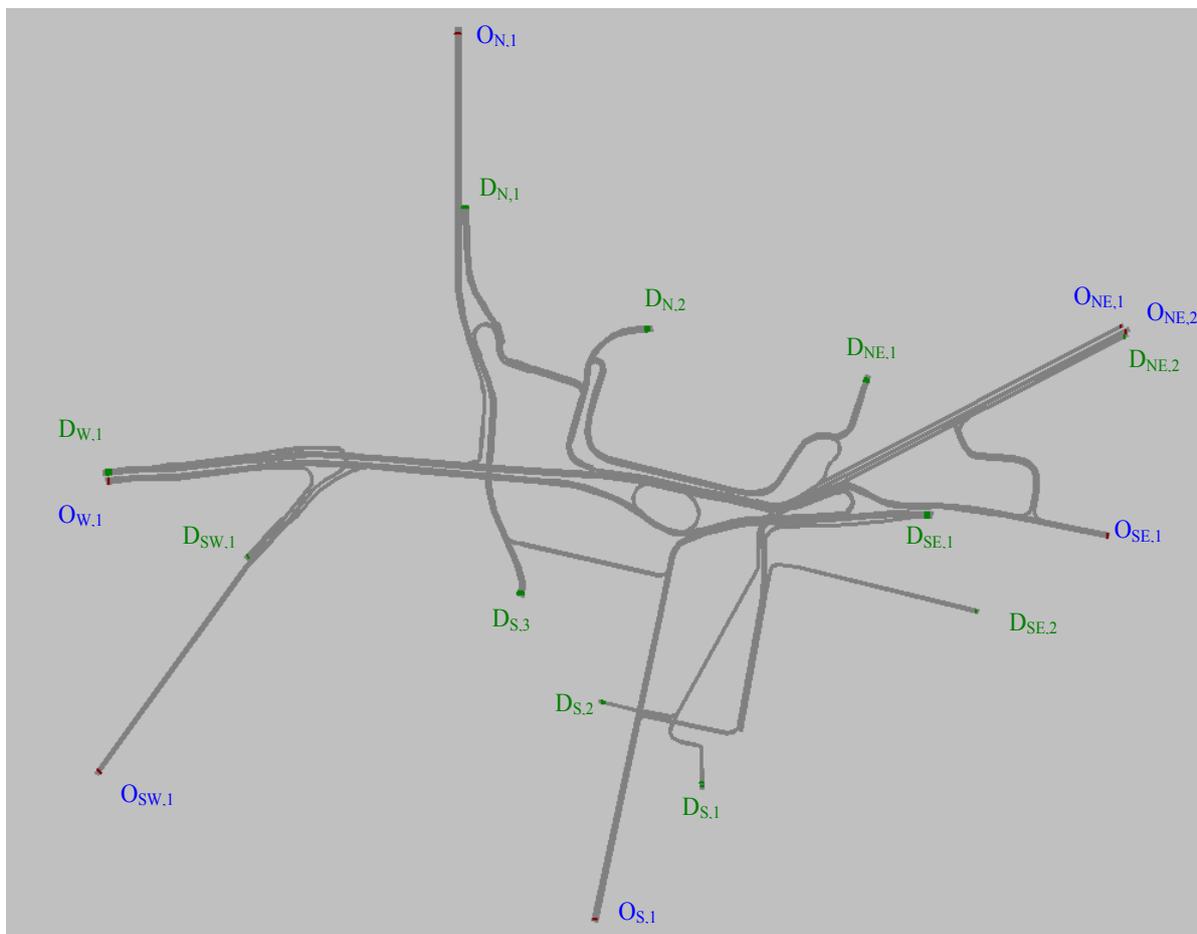
Si è così reso necessario ricondurre i flussi desunti dal modello disponibile in ambiente VISSIM ad una matrice O/D da implementare successivamente nel microsimulatore di AIMSUN. Nel far ciò è stata seguita la procedura di seguito descritta.

Primo passo è consistito nel ricondurre i diversi archi di ingresso ed uscita ad altrettanti centroidi di origine e/o destinazione, come illustrato nella Fig. 4.9 di seguito riprodotta. Ciò è equivalso ad istituire una corrispondenza biunivoca fra i numeri che in ambiente VISSIM

---

<sup>4</sup> Cfr. "3.1.3 Modelli di comportamento - *Vehicle Behavioural Models* -", pag. 145.

connotano gli archi di partenza ed arrivo e la denominazione assegnata ai centroidi del grafo implementato in ambiente AIMSUN.



**Fig. 4.9 - Dislocazione dei centroidi di origine e destinazione sullo schema di rete implementato in VISSIM.**

A ciascun arco di ingresso ed uscita dello schema di rete implementato in VISSIM è stato associato un corrispondente centroide rispettivamente di origine e destinazione nel nuovo schema di rete ricostruito in ambiente AIMSUN., ottenendo una prima dislocazione di centroidi illustrata in figura. In una fase successiva alcuni centroidi sono stati condensati in un unico centroide di origine/destinazione.

In VISSIM con la denominazione ‘*Scelta*’ s’intende, poi, la selezione dell’arco attraverso il quale immettersi nella rete, ed ogni *Scelta* è contrassegnata da un numero ordinale. Constando, poi, il grafo di rete ivi implementato, di 7 *Archi Iniziali* d’immissione (ciascuno contrassegnato dal rispettivo identificativo numerico), restavano dunque individuate 7 *Scelte*, ed una corrispondenza biunivoca fra il rispettivo identificativo e quello del relativo arco d’ingresso, secondo la Tab. 4.4 di seguito riprodotta.

Scelta N°	Scelta Nome	Arco iniz	A [m]	Classe/i veicolo	Mostra etichetta
1	-----	40	4,03	Auto, M.P.	True
2	-----	27	7,757	Auto, M.P.	True
3	-----	17	3,411	Auto, M.P.	True
4	-----	21	3,832	Auto, M.P.	True
5	-----	1	3,621	Auto, M.P.	True
6	-----	38	6,384	Auto, M.P.	True
7	-----	25	1,1	Auto, M.P.	True

**Tab. 4.4 - Definizione delle Scelte delle sezioni d'ingresso nel modello di rete implementato in VISSIM.**

La procedura di costruzione del grafo di rete in VISSIM prevede la precisazione degli archi di immissione dei veicoli nel sistema - *Archi Iniziali* -, contrassegnati da un indicatore numerico. Ad ognuno di essi, nel sottinteso meccanismo di selezione dei percorsi, corrisponde una *Scelta* operata dall'utente della rete, anch'essa contraddistinta da un identificativo numerico.

Per ogni *Scelta* lo stesso modello distingueva poi diversi *Itinerari* (i.e. percorsi), contrassegnati numericamente in ordine crescente, differenti fra loro per l'*Arco di Destinazione* contraddistinto anch'esso da un indice numerico. Allo stesso modo restava, quindi, definita una corrispondenza biunivoca fra i due identificativi rispettivamente di *Itinerario* ed *Arco di Uscita*, come dalle tabelle di seguito riportate.

Scelta N°	Itinerario N°	Arco dest.	A [m]	Spostamenti
1	1	47	72,7	50
	2	36	235,5	50
	3	33	174,5	50
	4	50	44	200
	5	26	98,3	200
	6	30	138,2	550

**Tab. 4.5 - Numero di spostamenti/h associati ai diversi itinerari corrispondenti alla Scelta 1 nel modello di rete implementato in VISSIM.**

La tabella riporta gli itinerari corrispondenti alla Scelta 1, ovvero gli archi di destinazione raggiunti a partire dall'arco d'ingresso ad essa associato. Per ciascun itinerario la stessa indica i rispettivi flussi orari.

Scelta N°	Itinerario N°	Arco dest.	A [m]	Spostamenti
2	1	50	49,8	500
	2	30	141	2848
	3	26	93,3	552

**Tab. 4.6 - Numero di spostamenti/h associati ai diversi itinerari corrispondenti alla Scelta 2 nel modello di rete implementato in VISSIM.**

La tabella riporta gli itinerari corrispondenti alla Scelta 2, ovvero gli archi di destinazione raggiunti a partire dall'arco d'ingresso ad essa associato. Per ciascun itinerario la stessa indica i rispettivi flussi orari.

Scelta N°	Itinerario N°	Arco dest.	A [m]	Spostamenti
3	1	26	97,9	1426
	2	47	72,5	17
	3	36	238,8	10
	4	33	174,1	10
	5	30	140,9	120
	6	51	61,3	120

**Tab. 4.7 - Numero di spostamenti/h associati ai diversi itinerari corrispondenti alla Scelta 3 nel modello di rete implementato in VISSIM.**

La tabella riporta gli itinerari corrispondenti alla Scelta 3, ovvero gli archi di destinazione raggiunti a partire dall'arco d'ingresso ad essa associato, nello schema di rete implementato in VISSIM. Per ciascun itinerario la stessa indica i rispettivi flussi orari.

Scelta N°	Itinerario N°	Arco dest.	A [m]	Spostamenti
4	1	50	46,2	570
	2	26	96,9	550
	3	47	73,7	100
	4	36	237,7	50
	5	33	173,9	50

**Tab. 4.8 - Numero di spostamenti/h associati ai diversi itinerari corrispondenti alla Scelta 4 nel modello di rete implementato in VISSIM.**

La tabella riporta gli itinerari corrispondenti alla Scelta 4, ovvero gli archi di destinazione raggiunti a partire dall'arco d'ingresso ad essa associato, nello schema di rete implementato in VISSIM. Per ciascun itinerario la stessa indica i rispettivi flussi orari.

Scelta N°	Itinerario N°	Arco dest.	A [m]	Spostamenti
5	1	26	94,2	146
	2	47	75,4	100
	3	36	237,5	191
	4	33	174,3	190
	5	50	46,4	70
	6	30	140	10
	7	55	278,1	142
	8	39	387,9	300

**Tab. 4.9 - Numero di spostamenti/h associati ai diversi itinerari corrispondenti alla Scelta 5 nel modello di rete implementato in VISSIM.**

La tabella riporta gli itinerari corrispondenti alla Scelta 5, ovvero gli archi di destinazione raggiunti a partire dall'arco d'ingresso ad essa associato, nello schema di rete implementato in VISSIM. Per ciascun itinerario la stessa indica i rispettivi flussi orari.

Scelta N°	Itinerario N°	Arco dest.	A [m]	Spostamenti
6	1	52	39,7	300
	2	53	102,3	600

**Tab. 4.10 - Numero di spostamenti/h associati ai diversi itinerari corrispondenti alla Scelta 6 nel modello di rete implementato in VISSIM.**

La tabella riporta gli itinerari corrispondenti alla Scelta 6, ovvero gli archi di destinazione raggiunti a partire dall'arco d'ingresso ad essa associato, nello schema di rete implementato in VISSIM. Per ciascun itinerario la stessa indica i rispettivi flussi orari.

Scelta N°	Itinerario N°	Arco dest.	A [m]	Spostamenti
7	1	39	387,8	600
	2	53	99	500
	3	52	43,3	50
	5	36	233,8	10
	6	33	173,4	30
	7	30	138,6	27
	8	50	48	1800
	9	47	75,3	10

**Tab. 4.11 - Numero di spostamenti/h associati ai diversi itinerari corrispondenti alla Scelta 7 nel modello di rete implementato in VISSIM.**

La tabella riporta gli itinerari corrispondenti alla Scelta 7, ovvero gli archi di destinazione raggiunti a partire dall'arco d'ingresso ad essa associato, nello schema di rete implementato in VISSIM. Per ciascun itinerario la stessa indica i rispettivi flussi orari.

Per ogni itinerario le stesse tabelle riportano altresì il numero di spostamenti registrati nell'intervallo di osservazione considerato (1 h). A partire da queste ultime, sulla scorta delle rintracciate corrispondenze fra identificativi, si è proceduto, quindi, alla paziente ricostruzione della ripartizione degli spostamenti fra i diversi centroidi di origine e destinazione conformemente alla configurazione di rete implementata in ambiente Aimsun. I dati numerici sono riassunti nelle Tab. 4.12 e Tab. 4.13 di seguito riprodotte.

Traffic Volumes per Dest. Centroid (veh/h)	
Dest. Centroid	Tot
<b>DN,1</b>	<b>330</b>
<b>DN,2</b>	<b>311</b>
<b>DNE,1</b>	<b>277</b>
<b>DNE,2</b>	<b>900</b>
<b>DSE,1</b>	<b>2874</b>
<b>DSE,2</b>	<b>142</b>
<b>DS,1</b>	<b>1100</b>
<b>DS,2</b>	<b>350</b>
<b>DS,3</b>	<b>3555</b>
<b>Dsw,1</b>	<b>120</b>
<b>DW,1</b>	<b>3140</b>
<b>Total Trips</b>	<b>13099</b>

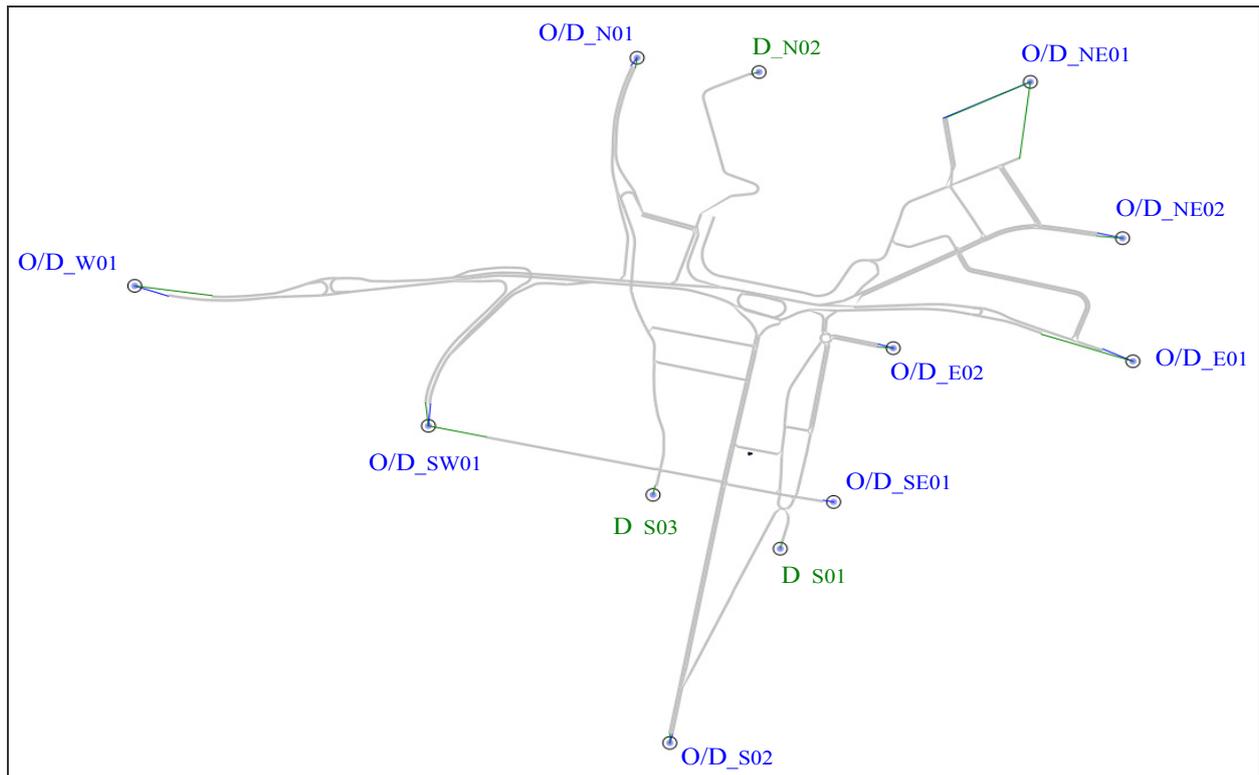
**Tab. 4.12 - Flussi orari associati ai diversi centroidi di destinazione in AIMSUN.**

Caso Studio - Implementazione e Risultati

Centroids						Path		Traffic Volumes per Orig. Centroid (veh/h)	
Sequence n°		Origin		Destination					
New id.	Vissim id.	New id.	Vissim id.	New id.	Vissim id.	New id.	Vissim id.	per Path	Tot
1	2	ON,1	27	DSE,1	26	1	3	552	3900
				DS,3	30	2	2	2848	
				DW,1	50	3	1	500	
2	1	ONE,1	40	DN,1	33	4	3	50	1100
				DN,2	36	5	2	50	
				DNE,1	47	6	1	50	
				DSE,1	26	7	5	200	
				DS,3	30	8	6	550	
				DW,1	50	9	4	200	
3	6	ONE,2	38	DS,1	53	10	2	600	900
				DS,2	52	11	1	300	
4	7	OSE,1	25	DN,1	33	12	6	30	3027
				DN,2	36	13	5	10	
				DNE,1	47	14	9	10	
				DNE,2	39	15	1	600	
				DS,1	53	16	2	500	
				DS,2	52	17	3	50	
				DS,3	30	18	7	27	
				DW,1	50	19	8	1800	
				5	5	OS,1	1	DN,1	
DN,2	36	21	3					191	
DNE,1	47	22	2					100	
DNE,2	39	23	8					300	
DSE,1	26	24	1					146	
DSE,2	55	25	7					142	
DS,3	30	26	6					10	
DW,1	50	27	5					70	
6	4	OSW,1	21	DN,1	33	28	5	50	1320
				DN,2	36	29	4	50	
				DNE,1	47	30	3	100	
				DSE,1	26	31	2	550	
				DW,1	50	32	1	570	
7	3	OW,1	17	DN,1	33	33	4	10	1703
				DN,2	36	34	3	10	
				DNE,1	47	35	2	17	
				DSE,1	26	36	1	1426	
				DS,3	30	37	5	120	
				DSW,1	51	38	6	120	

**Tab. 4.13 - Domanda di spostamento fra le diverse coppie Origine/Destinazione predisposte nel modello di rete implementato in AIMSUN.**

La tabella riporta gli identificativi delle sezioni di ingresso ed uscita nel modello di rete implementato in VISSIM, e quelli dei corrispondenti centroidi di origine e destinazione definiti nel modello di rete ricostruito in ambiente AIMSUN. Con riferimento a quest'ultimo modello, per ciascuna origine è altresì indicata la domanda di trasporto (sia complessiva che disaggregata per destinazione), da essa generata, così come ricostruita a partire dalle Tab. 4.5-Tab. 4.11, avvalendosi della corrispondenza istituita rispettivamente fra sezioni di ingresso/uscita ed centroidi di origine/destinazione negli schemi di rete implementati nei due ambienti di simulazione.



**Fig. 4.10 - Configurazione definitiva di centroidi O/D adottata nel modello di rete implementato in AIMSUN.**

Centroid Configuration	
Previous	Rearranged
ON,1 DN,1	O/D_N01
DN,2	D_N02
ONE,1 DNE,1	O/D_NE01
ONE,2 DNE,2	O/D_NE02
OSE,1 DSE,1	O/D_E01
DSE,2	O/D_E02
-----	O_SE01
DS,1	D_S01
OS,1	O/D_S02
DS,3	D_S03
OSW,1 DSW,1 DS,2	O/D_SW01
OW,1 DW,1	O/D_W01

**Tab. 4.14 - Condensazione dei centroidi O/D nel modello AIMSUN.**

## Caso Studio - Implementazione e Risultati

Ai fini di una più razionale distribuzione spaziale dei centroidi, rispetto a quella indirettamente suggerita dal modello implementato su VISSIM, evitando ridondanze inutili nelle analisi oggetto del presente studio, si è proceduto all'accorpamento di alcuni dei centroidi definiti in una prima fase, ed a una più sintetica ridenominazione degli stessi in relazione alla rispettiva funzione (Origine e/o Destinazione), secondo la Tab. 4.14 riportata nella pagina precedente. È stata così, in definitiva, assemblata la matrice O/D di seguito riprodotta (Tab. 4.15), associata alla configurazione spaziale di centroidi definitiva rappresentata in Fig. 4.10.

O/D MATRIX (Ct Traffic Authority Survey 2004)													
id		1573	1580	1584	1591	1596	1601	1609	1612	1617	1620	1629	
	name	O/D_N01	D_N02	O/D_NE01	O/D_NE02	O/D_E01	O/D_E02	D_S01	O/D_S02	D_S03	O/D_SW01	O/D_W01	Totals
1573	O/D_N01	0	0	0	0	552	0	0	0	2848	0	500	3900
1584	O/D_NE01	50	50	50	0	200	0	0	0	550	0	200	1100
1591	O/D_NE02	0	0	0	0	0	0	600	0	0	300	0	900
1596	O/D_E01	30	10	10	600	0	0	500	0	27	50	1800	3027
1601	O/D_E02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1606	O_SE01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1612	O/D_S02	190	191	100	300	146	142	0	0	10	0	70	1149
1620	O/D_SW01	50	50	100	0	550	0	0	0	0	0	570	1320
1629	O/D_W01	10	10	17	0	1426	0	0	0	120	120	0	1703
Totals		330	311	277	900	2874	142	1100	0	3555	470	3140	13099

**Tab. 4.15 - Matrice Origine/Destinazione implementata nel modello di rete ricostruito in ambiente AIMSUN.**

Essa riporta in ciascuna casella il numero di spostamenti fra l'origine e la destinazione individuate rispettivamente dalla riga e dalla colonna corrispondenti, previsti nell'intervallo di osservazione del sistema considerato. I valori indicati si riferiscono alla fascia oraria compresa fra le 07:30 e le 08:30 del giorno feriale medio, desunti dagli studi a supporto del 'Progetto di Adeguamento della Circonvallazione di Catania.

## 4.4 Analisi dei risultati

### 4.4.1 Inquadramento

Come già ampiamente descritto nell'apposito capitolo<sup>5</sup>, nell'espone gli output della simulazione sono stati scelti due livelli di aggregazione su scala spaziale, rispettivamente:

1. *globale*, che considera il sistema nel suo complesso - *System Statistics* -;
2. *parziale*, che elabora statisticamente i risultati per singole coppie origine/detrazione - *O/D Statistics* -.

Su scala globale, la risposta del sistema nei diversi scenari informativi contemplati è stata decritta in termini di tre grandezze ritenute di principale rilievo:

- Tempo medio kilometrico di attraversamento della rete - *Mean System Travel Time* (tt) -;
- Tempo totale di viaggio, somma dei tempi di attraversamento di tutti i veicoli transitati nella rete durante l'intero periodo di osservazione - *Total System Travel Time* (TT) -;
- Media armonica delle velocità di viaggio - *System Harmonic Mean Speed* (sph) -.

cui sono state poi aggiunte altre tre grandezze, ad integrare la prospettiva di osservazione del sistema con angolature utili a formare un quadro compiuto del suo comportamento, rispettivamente:

- Code virtuali in ingresso nel sistema - *Mean Virtual Queue* (qvmean) -  
Questo parametro è stato utilizzato per valutare se le discrepanze fra le risposte ottenute nei diversi contesti di funzionamento del modello fossero imputabili a differenze significative nei volumi di traffico di volta in volta effettivamente caricati nel sistema;
- Tempo medio kilometrico in arresto - *Mean System Stop Time* (stime) -;
- Ritardo medio kilometrico - *Mean System Delay Time* (dtime) -.

Nell'aggregazione per coppie O/D, invece, si è deciso, per motivi di brevità, di limitarsi a descrivere la risposta del sistema in termini del solo Tempo Medio di Viaggio - *Mean System Travel Time* tt -, al fine di ottenere giusto un'indicazione circa l'utilità di adottare una prospettiva alternativa e complementare a quella *globale* nell'osservazione di un sistema di trasporto complesso quale il nodo viario assunto a caso studio.

---

<sup>5</sup> Cfr. § 3.3.2 Grandezze di risposta e livello di aggregazione, pag. 157.

Per una attenta disamina del significato delle grandezze su elencate si rimanda all'apposita appendice<sup>6</sup>.

Quanto all'aggregazione su scala temporale, per ambedue i livelli spaziali anzidetti si è scelto di riferirsi all'intero orizzonte temporale di osservazione, calcolando medie e deviazioni standard dei valori raccolti nell'intervallo di tempo trascorso fra inizio e fine simulazione (pari ad 1 h).

L'analisi dei risultati è stata condotta secondo le modalità precisate nel Capitolo 3<sup>7</sup>.

## 4.4.2 Analisi per Soglie 'Critiche'

### 4.4.2.1 Statistiche di sistema

Nel seguito ci si limiterà, per esigenze di brevità, alla descrizione dei risultati espressi in termini delle tre grandezze prescelte come più indicative della performance del sistema, riportando qualora opportuno eventuali considerazioni integrative suggerite dalle altre grandezze complementari.

Con riferimento alla modalità di analisi semplificata basata sulla definizione di livelli limite di ammissibilità della performance di sistema e conseguente identificazione a ritroso delle corrispondenti soglie di carico 'critiche', sono stati ottenuti i risultati di seguito riprodotti, rispettivamente per i livelli di aggregazione temporale e spaziale già precisati. Nell'applicare questa modalità di analisi, le soglie critiche di risposta del sistema sono state determinate, per tutte e tre le grandezze in termini delle quali si è deciso di descrivere la performance del sistema, quali multipli dei rispettivi valori attinti in corrispondenza del livello di carico pari al 50% dell'intera Domanda di Trasporto. A partire da questo livello di sollecitazione del sistema si manifestano infatti i primi fenomeni di congestionamento. Così, rispettivamente per le tre grandezze anzidette si è assunto:

- $tt \text{ Critical Threshold} = 2 \cdot \overline{tt}_{50\%TD} = 120 \text{ (sec)}$ ;
- $TT \text{ Critical Threshold} = 2 \cdot \overline{TT}_{50\%TD} = 300 \text{ (h)}$ ;
- $speedh \text{ Critical Threshold} = \frac{1}{2} \cdot \overline{speedh}_{50\%TD} = 30 \text{ (km/h)}$ .

---

<sup>6</sup> Cfr. A. Elaborazione statistica dei risultati in Aimsun, pag. 263.

<sup>7</sup> Cfr. 3.3.3 Precisazione della modalità di analisi dei risultati, pag.162.

ove col soprasegno si è denotata la media dei valori ottenuti per la data grandezza nei diversi scenari informativi considerati, in corrispondenza della prescelta soglia di carico.

I livelli di carico della rete in corrispondenza dei quali si attingono, per i diversi contesti informativi, i valori limite di risposta testé riportati, sono stati coerentemente denominati *Travel Demand Critical Thresholds*.

#### **Tempo medio chilometrico di attraversamento della rete - *Mean System Travel Time* -**

Dall'osservazione dei grafici di seguito riprodotti si osserva come, lo scenario informativo per il quale l'attingimento della prestabilita soglia 'critica' di risposta del sistema - *tt Critical Threshold* - pari a 2 (min), si registra per il più alto livello di carico della rete pari allo 85,3%, 'posticipando' dunque l'insorgenza della criticità, è quello *limite teorico* che prevede la conoscenza deterministica dello stato del sistema da parte degli utenti, modellato attraverso un'assegnazione *a Tutto o Niente* basata su tempi di viaggio desunti da una simulazione preliminare di Warm-up. Fra le strategie informative preventive implementate nel modello, quella che meglio approssima questa condizione, con una soglia di carico critica del 78,9%, prevede la disseminazione dell'informazione sul 100% degli utenti del sistema. Fra le strategie informative adattive, invece, quella che garantisce una migliore performance del sistema, con una soglia di carico critica del 79,2%, è quella che prevede un tasso di disseminazione durante il viaggio del 25%. È interessante notare come questo livello di prestazione del sistema poco si discosta (del solo 0,3%), da quello che si attingerebbe in assenza d'informazione in fase di viaggio.

#### **Tempo Totale di Viaggio - *Total System Travel Time* -**

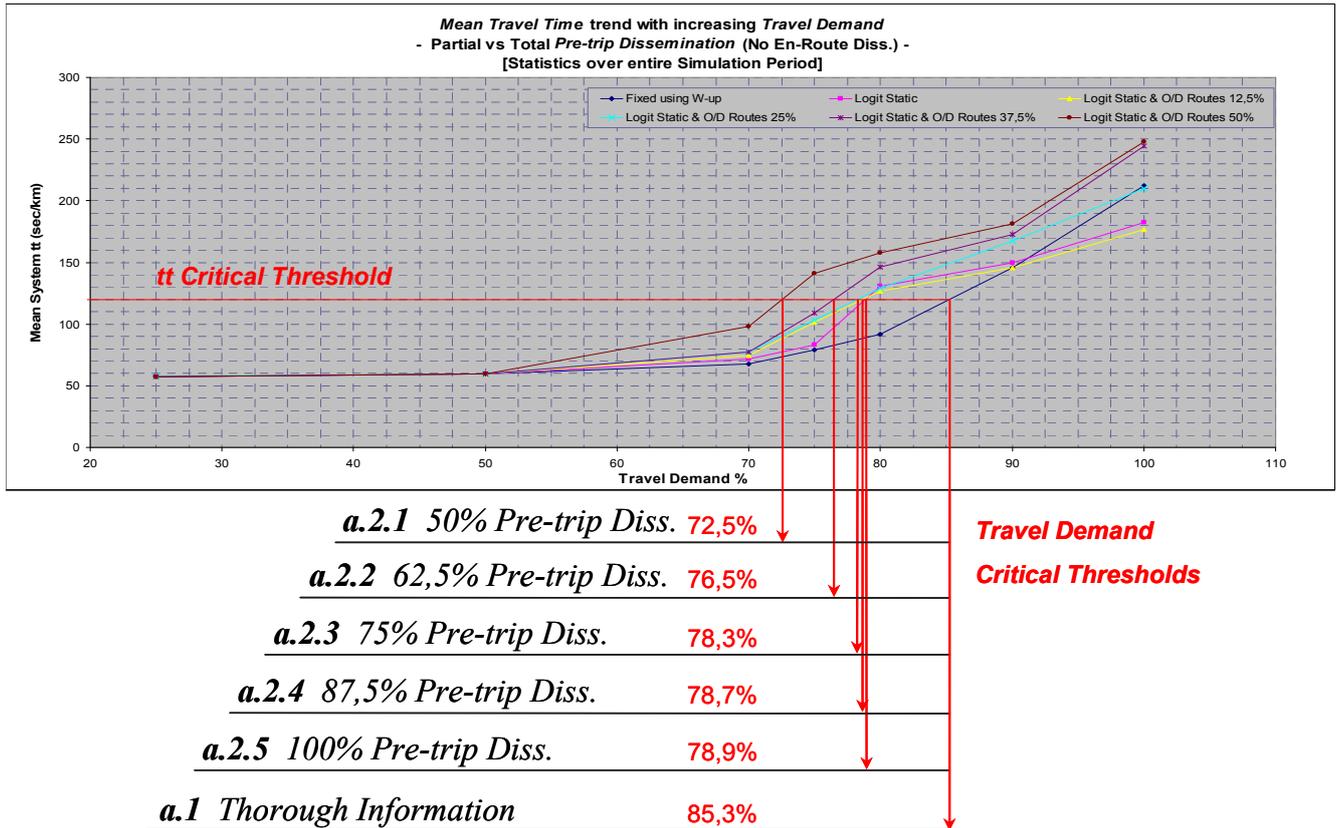
Per questo parametro di prestazione del sistema lo scenario informativo ottimale, fra quelli contemplati, risulta ancora coincidere con quello *limite teorico* (che presuppone la conoscenza deterministica dello stato del sistema da parte degli utenti), per il quale l'attingimento della prestabilita soglia 'critica' di risposta - *TT Critical Threshold* - pari a 300 (h), si registra in corrispondenza del 76% della domanda di trasporto complessiva. Fra le strategie informative in fase pre-trip, quella che meglio approssima questa condizione ideale, con una soglia di carico critica del 75,1%, prevede la disseminazione dell'informazione sul 100% degli utenti del sistema. Fra le strategie informative adattive, poi, a garantire la migliore performance su scala di sistema è ancora quella che prevede un tasso di disseminazione en-route del 25%, per la quale la soglia di carico critica si attinge al 72,9% della domanda di trasporto complessiva; a differenza però di quanto visto esaminando la risposta in termini del tempo medio di viaggio, adesso tale strategia è

peggiorativa rispetto al contesto privo di informazione in fase di viaggio, con uno scostamento non più trascurabile del 2,2%.

### **Media Armonica delle Velocità di Viaggio - *System Harmonic Mean Speed* -**

Anche dalla descrizione della risposta del sistema in termini della *velocità media armonica* emerge come il modello *limite teorico* basato su un'assegnazione deterministica *a Tutto o Niente* si confermi ancora una volta quale il contesto informativo ottimale cui tendere idealmente per garantire la migliore performance di sistema. Per questo modello, infatti, la prestabilita soglia 'critica' prestazionale - *speedh Critical Threshold* - pari a 30 (km/h), si attinge in corrispondenza del più alto livello di carico - *Travel Demand Critical Thresholds* - fra quelli registrati nei diversi contesti informativi contemplati dal presente studio, pari allo 86,5% della domanda di trasporto complessiva. Fra le strategie informative in fase pre-trip, quella che meglio approssima questa condizione ideale, con una soglia di carico 'critica' del 79,5%, prevede ancora la disseminazione dell'informazione sul 100% degli utenti del sistema. Fra le strategie informative in fase di viaggio, poi, a garantire la migliore performance su scala di sistema è, anche in questo caso, quella corrispondente ad un tasso di disseminazione en-route del 25%, per la quale la soglia di carico critica si attinge allo 80% della domanda di trasporto complessiva, con un guadagno minimo dello 0,5% rispetto al contesto privo d'informazione en-route, analogamente a quanto visto esaminando la risposta in termini del tempo medio di viaggio.

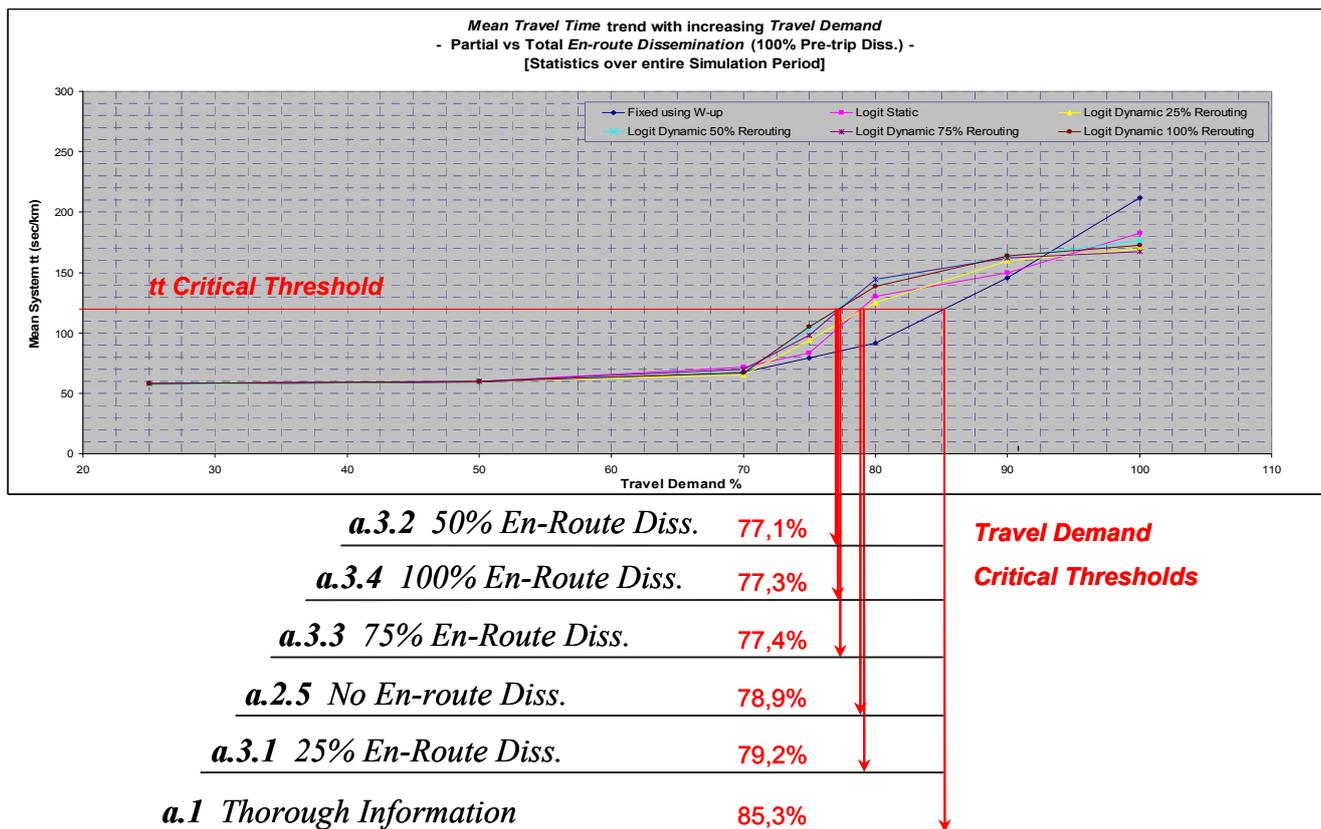
## Caso Studio - Implementazione e Risultati



**Fig. 4.11 - Andamenti del tempo medio di viaggio in funzione della domanda di trasporto ed attingimento delle soglie ‘critiche’ di risposta al variare del tasso di somministrazione dell’informazione in fase preventiva.**

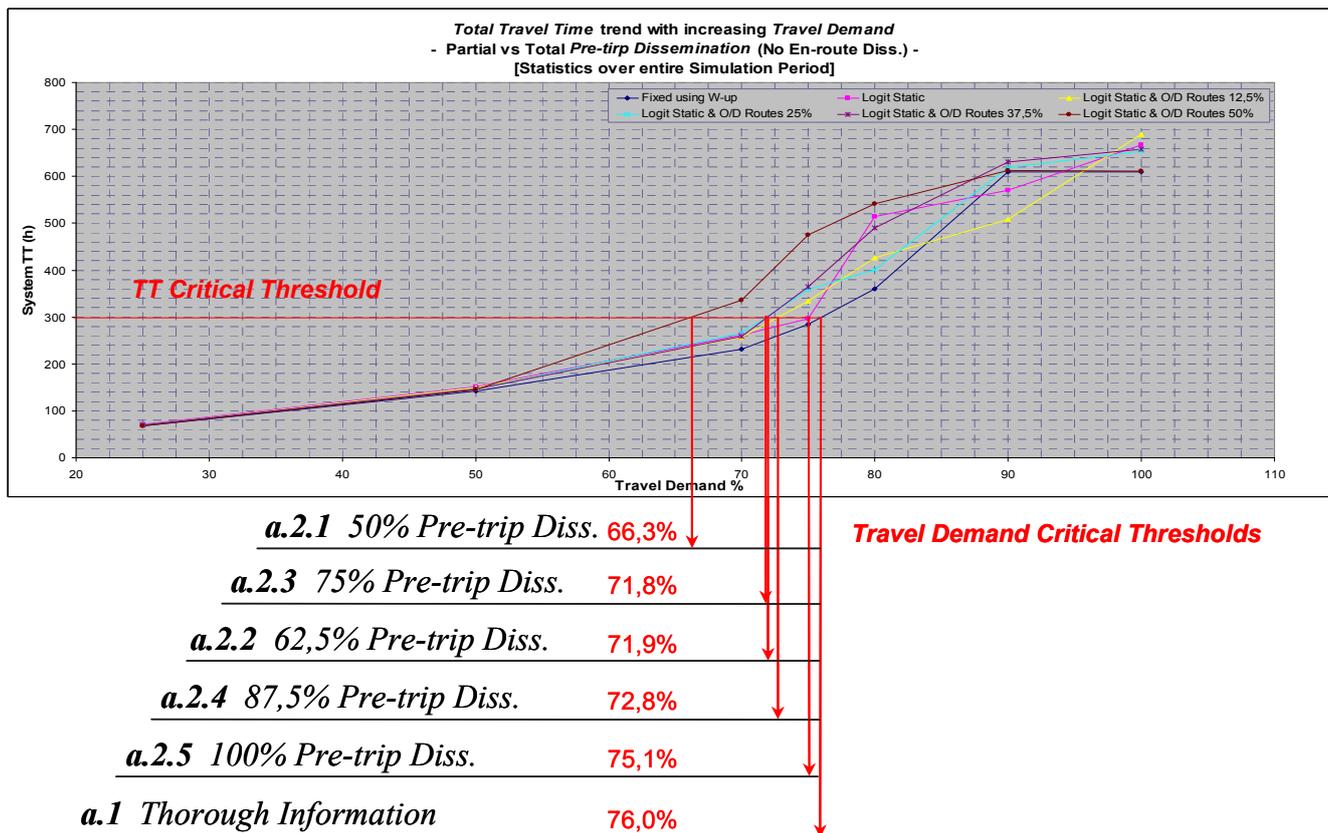
Il diagramma riproduce gli andamenti della prescelta grandezza di risposta ( $tt$ ), al crescere della domanda di trasporto, attinti nei cinque scenari che prevedono la somministrazione d’informazione esclusivamente in fase pre-trip, secondo tassi via via crescenti, rispettivamente pari al: 50÷62,5÷75÷87,5÷100% della platea di utenti del sistema. Tali contesti informativi sono riprodotti attraverso un meccanismo di assegnazione composito che prevede una quota di domanda precaricata staticamente e la restante quota assegnata dinamicamente secondo algoritmi probabilistici di scelta discreta di tipo *Logit*. Quale riferimento è riportato il medesimo andamento ottenuto in corrispondenza dello scenario limite teorico che prevede la nozione deterministica dello stato del sistema da parte di tutti i suoi utenti, reso attraverso un’assegnazione *a Tutto o Niente* basata sui costi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up. Fissata univocamente la soglia critica di risposta - *tt Critical Threshold* -, in corrispondenza di un tempo medio di viaggio di 2 min per unità di chilometro, il digramma riporta altresì i rispettivi livelli di carico - *Travel Demand Critical Thresholds* - che ne determinano l’attingimento, espressi come aliquote percentuali della domanda di trasporto complessiva relativa all’intero periodo di osservazione del sistema, stimata in 13.099 veicoli/h. La classifica che ne deriva indica quale scenario ideale proprio quello limite teorico, suggerendo al contempo come tassi crescenti di disseminazione dell’informazione in fase preventiva concorrano a migliorare le prestazioni del sistema.

## Caso Studio - Implementazione e Risultati



**Fig. 4.12** - Andamenti del tempo medio di viaggio in funzione della domanda di trasporto ed attingimento delle soglie ‘critiche’ di risposta al variare del tasso di somministrazione dell’informazione in fase di viaggio.

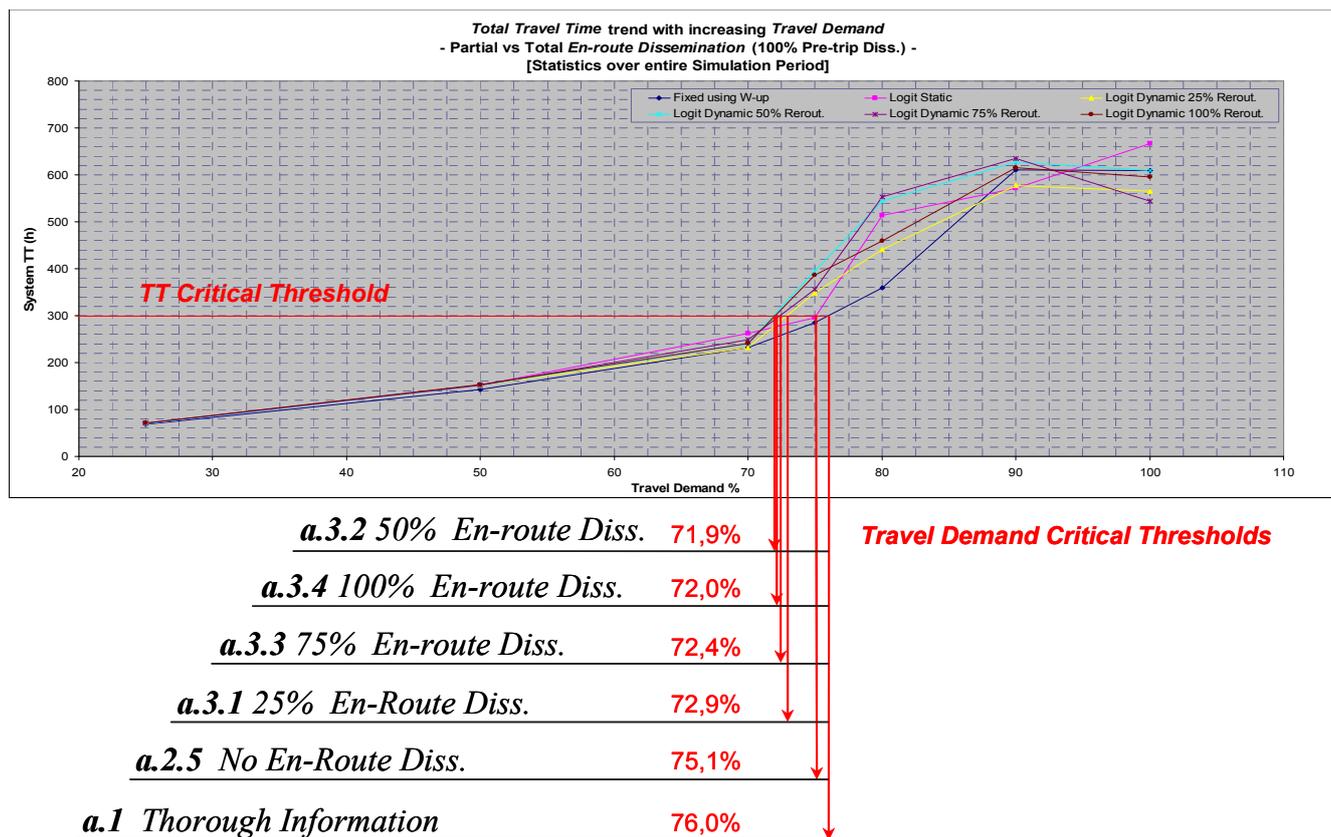
Il diagramma riproduce gli andamenti della prescelta grandezza di risposta ( $tt$ ), al crescere della domanda di trasporto, attinti nei cinque scenari che prevedono la somministrazione d’informazione sia in fase pre-trip (sull’intera utenza del sistema), che en-route secondo tassi via via crescenti, rispettivamente pari al: 0÷25÷50÷75÷100% della platea di utenti. Tali contesti informativi sono riprodotti attraverso meccanismi di assegnazione dinamica basati su algoritmi probabilistici di scelta discreta di tipo *Logit*, che prevedono un parziale reindirizzamento dei veicoli in fase di marcia, secondo le aliquote testè indicate. Quale riferimento è riportato il medesimo andamento ottenuto in corrispondenza dello scenario limite teorico che prevede la nozione deterministica dello stato del sistema da parte di tutti i suoi utenti, reso attraverso un’assegnazione *a Tutto o Niente* basata sui costi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up. Fissata univocamente la soglia critica di risposta - *tt Critical Threshold* -, in corrispondenza di un tempo medio di viaggio di 2 min per unità di chilometro, il digramma riporta altresì i rispettivi livelli di carico - *Travel Demand Critical Thresholds* - che ne determinano l’attingimento, espressi come aliquote percentuali della domanda di trasporto complessiva relativa all’intero periodo di osservazione del sistema, stimata in 13.099 veicoli/h. La classifica che ne deriva indica quale scenario ideale proprio quello limite teorico, suggerendo al contempo come tassi crescenti di disseminazione en-route dell’informazione non necessariamente concorrano a migliorare le prestazioni del sistema.



**Fig. 4.13 - Andamenti del tempo totale di attraversamento della rete in funzione della domanda di trasporto ed attingimento delle soglie ‘critiche’ di risposta al variare del tasso di somministrazione dell’informazione in fase preventiva.**

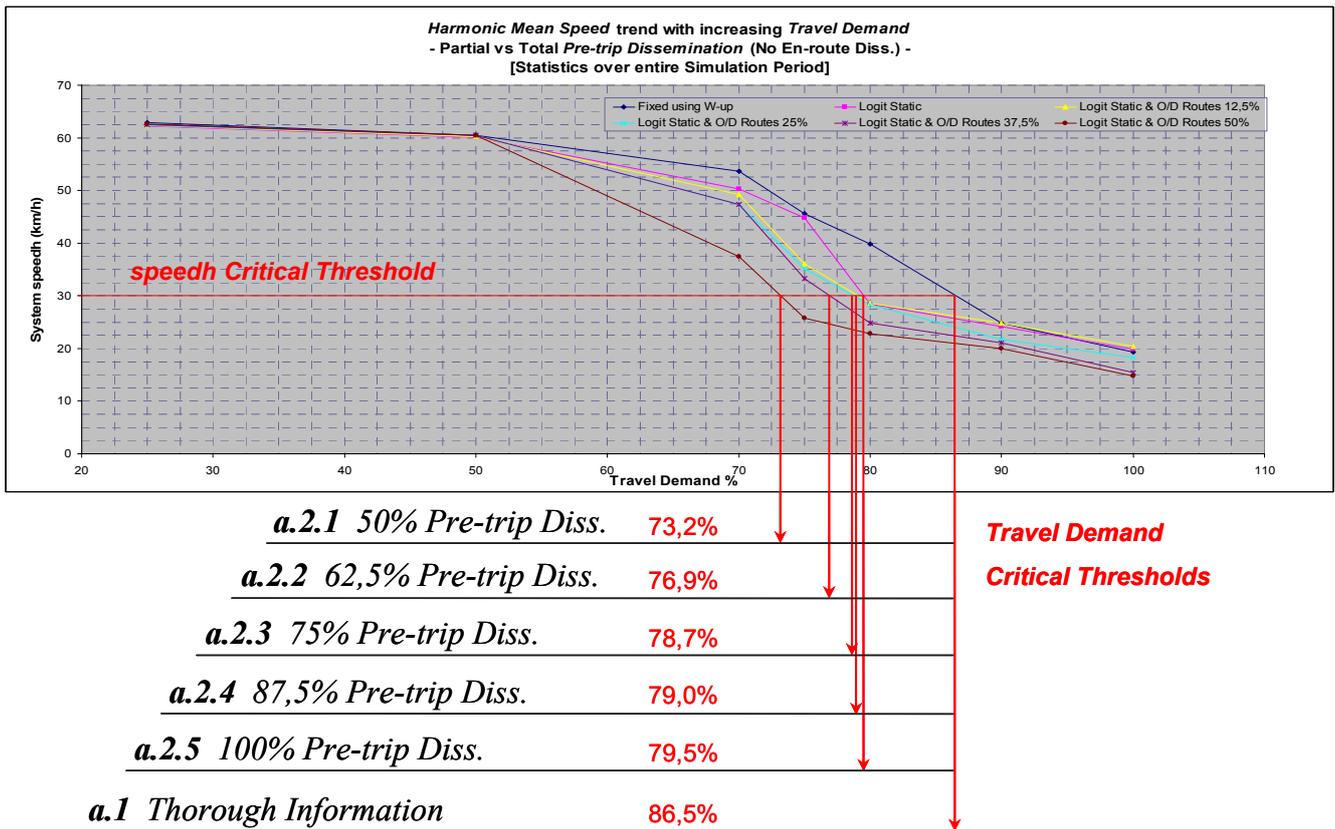
Il diagramma riproduce gli andamenti della prescelta grandezza di risposta (*TT*), al crescere della domanda di trasporto, attinti nei cinque scenari che prevedono la somministrazione d’informazione esclusivamente in fase pre-trip, secondo tassi via via crescenti, rispettivamente pari al: 50÷62,5÷75÷87,5÷100% della platea di utenti del sistema. Tali contesti informativi sono riprodotti attraverso un meccanismo di assegnazione composito che prevede una quota di domanda precaricata staticamente e la restante quota assegnata dinamicamente secondo algoritmi probabilistici di scelta discreta di tipo *Logit*. Quale riferimento è riportato il medesimo andamento ottenuto in corrispondenza dello scenario limite teorico che prevede la nozione deterministica dello stato del sistema da parte di tutti i suoi utenti, reso attraverso un’assegnazione *a Tutto o Niente* basata sui costi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up. Fissata univocamente la soglia critica di risposta - *TT Critical Thresholds* -, in corrispondenza di un tempo totale di viaggio di 300 h, il digramma riporta altresì i rispettivi livelli di carico - *Travel Demand Critical Threshold* - che ne determinano l’attingimento, espressi come aliquote percentuali della domanda di trasporto complessiva relativa all’intero periodo di osservazione del sistema, stimata in 13.099 veicoli/h. La classifica che ne deriva indica quale scenario ideale ancora una volta quello limite teorico, suggerendo al contempo come tassi crescenti (sebbene non sempre monotonamente), di disseminazione dell’informazione in fase preventiva concorrano a migliorare le prestazioni del sistema.

## Caso Studio - Implementazione e Risultati



**Fig. 4.14 - Andamenti del tempo totale di attraversamento della rete in funzione della domanda di trasporto ed attingimento delle soglie 'critiche' di risposta al variare del tasso di somministrazione dell'informazione in fase di viaggio.**

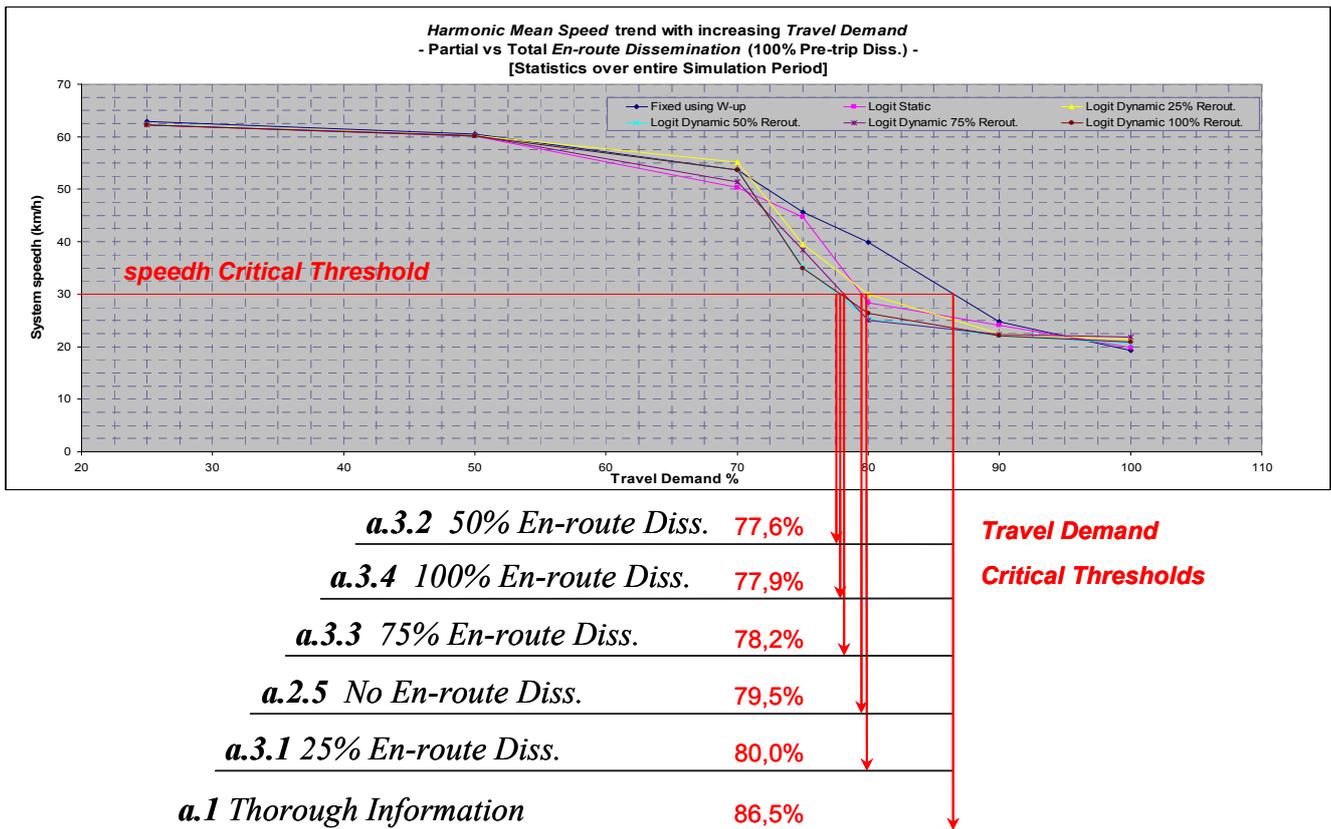
Il diagramma riproduce gli andamenti della prescelta grandezza di risposta ( $TT$ ), al crescere della domanda di trasporto, attinti nei cinque scenari che prevedono la somministrazione d'informazione sia in fase pre-trip (sull'intera utenza del sistema), che en-route secondo tassi via via crescenti, rispettivamente pari al:  $0 \div 25 \div 50 \div 75 \div 100\%$  della platea di utenti. Tali contesti informativi sono riprodotti attraverso meccanismi di assegnazione dinamica basati su algoritmi probabilistici di scelta discreta di tipo *Logit*, che prevedono un parziale reindirizzamento dei veicoli in fase di marcia, secondo le aliquote testè indicate. Quale riferimento è riportato il medesimo andamento ottenuto in corrispondenza dello scenario limite teorico che prevede la nozione deterministica dello stato del sistema da parte di tutti i suoi utenti, reso attraverso un'assegnazione *a Tutto o Niente* basata sui costi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up. Fissata univocamente la soglia critica di risposta - *TT Critical Threshold* -, in corrispondenza di un tempo totale di viaggio di 300h, il digramma riporta altresì i rispettivi livelli di carico - *Travel Demand Critical Thresholds* - che ne determinano l'attingimento, espressi come aliquote percentuali della domanda di trasporto complessiva relativa all'intero periodo di osservazione del sistema, stimata in 13.099 veicoli/h. La classifica che ne deriva indica anche in questo caso quale scenario ideale quello limite teorico, suggerendo al contempo come tassi crescenti di disseminazione en-route dell'informazione non necessariamente concorrano a migliorare le prestazioni del sistema.



**Fig. 4.15 - Andamenti della velocità media armonica in funzione della domanda di trasporto ed attingimento delle soglie ‘critiche’ di risposta al variare del tasso di somministrazione dell’informazione in fase preventiva.**

Il diagramma riproduce gli andamenti della prescelta grandezza di risposta (*speedh*), al crescere della domanda di trasporto, attenti nei cinque scenari che prevedono la somministrazione d’informazione esclusivamente in fase pre-trip, secondo tassi via via crescenti, rispettivamente pari al: 50÷62,5÷75÷87,5÷100% della platea di utenti del sistema. Tali contesti informativi sono riprodotti attraverso un meccanismo di assegnazione composito che prevede una quota di domanda precaricata staticamente e la restante quota assegnata dinamicamente secondo algoritmi probabilistici di scelta discreta di tipo *Logit*. Quale riferimento è riportato il medesimo andamento ottenuto in corrispondenza dello scenario limite teorico che prevede la nozione deterministica dello stato del sistema da parte di tutti i suoi utenti, reso attraverso un’assegnazione *a Tutto o Niente* basata sui costi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up. Fissata univocamente la soglia critica di risposta - *speedh Critical Threshold* -, in corrispondenza di una *velocità media armonica* pari a 30 Km/h, il digramma riporta altresì i rispettivi livelli di carico - *Travel Demand Critical Thresholds* - che ne determinano l’attingimento, espressi come aliquote percentuali della domanda di trasporto complessiva relativa all’intero periodo di osservazione del sistema, stimata in 13.099 veicoli/h. La classifica che ne deriva vede ancora una volta quale scenario ideale quello limite teorico, indicando al contempo come tassi crescenti di disseminazione dell’informazione in fase preventiva concorrano a migliorare le prestazioni del sistema.

## Caso Studio - Implementazione e Risultati



**Fig. 4.16 - Andamenti della velocità media armonica in funzione della domanda di trasporto ed attingimento delle soglie ‘critiche’ di risposta al variare del tasso di somministrazione dell’informazione in fase di viaggio.**

Il diagramma riproduce gli andamenti della prescelta grandezza di risposta (*speedh*), al crescere della domanda di trasporto, attenti nei cinque scenari che prevedono la somministrazione d’informazione sia in fase pre-trip (sull’intera utenza del sistema), che en-route secondo tassi via via crescenti, rispettivamente pari al: 0÷25÷50÷75÷100% della platea di utenti. Tali contesti informativi sono riprodotti attraverso meccanismi di assegnazione dinamica basati su algoritmi probabilistici di scelta discreta di tipo *Logit*, che prevedono un parziale reindirizzamento dei veicoli in fase di marcia, secondo le aliquote testè indicate. Quale riferimento è riportato il medesimo andamento ottenuto in corrispondenza dello scenario limite teorico che prevede la nozione deterministica dello stato del sistema da parte di tutti i suoi utenti, reso attraverso un’assegnazione *a Tutto o Niente* basata sui costi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up. Fissata univocamente la soglia critica di risposta - *speedh Critical Threshold* -, in corrispondenza di una *velocità media armonica* pari a 30 Km/h, il digramma riporta altresì i rispettivi livelli di carico - *Travel Demand Critical Thresholds* - che ne determinano l’attingimento, espressi come aliquote percentuali della domanda di trasporto complessiva relativa all’intero periodo di osservazione del sistema, stimata in 13.099 veicoli/h. La classifica che ne deriva indica anche in questo caso quale scenario ottimale quello limite teorico, evidenziando al contempo come tassi crescenti di disseminazione en-route dell’informazione non necessariamente concorrano a migliorare le prestazioni del sistema.

Riassumendo sinteticamente le considerazioni fin qui svolte, l'esame della risposta del sistema al crescere del livello di carico, secondo le prospettive fornite dai tre parametri di prestazione scelti, sembra confermare come il contesto informativo ottimale ai fini della performance complessiva di sistema sia comunque rappresentato da quella *limite teorica* in cui tutti gli utenti dispongono di una nozione deterministica dello stato di funzionamento del sistema e compiono coerentemente le proprie scelte di viaggio, espressa (secondo l'analogia suggerita nel presente studio), dal modello di assegnazione *a Tutto o Niente* basato sui tempi di viaggio ricavati da una preliminare simulazione di Warm-up - *Fixed using Travel Times calculated during a Warm-up Period* -. Fra i contesti d'informazione preventiva ed adattiva che meglio tendono a questa condizione limite ideale, si riconoscono quelli che prevedono tassi di disseminazione in fase pre-trip ed en-route rispettivamente del 100% e del 25%, resi, nell'ordine, attraverso un modello probabilistico di scelta discreta di tipo *Logit* senza reindirizzamento dinamico e senza precarico della rete (qui denominato *Logit Static*), ed un modello probabilistico di scelta discreta ancora di tipo *Logit* senza precarico della rete ma con reindirizzamento dinamico (qui denominato *Logit Dynamic y% Rerouting*). Per un raffronto immediato si possono utilmente consultare le Tab. 4.16 e Tab. 4.17 seguenti, che riportano, per ciascuna grandezza di risposta, i diversi tassi di somministrazione dell'informazione, rispettivamente prima di intraprendere lo spostamento ed in fase di viaggio, disposti in ordine crescente con i rispettivi livelli critici di carico.

	Performance Parameters			
	tt	TT	speedh	
Pre-trip Diss. %	50%	50%	50%	TD Crit. Thresholds ↓
	62,5%	75%	62,5%	
	75%	62,5%	75%	
	87,5%	87,5%	87,5%	
	100%	100%	100%	
	Thorough Info.	Thorough Info.	Thorough Info.	

**Tab. 4.16 - Confronto fra gli scenari informativi pre-trip.**

Per ciascuna delle prescelte grandezze di risposta, procedendo dall'alto verso il basso la tabella stila la classifica dei diversi tassi di somministrazione preventiva di informazione al crescere delle rispettive soglie di carico critiche. Il riquadro in giallo evidenzia i primi due contesti informativi che producono la migliore prestazione del sistema, così lo scenario deterministico limite teorico si attesta sempre quale ottimale, seguito da quello associato ad un tasso di disseminazione pre-trip del 100%.

	Performance Parameters			
	tt	TT	speedh	
En-route Diss. %	50%	50%	50%	↓ TD Crit. Thresholds
	100%	100%	100%	
	75%	75%	75%	
	No Diss.	25%	No Diss.	
	25%	No Diss.	25%	
	Thorough Info.	Thorough Info.	Thorough Info.	

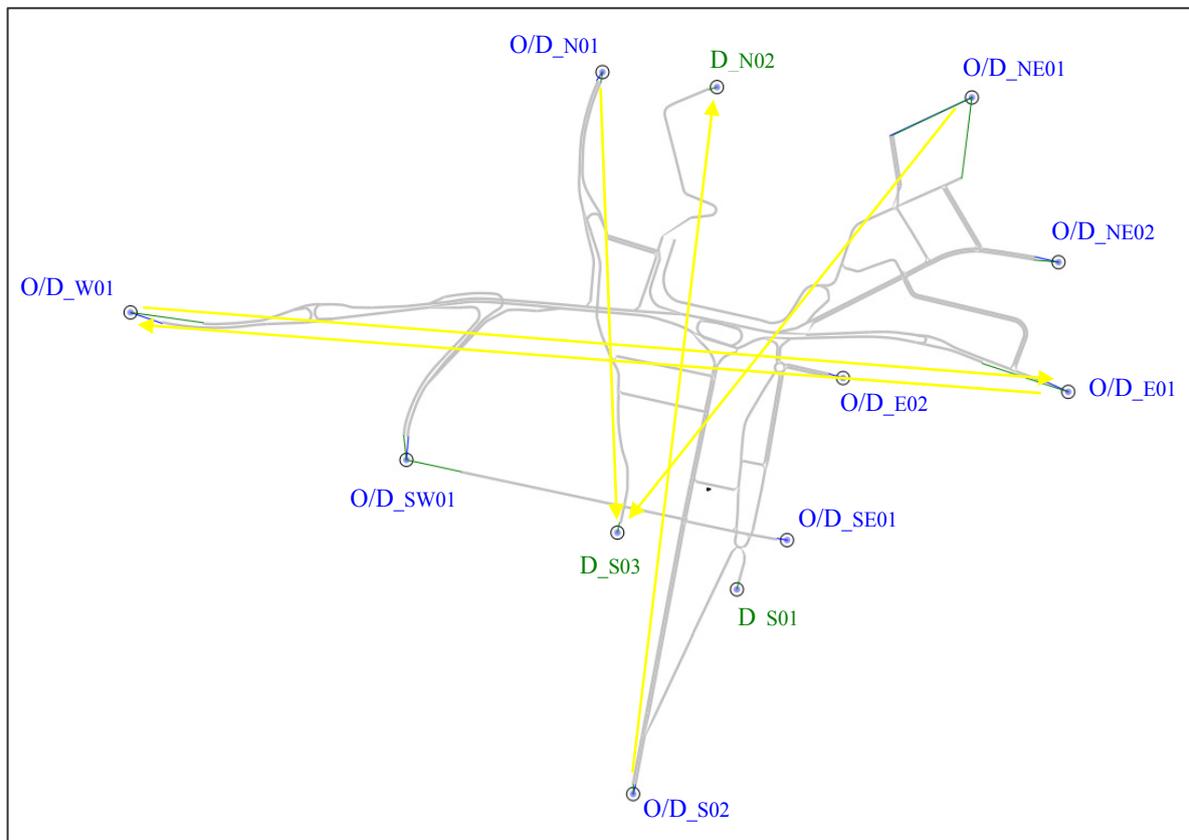
**Tab. 4.17 - Confronto fra gli scenari informativi en-route.**

Per ciascuna delle prescelte grandezze di risposta, procedendo dall'alto verso il basso, la tabella stila la classifica dei diversi tassi di somministrazione d'informazione en-route al crescere delle rispettive soglie di carico critiche. Il riquadro in giallo evidenzia i primi due contesti informativi che producono la migliore prestazione del sistema: così lo scenario deterministico limite teorico si attesta sempre quale ottimale, seguito da quello associato ad un tasso di disseminazione del 25%. Fa eccezione la risposta espressa in termini del tempo totale di viaggio, nel qual caso la mancata somministrazione d'informazione durante lo spostamento sembra sortire effetti migliorativi.

Non sfugge a chi scrive come la validità di tali risultati sia limitata al campo di sollecitazione del sistema (i.e. Domanda di Trasporto), intercettato in corrispondenza dei livelli di prestazione convenzionalmente assunti come 'critici', all'interno del quale (fatte eccezione per alcune oscillazioni legate alla natura intrinsecamente aleatoria del fenomeno studiato), i rapporti reciproci fra i vari contesti informativi si mantengono sostanzialmente invariati attraverso le diverse grandezze di risposta considerate, con il prevalere, quale contesto informativo ottimale, di quello limite teorico in cui gli utenti hanno una nozione deterministica dello stato di funzionamento del sistema. Come metterà meglio in luce l'analisi più dettagliata dei risultati condotta secondo una delle due modalità rispettivamente denominate *Traversal* e *Longitudinal* precisate nell'apposito capitolo, parziale inversione di tali rapporti reciproci si registra una volta varcate determinate soglie di carico, diverse a seconda della grandezza di risposta prescelta, al di là delle quali il modello di carico deterministico soffre dell'incapacità di cogliere fenomeni di congestione ormai sensibilmente accresciuti rispetto a quelli propri del periodo di Warm-up cui si riferisce.

#### 4.4.2.2 Statistiche per coppie O/D

Per avere una visione più compiuta del comportamento del modello si è deciso di rielaborare statisticamente i dati restituiti dal processo di simulazione secondo un ulteriore livello di aggregazione su scala spaziale, alternativo a quello globale, che raggruppa i risultati per coppie origine/destinazione. In particolare, per brevità ed essendo interessati esclusivamente ad ottenere degli indirizzi operativi, sono state considerate solo 5 delle 108 possibili combinazioni di coppie O/D, individuando quelle corrispondenti alle direttrici di spostamento interessate dai volumi di traffico più consistenti, evidenziate in giallo nella figura di seguito riportata.



**Fig. 4.17 - Direttrici di spostamento selezionate per l'analisi della risposta aggregata per coppie di centroidi di origine/destinazione.**

Il modulo software deputato in AIMSUN all'elaborazione statistica degli outputs del processo di simulazione, consente la loro aggregazione su scala spaziale per coppie origine/destinazione. I vettori tracciati in giallo indicano le direttrici orientate di spostamento prescelte per le analisi di seguito condotte. Esse sono interessate da significativi volumi di traffico nell'intervallo di osservazione considerato, rispettivamente: N01/S03 2848 veh/h, NE01/S03 550 veh/h, E01/W01 1800 veh/h, S02/N02 191 veh/h, W01/E01 1426 veh/h.

Su questa scala di aggregazione spaziale, per esigenze di sintesi, si è poi deciso di esaminare la risposta del sistema in termini di una sola grandezza individuata utilmente nel tempo medio chilometrico di spostamento fra la data coppia O/D - *Mean Travel Time* -. Quale orizzonte temporale per l'elaborazione statistica dei dati - *Statistical Interval* - è stato mantenuto ancora l'intero *Periodo di Simulazione*, della durata di 1 ora.

L'analisi dei risultati è stata condotta esclusivamente secondo la modalità semplificata precisata nell'apposito capitolo<sup>8</sup>, basata sulla definizione di livelli limite di ammissibilità della performance di sistema e conseguente identificazione a ritroso delle corrispondenti soglie di carico 'critiche' associate ai diversi contesti informativi implementati. Per ciascuna coppia O/D, sono state quindi convenzionalmente determinate le rispettive soglie critiche della grandezza prescelta per descrivere la risposta del sistema, pari a due volte i valori dalla stessa attinti in corrispondenza del livello di carico pari al 50% dell'intera Domanda di Trasporto (a partire da questo livello di sollecitazione del sistema si manifestano infatti i primi fenomeni di congestionamento).

Per ciascuna delle direttrici evidenziate in figura, nel seguito si riportano apposite tabelle riassuntive degli andamenti del *Tempo Medio di Viaggio* al crescere della domanda di trasporto corrispondenti ai diversi contesti di infomobilità considerati. Ogni tabella precisa inoltre, per ogni modello di assegnazione (i.e. strategia informativa), i livelli di carico corrispondenti alla soglia prestazionale assunta convenzionalmente come critica, ottenuti attraverso interpolazione lineare.

### **Direttrice N01/S03**

Le elaborazioni statistiche condotte sui tempi di viaggio riscontrati lungo l'asse N01/S03, sinteticamente riassunte nella Tab. 4.18, evidenziano come per la maggior parte dei contesti informativi considerati, tale direttrice sia in grado di sostenere livelli di carico addirittura maggiori della domanda di trasporto complessiva considerata senza dar luogo all'attingimento del limite prestazionale convenzionalmente assunto quale soglia di ammissibilità, pari a 2 min/km. Ciò suggerisce una più ridotta incidenza dei fenomeni di congestionamento lungo questa direttrice di spostamento rispetto a quanto si avrà modo di costatare per le altre coppie O/D esaminate più avanti. Fanno eccezione i tre contesti d'informazione preventiva con tassi di disseminazione rispettivamente del 50, 62,5 e 75%,

---

<sup>8</sup> Cfr.3.3.3 Precisazione della modalità di analisi dei risultati, pag.162.

per i quali la soglia prestazionale critica si attinge per livelli di carico, fra loro poco discosti, prossimi al 91% della domanda di spostamento complessiva.

### **Direttrice S02/N02**

La lettura dei dati riportati nella Tab. 4.19 mette in luce come, la strategia informativa che garantisce mediamente la migliore performance lungo i tragitti compresi fra la coppia S02/N02, posticipando l'insorgere della criticità per livelli di carico addirittura superiori alla stessa domanda di trasporto complessiva entro il periodo di osservazione del sistema, coincida con la somministrazione d'informazione in fase pre-trip con tasso di disseminazione dello 87,5%.

Fra i contesti informativi di tipo adattivo invece, quello più efficiente prevede un tasso di disseminazione en-route pari al 100%, per il quale l'attingimento della soglia prestazionale critica (individuata in 4 min e 50 sec per chilometro), si registra in corrispondenza del 98,78% della domanda di trasporto complessiva, con un margine di guadagno comunque minimo (dello 0,4%), rispetto alla mancata somministrazione d'informazione in fase di viaggio.

È interessante notare come il contesto informativo teorico ideale in cui tutti gli utenti del sistema hanno una nozione deterministica del suo funzionamento, a differenza di quanto mediamente osservato su scala globale di sistema, non prefiguri più qui la condizione informativa ottimale.

### **Direttrice NE01/S03**

I dati riportati nella Tab. 4.20 evidenziano come, la strategia informativa che garantisce mediamente la migliore performance lungo i tragitti che collegano la coppia NE01/S03, coincida con quella *limite teorica* che prevede che tutti gli utenti dispongano di una nozione deterministica dello stato di funzionamento del sistema e compiano coerentemente le proprie scelte di viaggio, espressa (secondo l'analogia suggerita nel presente studio), dal modello di assegnazione *a Tutto o Niente* basato sui tempi di viaggio ricavati da una preliminare simulazione di Warm-up - *Fixed using Travel Times calculated during a Warm-up Period* -.

Fra le strategie informative in fase pre-trip, quella che meglio approssima questa condizione ideale, con una soglia di carico 'critica' del 75,42%, prevede la disseminazione dell'informazione sul 100% degli utenti del sistema. Si osservi come lo scostamento dalla configurazione informativa immediatamente seguente in ordine di efficienza della risposta

(corrispondente al tasso di disseminazione preventiva del 75%), sia comunque risibile, pari al solo 0,12%.

Quanto ai contesti informativi di tipo adattivo, invece, si registra una sostanziale equivalenza fra i diversi tassi di somministrazione: le soglie di carico critiche attinte per ciascuno di essi si discostano, infatti, reciprocamente di scarti modesti compresi fra lo  $0,07 \div 0,54\%$ . Il margine di guadagno più pronunciato si registra per il tasso di disseminazione en-route del 100%, per il quale l'attingimento della soglia prestazionale critica (individuata in 4 min e 10 sec per chilometro), si registra in corrispondenza del 73,71% della domanda di trasporto complessiva; tale strategia è comunque peggiorativa rispetto al contesto privo d'informazione in fase di viaggio, con uno scostamento dello 1,71%.

### **Direttrice E01/W01**

Dalla Tab. 4.21 si evince come, la strategia informativa che garantisce mediamente la migliore performance lungo i percorsi che collegano la coppia E01/W01, coincida con quella *limite teorica* resa attraverso un modello di carico della rete deterministico *a Tutto o Niente* basato sui tempi di viaggio ricavati da una preliminare simulazione di Warm-up.

Fra le strategie informative in fase pre-trip, quella che meglio approssima questa condizione ideale, con una soglia di carico 'critica' del 76,52%, corrisponde ad un tasso di disseminazione del 100%.

Quanto ai contesti informativi di tipo adattivo, anche per la direttrice in esame si registra una sostanziale equivalenza fra i diversi tassi di somministrazione, con soglie di carico critiche che si discostano reciprocamente secondo scarti contenuti dell'ordine dello  $0,00 \div 0,42\%$ . In particolare la performance migliore si registra indifferentemente per due valori del tasso di disseminazione en-route rispettivamente del 75% e 100%; per ambedue l'attingimento della soglia prestazionale critica (individuata in 2 min e 26 sec per chilometro), si registra infatti in corrispondenza del 74,71% della domanda di trasporto complessiva. Tali strategie risultano comunque peggiorative rispetto al contesto privo d'informazione in fase di viaggio, con uno scostamento dello 1,81%.

### **Direttrice W01/E01**

La lettura dei dati riportati in Tab. 4.22 mette in luce come, la strategia informativa che garantisce mediamente la migliore performance lungo la direttrice W01/E01, coincida con la somministrazione d'informazione in fase pre-trip secondo un tasso di disseminazione dello 87,5%, per il quale la soglia prestazionale 'critica' di 2 minuti e 20 sec per

chilometro, si attinge in corrispondenza del 96,79% della domanda di spostamento complessiva.

Fra i contesti informativi di tipo adattivo, invece, quello più efficiente prevede un tasso di disseminazione en-route pari al 25%, per il quale l'attingimento del livello di risposta critico si registra in corrispondenza del 94,76% della domanda di trasporto complessiva, con uno scostamento esiguo dello 0,14% rispetto alla soglia attinta in corrispondenza di una disseminazione del 50%. Si noti come le strategie di somministrazione en-route risultino, anche per la coppia O/D qui esaminata, comunque peggiorative rispetto alla mancata somministrazione d'informazione in fase di viaggio, con uno scostamento compreso fra  $0,97 \div 2,31\%$ .

Anche in questo caso, come già riscontrato lungo la direttrice S02/N02, il contesto informativo *teorico ideale* in cui tutti gli utenti del sistema hanno una nozione deterministica del suo funzionamento, non riproduce più la condizione informativa ottimale.

<b>Mean tt (sec/Km) &amp; Network Load Critical Thresholds between N01/S03 (Statistical Interval: Simulation Period)</b>												
		Fixed using Wup	Logit Static & O/D Routes x%				Logit Static	Logit Dynamic y% Rerouting				tt Threshold
			12,5	25	37,5	50		25	50	75	100	
Travel Demand %	25	57,957	58,093	58,123	58,128	58,109	58,140	57,941	57,896	58,015	58,048	<b>120</b>
	50	60,622	60,229	60,272	60,122	60,218	60,198	60,155	60,388	59,994	60,153	
	70	76,270	66,634	85,940	70,102	75,035	68,181	66,393	66,620	71,887	68,430	
	75	101,233	92,939	114,714	112,457	107,671	83,025	82,191	99,640	88,392	105,777	
	80	108,781	114,620	114,800	115,719	114,757	108,652	110,142	110,301	111,229	114,071	
	90	112,967	114,036	<b>115,855</b>	<b>115,712</b>	<b>117,051</b>	114,076	113,021	114,513	114,151	113,702	
	100	115,932	115,276	<b>139,410</b>	<b>141,260</b>	<b>143,440</b>	113,813	114,895	115,369	118,870	117,339	
	<b>TD Crit. Threshold</b>	<b>&gt;100%</b>	<b>&gt;100%</b>	<b>91,76%</b>	<b>91,68%</b>	<b>91,12%</b>	<b>&gt;100%</b>	<b>&gt;100%</b>	<b>&gt;100%</b>	<b>&gt;100%</b>	<b>&gt;100%</b>	

**Tab. 4.18 - Livelli percentuali del carico di attingimento della prefissata soglia critica del tempo medio di viaggio lungo la direttrice N01/S03.**

La tabella riporta per ognuna delle strategie informative considerate, il tempo medio di viaggio per unità di chilometro, valutato, su scala aggregata per la sola coppia di centroidi N01/S03 e con riferimento all'intero periodo di simulazione, al crescere della domanda di trasporto che cimenta la rete. La stessa individua altresì, per interpolazione lineare, le rispettive soglie di carico critiche, intese come i livelli di domanda per i quali, nei diversi contesti informativi, si attinge il prefissato valore critico del parametro di performance del sistema. Quest'ultimo, convenzionalmente identificato con il doppio del tempo medio di viaggio mediamente attinto al 50% di sollecitazione del sistema, resta univocamente fissato a 2 min/Km.

<b>Mean tt (sec/Km) &amp; Network Load Critical Thresholds between S02/N02 (Statistical Interval: Simulation Period)</b>												
		Fixed using Wup	Logit Static & O/D Routes x%				Logit Static	Logit Dynamic y% Rerouting				tt Threshold
			12,5	25	37,5	50		25	50	75	100	
Travel Demand %	25	137,768	140,589	140,855	140,314	138,774	143,044	143,386	142,970	143,094	142,100	<b>290</b>
	50	142,798	144,312	143,523	142,303	143,940	145,834	146,393	145,814	146,671	146,781	
	70	164,226	163,547	164,644	169,930	212,053	161,092	152,653	154,400	158,809	153,662	
	75	177,549	199,274	190,907	194,149	<b>250,532</b>	170,731	196,795	197,463	185,276	203,285	
	80	<b>202,973</b>	211,964	255,681	257,062	<b>330,149</b>	224,396	210,066	236,188	231,512	244,616	
	90	<b>293,571</b>	242,042	<b>250,937</b>	<b>282,262</b>	387,719	<b>216,255</b>	<b>263,620</b>	<b>227,507</b>	<b>235,672</b>	<b>235,299</b>	
	100	508,663	262,736	<b>363,027</b>	<b>515,066</b>	544,753	<b>304,283</b>	<b>298,233</b>	<b>316,505</b>	<b>325,919</b>	<b>297,625</b>	
	<b>TD Crit. Threshold</b>	<b>89,61%</b>	<b>&gt;100%</b>	<b>93,48%</b>	<b>90,33%</b>	<b>77,48%</b>	<b>98,38%</b>	<b>97,62%</b>	<b>97,02%</b>	<b>96,02%</b>	<b>98,78%</b>	

**Tab. 4.19 - Livelli percentuali del carico di attingimento della prefissata soglia critica del tempo medio di viaggio lungo la direttrice S02/N02.**

La tabella riporta per ognuna delle strategie informative considerate, il tempo medio di viaggio per unità di chilometro, valutato, su scala aggregata per la sola coppia di centroidi S02/N02 e con riferimento all'intero periodo di simulazione, al crescere della domanda di trasporto che cimenta la rete. La stessa individua altresì, per interpolazione lineare, le rispettive soglie di carico critiche, intese come i livelli di domanda per i quali, nei diversi contesti informativi, si attinge il prefissato valore critico del parametro di performance del sistema. Quest'ultimo, convenzionalmente identificato con il doppio del tempo medio di viaggio mediamente attinto al 50% di sollecitazione del sistema, resta univocamente fissato a 4 min 50 sec/Km.

<b>Mean tt (sec/Km) &amp; Network Load Critical Thresholds between NE01/S03 (Statistical Interval: Simulation Period)</b>												
		Fixed using Wup	Logit Static & O/D Routes x%				Logit Static	Logit Dynamic y% Rerouting				tt Threshold
			12,5	25	37,5	50		25	50	75	100	
Travel Demand %	25	105,704	108,646	108,178	108,107	107,738	109,328	108,353	108,980	108,645	109,994	<b>250</b>
	50	111,083	124,574	121,173	121,407	<b>121,565</b>	129,613	130,279	130,320	130,598	130,776	
	70	121,934	<b>193,972</b>	155,410	<b>236,252</b>	<b>293,292</b>	161,863	<b>138,282</b>	<b>144,346</b>	<b>152,660</b>	<b>143,563</b>	
	75	132,159	<b>319,529</b>	<b>236,637</b>	<b>282,098</b>	449,649	<b>230,148</b>	<b>300,589</b>	<b>294,901</b>	<b>306,150</b>	<b>287,060</b>	
	80	<b>161,982</b>	493,002	<b>460,667</b>	526,908	425,015	<b>468,381</b>	509,344	536,461	566,308	594,185	
	90	<b>285,428</b>	631,130	726,534	662,271	691,574	598,773	706,806	719,657	765,262	728,194	
	100	547,740	729,356	749,951	865,240	706,271	784,250	784,996	828,602	805,312	803,372	
	<b>TD Crit. Threshold</b>	<b>87,13%</b>	<b>72,23%</b>	<b>75,30%</b>	<b>71,50%</b>	<b>64,96%</b>	<b>75,42%</b>	<b>73,44%</b>	<b>73,51%</b>	<b>73,17%</b>	<b>73,71%</b>	

Tab. 4.20 - Livelli percentuali del carico di attingimento della prefissata soglia critica del tempo medio di viaggio lungo la direttrice NE01/S03.

La tabella riporta per ogni strategia informativa il tempo medio di viaggio, su scala aggregata per la sola coppia di centroidi NE01/S03 e con riferimento all'intero periodo di simulazione, al crescere della domanda di trasporto. Individua altresì, per interpolazione lineare, le rispettive soglie di carico di attingimento del valore critico del parametro di prestazione, identificato con il doppio del tempo medio di viaggio attinto al 50% di sollecitazione del sistema, pari a 4 min 10 sec/Km.

<b>Mean tt (sec/Km) &amp; Network Load Critical Thresholds between E01/W01 (Statistical Interval: Simulation Period)</b>												
		Fixed using Wup	Logit Static & O/D Routes x%				Logit Static	Logit Dynamic y% Rerouting				tt Threshold
			12,5	25	37,5	50		25	50	75	100	
Travel Demand %	25	69,650	69,910	69,554	69,794	69,803	69,690	69,787	69,628	69,914	69,602	<b>146</b>
	50	73,021	73,371	73,003	73,083	<b>73,128</b>	73,216	72,948	73,410	73,173	73,541	
	70	83,748	<b>98,418</b>	<b>91,890</b>	<b>104,688</b>	<b>179,081</b>	92,016	<b>80,476</b>	<b>82,075</b>	<b>87,380</b>	<b>80,470</b>	
	75	<b>98,592</b>	<b>170,376</b>	<b>149,179</b>	<b>163,400</b>	296,880	<b>116,186</b>	<b>156,763</b>	<b>155,821</b>	<b>149,560</b>	<b>149,970</b>	
	80	<b>150,353</b>	203,098	283,683	279,346	476,890	<b>214,126</b>	180,505	257,851	230,215	237,153	
	90	485,815	262,238	274,266	377,110	444,712	208,796	315,455	241,456	259,921	288,556	
	100	474,666	301,480	440,154	592,523	656,498	408,186	354,793	414,137	392,222	340,019	
	<b>TD Crit. Threshold</b>	<b>79,58%</b>	<b>73,31%</b>	<b>74,72%</b>	<b>73,52%</b>	<b>63,76%</b>	<b>76,52%</b>	<b>74,29%</b>	<b>74,33%</b>	<b>74,71%</b>	<b>74,71%</b>	

Tab. 4.21 - Livelli percentuali del carico di attingimento della prefissata soglia critica del tempo medio di viaggio lungo la direttrice E01/W01.

La tabella riporta per ogni strategia informativa il tempo medio di viaggio, su scala aggregata per la sola coppia di centroidi E01/W01 e con riferimento all'intero periodo di simulazione, al crescere della domanda di trasporto. Individua altresì, per interpolazione lineare, le rispettive soglie di carico di attingimento del valore critico del parametro di prestazione, identificato con il doppio del tempo medio di viaggio attinto al 50% di sollecitazione del sistema, pari a 2 min 26 sec/Km.

<b>Mean tt (sec/Km) &amp; Network Load Critical Thresholds between W01/E01 (Statistical Interval: Simulation Period)</b>												
		Fixed using Wup	Logit Static & O/D Routes x%				Logit Static	Logit Dynamic y% Rerouting				tt Threshold
			12,5	25	37,5	50		25	50	75	100	
Travel Demand %	25	67,301	67,415	67,447	67,292	67,417	67,481	67,229	67,613	67,662	67,292	<b>140</b>
	50	69,810	70,186	69,860	70,112	69,984	70,111	70,097	69,877	69,989	70,149	
	70	73,114	81,331	80,399	79,670	83,360	79,530	75,820	78,310	78,493	77,920	
	75	75,389	81,201	84,094	84,574	86,796	79,301	82,918	89,117	81,217	105,595	
	80	77,289	85,022	86,038	89,205	92,391	91,825	87,430	99,781	111,299	100,714	
	90	<b>81,523</b>	<b>90,819</b>	<b>93,761</b>	<b>106,957</b>	<b>121,851</b>	<b>93,045</b>	<b>97,722</b>	<b>120,970</b>	<b>113,971</b>	<b>100,893</b>	
	100	<b>288,331</b>	<b>163,273</b>	<b>289,137</b>	<b>397,561</b>	<b>409,041</b>	<b>174,988</b>	<b>186,551</b>	<b>162,194</b>	<b>189,995</b>	<b>205,209</b>	
	<b>TD Crit. Threshold</b>	<b>92,83%</b>	<b>96,79%</b>	<b>92,37%</b>	<b>91,14%</b>	<b>90,63%</b>	<b>95,73%</b>	<b>94,76%</b>	<b>94,62%</b>	<b>93,42%</b>	<b>93,75%</b>	

Tab. 4.22 - Livelli percentuali del carico di attingimento della prefissata soglia critica del tempo medio di viaggio lungo la direttrice W01/E01.

La tabella riporta per ogni strategia informativa il tempo medio di viaggio al crescere della domanda di trasporto, su scala aggregata per la sola coppia di centroidi W01/E01 e con riferimento all'intero periodo di simulazione. Individua altresì, per interpolazione lineare, le rispettive soglie di carico di attingimento del valore critico del parametro di prestazione, identificato con il doppio del tempo medio di viaggio attinto al 50% di sollecitazione del sistema, pari a 2 min 20 sec/Km.

### 4.4.3 Analisi Trasversale - *Traversal Analysis* -

L'analisi trasversale dei risultati -*Traversal Analysis* - condotta secondo le modalità già precisate al Capitolo 3, attraverso il confronto in ogni passo di carico fra i valori di risposta attinti nei diversi contesti informativi, istituito in termini di scarti nel passo rispetto ad un valore assunto a riferimento, ed identificato con quello corrispondente allo scenario informativo limite teorico in cui tutti gli utenti hanno una conoscenza deterministica dello stato del sistema ed effettuano coerentemente le proprie scelte di percorso, ha fornito un'ulteriore prospettiva utile ad acquisire una visione più esaustiva sul comportamento del sistema Caso Studio nei diversi scenari informativi contemplati. In particolare questo diverso approccio all'esame della risposta del modello ha messo più chiaramente in luce come l'efficacia delle diverse strategie informative cambi al variare del livello di carico ovvero di congestionamento del sistema, vedendo di volta in volta il prevalere dell'una o dell'altra anche in relazione alla grandezza in termini della quale si esamina la risposta della rete. Di seguito si svolgono alcune brevi considerazioni per ambedue i livelli di aggregazione spaziale considerati, corredate da apposite tabelle riassuntive, dalla cui lettura si evince facilmente quanto appena asserito. Come precisato nel capitolo dedicato alla descrizione delle metodologie di analisi, in ogni casella è riportato lo scarto percentuale sul benchmark, del valore di risposta attinto per il livello di carico,  $j$ , e lo scenario informativo,  $i$ , corrispondenti rispettivamente alla colonna ed alla riga di appartenenza, secondo l'espressione di seguito per completezza riprodotta:

$$\Delta_{j,i} = \frac{tt_{j,i} - BenchTrav_i}{BenchTrav_i} \quad (4.1.a)$$

$$BenchTrav_i = tt_{Fixed\ using\ W-up,i} \quad (4.1.b)$$

$$j \in \mathcal{M}, \quad i = 2, \dots, 7$$

#### 4.4.3.1 Statistiche di sistema

Così come fatto nell'analisi per soglie critiche, anche nell'analisi trasversale qui condotta il confronto fra i vari scenari informativi su scala di sistema è stato istituito principalmente in termini delle tre grandezze già menzionate: tempo medio di viaggio per unità di chilometro; tempo totale di attraversamento della rete (somma dei tempi di totali di viaggio di tutti i veicoli transitati nel sistema durante l'intero periodo di simulazione); velocità media armonica.

L'esame dei valori riportati nelle Tab. 4.23-Tab. 4.25, permette di cogliere l'inversione dei rapporti reciproci fra i diversi modelli di disseminazione dell'informazione superate determinate soglie di domanda di spostamento. In giallo sono inoltre evidenziati, per ciascun successivo livello di carico della rete, le strategie informative che permettono di attingere la minima *perdita* o il massimo *guadagno* di performance rispetto alla configurazione limite teorica, assunta a riferimento. È facile così desumere che l'efficacia delle diverse strategie di somministrazione dell'informazione è sensibile al grado di congestionamento del sistema.

Non sorprende fra l'altro riconoscere la coincidenza dei patterns ottenuti per il tempo medio di viaggio e la velocità media armonica, essendo le due grandezze legate da una relazione di sostanziale reciprocità<sup>1</sup>

### 4.4.3.2 Statistiche per coppie O/D

Anche l'analisi trasversale della risposta del sistema sul scala di singole coppie O/D, così come quella per soglie critiche, è stata condotta rispetto al solo tempo medio di viaggio. Dall'esame degli output riportati nelle , si nota immediatamente la discordanza fra le indicazioni tratte per lo stesso parametro di performance su scala globale di sistema e quelle invece ottenute dall'esame di prescelte rotte di spostamento, a sottolineare come una strategia d'informazione vantaggiosa ai fini del funzionamento complessivo del sistema possa comportare il deterioramento della performance lungo determinate direttrici di viaggio.

---

<sup>1</sup> Cfr. A.2.2 Calcolo delle statistiche di sistema, pag.267.

Mean System Travel Time - tt -				% Deviations from Traversal Benchmark - Δ -							
Infomobility Scenarios		Assignment Models		Travel Demand thresholds							
				25%	50%	70%	75%	80%	90%	100%	
<b>a.2.</b>	<b>Pre-trip Dynamic Information</b>		<b>Logit &amp; O/D Routes x%</b>								
a.2.1	50% Dissemination		Logit & O/D Routes 50%	0,46	0,14	45,35	78,62	72,34	24,28	16,84	
a.2.2	62,5% Dissemination		Logit & O/D Routes 37,5%	0,54	-0,02	14,97	38,29	59,91	18,37	15,36	
a.2.3	75% Dissemination		Logit & O/D Routes 25%	0,79	0,06	14,61	31,02	40,81	15,16	-1,03	
a.2.4	87,5% Dissemination		Logit & O/D Routes 12,5%	0,87	0,52	10,46	28,52	38,30	-0,04	-16,56	
a.2.5	100% Dissemination		Logit	1,11	0,66	6,40	5,27	42,75	2,73	-13,91	
<b>a.3.</b>	<b>Pre-trip &amp; En-route Dynamic Information</b>		<b>Logit Dynamic y% Rerouting</b>								
a.3.1	100% Pre-trip Diss.	25% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 25%	0,82	0,33	-3,23	18,99	36,75	9,78	-19,97	
a.3.2		50% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 50%	0,74	0,57	-0,29	31,04	56,58	11,93	-16,98	
a.3.3		75% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 75%	1,07	0,44	3,93	23,86	58,12	11,05	-21,11	
a.3.4		100% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 100%	1,11	0,65	-0,49	32,66	51,28	12,43	-18,50	

**Tab. 4.23 - Scarti percentuali sul benchmark della risposta del sistema su scala globale espressa in termini del tempo medio di viaggio attinta nei diversi scenari informativi.**

La tabella istituisce un confronto fra i diversi contesti informativi attraverso i successivi passi di carico del sistema, valutando lo scarto percentuale della risposta, espressa in termini di tempo medio di viaggio - *Mean System Travel Time* -, rispetto al benchmark di riferimento identificato con lo scenario limite teorico in cui tutti gli utenti hanno una nozione deterministica dello stato del sistema (reso attraverso un meccanismo di assegnazione *All or Nothing* basato sui tempi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up). Le caselle evidenziate in giallo individuano, nelle righe corrispondenti, le strategie informative che assicurano, nel passo di carico della rispettiva colonna, la *minima perdita* o il *massimo guadagno* prestazionale rispetto allo scenario limite teorico assunto quale benchmark.

System Total Travel Time - TT -				% Deviations from Traversal Benchmark - Δ -						
Infomobility Scenarios		Assignment Models		Travel Demand thresholds						
				25%	50%	70%	75%	80%	90%	100%
<b>a.2.</b>	<b>Pre-trip Dynamic Information</b>		<b>Logit &amp; O/D Routes x%</b>							
a.2.1	50% Dissemination		Logit & O/D Routes 50%	1,35	2,67	44,64	66,75	50,63	0,32	0,26
a.2.2	62,5% Dissemination		Logit & O/D Routes 37,5%	1,83	4,03	11,48	28,16	36,22	3,41	7,84
a.2.3	75% Dissemination		Logit & O/D Routes 25%	2,74	3,57	14,81	25,95	11,34	1,30	7,18
a.2.4	87,5% Dissemination		Logit & O/D Routes 12,5%	3,34	5,60	10,87	17,24	18,61	-16,76	13,07
a.2.5	100% Dissemination		Logit	4,14	7,08	12,97	3,77	42,88	-6,47	9,30
<b>a.3.</b>	<b>Pre-trip &amp; En-route Dynamic Information</b>		<b>Logit Dynamic y% Rerouting</b>							
a.3.1	100% Pre-trip Diss.	25% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 25%	4,92	6,48	-0,06	22,21	22,45	-5,24	-7,37
a.3.2		50% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 50%	3,39	6,93	4,09	39,03	51,01	2,81	-0,13
a.3.3		75% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 75%	4,81	6,65	7,29	24,71	53,60	4,19	-10,78
a.3.4		100% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 100%	4,74	8,47	3,56	35,62	27,59	0,95	-2,29

**Tab. 4.24 - Scarti percentuali sul benchmark della risposta del sistema su scala globale espressa in termini del tempo totale di attraversamento della rete attinta nei diversi scenari informativi.**

La tabella istituisce un confronto fra i diversi contesti informativi attraverso i successivi passi di carico del sistema, valutando lo scarto percentuale della risposta, espressa in termini del tempo totale di viaggio - *Total System Travel Time* -, rispetto al benchmark di riferimento identificato con lo scenario limite teorico in cui tutti gli utenti hanno una nozione deterministica dello stato del sistema (reso attraverso un meccanismo di assegnazione *All or Nothing* basato sui tempi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up). Le caselle evidenziate in giallo individuano, nelle righe corrispondenti, le strategie informative che assicurano, nel passo di carico della rispettiva colonna, la *minima perdita* o il *massimo guadagno* prestazionale rispetto allo scenario limite teorico assunto quale benchmark.

System Harmonic Mean Speed - speedh -			% Deviations from Traversal Benchmark - Δ -						
Infomobility Scenarios		Assignment Models	Travel Demand thresholds						
			25%	50%	70%	75%	80%	90%	100%
<b>a.2.</b>	<b>Pre-trip Dynamic Information</b>		<b>Logit &amp; O/D Routes x%</b>						
a.2.1	50% Dissemination	Logit & O/D Routes 50%	-0,46	-0,14	-30,30	-43,38	-42,68	-19,18	-23,68
a.2.2	62,5% Dissemination	Logit & O/D Routes 37,5%	-0,54	0,02	-11,63	-26,93	-37,72	-15,08	-20,35
a.2.3	75% Dissemination	Logit & O/D Routes 25%	-0,79	-0,06	-11,59	-23,07	-29,05	-12,46	-5,64
a.2.4	87,5% Dissemination	Logit & O/D Routes 12,5%	-0,86	-0,52	-8,16	-20,87	-28,39	0,14	5,70
a.2.5	100% Dissemination	Logit	-1,09	-0,65	-6,12	-1,88	-28,78	-2,50	2,88
<b>a.3.</b>	<b>Pre-trip &amp; En-route Dynamic Information</b>		<b>Logit Dynamic y% Rerouting</b>						
a.3.1	25% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 25%	-0,82	-0,33	2,87	-13,32	-24,88	-8,94	10,65
a.3.2	50% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 50%	-0,73	-0,57	-0,01	-22,73	-36,53	-10,69	6,68
a.3.3	75% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 75%	-1,06	-0,44	-4,20	-15,69	-37,13	-9,54	13,10
a.3.4	100% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 100%	-1,09	-0,65	0,22	-23,48	-33,70	-10,81	8,34

**Tab. 4.25 - Scarti percentuali sul benchmark della risposta del sistema su scala globale espressa in termini di velocità media armonica attinta per i diversi scenari informativi in ciascuno dei successivi passi di carico.**

La tabella istituisce un confronto fra i diversi contesti informativi attraverso i successivi passi di carico del sistema, valutando lo scarto percentuale della risposta, espressa in termini di media armonica delle velocità - *Harmonic Mean Speed* -, rispetto al benchmark di riferimento identificato con lo scenario limite teorico in cui tutti gli utenti hanno una nozione deterministica dello stato del sistema (reso attraverso un meccanismo di assegnazione *All or Nothing* basato sui tempi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up). Le caselle evidenziate in giallo individuano, nelle righe corrispondenti, le strategie informative che assicurano, nel passo di carico della rispettiva colonna, la *minima perdita* o il *massimo guadagno* prestazionale rispetto allo scenario limite teorico assunto quale benchmark. Non sorprende riconoscere la coincidenza del pattern qui ottenuto con quello ricavato per il tempo medio di viaggio, essendo le due grandezze legate da una relazione di sostanziale reciprocità.

Mean Travel Time between N01/S03			% Deviations from Traversal Benchmark - Δ -						
Infomobility Scenarios		Assignment Models	Travel Demand thresholds						
			25%	50%	70%	75%	80%	90%	100%
<b>a.2.</b>	<b>Pre-trip Dynamic Information</b>		<b>Logit &amp; O/D Routes x%</b>						
a.2.1	50% Dissemination	Logit & O/D Routes 50%	0,26	-0,67	-1,62	6,36	5,49	3,62	23,73
a.2.2	62,5% Dissemination	Logit & O/D Routes 37,5%	0,30	-0,82	-8,09	11,09	6,38	2,43	21,85
a.2.3	75% Dissemination	Logit & O/D Routes 25%	0,29	-0,58	12,68	13,32	5,53	2,56	20,25
a.2.4	87,5% Dissemination	Logit & O/D Routes 12,5%	0,23	-0,65	-12,63	-8,19	5,37	0,95	-0,57
a.2.5	100% Dissemination	Logit	0,31	-0,70	-10,61	-17,99	-0,12	0,98	-1,83
<b>a.3.</b>	<b>Pre-trip &amp; En-route Dynamic Information</b>		<b>Logit Dynamic y% Rerouting</b>						
a.3.1	25% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 25%	-0,03	-0,77	-12,95	-18,81	1,25	0,05	-0,89
a.3.2	50% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 50%	-0,11	-0,39	-12,65	-1,57	1,40	1,37	-0,49
a.3.3	75% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 75%	0,10	-1,03	-5,75	-12,68	2,25	1,05	2,53
a.3.4	100% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 100%	0,16	-0,77	-10,28	4,49	4,86	0,65	1,21

**Tab. 4.26 - Scarti percentuali sul benchmark del tempo medio di viaggio attinto lungo la direttrice N01/S03 per i diversi scenari informativi in ciascuno dei successivi passi di carico.**

Con riferimento alla sola direttrice di viaggio N01/S03, la tabella istituisce un confronto fra i diversi contesti informativi attraverso i successivi passi di carico del sistema, valutando lo scarto percentuale della risposta, espressa in termini di tempo medio di viaggio - *Mean System Travel Time* -, rispetto al benchmark di riferimento identificato con lo scenario limite teorico in cui tutti gli utenti hanno una nozione deterministica dello stato del sistema (reso attraverso un meccanismo di assegnazione *All or Nothing* basato sui tempi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up). Le caselle evidenziate in giallo individuano, nelle righe corrispondenti, le strategie informative che assicurano, nel passo di carico della rispettiva colonna, la *minima perdita* o il *massimo guadagno* prestazionale rispetto allo scenario limite teorico assunto quale benchmark.

Mean Travel Time between S02/N02			% Deviations from Traversal Benchmark - Δ -						
Infomobility Scenarios		Assignment Models	Travel Demand thresholds						
			25%	50%	70%	75%	80%	90%	100%
<b>a.2.</b>	<b>Pre-trip Dynamic Information</b>		<b>Logit &amp; O/D Routes x%</b>						
a.2.1	50% Dissemination	Logit & O/D Routes 50%	0,73	0,80	29,12	41,11	62,66	32,07	7,10
a.2.2	62,5% Dissemination	Logit & O/D Routes 37,5%	1,85	-0,35	3,47	9,35	26,65	-3,85	1,26
a.2.3	75% Dissemination	Logit & O/D Routes 25%	2,24	0,51	0,25	7,52	25,97	-14,52	-28,63
a.2.4	87,5% Dissemination	Logit & O/D Routes 12,5%	2,05	1,06	-0,41	12,24	4,43	-17,55	-48,35
a.2.5	100% Dissemination	Logit	3,83	2,13	-1,91	-3,84	10,55	-26,34	-40,18
<b>a.3.</b>	<b>Pre-trip &amp; En-route Dynamic Information</b>		<b>Logit Dynamic y% Rerouting</b>						
a.3.1	25% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 25%	4,08	2,52	-7,05	10,84	3,49	-10,20	-41,37
a.3.2	100% Pre-trip Diss. 50% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 50%	3,78	2,11	-5,98	11,22	16,36	-22,50	-37,78
a.3.3	75% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 75%	3,87	2,71	-3,30	4,35	14,06	-19,72	-35,93
a.3.4	100% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 100%	3,14	2,79	-6,43	14,49	20,52	-19,85	-41,49

**Tab. 4.27 - Scarti percentuali sul benchmark del tempo medio di viaggio attinto lungo la direttrice S02/N02 per i diversi scenari informativi in ciascuno dei successivi passi di carico.**

Con riferimento alla sola direttrice di viaggio S02/N02, la tabella istituisce un confronto fra i diversi contesti informativi attraverso i successivi passi di carico del sistema, valutando lo scarto percentuale della risposta, espressa in termini di tempo medio di viaggio - *Mean System Travel Time* -, rispetto al benchmark di riferimento identificato con lo scenario limite teorico in cui tutti gli utenti hanno una nozione deterministica dello stato del sistema (reso attraverso un meccanismo di assegnazione *All or Nothing* basato sui tempi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up). Le caselle evidenziate in giallo individuano, nelle righe corrispondenti, le strategie informative che assicurano, nel passo di carico della rispettiva colonna, la *minima perdita* o il *massimo guadagno* prestazionale rispetto allo scenario limite teorico assunto quale benchmark.

Mean Travel Time between NE01/S03			% Deviations from Traversal Benchmark - Δ -						
Infomobility Scenarios		Assignment Models	Travel Demand thresholds						
			25%	50%	70%	75%	80%	90%	100%
<b>a.2.</b>	<b>Pre-trip Dynamic Information</b>		<b>Logit &amp; O/D Routes x%</b>						
a.2.1	50% Dissemination	Logit & O/D Routes 50%	1,92	9,44	140,53	240,23	162,38	142,29	28,94
a.2.2	62,5% Dissemination	Logit & O/D Routes 37,5%	2,27	9,29	93,75	113,45	225,29	132,03	57,97
a.2.3	75% Dissemination	Logit & O/D Routes 25%	2,34	9,08	27,45	79,06	184,39	154,54	36,92
a.2.4	87,5% Dissemination	Logit & O/D Routes 12,5%	2,78	12,14	59,08	141,78	204,36	121,12	33,16
a.2.5	100% Dissemination	Logit	3,43	16,68	32,75	74,15	189,16	109,78	43,18
<b>a.3.</b>	<b>Pre-trip &amp; En-route Dynamic Information</b>		<b>Logit Dynamic y% Rerouting</b>						
a.3.1	25% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 25%	2,51	17,28	13,41	127,45	214,45	147,63	43,32
a.3.2	100% Pre-trip Diss. 50% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 50%	3,10	17,32	18,38	123,14	231,19	152,13	51,28
a.3.3	75% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 75%	2,78	17,57	25,20	131,65	249,61	168,11	47,02
a.3.4	100% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 100%	4,06	17,73	17,74	117,21	266,82	155,12	46,67

**Tab. 4.28 - Scarti percentuali sul benchmark del tempo medio di viaggio attinto lungo la direttrice NE01/S03 per i diversi scenari informativi in ciascuno dei successivi passi di carico.**

Con riferimento alla sola direttrice di viaggio NE01/S03, la tabella istituisce un confronto fra i diversi contesti informativi attraverso i successivi passi di carico del sistema, valutando lo scarto percentuale della risposta, espressa in termini di tempo medio di viaggio - *Mean System Travel Time* -, rispetto al benchmark di riferimento identificato con lo scenario limite teorico in cui tutti gli utenti hanno una nozione deterministica dello stato del sistema (reso attraverso un meccanismo di assegnazione *All or Nothing* basato sui tempi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up). Le caselle evidenziate in giallo individuano, nelle righe corrispondenti, le strategie informative che assicurano, nel passo di carico della rispettiva colonna, la *minima perdita* o il *massimo guadagno* prestazionale rispetto allo scenario limite teorico assunto quale benchmark.

Mean Travel Time between E01/W01				% Deviations from Traversal Benchmark - Δ -							
Infomobility Scenarios		Assignment Models		Travel Demand thresholds							
				25%	50%	70%	75%	80%	90%	100%	
<b>a.2.</b>	<b>Pre-trip Dynamic Information</b>		<b>Logit &amp; O/D Routes x%</b>								
a.2.1	50% Dissemination		Logit & O/D Routes 50%	0,22	0,15	113,83	201,12	217,18	-8,46	38,31	
a.2.2	62,5% Dissemination		Logit & O/D Routes 37,5%	0,21	0,08	25,00	65,73	85,79	-22,38	24,83	
a.2.3	75% Dissemination		Logit & O/D Routes 25%	-0,14	-0,03	9,72	51,31	88,68	-43,55	-7,27	
a.2.4	87,5% Dissemination		Logit & O/D Routes 12,5%	0,37	0,48	17,52	72,81	35,08	-46,02	-36,49	
a.2.5	100% Dissemination		Logit	0,06	0,27	9,87	17,84	42,42	-57,02	-14,01	
<b>a.3.</b>	<b>Pre-trip &amp; En-route Dynamic Information</b>		<b>Logit Dynamic y% Rerouting</b>								
a.3.1	100% Pre-trip Diss.	25% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 25%	0,20	-0,10	-3,91	59,00	20,05	-35,07	-25,25	
a.3.2		50% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 50%	-0,03	0,53	-2,00	58,05	71,50	-50,30	-12,75	
a.3.3		75% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 75%	0,38	0,21	4,34	51,69	53,12	-46,50	-17,37	
a.3.4		100% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 100%	-0,07	0,71	-3,91	52,11	57,73	-40,60	-28,37	

**Tab. 4.29 - Scarti percentuali sul benchmark del tempo medio di viaggio attinto lungo la direttrice E01/W01 per i diversi scenari informativi in ciascuno dei successivi passi di carico.**

Con riferimento alla sola direttrice di viaggio E01/W01, la tabella istituisce un confronto fra i diversi contesti informativi attraverso i successivi passi di carico del sistema, valutando lo scarto percentuale della risposta, espressa in termini di tempo medio di viaggio - *Mean System Travel Time* -, rispetto al benchmark di riferimento identificato con lo scenario limite teorico in cui tutti gli utenti hanno una nozione deterministica dello stato del sistema (reso attraverso un meccanismo di assegnazione *All or Nothing* basato sui tempi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up). Le caselle evidenziate in giallo individuano, nelle righe corrispondenti, le strategie informative che assicurano, nel passo di carico della rispettiva colonna, la *minima perdita* o il *massimo guadagno* prestazionale rispetto allo scenario limite teorico assunto quale benchmark.

Mean Travel Time between W01/E01				% Deviations from Traversal Benchmark - Δ -						
Infomobility Scenarios		Assignment Models		Travel Demand thresholds						
				25%	50%	70%	75%	80%	90%	100%
<b>a.2.</b>	<b>Pre-trip Dynamic Information</b>		<b>Logit &amp; O/D Routes x%</b>							
a.2.1	50% Dissemination		Logit & O/D Routes 50%	0,17	0,25	14,01	15,13	19,54	49,47	41,87
a.2.2	62,5% Dissemination		Logit & O/D Routes 37,5%	-0,01	0,43	8,97	12,18	15,42	31,20	37,88
a.2.3	75% Dissemination		Logit & O/D Routes 25%	0,22	0,07	9,96	11,55	11,32	15,01	0,28
a.2.4	87,5% Dissemination		Logit & O/D Routes 12,5%	0,17	0,54	11,24	7,71	10,00	11,40	-43,37
a.2.5	100% Dissemination		Logit	0,27	0,43	8,77	5,19	18,81	14,13	-39,31
<b>a.3.</b>	<b>Pre-trip &amp; En-route Dynamic Information</b>		<b>Logit Dynamic y% Rerouting</b>							
a.3.1	100% Pre-trip Diss.	25% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 25%	-0,11	0,41	3,70	9,99	13,12	19,87	-35,30
a.3.2		50% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 50%	0,46	0,10	7,11	18,21	29,10	48,39	-43,75
a.3.3		75% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 75%	0,54	0,26	7,36	7,73	44,00	39,80	-34,11
a.3.4		100% En-route Diss.	Logit Dynamic Rerouting 100%	-0,01	0,49	6,57	40,07	30,31	23,76	-28,83

**Tab. 4.30 - Scarti percentuali sul benchmark del tempo medio di viaggio attinto lungo la direttrice W01/E01 per i diversi scenari informativi in ciascuno dei successivi passi di carico.**

Con riferimento alla sola direttrice di viaggio W01/E01, la tabella istituisce un confronto fra i diversi contesti informativi attraverso i successivi passi di carico del sistema, valutando lo scarto percentuale della risposta, espressa in termini di tempo medio di viaggio - *Mean System Travel Time* -, rispetto al benchmark di riferimento identificato con lo scenario limite teorico in cui tutti gli utenti hanno una nozione deterministica dello stato del sistema (reso attraverso un meccanismo di assegnazione *All or Nothing* basato sui tempi di viaggio restituiti da una simulazione preliminare di warm-up). Le caselle evidenziate in giallo individuano, nelle righe corrispondenti, le strategie informative che assicurano, nel passo di carico della rispettiva colonna, la *minima perdita* o il *massimo guadagno* prestazionale rispetto allo scenario limite teorico assunto quale benchmark.

#### 4.4.4 Conclusioni

Il presente studio ha inteso indagare le potenzialità di strumenti di simulazione virtuale al fine di riprodurre le interazioni fra l'utenza di un sistema di trasporto ed i sistemi di infomobilità. La ricerca non è stata rivolta alla disamina dei diversi ritrovati tecnologici a supporto di strategie di disseminazione dell'informazione: dai sistemi puntuali integrati con l'infrastruttura di trasporto (quali *Variable Message Signs*), ai dispositivi di navigazione assistita in dotazione ai veicoli (computers di bordo), fino alla galassia di applicazioni offerta da smartphones e dispositivi palmari ormai ampiamente diffusi. Essa ha inteso, piuttosto, concentrarsi sugli aspetti della modellazione dell'informazione, ancora non pienamente risolti e purtuttavia di rilevanza chiave ai fini della piena applicabilità di questa recente e promettente branca della teoria dei sistemi di trasporto. In particolare si è volutamente scelto di esaminare gli strumenti procedurali e modellistici offerti da softwares specificamente elaborati per impieghi trasportistici, in contrapposizione alle piattaforme di simulazione ad agenti dalla struttura aperta ed adattabile a qualsiasi tipo di applicazione non necessariamente attinente all'ambito dei trasporti. Dagli stessi scopi della ricerca è scaturita naturalmente la scelta dell'ambito di simulazione *microscopico* quale livello di dettaglio più idoneo a cogliere l'interazione fra utenti ed informazione, dovendo necessariamente disporre di uno strumento in grado di modellare esplicitamente il comportamento di scelta degli utenti così come l'interazione dinamica fra i singoli veicoli. In particolare si è deciso di avvalersi del Microsimulatore AIMSUN prodotto dalla software house catalana TSS - Transport Simulation Systems.

Un primo sforzo è consistito proprio nel forzare l'architettura procedurale ben strutturata propria dei softwares appositamente concepiti per modellare sistemi di trasporto, al fine di riprodurre la presenza di sistemi informativi. Così lo studio approfondito degli strumenti e delle procedure predisposti in ambiente AIMSUN ha permesso di riconoscere come i modelli di assegnazione implementati siano in grado, in certa misura, di emulare il comportamento di scelta del percorso attuato dagli utenti in presenza d'informazione somministrata in tempo reale ed, opportunamente abbinati, consentano di riprodurre molteplici scenari informativi. In particolare l'appropriata combinazione fra modelli di scelta discreta di tipo probabilistico e procedure di precarico della rete si è dimostrata efficace ai fini della modellazione del *grado di penetrazione* dell'informazione nel bacino di utenti di un sistema di trasporto, ovvero del tasso di disseminazione dell'informazione sia in fase *pre-trip* che *en-route*.

D'altro canto si è potuto constatare come softwares di questo tipo, se da un lato si presentano quali strumenti ideali per riprodurre i comportamenti di scelta attuati dagli utenti di un sistema di trasporto e l'interazione dinamica fra i veicoli, sulla scorta del riscontro rigoroso con i modelli formulati dalla Teoria del Traffico, dall'altro non dispongono di modelli adeguati per riprodurre la variabilità del *grado di compliance* degli utenti all'informazione somministrata. In posizione esattamente speculare si pongono i softwares di simulazione ad agenti che, consentendo di modellare con estrema libertà tutte le possibili condizioni di feedback dell'utenza all'informazione (a vantaggio del principio di massima verosimiglianza cui ogni modellatore anela), richiedono però come contropartita un notevole sforzo per riprodurre il moto e l'interazione dinamica dei singoli veicoli, non essendo predisposti appositi modelli supportati dai necessari fondamenti teorici.

In definitiva, riassumendo sinteticamente gli esiti del presente studio, si può affermare quanto segue:

- i *Modelli di Assegnazione* predisposti su scala *Microscopica* sono in grado di emulare il comportamento attuato dagli utenti nel formulare le proprie scelte di viaggio in presenza di sistemi di disseminazione dell'informazione in tempo reale;
- la somministrazione d'informazione può migliorare la prestazione di sistemi di trasporto di tipo privato;
- l'efficacia delle diverse strategie di infomobilità varia col livello di carico del sistema (i.e. *grado di congestione*);
- una stessa strategia d'informazione può dar luogo ad effetti differenti a seconda della scala spaziale di osservazione del sistema (i.e. su scala globale può rivelarsi complessivamente migliorativa, viceversa su scala più ridotta può dar luogo ad aggravii locali dello stato di funzionamento della rete che non si colgono attraverso una visione d'insieme);
- la combinazione appropriata dei modelli di assegnazione predisposti in AIMSUN si è dimostrata efficace nel riprodurre diversi *gradi di disseminazione* dell'informazione (i.e. *penetrazione di mercato* dei dispositivi di infomobilità);
- ad oggi i softwares appositamente elaborati per la *Microsimulazione del Traffico Veicolare*, quali AIMSUN, non dispongono di adeguati strumenti di modellazione del grado di osservanza - *compliance* - degli utenti all'informazione.

## Bibliografia di Capitolo

- [1] “Microsimulator and Mesosimulator in Aimsun 6.1”, *User’s Manual*, TSS-Transport Simulation Systems<sup>©</sup>, October 2009.
- [2] “Piano Generale del Traffico Urbano della Città di Catania”, Relazione Generale, 2012.
- [3] Rotondi, A., Pedroni, P., Piegatolo, A., “Probabilità, Statistica e Simulazione”, Springer-Verlag, 2005.



## APPENDICE

### A. Elaborazione statistica dei risultati in Aimsun

#### A.1 Inquadramento

Il microsimulatore di Aimsun, attraverso un apposito modulo software, raccoglie ed elabora statisticamente i valori delle grandezze che descrivono la risposta del sistema simulato, secondo più livelli di aggregazione relativi ai diversi ambiti del modello:

- *Temporale* - Aggregando i valori sull'intero periodo di simulazione o sui singoli intervalli di rilevamento dati, ovvero su due orizzonti temporali: *global* (dall'inizio alla fine della simulazione), *periodic* (nel qual caso le medie prodotte si riferiscono ai singoli intervalli di raccolta dati, stabiliti dall'utente del software);
- *Spaziale* - Aggregando i dati raccolti durante la simulazione su diverse scale rispettivamente: per i singoli archi stradali (*section & turning statistics*), per ciascun percorso (*subpath* o *stream statistics*), per coppie O/D (*O/D statistics*, in un modello *Route-Based*), o più complessivamente con riferimento all'intera rete (*system statistics*);
- *Categoria di utenti* - Distinguendo o meno per *vehicle types* e, qualora implementate, anche per linee di trasporto pubblico (*public transport lines*).

Le modalità di raccolta, memorizzazione ed in parte aggregazione dei dati desunti dalla simulazione vanno impostate in fase preliminare, al livello globale di *Scenario*, nella tabfolder '*Output*', ove, negli appositi campi, è possibile precisare gli intervalli di tempo ai quali rilevare le misure d'interesse - *Statistics Interval* -, la tipologia di database (*Access*, *SQLite*, *QODBC*, etc.), e la sua localizzazione, nonché i livelli di aggregazione spaziale desiderati.

Nei paragrafi seguenti, a scopo esemplificativo, si affronterà dapprima l'esposizione quindi la descrizione analitica delle grandezze statistiche attraverso le quali è possibile esprimere la risposta del modello in ambiente Aimsun, per due livelli di aggregazione spaziale e temporale. Per fornire un primo quadro sintetico di riferimento circa le grandezze afferenti alle diverse entità spaziali del modello, si riporta di seguito una tabella riassuntiva, demandando ai paragrafi successivi la disamina puntuale delle stesse.

Response Characteristics for each Model Element				
	Section & Turnings	Streams	O/D Couples	System
Flow	✓	✓	✓	✓
Density	✓			✓
Mean Speed	✓	✓	✓	✓
Harmonic Mean Speed	✓	✓	✓	✓
Travel Time	✓	✓	✓	✓
Delay Time	✓	✓	✓	✓
Stop Time	✓	✓	✓	✓
Number of Stops	✓	✓	✓	✓
Mean Queue Length	✓			
Max Queue Length	✓			
Total Travel	✓	✓	✓	✓
Total Travel Time	✓	✓	✓	✓
Lost Vehicles			✓	
Fuel Consumed	✓	✓	✓	✓
Pollution Emmitted	✓	✓	✓	✓

## A.2 Statistiche di sistema - *System Statistics* -

### A.2.1 Definizioni

Di seguito si elencano le grandezze attraverso le quali è possibile descrivere la risposta globale del sistema, relativa cioè allo stato della rete esaminata nel suo complesso:

- *Densità Media (Density)*. Numero medio di veicoli per chilometro nell'intera rete.
- *Velocità Media (Mean Speed)*. Media delle velocità di tutti i veicoli che hanno attraversato la rete nell'intervallo di riferimento. Le velocità dei singoli veicoli impiegate nel calcolo sono, a loro volta, le rispettive velocità medie di viaggio.
- *Media Armonica delle Velocità (Harmonic Mean Speed)*. Media armonica delle velocità medie di tutti i veicoli che hanno attraversato la rete nell'intervallo di riferimento.
- *Tempo Medio di Viaggio (Average Travel Time)*. Media dei tempi di viaggio per chilometro di tutti i veicoli che hanno attraversato la rete; rappresenta il tempo medio che il generico veicolo impiega per percorrere un chilometro all'interno del sistema. L'operazione di media è eseguita sulla distanza percorsa e sul numero di veicoli.

- *Ritardo Medio (Delay Time)*. Media dei ritardi accumulati per chilometro da tutti i veicoli che hanno attraversato la rete. L'operazione di media è eseguita sulla distanza percorsa e sul numero di veicoli. Per ritardo s'intende la differenza tra il tempo di viaggio effettivo ed il *tempo di viaggio atteso (Expected Travel Time)*, definito come il tempo che il singolo veicolo impiegherebbe ad attraversare la rete in condizioni di viaggio ideali, i.e. condizioni di flusso libero (*free flow conditions*).
- *Tempo medio di attesa in arresto (Stop Time)*. Tempo medio di attesa in arresto per chilometro di tutti i veicoli che hanno attraversato la rete. L'operazione di media è eseguita sulla distanza percorsa e sul numero di veicoli.
- *Numero medio di arresti (Number of Stops)*. Numero medio di arresti sulla distanza percorsa e sul numero di veicoli transitati nella rete.
- *Distanza Totale Percorsa (Total Travel)*. Numero totale di chilometri percorsi da tutti i veicoli che hanno attraversato la rete.
- *Tempo di Viaggio Complessivo (Total Travel Time)*. Somma dei tempi di viaggio di tutti i veicoli transitati lungo la rete, durante l'intervallo di osservazione del sistema.
- *Carburante Consumato (Fuel Consumed)*. Numero totale di litri di carburante utilizzati da tutti i veicoli che hanno attraversato la rete. Tale valore è fornito solo qualora sia stato preliminarmente attivato, al livello di Scenario, il modello 'Fuel Consumption' ([Dynamic Scenario/Output/Details/Main/Environmental Models/Fuel Consumption](#)).
- *Emissione di Inquinanti (Pollution Emitted)*. Per ciascun agente inquinante, emissione totale (in chilogrammi), di tutti i veicoli transitati lungo la rete. Valore fornito solo qualora sia stato preliminarmente attivato, al livello di Scenario, il modello 'Pollution Emission' ([Dynamic Scenario/Output/Details/Main/Environmental Models/Pollution Emission](#)).

Tali grandezze sono il risultato dell'elaborazione, al livello più generale di aggregazione possibile (ovvero di sistema), delle misure ottenute per i singoli veicoli, elaborazione per lo più di tipo statistico ad eccezione fatta dei parametri: *Total Travel*, *Total Travel Time*, *Fuel Consumed*, *Pollution Emitted*, desunti invece da operazioni algebriche deterministiche.

Per coerenza nel resto della trattazione si manterrà la notazione adottata nell'ambiente di simulazione di Aimsun.

## A.2.1 Misure relative ai singoli veicoli

Di seguito si elencano i dati relativi ai singoli veicoli che occorre rilevare al fine di produrre le statistiche di sistema:

$TEN_i$  - *Entrance Time* - Istante d'ingresso nella rete del veicolo  $i$ -esimo, espresso in secondi

$TEX_i$  - *Exit Time* - Istante di uscita dalla rete del veicolo  $i$ -esimo, espresso in secondi.

$D_i$  - *Total Distance Travelled* - Distanza totale percorsa dal veicolo  $i$ -esimo nella rete, espressa in metri.

$TDT_i$  - *Total Delay Time* - Ritardo totale accumulato dal veicolo  $i$ -esimo lungo la rete, espresso in secondi.

$TST_i$  - *Total Stop Time* - Tempo totale trascorso in fase di arresto dal veicolo  $i$ -esimo lungo la rete, espresso in secondi.

$TNS_i$  - *Total Number of Stops* - Numero totale di arresti del veicolo  $i$ -esimo lungo la rete.

$TFC_i$  - *Total Fuel Consumed* - Carburante complessivamente consumato dal veicolo  $i$ -esimo, espresso in litri.

$TPE_{i,j}$  - *Total  $j$ -th Pollutant Emission* - Quantità del  $j$ -esimo inquinante complessivamente emessa dal veicolo  $i$ -esimo, espressa in chilogrammi.

A partire da queste misure rilevate durante la simulazione, il modulo software deputato provvede (nell'istante in cui il veicolo esce dalla rete), al calcolo delle seguenti grandezze, associate ancora al singolo veicolo:

$TT_i$  - *Vehicle Average Travel Time* - Tempo medio di viaggio per chilometro del veicolo  $i$ -esimo (sec/Km):

$$TT_i = \frac{TEX_i - TEN_i}{D_i} \cdot 1000 \quad (A.1)$$

$DT_i$  - *Vehicle Average Delay Time* - Ritardo medio per chilometro accumulato dal veicolo  $i$ -esimo (sec/Km):

$$DT_i = \frac{TDT_i}{D_i} \cdot 1000 \quad (A.2)$$

$S_i$  - *Vehicle Average Speed* - Velocità media di crociera del veicolo  $i$ -esimo lungo la rete (m/sec):

$$S_i = \frac{D_i}{TEX_i - TEN_i} \quad (A.3)$$

*HS<sub>i</sub>* - *Harmonic Mean Speed Vehicle Term* - Contributo del singolo veicolo *i*-esimo alla velocità armonica media, espresso dall'inverso della sua velocità media (sec/m):

$$HS_i = \frac{1}{S_i} = \frac{TEX_i - TEN_i}{D_i} \quad (A.4)$$

*ST<sub>i</sub>* - *Vehicle Average Stop Time* - Tempo medio trascorso in fase di arresto dal veicolo *i*-esimo per chilometro (sec/Km):

$$ST_i = \frac{TST_i}{D_i} \cdot 1000 \quad (A.5)$$

*NS<sub>i</sub>* - *Vehicle Average Number of Stops* - Numero medio di arresti per chilometro del veicolo *i*-esimo:

$$NS_i = \frac{TNS_i}{D_i} \cdot 1000 \quad (A.6)$$

I dati fin qui elencati, ottenuti per i singoli veicoli, siano essi grezzi (i.e. di origine), o frutto di una preliminare elaborazione matematica, sono denominati nella terminologia adottata in ambiente Aimsun, *Vehicle Variables*.

## A.2.2 Calcolo delle statistiche di sistema

I dati raccolti per i singoli veicoli durante la simulazione (*Vehicle Variables*), vengono quindi elaborati statisticamente dal modulo software appositamente dedicato, secondo i due livelli di aggregazione temporale previsti:

- singolo intervallo di rilevamento dati (*Statistical Interval*);
- intero periodo di simulazione (*Simulation Period*);

rispettivamente definiti, il primo nell'editor del *Dynamic Scenario (Dynamic Scenario/General/Statistics/Interval)*, il secondo nell'editor della *Traffic Demand* assegnata allo Scenario (*Traffic Demand/Main/Set Time*).

Denotati dunque rispettivamente:

*I* - *Statistics Interval* - Intervallo di rilevamento dati e produzione delle statistiche (sec);

*N<sub>sys</sub>* - Numero di veicoli che escono dal sistema durante l'intervallo di tempo *I*;

le grandezze statistiche in termini delle quali è possibile, in definitiva, esprimere la risposta globale del sistema sono:

$F_{sys}$  - *System Mean Flow* - Flusso medio relativo all'intera rete (veh/h):

$$F_{sys} = \frac{N_{sys}}{I} \cdot 3600 \quad (A.7)$$

$DEN_{sys}$  - *System Mean Density* - Densità media relativa all'estensione complessiva di tutte le corsie appartenenti a tutte le sezioni che costituiscono la rete (veh/Km):

$$DEN_{sys} = \frac{1}{L} \cdot \frac{\sum_{t_j \in T} (t_j - t_{j-1}) \cdot NVeh_{t_{j-1}}}{I} \cdot 1000 \quad (A.8)$$

ove si sono denotati con:

$L$  la lunghezza totale delle corsie di tutti gli archi della rete (m);

$T = [0, t_1, \dots, t_j, \dots, I]$  l'insieme degli istanti di tempo, compresi entro l'intervallo  $I$ , in corrispondenza dei quali il numero di veicoli presenti all'interno della rete varia (i.e. *Simulation Cycle*, da impostare nell'apposito campo predisposto in [Experiment/Route Choice/Cycle](#));

$NVeh_{t_j}$  il numero di veicoli all'interno della rete all'istante  $t_j$ .

In questa espressione il secondo fattore a secondo membro rappresenta la media del numero di veicoli presenti nella rete pesata sui successivi intervalli di tempo (compresi nell'intervallo  $I$ ), entro i quali tale numero si mantiene costante.

$S_{sys}$  - *System Average Speed* - Velocità media chilometrica calcolata sul numero di veicoli transitati lungo la rete nell'intervallo di tempo  $I$  (Km/h):

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sys}} S_i}{N_{sys}} \cdot 3.6 \quad (A.9)$$

$HS_{sys}$  - *System Harmonic Mean Speed* - Media armonica delle velocità medie dei veicoli che hanno attraversato il sistema nell'intervallo  $I$  (Km/h):

$$HS_{sys} = \frac{N_{sys}}{\sum_{i=1}^{N_{sys}} HS_i} \cdot 3.6 \quad (A.10)$$

$TT_{sys}$  - *System Average Travel Time* - Tempo medio di viaggio per chilometro dei veicoli transitati lungo la rete nell'intervallo di tempo  $I$  (sec):

$$TT_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sys}} TT_i}{N_{sys}} \quad (A.11)$$

$DT_{sys}$  - *System Average Delay Time* - Ritardo medio per chilometro e per veicolo (sec/Km):

$$DT_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sys}} DT_i}{N_{sys}} \quad (A.12)$$

$ST_{sys}$  - *System Average Stop Time* - Tempo medio trascorso in arresto per chilometro calcolato sul numero di veicoli che hanno attraversato la rete durante l'intervallo di tempo  $I$  (sec/Km):

$$ST_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sys}} ST_i}{N_{sys}} \quad (A.13)$$

$NS_{sys}$  - *System Average Number of Stops* - Numero medio di arresti per chilometro e per veicolo:

$$NS_{sys} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sys}} NS_i}{N_{sys}} \quad (A.14)$$

Accanto a queste vengono altresì prodotte alcune grandezze di natura deterministica, di seguito elencate:

$TotTrav_{sys}$  - *System Total Distance Travelled* - Numero complessivo di chilometri percorsi da tutti i veicoli transitati nella rete durante l'intervallo di tempo  $I$  (Km):

$$TotTrav_{sys} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{N_{sys}} D_i \quad (A.15)$$

$TotTT_{sys}$  - *System Total Travel Time* - Somma dei tempi di viaggio di tutti i veicoli che hanno attraversato la rete nell'intervallo  $I$  (sec):

$$TotTT_{sys} = \sum_{i=1}^{N_{sys}} (TEX_i - TEN_i) \quad (A.16)$$

*FuelCon<sub>sys</sub>* - *System Total Fuel Consumed* - Quantità complessiva di carburante utilizzata dai veicoli transitati lungo la rete nell'intervallo di tempo *I* (litri):

$$FuelCons_{sys} = \sum_{i=1}^{N_{sys}} TFC_i \quad (A.17)$$

*PollEm<sub>sys,j</sub>* - *System Total jth Pollutant Emission* - Quantità del *j*-esimo inquinante complessivamente immessa in atmosfera dall'insieme dei veicoli che hanno attraversato la rete durante l'intervallo di tempo *I* (Kg):

$$PollEm_{sys,j} = \sum_{i=1}^{N_{sys}} TPE_{i,j} \quad (A.18)$$

## A.3 Statistiche di tragitto - *Stream Statistics* -

### A.3.1 Definizioni

Nell'organizzazione del modello di rete, Aimsun distingue due tipi di oggetti 'percorso', rispettivamente:

1. *Paths*;
2. *Subpaths* o *Statistical Streams*.

diversi sia dal punto di vista topologico che funzionale.

Per quanto concerne l'aspetto topologico, definisce più strettamente *Path* (*Percorso*), ciascuno dei possibili tracciati che collegano una data coppia di centroidi O/D, come tale costituito, oltre che da tutte le sezioni intermedie (secondo una delle possibili configurazioni), anche dalle sezioni di ingresso ed uscita dalla rete, a loro volta collegate rispettivamente ai centroidi di origine e destinazione tramite opportuni connettori - *Connectors* -; definisce, invece, *Subpath* o *Statistical Stream* una qualsivoglia successione di sezioni consecutive mutuamente connesse (tramite *joints*, *junctions* o singole *turnings*), compresa fra due nodi non necessariamente coincidenti con centroidi di origine e destinazione.

Quanto invece alla funzione assoluta, mentre i *paths* sono utilizzati nel processo di assegnazione della domanda di viaggio - *Trip Assignment* -, dall'apposito modello di scelta del percorso - *Route Choice Model* -; le *Statistical Streams*, come suggerisce il nome stesso, rispondono esclusivamente all'esigenza di produrre statistiche relative a determinati tratti della rete ritenuti di particolare interesse dal modellatore.

Poiché le considerazioni svolte nel seguito della trattazione hanno validità generale, senza tema di ingenerare confusione, per brevità ci si riferirà anche ai *subpaths* o *statistical streams* con il termine *percorso*.

Le grandezze che discendono dall'elaborazione statistica delle misure relative ai soli veicoli assegnati ad un determinato percorso, ovvero aggregando i veicoli in base al percorso seguito, sono elencate di seguito:

- *Flusso Medio (Mean Flow)*. Numero medio orario di veicoli transitati lungo il percorso durante l'intero periodo di simulazione.
- *Velocità Media (Mean Speed)*. Media delle velocità di tutti i veicoli transitati lungo il percorso nell'intervallo di riferimento. Le velocità dei singoli veicoli impiegate nel calcolo sono, a loro volta, le rispettive velocità medie di viaggio.
- *Media Armonica delle Velocità (Harmonic Mean Speed)*. Media armonica delle velocità medie di tutti i veicoli che hanno viaggiato lungo il percorso nell'intervallo di riferimento.
- *Tempo Medio di Viaggio (Average Travel Time)*. Media dei tempi di viaggio di tutti i veicoli transitati lungo il percorso, ovvero: tempo medio impiegato dal generico veicolo per percorrere il tragitto in esame.
- *Ritardo Medio (Delay Time)*. Media dei ritardi accumulati lungo il percorso da tutti i veicoli ivi transitati durante l'intervallo di riferimento. Per ritardo si intende la differenza tra il tempo di viaggio effettivo ed il *tempo di viaggio atteso - Expected Travel Time* -, a sua volta definito come il tempo che il singolo veicolo impiegherebbe a completare il percorso in condizioni di viaggio ideali (i.e. condizioni di flusso libero - *free flow conditions* -).
- *Tempo medio di attesa in arresto (Stop Time)*. Valore medio dei tempi di attesa in arresto di tutti i veicoli transitati lungo il percorso nell'intervallo di riferimento.
- *Numero medio di arresti (Number of Stops)*. Numero medio di arresti di tutti i veicoli che hanno seguito il percorso in esame.

Alle grandezze fin qui elencate si aggiungono quelle ottenute dai relativi dati di origine (sempre aggregati in base al percorso), tramite semplici operazioni di natura deterministica:

- *Distanza Totale Percorsa (Total Travel)*. Distanza complessivamente percorsa da tutti i veicoli che hanno seguito il percorso in esame.
- *Tempo di Viaggio Complessivo (Total Travel Time)*. Somma dei tempi di viaggio lungo il dato percorso di tutti i veicoli ivi transitati durante l'intervallo di tempo di riferimento.

- *Carburante Consumato (Fuel Consumed)*. Quantità complessiva di carburante (espressa in litri), utilizzata per attraversare il percorso prescelto, dall'insieme di tutti i veicoli ivi transitati durante l'intervallo di osservazione del sistema. Valore fornito solo qualora sia stato preliminarmente attivato, al livello di Scenario, il modello '*Fuel Consumption*' (*Dynamic Scenario/Output/Details/Main/Environmental Models/Fuel Consumption*).
- *Emissione di Inquinanti (Pollution Emitted)*. Per ciascun agente inquinante, emissione totale (espressa in chilogrammi), di tutti i veicoli transitati lungo il percorso. Valore calcolato solo qualora sia stato preliminarmente attivato, al livello di Scenario, il modello '*Pollution Emission*' (*Dynamic Scenario/Output/Details/Main/Environmental Models/Pollution Emission*).

Per coerenza nel resto della trattazione si manterrà la notazione adottata nell'ambiente di simulazione di Aimsun.

### A.3.2 Misure relative ai singoli veicoli

I dati raccolti dal microsimulatore per ogni veicolo lungo ciascun percorso, sono:

- TEN<sub>i</sub>* - *Entrance Time* - Istante di ingresso del veicolo *i*-esimo nel relativo percorso (sec).
- TEX<sub>i</sub>* - *Exit Time* - Istante di uscita del veicolo *i*-esimo dal relativo percorso (sec).
- Di* - *Total Distance Travelled* - Distanza totale percorsa dal veicolo *i*-esimo lungo il tragitto, si tratta dunque di una misura della lunghezza del percorso (m).
- TDT<sub>i</sub>* - *Total Delay Time* - Ritardo totale accumulato dal veicolo *i*-esimo lungo il percorso, somma dei ritardi totalizzati in tutte le sezioni che compongono il percorso (sec).
- TST<sub>i</sub>* - *Total Stop Time* - Tempo totale trascorso in fase di arresto dal veicolo *i*-esimo lungo il percorso, somma dei tempi di arresto totalizzati nelle sezioni che compongono il percorso (sec).
- TNS<sub>i</sub>* - *Total Number of Stops* - Numero totale di arresti effettuati dal veicolo *i*-esimo lungo tutte le successive sezioni del relativo percorso.
- TFC<sub>i</sub>* - *Total Fuel Consumed* - Carburante complessivamente consumato dal veicolo *i*-esimo lungo il percorso, somma dei consumi registrati in tutte le sezione compongono il tragitto (litri).

$TPE_{i,j}$  - *Total j-th Pollutant Emission* - Quantità del  $j$ -esimo inquinante complessivamente immessa in atmosfera dal veicolo  $i$ -esimo lungo il percorso, somma delle relative emissioni rilevate in tutte le sezioni appartenenti al percorso (Kg).

A partire da questi ultimi, il modulo software deputato provvede (nell'istante in cui il singolo veicolo completa il percorso), al calcolo delle seguenti grandezze, riferite ancora al singolo veicolo:

$TT_i$  - *Vehicle Average Travel Time* - Tempo medio di viaggio del veicolo  $i$ -esimo (sec):

$$TT_i = TEX_i - TEN_i \quad (A.19)$$

$DT_i$  - *Vehicle Average Delay Time* - Ritardo medio accumulato dal veicolo  $i$ -esimo (sec):

$$DT_i = TDT_i \quad (A.20)$$

$S_i$  - *Vehicle Average Speed* - Velocità media di crociera del veicolo  $i$ -esimo lungo relativo percorso (m/sec):

$$S_i = \frac{D_i}{TEX_i - TEN_i} \quad (A.21)$$

$HS_i$  - *Harmonic Mean Speed Vehicle Term* - Contributo del singolo veicolo  $i$ -esimo alla velocità armonica media, espresso dall'inverso della sua velocità media (sec/m):

$$HS_i = \frac{1}{S_i} = \frac{TEX_i - TEN_i}{D_i} \quad (A.22)$$

$ST_i$  - *Vehicle Average Stop Time* - Tempo medio trascorso in fase di arresto dal veicolo  $i$ -esimo (sec):

$$ST_i = TST_i \quad (A.23)$$

$NS_i$  - *Vehicle Average Number of Stops* - Numero medio di arresti del veicolo  $i$ -esimo:

$$NS_i = TNS_i \quad (A.24)$$

I dati fin qui elencati relativi ai singoli veicoli, siano essi desunti da misure dirette sul modello (i.e. di origine), o frutto di una preliminare elaborazione matematica, sono denominati nella terminologia adottata in ambiente Aimsun, *Vehicle Variables*.

### A.3.3 Calcolo delle statistiche di tragitto

Servendosi delle misure raccolte in fase di simulazione per i singoli veicoli - *Vehicle Variables* -, lungo ciascuna *statistical stream* o *subpath*, il modulo software dedicato procede all'elaborazione statistica delle stesse su ambedue gli orizzonti temporali previsti:

- singolo intervallo di rilevamento dati (*Statistics Interval*);
- intero periodo di simulazione (*Simulation Period*);

impostati dall'utente del software negli appositi campi predisposti rispettivamente nell'editor del *Dynamic Scenario* (*Dynamic Scenario/General/Statistics/Interval*), ed in quello della *Traffic Demand* assegnata allo scenario (*Traffic Demand /Main/Set Time*).

Denotati dunque con:

$I$  - *Statistics Interval* - Intervallo di rilevamento dati e produzione delle statistiche misurato in secondi;

$N_{str}$  - Numero di veicoli transitati lungo il percorso (*Stream*), durante l'intervallo di tempo  $I$ ;

le grandezze che descrivono, in termini statistici, la prestazione del sistema lungo i *subpaths* - *Subpath Statistical Output* -, sono quelle elencate di seguito:

$TT_{str}$  - *Stream Average Travel Time* - Media dei tempi impiegati da tutti i veicoli per attraversare il subpath durante l'intervallo  $I$  (veh/h):

$$TT_{str} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{str}} TT_i}{N_{str}} \quad (A.25)$$

$S_{str}$  - *Stream Average Speed* - Media delle velocità medie viaggio dei veicoli che hanno attraversato il dato percorso durante l'intervallo di tempo  $I$  (Km/h):

$$S_{str} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{str}} S_i}{N_{str}} \cdot 3.6 \quad (A.26)$$

$HS_{str}$  - *Stream Harmonic Mean Speed* - Media armonica delle velocità medie lungo il prescelto subpath dei veicoli che lo hanno attraversato nell'intervallo di tempo  $I$  (Km/h):

$$HS_{str} = \frac{N_{str}}{\sum_{i=1}^{N_{str}} HS_i} \cdot 3.6 \quad (A.27)$$

*DTstr* - *Stream Average Delay Time* - Media dei ritardi accumulati da tutti i veicoli transitati lungo il percorso nell'intervallo di tempo *I* (sec):

$$DT_{str} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{str}} DT_i}{N_{str}} \quad (A.28)$$

*STstr* - *Stream Average Stop Time* - Tempo mediamente trascorso in arresto lungo il percorso da tutti i veicoli ivi transitati nell'intervallo di tempo *I* (sec):

$$ST_{str} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{str}} ST_i}{N_{str}} \quad (A.29)$$

*NSstr* - *Stream Average Number of Stops* - Numero medio di arresti lungo il percorso di tutti i veicoli ivi transitati nell'intervallo di tempo *I* (sec):

$$NS_{str} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{str}} NS_i}{N_{str}} \quad (A.30)$$

Come già detto, accanto a quelle fin qui elencate vengono altresì prodotte alcune grandezze di natura deterministica, di seguito precisate:

*TotTrav str* - *Stream Total Distance Travelled* - Somma delle lunghezze delle traiettorie seguite, all'interno del dato subpath, dai veicoli che lo hanno attraversato nell'intervallo di tempo *I* (Km):

$$TotTrav_{str} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{N_{str}} D_i \quad (A.31)$$

*TotTT str* - *Stream Total Travel Time* - Somma estesa a tutti i veicoli transitati lungo il percorso durante l'intervallo *I*, dei tempi da essi impiegati per attraversarlo (sec):

$$TotTT_{str} = \sum_{i=1}^{N_{str}} TT_i \quad (A.32)$$

*FuelCon str* - *Stream Total Fuel Consumption* - Somma delle quantità di carburante impiegate per attraversare il dato subpath da ciascuno dei veicoli ivi transitati nell'intervallo di tempo *I* (litri):

$$FuelCon_{str} = \sum_{i=1}^{N_{str}} TFC_i \quad (A.33)$$

$PollEm_{str,j}$  - *Stream Total j-th Pollutant Emission* - Quantità del  $j$ -esimo inquinante complessivamente immessa in atmosfera dall'insieme dei veicoli che hanno attraversato il percorso durante l'intervallo di tempo  $I$  (Kg):

$$PollEm_{str,j} = \sum_{p=1}^{NTurns_{str}} PollEm_{tur(p),j} + \sum_{q=1}^{NSects_{str}} PollEm_{sec(q),j} \quad (A.34.1)$$

ove a loro volta:

$$PollEm_{tur(p),j} = \sum_{i=1}^{N_{tur(p)}} TPE_{i,j}; \quad PollEm_{sec(q),j} = \sum_{i=1}^{N_{sec(q)}} TPE_{i,j} \quad (A.34.2)$$

Avendo denotato rispettivamente:

$NTurns_{str}$  il numero complessivo di tratti in curva lungo la *statistical stream*;

$NSects_{str}$  il numero complessivo di sezioni appartenenti alla *statistical stream*;

$N_{tur(p)}$  il numero totale di veicoli che hanno compiuto la  $p$ -esima manovra di svolta nell'intervallo di tempo  $I$ ;

$N_{sec(q)}$  il numero totale di veicoli transitati lungo la sezione  $q$ -esima nell'intervallo di tempo  $I$ .

## INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1.1 - Principali interazioni fra i diversi sottomodelli che intervengono nel processo di assegnazione in presenza di informazione. ....	36
Fig. 2.1 - Proposta di tassonomia delle <i>Azioni</i> predisposte nel modulo <i>Traffic Management</i> del microsimulatore Aimsun. ....	55
Fig. 2.2 - Approccio euristico alla risoluzione del problema di Dyanmic User Equilibrium in Aimsun. ....	65
Fig. 2.3 - Approccio algoritmico alla risoluzione del problema di Dyanmic User Equilibrium in Aimsun. ....	69
Fig. 2.4. a)-b) - <i>Rappresentazione grafica monodimanesionale di una rete stradale in Aimsun.</i> ...	72
Fig. 2.5 - Esempio di calcolo dell' <i>attrattività</i> di arco in Aimsun. ....	75
Fig. 2.6 - <i>Procedura di calcolo del Tempo di Viaggio Stimato.</i> ....	79
Fig. 2.7 - Procedura di calcolo del <i>Tempo di Viaggio</i> disaggregato per classi di veicolo. ....	81
Fig. 2.8 - Costruzione dell'insieme di scelta dei percorsi $K_i$ per l' <i>i</i> -esima coppia O/D. ....	85
Fig. 2.9 - Definizione delle aliquote di domanda da assegnare a percorsi preordinati ( <i>ODR</i> e <i>PAR</i> ). ....	89
Fig. 2.10 - Costruzione delle <i>O/D Routes</i> . ....	93
Fig. 2.11 - Impostazione delle percentuali di assegnazione associate alle singole <i>O/D Routes</i> . ....	93
Fig. 2.12.a-b - Scansione temporale che regola il calcolo dei percorsi secondo il modello <i>Fixed using travel times calculated under free-flow conditions</i> . ....	97
Fig. 2.13.a-b - Scansione temporale che regola il calcolo dei percorsi secondo il modello <i>Fixed using travel times calculated at the end of a Warm-up Period</i> . ....	98
Fig. 2.14 - Scansione temporale che regola il calcolo dei percorsi secondo i <i>Variable Routes Models</i> . ....	99
Fig. 2.15 - Probabilità di scelta fra tre percorsi secondo il <i>Modello Binomiale</i> . ....	101
Fig. 2.16 - Impostazione del parametro di calibrazione del <i>Modello di Scelta Binomiale</i> in Aimsun. ....	101
Fig. 2.17 - Impostazione del parametro di calibrazione del <i>Modello di Scelta Probabilistico</i> in Aimsun. ....	102
Fig. 2.18 - Sensibilità della <i>Probabilità di Scelta Proporzionale</i> al parametro di calibrazione $\alpha$ . ....	103
Fig. 2.19 - Impostazione del parametro di calibrazione del <i>Modello di Scelta Logit</i> in Aimsun. ....	105

Fig. 2.20 - Rappresentazione grafica di due percorsi con elevato grado di sovrapposizione. ....	106
Fig. 2.21- Impostazione dei parametri di calibrazione del <i>Modello di SceltaC- Logit</i> in Aimsun. ....	108
Fig. 2.22 - Veicoli coinvolti nel <i>Two Lane Car-following Model</i> . ....	117
Fig. 2.23 - Individuazione delle zone a diversa priorità di manovra nel <i>Lane-Changing Model</i> . .	119
Fig. 2.24 - Schema logico di applicazione del <i>Lane-Changin Model</i> in Aimsun. ....	122
Fig. 2.25 - Contesti tipici di applicazione del modello <i>On-Ramp Lane Changing</i> . ....	125
Fig. 2.26 - Veicoli interessati dall'applicazione del modello di <i>On-Ramp Lane Changing</i> . ....	126
Fig. 2.27 - Calcolo delle grandezze che intervengono nel <i>Gap-Acceptance Model</i> . ....	127
Fig. 2.28 - Veicoli ad elevata priorità tenuti in conto dal <i>Gap-Acceptance Model</i> ., in prossimità di segnali di precedenza. ....	128
Fig. 3.1 - Impostazione dei tassi che regolano l'assegnazione secondo il modello di precarico <i>O/D Routes based</i> in Aimsun. ....	139
Fig. 3.2 - <i>Distribuzione Esponenziale di Intertempi</i> al variare del parametro $\lambda$ . ....	144
Fig. 3.3 - Impostazione dei parametri prestazionali del singolo <i>Vehicle Type</i> in Aimsun. ....	148
Fig. 3.4 - Selezione delle <i>Replications</i> di uno stesso <i>Experiment</i> per il calcolo della relativa <i>Average</i> . ....	160
Fig. 3.5 - Layout della rete implementata in Aimsun per l'analisi dei modelli di scelta del percorso. ....	170
Fig. 3.6 - Percorsi alternativi esistenti nella <i>Rete di Braess</i> . ....	170
Fig. 3.7 - Schema logico-procedurale adottato nella implementazione dell'analisi di sensibilità dei modelli <i>RC</i> nell'ambiente di microsimulazione di Aimsun. ....	173
Fig. 3.8 - Sensibilità della risposta del sistema al parametro di calibrazione $\alpha$ del modello di scelta <i>Proportional</i> . ....	175
Fig. 3.9 - Sensibilità della risposta del sistema al parametro $\theta$ di calibrazione del modello di scelta <i>Multinomial Logit</i> . ....	176
Fig. 3.10 - Sensibilità della risposta del sistema al parametro $\theta$ di calibrazione del modello di scelta <i>Multinomial C-Logit</i> . ....	177
Fig. 3.11 - Sensibilità del <i>tempo medio di viaggio</i> rispetto al <i>tempo di reazione</i> del generico utente del sistema. ....	186
Fig. 3.12 - Sensibilità del <i>tempo medio di viaggio</i> rispetto all' <i>intertempo minimo</i> fra veicoli consecutivi. ....	187

Fig. 3.13 - Sensibilità del <i>tempo medio di viaggio</i> rispetto al <i>tempo massimo di attesa</i> del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.....	188
Fig. 3.14 - Sensibilità del <i>tempo medio di viaggio</i> rispetto alla <i>massima accelerazione</i> erogabile dal generico veicolo. ....	189
Fig. 3.15 - Sensibilità del <i>tempo medio in arresto</i> rispetto al <i>tempo di reazione</i> del generico utente del sistema. ....	190
Fig. 3.16 - Sensibilità del <i>tempo medio in arresto</i> rispetto all' <i>intertempo minimo</i> fra veicoli consecutivi.....	191
Fig. 3.17 - Sensibilità del <i>tempo medio in arresto</i> rispetto al <i>tempo massimo di attesa</i> del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.....	192
Fig. 3.18 - Sensibilità del <i>tempo medio in arresto</i> rispetto alla <i>massima accelerazione</i> erogabile dal generico veicolo. ....	193
Fig. 3.19 - Sensibilità del <i>ritardo medio</i> rispetto al <i>tempo di reazione</i> del generico utente del sistema.....	194
Fig. 3.20 - Sensibilità del <i>ritardo medio</i> rispetto all' <i>intertempo minimo</i> fra veicoli consecutivi. .	195
Fig. 3.21 - Sensibilità del <i>ritardo medio</i> rispetto al <i>tempo massimo di attesa</i> del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta. ....	196
Fig. 3.22 - Sensibilità del <i>ritardo medio</i> rispetto alla <i>massima accelerazione</i> erogabile dal generico veicolo. ....	197
Fig. 3.23 - Sensibilità del <i>tempo totale di attraversamento della rete</i> rispetto al <i>tempo di reazione</i> del generico utente del sistema.....	198
Fig. 3.24 - Sensibilità del <i>tempo totale di attraversamento della rete</i> rispetto all' <i>intertempo minimo</i> fra veicoli consecutivi. ....	199
Fig. 3.25 - Sensibilità del <i>tempo totale di attraversamento della rete</i> rispetto al <i>tempo massimo di attesa</i> del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta. ....	200
Fig. 3.26 - Sensibilità del <i>tempo totale di attraversamento della rete</i> rispetto alla <i>massima accelerazione</i> erogabile dal generico veicolo. ....	201
Fig. 3.27 - Sensibilità della <i>densità veicolare</i> lungo la rete rispetto al <i>tempo di reazione</i> del generico utente del sistema. ....	202
Fig. 3.28 - Sensibilità della <i>densità veicolare</i> lungo la rete rispetto all' <i>intertempo minimo</i> fra veicoli consecutivi.....	203

Fig. 3.29 - Sensibilità della <i>densità veicolare</i> lungo la rete rispetto al <i>tempo massimo di attesa</i> del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.....	204
Fig. 3.30 - Sensibilità della <i>densità veicolare</i> lungo la rete rispetto alla <i>massima accelerazione</i> erogabile dal generico veicolo. ....	205
Fig. 3.31 - Sensibilità del <i>flusso veicolare</i> lungo la rete rispetto al <i>tempo di reazione</i> del generico utente del sistema. ....	206
Fig. 3.32 - Sensibilità del <i>flusso veicolare</i> lungo la rete rispetto all' <i>intertempo minimo</i> fra veicoli consecutivi.....	207
Fig. 3.33 - Sensibilità del <i>flusso veicolare</i> lungo la rete rispetto al <i>tempo massimo di attesa</i> del generico veicolo prima di procedere ad una manovra a priorità ridotta.....	208
Fig. 3.34 - Sensibilità del <i>flusso veicolare</i> lungo la rete rispetto alla <i>massima accelerazione</i> erogabile dal generico veicolo. ....	209
Fig. 4.2.a-b - Configurazioni del nodo stradale ‘Tondo Gioeni’ ante e post i recenti lavori di riordino.....	214
Fig. 4.3.a-b-c - Gestione dei flussi veicolari durante i lavori stradali di riordino del nodo ‘Tondo Gioeni’.....	214
Fig. 4.4 - Delimitazione dell’area d’interesse nella planimetria catastale dell’area urbana circostante il nodo viario ‘Tondo Gioeni’.....	217
Fig. 4.5 - “Progetto di Adeguamento della Circonvallazione di Catania”, Legge n°.433 31.12.1991, Obiettivo h - Tavola 6: Linee di progetto su base aerofotogrammetrica. ....	217
Fig. 4.6 - Implementazione della topologia di rete nell’ambiente grafico del microsimulatore Aimsun.....	219
Fig. 4.7.a-b - Layout grafici dei due modelli implementati in ambiente Aimsun, corrispondenti alle configurazioni infrastrutturali del nodo ‘Tondo Gioeni’ ante e post i recenti lavori di riordino.....	220
Fig. 4.8 - Linee di Desiderio relative al trasporto su mezzo privato. ....	224
Fig. 4.9 - Dislocazione dei centroidi di origine e destinazione sullo schema di rete implementato in VISSIM. ....	227
Fig. 4.10 - Configurazione definitiva di centroidi O/D adottata nel modello di rete implementato in AIMSUN.....	232
Fig. 4.11 - Andamenti del <i>tempo medio di viaggio</i> in funzione della <i>domanda di trasporto</i> ed attingimento delle soglie ‘critiche’ di risposta al variare del tasso di somministrazione dell’informazione in fase preventiva.....	238

Fig. 4.12 - Andamenti del <i>tempo medio di viaggio</i> in funzione della <i>domanda di trasporto</i> ed attingimento delle soglie ‘critiche’ di risposta al variare del tasso di somministrazione dell’informazione in fase di viaggio. ....	239
Fig. 4.13 - Andamenti del <i>tempo totale di attraversamento della rete</i> in funzione della <i>domanda di trasporto</i> ed attingimento delle soglie ‘critiche’ di risposta al variare del tasso di somministrazione dell’informazione in fase preventiva. ....	240
Fig. 4.14 - Andamenti del <i>tempo totale di attraversamento della rete</i> in funzione della <i>domanda di trasporto</i> ed attingimento delle soglie ‘critiche’ di risposta al variare del tasso di somministrazione dell’informazione in fase di viaggio. ....	241
Fig. 4.15 - Andamenti della <i>velocità media armonica</i> in funzione della <i>domanda di trasporto</i> ed attingimento delle soglie ‘critiche’ di risposta al variare del tasso di somministrazione dell’informazione in fase preventiva. ....	242
Fig. 4.16 - Andamenti della <i>velocità media armonica</i> in funzione della <i>domanda di trasporto</i> ed attingimento delle soglie ‘critiche’ di risposta al variare del tasso di somministrazione dell’informazione in fase di viaggio. ....	243
Fig. 4.17 - Diretrici di spostamento selezionate per l’analisi della risposta aggregata per coppie di centroidi di origine/destinazione. ....	246



## ***RINGRAZIAMENTI***

---

Si ringraziano:

I Tutors Prof. Ing. S. Leonardi e Prof. Ing. G. Inturri, per il tempo dedicato all'attività di ricerca a supporto del presente studio.

La società REDAS ENGINEERING, distributrice per l'Italia del software di simulazione AIMSUN, nelle persone della Dr.ssa Ing. D. Condino e del Dr. T. Valentini, per il prezioso supporto tecnico.

Il Dr. Ing. R. Mirone per la disponibilità nel fornire le tavole del 'Progetto di Adeguamento della Circonvallazione di Catania', indispensabili per l'implementazione grafica del modello assunto a Caso Studio.