

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CATANIA
FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

DOTTORATO DI RICERCA IN
INGEGNERIA DELLE INFRASTRUTTURE VIARIE
XXIII Ciclo

Ing. Daniele Buscema

**Valutazione dell'efficacia di sistemi ITS per l'indirizzamento del traffico
stradale mediante la simulazione ad agenti**

Tesi di Dottorato

COORDINATORE:
Chiar.mo Prof. Sascia Canale

TUTOR:
Chiar.mo Prof. Giuseppe Inturri

*Ad Anna, mia compagna di vita,
che più di chiunque altro crede in me*

Ringraziamenti

L'esperienza maturata nel corso di questo Dottorato di Ricerca avrà senza dubbio una grande influenza sulla mia vita. È questo il motivo per il quale, a prescindere dalle strade che il destino mi porterà ad imboccare, sarò sempre entusiasta di aver votato questi anni alla ricerca ed all'attività universitaria.

Rivolgo un pensiero di profonda gratitudine al Prof. Giuseppe Inturri per il suo apporto scientifico, per le risposte in *real time* e la chiarezza con cui ha sempre reso comprensibili *problematiche complesse*.

Un sentito ringraziamento va ai Proff. Alessandro Pluchino ed Andrea Rapisarda che hanno rivestito un ruolo fondamentale nell'ambito della presente ricerca, contribuendo ad essa in maniera determinante.

Ringrazio di cuore tutti coloro i quali mi hanno sostenuto in questo percorso.

Indice

INTRODUZIONE	3
1 I COSTI ESTERNI DELLA MOBILITÀ: PROBLEMATICHE E STRATEGIE DI MITIGAZIONE	5
1.1 I costi ambientali ed i costi sociali	9
1.1.1 Inquinamento e cambiamenti climatici	10
1.1.2 L’incidentalità nei trasporti	14
1.1.3 Il fenomeno della congestione stradale	17
1.1.4 Il rumore	18
1.1.5 L’intrusione visiva, l’effetto barriera, il consumo di uso del suolo	18
1.1.6 Conclusioni	19
1.2 Strategie di mitigazione	21
1.2.1 Teoria economica	21
1.2.2 Riequilibrio tra le diverse modalità di trasporto e politiche di tariffazione	25
1.2.3 Migliorare l’offerta di trasporto pubblico e la mobilità ciclistica in ambito urbano	27
1.2.4 I sistemi intelligenti di trasporto	33
2 I SISTEMI ITS APPLICATI ALL’INFOMOBILITÀ	36
2.1 Le informazioni fornite dai sistemi ITS	38
2.1.1 Informazioni pre-viaggio	41
2.1.2 Informazioni in viaggio	41
2.1.3 Informazioni esterne	43
2.2 Principali applicazioni delle tecnologie ITS nel trasporto privato e pubblico	45
2.2.1 Applicazioni nel trasporto privato	45
2.2.2 Applicazioni nel trasporto pubblico	46
2.3 Sistemi infrastructure-based e sistemi vehicle-based	50
2.3.1 Sistemi infrastructure-based	50
2.3.2 Sistemi vehicle-based	59
3 LA SIMULAZIONE DEI SISTEMI DI TRASPORTO	63
3.1 Identificazione dei sistemi di trasporto	67
3.2 I modelli macroscopici	70
3.2.1 Il deflusso dei veicoli	71
3.2.2 Modelli di offerta	76
3.2.3 Modelli di domanda	81
3.2.4 Modelli di assegnazione	93
3.3 I modelli microscopici	97
3.3.1 Car following model	97
3.3.2 Lane Change model	103
3.3.3 Gap acceptance model	105
3.3.4 Considerazioni sui modelli microscopici	107
3.4 I modelli mesoscopici	109
4 METODOLOGIA	110
4.1 Simulare l’effetto dei sistemi di informazione ai guidatori su una rete di trasporto	110
4.1.1 I sistemi complessi adattivi e la tecnica della simulazione ad agenti	114
4.2 L’ambiente di simulazione: NetLogo	123
4.3 La topologia della rete: il paradosso di Braess	134

5	CASO STUDIO E RISULTATI.....	140
5.1	Caratteristiche fisico-geometriche del modello.....	141
5.2	Gli scenari: strategie di informazione e modelli di scelta del percorso.....	146
5.3	Simulazioni ed analisi dei risultati	153
	CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	163
	Appendice I: pubblicazione scientifica	166
	Appendice II: script dell’interfaccia di programmazione A	172
	Appendice III: script dell’interfaccia di programmazione B	184
	Bibliografia.....	196
	Indice delle figure.....	202
	Indice delle tabelle.....	205

INTRODUZIONE

Negli ultimi 30 anni la mobilità in auto dei cittadini è aumentata mediamente in Europa del 140%. In Italia l’aumento è ancora più rilevante: 214%, in 30 anni cioè la mobilità in auto è più che triplicata. Le analisi evidenziano che questo aumento è fortemente “trainato” dal progressivo incremento del “possesso di auto”. In particolare, in Italia si registrano tassi ben oltre la media europea. L’aumento della congestione determinato dal continuo incremento nell’uso dell’auto privata ha comportato la diminuzione del 10% nella velocità media del traffico nelle principali città; ne consegue una dilatazione dei tempi di viaggio ed un aumento delle emissioni inquinanti. Le perdite sul PIL stimate a livello europeo ammontano a circa il 2%, che corrisponde in termini di perdita di tempo produttivo a 120 miliardi di Euro (fonte: progetto P.O.R.E. “Mobilità informata; l’infomobilità come fattore strategico per l’innovazione e la competitività del paese” - Presidenza del Consiglio dei Ministri; Dipartimento per gli Affari Regionali e le Autonomie Locali - 2007).

Lo sviluppo dei sistemi ITS (Intelligent Transportation Systems) e dell’infomobilità (la gestione intelligente dei processi della mobilità e dell’informazione che li accompagna) rappresentano una opportunità per ridurre, con costi e tempi sostenibili, la congestione sulle infrastrutture stradali, regolare, limitare e ottimizzare i percorsi dei flussi di traffico producendo benefici per la qualità della vita e per il miglioramento delle prestazioni funzionali e ambientali dell’intero sistema di trasporto.

Anche in Italia, l’utilizzo integrato di tecnologie informatiche e telematiche nel mondo dei trasporti sta consentendo nel corso degli ultimi anni di sviluppare sistemi per il monitoraggio e la gestione di flotte, per il controllo del traffico e la regolazione dei cicli semaforici, per il rilievo dell’inquinamento atmosferico e per l’erogazione di servizi di infomobilità agli utenti della strada. Questi sistemi, seppure sviluppati in forma ancora poco coordinata e con risultati differenti, hanno evidenziato il ruolo strategico delle tecnologie telematiche nella risoluzione di problemi relativi alla mobilità.

Sulla base delle condizioni attuali, previste ed auspicabili, i centri di controllo del traffico potranno identificare ed attuare interventi di regolarizzazione della mobilità (regolazione cicli semaforici, reindirizzamenti, limitazioni alla circolazione, controllo accessi, tariffazione dinamica, etc.) ed informare i cittadini su eventi e provvedimenti significativi per la circolazione e sui percorsi ottimi in funzione di una molteplicità di criteri (tempo di percorrenza, caratteristiche accessibilità, punti e tipologie di percorsi vincolati, ecc.).

La diffusione dei sistemi di informazione avanzata per i viaggiatori (ATIS) permetterà ai guidatori il beneficio di poter usufruire dell’offerta di spostamento in modo consapevole, attraverso una informazione in tempo reale più puntuale e personalizzata, che permetta una migliore pianificazione del viaggio, una riduzione dei tempi di viaggio e una maggiore prevedibilità dei tempi di spostamento, una riduzione dell’inquinamento, tema oggigiorno di grande rilevanza.

A dispetto di ciò, emerge dalla letteratura scientifica di riferimento che i benefici connessi alla diffusione dei sistemi di informazione avanzata ai guidatori sono fortemente condizionati da quanto si è riuscito a capire sul meccanismo di adattamento degli automobilisti in risposta alle informazioni ricevute e sugli impatti che le informazioni fornite dagli ITS determinano su una rete di trasporto in termini di tempi di percorrenza, di riduzione delle congestioni, di riduzione dell’incidentalità, etc. Per raggiungere questo obiettivo, i modelli “classici” di simulazione (macro-meso-micro simulazione), data la complessità del sistema in oggetto, non sono in grado di fornire le risposte cercate. Come vedremo, si possono ottenere dei risultati importanti, ad esempio, integrando l’utilizzo di strumenti di simulazione microscopica con modelli basati sugli automi cellulari e sugli agenti intelligenti.

Dall’analisi di diverse modalità di raccolta e diffusione delle informazioni ai guidatori, attraverso la costruzione di un modello di simulazione ad agenti intelligenti sviluppato sulla piattaforma software NetLogo, il presente lavoro di ricerca vuole fornire delle indicazioni (è pacifico affermare che non esiste una strategia ed una gestione delle informazioni ottimale in senso assoluto in quanto queste sono fortemente dipendenti dal contesto nel quale sono applicate) rispetto ai possibili impatti, in termini di benefici e di costi, che i sistemi di informazione dinamici ai guidatori possono determinare su una rete di trasporto.

Capitolo I

1 I COSTI ESTERNI DELLA MOBILITÀ: PROBLEMATICHE E STRATEGIE DI MITIGAZIONE

Nell’ultimo decennio si è manifestato un crescente interesse rispetto alla stima dei costi e dei benefici complessivi connessi al sistema dei trasporti, intendendo con il termine complessivi, i costi e benefici pubblici e privati, monetari e non monetari, intenzionali e non intenzionali. Tale interesse è strettamente connesso alle crescenti dimensioni del fenomeno dei trasporti e alle complesse interazioni che esso ha non solo con il resto del sistema economico ma anche con l’ambiente sociale e naturale.

Con riferimento al solo trasporto interno di passeggeri (Tab. 1), si osserva come gli ultimi dati annuali disponibili, riferiti al 2007 (Fonte [1]: Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti Anni 2007-2008), evidenzino oltre 1.023 miliardi di passeggeri-km, che rappresentano circa il 2,4% in più rispetto al 2006. La modalità stradale, ancor più nell’ambito del trasporto merci, prevale sulle altre in maniera netta, con il 92,6% del traffico rilevato. Le percentuali delle altre modalità di trasporto rimangono pressoché costanti, con i trasporti passeggeri tramite impianti fissi al secondo posto con il 5,5% (Fig. 1).

La rapida crescita della domanda di mobilità ha considerevoli ripercussioni di carattere ambientale e sociale ed in particolare, la forte predominanza della modalità stradale ha sollevato da più parti la richiesta di riequilibrare la distribuzione modale. Infatti, i costi dei trasporti, ed in particolare quelli del trasporto stradale, non riflettono i “veri” costi e benefici connessi al sistema dei trasporti, in quanto riflettono solo la componente di costo interna (privata) e non quella esterna. Questa argomentazione trova un sostegno teorico nella teoria microeconomica dell’equilibrio economico generale che mostra come l’esistenza di costi e benefici esterni, detti esternalità, comporti una allocazione delle risorse inefficiente.

L’esternalità consiste in un vantaggio o svantaggio economico che una attività produttiva o di consumo può produrre a capo di altri produttori o consumatori.

Essa può quindi essere:

- positiva qualora determini ad altri un ricavo (o utilità) o una diminuzione di costo;
- negativa qualora determini una diminuzione di ricavo (o utilità) o un incremento di costo.

Il beneficiario ed il danneggiato possono essere come detto produttori o consumatori.

<i>Milioni di passeggeri-km</i>								
Modalità di trasporto	1990	1995	2000	2004	2005	2006	2007	2008
Impianti fissi	47.784	46.972	49.923	49.623	50.845	51.268	50.046	50.162
Ferrovie dello Stato (*)	44.709	43.859	47.133	45.577	46.527	47.145	45.985	45.767
Ferrovie regionali ex in conc. e in g.g.	2.780	2.792	2.439	3.516	3.809	3.716	3.648	3.929
Altre Ferrovie				160	134	30	46	99
Altri (tramvie extraurbane e funivie)	295	321	351	370	375	377	367	367
- di cui tranvie extraurbane	53	46	48	50	50	50	51	51
- di cui funivie	242	275	303	320	325	327	316	316
Trasporti collettivi extraurbani	72.339	76.797	82.391	88.196	89.598	91.442	91.407	92.180
Autolinee e filovie	17.505	16.829	17.241	17.974	18.134	18.679	17.675	18.393
Autolinee di comp. statale, noleggio e privati	54.834	59.968	65.150	70.222	71.464	72.763	73.733	73.787
Trasporti collettivi urbani	15.791	15.550	16.746	17.587	17.662	17.898	18.188	18.226
Filovie e autobus	11.616	10.350	11.158	11.564	11.625	11.607	11.549	11.732
Altri modi	4.175	5.200	5.588	6.023	6.044	6.290	6.639	6.494
- di cui tranvie urbane	1.576	1.136	1.057	1.051	1.045	1.067	1.060	1.057
- di cui metropolitane	2.580	4.038	4.503	4.954	4.982	5.204	5.559	5.417
- di cui funicolari	19	26	28	18	18	20	20	20
Navigaz. marittima di cabotaggio (2)	2.404	2.247	3.497	3.390	3.237	3.577	3.566	3.525
Navigazione interna	483	420	450	479	488	496	493	487
Navigazione aerea (3)	6.416	7.108	10.384	12.147	12.813	13.930	15.334	15.064
Autotrasporti privati	582.717	674.595	793.460	788.668	763.013	820.306	844.189	795.811
- di cui autovetture (**)	522.593	614.713	726.529	716.060	688.986	744.860	768.347	719.558
- di cui motocicli	60.124	59.882	66.931	72.608	74.027	75.446	75.842	76.253
Totale generale	727.934	823.689	956.851	960.090	937.663	998.917	1.023.224	975.455

In corsivo i dati stimati - Le somme possono non coincidere con i totali a causa degli arrotondamenti.

(*) Dall'anno 2000 il dato fornito dalle Ferrovie dello Stato è ottenuto utilizzando una nuova metodologia di calcolo e quindi tale dato non è confrontabile con la precedente serie storica. Dal 2005 comprende anche i volumi realizzati dalla società Cisalpino Ag sul territorio nazionale.

(**) Dall'anno 2000 il dato stimato per le autovetture è ottenuto utilizzando una nuova metodologia di calcolo e quindi tale dato non è confrontabile con la precedente serie storica.

(1) Sono considerati gli spostamenti dei passeggeri realizzati mediante vettori nazionali con origine e destinazione interne al territorio italiano. Per il traffico ferroviario è compresa anche la quota dei traffici internazionali realizzata su territorio nazionale.

(2) Dal 1997 l'Istat ha migliorato la rilevazione dei traffici che si realizzano nello stretto di Messina.

(3) Traffico nazionale aerei di linea Alitalia, ATI (per il 1990), Meridiana.

Fonte: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Fonti diverse.

Tab. 1 - Traffico totale interno di passeggeri-km - Anni 1990, 1995, 2000, 2004-2008 [1]

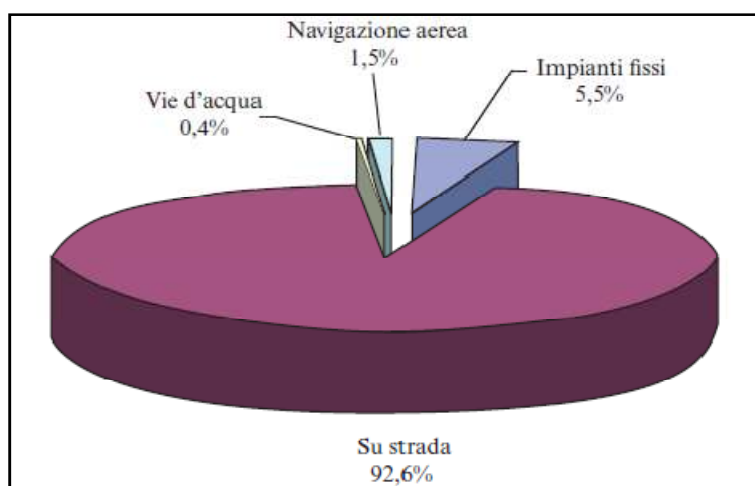


Fig. 1 - Traffico totale interno di passeggeri per modo di trasporto [pass-km] - Anno 2007 [1]

Il fenomeno dei trasporti dà origine ad esternalità di produzione e di consumo, sia positive sia negative.

Esempi di esternalità positive possono essere ricercati fra quelle che accrescono il valore commerciale o residenziale delle aree interessate da un nuovo servizio di trasporto (ad esempio, un’attività commerciale o un fabbricato residenziale serviti da una nuova fermata di metropolitana).

Numerose sono le esternalità negative connesse al sistema dei trasporti.

Questo settore consuma grandi quantità di risorse energetiche soprattutto da fonti non rinnovabili, causando l’immissione in atmosfera di numerose sostanze inquinanti fra cui le sostanze acidificanti, i precursori dell’ozono ed il particolato fine.

In questo contesto i cambiamenti climatici sono, purtroppo, una realtà. Oggi, sul nostro pianeta si registrano le temperature medie più alte probabilmente da duemila anni a questa parte e questo ha già iniziato a modificare il clima, come dimostrano le maggiori ricerche scientifiche del settore. Entro la fine del secolo, se le tendenze attuali continueranno, la temperatura media globale probabilmente raggiungerà il picco più alto degli ultimi due milioni di anni. Non sarà in assoluto il periodo più caldo della storia terrestre, ma sarà dovuto a una causa inedita: l’attuale riscaldamento globale, infatti, non dipende dai meccanismi naturali che hanno causato i precedenti periodi caldi, ma dalle attività umane e principalmente dall’emissione di anidride carbonica derivante soprattutto dall’utilizzo di combustibili fossili.

Le ricadute ambientali e sociali della mobilità, oltre che all’immissione di sostanze che producono inquinamento atmosferico, sono riconducibili anche ad altre pressioni quali la generazione di rumore, l’incidentalità, la congestione stradale, l’occupazione di suolo e la generazione di rifiuti.

I trasporti, ed in particolare quelli su strada, non solo creano disturbo ad alte percentuali di popolazione con la generazione di rumore, ma sono anche responsabili di un elevato numero di incidenti con morti, feriti e danni materiali.

La congestione riguarda essenzialmente la modalità stradale, soprattutto in ambito urbano. Si ha congestione quando il traffico non viene sufficientemente assorbito dalla capacità dell’infrastruttura; questo fenomeno determina per gli utenti un aumento del tempo necessario a compiere uno spostamento ed ha effetti di natura ambientale quali il maggior consumo di carburante cui consegue l’aumento dell’inquinamento.

Le infrastrutture di trasporto consumano suolo, sottraendolo ad altri usi; il loro impatto ambientale dipende non solo dal tipo di suolo interessato ma anche dalle caratteristiche delle infrastrutture stesse che determinano, ad esempio, l’estensione dell’effetto barriera nei confronti del movimento degli animali e delle persone.

La sottrazione e la frammentazione del suolo nell’intorno delle aree naturali dovuta alla realizzazione di infrastrutture di trasporto può portare alla diminuzione della biodiversità; la sottrazione di suolo al contesto agricolo e forestale può inoltre determinare impatti negativi sul paesaggio.

1.1 I costi ambientali ed i costi sociali

Le attività connesse ai trasporti determinano, spesso non intenzionalmente, degli effetti dannosi e quindi dei costi:

- sull’ambiente urbano (qualità dell’aria e rumore);
- sull’ambiente naturale e sugli ecosistemi (piogge acide, effetto serra, cambiamenti climatici);
- sulla salute e sulla vita dell’uomo (incidenti, malattie, infortuni);
- in termini di perdite di tempo (congestione);
- sull’ambiente sociale (separazione delle comunità, occupazione del suolo, degrado estetico).

Nella Fig. 2 sono rappresentati graficamente i principali impatti dannosi dei trasporti sull’ambiente e sulla collettività mentre la Fig. 3 mostra qual è la ripartizione percentuale dei costi dovuti alle esternalità dei trasporti in ambito Europeo per l’anno 2004.

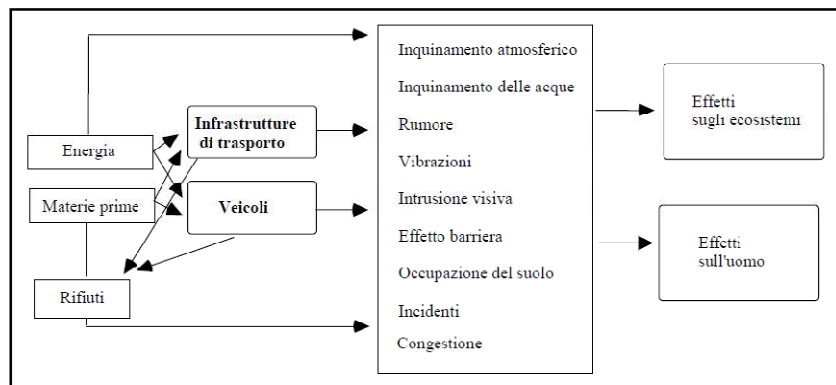


Fig. 2 - Gli impatti dei trasporti sull’ambiente e sulla collettività

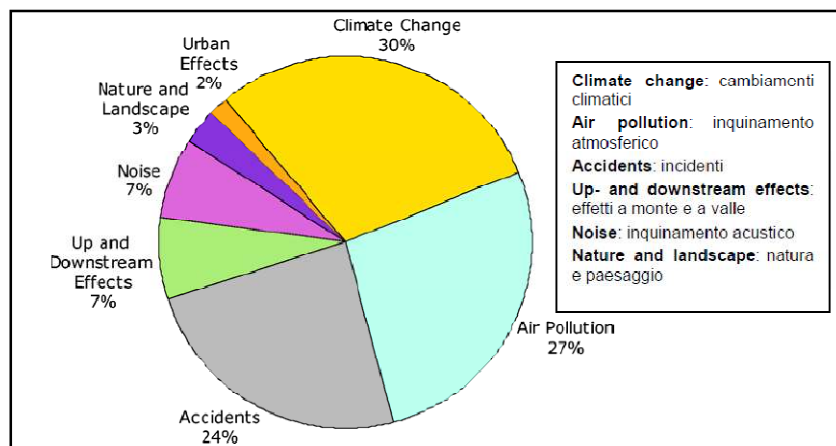


Fig. 3 - Esternalità dei trasporti (in termini di costi) in Europa nel 2004

1.1.1 Inquinamento e cambiamenti climatici

Gli inquinanti atmosferici si possono suddividere in inquinanti direttamente immessi nell'atmosfera e in inquinanti secondari, formati dalla reazione degli inquinanti primari tra di loro e con alcuni componenti dell'atmosfera. I principali inquinanti primari connessi ai trasporti vengono emessi dal processo di combustione dei motori e, per i motori a benzina, sono:

- il monossido di carbonio (CO), derivante dalla combustione incompleta;
- l'anidride carbonica (CO₂), che si produce in ogni processo di combustione dei combustibili fossili. Le CO₂, in quanto composto naturale dell'aria ed indispensabile nella fotosintesi delle piante, non è in sé un inquinante, ma livelli eccessivi di accumulo, naturale e provocato dall'uomo, sono ritenuti responsabili di importanti cambiamenti climatici (effetto serra);
- i composti organici volatili (COV), anch'essi derivanti dalla combustione incompleta. Includono gli HC leggeri e gli HC aromatici, come il benzene o altri composti aromatici policiclici;
- gli ossidi di azoto (NO_x) che si formano a temperature di combustione elevate;
- il piombo, usato nella benzina tradizionale per raggiungere l'indice di ottani desiderato;
- il particolato, misurato come particelle sospese totali (PST) o a seconda del diametro (PM₁₀ o PM_{2.5});
- gli aldeidi ed i clorofluorocarburi (CFC), usati per la climatizzazione delle automobili.

I motori a gasolio si caratterizzano invece per l'elevata emissione di ossidi di zolfo, tra cui l'anidride solforosa (SO₂).

Gli HC leggeri insaturi e gli NO_x partecipano, assieme all'ossigeno e ad altri composti organici, a reazioni fotochimiche nella bassa atmosfera e sono responsabili della produzione di ossidanti fotochimici, come l'ozono troposferico (O₃) e lo smog.

Gli NO_x giocano poi un ruolo importante, assieme al SO₂, nella formazione delle piogge acide.

Il PM, ossia il materiale particolato presente nell'aria, è costituito da una miscela di particelle solide e liquide (carbonio, piombo, nichel, nitrati, solfati, composti organici, frammenti di suolo, etc.) che possono rimanere sospese anche per lunghi periodi. Le polveri totali vengono distinte in due classi corrispondenti alla capacità di penetrazione nelle vie respiratorie da cui dipende l'intensità degli effetti nocivi alla salute; le classi sono costruite in base alla dimensione delle polveri stesse:

- le polveri dette PM₁₀ hanno un diametro inferiore ai 10 μm e possono giungere fino al tratto superiore delle vie aeree (cavità nasali, faringe e laringe);

- le polveri dette $PM_{2,5}$ hanno un diametro inferiore a $2,5 \mu m$ e possono giungere fino alle parti inferiori dell’apparato respiratorio (trachea, bronchi, alveoli polmonari).

Il traffico veicolare contribuisce in maniera sostanziale alla presenza di alte concentrazioni di polveri in ambito urbano. I veicoli, infatti, producono polveri sia come conseguenza dell’utilizzo di combustibili fossili per la loro alimentazione, sia, in misura minore, per l’usura di pneumatici, freni e manto stradale.

Dai dati rilevati dall’ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) in Italia, per l’anno 2007, risulta che gli autoveicoli e motoveicoli (autovetture, motoveicoli, motocicli, mezzi leggeri e pesanti per trasporto merci e passeggeri) hanno contribuito alla produzione di PM_{10} con circa 5.800 tonnellate di tale particolato (Tab. 2)

Alimentazione	Normativa Euro	PM_{10} ciclo urbano (g/veicolo-km)	Numero autovetture circolanti	Percorrenze urbane in km	Tonnellate annue di emissioni di PM_{10}
Benzina	0	0,0617	4.985.479	3.842	1.181,815
	1	0,0178	2.510.094	3.842	171,659
	2	0,0178	6.980.102	3.842	477,352
	3	0,0178	3.909.565	3.842	267,366
	4	0,017	3.795.145	3.842	247,876
Totale			22.180.385		2.346,068
Gasolio	0	0,4785	846.859	3.037,5	230,862
	1	0,1714	387.448	3.037,5	201,716
	2	0,1714	2.203.550	3.037,5	1.147,229
	3	0,05	2.993.937	3.037,5	454,704
	4	0,025	5.633.460	3.037,5	427,791
Totale			12.065.254		3.462,302

Fonte: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), ACI.

Tab. 2 - Stima delle emissioni di PM_{10} delle autovetture, alimentate a benzina e a gasolio, circolanti in ambito urbano - Anno 2007 [1]

Come già evidenziato per gli anni precedenti, anche nell’anno in esame si è assistito ad una crescita degli autoveicoli alimentati a gasolio e tale incremento incide sull’aumento del PM_{10} .

La percentuale di autovetture a gasolio in relazione al parco auto circolante, infatti, è passata nel periodo 2003-2007, dal 21,6% al 33,8% e, solo per l’ultimo anno preso in esame, l’incremento è stato pari a circa 2 punti percentuali.

Tali risultati evidenziano, ancora una volta, che il peso delle autovetture diesel nella produzione del particolato, relativamente al ciclo di guida urbano, è preponderante rispetto a quello delle autovetture alimentate a benzina.

Nel 2007, il 33% circa del parco circolante costituito da automobili diesel si stima che abbia prodotto il 59% circa del particolato, contro poco più del 40% prodotto dalle automobili a benzina, che rappresentano, invece, circa il 62% del parco circolante.

Le informazioni di seguito riportate sono state trasmesse dall’ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) e riguardano le emissioni di anidride carbonica (Tab. 3), ossidi di azoto (Tab. 4) e composti organici volatili non metanici (Tab. 5) dovuti al settore trasporti.

L’osservazione delle tabelle mette in rilievo:

- una positiva riduzione, a partire dal biennio 2004-2005, delle emissioni di anidride carbonica (Tab. 3), dopo anni di crescita ininterrotta;
- un progressivo calo delle emissioni di ossidi di azoto (Tab. 4);
- una sensibile diminuzione delle emissioni di composti organici volatili non metanici a partire dal 2000 (Tab. 5).

<i>Migliaia di tonnellate</i>										
Settore	1990	1995	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2008 (*)
A) Traffico passeggeri su strada, con veicoli alimentati a:										
- benzina	38,8	51,4	49,6	48,5	45,6	43,2	40,1	37,6	35,8	33,3
<i>di cui motocicli</i>	3,1	3,5	3,5	3,7	3,9	3,7	3,9	4,1	4,1	4,0
- gasolio	19,6	15,3	20,2	22,1	27,2	29,9	31,8	35,8	38,2	37,3
- gpl + altri gas	4,3	4,8	4,8	4,8	4,4	4,0	3,8	3,9	3,8	4,0
Totale A)	62,6	71,5	74,6	75,4	77,2	77,1	75,7	77,3	77,7	74,6
B) Traffico merci su strada, con veicoli										
- leggeri, < 3,5 t	11,9	10,5	14,2	13,7	14,5	15,8	16,2	15,5	15,9	16,2
<i>di cui benzina</i>	1,6	1,3	1,9	2,1	1,5	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1
- pesanti, > 3,5 t	18,2	20,8	21,3	22,8	24,6	25,3	25,1	24,8	25,3	25,7
Totale B)	30,1	31,4	35,4	36,5	39,1	41,1	41,4	40,3	41,2	41,9
C) Ferrovie	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3
D) Navi (a)	4,8	4,4	6,2	6,2	6,1	6,3	6,2	6,0	6,0	6,3
E) Aerei (b)	1,7	1,7	2,8	2,7	2,9	2,8	2,8	2,9	3,1	2,8
F) Altro (nautica, Stato)	1,9	1,8	1,0	0,8	1,0	1,3	1,4	1,2	1,2	1,4
Totale trasporti (A+B+C+D+E+F)	101,6	111,3	120,3	122,0	126,5	128,9	127,7	128,2	129,6	127,3
Totale nazionale	434,8	445,7	464,3	470,2	487,8	491,1	491,8	488,0	477,8	n.d.
(*) Stime.										
a) Include i bunkeraggi utilizzati per la navigazione nazionale e le soste nei porti di tutte le navi.										
b) Include solo il traffico aereo nazionale.										
n.d.: non disponibile.										
Fonte: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale).										

Tab. 3 - Emissioni di anidride carbonica - Anni 1990, 1995, 2000, 2001, 2003-2008 [1]

<i>Migliaia di tonnellate</i>										
Settore	1990	1995	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2008(*)
A) Traffico passeggeri su strada, con veicoli alimentati a :										
- benzina	388,3	439,9	283,9	238,5	187,8	156,1	115,2	87,7	70,2	63,3
<i>di cui motocicli</i>	1,6	1,9	3,1	4,0	5,6	6,1	6,7	7,4	7,9	8,0
- gasolio	125,1	88,4	118,6	128,6	154,6	167,2	176,2	188,7	194,3	187,3
- gpl + altri gas	67,9	76,2	49,3	45,0	35,0	30,0	25,8	23,7	22,3	22,1
Totale A)	581,3	604,5	451,8	412,1	377,4	353,4	317,2	300,0	286,8	272,7
B) Traffico merci su strada, con veicoli										
- leggeri, < 3,5 t.	89,9	78,1	111,7	112,7	99,9	107,0	105,7	99,2	96,2	94,1
<i>di cui benzina</i>	15,8	11,1	12,0	10,7	6,9	5,6	5,0	4,5	4,0	3,5
- pesanti, > 3,5 t	213,4	236,5	263,7	283,2	291,6	291,9	276,4	260,3	254,8	248,6
Totale B)	303,3	314,7	375,4	395,8	391,6	398,9	382,1	359,4	351,0	342,7
C) Ferrovie	5,6	5,5	4,5	4,4	4,3	4,4	3,9	4,5	4,2	4,4
D) Navi (a)	91,6	84,0	117,7	119,1	116,9	119,9	118,2	115,1	114,4	120,3
E) Aerei (b)	7,6	8,0	13,4	12,9	13,7	13,1	13,1	14,0	14,9	13,6
F) Altro (nautica, Stato)	11,6	10,1	4,0	1,6	3,9	8,3	8,7	7,2	6,9	9,7
Totale trasporti (A+B+C+D+E+F)	1.001,1	1.026,8	966,7	945,9	907,9	898,0	843,1	800,2	778,2	763,4
Totale nazionale	1.943,0	1.808,0	1.516	1.494	1.398	1.338	1277	1226	n.d.	n.d.

(*) Valori stimati sulla base delle previsioni traffico PGT, includono la stima degli effetti delle nuove direttive apportate.
a) Include i bunkeraggi utilizzati per la navigazione nazionale e le soste nei porti di tutte le navi.
b) Include solo il traffico aereo nazionale.
n.d.: non disponibile.
Fonte: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale).

Tab. 4 - Emissioni di ossidi di azoto - Anni 1990, 1995, 2000, 2001, 2003-2008 [1]

<i>Migliaia di tonnellate</i>										
Settore	1990	1995	2000	2001	2003	2004	2005	2006	2007	2008(**)
A) Traffico passeggeri su strada, con veicoli alimentati a :										
- benzina	828,5	906,7	572,8	480,3	400,4	343,5	282,9	273,5	264,6	255,5
<i>di cui motocicli</i>	217,2	228,9	311,2	263,4	226,2	196,9	196,9	203,8	179,8	163,7
- gasolio	32,8	28,0	34,4	32,8	32,7	31,6	30,9	30,3	30,0	28,8
- gpl + altri gas	21,5	25,5	18,4	17,2	13,7	11,9	10,4	9,6	9,0	9,1
Totale A)	882,8	960,2	625,5	530,3	446,7	387,0	324,1	313,3	303,6	293,4
B) Traffico merci su strada, con veicoli										
- leggeri, < 3,5 t.	56,4	46,0	31,1	28,3	22,6	20,4	18,5	15,9	14,6	13,6
<i>di cui benzina</i>	31,9	23,4	19,3	17,8	12,3	9,7	8,1	6,7	5,9	5,1
- pesanti, > 3,5 t	31,8	38,8	18,1	18,7	18,8	18,2	17,5	15,3	14,3	13,1
Totale B)	88,2	84,8	49,3	47,0	41,4	38,6	36,0	31,3	28,9	26,8
C) Ferrovie	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
D) Navi (a)	3,7	3,4	4,7	4,8	4,7	4,8	4,7	4,6	4,6	4,8
E) Aerei (b)	1,3	1,0	2,1	2,0	2,3	2,3	2,3	2,5	2,2	2,0
F) Altro (nautica, Stato)	99,8	112,3	99,5	94,1	91,6	88,2	83,8	83,4	83,3	79,0
Totale trasporti (A+B+C+D+E+F)	1.076,4	1.162,3	781,6	678,8	587,2	521,5	451,4	435,6	423,0	406,5
Totale nazionale	1.986,0	2.004,0	1610	1486	1334	1289	1238	1200	n.d.	n.d.

(*) La stima deriva da previsioni di mobilità coerenti con il CNIT e con i consumi del Bilancio Energetico Nazionale del Ministero dello Sviluppo Economico.
(**) Valori stimati sulla base delle previsioni traffico PGT, includono la stima degli effetti delle nuove direttive apportate.
a) Include i bunkeraggi utilizzati per la navigazione nazionale e le soste nei porti di tutte le navi.
b) Include solo il traffico aereo nazionale.
n.d.: non disponibile.
Fonte: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale).

Tab. 5 - Emissioni di composti organici volatili non metanici - Anni 1990, 1995, 2000, 2001, 2003-2008 [1]

Il sistema dei trasporti è responsabile dell’emissione nell’atmosfera di un’aliquota pari al 15% delle emissioni globali di gas-serra e, anche per questo motivo, si profila all’orizzonte una crescita della

concentrazione di questi gas che causerà, nei prossimi decenni, un incremento dell’effetto serra e, quindi, un ulteriore innalzamento della temperatura media del Pianeta (Fig. 4).

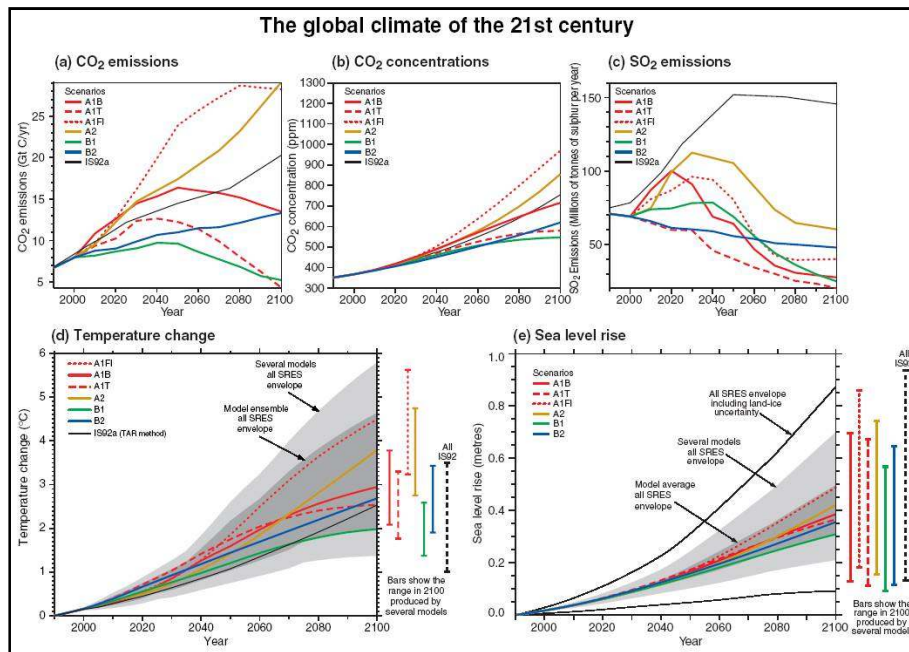


Fig. 4 - Proiezioni al 2100: inquinamento e cambiamenti climatici (fonte: IPCC Third Assessment Report - "Climate Change 2001")

Il riscaldamento si distribuirà in modo disuguale: di più vicino ai poli, di meno all’equatore. Dato che le condizioni meteorologiche della Terra sono, in larga misura, condizionate dalla differenza di temperatura tra zone polari ed equatore, si potranno determinare mutamenti di forza e direzione dei venti, delle precipitazioni e delle correnti oceaniche.

1.1.2 L’incidentalità nei trasporti

La dimensione dei costi sociali derivanti dall’incidentalità che ogni anno il sistema dei trasporti scarica sul paese è, per la gran parte, da addebitare ai trasporti su strada piuttosto che ai trasporti ferroviari ed aerei (Tab. 6).

La Commissione Europea stima che, nell’ambito comunitario, il costo sociale derivante dalla incidentalità stradale sia pari al 2% del Prodotto Interno Lordo dell’Unione Europea. Le statistiche disponibili mettono in evidenza che il fenomeno, nel lungo periodo (tra il 1980 ed il 2004), è complessivamente in fase di ridimensionamento. Infatti, i dati indicano che sia gli incidenti (Fig. 5), sia il numero di decessi ad essi conseguenti (Fig. 6) si sia progressivamente ridotto.

	Costi per incidenti
Strada	27727
Trasporto passeggeri	25829
Trasporto merci	1898
Rotaia	94
Trasporto passeggeri	81
Trasporto merci	13
Aereo	79
Trasporto passeggeri	79
Trasporto merci	0

Tab. 6 - Costi esterni imputabili alla mobilità nel 1999 (milioni di euro) – [2]

All’interno della statistica complessiva è però possibile indagare il fenomeno per i singoli paesi comunitari mettendo in evidenza uno scenario più articolato e complesso. Nelle diverse realtà esistono casi in cui la sinistrosità è diminuita in modo significativo (Belgio, Danimarca, Francia, Grecia, Olanda e Portogallo), ma è altrettanto meritorio di evidenza il fatto che esistano realtà dove il numero di incidenti è aumentato in modo non trascurabile (Italia e Spagna).

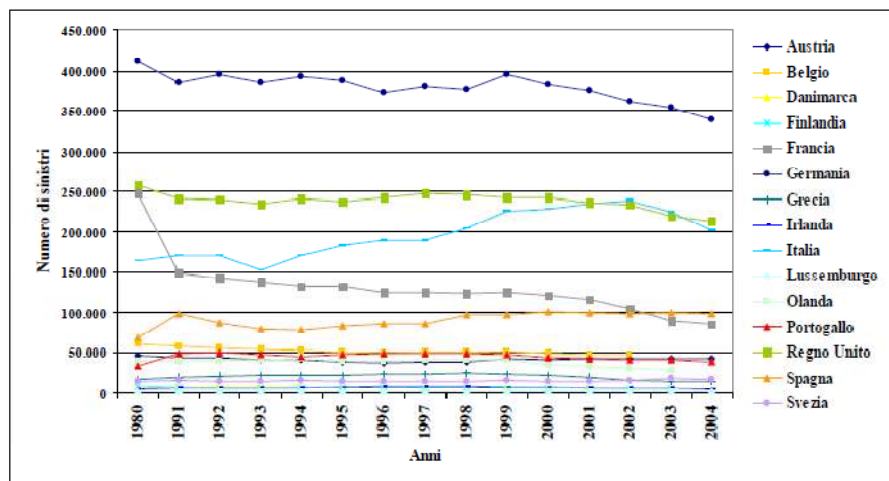


Fig. 5 - Sinistrosità stradale nei paesi dell’Unione Europea (numero di incidenti) – [3]

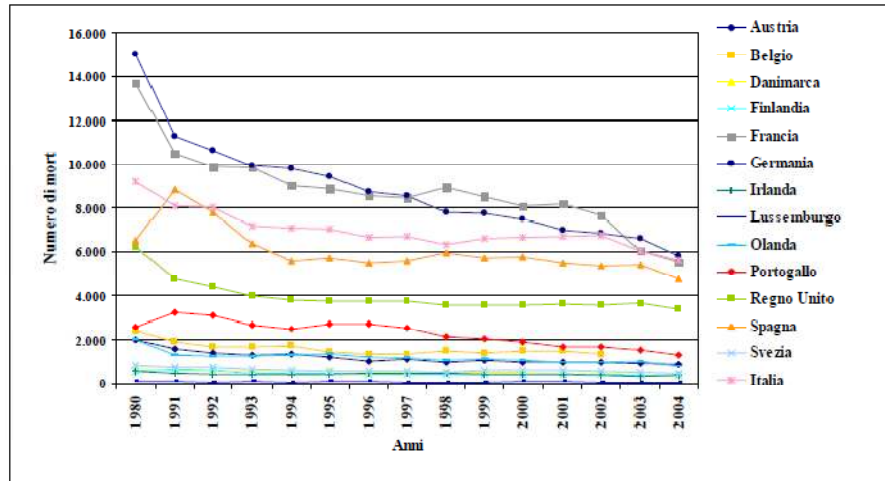


Fig. 6 - Sinistrosità stradale nei paesi dell’Unione Europea (numero di morti) – [3]

Con riferimento ai decessi per incidenti è altresì utile evidenziare che, in alcuni casi, dove il fenomeno della sinistrosità è risultato in crescita si è ridotto il numero di vittime (Italia e Spagna). Le principali motivazioni del ridimensionamento del fenomeno della mortalità sono da cercare principalmente nel miglioramento dei sistemi di sicurezza introdotti sugli autoveicoli (airbag, barre anti – intrusione laterali, ecc...) e nel miglioramento della qualità delle cure sanitarie.

Gli incidenti stradali si verificano prevalentemente in modo stocastico, ovvero, non è facilmente prevedibile l’accadimento di un tale evento. I gradi di libertà del fenomeno sono tali per cui la misurazione preventiva degli accadimenti non risulta essere significativa, in quanto le principali variabili (giorno, ora, luogo, livello di traffico, tipo di veicolo) non sempre risultano essere correlate in modo determinante. Ciò che può predisporre all’accadimento di un incidente risulta, molto probabilmente, connesso allo stato psico – fisico del conducente.

E’ significativo valutare il fenomeno per la realtà Italiana, in relazione alla tipologia di rete stradale. Ciò si ritiene utile in prima battuta per ridurre il grado di complessità delle statistiche disponibili; la quantità di informazioni ricavabile dai dati ISTAT è significativamente articolata poiché deriva direttamente dai rilievi effettuati dalle forze dell’ordine, ma è altresì di difficile lettura se non valutata con criteri uniformi.

Una sintesi aggregata dei risultati (Fig. 7) evidenzia che la parte rilevante del fenomeno accade in ambito urbano e che la quota restante, rispetto al totale, sia quasi equamente distribuita sulle reti di livello superiore (autostrade, strade statali e strade provinciali).

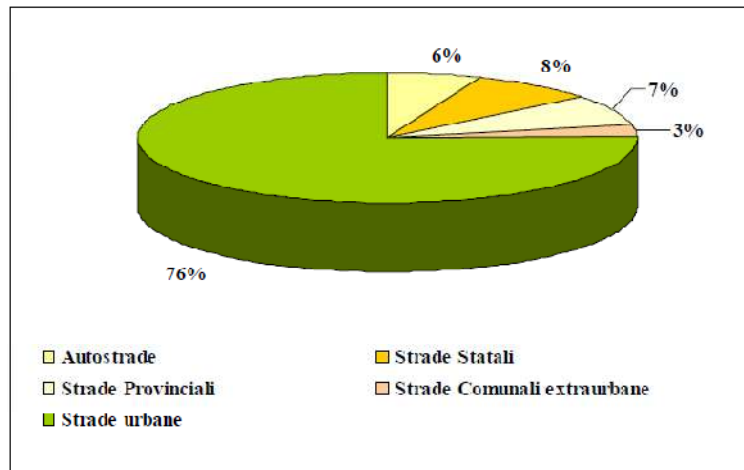


Fig. 7 - Ripartizione percentuale degli incidenti per rete stradale – Anno 2004 – [4]

Dai dati disponibili emerge, pertanto, che il fenomeno della sinistrosità stradale è rilevante e diffuso; le cause e gli eventi che lo determinano sono molteplici e gli effetti che si generano non si concludono nella maggior parte dei casi con il sinistro, ma si protraggono con danni materiali, biologici e morali. I costi, pertanto, non si riducono ai soli danni a cose o persone, ma si estendono a costi di tipo sociale che perdurano nel tempo.

1.1.3 Il fenomeno della congestione stradale

Una delle principali conseguenze delle crescenti dimensioni del fenomeno della mobilità è la congestione. La congestione è dovuta a vari fattori: sproporzione fra traffico e capacità dell’infrastruttura, incidenti, interruzioni del flusso dovute a lavori in corso o scioperi. Dal punto di vista quantitativo, il più importante è il primo dei fattori citati: la congestione che si genera quando il traffico non è adeguatamente assorbito dalla capacità dell’infrastruttura, quando cioè il tempo di viaggio supera il valore che avrebbe se i flussi e le condizioni di traffico fossero “normali” (ovvero in linea con quanto previsto in fase di progettazione dell’infrastruttura).

I costi generati dalla congestione consistono di varie componenti:

- i costi associati al tempo perduto dagli individui e dalle merci (costi causati anche ai non utenti ed all’economia in generale);
- i maggiori costi operativi dei veicoli (benzina, lubrificanti, ammortamenti);
- i maggiori costi dell’inquinamento;
- i maggiori rischi di incidente;
- i costi del maggiore stress.



Fig. 8 – Un episodio estremo di congestione

A causa della complessità delle catene di causa-effetto di molte delle componenti di costo sopra elencate non è semplice quantificare la quota parte prettamente esterna, cioè la differenza fra i costi della congestione che ricadono sulla collettività al netto di quelli sostenuti da chi utilizza i veicoli.

1.1.4 Il rumore

Il rumore e le vibrazioni sono degli altri effetti sgraditi connessi al sistema dei trasporti. Data la variabilità della sua manifestazione (relativamente alla durata, frequenza, intensità, ecc.), per rappresentare il livello di rumore sono stati sviluppati dei particolari indicatori. Tra questi citiamo il dBA (decibel ponderato in scala A) ed il Leq (livello equivalente continuo).

Viene definita vibrazione un fenomeno ondulatorio, generalmente a bassa frequenza, trasmesso attraverso un mezzo solido. Esso può essere valutato in termini di spostamenti, di velocità e di accelerazione. Le vibrazioni si possono propagare via terra e via aria. Quelle via terra vengono provocate dal passaggio di un veicolo su una superficie più o meno regolare e l'intensità delle vibrazioni dipende dalla dimensione e dall'irregolarità del terreno nonché dalla velocità e dal peso del veicolo. L'intensità è quindi maggiore per i veicoli industriali.

1.1.5 L'intrusione visiva, l'effetto barriera, il consumo di uso del suolo

Per intrusione visiva si intende l'effetto sull'impatto visivo che una struttura di trasporto produce nell'ambiente che la circonda. L'intrusione visiva è un'esternalità assai difficile da quantificare dal

momento che nella sua valutazione giocano in ampia misura elementi di giudizio estetici ed etici fortemente soggettivi.

L'effetto barriera è l'effetto di separazione fisica conseguente alla presenza di un asse di trasporto che impedisce o rende più difficili i collegamenti all'interno di una comunità.

L'entità dell'effetto dipende dalle caratteristiche dell'infrastruttura (larghezza, numero di attraversamenti pedonali o rampe), dal tipo di traffico che vi si svolge (entità, velocità) e dalle caratteristiche della comunità interessata. Come indicatori dell'entità dell'effetto barriera si ricorre solitamente al numero di relazioni impedito o all'allungamento dei tempi di attraversamento.

Le attività di trasporto sono caratterizzate da un elevato consumo di uso del suolo come sede delle infrastrutture e per la sosta dei veicoli. Si ritiene che, tra tutti i modi di trasporto, il modo stradale sia quello che ha il più elevato consumo del suolo, anche se non esistono precise stime quantitative per le intuibili difficoltà di misurazione.

1.1.6 Conclusioni

E' immediato rilevare che le esternalità negative connesse al sistema dei trasporti differiscono considerevolmente (Tab. 7) per unità di misura, per dimensione temporale e spaziale in cui esercitano i loro effetti, per la possibilità di identificare una relazione dose/risposta. Queste differenze fanno sì che per alcune di queste si incontrino notevoli difficoltà nella stima del loro valore economico.

Impatto	Unità di misura	Dimensione temporale	Dimensione spaziale	Relazione di dose/risposta
Rumore	Decibel	effetti immediatamente percepibili e di breve periodo	locale, modello di diffusione suff. certo	soglia critica incerta
Inquinamento Dell'aria	molteplici, manca una unità sintetica aggregata	effetti che si manifestano sia nel breve, che nel medio-lungo periodo	locale, regionale e globale, modello di diffusione altamente incerto	massima incertezza sulla soglia critica, effetti sinergici sconosciuti, ma si sospetta rilevanti
Inquinamento Dell'acqua e del suolo	v. sopra	v. sopra	locali e regionali, modello di diffusione incerto	v. sopra
Intrusione visiva ed effetti di separazione	manca una unità di misura naturale	percezione immediata e durata pari alla permanenza dell'infrastruttura o del flusso di traffico	locale	soggettiva
Incidenti	persone coinvolte		locale	

Tab. 7 - Caratteristiche dei principali impatti

Una prima difficoltà deriva dal fatto che mentre per alcuni impatti esiste una unità di misura immediatamente identificabile (consumo di suolo, numero di persone coinvolte in incidenti, rumore, vibrazioni, ecc.), per altri manca una unità di misura aggregata (inquinamento dell'aria, dell'acqua e del suolo) e per altri ancora l'unità di misura è soggettiva (impatto visivo, separazione delle comunità) e dipende da abitudini, gusti, preferenze.

Inoltre, si individuano diversità nella dimensione temporale relativamente alla manifestazione ed alla percezione del danno. I danni possono essere immediati o di breve periodo (rumore, separazione, impatto visivo, cattivi odori, polveri) oppure di medio-lungo periodo (malattie respiratorie e alterazioni genetiche legate all'inquinamento dell'aria e dell'acqua).

La dimensione spaziale degli impatti ambientali dei trasporti è altresì assai diversificata. Una buona parte degli impatti è relativa all'area circostante il luogo in cui avviene l'attività di trasporto ed è ben localizzata (rumore, impatto visivo, vibrazioni, effetto di separazione, inquinamento da CO, piombo, particolati). Altri impatti, ad esempio quelli prodotti da alcuni inquinanti dell'aria quali SO_x, NO_x, HC, si manifestano in un'area vasta (smog, piogge acide, ozono troposferico) o sono addirittura globali (riduzione dello strato di ozono, effetto serra causato dalla CO₂ e dai clorofluorocarburi, ozono, ossidi di azoto).

Per gli inquinanti soggetti a fenomeni di trasporto si utilizzano modelli di diffusione che, a volte, possono risultare imprecisi e, per di più, in presenza di numerose variabili che dipendono dal comportamento individuale dei conducenti (manutenzione della vettura, stile di guida, etc).

Le incertezze connesse alle complesse ed, a volte, imprecise definizioni temporali e spaziali degli impatti si sommano inoltre alle incertezze scientifiche sulla definizione della relazione tra esposizione all'inquinamento ed effetti sulla salute, sulla psicologia umana e sugli equilibri ecologici. Tutto ciò, connesso anche allo scarso livello di informazione (dovuto alla mancanza di adeguate reti di monitoraggio), limita la possibilità per gli agenti economici di formare e manifestare le proprie preferenze e quindi la propria disponibilità a pagare che sono, come vedremo, le pre-condizioni per stimare il valore economico di un costo esterno.

1.2 Strategie di mitigazione

Come già è stato detto, l’esistenza di costi e benefici esterni comporta una allocazione delle risorse inefficiente. Da qui la richiesta di intervenire, ed esempio, attraverso misure fiscali (imposte o sussidi) o regolamentari che correggano le distorsioni e ripristinino la corretta allocazione modale.

Se sulla necessità di apportare alcune correzioni ai prezzi dei trasporti c’è un sostanziale consenso tra i commentatori, le opinioni divergono fortemente quando si passa alla definizione concettuale di costo e beneficio esterno, alla loro identificazione nel caso dei trasporti e, soprattutto, quanto si tenta una loro quantificazione monetaria. Pertanto, dopo una breve trattazione di economia dei trasporti, sono analizzate delle strategie di intervento alternative alle imposte fiscali. Ci si riferisce, ad esempio, al miglioramento dell’offerta di trasporto alternativo al trasporto stradale, allo sviluppo dell’intermodalità, alla promozione delle mobilità dolci e, soprattutto, allo sviluppo dei Sistemi Intelligenti di Trasporto (ITS) ai quali sarà dedicata una trattazione approfondita nei capitoli successivi del presente lavoro.

1.2.1 Teoria economica

Consideriamo due casi classici di esternalità negativa del trasporto, l’inquinamento atmosferico e la congestione.

L’inquinamento atmosferico

L’inquinamento atmosferico derivante dalle attività di trasporto rappresenta un costo esterno (esternalità negativa) che chi esercita un’attività di trasporto impone a terzi, senza che gli venga chiesta una compensazione per il danno arrecato e quindi senza che questi ne tenga conto nel decidere se e come effettuare il viaggio. L’allocazione delle risorse che ne risulta non è quindi ottimale. La dimostrazione di questo risultato è condotta nella teoria economica nel seguente modo. Immaginiamo una strada che collega un’area residenziale con il centro città, sede di negozi ed uffici. Sia D (Fig. 9) la curva di domanda per usare quella strada. Essa riflette i benefici marginali privati (BMP) che si ricavano dal trasporto e che si assumono decrescenti al crescere del numero dei veicoli.

Sia CMP la curva dei costi marginali privati (consistenti prevalentemente nel carburante e nel tempo necessario per percorrere la strada). Essa è crescente al crescere del numero di veicoli che usano la strada in quanto ogni veicolo che si aggiunge diminuisce via via la velocità di percorrenza

della strada, aumentando quindi il tempo di percorrenza. Si noti che l’aumento dei costi non riguarda solo il veicolo che si è aggiunto per ultimo, ma tutti i veicoli presenti sulla strada.

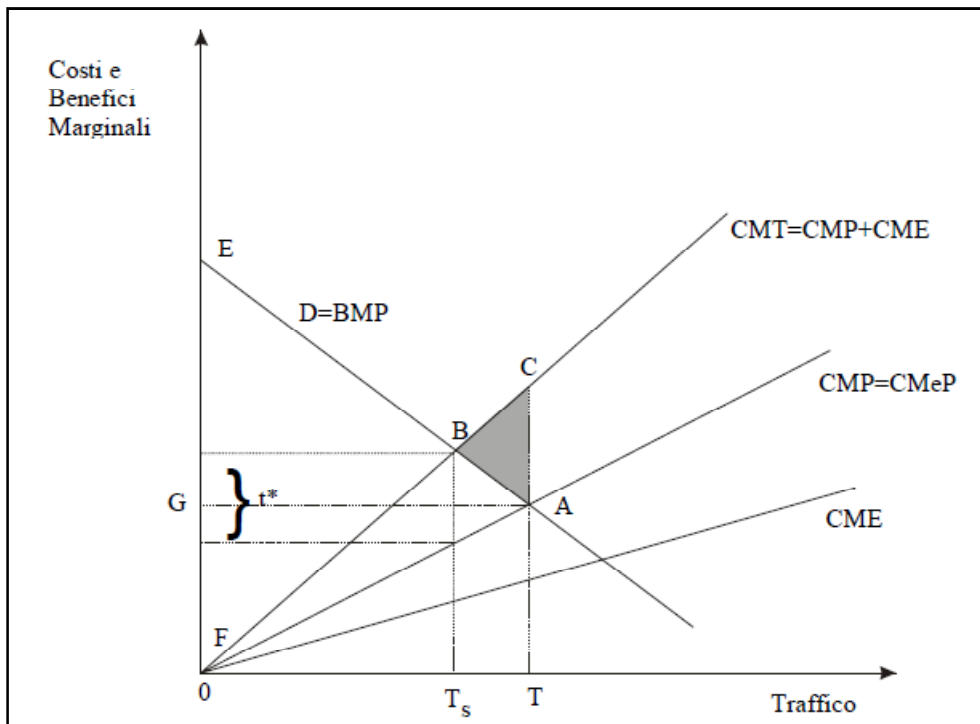


Fig. 9 - L'imposta sull'inquinamento atmosferico

Nell'ipotesi che gli individui siano uguali, la curva dei costi marginali privati CMP equivale a quella dei costi medi privati CMeP. Sulla base di criteri di scelta economici privati, il livello di traffico che si sviluppa è pari a T, perché in quel punto i benefici marginali sono uguali ai costi marginali. Fino al livello di traffico T ogni nuovo veicolo realizza un guadagno perché il beneficio marginale del viaggio è superiore al suo costo marginale, oltre il livello T ogni eventuale veicolo realizzerebbe una perdita, per cui T è il livello di equilibrio stabile del mercato. Il surplus totale privato è massimizzato ed è composto dal surplus del consumatore (area EAG) e dal surplus del produttore (FAG). Il livello di traffico T, però, non è il livello ottimo dal punto di vista sociale se sono presenti costi esterni quali l'inquinamento atmosferico, che impone costi a terzi ed agli stessi automobilisti. Ipotizziamo che le emissioni e, dunque, i costi dell'inquinamento, aumentino all'aumentare del livello di traffico come indicato dalla curva CME, in quanto a minori velocità l'efficienza energetica ed ambientale dei motori diminuisce. La curva CMT, somma della curva CMP e CME, indicherà i costi marginali totali (privati ed esterni) del trasporto. In corrispondenza del livello di traffico T, punto di ottimo dal punto di vista privato, si ha una perdita di benessere sociale pari

all’area CBA, in quanto nel tratto da T_s a T i costi marginali sociali sono superiori ai benefici marginali (in T il benessere sociale è pari all’area EBF meno l’area CBA).

Come vedremo, assume un ruolo di fondamentale importanza all’interno del presente lavoro notare che, riducendo il livello di traffico tale perdita si riduce.

Al livello T_s la perdita sarebbe eliminata, ripristinando le condizioni di massimizzazione del benessere totale sociale, pari questa volta all’area EBF.

Il nuovo livello di traffico T_s , ottimo dal punto di vista sociale, può essere raggiunto imponendo ad ogni automobilista un’imposta t^* , pari al costo marginale esterno (differenza tra i costi totali ed i costi privati nel punto T_s), in questo modo internalizzando l’esternalità oppure, come vedremo meglio in seguito, mediante strategie di intervento alternative.

Il fenomeno della congestione

Un altro esempio di costo esterno è la congestione. Rispetto all’inquinamento atmosferico la congestione presenta due differenze: è un costo esterno al singolo automobilista ma interno al settore dei trasporti ed è una esternalità di tempo, cioè entra nella funzione di produzione o consumo di altri individui aumentando il tempo loro necessario per compiere il viaggio.

L’illustrazione di questa esternalità avviene nei seguenti termini (Fig. 10).

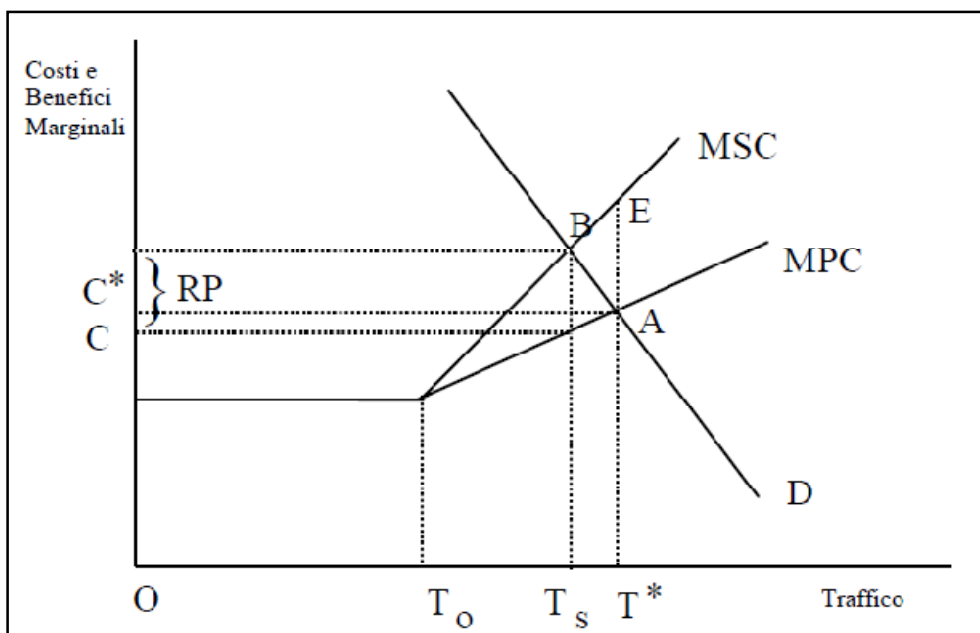


Fig. 10 - L'imposta sulla congestione

All'aumentare del flusso di veicoli (numero di mezzi di trasporto che passano sull'asse stradale nell'unità di tempo) su una data strada, da un certo valore di soglia T_0 in poi, ogni veicolo aggiuntivo non soltanto si trova ad operare ad un costo privato sempre più elevato, ma provoca un aumento di costo anche agli altri veicoli già circolanti, in quanto il suo ingresso nella strada aumenta il loro tempo di viaggio.

Si determina così una biforcazione tra la curva dei costi marginali (medi) privati e quella dei costi marginali sociali.

Dal momento che il guidatore considera solo i costi privati e non i costi esterni (esternalità) che impone agli altri, si ha un problema di efficienza e di perdita di benessere sociale pari a ABE. Infatti, il livello di traffico che si genera è T^* (costi marginali privati pari ai benefici marginali descritti dalla funzione di domanda D), mentre quello socialmente desiderabile sarebbe T_s . Il flusso effettivo tende ad essere quindi più elevato di quello socialmente ottimale. Per ottenere il flusso ottimale si può ricorrere ad un'imposta pari a RP (*road pricing*) che riflette la differenza tra il costo marginale privato e quello sociale e rende l'automobilista consapevole del rallentamento che impone agli altri utenti della strada. Con l'imposta non si mira ad eliminare tutta la congestione, ma solo quella economicamente eccessiva. L'ammontare totale che affluisce alle casse dello Stato è pari all'imposta RP per il flusso T_s .

La presentazione grafica della teoria dei costi esterni che abbiamo appena mostrato ha già introdotto la soluzione alla perdita di benessere che essi causano: l'internalizzazione tramite imposte fiscali pari al costo marginale esterno provocato, soluzione definita ottimale o di *first best*.

Tale soluzione, se difficilmente contestabile nel mondo asettico della teoria dell'equilibrio economico parziale in cui è collocata, appare via via più debole quando si allarga l'orizzonte teorico o si tenta di calare nella realtà i suggerimenti della teoria.

Inoltre, c'è un grave problema di applicabilità dell'imposta fiscale che, ricordiamo, per avere la natura di imposta efficiente deve soddisfare i seguenti criteri:

- deve essere uguale o proporzionale al danno causato: perciò deve essere differenziata per tipo di viaggio, tenendo conto del luogo e dell'ora del viaggio e del tipo di veicolo con cui è effettuata. In assenza di una sufficiente differenziazione diminuisce l'efficienza dell'imposta, cioè la sua capacità di mandare gli opportuni segnali correttivi agli utenti e viene meno il vantaggio di efficienza che le imposte fiscali hanno rispetto agli strumenti regolamentari di tipo tradizionale;

- deve essere nota prima che gli utenti scelgono se, come e dove usare l’automobile. Il segnale agli utenti deve essere cioè noto *ex-ante* e non *ex-post* affinché essi tengano conto dei costi esterni. Questo può essere un problema rilevante se le condizioni di traffico sono variabili, spazialmente e temporalmente e se c’è un’interazione non prevedibile tra fissazione dell’imposta e comportamento degli automobilisti.

Oltre che di tipo teorico, i problemi di applicazione di imposte fiscali efficienti sono anche di tipo tecnico-ingegneristico ed economico. Esiste infatti un problema di attrezzature tecniche necessarie alla loro attuazione, che sembrano risolvibili nel caso dell’imposta da congestione (*road pricing*), ma ancora a livello di ideazione nel caso dell’imposta ambientale.

1.2.2 Riequilibrio tra le diverse modalità di trasporto e politiche di tariffazione

Una strategia di intervento mirata alla riduzione della congestione del sistema stradale è rappresentata da una coraggiosa politica pubblica di riequilibrio tra le diverse modalità di trasporto, con investimenti straordinari ed interventi strutturali che permettano di valorizzare le peculiarità di ogni singolo mezzo.

Bisogna incentivare, dove è possibile ed opportuno, il traffico marittimo, quello aereo e quello su rotaia, il relazione ai loro minori costi esterni.

Questo significa conoscere il funzionamento, le caratteristiche ed i limiti del sistema dei trasporti, ma significa anche ricercare come possano essere meglio combinate le diverse modalità di trasporto nell’interesse della società e dei singoli individui.

Come è stato detto, la presenza di esternalità provoca un imperfetto funzionamento delle leggi di mercato. E’ necessario, quindi, che lo Stato intervenga per armonizzare l’interesse collettivo ed individuale tramite meccanismi regolamentari, fiscali o tariffari che quantifichino gli effetti esterni, in modo tale che la struttura dei costi del soggetto economico risulti uguale a quello della collettività.

In questo senso il principale obiettivo dovrà essere il contenimento del trasporto su gomma, il quale presenta indubbi vantaggi di comodità, di flessibilità e di capillarità di percorso (*door to door*) senza alcuna rottura di carico, ma che ha ormai raggiunto livelli difficilmente sostenibili da un punto di vista collettivo, specialmente nell’ambito degli agglomerati urbani.

Gran parte del trasporto su gomma è infatti un trasporto locale con distanze inferiori ai 50 Km (e spesso inferiore ai 30 Km). Quindi, è nei pressi dei centri abitati che si verifica il gran numero di

incidenti stradali, si generano i più vistosi fenomeni di congestionamento e si rischia di deturpare in modo irreversibile il territorio.

Nel corso degli anni novanta la Commissione Europea è più volte intervenuta sul problema della sostenibilità del sistema dei trasporti, fino ad arrivare al Libro Bianco intitolato “La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte”. In questo documento si prende atto che la politica comune dei trasporti non si è purtroppo sviluppata in modo armonioso e che il sistema dei trasporti europeo si trova oggi a dover fronteggiare ad una serie di gravi difficoltà.

Nel Libro Bianco è prevista una politica attiva di rilancio delle ferrovie, di promozione del trasporto marittimo a corto raggio e del trasporto fluviale, di sviluppo dell’intermodalità. Combinando la strada con la ferrovia o con la navigazione è possibile mantenere i vantaggi economici e qualitativi della prima ed ammorbidire la rigidità degli altri due sistemi.

Nel Libro Bianco è inoltre ribadita l’importanza di elaborare un’efficace politica di tariffazione dei trasporti che conduca all’internalizzazione completa dei costi sociali ed ambientali. Se gli utenti del trasporto, in particolare le imprese, dovessero sostenere i costi reali della loro attività, essi sarebbero motivati a modificare le loro scelte logistiche, utilizzando ad esempio veicoli meno inquinanti, più sicuri e che arrechino minori danni alla rete viaria, oppure modificando i percorsi e, come vedremo in maniera dettagliata nel proseguo della trattazione, passando a quelli che provochino minore congestione.

Il sistema dei trasporti è tassato male ed in maniera disuguale: gli utenti sono trattati senza distinzione e senza tenere conto del degrado delle infrastrutture, degli ingorghi o dell’inquinamento di cui sono responsabili. Questa cattiva ripartizione degli oneri tra gestori dell’infrastruttura, contribuenti ed utenti è all’origine di notevoli distorsioni tra operatori e modi di trasporto. Nel Libro Bianco si punta perciò a sostituire progressivamente le tasse che gravano attualmente sul sistema dei trasporti con strumenti più efficaci per integrare i costi di infrastruttura e i costi esterni, basandosi sui principi “chi usa paga” e “chi inquina paga”.

Che si tratti di aeroporti, porti, strade, ferrovie o vie navigabili, il prezzo d’uso delle infrastrutture dovrebbe variare secondo lo stesso principio, in funzione cioè della categoria di infrastruttura usata, del periodo della giornata, della distanza, delle dimensioni, della massa del veicolo e di qualunque altro fattore che influenzi i livelli di congestione, di inquinamento, di incidentalità, il deterioramento delle infrastrutture stesse.

Altro obiettivo prioritario della UE è garantire ai cittadini europei il più elevato grado possibile di sicurezza, specie sulle strade. Che si tratti di morti o feriti, le vittime della strada rappresentano per

la società un costo di decine di miliardi di euro ed un prezzo umano incalcolabile. L’UE intende contribuire a questo obiettivo, non soltanto attraverso lo scambio di buone pratiche, ma anche intervenendo ad un duplice livello: da un lato, armonizzando le sanzioni; dall’altro promovendo nuove tecnologie al servizio della sicurezza stradale.

1.2.3 Migliorare l’offerta di trasporto pubblico e la mobilità ciclistica in ambito urbano

L’ambiente urbano, caratterizzato dall’elevata concentrazione di popolazione, servizi, attività produttive e commerciali, costituisce lo scenario all’interno del quale la mobilità si pone come elemento di criticità principale per il raggiungimento dell’equilibrio fra le esigenze dei singoli ed il benessere comune. Dopo un’analisi conoscitiva dell’offerta e della domanda di trasporto in Italia, vedremo come gli strumenti di programmazione tecnico-amministrativo possono, tramite un insieme coordinato di interventi, migliorare le condizioni della circolazione stradale nell’area urbana, dei pedoni, dei mezzi pubblici e dei veicoli privati.

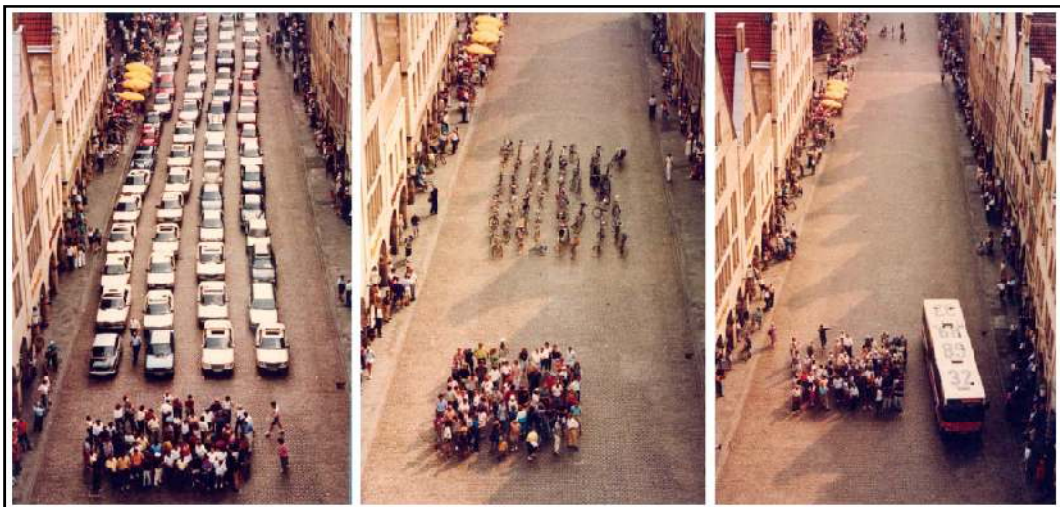


Fig. 11 - Ingombro per diverse modalità di trasporto (Presseamt Münster)

L’offerta di trasporto pubblico

L’offerta di trasporto pubblico può essere scomposta in base a differenti elementi che costituiscono i suoi input:

- impianti fissi, cioè le cosiddette infrastrutture viarie e ferroviarie;
- attrezzature mobili, vale a dire il parco veicoli.

La presenza di impianti fissi costituisce motivo di polarizzazione dei flussi di traffico ed agisce da fattore di incentivazione della domanda di mobilità. L’offerta di infrastrutture di trasporto pubblico è calcolata come lunghezza in chilometri delle reti di trasporto pubblico considerate per 100 km² di superficie comunale (densità).

Il trasporto ferroviario comporta una combinazione complessa di materiale rotabile ed impianti fissi, per cui l’apparato ferroviario presenta una pesantezza strutturale che lo rende alquanto lento nel recepire le spinte del progresso tecnico; questi inconvenienti sono tuttavia bilanciati dalla notevole economicità della trazione ferroviaria, dal minore fabbisogno di suolo rispetto al trasporto stradale e dai ridottissimi tassi di inquinamento, per cui oggi, emergendo una maggiore sensibilità verso i problemi ambientali, il trasporto ferroviario deve essere rilanciato nelle scelte collettive riguardanti le preferenze modali alla mobilità.

Un altro importante aspetto dell’offerta di trasporto pubblico è la disponibilità di attrezzature mobili. Per attrezzature mobili si intendono tutti i mezzi di locomozione usati nei diversi sistemi modali di trasporto pubblico. Per ogni tipologia di trasporto (autobus, tram, filobus e metropolitana), l’indicatore relativo alla consistenza del parco veicolare del trasporto pubblico è espresso in termini di vetture per dieci mila abitanti (Tab. 8).

<i>Vetture per 10.000 abitanti</i>					
Comuni	Autobus	Tram	Filobus	Metropolitana	Totale
Torino	12,4	2,6	-	0,6	15,6
Milano	7,7	3,4	1,2	5,6	17,9
Verona	6,7	-	-	-	6,7
Venezia	17,1	-	-	-	17,1
Padova	9,9	0,7	-	-	10,6
Trieste	13,3	0,3	-	-	13,6
Genova	12,4	..	0,3	0,3	13,0
La Spezia	14,8	-	1,5	-	16,3
Parma	12,1	-	1,9	-	14,0
Modena	4,2	-	1,3	-	5,5
Bologna	11,4	-	1,3	-	12,7
Bologna	11,4	-	1,3	-	12,7
Rimini	9,9	-	1,2	-	11,1
Firenze	13,5	-	-	-	13,5
Ancona	10,6	-	0,9	-	11,5
Roma	10,0	0,6	0,1	1,6	12,3
Napoli	9,7	0,5	1,0	0,6	11,8
Bari	5,5	-	-	-	5,5
Palermo	8,6	-	-	-	8,6
Messina	3,0	0,4	-	-	3,4
Catania	10,3	-	-	0,1	10,4
Sassari	6,8	-	-	0,2	7,0

(a) Sono stati considerati, esclusivamente, i Comuni Capoluogo di Provincia che presentano tali tipologie di trasporto urbano.
Fonte: ISTAT, Osservatorio ambientale sulle città.

Tab. 8 - Consistenza del parco veicolare adibito al trasporto pubblico nei grandi Comuni Capoluogo di Provincia ed in quelli dotati di tram, filobus o metropolitana – Anno 2007 [1]

In linea generale la valutazione della capacità del parco mobile di soddisfare la domanda di mobilità dipende sempre da un rapporto di consistenza rispetto ai fattori che generano tale domanda (popolazione, distanze, attività produttive), ma anche dal modo in cui il parco stesso viene inserito ed utilizzato all’interno degli impianti fissi, soprattutto laddove esistono servizi di linea. Nel campo dei trasporti collettivi, un parco veicolare efficiente, comodo ed accessibile finisce con l’attrarre domanda di mobilità sottraendola alla componente individuale.

I posti-km, che possono essere definiti come un’unità di misura dell’offerta di trasporto, ci forniscono delle indicazioni estremamente interessanti sul fenomeno esaminato (Tab. 9).

<i>Milioni</i>					
Comuni	Autobus	Tram	Filobus	Metropolitana	Totale
Torino	4.484	1.004	-	735	6.223
Milano	3.713	3.391	591	9.490	17.185
Verona	653	-	-	-	653
Venezia	3.139	-	-	-	3.139
Padova	760	27	-	-	787
Trieste	1.236	11	-	-	1.247
Genova	2.915	2	23	178	3.118
La Spezia	251	-	21	-	272
Parma	597	-	75	-	672
Modena	489	-	104	-	593
Bologna	1.308	-	136	-	1.444
Rimini	436	-	12	-	448
Firenze	2.064	-	-	-	2.064
Ancona	279	-	25	-	304
Roma	13.978	1.165	161	6.947	22.251
Napoli	2.335	94	41	1.239	3.709
Bari	995	-	-	-	995
Palermo	1.795	-	-	-	1.795
Messina	1.510	1	-	-	1.511
Catania	1.415	-	-	56	1.471
Sassari	337	-	-	2	339

Tab. 9 - Posti-Km offerti per modalità di trasporto pubblico nei grandi Comuni Capoluogo di Provincia ed in quelli dotati di tram, filobus o metropolitana – Anno 2007 [1]

La domanda di trasporto pubblico

Nel periodo 2000-2007 è chiara (Tab. 10) l’influenza del peso demografico nel calcolo dell’indicatore che individua la domanda di trasporto pubblico, espresso in termini di passeggeri trasportati, da autobus, tram, filobus, metropolitana e funicolari, per abitante e caratterizzante l’uso dei sistemi di trasporto pubblico. I Comuni di grandi dimensioni, infatti, sono quelli che fanno registrare i valori più alti dell’indicatore, in quanto possono essere considerati come fattori di attrazione per manifestazioni diverse quali il commercio, il lavoro, lo studio, il turismo ed altro, determinando, in tal modo, dei flussi gravitazionali di richiamo.

E opportuno evidenziare che l’analisi della domanda di mobilità rappresenta la premessa conoscitiva di ogni azione politica di intervento rivolta al settore dei trasporti, in quanto il processo

di decisione che porta l’utente verso la scelta dei servizi di trasporto comprende elementi di valutazione appartenenti sia all’ambito delle preferenze del consumatore che alle condizioni stesse dell’offerta di trasporto pubblico.

Classi di popolazione	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
≤50.000 ab.	31,6	32,5	34,2	34,1	37,4	38,1	36,9	38,0
50.001-100.000 ab.	57,3	57,3	56,9	55,0	55,4	55,7	57,3	58,3
100.001-250.000 ab.	95,6	96,6	99,2	99,4	98,1	98,3	99,5	102,7
>250.000 ab.	328,2	339,8	348,1	348,6	341,2	343,2	351,1	369,5
Italia	206,9	212,9	217,4	216,9	212,8	213,8	218,8	229,6

Tab. 10 - Passeggeri annui trasportati da autobus, tram, filobus, metropolitana e funicolari nei Comuni Capoluogo di Provincia, per classi di popolazione - Anni 2000-2007 [1]

La domanda di trasporto privato

La domanda di trasporto privato è ancora fortemente espressa con l’uso dei veicoli di proprietà dei cittadini. Il tasso di motorizzazione risulta essere elevato quasi ovunque; sono, infatti, 77 i Comuni Capoluogo di Provincia in cui si calcola un numero di autovetture, per mille abitanti, superiore a 600.

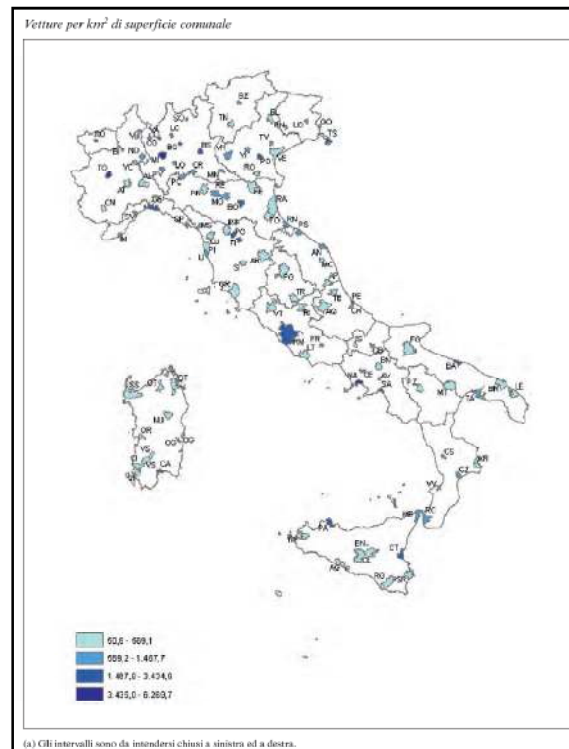


Fig. 12 - Densità veicolare nei Comuni Capoluogo di Provincia - Anno 2007 [1]

L’indicatore numero di veicoli per km² di superficie comunale (densità veicolare), calcolato considerando i mezzi adibiti sia al trasporto di persone sia al trasporto di merci, ovvero motocarri e motocicli, autovetture, autobus, autocarri, trattori stradali o motrici nonché rimorchi e semirimorchi, per l’anno 2007 (Fig. 12), è particolarmente elevato a Napoli (6.296,7), Torino (5.412,7) e Milano (5.302,2).

Strumenti di programmazione

I Comuni, con popolazione residente superiore a trentamila abitanti, hanno l’obbligo di adottare un Piano urbano del traffico veicolare (PUT), al fine di migliorare le condizioni di circolazione e della sicurezza stradale e per la riduzione degli inquinamenti acustico ed atmosferico ed il risparmio energetico, in accordo con gli strumenti urbanistici vigenti, con i piani di trasporto e nel rispetto dei valori ambientali, stabilendo le priorità e i tempi di attuazione degli interventi.

Il PUT prevede il ricorso ad adeguati sistemi tecnologici, su base informatica, di regolamentazione e controllo del traffico nonché di verifica del rallentamento della velocità e di dissuasione della sosta, al fine anche di consentire modifiche ai flussi della circolazione stradale che si rendano necessarie in relazione agli obiettivi da perseguire.

Il PUT dovrebbe essere aggiornato ogni due anni ed è adeguato agli obiettivi generali della programmazione economico-sociale e territoriale.

In particolare il PUT deve essere inteso come piano di immediata realizzabilità, con l’obiettivo di contenere le criticità della circolazione.

La progettazione dell’organizzazione della circolazione stradale deve prevedere interventi su tutti i suoi settori, inclusa la gestione ottimale degli spazi stradali esistenti, pubblici o aperti all’uso pubblico (individuazione degli interventi di organizzazione delle sedi viarie, finalizzata al miglior uso possibile delle medesime per la circolazione stradale).

Nel processo di pianificazione e governo del sistema dei trasporti a scala urbana, il PUT costituisce lo strumento tecnico-amministrativo di breve periodo che, mediante successivi aggiornamenti, rappresenta le fasi attuative di un disegno strategico di lungo periodo.

Alla fine del 2007, in 86 Comuni Capoluogo di Provincia è stato adottato questo strumento di pianificazione previsto dall’art. 36 del Nuovo Codice della Strada, con un incremento del 32,3% sul 2000.

La mobilità ciclistica

Lo sviluppo di parti longitudinali della strada, opportunamente delimitate, riservate alla circolazione dei velocipedi, può essere utilizzato per migliorare la mobilità urbana e ridurre il traffico veicolare.

La bicicletta, oltre ad essere un mezzo di trasporto che consente spostamenti significativi, è strumento di svago e di attività fisica.

L’uso della bicicletta, mezzo di trasporto “pulito” e sostenibile, oltre a fungere da volano per attività ludico-turistiche, assolve alla funzione trasportistica di compiere spostamenti per motivi di lavoro e svago minimizzando gli impatti sul territorio, contribuendo inoltre allo sviluppo delle economie locali e dell’intermodalità.

In Italia negli ultimi anni, in specie nelle aree urbane, si è verificato un consistente aumento del numero dei ciclisti, anche dove si sta facendo poco per fare circolare meglio e più in sicurezza le biciclette.

Il motivo di fondo di questo aumento è abbastanza semplice: sono sempre di più gli utenti che si rendono conto che, per poter circolare in città, la bicicletta è un mezzo utile e agile in alternativa al traffico motorizzato. Si tratta quindi di una acquisizione di consapevolezza dell’efficienza trasportistica della bicicletta e quindi della sua convenienza nell’ambito urbano, dovuta soprattutto alla crisi permanente del traffico automobilistico nelle città.

Come si nota in Fig. 13 la bicicletta permette agli utenti di effettuare in 10 minuti spostamenti nel raggio di 2,5 Km, coprendo un’area di circa 20 Km².

Pertanto, la bicicletta, privata o pubblica (*bike sharing*), rappresenta, soprattutto in ambito urbano e suburbano, il modo di trasporto migliore per compiere l’ultimo tratto degli spostamenti casa-lavoro, casa-scuola, casa-tempo libero che rappresentano un’aliquota notevole degli spostamenti complessivi.



Fig. 13 - Peculiarità della mobilità ciclistica

Inoltre, come mostra la Fig. 14, il ciclopoleggio consente un notevole risparmio di spazio in città; un’auto occupa lo spazio necessario a ben nove biciclette allocate su apposite rastrelliere.



Fig. 14 - Spazio necessario per la sosta di auto e biciclette

Per incrementare e favorire l’uso della bicicletta è di fondamentale importanza garantire la possibilità di effettuare nel territorio scambi modali tra la bicicletta stessa ed i mezzi di trasporto pubblico su ferro e su gomma.

L’integrazione modale permette infatti di razionalizzare le possibilità di spostamento sul territorio e di creare un effetto di sinergia tra mezzi di trasporto differenti. Questo si traduce in una riduzione dei costi economici della mobilità, in una maggiore sostenibilità sociale, in una riduzione del traffico e dell’impatto inquinante causato dall’uso generalizzato e spesso improprio dei sistemi di trasporto a motore ed, in particolare, dell’autovettura privata.

1.2.4 I sistemi intelligenti di trasporto

“Intelligent Transportation System” (ITS) è l’applicazione di tecnologie avanzate (come informatica, elettronica e telecomunicazioni) che integrano i sistemi di trasporto terrestri per migliorarne la sicurezza e l’efficienza.

L’adozione di questi sistemi interessa principalmente i seguenti aspetti:

- sicurezza stradale: si è stimato che circa il 90% degli incidenti sia causato da errori umani; ne deriva che eliminando la componente umana dalla guida, o almeno limitandone l’influenza, a favore di sistemi di guida automatici con un tasso di errore molto basso, si possono raggiungere ottimi risultati per quanto riguarda la salvaguardia di persone e mezzi;
- congestione del traffico: gli ITS possono contribuire alla diminuzione di questo fenomeno automatizzando la guida dei veicoli in modo da sostituire i tempi di reazione del guidatore, variabili a seconda dell’individuo, con dei valori costanti, noti ed inferiori, in modo che i veicoli possano viaggiare ad una distanza di sicurezza minore aumentando il throughput;

rivelando gli incidenti nelle aree urbane, così da diminuire il tempo di risposta del personale di pronto intervento e quindi permettere una più efficiente eliminazione del blocco; fornendo informazioni ai viaggiatori sulle condizioni di traffico nelle diverse vie e sui relativi tempi di percorrenza; utilizzando sistemi per effettuare una scelta più ragionata della strada da seguire incrementando l’efficienza operativa del sistema;

- impatto ambientale: l’utilizzo degli ITS ha anche una forte influenza sull’ambiente. Per esempio, riducendo la congestione del traffico si ha una riduzione delle emissioni di gas nocivi anche se, tramite una ottimizzazione del sistema dei trasporti, si abilita a viaggiare un maggior numero di veicoli e questo potrebbe comportare l’annullamento dei benefici sull’ambiente.
- sviluppo economico: la collocazione su un territorio di sistemi ITS può generare vantaggi indiretti sull’economia, attraverso l’attrazione di attività che dipendono da sistemi di trasporto efficienti. Se una regione si dota di tali dispositivi ottiene la preferenza di vettori e spedizionieri. Viceversa una rete di trasporto inadeguata può impedire o limitare la capacità di un produttore di competere in un certo mercato.

Pertanto, gli ITS stanno traghettando la società in cui viviamo da un’era in cui la costruzione di nuove e più grandi infrastrutture stradali era vista come la soluzione principale, se non l’unica, ad una dove la gestione integrata dei trasporti è vista come il migliore approccio possibile.

I servizi resi dagli ITS possono, a vario titolo, migliorare le condizioni di sicurezza nei trasporti terrestri, per mezzo di sistemi che assistono alla guida o, in un prossimo futuro, con sistemi di guida automatica. La realizzazione di tali sistemi è ostacolata solo marginalmente da barriere di carattere tecnico, in quanto l’aspetto più problematico si delinea nel momento dell’implementazione operativa.

La grande opportunità di questi sistemi risiede nella loro integrazione operativa che rende possibile la gestione coordinata di tutte le componenti della mobilità cittadina. Ad esempio, la gestione intelligente delle flotte di veicoli adibiti al trasporto pubblico non può prescindere da una gestione intelligente delle priorità semaforiche e da un monitoraggio dei flussi di traffico.

Ovviamente, tali sistemi si utilizzano anche in ambito aereo e marittimo, ma l’interesse ed i relativi investimenti sono molto minori se paragonati all’ambito del sistema dei trasporti terrestri, anche se alcuni porti ed aeroporti, sempre più spesso, presentano problemi di congestione.

La gestione della mobilità si deve dunque dotare di specifici strumenti di programmazione, pertanto, come piano si settore del Piano Urbano del Traffico per la definizione e la pianificazione

degli interventi per la mobilità, il Comune deve definire un piano generale dello sviluppo degli ITS. In tale piano devono essere individuati: l'architettura di integrazione delle applicazioni ITS settoriali (controllo degli accessi, regolazione dei semafori, telemetria, etc.); l'infrastruttura e gli standard di comunicazione e di interfaccia e, soprattutto, il sistema di relazioni tra i soggetti coinvolti nella gestione della mobilità.

Capitolo II

2 I SISTEMI ITS APPLICATI ALL’INFOMOBILITÀ

La gestione intelligente dei processi della mobilità e dell’informazione che li accompagna, rappresenta oggi un fattore chiave di espansione, di crescita economica e di miglioramento dei servizi della società in cui viviamo.

Nel corso degli ultimi anni, grazie anche alle straordinarie opportunità offerte dalla ricerca scientifica e dallo sviluppo delle nuove tecnologie, i servizi di infomobilità resi all’utenza hanno conosciuto, sebbene i bisogni di una società in continua e rapida evoluzione impongano sforzi sempre maggiori, progressivi miglioramenti.

Lo scopo fondamentale dei Sistemi Intelligenti di Trasporto (ITS) è integrare le tecnologie di comunicazione tra i veicoli e le reti di trasporto, di persone e merci. La telematica applicata ai trasporti, attraverso l’integrazione delle tecnologie informatiche con quelle delle telecomunicazioni, contribuisce a sfruttare al meglio il potenziale delle infrastrutture, offrendo diverse possibilità tecniche per gestire e controllare in modo globale i flussi di traffico.

Gli ITS, attraverso i sistemi di informazione all’utenza, i servizi di controllo e gestione del traffico e dei trasporti, i sistemi di informazione dinamici, i sistemi di controllo del veicolo, apportano benefici in termini di riduzione della congestione, miglioramento dell’ambiente e della sicurezza, aumento dell’efficienza e della produttività dei trasporti (Fig. 15).

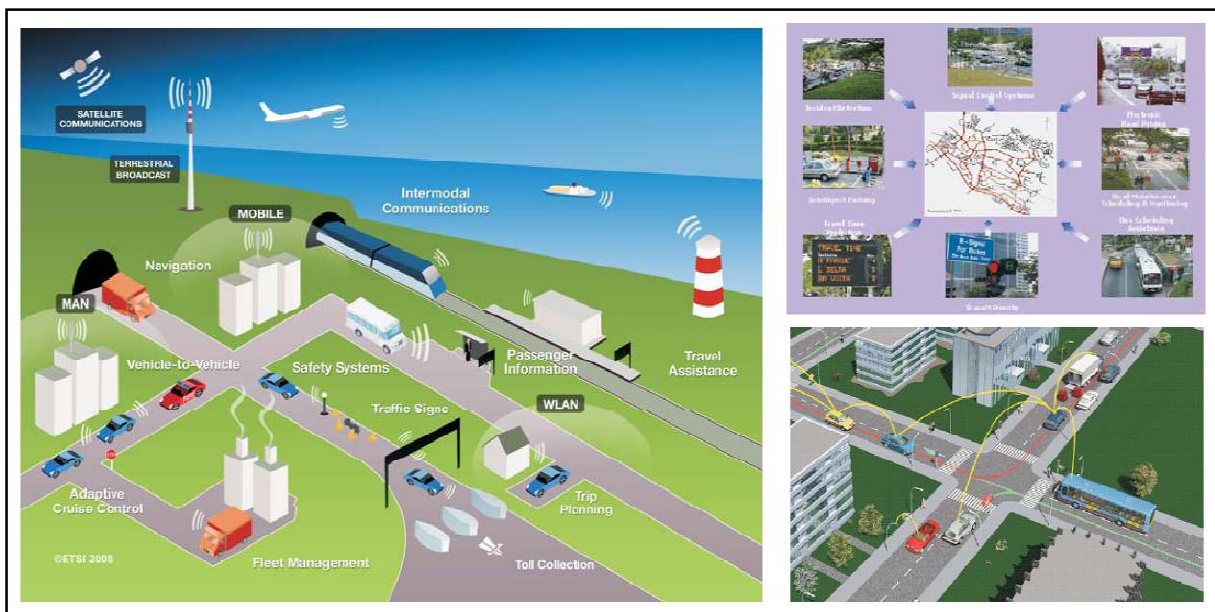


Fig. 15 - Campi di applicazione dei sistemi ITS

I sistemi intelligenti di trasporto forniscono informazioni ai viaggiatori al fine di renderli capaci, tramite le loro scelte, di ottimizzare l’uso della capacità della rete e di ridurre la conseguente congestione.

Con particolare riferimento ai sistemi dinamici di informazione agli utenti, aspetti di primaria importanza sono la tempestività e l’accessibilità delle informazioni fornite dagli ITS.

In questo senso, non serve solo conoscere, quanto piuttosto essere informati bene e in tempo utile. Non è un caso che oggi i più importanti gestori di reti e sistemi di trasporto stiano ponendo sempre più al centro della loro politica aziendale i bisogni di informazione dei loro utenti provando a soddisfarli con l’ausilio di moderne tecnologie quali i messaggi sms sui cellulari, gli aggiornamenti trasmessi per mezzo delle paline elettroniche installate alle fermate dei bus, i pannelli a messaggio variabile posti lungo le autostrade, il sistema del broadcast per la trasmissione via etere di notiziari dedicati al traffico ed alla circolazione.

Di seguito verrà fornito un quadro generale delle diverse tipologie di informazione fornite dagli ITS e dei principali campi di applicazione in cui questi si sono sviluppati, effettuando una prima distinzione tra sistemi di informazione per il trasporto privato e per il trasporto pubblico.

Infine, in base all’ambito di utilizzo e di orientamento della ricerca, i Sistemi Intelligenti di Trasporto saranno classificati in sistemi infrastructure-based e sistemi vehicle-based.

2.1 Le informazioni fornite dai sistemi ITS

I sistemi intelligenti di trasporto comprendono un vasto range di informazioni che, integrate nelle infrastrutture del sistema di trasporto e nei veicoli stessi facilitano il monitoraggio ed il management dei flussi di traffico, aiutano a ridurre le congestioni, forniscono percorsi alternativi agli automobilisti, incrementano la produttività e l’efficienza del sistema, aumentano la sicurezza, e portano ad un risparmio di tempo e denaro.

Gli ITS forniscono inoltre strumenti per raccogliere, analizzare ed archiviare dati ed informazioni riguardo all’efficienza del sistema durante le ore di maggiore utilizzo delle reti di trasporto e, attraverso questi dati, si possono affrontare e gestire in maniera migliore incidenti, condizioni atmosferiche avverse e limiti della rete legati alla capacità.

I sistemi ATIS (Advanced Traveller Information Systems), sono un particolare tipo di sistemi intelligenti di trasporto il cui scopo è quello di fornire un insieme di servizi di informazione che assistono i viaggiatori in modo che essi scelgano il proprio percorso in maniera più sicura, veloce e facile.

Le informazioni diffuse dai sistemi ATIS sono il risultato di un sistema complesso di gestione del traffico. Questo agisce sui seguenti presupposti (Fig. 16):

- Sistemi di input dal territorio;
- Sistemi di elaborazione dell’informazione in tempo reale;
- Sistemi di supporto alle decisioni;
- Sistemi di output sul territorio.

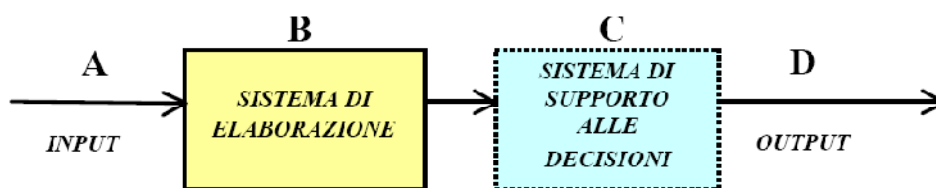


Fig. 16 - Schematizzazione del sistema di gestione del traffico

I sistemi di input (contatraffico a infrarossi, ultrasuoni, microonde, radar, video, spire magnetiche o induttive, etc) rilevano i dati di traffico in tempo reale (Fig. 17). Questi vengono raccolti, filtrati ed elaborati dal sistema di elaborazione, per essere trasformati in informazioni utili ad essere lette ed interpretate dagli operatori.



Fig. 17 - Sistemi di input: contatori di traffico

Il sistema di supporto alle decisioni è costituito da sofisticati software che, sulla base dei dati di input e di database storici, modellizzano le condizioni attuali traffico e ne prevedono quelle future. In funzione di queste i sistemi di output inviano informazioni ai veicoli ed ai guidatori e/o intervengono in maniera attiva, ad esempio modificando la lunghezza dei cicli semaforici.

L’importanza dei sistemi di informazione ai viaggiatori risiede nel fatto che un’informazione accurata e precisa aiuta i guidatori ad evitare grossi inconvenienti. Permette loro, ad esempio, di decidere in maniera efficiente quando partire per evitare code e congestioni, in situazioni in cui piccole differenze nel tempo di partenza fanno grosse differenze sul tempo di arrivo.

Per permettere tutto questo, le informazioni non solo devono essere precise ma anche disponibili ventiquattro ore al giorno. Una grande opportunità che si ha con l’utilizzo dei sistemi intelligenti di trasporto è quella di ottenere informazioni in tempo reale. Prima di tale innovazione si disponeva solamente di informazioni di tipo statico, cioè indipendenti dalle reali condizioni della rete o, al più, aggiornate con frequenza molto bassa. Informazioni di tipo statico sono ad esempio quelle relative alle operazioni pianificate di costruzione e manutenzione, ai costi dei pedaggi e alle modalità di pagamento, ai prezzi dei biglietti ecc.

Le informazioni real-time, invece, cambiano con frequenza elevata e, proprio perché relative alle effettive condizioni della rete, risultano molto utili agli utenti. Queste informazioni si riferiscono:

- alle condizioni di deflusso sulla rete stradale, inclusi episodi di congestione o il verificarsi di incidenti;

- a percorsi alternativi, i cui itinerari sono variabili in funzione del grado di congestione;
- alla disponibilità di posti liberi per il parcheggio;
- alle condizioni meteorologiche;
- all’identificazione delle fermate e dei tempi di arrivo di bus e treni.

L’utente che si appresta ad intraprendere un viaggio ha quindi a disposizione tutta una serie di informazioni per poter pianificare il proprio viaggio ed ottimizzarlo (Fig. 18).

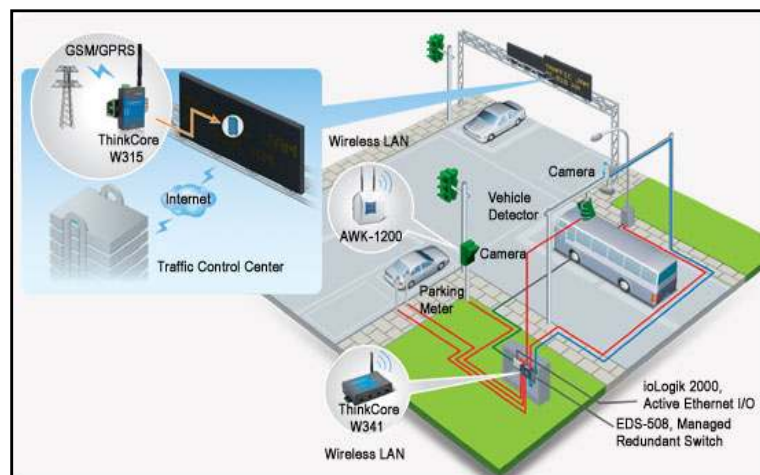


Fig. 18 - Servizi di informazione ai guidatori forniti dagli ITS

La fase di acquisizione delle informazioni continua anche mentre si è in viaggio. Le informazioni real-time descrivono le effettive condizioni presenti nella rete e, pertanto, gli utenti possono acquisirle ed essere in grado di modificare il proprio itinerario continuando a mantenere alto il livello della sicurezza, del comfort e dell’efficienza del viaggio.

Infine, una volta scesi dal veicolo o dal mezzo di trasporto pubblico, possono essere acquisite informazioni per compiere l’ultimo tratto dello spostamento ed arrivare alla destinazione scelta.

Le informazioni, quindi, possono essere classificate in base alla loro acquisizione temporale:

- Informazioni pre-viaggio (PV): acquisite in maniera volontaria o non, in fase di preparazione del viaggio;
- Informazioni in viaggio (IV): acquisite mentre si è in viaggio. Se vengono acquisite tramite dispositivi e mezzi interni al veicolo si definiscono informazioni in viaggio in auto (IV IA), se provengono dall’esterno allora si parla di informazioni in viaggio fuori dall’auto (IV FA);
- Informazioni post-viaggio (FA): acquisite una volta scesi dal veicolo e utili all’utente per completare il proprio percorso.

2.1.1 Informazioni pre-viaggio

Tutte le informazioni fornite ai viaggiatori prima di iniziare il proprio spostamento vengono definite pre-viaggio, cioè acquisite in fase di preparazione e pianificazione del viaggio.

Un utente prudente, sia esso di trasporto pubblico o privato, prima di intraprendere un viaggio cerca di informarsi sulla situazione attuale della rete, valutando se il percorso che ha scelto risulta essere il più efficiente.

La modalità con cui queste informazioni vengono diffuse sono:

- *Radio e Televisione*: hanno il vantaggio di essere mezzi di comunicazione molto diffusi, quindi rappresentano un canale molto influente attraverso il quale è possibile acquisire informazioni sulla situazione del traffico e della viabilità;
- *Teletext e data broadcasting*: chiamati data broadcasting perché permettono la diffusione di informazioni via etere in formato digitale, in parallelo con il segnale televisivo. Tramite Teletext i dati vengono presentati su pagine di testo inviate a tutti gli utenti i quali possono selezionare le pagine di interesse digitando il codice di pagina sul comando del televisore;
- *Televisione interattiva*: offre la possibilità di interagire con il servizio permettendo agli utenti di usufruire di programmi a seconda delle proprie esigenze informative di trasporto;
- *Internet*: è il sistema più potente per ottenere informazioni; basta connettersi ad una pagina web di una società di trasporto per ottenere informazioni sulla viabilità, sul traffico, sull’esercizio del trasporto pubblico e sulla sua regolarità.

2.1.2 Informazioni in viaggio

L’importanza per gli utenti di essere continuamente informati sulla situazione delle rete sta nel fatto che un percorso può risultare efficiente in un determinato momento, come ad esempio alla partenza, ma può non esserlo in un secondo momento.

Questo comunicare e ricevere informazioni “anytime, anyplace, anywhere”, unitamente alla convergenza delle tecnologie comunicative della telefonia mobile e dell’informatica legate all’auto, consentono ai viaggiatori di beneficiare di informazioni costantemente aggiornate direttamente nel proprio veicolo senza la necessità di staccare le mani dal volante e lo sguardo dalla strada.

E’ bene distinguere tra due modalità differenti per l’acquisizione di informazioni durante il viaggio, a seconda che le informazioni si ottengano a bordo del veicolo (IV IA) o al di fuori di questo (IV FV).

Un impulso notevole allo sviluppo delle informazioni in viaggio acquisite in auto (IV IA) è stato dato dall’applicazione sulle autovetture del navigatore satellitare (Fig. 19).



Fig. 19 - Sistemi di informazione in viaggio: navigatore satellitare

L’utente che vuole raggiungere una meta ne indica l’indirizzo al computer di bordo che, conoscendo la posizione del veicolo grazie al sistema di localizzazione satellitare, calcola il percorso e fornisce indicazioni sulla strada da seguire.

Un notevole miglioramento di questa tipologia di servizio si ottiene qualora le informazioni vengano fornite in tempo reale, sulla base della densità delle correnti di traffico sugli archi e sui nodi della rete stradale. In questo modo, le informazioni ai guidatori non solo si riferiscono all’itinerario che essi hanno pianificato ma sono corredate da variazioni puntuali in caso di incidenti o aumento dei livelli di congestione sul percorso previsto.

Con il sistema satellitare di navigazione gli utenti sono guidati da una centrale operativa che, ad esempio tramite il telefono di bordo, fornisce informazioni che possono riguardare il traffico su una strada oppure l’individuazione del percorso più veloce per giungere a destinazione.

In alternativa al call-center i veicoli, se predisposti, possono divenire “internet car” e, connettendosi alla rete web, possono leggere le notizie sul traffico ed usufruire dei servizi cartografici a disposizione.

Le informazioni acquisite mediante quei mezzi che non raggiungono direttamente i guidatori all’interno del proprio veicolo ma sono visibili in quanto posti esternamente, sono indicate come IV FV.

Gli strumenti di informazione utilizzati per erogare questo tipo di servizio di infomobilità sono essenzialmente i PMV (pannelli a messaggio variabile). Questi sono dei cartelli segnaletici che forniscono indicazioni sulle condizioni meteorologiche, di traffico e di circolazione presenti su un tratto stradale (Fig. 20).



Fig. 20 - Sistemi di informazione in viaggio: pannelli a messaggio variabile

I pannelli hanno lo scopo di catturare l’attenzione dell’utente che dall’interno del suo abitacolo viene informato su ciò che lo attende sul tratto stradale che si accinge a percorrere. La maggior parte dei messaggi riportati dai PMV sono composti dall’abbinamento di un’immagine grafica (pittogramma) e da una parte recante un testo alfanumerico. Il sistema di visualizzazione è un sistema a led a messaggio variabile ad uno o più colori in grado di visualizzare notizie sullo stato della viabilità trasmesse real time. I supporti fisici utilizzati possono andare da piccoli tabelloni fino ai maxischermi.

I pannelli a messaggio variabile sono dislocati lungo la rete viaria e rappresentano uno strumento utilissimo di informazione diretto per l’utenza. Questi sistemi sono governati da centrali operative dove, in funzione delle informazioni che pervengono dal monitoraggio stradale, vengono attuate le strategie di impiego e vengono composti i messaggi da inviare agli utenti.

Il contenuto delle informazioni può non limitarsi soltanto ai dati inerenti alle condizioni di traffico ma, all’occorrenza, i PMV suggeriscono percorsi alternativi, tempi previsti di percorrenza e avvisi utili per la scelta del percorso ottimale rispetto alla situazione di congestione.

2.1.3 Informazioni esterne

Per informazioni esterne si intendono quelle informazioni che si ottengono quando l’utente ha già effettuato la gran parte del suo spostamento e, avendo già raggiunto la zona di interesse, ha solamente bisogno di informazioni per raggiungere un punto specifico di tale zona.

Tra i vari strumenti che permettono la realizzazione di un’infomobilità esterna si annoverano:

- I telefoni cellulari: grazie agli sviluppi fatti in questo settore il telefono cellulare si trasforma all’occorrenza in un navigatore aggiornato e completo di informazioni sul territorio;

- Guide tascabili: Sono delle piccole guide di viaggio elettroniche che si basano sulle comunicazioni cellulari e consentono agli utenti un accesso immediato agli enti di informazione;
- Palmari: I palmari sono dei personal computer tascabili e sono progettati per supportare una gestione dell’informazione sempre più mobile e geograficamente distribuita;
- Chioschi multimediali: un chiosco multimediale è un punto di consultazione pubblico. Questo non è un mezzo di informazione funzionale alla pianificazione ex novo di uno spostamento, ma uno strumento utile per modificare e perfezionare uno spostamento già intrapreso. Infatti, i chioschi multimediali vengono utilizzati durante il viaggio stesso con un’azione di fermata – consultazione – ripartenza.

2.2 Principali applicazioni delle tecnologie ITS nel trasporto privato e pubblico

Come si è detto, le tecnologie ITS migliorano l’efficienza del sistema dei trasporti, la sicurezza, il confort, l’ambiente e rendono più agevole il passaggio da una modalità di trasporto all’altra.

I campi di applicazione di tali sistemi sono numerosi, cercheremo comunque di fare una prima classificazione, effettuando una distinzione generale tra sistemi applicati al trasporto privato e sistemi applicati al trasporto pubblico.

2.2.1 Applicazioni nel trasporto privato

Nel trasporto privato i sistemi intelligenti di trasporto trovano un duplice impiego, da una parte essi sono strumenti di supporto decisionale per ottimizzare le scelte di percorso, dall’altra, grazie a dei sistemi di controllo del veicolo sono uno strumento di sicurezza per il guidatore mentre è in viaggio. Per quel che riguarda il primo aspetto si è già detto che i sistemi intelligenti di trasporto danno all’automobilista una serie di consigli e di informazioni che rendono il viaggio più confortevole, più efficiente e meno aleatorio.

I consigli agli utenti si riferiscono alla diffusione dei dati di informazione riguardo a situazioni di congestione, a condizioni atmosferiche avverse ed ad incidenti.

Più in dettaglio, attraverso le applicazioni nella pianificazione dei percorsi, gli utenti vengono messi a conoscenza riguardo a costi e pedaggi, ricevono consigli per la schedulazione dei tratti da percorrere, ricevono stime riguardo ai tempi di ritardo a causa di situazioni di congestione, sono aiutati per la scelta del percorso da compiere e l’orario di partenza da scegliere.

Attraverso l’acquisizione di dati real-time e l’istantanea diffusione di messaggi di informazione, l’automobilista è continuamente a conoscenza delle effettive condizioni della rete ed è quindi in grado di prendere decisioni più intelligenti e sicure. Infatti, grazie alla diffusione di informazioni sulla viabilità e sulle condizioni di traffico della rete, utilizzando i servizi di infomobilità telematica, gli utenti compiono scelte ottimali in merito alle proprie esigenze di spostamento. Questo sistema di instradamento che fornisce consigli ed istruzioni agli automobilisti riguardo alla scelta migliore del percorso da compiere viene chiamato Route Guidance System.

I sistemi ITS d'altronde non solo forniscono una serie di informazioni all’automobilista, tenendolo continuamente aggiornato, ma sono anche un sistema di supporto alla guida per garantirgli sicurezza.

I sistemi avanzati per il controllo dei veicoli forniscono utili applicazioni in termini di controllo adattativo della velocità di crociera, del controllo autonomo del veicolo, di sistemi di avviso per pericolo collisione, di controllo delle condizioni e dell’efficienza dell’automobilista, di sistemi di avviso per manovre rischiose ed indicazioni agli incroci pericolosi, di monitoraggio e di controllo delle condizioni e dell’efficienza del veicolo.

Queste applicazioni sono rese possibili grazie all’utilizzo di sensori radar, laser e microonde che acquisiscono, rispettivamente per il corto e il lungo raggio, dati riguardanti la presenza di ostacoli o supportano le funzioni elementari di guida rilevando automaticamente la posizione del veicolo rispetto ai bordi della corsia di marcia (Fig. 21), prevedendo così possibili distrazioni del guidatore. Il sistema provvede a segnalare in anticipo una involontaria uscita di corsia o una anomalia di guida imputabile a stanchezza o ad altri motivi attirando l’attenzione di chi guida.

Tutto questo dimostra l’utilità dei sistemi ITS come supporto ai guidatori non solo in quanto fonte di informazioni utili ma anche perché strumenti di sicurezza grazie all’utilizzo di sensori in-vehicle.

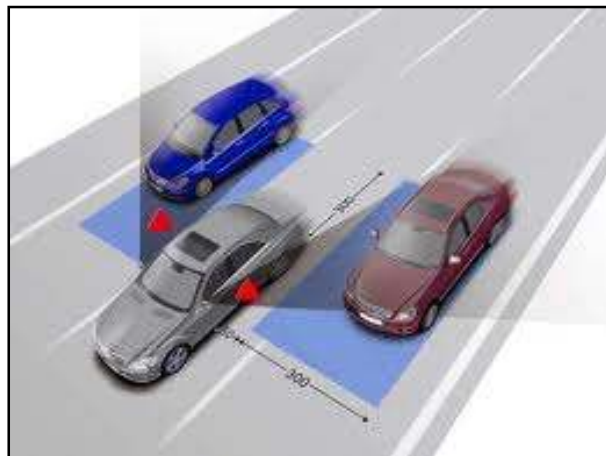


Fig. 21 - Sistemi ITS di supporto alla guida

2.2.2 Applicazioni nel trasporto pubblico

Nel settore del trasporto pubblico i moderni sistemi intelligenti di trasporto hanno contribuito a:

- migliorare il coordinamento della rete di trasporto;
- migliorare l'informazione all'utenza;
- acquisire dei dati di servizio ai fini di una migliore utilizzazione dei mezzi pubblici e della predisposizione di adeguati piani di trasporto.

Il coordinamento della rete dei servizi è la diretta conseguenza dell’adozione del sistema di rilevamento della posizione dei mezzi e della loro rappresentazione grafica per segnalare scostamenti o irregolarità.

L’informazione all’utenza è lo strumento ideale per ristabilire quel colloquio tra coloro che sono in attesa alle fermate oppure a bordo dei mezzi e l’azienda di trasporto.

L’acquisizione dei dati storici del servizio rappresenta una fonte preziosa a cui attingere al momento di programmare orari ed itinerari dei nuovi programmi di esercizio. Una rete complessa, in cui interagiscono linee e mezzi diversi, possiede elementi articolati su diversi livelli (frequenze di transito, tipologia dei mezzi, gestione delle manutenzione, etc.) che possono determinare elementi di turbativa che rischiano di coinvolgere la regolarità del servizio.

Per mantenere sotto generale controllo l’intera rete dei servizi viene ad essere molto importante fornirsi di sistemi informatici adeguati.

Tramite l’utilizzo di sistemi ITS una rete di servizi è sottoposta a continuo monitoraggio; i dati rilevati vengono inviati ad un centro operativo attivo nel coordinamento dell’intero servizio di trasporto (Fig. 22).

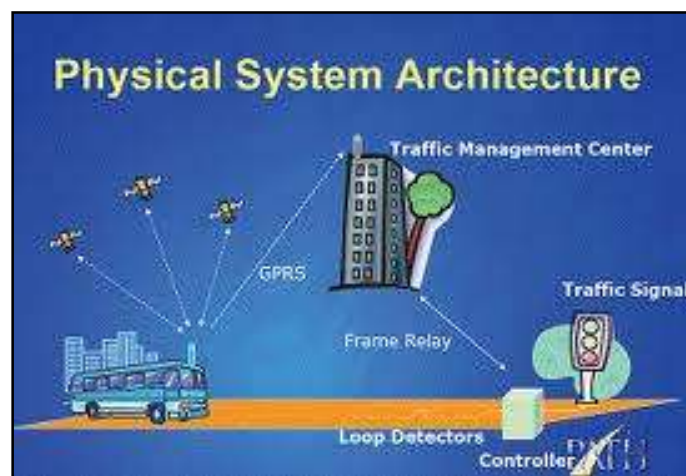


Fig. 22 - Sistema di gestione del traffico nel trasporto pubblico

Inoltre, insieme ai dati sulla sua posizione, il mezzo pubblico può inviare anche i dati relativi all’affollamento dei passeggeri ed ai tempi intercorsi per lo spostamento da un punto all’altro del suo itinerario. In questo modo il centro operativo sarà in grado non solo di verificare la regolarità dei transiti ma, più in generale, lo stato del servizio.

Questo continuo monitoraggio e controllo del sistema di trasporto e della rete risulta fondamentale per aumentare la competitività dell’azienda e per fornire un elevato livello di servizio all’utenza.

Infatti, le informazioni statiche riguardo ai percorsi della linea ed agli orari teorici di transito ad esempio, rischiano di fallire gli obiettivi anzidetti perché forniscono elementi teorici spesso vanificati e concorrono ad introdurre ulteriori elementi di incertezza (Fig. 23).



Fig. 23 - Sistemi ITS di informazione all’utenza per il trasporto pubblico

L’utilizzo di sistemi ITS permette, tramite paline elettroniche ad esempio, di fornire messaggi ai passeggeri in attesa che, in tal modo, sono informati di quanto sta accadendo sulla rete (interruzioni, deviazioni) consentendo loro di adeguare le proprie decisioni agli eventi.

I sistemi intelligenti di trasporto consentono inoltre ai gestori di un’azienda di trasporto di conoscere in maniera tempestiva e aggiornata la qualità dei servizi offerti.

Tale conoscenza riguarda i tempi di percorrenza reali, il numero dei passeggeri, la movimentazione alle rispettive fermate (passeggeri saliti e discesi dal mezzo), la ciclicità della richiesta di servizio.

Ad esempio, la velocità dei flussi viari è facilmente deducibile analizzando i tempi di percorrenza dei bus e, nel caso ci fossero problemi di viabilità, si potrebbe intervenire disponendo una diversa temporizzazione dei cicli semaforici dando la necessaria priorità ai mezzi di trasporto pubblico rispetto alle altre componenti del traffico (Fig. 24).



Fig. 24 - Sistemi ITS nel trasporto pubblico: semafori intelligenti

Tutto questo rende il servizio di trasporto pubblico più efficiente ed incrementa il livello di soddisfazione percepito dagli utenti che, di conseguenza, sono incoraggiati ad utilizzarlo, preferendolo al servizio di trasporto privato.

2.3 Sistemi infrastructure-based e sistemi vehicle-based

I sistemi ITS possono essere classificati in due famiglie in base all’ambito di utilizzo e di orientamento della ricerca:

- 1) Sistemi Infrastructure-based: sono sistemi di informazione in tempo reale che forniscono aggiornamenti sullo stato della rete informando i guidatori o gli operatori di una società di trasporto su eventuali congestioni, incidenti o eventuali anomalie registrate sulla rete. In questo modo gli utenti saranno indotti ad evitare le zone congestionate, indirizzandosi verso un itinerario più conveniente mentre gli operatori di una società di trasporto cercheranno di gestire nella maniera più efficiente i flussi sulla rete.
- 2) Sistemi Vehicle-based: sono sistemi che supportano i guidatori a bordo dell’auto per garantire loro una maggiore sicurezza. Questi sono sistemi di controllo della distanza veicolare, sistemi di controllo della velocità, ed ulteriori sistemi che aiutano il guidatore in caso di emergenza.

2.3.1 Sistemi infrastructure-based

Arterial Management Systems

Questi sistemi, impiegando rivelatori di traffico, segnali di traffico e diversi mezzi di comunicazione per informare i viaggiatori, controllano e regolano il transito dei veicoli lungo le arterie stradali.

I segnali di priorità di transito per il trasporto pubblico (Transit Signal Priority - TSP) possono agevolare il viaggio di mezzi pubblici, migliorandone prestazioni e puntualità.

Segnali di precedenza (Emergency Vehicle Preemption - EVP) per i veicoli di soccorso aumentano la sicurezza di chi è deputato a rispondere alle chiamate di emergenza, riducendo la probabilità di inconvenienti durante le operazioni di soccorso (Fig. 25).

Sistemi semaforici adattivi (Adaptive Signal Control - ASC) coordinano il controllo dei semafori nelle aree metropolitane, adattando il ciclo delle fasi semaforiche in base alle reali condizioni di traffico.

Rivelatori pedonali e segnali di pericolo specializzati per le biciclette possono migliorare la sicurezza negli incroci stradali (Fig. 26).



Fig. 25 - Emergency Vehicle Preemption

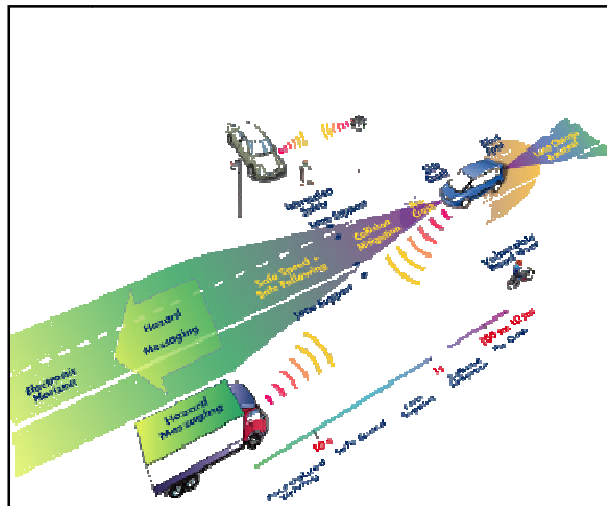


Fig. 26 - Rilevatori pedonali e segnali di pericolo per i ciclisti in corrispondenza delle intersezioni

Esistono inoltre dei sistemi che, nelle ore di punta, consentono di variare il numero di corsie disponibili, in funzione dei flussi di traffico nelle due direzioni di marcia e dei sistemi che, basandosi su tecnologie di comunicazione dinamica veicolo-strada, possono imporre restrizioni alla marcia di alcuni veicoli (per il trasporto eccezionale o che trasportano merci pericolose) solo su alcune corsie di marcia (Fig. 27).



Fig. 27 - Gestione delle corsie di marcia tramite applicazioni ITS

Le informazioni raccolte da sensori associati all’Arterial Management Systems (AMS) vengono acquisite da un centro di monitoraggio e gestione del traffico e, quindi, vengono condivise con i guidatori attraverso Pannelli a Messaggio Variabile (PMV) o canali radio tematici (Highway Advisory Radio - HAR).

Gli AMS includono anche dispositivi di imposizione dei limiti di velocità variabili ed altri dispositivi di controllo del traffico.

Freeway Management Systems

Questi sistemi mediante rivelatori di traffico, videocamere di sorveglianza e altri mezzi di controllo della circolazione stradale, consentono la gestione del traffico limitando l’accesso all’infrastruttura (Fig. 28), chiudendo una o più corsie, imponendo limiti di velocità variabili (Variable Speed Limits - VSL).

Le misure di controllo del traffico sulle rampe d’accesso, come i contatori d’ingresso, possono utilizzare i dati dei sensori per ottimizzare le velocità di viaggio e i tempi di attesa per l’accesso all’infrastruttura (Fig. 29).

La gestione delle corsie di marcia serve ad indirizzare la capacità della strada in questione e promuovere l’uso di veicoli con elevati coefficienti di occupazione (HOV – High Occupancy Vehicles).

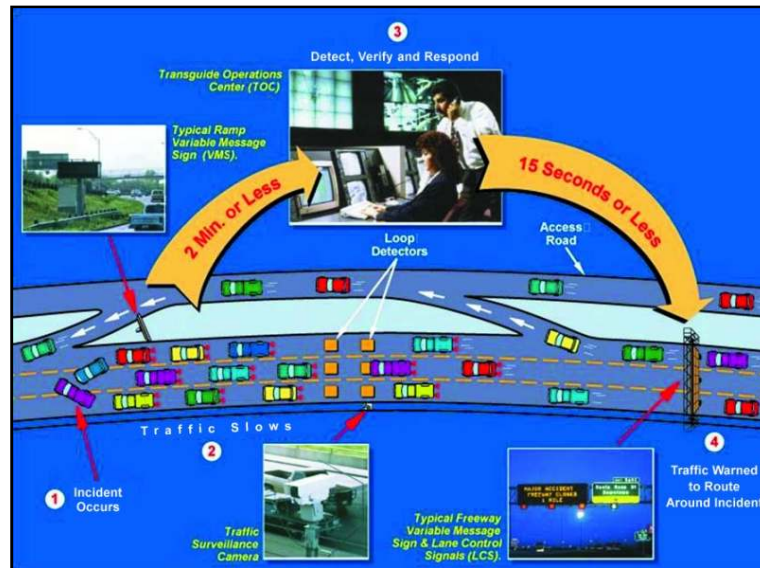


Fig. 28 - Sistema di gestione intelligente degli accessi alle infrastrutture stradali



Fig. 29 – Esempi di ramp metering

Incident Management Systems

I sistemi di gestione degli incidenti determinano una riduzione del tempo necessario per rilevare un incidente, riducono il tempo necessario ai mezzi di soccorso per giungere in loco e diminuiscono il tempo richiesto perché il traffico ritorni alla normalità, riducendo così gli effetti della congestione stradale.

Una varietà di tecnologie di sorveglianza quali telecamere, rilevatori acustici e sistemi fotografici, può aiutare a rilevare gli incidenti velocemente.

Segnali di richiesta di soccorso e Collision Notification Systems automatizzati, sistemi di localizzazione veicolare automatizzata (Automated Vehicle Location – AVL), i telefoni di soccorso ai bordi delle strade, possono aiutare il personale del sistema di gestione e dei soccorsi a identificare e valutare i sinistri velocemente.

In questo modo si agevola lo sgombero rapido e sicuro della carreggiata dagli incidenti occorsi e la conseguente riapertura delle corsie di viaggio (Fig. 30).



Fig. 30 - Sistemi di informazione ai guidatori in caso di incidenti

Di norma gli Incident Management Systems sono realizzati simultaneamente con i Freeway Management Systems e con gli Arterials Management Systems.

Crash Prevention & Safety

I sistemi di prevenzione degli incidenti fanno ricorso all’uso di sensori tecnologici e segnali d’avvertimento attivo quali lampeggianti e PMV per avvertire i conducenti della presenza di curve o discese pericolose, di passaggi a livello ferroviari ed altre condizioni di pericolo.

I sistemi di avvertimento sul tipo di geometria stradale (Road Geometry Warning Systems) avvertono i conducenti di condizioni potenzialmente pericolose che possono causare incidenti su rampe d'accesso in curva o in pendenza.

Sistemi di avvertimento in incroci con la ferrovia (Roadside Rail Crossing - RS-RC) possono ridurre il pericolo potenziale di tragici incidenti.

I sistemi di rilevamento degli incroci stradali possono ridurre la velocità di approccio dei veicoli specie nelle intersezioni rurali indicando ai conducenti la presenza e la direzione di mezzi in avvicinamento (Fig. 31).

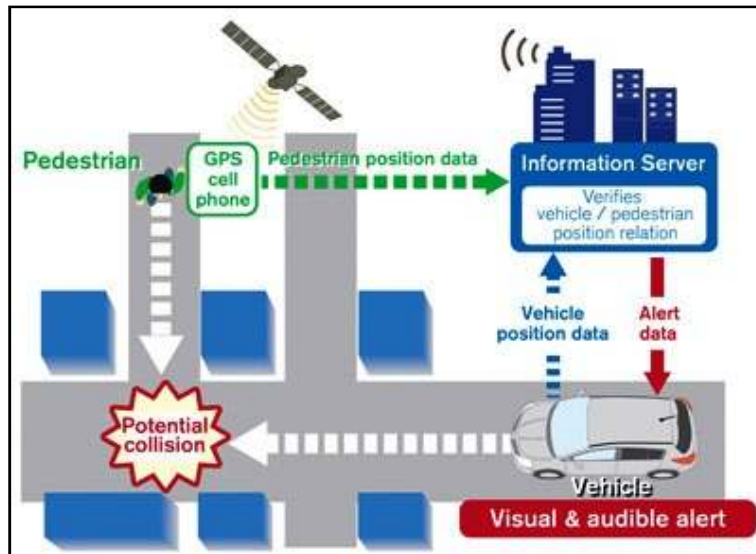


Fig. 31 - Sistemi di sicurezza ITS in corrispondenza delle intersezioni stradali

I sistemi di sicurezza pedonali possono aiutare a proteggere i pedoni attivando automaticamente una illuminazione sita nel fondo stradale per allertare gli automobilisti in arrivo (Fig. 32).



Fig. 32 - Sistemi di sicurezza in corrispondenza degli attraversamenti pedonali

I sistemi di avvertimento del passaggio di animali utilizzano radar per rilevare animali di grande taglia che si avvicinano alla carreggiata e, quindi, allertano i conducenti attivando degli appositi lampeggiatori.

Traveler Information e Information Management

Dei sistemi di informazione ai viaggiatori si è già detto ampiamente nei precedenti paragrafi. I primi sono quei sistemi informativi dedicati a chi viaggia che, attraverso l’utilizzo di tecnologie quali

internet, numeri telefonici dedicati, canali televisivi e radiofonici tematici, consentono ai guidatori di prendere decisioni appropriate in merito ad orari di partenza, percorsi e tappe di viaggio.

I secondi utilizzano i dati storici raccolti mediante sistemi ITS per poi valutare le prestazioni di un sistema di trasporto. Inoltre, i sistemi di gestione delle informazioni possono assistere nella pianificazione dei trasporti e nell’attività di gestione della sicurezza.

Road Weather Management

Le avverse condizioni meteorologiche costituiscono una significativa minaccia per il transito dei veicoli in sicurezza. In questo ambito troviamo applicazioni ITS che si basano sullo sviluppo di sistemi informativi meteorologici stradali (Road/Weather Information Systems - RWIS) e di tecnologie manutentive invernali.

Questi sistemi facilitano il monitoraggio e l’attività previsionale delle condizioni stradali e atmosferiche, diffondono informazioni relative alle condizioni meteo, aumentano la sicurezza imponendo limiti di velocità variabili (Fig. 33).



Fig. 33 - Limiti di velocità variabili

Roadway Operations & Maintenance

Queste applicazioni ITS si occupano della gestione integrata della manutenzione del manto stradale e della sicurezza dei cantieri stradali. Tali sistemi controllano, analizzano e diffondono dati relativi allo stato delle strade e alla manutenzione in atto (Fig. 34).



Fig. 34 - Sistemi di informazione ai guidatori in presenza di cantieri stradali

Le applicazioni in zone di lavoro includono l’implementazione provvisoria di Traffic Management o Incident Management System. Questi sistemi provvisori possono essere realizzati indipendentemente o possono aggiungersi ai sistemi esistenti nell'area di lavoro.

Altre applicazioni includono misure per il controllo della velocità e informazioni sui cambiamenti di configurazioni delle corsie, tempi di viaggio e ritardi (Fig. 35).



Fig. 35 - Sistemi di informazione ai guidatori rispetto alle condizioni del manto stradale

Electronic Payment Systems

I sistemi di pagamento elettronici impiegano varie tecnologie per velocizzare il pagamento di pedaggi e tariffe di transito (Fig. 36).

La raccolta elettronica dei pedaggi (Electronic Toll Collection - ETC) utilizza sistemi automatizzati per aumentare l'efficienza e la convenienza operativa. L’ETC è una efficace applicazione ITS in quanto determina una riduzione dei tempi d’attesa in coda, uno snellimento della circolazione, una riduzione del consumo di combustibile con la conseguente riduzione delle emissioni del veicolo in sosta. Tuttavia, alcuni studi hanno documentato un aumento dei sinistri presso i caselli autostradali

muniti di ETC, probabilmente a causa dell’incertezza del conducente nei confronti di caselli a configurazione variabile (pagamento automatico o manuale) oppure della differente velocità dei veicoli con o senza transponder per il rilevamento automatizzato.



Fig. 36 - Sistemi di pagamento elettronico

Commercial Vehicle Operations

Esistono applicazioni ITS specifiche per le operazioni relative a veicoli commerciali e progettate per aumentare la comunicazione fra addetti al trasporto e i rispettivi centri direzionali, in particolare durante trasporti transnazionali. Questi sistemi abbassano le spese operative attraverso il potenziamento dell’efficienza e migliorano la sicurezza degli autotrasportatori.

Le applicazioni gestionali sulle credenziali di viaggio consentono inoltre ad agenzie e lavoratori del settore un corposo risparmio di carteggio burocratico.

Apparecchiature automatizzate di ispezione a distanza vengono utilizzate per vagliare lo stato di un mezzo.

Transponder presenti sul mezzo possono comunicare con stazioni di pesa e checkpoint doganali riducendo così la congestione nelle stazioni di ispezione ed i tempi di viaggio (Fig. 37).



Fig. 37 - Sistemi ITS nell’ambito del trasporto merci

Intermodal Freight

I sistemi ITS possono migliorare l’efficienza e la sicurezza del trasporto delle merci. Appositi sistemi di rilevazione controllano e forniscono informazioni sullo stato del carico per assicurare che i container rimangano chiusi mentre sono in viaggio. Si possono in questo modo controllare posizione e corrispondenza dei container in tempo reale (Fig. 38).



Fig. 38 - Applicazioni ITS nei terminal container (simulazione)

Applicazioni ITS nei terminal container possono migliorare l'efficienza delle operazioni di carico/scarico e di movimentazione. Attivando etichette provviste di chip (detti tag) si è in grado di tracciare il percorso dei container all'interno del terminal e di automatizzarne la movimentazione. Presso gli scali internazionali sono presenti sistemi ITS che consentono transazioni automatizzate, riducendo così i ritardi associati alla dogana.

2.3.2 Sistemi vehicle-based

Collision Warning System

Al fine di migliorare le condizioni di sicurezza dei veicoli, stanno diffondendosi sistemi di avvertimento anticollisione (Collision Warning System - CWS) (Fig. 39), sistemi di avvertimento anticollisione anteriore, sistemi di rilevamento degli ostacoli, i sistemi di avvertimento di partenza, sistemi di avvertimento di cambio corsia.

I sistemi CWS utilizzano una varietà di sensori per controllare le zone adiacenti al veicolo e allertare il conducente in caso di condizioni che potrebbero condurre a una collisione.

Nell'ambito di applicazione dei sistemi frontali anticollisione (Forward-Collision Systems), dei radar a microonde e delle telecamere montate a bordo del veicolo, qualora il conducente non usi

correttamente i freni in una situazione critica, inviano un segnale di pericolo a dei sistemi attuatori che assumono autonomamente il controllo e rallentano il veicolo nel tentativo di evitare l’urto (Fig. 40).

I sistemi di rilevamento degli ostacoli utilizzano sensori montati sul veicolo per rilevare ostruzioni, la presenza di altri veicoli, detriti o animali lungo il percorso.

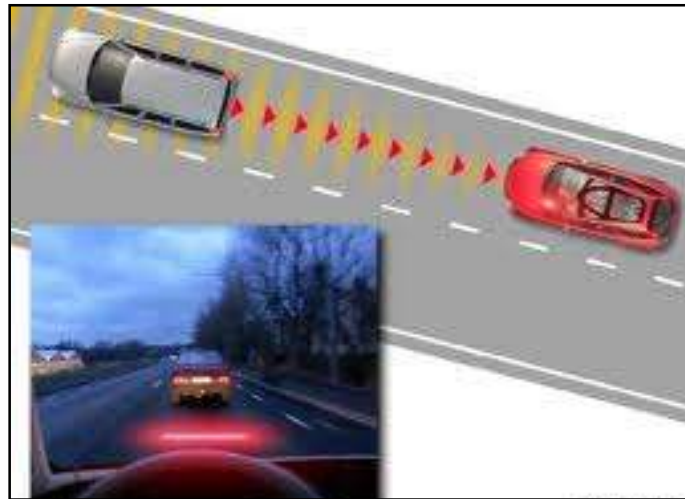


Fig. 39 - Sistemi di avvertimento anticollisione



Fig. 40 - Sistemi anticollisione attivi

I sistemi di avvertimento di partenza sono utilizzati per allertare gli automobilisti, qualora risultino assonnati e trattenerli dall’intraprendere un viaggio.

Sistemi di avvertimento del cambio di corsia (Lane-change) vengono usati per allertare i conducenti della presenza di altri veicoli o ostruzioni nelle corsie adiacenti, nel caso in cui il conducente voglia cambiare corsia (Fig. 41).



Fig. 41 - Sistemi di avvertimento del cambio di corsia

La maggior parte dei sistemi CWS sono ancora nella fase di ricerca o sviluppo, ma alcuni, per esempio, Forward-Collision Warning e Lane-change, hanno iniziato ad emergere nei mercati tradizionali.

Driver Assistance Systems

Nell’ambito dell’assistenza ai guidatori esistono sistemi di visione presenti sui veicoli che migliorano le qualità della guida in condizioni visive ridotte, in caso di guida notturna, di illuminazione inadeguata, nebbia, neve o altro.

Il controllo di crociera intelligente (Intelligent Cruise Control - ICC), il controllo di velocità e l’assistenza di guida e sterzo, aiutano la guida di chi viaggia (Fig. 42).



Fig. 42 - Intelligent Cruise Control

Nel caso di incidente, i registratori di sicurezza possono agire come una "scatola nera" e registrare i dati relativi alle prestazioni e ad altre informazioni, rilevate da videocamere o sensori radar, per migliorare a posteriori la comprensione dell’incidente.

Collision Notification Systems

I sistemi di notifica di collisione sono stati progettati per rilevare e riferire posizione e gravità dei sinistri ad organizzazioni preposte al coordinamento delle azioni di soccorso.

Questi sistemi possono essere attivati manualmente (Mayday) e da sistemi ACN (Automatic Collision Notification).

I sistemi di notifica di collisione utilizzano appositi sensori unitamente alla tecnologia GPS ed a sistemi di comunicazioni wireless per fornire a call-center pubblici e privati informazioni sulla posizione e, in alcuni casi, sul numero dei passeggeri feriti e sulla natura delle loro ferite.

I dati forniti dal sistema ACN aiutano chi risponde alla chiamata di emergenza nella determinazione del tipo di soccorso che è necessario apportare, della modalità di trasporto (aria o terra) e della posizione del centro traumatologico più vicino.

Sono attualmente disponibili diverse apparecchiature Mayday/ACN, molti dei quali sono disponibili come optional su vetture di lusso mentre altri sono installabili sui veicolo come prodotti fuori mercato.

Capitolo III

3 LA SIMULAZIONE DEI SISTEMI DI TRASPORTO

Il sistema delle attività sociali, economiche e culturali di ogni civiltà ha da sempre avuto una stretta connessione con i sistemi di trasporto. Basti pensare che lo sviluppo di questi due sistemi è sempre andato di pari passo e che qualsiasi ipotesi sul futuro è sempre associata ad un innovativo sistema di trasporto.

Per simulare un sistema di trasporto, data la sua complessità, non è possibile ricorrere a metodi qualitativi, ma è necessario utilizzare dei modelli quantitativi che costituiscono l’oggetto di studio dell’ingegneria dei sistemi di trasporto. Lo scopo di questa disciplina non si limita alla simulazione del funzionamento attuale di un sistema di trasporto, cosa che avrebbe scarso interesse dal punto di vista ingegneristico, bensì mira a valutare l’effetto degli interventi prima che essi siano realizzati, consentendo di ottimizzare le risorse impiegate scegliendo gli interventi migliori da attuare sul sistema di trasporto.

Una soluzione alternativa, consiste in un uso più intelligente delle infrastrutture presenti sul territorio; attraverso un monitoraggio continuo, una raccolta di informazioni e dati e l’applicazione di azioni preventive, si può tentare di evitare la formazione di ingorghi e di rallentamenti e quindi di sfruttare al meglio la rete esistente.

I metodi con cui è possibile simulare un sistema di trasporto sono molteplici sia per quanto riguarda la loro natura che per i risultati che questi consentono di ottenere. Possono essere raggruppati in:

- modelli macroscopici;
- modelli microscopici;
- modelli mesoscopici.

Nella macro-simulazione il traffico è descritto come un flusso continuo definito da regole comportamentali che si basano principalmente sull’interazione dei veicoli con l’infrastruttura. I modelli macroscopici sono di solito continui nel tempo e nello spazio. La teoria matematica che sta dietro tali modelli viene impostata sulle dinamiche temporali e uni-dimensionali, rispettando le leggi di conservazione del flusso.

I modelli di micro-simulazione del traffico, invece, sono di tipo discreto e consentono di visualizzare in maniera realistica il movimento dei singoli veicoli e di seguire l’evoluzione del traffico sulla rete stradale. Questi modelli, simulando il comportamento di ogni singolo veicolo con la propria origine e destinazione, forniscono una serie di elementi utili per una dettagliata analisi

quantitativa. Essi sono modelli disaggregati, in quanto riproducono il moto dei singoli veicoli, ma spesso sono anche utilizzati per analisi aggregate (flussi, lunghezze di coda, tempi di percorrenza, ecc.).

Sono stati proposti negli ultimi anni anche alcuni modelli misti, detti mesoscopici, che si basano sulle simulazioni di tipo microscopico o quasi-microscopico ed hanno caratteristiche macroscopiche di collegamento (come, ad esempio, i concetti di velocità e densità aggregate). Questi modelli concentrano l’attenzione sul comportamento di insiemi di utenti e gli output che si ottengono sono riferiti, appunto, a tali gruppi e non ai singoli veicoli (come nella micro-simulazione). Ogni singolo insieme è composto da veicoli che hanno la stessa origine, la stessa destinazione e la stessa strategia di scelta (percorso, velocità, ecc..) durante il loro movimento. Di questi gruppi, si simula lo spostamento rigido seguendone la traiettoria nello spazio; quanto più piccola è la dimensione del gruppo, tanto più la soluzione del modello sarà vicina al tipo microscopico.

La Tab. 11 presenta una classificazione di modelli di deflusso veicolare basata sulla rappresentazione del flusso di utenti (continui e discreti) e sul tipo di funzioni di prestazione (aggregate e disaggregate).

Rappresentazione del deflusso	Funzioni di prestazione	
	Aggregate	Disaggregate
Continua	MACRO-SIMULAZIONE	•
Discreta	MESO-SIMULAZIONE	MICRO-SIMULAZIONE

Tab. 11 - Classificazione dei modelli di deflusso veicolare

La scelta del modello da utilizzare dipende dal livello di dettaglio richiesto dall’applicazione; per questo motivo bisogna tenere conto che ogni tipologia di modello (micro, macro e meso) presenta delle difficoltà di raccolta dei dati e di costruzione del modello stesso.

Il problema della micro-simulazione dipende principalmente dalla complessità insita nel riprodurre lo stato dinamico del traffico ed è accentuato dall’aleatorietà propria del comportamento degli utenti.

In alcuni casi, l’approccio alla pianificazione del traffico legato all’utilizzo di strumenti di macro-simulazione non consente di operare al livello di dettaglio richiesto. Tali strumenti, infatti, non sono in grado di fornire quegli elementi di valutazione legati alle specifiche scelte progettuali

(risoluzione delle intersezioni, svincoli, rotatorie, semaforizzazioni, ecc.), né di valutare la correttezza geometrica di una proposta progettuale.

In questo ambito, gli strumenti di micro-simulazione sono in grado di rappresentare in maniera puntuale il traffico e la sua evoluzione dinamica, prendendo in considerazione gli aspetti geometrici di dettaglio dell’infrastruttura ed il comportamento reale di ogni singolo veicolo, legato all’accoppiamento delle caratteristiche del veicolo stesso e di quelle del conducente.

Sempre più spesso, i modelli di simulazione sono utilizzati come sistema di supporto alle decisioni nelle fasi preliminari alla progettazione delle infrastrutture stradali o nell’ambito della pianificazione dei trasporti (studi di fattibilità, studi di mobilità, studi di traffico, progettazione preliminare di nuove infrastrutture) in quanto sono in grado di analizzare alternative di progetto o di gestione dei trasporti dal punto di vista territoriale, ambientale, economico.

Si è detto nei capitoli precedenti che i sistemi di informazione avanzata per i viaggiatori (ATIS) sono sempre più riconosciuti come una potenziale strategia per influenzare il comportamento dei guidatori non soltanto nella scelta dell’itinerario da seguire ma anche nella scelta dell’ora di partenza e nella scelta del modo di trasporto.

Inoltre, avere a disposizione informazioni in tempo reale consente di migliorare l’efficienza della rete, di ridurre le congestioni e di migliorare la qualità dell’ambiente a seguito di minori emissioni inquinanti.

Tuttavia, il successo dell’attuazione di questi sistemi dipende in larga misura da quanto si è riuscito a capire sul meccanismo di adattamento degli automobilisti in risposta alle informazioni ricevute e sugli impatti che le informazioni fornite dagli ITS determinano su una rete di trasporto in termini di tempi di percorrenza, di riduzione delle congestioni, di riduzione dell’incidentalità, etc.

Per raggiungere questo obiettivo, i modelli di macro-meso-micro simulazione non sono in grado da soli di fornire gli strumenti necessari ma, come vedremo, si possono ottenere dei risultati importanti, ad esempio, integrando l’utilizzo di strumenti di simulazione microscopica con modelli basati sugli automi cellulari e sugli agenti intelligenti.

Infatti, il sistema che si vuole riprodurre in questo caso presenta un ulteriore grado di libertà rispetto ad un “classico” sistema dei trasporti: i guidatori possono modificare il proprio comportamento di scelta del percorso sulla base delle informazioni che ricevono dagli ITS ed, apprendendo dall’esperienza pregressa, sono in grado di individuare in maniera continua una strategia di scelta ottimale.

Di seguito, dopo una trattazione di carattere generale sull’identificazione dei sistemi di trasporto (paragrafo 3.1), saranno descritti i modelli e gli algoritmi presenti in letteratura con i quali è possibile simulare un sistema di trasporto a livello macroscopico (paragrafo 3.2), microscopico (paragrafo 3.3) e mesoscopico (paragrafo 3.4). Successivamente (paragrafo 3.5), ci si soffermerà ad analizzare modelli di comportamento dinamico adattativo utili per riprodurre le caratteristiche dei sistemi di trasporto e per far emergere i fenomeni ad essi associati.

3.1 Identificazione dei sistemi di trasporto

Un *sistema di trasporto* può essere definito come “la combinazione di elementi e delle loro interazioni, che producono la domanda di trasporto all’interno di una data area e i servizi di offerta di trasporto per soddisfare questa domanda” [6]. Tale definizione è abbastanza generale, e può essere applicata in differenti contesti.

Da un punto di vista applicativo per simulare un sistema di trasporto è necessario isolarne gli elementi più importanti e considerare le interazioni più rilevanti, dal momento che è impossibile tenere in considerazione tutti gli elementi interagenti fra loro. In altri termini, come per tutte le discipline ricadenti nell’ambito dell’ingegneria, è necessario costruire un modello semplificato di quella che è la complessa realtà. Tale modello semplificato deve garantire il giusto compromesso fra la capacità di simulare il fenomeno in maniera sufficientemente aderente alla realtà e la trattabilità teorica e computazionale del modello stesso.

Benché la data di nascita dell’ingegneria dei sistemi di trasporto si può fare risalire agli anni cinquanta del secolo scorso (ed in particolare al 1952, anno in cui John Glen Wardrop scrisse “Some theoretical aspects of road traffic research” [7]) le prime trattazioni sistematiche relative alla simulazione di un sistema di trasporto risalgono agli anni settanta [8] e si susseguono negli anni ottanta [9] [10] e novanta [11] [12], fino agli anni più recenti [6], essendo tale disciplina tuttora in continua evoluzione.

Un sistema di trasporto è costituito da due parti che interagiscono fra loro: l’offerta e la domanda.

L’*offerta* è costituita dalle componenti fisiche ed organizzative finalizzate alla produzione dei servizi di trasporto in una determinata area. Per simulare un sistema di trasporto è necessario riprodurre il modo in cui il livello di servizio offerto da tali componenti è influenzato dagli utenti che se ne servono. L’approccio più diffuso per simulare l’offerta di trasporto si avvale delle reti, che sono costituite da grafi, con i quali è possibile rappresentare la struttura topologica dell’offerta e delle funzioni di costo associate agli archi e ai nodi, con le quali si simulano le prestazioni del sistema.

La *domanda* è costituita dall’insieme dei viaggiatori e delle merci con determinate caratteristiche che si spostano in una determinata area in un intervallo di tempo. Questa è simulata attraverso opportuni modelli che possono essere visti come una relazione matematica che fornisce il valore medio del flusso di domanda in un determinato periodo di riferimento con le sue caratteristiche rilevanti, dati il sistema delle attività insediate nel territorio e l’offerta di trasporto.

Il funzionamento di un sistema di trasporto dipende dall’*interazione domanda-offerta*: da una parte le prestazioni del sistema di offerta possono essere influenzate dalla domanda, e dall’altra le scelte di viaggio e, di conseguenza, i flussi di traffico, dipendono dalle caratteristiche dell’offerta. Tale fenomeno è simulato attraverso modelli che si differenziano a seconda di alcune ipotesi, fra le quali: la scelta del percorso da parte degli utenti (che può essere simulata con modelli deterministici o stocastici), l’influenza sul livello di servizio di un dato componente dell’offerta degli utenti che si servono del componente stesso.

Per progettare un sistema di trasporto è necessario simularne il funzionamento all’interno di un’area geografica nella quale si ritiene che si esauriscano la parte rilevante degli effetti degli interventi progettati. Tale area prende il nome di *area di studio* ed il suo confine è detto *cordone*. L’area di studio è suddivisa in più *zone di traffico*, che possono consistere in intere città o province per analisi di sistemi a scala nazionale oppure in pochi isolati per analisi di sistemi a scala urbana. Per ciascuna zona di traffico si suppone che tutti gli spostamenti interzonalari siano concentrati in un punto detto *centroide di zona* o *centroide interno*, mentre gli spostamenti intrazonari vengono trascurati. Tutto ciò che è esterno all’area di studio interessa esclusivamente per quanto riguarda le interconnessioni con il sistema analizzato ed, a tal fine, si considerano alcuni punti detti *centroidi esterni*, nei quali si suppongono concentrati gli spostamenti di scambio fra l’area di studio e l’esterno e gli spostamenti di attraversamento dell’area di studio. Un esempio del risultato del processo di identificazione dell’area di studio e della suddivisione in zone di traffico è riportato nella Fig. 43.

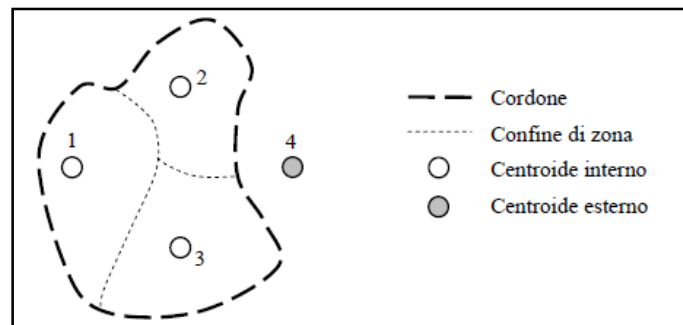


Fig. 43 - Identificazione dell’area di studio e suddivisione in zone di traffico

Si introduce la seguente notazione:

- r centroide (zona) origine dello spostamento;
- R insieme dei centroidi origine;
- s centroide (zona) destinazione dello spostamento;
- S insieme dei centroidi destinazione;

- rs coppia origine-destinazione;
- RS insieme delle coppie origine-destinazione.

3.2 I modelli macroscopici

I modelli di simulazione dei sistemi di trasporto macroscopici sono in grado di effettuare stime e valutazioni relative alla domanda ed all’offerta di trasporto, nonché alla interazione tra queste (assegnazione) Fig. 44.

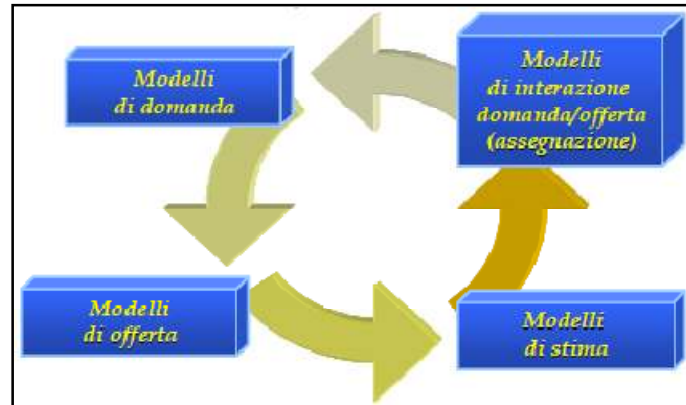


Fig. 44 - Interazione tra i modelli macroscopici

I modelli prendono in considerazione valutazioni di tipo medio relative al deflusso che, come vedremo in dettaglio, si basa su analogie con la fluidodinamica.

Le analisi si basano, pertanto, su valutazioni e simulazioni statistiche medie dei volumi di traffico orari e dei tempi medi di percorrenza previsti sugli archi, a partire dalle caratteristiche geometriche e funzionali delle strade ed eventualmente dai volumi di traffico esistenti.

Queste analisi sono supportate da modelli comportamentali di tipo deterministico o stocastico che consentono di individuare la ripartizione percentuale dei flussi sulle differenti alternative di percorso.

Poiché la ripartizione del traffico sulle tratte comporta una variazione dei tempi di percorrenza degli archi e dei costi generalizzati sulla base dei quali si fonda il criterio di scelta del percorso stesso, un processo iterativo, ad esempio, consente di individuare la situazione di equilibrio tra i flussi di traffico ed i costi generalizzati.

Questo porta ad individuare una serie di indicazioni di carattere medio e statistico rispetto ai flussi di traffico orario e giornaliero previsti sulle tratte, alle velocità medie, alle densità, ai livelli di servizio, agli indici di saturazione, ecc..

Rappresentare questi indicatori ad un periodo di riferimento temporale medio, solitamente di un’ora, porta ad una visione del processo di simulazione che viene definita statica, in quanto non vengono presi in considerazione variabili che caratterizzano l’effettivo comportamento dei veicoli e della

loro distribuzione sulla rete. I veicoli, infatti, non vengono simulati in maniera distinta, ma sono considerati esclusivamente in termini di flusso medio. Ciò equivale a considerarli come una flotta uniforme che procede alla medesima velocità (moto uniforme) e con il medesimo distanziamento.

3.2.1 Il deflusso dei veicoli

Da un punto di vista macroscopico, il traffico automobilistico può essere associato ad un fluido che scorre.

L’analogia con la fluidodinamica porta a focalizzare l’attenzione su alcune grandezze fisiche quali il flusso, la concentrazione (in termini di densità spaziale) e la velocità. Il traffico veicolare viene trattato come un fluido monodimensionale, considerando le seguenti ipotesi di partenza:

1. il flusso di traffico si conserva e come tale sarà regolato da una legge di conservazione così come i fluidi;
2. esiste una corrispondenza biunivoca tra velocità e densità e tra flusso e densità, che si concretizza in un’equazione di stato.

Il modello macroscopico di deflusso del traffico più antico, ma ancora il più famoso, risale al 1955 ed è attribuito a Lighthill e Whitman [13]. Questo modello, inoltre, venne sviluppato anche da Richards nel 1956 in maniera del tutto indipendente [14].

Il loro modello di fluidodinamica si basa sull’affermazione che, lontano da rampe di accesso o di uscita, nessun veicolo abbandona o si immette nella rete stradale.

Nel 1971, Payne, in [15], sviluppò il primo modello macroscopico del secondo ordine, che prendeva in considerazione le seguenti variabili di stato:

- $\rho(x, t)$, densità del traffico definita come il numero dei veicoli presenti mediamente per unità di lunghezza. Viene misurata in [veh/km];
- $q(x, t)$, flusso del traffico definito come il numero dei veicoli passanti da una specifica sezione della tratta stradale nell’unità di tempo. Viene misurata in [veh/h];
- $v(x, t)$, velocità media dei veicoli misurata in [km/h].

Le tre grandezze appena definite, sono legate tra loro dalla seguente equazione di stato:

$$q(x, t) = \rho(x, t) \cdot v(x, t) \quad (3.1)$$

Legge di conservazione della materia

Come detto, il modello di traffico è basato sui principi della fluidodinamica; pertanto, se si fissa un intervallo sulla strada e si analizza il numero di auto che la attraversano in tale intervallo (Fig. 45), si può dedurre che il numero di auto entranti in un nodo risulta uguale al numero di auto uscenti dal nodo stesso.

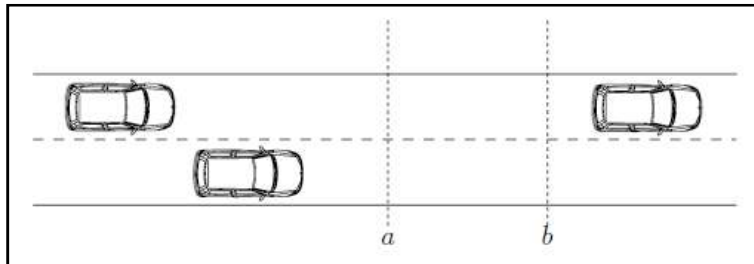


Fig. 45 - Schematizzazione della barriera per il calcolo del flusso

Questo viene espresso nell’Equazione di conservazione, definita come:

$$\frac{d}{dt} \int_a^b \rho(x, t) dx = q(a, t) - q(b, t) \quad (3.2)$$

La relazione 3.2 può essere riscritta in termini differenziali:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} q(x, t) = 0 \quad (3.3)$$

Quindi, per considerare i flussi in entrata ed in uscita, vengono introdotte altre due grandezze:

- $r(x, t)$, che indica il flusso di traffico in entrata, misurato in [veh/h];
- $s(x, t)$, che indica il flusso di traffico in uscita, misurato in [veh/h].

L’equazione 3.3 diventa:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(x, t) + \frac{\partial}{\partial x} q(x, t) = r(x, t) + s(x, t) \quad (3.4)$$

Questa equazione viene risolta utilizzando metodi alle differenze finite per equazioni differenziali alle derivate parziali.

Relazione Velocità - Densità

Il primo modello storicamente proposto risale al 1935 e venne introdotto da Greenshields in [16].

Esso è un modello lineare che si basa su tre considerazioni fondamentali:

1. la velocità dei veicoli decresce all’aumentare della loro densità, il che corrisponde a $\frac{dv}{d\rho} \leq 0$;
2. la velocità dei veicoli è proporzionale ad una velocità massima v_f ; in corrispondenza di basse densità la velocità dei veicoli è proprio pari a v_f ;
3. la velocità è direttamente proporzionale allo scarto $\rho_{max} - \rho$, dove ρ_{max} è la densità massima.

Si ottiene pertanto il modello lineare espresso dalla relazione 3.5 e rappresentato in (Fig. 46):

$$v(\rho) = v_f \left(1 - \frac{\rho(x,t)}{\rho_{max}}\right) \quad (3.5)$$

Nel corso degli anni sono stati introdotti ulteriori modelli, uno dei quali è quello di Greenberg nel 1959 in [17]:

$$v(\rho) = v_c \cdot \ln \frac{\rho_{max}}{\rho(x,t)} \quad (3.6)$$

dove v_c è la velocità per la quale il flusso è massimo.

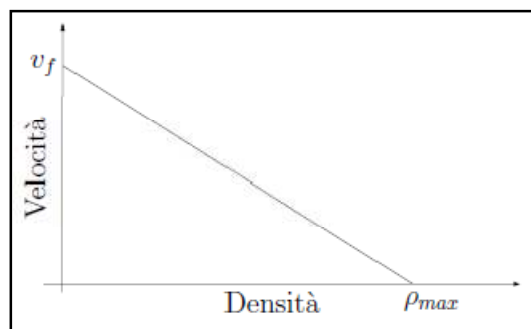


Fig. 46 - Relazione lineare densità-velocità secondo Greenshield

Questo modello logaritmico risulta più accurato ed efficace rispetto a quello di Greenshield, soprattutto per valori della densità prossimi alla congestione.

Nel 1961 in [18], per evitare di avere velocità infinite per ρ che tende a 0, Underwood ha rielaborato la (3.6) nel seguente modo:

$$v(\rho) = v_f \cdot e^{\left(\frac{-\rho(x,t)}{\rho_{max}}\right)} \quad (3.7)$$

dove v_f è la velocità critica per la quale il flusso è massimo.

Recentemente, nel 1995 in [19], un altro tipo di relazione velocità-densità è stato fornito da Papageorgiou. Il suo è un modello macroscopico del secondo ordine, che riesce a riprodurre situazioni di traffico molto complesse [20][21].

Questo modello descrive il comportamento medio di una rete stradale e sfrutta come variabili di stato la densità di traffico e la velocità media dei veicoli.

Come esprime la seguente relazione:

$$v = v_f \left[\left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}} \right)^l \right]^m \quad (3.8)$$

la relazione tra velocità e densità non è più lineare, ma decresce esponenzialmente come mostrato in Fig. 47.

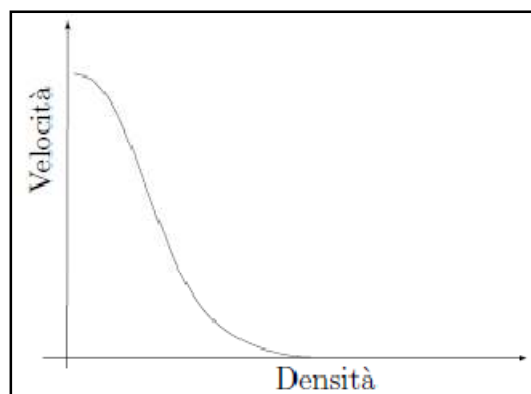


Fig. 47 - Andamento della velocità al variare della densità sugli archi

Relazione Flusso - Densità

La relazione che lega il flusso alla densità è un diagramma di fondamentale importanza in quanto si rivela molto utile per comprendere e prevedere l’evoluzione del traffico.

Dal modello lineare di Greenshield e dall’equazione di stato, si può ricavare la seguente formula:

$$q(x, t) = \rho(x, t) \cdot v(x, t) = \rho(x, t) \cdot v_f \cdot \left(1 - \frac{\rho(x, t)}{\rho_{max}}\right) \quad (3.9)$$

ovvero una parabola che passa per l’origine, presenta un massimo in corrispondenza di $\frac{\rho_{max}}{2}$ e presenta una seconda intersezione con l’asse ρ in ρ_{max} , come mostrato in Fig. 48.

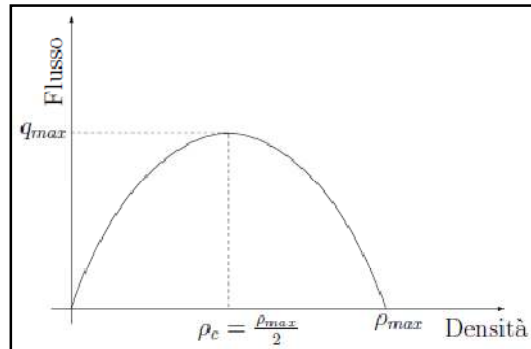


Fig. 48 - Curva caratteristica Flusso-Densità nell’ipotesi di Greenshield

L’inclinazione dei vettori che congiungono l’origine con un punto qualsiasi sulla parabola corrisponde alla velocità media nel punto, che nel caso particolare di $\rho = 0$, è la velocità v_f .

Per calcolare il massimo della funzione basta imporre:

$$\frac{dq}{d\rho} = v_f \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{max}}\right) - \rho \cdot \frac{v_f}{\rho_{max}} = v_f \left(1 - 2 \frac{\rho}{\rho_{max}}\right) \quad (3.10)$$

da cui si ricava:

$$1 - 2 \frac{\rho}{\rho_{max}} = 0 \Rightarrow \rho_c = \frac{1}{2} \rho_{max} \quad (3.11)$$

Qualora non ci fosse una relazione lineare tra la velocità e la densità come nel caso di Greenshields, il diagramma flusso-densità è dato da una parabola non simmetrica in cui il valore della densità critica non si trova più a metà rispetto alla densità massima, come si può vedere in Fig. 49.

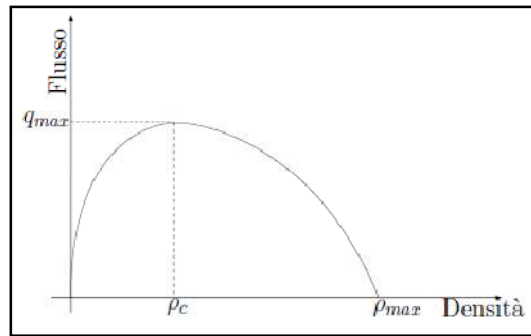


Fig. 49 - Curva caratteristica Flusso-Densità in presenza di una relazione non lineare velocità-densità

In generale, la parte con $\rho < \rho_c$ del diagramma viene denominata *parte stabile o a traffico leggero*, mentre la parte con $\rho > \rho_c$ viene denominata *parte instabile o a traffico intenso*.

La zona intermedia, nella quale i valori di densità sono vicini a ρ_c , è una zona importante in quanto è caratterizzata dal fenomeno dello *stop and go*. L’abbandono delle condizioni di stabilità è dovuto a bruschi eventi esterni come, ad esempio, lo stop al semaforo, dei lavori in corso sulla rete stradale, un incidente. Il verificarsi di una delle anzidette perturbazioni dà luogo ad un’onda d’urto che investe la corrente veicolare a monte generando una coda.

Contemporaneamente, parte verso valle un’altra onda che riflette l’effetto dell’ostruzione diminuendo, in questo caso, la densità veicolare.

3.2.2 Modelli di offerta

Un modello di offerta simula il livello di servizio, cioè le prestazioni, associate alle componenti fisiche ed organizzative finalizzate alla produzione dei servizi di trasporto in funzione delle caratteristiche di tali componenti ed eventualmente del numero di utenti che se ne servono. L’influenza del numero di utenti sul livello di servizio costituisce un fenomeno che è detto *congestione*.

La costruzione di un modello di offerta [6] [8] [9] [10] [11] consiste nella rappresentazione dell’offerta per mezzo di una *rete*, cioè di un grafo orientato ai cui archi sono associate delle funzioni di costo. Il *grafo*, cui è associata la configurazione topologica del sistema di trasporto, è costituito da nodi e archi e sarà indicato col simbolo G . Più in dettaglio i componenti di un grafo sono:

- *archi reali*, che rappresentano le infrastrutture viarie rilevanti (cioè quelle che sono destinate prevalentemente agli spostamenti interzonali);

- *nodi reali*, che rappresentano le intersezioni fra le infrastrutture viarie o punti nei quali si modificano significativamente le caratteristiche delle infrastrutture;
- *centroidi* interni ed esterni, definiti al paragrafo 3.1, che costituiscono nodi del grafo;
- *archi fittizi*, che collegano i centroidi alla rete reale (cioè il sottografo costituito da archi e nodi reali);
- *nodi fittizi*, che costituiscono punti di connessione fra gli archi fittizi e la rete reale.

Ad ogni arco è associato un *flusso di arco*, cioè il numero di utenti (o veicoli) che lo attraversa nell’unità di tempo, ed un *costo di arco* che ogni utente deve sostenere per attraversarlo. Ogni utente per raggiungere dalla propria origine la destinazione prescelta ha a disposizione un insieme di *percorsi*, cioè una sequenza di archi che ha come nodo iniziale il centroide origine e come nodo finale il centroide destinazione. A ciascuno di questi percorsi può essere associato un *flusso di percorso* ed un *costo di percorso*, che si compone di due aliquote: *costo di percorso additivo*, che è dato dalla somma dei costi di arco che compongono il percorso, e *costo di percorso non additivo* che è specifico del percorso. I costi possono tenere conto di differenti disutilità (tempo di viaggio, costo monetario, trasbordi, ecc.) opportunamente pesate fra loro.

Si introduce la seguente notazione:

- n generico nodo;
- N insieme dei nodi;
- l generico arco (talvolta indicato con la coppia di nodi iniziale e finale $n'h$);
- L insieme degli archi;
- f_l flusso di arco relativo all’arco l ;
- \mathbf{f} vettore dei flussi di arco; è costituito da tanti elementi quanti sono gli archi della rete;
- c_l costo di arco relativo all’arco l ;
- \mathbf{c} vettore dei costi di arco; è costituito da tanti elementi quanti sono gli archi della rete;
- k generico percorso;
- K insieme dei percorsi;
- K_{rs} insieme dei percorsi relativi alla coppia origine-destinazione rs ;
- h_k flusso di percorso relativo al percorso k ;
- \mathbf{h} vettore dei flussi di percorso; è costituito da tanti elementi quanti sono i percorsi della rete;
- \mathbf{h}_{rs} vettore dei flussi dei percorsi relativi alla coppia rs ; è costituito da tanti elementi quanti sono i percorsi della rete che connettono l’origine r alla destinazione s ;

- g_k costo di percorso relativo al percorso k ;
- \mathbf{g} vettore dei costi di percorso; è costituito da tanti elementi quanti sono i percorsi della rete;
- g_{NA} vettore dei costi di percorso additivi (cioè costituiti dalla somma dei costi degli archi che compongono il percorso); è costituito da tanti elementi quanti sono i percorsi della rete;
- g_{ADD} vettore dei costi di percorso non additivi (cioè associati direttamente al percorso); è costituito da tanti elementi quanti sono i percorsi della rete;
- g_{rs} vettore dei costi dei percorsi relativi alla coppia rs ; è costituito da tanti elementi quanti sono i percorsi della rete che connettono l’origine r alla destinazione s .

Le grandezze di arco, flussi e costi, possono essere messe in relazione alle corrispondenti quantità riferite ai percorsi, mediante una *matrice di incidenza archi percorsi*, indicata col simbolo Δ . Ad ogni riga di tale matrice è associato un arco l della rete, mentre ad ogni colonna è associato un percorso k ; un generico elemento δ_{lk} della matrice può assumere i valori 0 oppure 1, che stanno ad indicare rispettivamente la non appartenenza e l’appartenenza dell’arco l al percorso k . Nella Fig. 50 sono riportate una rete di esempio e la corrispondente matrice di incidenza.

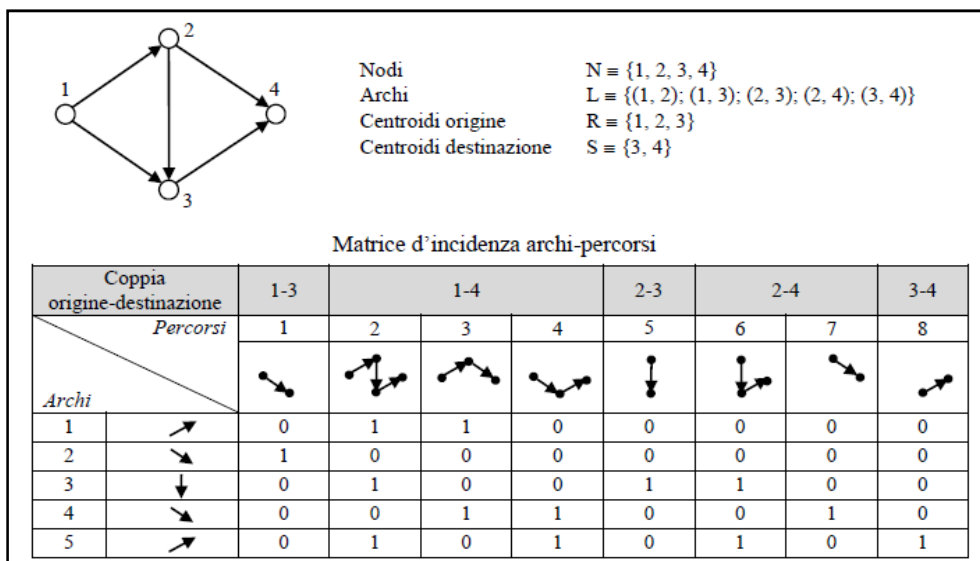


Fig. 50 - Esempio di rete e di matrice di incidenza archi-percorsi

Grazie a tale matrice è possibile introdurre delle relazioni fra i flussi di arco e di percorso

$$\mathbf{f} = \Delta \mathbf{h} \quad (3.12)$$

e fra i costi di arco e di percorso

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}^{\text{ADD}} + \mathbf{g}^{\text{NA}} = \Delta^T \mathbf{c} + \mathbf{g}^{\text{NA}} \quad (3.13)$$

I flussi e i costi di arco possono essere fra loro indipendenti (rete non congestionata) oppure messi in relazione fra loro (rete congestionata) per mezzo delle cosiddette *funzioni di costo* $\mathbf{c}(\bullet)$

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}(\mathbf{f}) \quad (3.14)$$

che si dicono *separabili* se per ogni arco l il costo dipende solo dal flusso sull’arco stesso

$$c_l = c_l(f_l) \quad \forall l \in L$$

dove $c_l(\bullet)$ è la funzione di costo dell’arco l . Un esempio di funzione di costo separabile è la funzione BPR [22]

$$c_l = c_{0,l} \left(1 + \alpha \left(\frac{f_l}{c_{A,l}} \right)^\beta \right) \quad (3.15)$$

con:

- $c_{0,l}$ costo dell’arco l a flusso nullo;
- $c_{A,l}$ capacità dell’arco l , che dipende da caratteristiche infrastrutturali e funzionali dell’arco e da eventuali disturbi esogeni (attraversamento di pedoni, manovre di parcheggio, condizioni meteorologiche, etc.);
- α, β coefficienti che possono essere stimati per ciascuna tipologia di infrastruttura stradale per mezzo di una regressione non lineare utilizzando dati di traffico rilevati su uno o più tronchi stradali.

In letteratura sono state proposte numerose funzioni di costo, alcune delle quali sono adatte per archi urbani [23], altre per archi extraurbani [24] ed altre ancora per simulare il tempo di attesa alle intersezioni semaforizzate [25] [26] [27]. Sono inoltre state proposte funzioni di costo adatte in

alcuni contesti particolari, che esprimono ad esempio il ritardo ai caselli autostradali [28] o il tempo necessario per la ricerca del parcheggio [29].

La relazione fra costi di percorso e flussi di arco si può ricavare dalla (3.13) per mezzo della (3.14)

$$\mathbf{g} = \Delta^T \mathbf{c}(\mathbf{f}) + \mathbf{g}^{\text{NA}}$$

e, successivamente, utilizzando la (3.12), si può ottenere la relazione fra costi di percorso e flussi di percorso

$$\mathbf{g} = \Delta^T \mathbf{c}(\Delta \mathbf{h}) + \mathbf{g}^{\text{NA}}$$

Come è stato detto nel capitolo I, un sistema di trasporto genera delle grandezze non considerate dagli utenti del sistema di trasporto nell’effettuare le proprie scelte di viaggio, cioè delle esternalità rispetto al mercato del servizio di trasporto. Alcune di queste grandezze, quali ad esempio l’incidentalità e le sue conseguenze (morti, feriti e danni materiali) e alcuni costi non percepiti (consumo di pneumatici e lubrificanti, svalutazione dei veicoli, consumo di carburante), ricadono all’interno del sistema e vengono calcolate per mezzo di funzioni di prestazione. Altre grandezze, quali ad esempio l’inquinamento acustico e atmosferico, ricadono all’esterno del sistema e vengono calcolate per mezzo di funzioni di impatto.

Le funzioni di prestazione e quelle di impatto nei casi più semplici sono associate al singolo arco e dipendono dal flusso dell’arco, in modo del tutto analogo alle funzioni di costo. Esse generalmente esprimono una misura dell’esternalità per unità di tempo e per unità di flusso. In questo caso, indicando col simbolo $e_{i,l}$ una generica esternalità i associata all’arco l , essa può essere calcolata per mezzo della funzione prestazione o di impatto $e_{i,l}(\bullet)$ per ogni arco della rete

$$e_{i,l} = e_{i,l}(f_l) \quad \forall l \in L$$

È possibile definire una matrice degli impatti \mathbf{E} , la cui i -esima riga è associata all’impatto i e la l -esima colonna all’arco l , ed il cui generico elemento è il termine $e_{i,l}$.

Tuttavia, nella pratica, spesso non è possibile associare la misura dell’esternalità al singolo arco, mentre in altri casi, nonostante sia possibile effettuare tale associazione, non è possibile esprimere la misura dell’esternalità per unità di flusso e per unità di tempo.

3.2.3 Modelli di domanda

Per simulare un sistema di trasporto non si può prescindere dalla simulazione della domanda di trasporto. Tale componente è intrinsecamente legata alle scelte di decisori umani.

Nei paragrafi seguenti è descritta la struttura generale dei modelli di domanda di trasporto ed è introdotta la teoria più diffusamente utilizzata per simulare le scelte fra alternative discrete.

Teoria dell’utilità aleatoria

Il paradigma teorico più frequentemente utilizzato per la simulazione della domanda di trasporto è la *teoria dell’ utilità aleatoria* [6] [30] [31] [32] [33] [34] [35] che è basato sull’ipotesi che ogni individuo sia un decisore razionale che massimizza l’utilità della propria scelta. Più in dettaglio le ipotesi alla base della teoria dell’utilità aleatoria sono:

1. il generico decisore i considera un insieme di alternative, mutuamente esclusive, che costituiscono il suo *insieme di scelta* H_i ;
2. il decisore i assegna ad ogni alternativa j del suo insieme di scelta un’*utilità percepita* u_{ij} che è funzione di alcune grandezze misurabili, dette *attributi* x_{ij} ;
3. il decisore sceglie l’alternativa di massima utilità percepita.

L’utilità percepita non può essere conosciuta con certezza (a causa di errori di misura dell’analista o del decisore, di attributi omessi o sostituiti con altri attributi e della variazione dei pesi che i decisori attribuiscono a ciascun attributo) e pertanto nella teoria dell’utilità aleatoria si assume che essa sia rappresentata da una variabile aleatoria.

In questo contesto, come vedremo in appresso, le informazioni ai guidatori fornite dai sistemi ITS possono avere un impatto positivo, riducendo l’incertezza con cui i guidatori percepiscono l’utilità della propria scelta.

Un approccio alternativo alla teoria dell’utilità aleatoria, consiste nel rappresentare l’incertezza associata all’utilità percepita per mezzo di numeri fuzzy. Tale ipotesi, che è alla base della teoria dell’utilità fuzzy [36], trova una sua giustificazione nel tentativo di rappresentare un diverso tipo di incertezza, che non può essere rappresentato dalle variabili aleatorie. Queste ultime infatti sono

adatte a rappresentare la dispersione dell’utilità fra i decisori, piuttosto che l’incertezza associata alla percezione del singolo decisore.

Nell’ambito della teoria dell’utilità aleatoria, l’utilità percepita è usualmente scomposta in due aliquote: una parte deterministica, detta utilità sistematica v_j^i , ed un residuo aleatorio ε_j^i , che è una variabile aleatoria considerata a media nulla

$$u_j^i = v_j^i + \varepsilon_j^i \quad (3.16)$$

La relazione (3.16) può essere scritta in termini vettoriali

$$\mathbf{u}^i = \mathbf{v}^i + \boldsymbol{\varepsilon}^i$$

con:

- \mathbf{u}^i vettore dell’utilità percepita del decisore i , la cui dimensione è pari al numero di alternative contenute nell’insieme di scelta del decisore i , ed il cui generico termine è u_j^i ;
- \mathbf{v}^i vettore dell’utilità sistematica del decisore i , la cui dimensione è uguale a quella del vettore \mathbf{u}^i , ed il cui generico termine è v_j^i ;
- $\boldsymbol{\varepsilon}^i$ vettore dell’utilità percepita del decisore i , la cui dimensione è uguale a quella del vettore \mathbf{u}^i , ed il cui generico termine è ε_j^i .

Dal momento che l’utilità percepita è una variabile aleatoria, non è possibile conoscere con certezza l’alternativa di massima utilità, cioè quella scelta dall’utente, ma è possibile solo attribuire a ciascuna alternativa j una probabilità $p^i[j | H^i]$ di essere l’alternativa scelta dall’utente i

$$p^i[j | H^i] = \text{pr}[u_j^i > u_{j'}^i, \quad \forall j' \in H^i - \{j\}]$$

la quale, considerando la (3.16) diviene:

$$p^i[j | H^i] = \text{pr}[v_j^i - v_{j'}^i > \varepsilon_{j'}^i - \varepsilon_j^i, \quad \forall j' \in H^i - \{j\}]$$

Un modello di utilità aleatoria si dice *additivo* se la funzione di densità congiunta dei residui aleatori non dipende dalle utilità sistematiche. In tal caso le probabilità di scelta non variano se una

costante è aggiunta alle utilità sistematiche di tutte le alternative e dunque le probabilità di scelta dipendono solo dalle differenze delle utilità sistematiche. Si può inoltre dimostrare che le probabilità di scelta sono una funzione monotona non decrescente dell’utilità sistematica.

La relazione fra l’utilità sistematica e gli attributi è solitamente di tipo lineare, cioè è il prodotto di un vettore di *parametri* β per gli attributi x_j^i

$$v_j^i = \beta^T x_j^i$$

I coefficienti β non sono noti e pertanto devono essere stimati per mezzo di una procedura detta *calibrazione*. In questo senso, il criterio più diffusamente utilizzato è la *massima verosimiglianza*, per mezzo del quale i coefficienti incogniti sono ottenuti massimizzando la probabilità di riprodurre le scelte effettuate da un campione di utenti [31] [35].

Si definisce *soddisfazione* del decisore i , e si indica con z^i , il valore atteso della massima utilità percepita dal decisore i

$$z^i = z^i(\mathbf{v}^i) = att[\max(\mathbf{u}^i)] = att[\max(\mathbf{v}^i + \boldsymbol{\varepsilon}^i)]$$

Si può verificare che tale valore è sempre maggiore o uguale del valore della massima utilità sistematica

$$z^i(\mathbf{v}^i) \geq \max(\mathbf{v}^i)$$

Differenti specificazioni di modelli di utilità aleatoria probabilistici si possono ottenere a partire dalle ipotesi generali assumendo differenti funzioni di densità di probabilità congiunta dei residui aleatori $pdf(\bullet)$, o, in maniera equivalente, le funzioni di distribuzioni congiunte $cdf(\bullet)$. La matrice di varianza-covarianza dei residui aleatori Σ_ε è in generale una matrice simmetrica e semidefinita positiva.

Nel caso in cui la matrice di varianza-covarianza dei residui aleatori è nulla, $\Sigma_\varepsilon = \mathbf{0}$, il modello di domanda si dice *deterministico* e il decisore sceglie l’alternativa di massima utilità sistematica. Nel caso in cui vi siano più alternative di massima utilità sistematica, solo queste possono avere una probabilità di scelta non nulla, mentre tutte le altre alternative hanno una probabilità di scelta nulla.

Nel caso in cui la matrice di varianza-covarianza dei residui aleatori è non nulla, $\Sigma_\varepsilon \neq 0$, il modello di domanda si dice *non deterministico*. Usualmente si assume che i residui aleatori siano non perfettamente correlati e tutti con varianza non nulla; in tal caso il modello di domanda si definisce *probabilistico*, e ciò equivale ad assumere che la matrice di varianza-covarianza dei residui aleatori sia non singolare, cioè che il suo determinante sia non nullo, $\det(\Sigma_\varepsilon) \neq 0$. Nel seguito saranno descritti alcuni dei più noti ed utilizzati modelli di domanda probabilistici.

Uno dei modelli più semplici e vastamente utilizzati è il modello *Logit Multinomiale* [31] [33], nel quale si assume che i residui aleatori siano distribuiti come variabili di Gumbel indipendenti ed identicamente distribuite con media nulla

$$cdf(\varepsilon) = \prod_{j \in I} \exp\left(-\exp\left(-\frac{\varepsilon_j}{\theta} - \gamma\right)\right) \quad (3.17)$$

Dove γ è la costante di Eulero ($\gamma \cong 0,577$) e θ è un parametro associato alla varianza. La matrice di varianza-covarianza dei residui aleatori è

$$\Sigma_\varepsilon = \frac{\pi^2 \theta^2}{6} \mathbf{I} \quad (3.18)$$

dove \mathbf{I} è la matrice identità di dimensione pari al numero di alternative contenute nell’insieme di scelta. Si può dimostrare che la probabilità di scelta di una generica alternativa j è

$$p(j|H) = \frac{\exp\left(\frac{v_j}{\theta}\right)}{\sum_{j' \in I} \exp\left(\frac{v_{j'}}{\theta}\right)}$$

La soddisfazione è data dalla seguente espressione:

$$z(\mathbf{v}) = \theta \ln \sum_{j \in I} \exp\left(\frac{v_j}{\theta}\right)$$

Il modello Logit Multinomiale gode della proprietà dell’*indipendenza dalle alternative irrilevanti*, cioè i rapporti fra le probabilità di scelta di qualsiasi coppia di alternative sono costanti e indipendenti dal numero e dall’utilità sistematica delle altre alternative di scelta. Tale proprietà deriva dalla struttura diagonale della matrice di varianza-covarianza (3.18), che a sua volta dipende

dall’indipendenza delle distribuzioni dei residui aleatori (3.17). Essa comporta dei risultati inattesi dovuti al fatto che, secondo il modello, alternative simili sono viste come assolutamente indipendenti dal decisore. Ad esempio [31], se un decisore ha la stessa probabilità di scegliere l’alternativa “autovettura” e l’alternativa “bus rosso” (cioè $\frac{1}{2}$ per ciascuna), quando si introduce una nuova alternativa “bus blu”, consistente in una nuova linea di trasporto collettivo che effettua le stesse fermate della linea rossa esattamente agli stessi orari e con identica tipologia di mezzi (ad eccezione del colore, che tuttavia si può ragionevolmente assumere che non influenzi le scelte degli utenti), le tre alternative avranno ciascuna una probabilità di scelta pari ad $\frac{1}{3}$. Tale problema è un limite fondamentale del modello Logit Multinomiale quando esso deve essere applicato in un contesto nel quale vi è una non trascurabile similitudine fra le alternative, come ad esempio nel caso della scelta del percorso.

Per superare questo limite del modello Logit Multinomiale, esso è stato esteso introducendo il modello *Logit Gerarchizzato*, il quale nella sua forma più semplice, *Logit Gerarchizzato ad un livello* [37], prevede che le alternative siano raggruppate in funzione della loro similitudine. Si suppone che il meccanismo di scelta avvenga in due fasi: nella prima si effettua la scelta fra i gruppi individuati, e nella seconda si effettua la scelta fra le alternative incluse nel gruppo selezionato nella prima fase. Nella prima fase ad ogni gruppo viene associata una utilità sistematica corrispondente alla soddisfazione relativa all’insieme di alternative contenute nel gruppo stesso, mentre nella seconda fase a ciascuna alternativa è associata la propria utilità sistematica. Ad ogni fase di scelta i residui aleatori sono distribuiti come variabili di Gumbel indipendenti ed identicamente distribuite. Tale modo di operare introduce una covarianza fra le alternative incluse nello stesso gruppo, e pertanto la matrice di varianza-covarianza possiede una struttura diagonale a blocchi.

Il modello *Logit Gerarchizzato a più livelli* [16], [38] (anche noto come *Tree Logit*) generalizza quello ad un livello, supponendo che sia possibile raggruppare le alternative in più gruppi e sottogruppi con un qualsivoglia livello di nidificazione. Le scelte avvengono in più fasi, prima fra i gruppi a livello gerarchico più alti e poi progressivamente fino alle singole alternative. La matrice di varianza-covarianza associata a questo modello è una matrice diagonale a blocchi e sottoblocchi, la cui struttura è analoga alla struttura dei gruppi e sottogruppi⁶.

Il modello *Cross Nested Logit* [76], [90] generalizza ulteriormente il modello Logit Gerarchizzato a più livelli, assumendo che una data alternativa possa appartenere a gruppi diversi, ciascuno con un certo grado di appartenenza, la cui somma complessiva è unitaria⁷. In tal modo è possibile avere

una matrice di varianza-covarianza che non sia vincolata ad essere diagonale a blocchi (e sottoblocchi). Tale modello non è ancora consolidato, ma è attualmente in fase di studio.

I modelli Logit Multinomiale, Logit Gerarchizzato ad uno o più livelli e Cross Nested Logit possono essere visti come casi particolari di una classe di modelli, i cosiddetti modelli *GEV* (*Generalized Extreme Value*) [15], [76]. È dunque possibile dimostrare come tali modelli si possano derivare dai modelli GEV. Tale classe di modelli è caratterizzata dalla possibilità di calcolare le probabilità di scelta delle alternative in forma chiusa.

Accanto ai modelli della famiglia Logit, un altro modello vastamente utilizzato è il modello *Probit* [32]. Alla base di tale modello si assume che i residui aleatori siano distribuiti come una variabile Normale multivariata

$$pdf(\boldsymbol{\varepsilon}) = \frac{1}{\sqrt{\det(2\pi \cdot \Sigma_{\boldsymbol{\varepsilon}})}} \exp\left(-\frac{\boldsymbol{\varepsilon}^T \Sigma_{\boldsymbol{\varepsilon}} \boldsymbol{\varepsilon}}{2}\right)$$

dove $\det(\bullet)$ è una funzione che restituisce il determinante di una matrice quadrata. La matrice di varianza-covarianza dei residui aleatori $\Sigma_{\boldsymbol{\varepsilon}}$ è una qualsiasi matrice simmetrica definita positiva, cioè è possibile definire qualsiasi struttura di correlazione fra le alternative. La probabilità di scegliere una data alternativa j può essere calcolata integrando la funzione di densità nella regione dove l’utilità dell’alternativa j è massima. Tale integrale non può essere risolto in forma chiusa e pertanto non è possibile ottenere una espressione della probabilità di scelta in forma chiusa, fatto che costituisce il principale svantaggio nell’utilizzo del modello Probit. Le probabilità di scelta possono essere ottenute effettuando delle estrazioni casuali ripetute dei residui aleatori (metodo Monte Carlo): ad ogni estrazione si individua l’alternativa di massima utilità, e la probabilità di scegliere una data alternativa si pone pari alla frequenza con la quale l’alternativa stessa risulta essere quella di massima utilità.

Struttura e proprietà generali dei modelli di domanda di trasporto

L’analisi della domanda di trasporto serve a determinare la quantità media dei viaggiatori con determinate caratteristiche che in un determinato periodo di riferimento si spostano da un’origine r ad una destinazione s , servendosi di un certo modo di trasporto e di uno fra i percorsi disponibili. A tal fine sono utilizzati modelli di domanda che cercano di riprodurre nel modo migliore possibile le scelte degli utenti di un sistema di trasporto. Questi possono essere formalmente espressi attraverso

una relazione che lega la domanda d_{rs} che si sposta dall’origine r alla destinazione s con certe caratteristiche q_1, q_2, \dots , all’insieme delle variabili socioeconomiche X_{SE} ed a quello delle variabili relative al livello di servizio X_T

$$d_{rs}[q_1, q_2, \dots] = d_{rs}(X_{SE}, X_T)$$

Solitamente tali modelli simulano le scelte considerando i decisori suddivisi in gruppi omogenei, detti *categorie*.

Un sistema di modelli di domanda per motivi di trattabilità analitica è usualmente frazionato in più fasi successive, associate alle varie dimensioni di scelta. Per gli spostamenti in ambito urbano tale suddivisione è usualmente effettuata in quattro fasi, ottenendo la seguente sequenza di sottomodelli nota come *modello di domanda a quattro stadi* [6]

$$d_{rs}^i [q_S, q_H, q_M, k] = n^i[r] \cdot \sum_x x p^i[x | q_S, q_H, r](X_{SE}, X_T) \cdot p^i[s | q_S, q_H, r](X_{SE}, X_T) \cdot p^i[q_M | q_S, q_H, r, s](X_{SE}, X_T) \cdot p^i[k | q_S, q_H, r, s, q_M](X_{SE}, X_T)$$

dove

- $d_{rs}^i [q_S, q_H, q_M, k]$ è la domanda della categoria i che parte dall’origine r , è diretta alla destinazione s , per il motivo q_S , nella fascia oraria q_H , utilizzando il modo q_M ed il percorso k ;
- $n^i[r]$ è il numero di individui della categoria i che si trovano nella zona di origine r ;
- $p^i[x | q_S, q_H, r](X_{SE}, X_T)$ è il *modello di emissione*, che fornisce la percentuale di individui della categoria i che, trovandosi in r , effettuano x spostamenti per il motivo q_S nella fascia oraria q_H ;
- $p^i[s | q_S, q_H, r](X_{SE}, X_T)$ è il *modello di distribuzione*, che fornisce la percentuale di individui della categoria i che, spostandosi da r per il motivo q_S nella fascia oraria q_H , si recano nella zona di destinazione s ;
- $p^i[q_M | q_S, q_H, r, s](X_{SE}, X_T)$ è il *modello di scelta modale*, che fornisce la percentuale di individui della categoria i che, spostandosi da r a s per il motivo q_S nella fascia oraria q_H , utilizzano il modo di trasporto q_M ;

- $p^i[k | q_S, q_H, r, s, q_M](X_{SE}, X_T)$ è il *modello di scelta del percorso*, che fornisce la percentuale di individui della categoria i che, spostandosi da r a s per il motivo q_S nella fascia oraria q_H con il modo q_M , utilizzano il percorso k .

Ciascuna fase è ovviamente condizionata dalle fasi precedenti; ad esempio è evidente che la scelta del percorso dipende dal modo di trasporto. D’altra parte ciascuna fase deve tenere conto delle fasi successive; infatti la scelta di un modo di trasporto piuttosto che un altro dipende dai percorsi che è possibile effettuare con quel dato modo. In una data fase di scelta è possibile tenere conto delle fasi successive utilizzando nella specificazione dell’utilità sistematica la soddisfazione associata alla scelta fra le alternative della fase immediatamente successiva. La struttura del modello di domanda a quattro stadi è riportata nella Fig. 51.

Benché la sequenza di modelli riportata sia quella di gran lunga più utilizzata per la simulazione della domanda di trasporto, è possibile specificare sequenze diverse sia per la tipologia dei modelli considerati sia per l’ordine nel quale essi intervengono. Ad esempio è possibile considerare esplicitamente la scelta della fascia oraria e/o della tipologia e della zona di sosta.

Ad ogni stadio è possibile utilizzare modelli di domanda di tipo differente. Tali modelli possono essere classificati in funzione di alcuni aspetti.

Essi si dicono *comportamentali* o *interpretativi* se derivano da una esplicita ipotesi sul comportamento degli utenti, mentre si dicono *descrittivi* o *non-interpretativi* se descrivono una relazione fra la domanda di trasporto e le variabili socioeconomiche X_{SE} e del livello di servizio X_T , senza assumere esplicite ipotesi sul comportamento degli utenti. Possono esistere modelli misti, nei quali alcuni sottomodelli sono comportamentali, mentre altri sono descrittivi. L’utilizzo di approcci descrittivi è solitamente limitato ai sottomodelli di emissione e distribuzione, mentre la scelta modale e la scelta del percorso sono comunemente simulati per mezzo di modelli comportamentali. Gli approcci comportamentali sono solitamente basati sulla teoria dell’utilità aleatoria.

I modelli possono essere inoltre classificati in *aggregati* o *disaggregati*: nel primo caso le variabili X_{SE} e X_T sono riferite ad un gruppo di decisori, mentre nel secondo sono riferite al singolo decisore. La distinzione fra modelli aggregati e disaggregati non è netta, in quanto sono possibili di versi livelli di aggregazione. I modelli di domanda utilizzati per la simulazione di un sistema di trasporto sono caratterizzati da un livello minimo di aggregazione che è posto almeno a livello di zona di traffico.

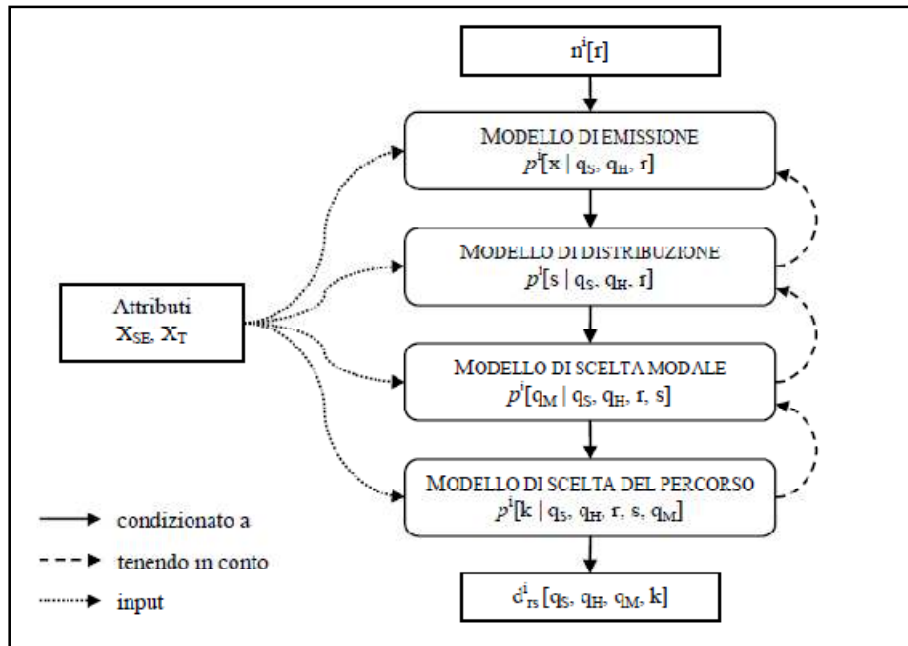


Fig. 51 - Modello di domanda a quattro stadi [6]

Il risultato dei primi tre stadi (emissione, distribuzione e scelta modale) è una *matrice origine-destinazione* per ogni modo considerato. Tale matrice ha dimensioni $|R| \times |S|$, cioè è costituita da tante righe quanti sono i centroidi origine e tante colonne quanti sono i centroidi destinazione. Il generico elemento d_{rs} di tale matrice rappresenta la domanda di trasporto che si sposta fra tutti i percorsi che connettono l’origine r alla destinazione s . Per motivi di convenienza analitica tale matrice viene spesso rappresentata come un vettore, che sarà indicato con \mathbf{d} ; gli elementi di tale vettore sono i termini d_{rs} della matrice origine-destinazione ordinati in modo crescente per origine e poi per destinazione. Un esempio di matrice origine-destinazione e del corrispondente vettore di domanda sono riportati nella Fig. 52.

Nel caso cui in le variazioni dei costi di percorso dovute alla congestione influenzano solo la scelta del percorso ma non gli stadi di scelta superiori allora la domanda si dice *rigida*. In tal caso il vettore dei flussi di domanda \mathbf{d} può dipendere solo da attributi dei percorsi che a loro volta non dipendono dai flussi (ad esempio il costo a flusso nullo). Se invece anche altre dimensioni di scelta (modo, distribuzione, emissione) sono influenzate da tali variazioni allora la domanda si dice *elastica*. In tal caso il vettore dei flussi di domanda \mathbf{d} dipende dai costi di percorso congestionati (cioè calcolati in funzione dei flussi) e per evidenziare tale dipendenza potrà essere indicato col simbolo $\mathbf{d}(\mathbf{g})$.

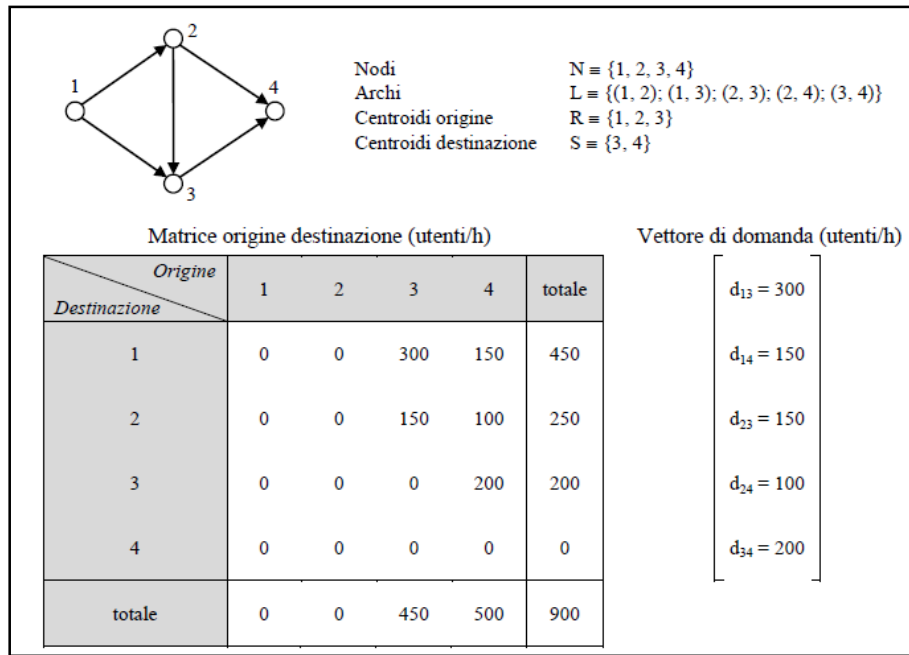


Fig. 52 - Matrice origine-destinazione e corrispondente vettore di domanda

Il modello di scelta del percorso, data una generica coppia origine-destinazione rs , attribuisce ad ogni percorso $k \in K_{rs}$ una probabilità di scelta $p_{rs,k}$ in funzione delle utilità sistematiche di tutti i percorsi della coppia origine-destinazione v_{rs} . Detto p_{rs} il vettore costituito dalle probabilità $p_{rs,k}$, i flussi sui percorsi che collegano r ad s sono dati dalla seguente espressione

$$h_{rs} = d_{rs} p_{rs}(v_{rs}) \quad (3.19)$$

Assumendo che le utilità sistematiche di percorso siano uguali all’opposto dei costi di percorso

$$v_{rs} = -g_{rs}$$

dalla (3.19) si ottiene la seguente espressione

$$h_{rs} = d_{rs} p_{rs}(-g_{rs})$$

che si può generalizzare per tutte le coppie origine-destinazione per mezzo della seguente espressione

$$h = P(-g) d \quad (3.20)$$

dove \mathbf{P} è la *matrice delle probabilità di scelta del percorso*. Tale matrice ha dimensione $|K| \times |RS|$, cioè ha tante righe quanti sono i percorsi e tante colonne quante sono le coppie origine-destinazione. Ogni colonna è associata ad una data coppia origine-destinazione rs e contiene il vettore \mathbf{p}_{rs} . Ogni riga è associata ad un percorso e , siccome ogni percorso appartiene ad una ed una sola coppia origine-destinazione, contiene un solo valore di probabilità non nullo. La struttura di tale matrice è illustrata nella Fig. 53.

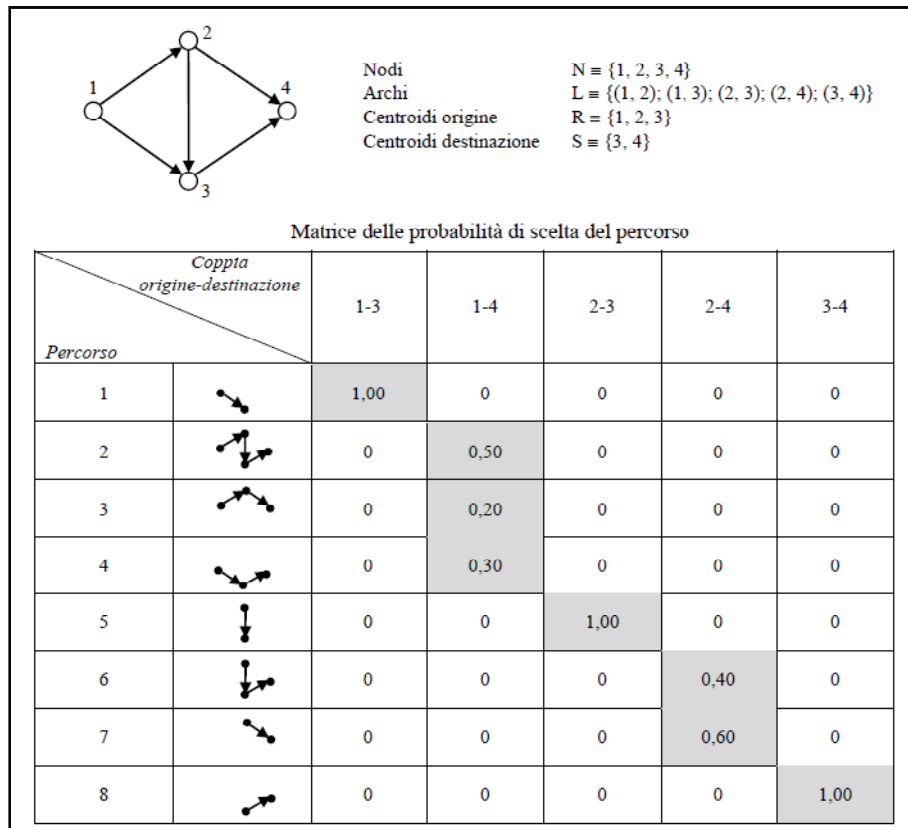


Fig. 53 - Matrice delle probabilità di scelta del percorso

Le probabilità di scelta dei percorsi vengono usualmente calcolate col modello Probit o col modello Logit Multinomiale.

La specificazione più diffusamente utilizzata del modello Probit applicato alla scelta del percorso [42] assume che

- la varianza del residuo aleatorio associato ad un generico percorso k sia proporzionale al costo (o a qualche altro attributo) del percorso quando tutti gli archi che lo compongono hanno flusso nullo; tale grandezza, indicata con $g_{0,k}$ sarà detta costo a flusso nullo del percorso k ;

- la covarianza di due residui aleatori associati ai generici percorsi k e k' sia proporzionale al costo del tratto in comune fra i due percorsi quando tutti gli archi in comune hanno flusso nullo; tale grandezza, indicata con $g_{0,k-k'}$ sarà detta costo a flusso nullo del tratto in comune fra i percorsi k e k' .

Cioè in simboli

$$var[\varepsilon_k] = \xi g_{0,k} \quad (3.21.a)$$

$$var[\varepsilon_k, \varepsilon_{k'}] = \xi g_{0,k-k'} \quad (3.21.b)$$

dove ξ è la costante di proporzionalità che deve essere calibrata.

Utilizzando il modello Logit Multinomiale la probabilità di scelta di un generico percorso k appartenente alla coppia origine-destinazione rs è data da

$$p_{rs,k} = \frac{\exp\left(\frac{-g_k}{\theta}\right)}{\sum_{k' \in k_{rs}} \exp\left(\frac{g_{k'}}{\theta}\right)} \quad (3.22)$$

L’utilizzo del modello Logit Multinomiale comporta il fatto che percorsi molto simili (cioè costituiti per una parte rilevante dagli stessi archi) vengono visti fra loro come indipendenti e pertanto vengono sovrastimate le loro probabilità di scelta.

Per risolvere questo problema, senza tuttavia rinunciare ad ottenere le probabilità di scelta in forma chiusa, è stato proposto il modello *C-Logit* [43], che consiste in una particolare specificazione del modello Logit Multinomiale

$$p_{rs,k} = \frac{\exp\left(\frac{(-g_k - c_{F,k})}{\theta}\right)}{\sum_{k' \in k_{rs}} \exp\left(\frac{(g_{k'} - c_{F,k})}{\theta}\right)}$$

dove il termine $c_{F,k}$, detto *fattore di sovrapposizione* del percorso k , riduce l’utilità sistematica del percorso k in funzione del suo grado di sovrapposizione con gli altri percorsi. Il fattore di sovrapposizione può essere specificato in diversi modi, ad esempio con riferimento ad un percorso k appartenente alla coppia origine-destinazione rs

$$c_{F,k} = \beta_0 \ln \left(1 + \sum_{K' \in K_{rs} - \{K\}} \frac{g_{0,K-K'}}{(g_{0,K} g_{0,K'})^{1/2}} \right)$$

dove β_0 è un parametro da calibrare. Un’altra possibile specificazione del fattore di sovrapposizione è:

$$c_{F,k} = \beta_0 \sum_{l \in k} \frac{c_{0,l}}{g_{0,k}} \ln v_{l,rs}$$

dove $v_{l,rs}$ è il numero di percorsi appartenenti alla coppia origine-destinazione rs che utilizzano l’arco l .

3.2.4 Modelli di assegnazione

Un modello di assegnazione simula come la domanda e l’offerta interagiscono fra di loro nei sistemi di trasporto. Per mezzo di un modello di assegnazione è possibile conoscere i flussi e le prestazioni su ogni arco della rete.

In funzione di varie ipotesi sulla domanda, sull’offerta e sulla loro interazione si possono realizzare diversi modelli di assegnazione. Queste ipotesi determinano alcuni fattori di classificazione dei modelli di assegnazione.

I fattori relativi all’offerta sono:

- il tipo di servizio, che può essere simulato in modo continuo nel tempo oppure in modo discontinuo, rappresentando l’offerta per mezzo di *reti diacroniche* ed effettuando una cosiddetta assegnazione *ad orario*;
- l’effetto della congestione, che può essere tenuto in conto (reti congestionate) o meno (reti non congestionate).

I fattori relativi alla domanda sono:

- la segmentazione della domanda, in funzione della quale si può effettuare una assegnazione *mono-classe*, nella quale gli utenti sono distinti esclusivamente per la coppia origine-destinazione, oppure *multi-classe*, nella quale almeno per una coppia origine-destinazione si considerano più categorie di utenti, ciascuna delle quali presenta differenti caratteristiche comportamentali e percepisce costi diversi;

- l’elasticità della domanda, in funzione della quale si può effettuare una assegnazione a *domanda rigida* oppure a *domanda elastica*;
- il comportamento di scelta del percorso, che può essere *completamente preventivo*, se si assume che il decisore scelga il proprio percorso basandosi solo sulle informazioni disponibili all’origine dello spostamento, oppure *preventivo-adattivo*, se si assume che il decisore assuma all’origine dello spostamento una strategia di viaggio in funzione delle informazioni a sua disposizione, e compia successivamente delle scelte durante il viaggio in funzione delle nuove informazioni disponibili;
- il modello di scelta del percorso, che può essere deterministico oppure probabilistico ;
- l’obiettivo perseguito dall’utente, che può consistere nella massimizzazione della propria utilità oppure nella massimizzazione dell’utilità collettiva degli utenti del sistema.

I fattori relativi all’interazione domanda-offerta sono:

- la simulazione della evoluzione dinamica intraperiodale del sistema, cioè tenendo conto delle variazioni che intervengono all’interno del periodo di simulazione, oppure la simulazione in condizioni statiche;
- la simulazione dell’evoluzione dinamica interperiodale del sistema oppure la simulazione del suo stato di equilibrio.

Dalla combinazione dei precedenti fattori si possono ottenere molteplici modelli di domanda, ciascuno adatto a simulare alcune tipologie di contesti. Non tutte le combinazioni dei fattori sopra descritti sono possibili: ad esempio in assenza di congestione non avrebbe senso considerare la domanda elastica.

Nel seguito verranno descritti alcuni possibili modelli di assegnazione, che derivano dalla combinazione di alcuni dei fattori sopra descritti: la congestione, il modello di scelta del percorso e l’obiettivo perseguito dall’utente. Si assumerà che il tipo di servizio sia continuo e che il comportamento di scelta del percorso sia completamente preventivo, come in generale avviene nella simulazione di un sistema di trasporto stradale. Si assumerà inoltre che la domanda sia non segmentata (assegnazione mono-classe) e rigida e si trascureranno le evoluzioni dinamiche intraperiodali ed interperiodali del sistema. Infine si assumeranno nulli i costi non additivi di percorso.

Se si assume che l’obiettivo dell’utente sia la massimizzazione della propria utilità, si effettua la cosiddetta *assegnazione di ottimo di utente*. In funzione della presenza o assenza di congestione e

del modello di scelta del percorso è possibile individuare quattro tipi di assegnazione di ottimo di utente:

- *assegnazione di carico deterministico della rete*, indicata con l’acronimo DNL (*deterministic network loading*), nella quale si assume la rete non congestionata ed il modello di scelta del percorso deterministico. L’assegnazione di carico deterministico della rete è regolata dal *primo principio di Wardrop* [7] che afferma che per ogni coppia origine-destinazione, il costo di ogni percorso utilizzato è uguale, ed è minore o uguale del costo di ogni percorso non utilizzato;
- *assegnazione di carico stocastico della rete*, indicata con l’acronimo SNL (*stochastic network loading*), nella quale si assume la rete non congestionata ed il modello di scelta del percorso stocastico. L’esigenza di utilizzare un modello stocastico (rispetto ad un più semplice modello deterministico) ha trovato le sue motivazioni in alcune criticità che caratterizzano l’assegnazione di carico deterministico della rete [44]:
 - l’instabilità, cioè la tendenza a produrre flussi significativamente diversi in risposta a lievi variazioni dei costi;
 - l’inadeguatezza nel riprodurre il comportamento degli utenti, dal momento che nel caso di due percorsi con costo molto simile si osserva che entrambi hanno una probabilità non nulla di essere scelti;
 - la presenza contemporanea di alcuni archi della rete molto carichi e di altri completamente scarichi.

L’assegnazione di carico stocastico della rete è regolata dal principio secondo il quale per ogni coppia origine-destinazione il costo percepito dei percorsi utilizzati è minore o uguale del costo di ogni altro percorso. Essendo il modello di scelta del percorso probabilistico, i flussi sono anch’essi variabili aleatorie;

- *assegnazione di equilibrio deterministico degli utenti*, indicata con l’acronimo DUE (*deterministic user equilibrium*), nella quale si assume la rete congestionata ed il modello di scelta del percorso deterministico;
- *assegnazione di equilibrio stocastico degli utenti*, indicata con l’acronimo SUE (*stochastic user equilibrium*), nella quale si assume la rete congestionata ed il modello di scelta del percorso stocastico.

Se si assume che l’obiettivo degli utenti sia la massimizzazione della utilità collettiva e non della propria utilità, si ottiene l’*assegnazione di ottimo di sistema*. Tale tipo di assegnazione ha senso solo

se la rete è congestionata, poiché nel caso di rete non congestionata a causa dell’assenza di interazioni fra gli utenti ciascun comportamento che tende a massimizzare la propria utilità contemporaneamente tende a massimizzare l’utilità collettiva degli utenti. In funzione del modello di scelta del percorso è possibile individuare due tipi di assegnazione di ottimo di sistema:

- *assegnazione deterministica di ottimo di sistema*, indicata con l’acronimo DSO (*deterministic system optimum*), nella quale si assume che il modello di scelta del percorso sia deterministico;
- *assegnazione deterministica di ottimo di sistema*, indicata con l’acronimo SSO (*stochastic system optimum*), nella quale si assume che il modello di scelta del percorso sia stocastico.

La classificazione dei modelli sopra descritta è schematicamente riportata nella Tab. 12.

			Modello di scelta del percorso	
			Deterministico	Stocastico
Rete	Non congestionata		Assegnazione di carico deterministico della rete (DNL)	Assegnazione di carico stocastico della rete (SNL)
	Congestionata	Ottimo di utente	Assegnazione di equilibrio deterministico degli utenti (DUE)	Assegnazione di equilibrio stocastico degli utenti (SUE)
		Ottimo di sistema	Assegnazione deterministica di ottimo di sistema (DSO)	Assegnazione stocastica di ottimo di sistema (SSO)

Tab. 12 - Classificazione dei modelli di assegnazione

3.3 I modelli microscopici

I modelli di simulazione microscopica sono in grado di rappresentare in maniera puntuale, precisa e specifica il traffico e la sua evoluzione, prendendo in considerazione gli aspetti geometrici di dettaglio dell’infrastruttura e il comportamento reale del conducente, legato all’accoppiamento delle caratteristiche del veicolo e del guidatore.

Essi sono in grado di analizzare ed elaborare istante per istante il movimento di ogni singolo veicolo presente sulla rete, sulla base di leggi legate al moto del veicolo ed al comportamento del conducente. Consentono inoltre di determinare per ogni mezzo alcune grandezze quali posizione, velocità ed accelerazione.

Ogni aggiornamento viene ottenuto dal guidatore considerando la propria velocità ed accelerazione e tenendo presente la situazione del traffico che lo circonda. Infatti, in questi modelli, si considera che la posizione del veicolo al tempo $t + \Delta t$ dipende dalla posizione e dalla velocità tenuta dal guidatore al tempo t . Quest’ultima grandezza, invece, viene definita da ulteriori fattori, che dipendono dal veicolo considerato e da quello immediatamente precedente; fattori significativi sono perciò la distanza, la velocità relativa, il tempo di reazione dell’autista in relazione al gap dal veicolo che lo precede e alla velocità di quest’ultimo ed, infine, la presenza di altri veicoli nelle corsie adiacenti.

Tutti questi elementi fanno sì che il modello si avvicini il più possibile alla realtà.

I microsimulatori basano il loro funzionamento su modelli in grado di rappresentare singolarmente il movimento di ciascun veicolo sulla base del comportamento del conducente, che segue le regole dettate dai seguenti modelli:

- Car Following (modello dell’inseguitore);
- Lane Change (modello del cambio corsia);
- Gap Acceptance (modello dell’intervallo minimo di accesso).

3.3.1 Car following model

I modelli car following si basano sull’idea che ogni veicolo si muove lungo una strada seguendo il veicolo che lo precede e perciò la sua dinamica è funzione solo di quel veicolo. Questa ipotesi risulta di semplice modellazione matematica, anche se è relativamente poco complessa se confrontata con la totalità dei comportamenti che si tengono durante la guida.

Questi modelli microscopici, in linea generale, assumono la forma riportata nella 3.23

$$\begin{cases} v(t + \Delta t) = f(g(t), v(t), v^{\sim}(t), \xi(t), p) \\ x(t + \Delta t) = x(t) + v(t) \cdot \Delta t \end{cases} \quad (3.23)$$

nella quale:

- $g(t) = x^{\sim}(t) - x(t) - s$ è la distanza effettiva tra il veicolo considerato e il suo predecessore, essendo s la lunghezza del veicolo;
- $v(t)$ e $x(t)$ rappresentano la velocità e la posizione del veicolo al tempo t ;
- $v^{\sim}(t)$ ed $x^{\sim}(t)$ rappresentano la velocità e la posizione del veicolo che precede quello considerato;
- Δt è il tempo di campionamento;
- $\xi(t)$ è un componente stocastico di rumore inserito nel modello. Ogni guidatore, infatti è un’entità autonoma, dotata di un suo modo di agire e di tempi di reazioni diverse;
- p è il vettore delle componenti parametriche del modello.

Il modello si può schematizzare come in Fig. 54.

I modelli car following vengono introdotti per la prima volta attorno alla metà del secolo scorso e sono attribuiti a Reuschel e Pipes [45], [46]. In essi si assume che ogni guidatore tende a muoversi con la stessa velocità del veicolo che lo precede; se si considera, quindi, un tratto di strada fissato, ogni macchina occuperà una posizione $x_i(t)$ e una lunghezza L_i .

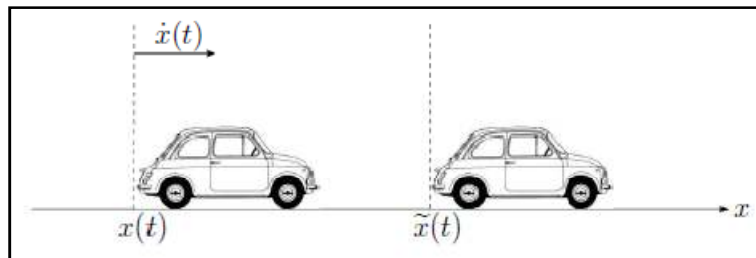


Fig. 54 - Schema del modello car-following

Se si indicano con x_n ed x_{n+1} rispettivamente la posizione del veicolo che precede e quella del veicolo considerato, da queste grandezze sarà possibile determinare la velocità del veicolo $n+1$ -esimo $x_{n+1}^{\cdot}(t)$ e la sua accelerazione $x_{n+1}^{\cdot\cdot}(t)$. Quest’ultima risulta essere funzione della velocità del veicolo stesso, ma anche della vettura che lo precede.

$$x_{n+1}^{\cdot\cdot}(t) = f(x_n^{\cdot}(t), x_{n+1}^{\cdot}(t)) \quad (3.24)$$

dove la funzione f sarà scelta considerando i parametri essenziali per rispecchiare al meglio il deflusso del traffico.

Secondo Pipes e Reuschel, l’equazione che lega il moto della coppia dei veicoli è la seguente:

$$\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t) = L + S \cdot \dot{x}_{n+1}(t) \quad (3.25)$$

Questa formula suppone che ogni automobilista mantenga una distanza di sicurezza che è funzione della propria velocità e di una distanza L che rappresenta la lunghezza dell’auto che lo precede (Fig. 55).

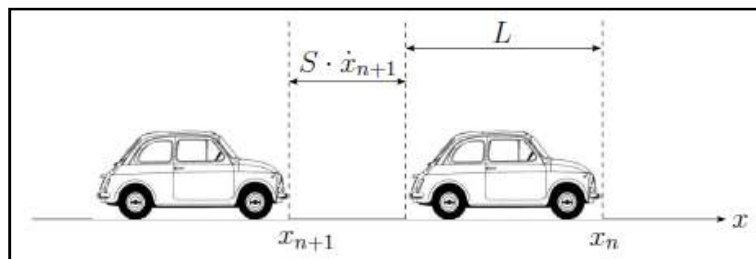


Fig. 55 - Il modello di Pipes

Passando alle derivate, dall’equazione 3.25 otteniamo:

$$\ddot{x}_{n+1}(t) = \frac{1}{S} (\ddot{x}_n(t) - \ddot{x}_{n+1}(t)) \quad (3.26)$$

dove $\frac{1}{S} = \lambda$ viene detto fattore di sensibilità.

L’equazione (3.26) è la formula generale del modello lineare follow the leader (uno degli approcci del metodo car following), proposta per la prima volta dall’americano Chandler [47].

Per una descrizione più realistica è stato introdotto un ritardo τ , in quanto gli automobilisti non rispondono istantaneamente agli stimoli esterni.

Questo modifica la relazione (3.26) come segue:

$$\dot{x}_{n+1}(t + \tau) = \lambda (x_n(t) - x_{n+1}(t)) \quad (3.27)$$

nota come l’equazione di base dei modelli car following.

Per ottenere risultati maggiormente accurati, si può esprimere un fattore λ proprio di ciascun guidatore:

$$\lambda_{n+1} = \lambda_0 \frac{x'_{n+1}(t+\tau)^m}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} \quad (3.28)$$

dove λ_0 è una costante ed l e m sono esponenti interi.

Il modello proposto da Reuschel e Pipes fu validato nel 1958 da Chandler e da altri ricercatori grazie ai dati forniti dal General Motors Technical Center.

Il modello di Gipps

Il modello di Gipps sviluppato in [48], appartiene alla categoria dei car following e consta di due componenti separate, un modello di accelerazione ed uno di decelerazione.

La prima componente, espressa dalla prima equazione della relazione 3.29, rappresenta l’obiettivo di un dato veicolo di raggiungere una velocità desiderata v^* in accordo con le caratteristiche del veicolo stesso e, pertanto, modella la dinamica del veicolo in condizioni di flusso libero; la seconda equazione riproduce la limitazione sulla velocità imposta dal veicolo immediatamente precedente, modellando quindi l’interazione con il veicolo che lo precede. Si ottiene il seguente sistema:

$$\begin{cases} v_a(n, t + T) = v_a(n, t) + 2.5a(n)T \left(1 - \frac{v(n, t)}{v^*(n)}\right) \sqrt{0.025 + \frac{v(n, t)}{v^*(n)}} \\ v_b(n, t + T) = d(n, t) + \left\{ d(n)^2 T^2 + d(n) \left\{ 2[x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)] - v(n, t)T \frac{v(n-1, t)^2}{d(n-1)} \right\} \right\}^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (3.29)$$

nel quale:

- n indica l’ n -esimo veicolo;
- $v^*(n)$ è la velocità desiderata dell’ n -esimo veicolo;
- $a(n)$ e $d(n)$ sono la massima accelerazione e decelerazione possibile per il veicolo;
- $d(n-1)$ è la massima decelerazione per il veicolo che precede l’ n -esimo;
- $x(n-1, t)$ e $x(n, t)$ sono rispettivamente la posizione al tempo t del veicolo $(n-1)$ -esimo ed n -esimo;
- $v(n-1, t)$ e $v(n, t)$ sono le velocità al tempo t dei due veicoli;
- T è il tempo di campionamento dal quale derivano le prestazioni del modello.

Da queste relazioni, si ricava un modello dinamico descritto nella 3.30:

$$\begin{cases} v(n, t + T) = \min\{v_a(n, t + T), v_b(n, t + T)\} \\ x(n, t + T) = x(n, t) + v(n, t + T)T \end{cases} \quad (3.30)$$

Questo modello permette di simulare la dinamica di ogni singolo veicolo, che risulta essere condizionata da quella della vettura che lo precede. L’inconveniente maggiore che, tuttavia, si può riscontrare è insito nella difficoltà nel reperire le informazioni relative alla massima accelerazione e decelerazione dei veicoli e alle caratteristiche dei guidatori. Per ovviare a queste difficoltà, il modello di Gipps è stato modificato e preso come riferimento ad esempio per il simulatore di traffico AIMSUN2 [49].

Le modifiche riguardano:

- il calcolo di $v^*(n)$;
- l’influenza dei veicoli della corsia adiacente sulle decisioni del veicolo, in caso di presenza di più corsie per senso di marcia;
- l’effetto delle caratteristiche altimetriche proprie della rete stradale.

Il primo miglioramento è legato alla velocità desiderata. Per calcolare $v^*(n)$ si usano tre parametri:

1. la velocità massima desiderata, $v_{max}(n)$;
2. il limite massimo di velocità per il tratto di strada s preso in esame, $S_{lim}(s)$;
3. il rispetto dei limiti di velocità da parte del guidatore, $\Theta(n)$. Tale parametro può essere scelto attraverso una distribuzione di probabilità, che partendo da osservazioni reali riproduce il grado di aggressività dei guidatori. In particolare:
 - se $\Theta(n) < 1$, il guidatore viaggia ad una velocità inferiore rispetto ai limiti di velocità;
 - se $\Theta(n) = 1$, il guidatore viaggia ad una velocità pari a $S_{lim}(s)$;
 - se $\Theta(n) > 1$, il guidatore non rispetta il limite di velocità.

La relazione per calcolare la velocità desiderata diventa:

$$v^*(n) = \min\{S_{lim}(n, s), v_{max}(n, s)\} \quad (3.31)$$

essendo:

$$S_{lim}(n, s) = S_{lim}(s)\Theta(n)$$

Il secondo miglioramento si basa sull’ipotesi che i veicoli della corsia adiacente possono influenzare la velocità del veicolo n . Se la corsia adiacente è una corsia di decelerazione, si indica con v_{MDR} la differenza massima di velocità tra il veicolo n e gli altri veicoli che si trovano nella corsia di accelerazione e con v_{ms} la velocità media dei veicoli che si trovano nella stessa corsia di n e ad una certa distanza da esso, ottenendo:

$$v_{MDR}(n, s) = v_{ms} \cdot v_{MDR} \quad (3.32)$$

Se la corsia adiacente è di altro tipo, si indica con v_{MD} la differenza massima di velocità tra il veicolo n e i veicoli nell’altra corsia e si ottiene:

$$v_{max}(n, s) = v_{ms} \cdot v_{MD} \quad (3.33)$$

infine, per assicurare che la differenza di velocità tra due corsie adiacenti sia sempre minore di v_{MD} o di v_{MDR} , si ottiene:

$$v(n)^* = \min\{(v_m + v_{MD}) \cdot \Theta(n), v_{max}(n, s)\} \quad (3.34)$$

La terza modifica riguarda l’influenza delle caratteristiche altimetriche (salita e discesa) sui parametri caratteristici dei veicoli, in particolare su $a(n)$ e $d(n)$, rispettivamente la massima accelerazione e decelerazione del veicolo n .

La seguente relazione empirica è utile per tenere in considerazione questo effetto:

$$a(n) = \max\left\{a(n) - p_p \cdot \frac{9.81}{100}, a(n) \cdot 0.1\right\} \quad (3.35)$$

dove p_p rappresenta la pendenza percentuale della strada.

Il modello di Gipps è uno dei più usati e accurati tra i modelli microscopici di car following, grazie anche ad alcune rettifiche che ne semplificano l’impiego.

Per una applicazione del modello, è necessario separare i veicoli in classi, raggruppandoli in base alle loro prestazioni ($a(n)$, $d(n)$). Questa approssimazione riduce notevolmente la complessità del modello, anche se esso, come tutti i modelli microscopici, richiede il supporto di un ampio database.

Per tale ragione, spesso, lo si utilizza facendo ricorso a dati provenienti da veicoli dotati di G.P.S. di cui, pertanto, si conosce la posizione e la velocità in ogni istante [50].

3.3.2 Lane Change model

Una limitazione dei modelli car following consiste nel fatto che, in generale, vengano usati per modellare strade ad un’unica corsia. Per quanto riguarda, perciò, la modellizzazione di tratte stradali a più corsie per senso di marcia, è necessario considerare la possibilità di effettuare dei cambi di corsia. Per questo motivo i modelli car following vengono migliorati con l’aggiunta di una nuova componente modellistica chiamata *lane changing models*.

Il primo modello lane change è stato introdotto da Gibbs nel 1986 in [51]; esso venne ideato per modellizzare l’ambito urbano dove i segnali, le ostruzioni e la presenza di veicoli pesanti influiscono sulla corsia di percorrenza scelta dai guidatori. I tre fattori principali che furono valutati nel processo di scelta sono: la necessità, l’opportunità e la sicurezza di un cambiamento di corsia.

La necessità o l’opportunità di effettuare un cambio di corsia è determinata da un fattore di rischio, funzione della posizione relativa tra il veicolo in esame e l’oggetto o il veicolo che dà luogo alla necessità di un cambiamento di corsia. Questo valore del rischio viene quindi confrontato con uno di riferimento che, a sua volta, dipende dalla tipologia di manovra necessaria al cambiamento di corsia.

Molti software di microsimulazione fanno riferimento al modello di Gipps nei loro modelli di lane change.

Yang e Koutsopoulos, in [52], hanno sviluppato un modello di lane change, applicabile in ambito autostradale, che è implementato nel software MITSIM.

In questo caso, i cambiamenti di corsia sono classificati come:

- MLC (scelta obbligata), quando il guidatore è obbligato a cambiare corsia come nel caso di rampe di uscita;
- DLC (scelta a discrezione), quando il guidatore capisce che le condizioni di guida nella corsia adiacente sono migliori.

A differenza di Gipps (1986), secondo Yang e Koutsopoulos un guidatore prende in considerazione l’ipotesi di effettuare un cambiamento di corsia quando la velocità del veicolo che lo precede è inferiore alla sua velocità desiderata e qualora nella corsia adiacente il guidatore ha la possibilità di raggiungere tale velocità. Il verificarsi di queste condizioni è funzione di due parametri, un fattore di intolleranza e un fattore di velocità.

Recentemente, Ahmed et Al. in [53], hanno proposto un modello di Lane change che riproduce il comportamento dei guidatori durante la manovra di cambio corsia strutturato secondo una sequenza di 4 steps:

1. la decisione di considerare un cambiamento di corsia;
2. la scelta della corsia;
3. l’accettazione del gap;
4. l’esecuzione della manovra.

Ahmed ha calibrato i parametri del modello nel caso di entrata in autostrada mediante una rampa. In questo caso, i conducenti hanno già deciso di entrare nella corsia adiacente e, pertanto, i primi due steps del modello sono ininfluenti.

Il gap è considerato accettabile solo quando sia il lead gap sia lag gap sono accettabili.

La Fig. 56 mostra la definizione di lead e lag gap.

Il lead e il lag gap si assume che siano distribuiti secondo una distribuzione log-normale e quindi del tipo: $X = e^{(Y)}$ dove Y è distribuita normalmente con media μ e deviazione standard d .

La stima del lead gap critico per il guidatore n all’istante t è:

$$G_n^{cr,lead}(t) = e^{[2.72 - 0.055v_n + \epsilon_n^{lead}(t)]} \quad (3.36)$$

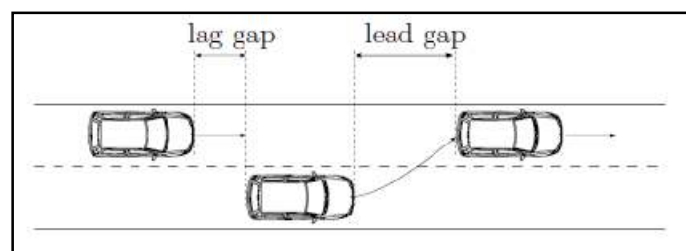


Fig. 56 - Schema della manovra di lane change

dove:

- $G_n^{cr,lead}(t)$ è il lead critical gap;
- v_n è un termine random, costante per ogni guidatore ed avente una distribuzione normale;

- $\epsilon_n^{lead}(t)$ è un termine random che varia con i gap differenti sia per un dato guidatore sia per guidatori diversi; è distribuito secondo $N(0, 1.61^2)$.

La stima del lag gap critico per il guidatore n all’istante t è:

$$G_n^{cr,lag}(t) = \exp[-9.32 + 0.1170\min(\Delta V_n^{lag}(t), 10) + 0.1174\max(\Delta V_n^{lag}(t) - 10) + 1.57\delta_n^{lstGap}t + 1.88\ln L_n^{rem}t + 1.90v_n + \epsilon_n^{lag}t] \quad (3.37)$$

dove:

- $G_n^{cr,lag}(t)$ è il lag critical gap;
- $\Delta V_n^{lag}(t)$ è la differenza di velocità tra il veicolo che segue (lag) e quella del veicolo considerato;
- $\delta_n^{lstGap}(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } delay_n(t) = 0 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$
- $delay_n(t)$ è il tempo trascorso sotto l’applicazione delle condizioni MLC;
- $L_n^{rem}(t)$ è la distanza rimanente nella corsia nella quale deve essere completata la manovra di lane change;
- $\epsilon_n^{lag}(t)$ è un termine random distribuito secondo $N(0, 1.31^2)$.

La stima del lane change, supposto che entrambi i gap siano accettati, è:

$$P_n = \frac{1}{1 + e^{(1.90 - 0.52delay_n(t))}} \quad (3.37)$$

Pertanto, escluse le componenti aleatorie connesse alla scelta di cambiare corsia di un guidatore, alla sua propensione al rischio, al suo stile di guida, i modelli di lane-change sono studiati come casi particolari dei modelli di gap-acceptance dei quali diremo del paragrafo seguente.

3.3.3 Gap acceptance model

Il gap acceptance è un elemento importante nella maggior parte dei modelli lane change. Per eseguire manovre di cambio di corsia, il guidatore valuta la posizione e la velocità dei veicoli che lo precedono e in arrivo nella corsia prescelta.

I modelli di gap acceptance sono formulati come un problema di scelta binario, nel quale i guidatori decidono se accettare o rifiutare il possibile gap, confrontandolo con un gap critico (minimo gap accettabile). I gap critici sono modellati come variabili random per analizzare la variazione dei comportamenti dei diversi o degli stessi guidatori.

Differenti modelli di gap acceptance sono stati sviluppati negli anni sessanta e settanta e sono basati sull’ipotesi che il critical gap segua una specifica distribuzione di probabilità.

Herman e Weiss, in [54], hanno supposto che il gap sia distribuito con una distribuzione esponenziale, Drew et al., in [55], hanno usato una distribuzione log-normale, e Miller, in [56], ha assunto una distribuzione normale.

Daganzo, in [57], utilizzò una formulazione appropriata del particolare modello probit per stimare il gap acceptance.

Il gap critico per il conducente n all’istante t si assume che segua la seguente relazione:

$$G_n^{cr}(t) = G_n + \epsilon_n^{cr}(t) \quad (3.38)$$

dove:

- G_n è un componente del gap critico attribuibile al guidatore n ;
- $\epsilon_n^{cr}(t)$ è un termine random che varia con i gap differenti sia per un dato guidatore sia per guidatori diversi.

Queste due variabili si assume che siano indipendenti ed, inoltre, si assume che G_n sia distribuita con una distribuzione normale con media G e varianza σ_G^2 e che $\epsilon_n^{cr}(t)$ sia distribuita con una distribuzione normale con media 0 e varianza σ_ϵ^2 .

Mahmassani e Sheffi, in [58], hanno utilizzato i dati raccolti da Daganzo (1981), scegliendo come distribuzione per il gap critico quella normale, nella quale si assume che la media dei gap è una funzione di variabili esplicative. Questo approccio consente di integrare l’impatto di fattori diversi nel comportamento dei guidatori riguardo al gap acceptance.

La variabile *numero di gap rigettati*, analizzando il fattore di impazienza, ha un riscontro importante per quanto riguarda la condotta del guidatore. L’Highway Capacity Manual, in [59], utilizza la media del gap critico a un incrocio per stimare il ritardo e la capacità di quest’ultima. L’HCM definisce il gap critico per un’intersezione controllata da due stop come la media di tutti i gap accettabili.

Una grave limitazione di tale definizione è che un’osservazione su un grande gap accettato da un conducente non fornisce informazioni circa il minimo gap accettabile. Nella revisione della procedura HCM, il gap critico è definito come il più grande gap rigettato. Questa definizione è ancora imperfetta, poiché un guidatore molto prudente può aumentare notevolmente la stima in quanto anche con gap elevati non effettua la manovra.

In aggiunta, Cassidy et Al., in [60], hanno elencato altre carenze di questo approccio. In primo luogo, solo un sottoinsieme dei dati è utilizzato e l’incoerenza nel comportamento dei guidatori può portare alla modifica di parte di essi. Tuttavia, il vantaggio di utilizzare la definizione HCM è la facilità di stima del parametro.

Kita, in [61], usò un modello logit per stimare il gap nei casi di innesto di una rampa con un’arteria autostradale. L’impatto di fattori diversi per il comportamento degli autisti è modellato utilizzando un modello random. In aggiunta alla lunghezza del gap, va considerato che la velocità relativa del veicolo nei riguardi di quelli sulla corsia principale e la restante distanza sulla corsia di accelerazione hanno un impatto sul comportamento del guidatore.

Cassidy et Al. (1995), utilizzando l’approccio di Kita, hanno considerato che una funzione con fattori diversi ha più significato di una che include solo la media dei gap.

3.3.4 Considerazioni sui modelli microscopici

I modelli microscopici presentano alcune limitazioni in quanto richiedono un’elevata quantità di dati come si denota dalla 3.23; infatti, per ogni istante di tempo, si deve conoscere la posizione e la velocità di ogni veicolo. Ciò porta ad una difficoltà computazionale dovuta all’aggiornamento delle variabili di stato e inoltre spesso è difficile trasferire in informazione matematica le caratteristiche fisiche della rete.

Essendo quasi impossibile gestire un’applicazione real time, l’uso di questi modelli è limitato a casi in cui la rete stradale è semplice ed il numero dei veicoli limitato. Ciò nonostante esistono vari software commerciali basati su diversi modelli microscopici (ad es. AIMSUN, SITRA B+, MITSIM, VISSIM) usati per simulare realtà di traffico urbano. Questa categoria di modelli, a differenza di quelli macroscopici, riesce a rappresentare con accuratezza il traffico cittadino caratterizzato da semafori, incroci, rotatorie, capaci di influenzare notevolmente la dinamica di ogni veicolo.

Attualmente, grazie all’ottimizzazione dei codici e alla potenza di calcolo dei moderni computers, esistono applicativi commerciali in grado di simulare il traffico pedonale e ciclabile e le interazioni fra le varie classi di traffico; questi software però creano scenari virtuali non sfruttando dati reali.

3.4 I modelli mesoscopici

L’approccio mesoscopico vuole descrivere statisticamente il comportamento dei veicoli accorpando il flusso dei veicoli in insiemi che hanno caratteristiche simili, affinché vengano snellite le procedure di calcolo.

In questi modelli non viene analizzato singolarmente il veicolo come nei modelli microscopici, ma si considera un gruppo di veicoli che agiscono come se fossero un unico elemento e la loro velocità lungo un percorso è ottenuta da una funzione velocità-densità definita per ciascun tratto stradale. In questo modo la velocità del veicolo non è determinata dal comportamento e dalle decisioni del guidatore; inoltre non vengono considerati cambiamenti di corsia, accelerazione e decelerazioni.

Ci sono diversi tipi di modelli mesoscopici, in ognuno dei quali cambia la rappresentazione della strada e del veicolo; in alcuni modelli si utilizza un sistema a coda nel quale la strada è vista come un insieme di zone in coda e in movimento. In questo caso ogni veicolo è considerato singolarmente, ma non allo stesso livello di un modello microscopico. La zona di strada caratterizzata dal movimento viene descritta attraverso una relazione velocità-densità tipica del modello macroscopico, mentre la parte in coda è gestita da un sistema coda-server.

Un altro tipo di approccio utilizza una visione cellulare della strada, nella quale essa viene divisa in celle unitarie che possono essere vuote o occupate da un veicolo. Per far avanzare il veicolo lungo le celle vengono utilizzate regole abbastanza semplici, che determinano ad ogni istante di tempo il numero di celle che ogni veicolo deve attraversare. In questi casi risulta anche abbastanza difficile stabilire se questi modelli devono essere aggregati a quelli microscopici o a quelli macroscopici.

Il vantaggio dei modelli mesoscopici è che possono essere applicati nelle situazioni dove si vorrebbe il dettaglio di una simulazione microscopica, ma questo non è possibile a causa delle dimensioni della rete o per la mancanza di risorse necessarie per implementare una microsimulazione.

Capitolo IV

4 METODOLOGIA

In questo capitolo anzitutto descriveremo brevemente, con riferimento alla simulazione ad agenti intelligenti ed ai sistemi ITS di informazione ai guidatori, le diverse metodologie adottate nella letteratura scientifica a cui si è fatto riferimento ed i risultati che da tali studi sono emersi. Inoltre si riporterà una descrizione sintetica delle peculiarità dei sistemi complessi adattivi e delle relative tecniche di simulazione, con particolare riferimento, ovviamente, alla simulazione ad agenti intelligenti.

Successivamente analizzeremo alcune delle peculiarità del software di simulazione ad agenti (NetLogo) tramite il quale abbiamo costruito il nostro modello di simulazione (paragrafo 4.2) ed infine, dato che la topologia di rete scelta nel presente caso studio è quella con cui Von D. Braess mostrò nel 1968 il noto paradosso, si è ritenuto opportuno darne una dettagliata illustrazione (paragrafo 4.3).

4.1 Simulare l’effetto dei sistemi di informazione ai guidatori su una rete di trasporto

Come riportato nei paragrafi precedenti, negli ultimi decenni sono stati proposti e sviluppati numerosi modelli di tipo deterministico o stocastico, atti a risolvere problemi complessi nel campo dell’ingegneria dei trasporti.

La tradizionale metodologia seguita presuppone l’utilizzo di modelli matematici, formule e complessi sistemi di equazioni, per risolvere questi problemi. I modelli matematici, in generale, sono però espressione di quella che in letteratura viene chiamata spesso “conoscenza oggettiva”; in altre parole, sono rappresentativi di una parte della realtà spiegabile, in maniera più o meno facile, attraverso osservazioni del fenomeno, ipotesi, formule, sistemi di equazioni, verifica delle ipotesi. Tuttavia nel caso di problemi d’ingegneria particolarmente complessi, vi sono una serie di informazioni appartenenti ad una realtà difficilmente spiegabile o inspiegabile, dette “conoscenza soggettiva”, di difficile riproduzione modellistica o di difficile quantificazione. Tali informazioni risultano quindi essere per lo più incognite, nel senso che non si ha percezione di quanto possano influire sulla bontà di un modello matematico che non tiene conto delle stesse. Il prezzo che si paga

per l’utilizzo di precisi modelli matematici per la risoluzione di complicati problemi ingegneristici, è la limitazione nel loro campo d’applicazione, attraverso ipotesi restrittive di utilizzo.

Là dove la modellizzazione della realtà non può, per ragioni fisiche, essere più precisa entra in gioco l’evoluzione tecnologica di sistemi computazionali sempre più potenti.

Nel campo dell’ingegneria dei trasporti, il problema di modellizzare sistemi capaci di prevedere ed elaborare accurate previsioni a breve termine dei parametri di traffico è uno dei temi di ricerca più interessanti nell’ambito di sistemi ITS (Intelligent Transportation System). Ad esempio, le tecnologie ITS, come ATIS (Advanced Traveler Information System) e ATMS (Advanced Traffic Management System), ricercano soluzioni ai problemi di congestione del traffico e di tempi di percorrenza, sincronizzando al meglio gli strumenti di gestione del traffico e assistendo i viaggiatori nella scelta del percorso di viaggio, il tutto basandosi su accurate informazioni, ottenute in tempo reale, sulle condizioni di traffico.

In particolare, quello che riguarda la modellizzazione e la predizione a breve termine dei parametri di traffico ha provocato un significativo interesse scientifico che incrementa man mano nel tempo, dovuto al continuo aumentare della velocità computazionale, conseguenza di una evoluzione esponenziale della tecnologia ed allo sviluppo di nuove e sempre più flessibili metodologie.

La letteratura corrente [62] [63] [64] [65] [66] [67] [68] [69] [70] [71] [72] [73] [74] ha mostrato che le reti neurali artificiali e la simulazione ad agenti intelligenti, sono una delle migliori alternative nella modellizzazione e predizione dei parametri di traffico in presenza di informazioni ai guidatori, in quanto hanno la capacità di approssimare qualsiasi tipo di funzione, senza tenere conto del suo grado di non linearità e senza una conoscenza a priori della sua forma funzionale (Tab. 13).

In maniera particolare, nella fase di sviluppo iniziale del presente lavoro, sono stati significativi alcuni spunti forniti dall’attività di ricerca condotta da Ana L.C. Bazzan e F. Klügl, di concerto, ovviamente, con i rispettivi gruppi di ricerca. Infatti, questi docenti svolgono la loro attività didattica e gran parte della loro attività di ricerca proprio nell’ambito della simulazione ad agenti intelligenti e dell’intelligenza artificiale applicata alle problematiche della mobilità ed hanno partecipato ad importanti progetti di ricerca in questo settore (ITSUMO: Intelligent Transportation System for Urban Mobility; SISCOT: Integrated System of Simulation, Control and Optimization of Traffic; SOCIAT: Simulation of Social Agents in Traffic; MASTERLab: Laboratory for MAS-based Traffic and Transportation Engineering Research).

RIFERIMENTO BIBLIOGRAFICO	OBBIETTIVI	METODOLOGIA
[62]	Simulare l’effetto che la presenza di informazioni diffuse dai sistemi ITS determina sulle performance di una rete di trasporto.	<ul style="list-style-type: none"> MAS (Multi Agent Simulation) automi cellulari
[63]	Costruire un modello di scelta del percorso (ARC Agent Based Route Choise) che tenga conto della presenza di informazioni ai guidatori.	<ul style="list-style-type: none"> MAS (Multi Agent Simulation) microsimulazione
[64]	Simulare un sistema di guida collaborativo (in cui i veicoli cooperano tra loro).	MAS (Multi Agent Simulation)
[65]	Costruire un modello di guida che riproduca in maniera realistica il comportamento dei guidatori in corrispondenza delle intersezioni stradali.	MAS (Multi Agent Simulation)
[66]	Costruire un modello decisionale per la gestione intelligente della mobilità.	MAS (Multi Agent Simulation)
[67]	Caso studio del paper precedente [67].	MAS (Multi Agent Simulation)
[68]	Simulare un sistema di guida collaborativo per una gestione intelligente della mobilità.	MAS (Multi Agent Simulation)
[69]	Fornire delle linee guida per ridurre l’incremento dei tempi di percorrenza dovuti al manifestarsi del paradosso di Braess.	MAS (Multi Agent Simulation)
[70]	Costruire un modello di simulazione in grado di riprodurre il comportamento dei guidatori.	MAS (Multi Agent Simulation)
[71]	Costruire un modello di simulazione finalizzato alla gestione cooperativa del traffico stradale.	MAS (Multi Agent Simulation)
[72]	Capire quale impatto determina la diffusione di informazioni ai guidatori su una semplice rete a due percorsi.	MAS (Multi Agent Simulation)
[73]	Descrivere alcuni aspetti del comportamento dei guidatori.	MAS (Multi Agent Simulation)
[74]	Modellizzare la reazione dei guidatori a diverse tipologie di informazioni loro fornite.	<ul style="list-style-type: none"> MAS (Multi Agent Simulation) reti neurali

Tab. 13 - Modellizzazione dei parametri di traffico in presenza di informazioni ai guidatori: peculiarità dei riferimenti bibliografici presi in esame

In special modo, con riferimento alla pubblicazione scientifica dal titolo “Case studies on the Braess Paradox: Simulating route recommendation and learning in abstract and microscopic models” [62], della quale sono autrici A. Bazzan e F. Klügl, l’obiettivo della ricerca è proprio quello di simulare quale effetto determina fornire informazioni ai guidatori su una rete di trasporto avente la struttura topologica della rete con cui Braess mostrò il noto paradosso. Per perseguire questo obiettivo, le

autrici hanno costruito due modelli di simulazione: un modello astratto ed un modello di simulazione microscopia basato su automi cellulari (Cellular Automaton).

Il primo di questi è, a sua volta, strutturato sulla logica di un modello di scelta del percorso adattivo (IRC Iterated Route Choise) in cui ciascun agente “informato” sceglie, attribuendo un peso maggiore alle esperienze di viaggio più recenti, il percorso che sulla base della sua esperienza pregressa determina un tempo di percorrenza più basso.

Il modello in questione è detto astratto in quanto il tempo di percorrenza degli itinerari è determinato tramite funzioni analitiche (funzioni di costo dei percorsi) e non si riproduce il movimento di alcun veicolo sulla rete. Gli agenti non cooperano tra loro ma effettuano le proprie scelte in maniera del tutto indipendente l’uno dall’altro. La metodologia prevede di fornire ad aliquote diverse di guidatori (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) informazioni sui tempi di percorrenza secondo la logica del modello IRC mentre la restante percentuale di guidatori effettua la scelta dei percorsi in maniera casuale. In alternativa a questa strategia di informazione si analizzano degli scenari in cui ad aliquote diverse di guidatori (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) si forniscono informazioni sui tempi di percorrenza manipolate, con l’obiettivo di perseguire l’ottimo del sistema e non del singolo agente. Gli scenari vengono simulati per mezzo di un software di simulazione ad agenti, il SeSAm (Shell for Simulated Agent Systems).

Gli output del modello astratto sono, per ciascuno degli scenari descritti, il numero dei guidatori transitati su ciascuno dei percorsi presenti sulla rete ed il rispettivo tempo di percorrenza. Questi valori, tuttavia, non vengono determinati in maniera chiusa ma espressi in termini di probabilità e varianza e, pertanto, sono di fatto dei range di valori.

I risultati che emergono dalle simulazioni consentono agli autori di affermare che le informazioni manipolate determinano una riduzione dei tempi di percorrenza e che la presenza di agenti che effettuano la scelta in maniera del tutto casuale determina un incremento nei tempi di percorrenza.

Nel modello di simulazione microscopia basato su automi cellulari (Cellular Automaton) il tempo necessario a percorrere ciascun itinerario è, invece, determinato dalla simulazione stessa. Infatti gli archi della rete vengono suddivisi in celle ed ogniuna di tali celle può essere vuota ovvero occupata da un solo veicolo. Quindi, sulla base dei modelli di simulazione microscopica notevolmente semplificati, sono fissate delle regole che riproducono il moto dei veicoli. Nel paper in questione, dopo una opportuna calibrazione dei parametri del modello, viene preso in esame lo scenario in cui la totalità degli agenti effettua la scelta del percorso sulla base del modello di scelta IRC precedentemente descritto. L’output più significativo del modello è rappresentato dal tempo di

percorrenza sui percorsi della rete. Infatti, mantenendo immutati tutti i parametri del modello, da un confronto tra i tempi di percorrenza rilevati in presenza di soli “guidatori random” ed in presenza di “guidatori informati” se ne evince una riduzione in quest’ultimo caso.

4.1.1 I sistemi complessi adattivi e la tecnica della simulazione ad agenti

Negli ultimi anni, la *complessità* è stata sempre più oggetto di studio da parte di molteplici discipline, quali la matematica, la fisica, la biologia, le scienze sociali e l’ingegneria. Il suo carattere di multidisciplinarietà crea delle difficoltà nel momento in cui si voglia dare una definizione di questo concetto e la conseguenza principale è che non ne esiste una ampiamente condivisa.

Una definizione generale può essere che “un sistema dinamico è complesso se a livello endogeno non tende asintoticamente ad un punto fissato, ma mostra comportamenti discontinui e può essere descritto come un insieme di equazioni non lineari con elementi stocastici” [75]. Un secondo tentativo di definizione si può trovare in Tinti [76], dove la complessità è definita come “lo studio interdisciplinare dei sistemi complessi adattivi e dei fenomeni emergenti ad essi associati”.

Gran parte dei fenomeni presenti nella società in cui viviamo può essere considerato composto da *sistemi complessi adattivi*, strutture in cui le componenti sono fortemente dinamiche e correlate tra loro; ciascuno di questi sistemi evolve e si adatta ai cambiamenti continui.

I sistemi di questo tipo presentano alcune caratteristiche comuni:

- tante componenti più o meno complesse; quanto più numerose e complesse sono le parti che lo compongono, tanto più complesso è il sistema in generale;
 - interazioni tra le componenti, che si passano informazioni tra loro; le informazioni non possono essere né troppo numerose né troppo poche, perché nel primo caso il sistema diventerebbe caotico e nel secondo si “cristallizzerebbe”;
 - assenza di gerarchia piramidale; in caso contrario il funzionamento del sistema potrebbe essere spiegato osservando soltanto la componente che si trova al vertice della struttura;
 - interazione adattiva con l’ambiente; il sistema è tanto più complesso quanto maggiori sono i fattori esterni che influiscono sul suo adattamento all’ambiente e sulla sua evoluzione.
- Questa caratteristica rende *adattivi* i sistemi complessi.

È possibile classificare i sistemi in tre differenti categorie in base al loro grado di complessità. Si definiscono *sistemi minimamente complessi* tutti i sistemi naturali non biologici che non manifestano interazioni con l’ambiente esterno. I *sistemi di media complessità* sono gli artefatti

complessi, come ad esempio il computer; questi sistemi possono essere adattivi e manifestare comportamenti imprevedibili. Infine, i *sistemi complessi* sono sistemi adattivi che manifestano fenomeni emergenti, esempi di sistemi complessi sono le popolazioni umane e tutti i sistemi biologici.

I sistemi complessi sono detti *non lineari* [77], perché le variabili al loro interno interagiscono tra loro costantemente e si modificano in risposta alle variazioni delle altre; in questi sistemi piccoli cambiamenti possono dare origine a variazioni di tutto il sistema. I sistemi non lineari non rispondono al *principio della sovrapposizione*, in quanto anche scomponendoli nelle parti costitutive non è possibile comprendere il funzionamento del sistema totale. La caratteristica fondamentale dei sistemi non lineari è l'importanza delle interazioni tra le parti piuttosto che le proprietà delle sue componenti.

Al contrario, i *sistemi lineari* sono soggetti al principio di sovrapposizione, cioè è possibile analizzare un sistema di questo tipo studiando separatamente le parti che lo compongono e da esse comprendere il funzionamento completo del sistema.

La principale differenza tra i sistemi complessi, o non lineari, e quelli complicati, o lineari, è che per i secondi il comportamento globale è la somma dei comportamenti locali delle sue parti; per i primi invece il comportamento del tutto è maggiore della somma dei comportamenti locali, a causa delle interazioni tra gli agenti del sistema [78].

È possibile fare un esempio legato alla realtà, mettendo a confronto il motore di un'automobile e un formicaio [79]. Il primo è un sistema complicato, o lineare, perché può essere scomposto in tutte le sue parti costitutive ed a ciascuna, ad esempio il carburatore o la marmitta, può essere associata una particolare funzione che aiuta a comprendere il funzionamento generale del motore. Il formicaio è un sistema complesso, o non lineare, perché la più piccola unità di questo sistema, la formica, non è in grado di dire nulla sulla struttura aggregata; per comprendere il funzionamento di un formicaio, e di qualsiasi altro sistema complesso, si rivela quindi necessario osservarlo nel suo insieme.

In questo senso, sta, nell’ultimo decennio, riscontrando un successo crescente la simulazione ad agenti intelligenti, per mezzo della quale è possibile creare, realizzando dei modelli informatici, degli oggetti virtuali che siano in grado di agire in base a regole e di operare all’interno di un ambiente.

Un esempio interessante per introdurre la simulazione ad agenti è proprio il modello della formica di Langton (Fig. 57). In questo modello, una formica virtuale è collocata in uno spazio a due

dimensioni, suddiviso in caselle che possono essere bianche o nere. Le celle di una griglia sono colorate ognuna di bianco o nero e la "formica" può occupare ad ogni step una sola di queste.

La formica può spostarsi in ognuna delle 4 direzioni cardinali, seguendo le seguenti regole:

- su una cella nera, gira a destra di 90° , scambia il colore della cella, si sposta avanti di una cella;
- su una cella bianca, gira a *sinistra* di 90° , scambia il colore della cella, si sposta avanti di una cella.

Queste due semplici regole portano ad un comportamento sorprendentemente complesso: se si avvia la simulazione su una griglia completamente bianca, dopo un periodo di apparente caos, la formica comincia a costruire un motivo ricorrente di 104 passi che si ripete all'infinito ed incomincia ad allontanarsi dalla posizione iniziale e a spostarsi in una direzione lasciando dietro di sé una “scia” di caselle variamente colorate detta “autostrada”. Ciò è possibile perché, senza che la formica cambi la sua regola di comportamento, i movimenti si strutturano secondo un modulo che è ripetuto involontariamente e fa sì che ad ogni ciclo la formica si sposti progressivamente verso una direzione particolare.

In questo modello è *simulato* il comportamento di un soggetto. Il numero di cicli di questa simulazione è molto alto: la formica si “incammina” in una direzione dopo aver compiuto circa diecimila passi apparentemente disordinati. Nonostante il risultato ottenuto sia teoricamente molto semplice da capire, è invece molto difficile ottenere questo effetto svolgendo le operazioni manualmente, su un pezzo di carta. È il computer a consentire questo tipo di operazioni, in cui la semplicità dei singoli passi è controbilanciata dalla quantità eccezionale di questi. Il carattere inaspettato del risultato è, inoltre, un elemento di forte curiosità.

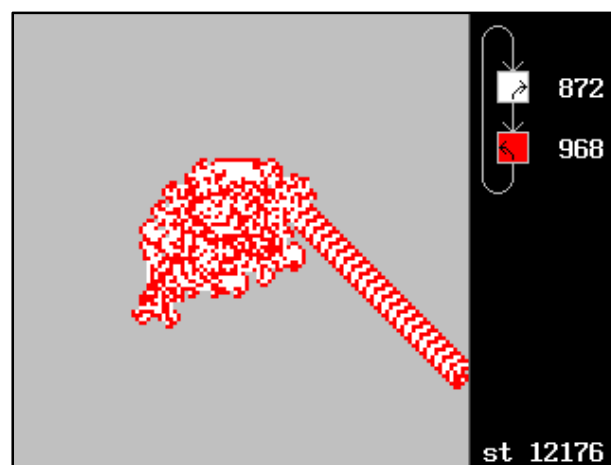


Fig. 57 - Un’esposizione del comportamento della formica di Langton [79]

Nella simulazione ad agenti si utilizza la prospettiva *bottom-up*, secondo cui i sistemi sono descritti a partire da semplici regole da cui possono essere originati comportamenti di grande complessità. In questo contesto inizialmente si definisce il genotipo, cioè il repertorio di comportamenti, e in seguito dalle interazioni dell'insieme emerge il comportamento globale del sistema, il fenotipo.

Axtell [80] osserva che la tecnica della simulazione ad agenti può essere usata in tre casi distinti. Il primo, il più semplice, si presenta quando il sistema che si va a studiare può essere completamente descritto da equazioni risolvibili analiticamente o numericamente; in questo caso la simulazione può essere usata come metodo alternativo per arrivare agli stessi risultati o come strumento per presentarli in modo più facilmente comprensibile rispetto a quelli di un modello matematico. Un secondo uso emerge nel caso in cui il modello matematico adottato per analizzare un sistema possa essere descritto ma le sue equazioni non siano risolvibili oppure i risultati non siano stabili. Infine, il terzo tipo di utilizzo si ha nel caso di sistemi per i quali non è possibile una spiegazione fondata su equazioni; la simulazione ad agenti è perciò l'unico metodo con cui è possibile studiarli.

Gli utilizzatori della simulazione possono avere diversi obiettivi e, in particolare, se ne possono distinguere almeno tre [81] [82]:

- 1) la *proiezione*, cioè l'uso di modelli per prevedere gli avvenimenti futuri legati ad un particolare fenomeno; queste simulazioni non sono necessariamente basate su un modello ad agenti e risultano molto utili quando il sistema su cui si indaga è di natura complessa, ad esempio se si tratta di un processo non lineare. La simulazione in questo caso può essere utilizzata per prevedere gli esiti di interventi di politica economica o sociale;
- 2) la *sperimentazione*, nel caso in cui con la simulazione si intendano spiegare dei particolari fenomeni e si desideri verificare la qualità dei modelli proposti. Il modello creato nel computer può essere usato in due modi: *manipolando* le variabili del modello, possibilità particolarmente indicata quando non si possono realizzare modifiche nella realtà oppure quando si intende valutare quali siano le cause scatenanti di particolari eventi, con l'obiettivo di utilizzare il computer come un vero e proprio "laboratorio" delle scienze sociali; un secondo modo di utilizzo è l'*osservazione* del comportamento del modello "così come è" e dei fenomeni che hanno origine da esso;
- 3) infine, l'*esplorazione* del fenomeno costruito nel "laboratorio virtuale", per osservare e studiare i diversi aspetti delle dinamiche sociali e l'evoluzione della cooperazione tra gli agenti.

Lo sviluppo di una simulazione prevede lo svolgimento di due fasi, la prima di *modelling*, cioè la costruzione nel computer del modello da simulare e, in seguito, la *simulazione* vera e propria.

Durante la fase di *modelling* si crea un ambiente virtuale che sia in grado di imitare un certo aspetto della realtà [82]; il modello solitamente è soggetto a dei parametri, perciò è possibile che lo stesso possa essere adattato per simulare e analizzare diversi aspetti della stessa realtà.

La “bontà” di un modello è valutata in base ai seguenti criteri [82]:

- la *correttezza*; un modello può essere costruito scegliendo uno tra i due metodi maggiormente diffusi: il primo propone di seguire i principi che sono stati sviluppati precedentemente per fenomeni simili ed è funzione del successo che essi hanno avuto; il secondo metodo consiste nel tentativo di imitare il più possibile il processo reale ed è il più impegnativo e difficoltoso;
- la *precisione* dei principi utilizzati per costruire il modello, che è misurata dalla differenza tra i risultati del modello e quelli della realtà; generalmente la perfetta correttezza non è raggiungibile a causa della presenza persistente di fenomeni che la ostacolano;
- la *generalità*, che indica la possibilità di applicare un modello in diverse circostanze; generalmente si tende a preferire un modello più versatile rispetto ad uno più specifico;
- la *semplicità*, qualità importante quando il modello deve essere applicato o interpretato;
- il *costo* richiesto per la creazione del modello, che spesso rappresenta uno dei criteri guida nelle scelte dei modelli di simulazione con lo scopo di ricerca;

Un aspetto importante di questa fase riguarda la scelta del modello da utilizzare, in quanto ne esistono di diversi tipi. In particolare, i modelli usati dagli economisti e dai teorici dei giochi sono *matematici* e hanno la caratteristica di definire gli agenti in base ai valori assegnati a determinate variabili. Un secondo tipo di modelli, detti *procedurali*, definiscono gli agenti in base a delle sequenze di azioni eseguite secondo regole interne.

Durante la fase di simulazione si fa funzionare il modello software nel computer. Si presenta però un interrogativo, che riguarda l'utilità della simulazione per un modello per cui è possibile l'esecuzione analitica; in almeno tre casi l'utilizzo della simulazione si rende necessario [81]:

- 1) negli studi su sistemi che presentano capacità di apprendimento, in cui gli agenti imparano interagendo con l'ambiente e con gli altri agenti;
- 2) negli studi in cui possono emergere nuovi fenomeni a partire da situazioni conosciute, riscontrabili nell'osservazione di sistemi dinamici auto-organizzanti, che possono subire delle modifiche per adattarsi ai cambiamenti dell'ambiente esterno;

3) negli studi sull'evoluzione e sull'adattamento dei sistemi, come nel caso degli studi dell'Istituto di Santa Fe sui sistemi complessi adattivi.

In tutti questi casi l'esecuzione analitica non può sostituire la simulazione, perché questa tecnica si rende necessaria per tutti i sistemi il cui studio prevede delle interazioni con l'ambiente; infatti solo con questo metodo è possibile consentire ai sistemi di agire in un mondo artificiale, ed in seguito a queste azioni si possono osservare fenomeni di apprendimento e di evoluzione dei sistemi.

Infine, ci sono casi per cui l'uso della simulazione è fondamentale, in quanto di essi non si può ottenere una soluzione da un modello analitico. Alcuni esempi riguardano lo studio degli effetti dei sistemi complessi e di quelli semplici; questo secondo caso è molto interessante, perché in queste situazioni la simulazione ha un carattere esplorativo, cioè è usata per formulare una teoria e per evidenziare le proprietà più importanti del modello e non per verificare delle ipotesi, come avviene nel primo caso.

Un grande pregio della simulazione ad agenti è l'aver reso possibile l'incontro fra diverse discipline, sia per quanto riguarda il metodo di ricerca scelto sia per i temi di studio, che si sono rivelati, in alcuni casi, di carattere multidisciplinare.

I temi unificanti che sono emersi dai vari studi sono i seguenti [81]:

- l'*emergenza*, cioè la manifestazione spontanea di fenomeni inaspettati a partire da modelli conosciuti;
- la *complessità*, che si può concretizzare, ad esempio, nella formazione di organizzazioni oppure nella specializzazione funzionale;
- l'*evoluzione* degli agenti e dei sistemi in risposta all'ambiente circostante;
- la *distribuzione*, ovvero la condivisione di proprietà e comportamenti da parte delle unità del modello;
- la *comunicazione*, che è necessaria al coordinamento ed alla diffusione di regolarità.

La simulazione ad agenti presenta, tuttavia, alcune problematiche. Il più noto dei problemi legati all'uso della simulazione riguarda l'interpretazione dei dati che sono originati dal modello. Da un lato, se questi ultimi non confermano le ipotesi iniziali, è difficile capire se il risultato sia attribuibile ad un errore di specificazione del modello o semplicemente ad uno di programmazione; dall'altro lato, se le ipotesi sono confermate, risulta difficoltoso affermare l'adeguatezza dei risultati, perché oltre a quelli espliciti possono essercene anche altri impliciti.

Un secondo tipo di problema riguarda la progettazione del modello. Pur avendo il vantaggio di usare linguaggi di programmazione non particolarmente difficili, questa fase ha un primo tipo di

costo che può essere misurato nel tempo dedicato alla progettazione del modello, in quanto è necessario imparare il linguaggio da usare; dopo aver scritto il codice si presenta un altro costo, rappresentato dal tempo impiegato a controllare che non ci siano errori nel programma.

Un ulteriore problema consiste nella definizione delle assunzioni relative ai diversi aspetti della realtà che si studiano e nella scelta del modello e dei valori da assegnare ai parametri, che possono richiedere del tempo, necessario all'utilizzatore per scegliere la migliore delle possibilità.

Infine, un ultimo problema riguarda il realismo della simulazione, definito in Conte [81] come la *trappola della verosimiglianza*. La simulazione rappresenta una semplificazione della realtà, individuando i fattori fondamentali che determinano i fenomeni oggetto di studio, e ogni miglioramento che si vuole portare richiede maggiori sforzi di progettazione. Tuttavia è anche importante trovare il giusto bilanciamento tra i dettagli necessari e quelli che non lo sono, per non correre il rischio di fare un'errata specificazione e creare un modello che non è in grado di rappresentare la realtà studiata.

Per quanto riguarda gli agenti, Wooldridge e Jennings [83] sostengono che la definizione più generale che può essere data al termine *agente* consiste nel considerarlo un sistema computazionale posto in un certo ambiente dotato delle seguenti caratteristiche (Fig. 58):

- *autonomia*, che gli consente di operare senza la necessità di un intervento umano;
- *abilità sociale*, cioè capacità di interagire e comunicare con altri agenti;
- *reattività*, che gli permette di reagire in modo tempestivo ai cambiamenti dell'ambiente circostante;
- capacità di prendere iniziative guidate da obiettivi interni, o *pro-attività*.

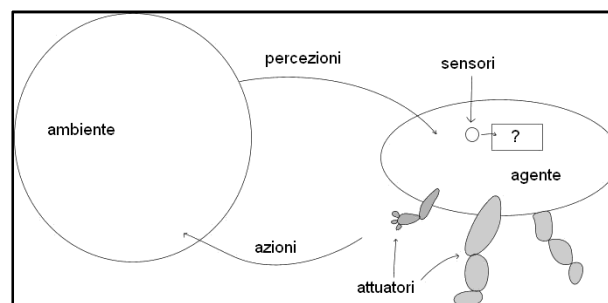


Fig. 58 - Peculiarità di un agente intelligente

Secondo coloro che studiano l'intelligenza artificiale, l'agente è un sistema computerizzato che, oltre a possedere le caratteristiche sopra descritte, è concepito usando concetti che sono abitualmente applicati agli esseri umani.

Ad esempio, è possibile definire gli agenti usando caratteristiche come la conoscenza, le opinioni, le intenzioni, i desideri e i doveri.

Una teoria soddisfacente degli agenti deve essere in grado di illustrare in modo approfondito tutti gli attributi sopra considerati e di mostrare in che modo sono collegati questi ultimi; ad esempio, dovrà specificare come l'ambiente influisce sul comportamento dell'agente e come gli obiettivi e le informazioni guidano le sue azioni.

È possibile effettuare una classificazione generale degli agenti usati in una simulazione in base ai loro meccanismi di decisione, alla capacità di adattamento e di apprendere; se gli agenti sono privi di capacità di apprendimento sono detti “senza mente”, in caso contrario “con mente”. Inoltre si può effettuare una distinzione anche secondo l'ambiente in cui si trovano, che può essere neutrale o strutturato, cioè dotato di regole precise a cui gli agenti devono attenersi. Ne consegue che gli agenti possono essere raggruppati in quattro categorie [79]:

- 1) agenti “senza mente” in un ambiente neutrale, o non strutturato;
- 2) agenti “senza mente” in un ambiente strutturato;
- 3) agenti “con mente” in un ambiente neutrale;
- 4) agenti “con mente” in un ambiente strutturato.

Nel primo caso, agenti senza mente in ambiente neutrale, si osserva che dalla simulazione emerge un fenomeno complesso, con elementi di caos generati indirettamente dagli agenti. Tuttavia i fenomeni provocati da agenti di questo tipo non sono realistici, perciò sono di scarso interesse scientifico.

Al contrario, se si inseriscono agenti senza mente in un ambiente strutturato si nota che si creano fenomeni complessi che originano risultati realistici grazie alla presenza di un ambiente con regole. L'aspetto interessante di questo esempio è che l'emergenza di situazioni complesse è dovuta alle caratteristiche dell'ambiente e non a quelle degli agenti operanti.

Nel terzo caso si presentano agenti con mente in un ambiente neutrale. In questa situazione gli agenti sono in grado di imparare ad agire in modo coerente, conoscendo a mano a mano quali sono le conseguenze che derivano da una particolare azione; per un osservatore esterno gli agenti di questo tipo sembrano operare seguendo obiettivi e strategie interne, ma in realtà sono guidati soltanto da semplici regole e il loro comportamento è dovuto soltanto alla loro capacità di adattamento.

Infine, utilizzando agenti con mente in un ambiente strutturato si va incontro all'emergenza di fenomeni complessi come nel secondo caso; inoltre in questa situazione gli agenti si adattano ed

imparano e sono in grado di determinare risultati importanti anche a livello individuale, sviluppando strategie che ad un osservatore esterno possono sembrare non ovvie.

4.2 L’ambiente di simulazione: NetLogo

Il software NetLogo, sviluppato originariamente su piattaforma Java da Uri Wilensky nel 1999 presso il Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling della Northwestern University, offre un ambiente di sviluppo ideale per la simulazione di sistemi fisici, biologici, sociali e dell’ingegneria in senso lato. Al suo interno è possibile riprodurre con facilità molte delle caratteristiche di un sistema complesso, simulandone l’evoluzione temporale e visualizzandone i parametri significativi in tempo reale.

Con Netlogo si possono dare istruzioni a centinaia o migliaia di agenti in grado di competere o di cooperare all'interno di spazi limitati o (virtualmente) illimitati, esplorando le connessioni tra il micro-livello degli individui e il macro-livello dei patterns emergenti dalla loro reciproca interazione e, pertanto, questo ci è parso il software ideale per gli obiettivi della presente ricerca.

La Fig. 59 mostra l’interfaccia grafica di Netlogo, così come si presenta quando si lancia il software o si inizia un nuovo progetto.

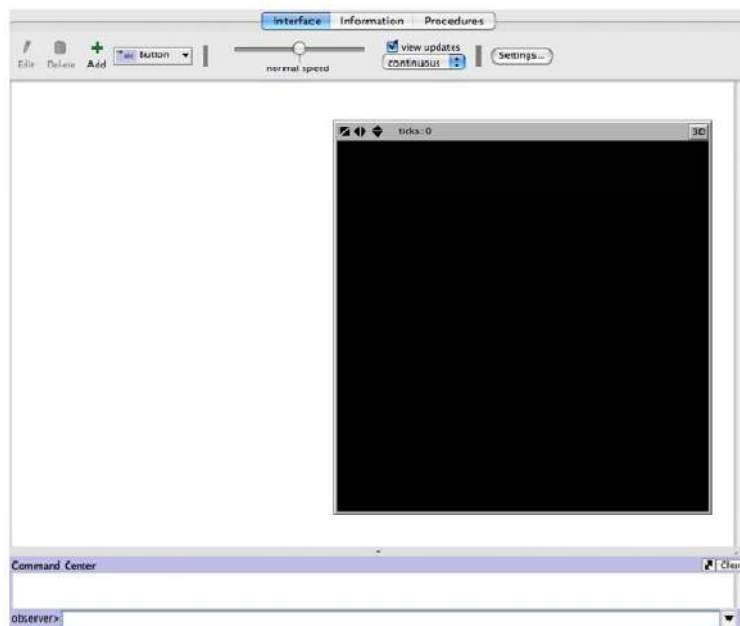


Fig. 59 - L’interfaccia grafica di Netlogo

NetLogo consente di costruire delle simulazioni di sistemi complessi, interfaccia compresa, utilizzando un ambiente di sviluppo completamente programmabile. A questo scopo Netlogo mette a disposizione dell’utente-programmatore un *metalinguaggio* semplificato ed intuitivo, ma allo stesso tempo estremamente potente, basato sulla sintassi originaria del Logo (un linguaggio creato

da Seymour Papert nel 1960) ed utilizzato in una forma più evoluta nell'ambiente di sviluppo *Starlogo*, il progenitore di Netlogo, creato all'MIT nel 1990 da Mitch Resnick.

L'ambiente di sviluppo di NetLogo interpreta direttamente il codice senza bisogno di compilarlo, quindi al suo interno è possibile, in tempo reale,:

- interagire con il sistema simulato attraverso pulsanti e sliders per modificare i parametri di controllo;
- visualizzare variabili, grafici ed istogrammi relativi alla simulazione in corso;
- importare/salvare immagini e dati da/su files esterni;
- effettuare set di esperimenti al variare delle condizioni iniziali o dei parametri di controllo.

Il mondo di Netlogo, mostrato in Fig. 60, è costituito da una griglia quadrata o rettangolare dalle dimensioni regolabili chiamata *World*, sulla quale è definito un sistema di coordinate cartesiane.

All'interno del World sono definite due categorie di oggetti (agenti) fondamentali:

- le *Patches*, che corrispondono alle celle quadrate della griglia e sono dotate di coordinate intere fisse (colorate in scala di grigio in Fig. 60);
- le *Turtles*, che corrispondono agli agenti in grado di muoversi sulla griglia e sono dotati di coordinate variabili in virgola mobile (rappresentati con delle freccette rosse in Fig. 60).

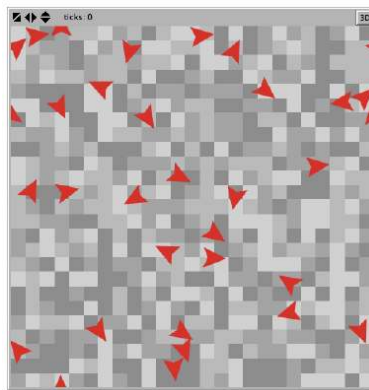


Fig. 60 - World: la griglia virtuale di Netlogo

Al di sopra del livello delle Patches e delle Turtles esiste poi il cosiddetto *Observer*, che in sostanza coincide con il programmatore e rappresenta il livello più alto dal quale è possibile eseguire delle istruzioni in Netlogo.

In Fig. 61 è riportata la finestra di dialogo *Model Settings* con la quale è possibile fissare l'origine del sistema di coordinate all'interno della griglia. L'origine può essere posta al centro della griglia, in uno dei suoi quattro vertici, nel punto medio di uno dei suoi quattro lati, in un punto qualsiasi della griglia. In ciascuno dei quattro casi è possibile inserire il valore (espresso in patches) corrispondente alla massima estensione positiva e negativa lungo l'asse x e lungo l'asse y.

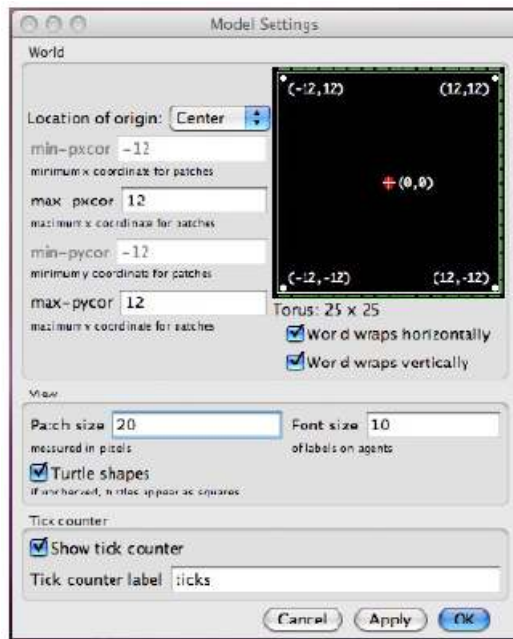


Fig. 61 - Finestra Model Settings

Di fondamentale importanza sono le caselle di controllo *World wraps horizontally* e *World wraps vertically*, in quanto fissano la topologia della griglia. A seconda delle esigenze, infatti, la topologia del World di Netlogo può essere resa rettangolare, ossia limitata e con condizioni al contorno non periodiche oppure toroidale, ossia illimitata e con condizioni al contorno periodiche. Selezionando solo una delle due caselle di controllo si può scegliere invece una topologia cilindrica (limitata in una direzione, orizzontale o verticale, e illimitata nell'altra).

Nella parte inferiore della finestra Model Settings troviamo la casella di controllo *Show tick counter* che, se viene spuntata, abilita l'attivazione del contatore di *ticks* di Netlogo. Un “tick” corrisponde alla esecuzione di una singola routine, all'interno della quale sia stato posto il comando tick, che incrementa di una unità il contatore. In alternativa si può incrementare il contatore di un numero arbitrario n di unità con il comando *tick-advance* seguito da un numero intero. Il comando *reset-ticks* azzerava invece il contatore.

Infine, la variabile *Patch size* consente di fissare la dimensione in pixel di ciascuna patch. Questa operazione lascia invariato il numero totale di patches ma ne modifica la dimensione in pixel agendo sul ridimensionamento della griglia nel suo complesso.

Passiamo ora ad esaminare gli elementi principali dell’interfaccia grafica di Netlogo (Fig. 62).

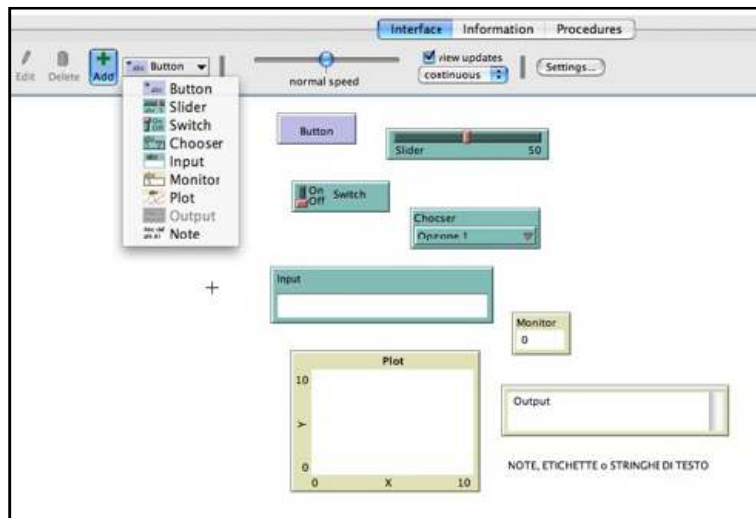


Fig. 62 - Elementi dell’interfaccia grafica di Netlogo

Il primo elemento è il *Button*, che non è altro che un pulsante in grado di richiamare una procedura o eseguire una certa istruzione. Come abbiamo già osservato in precedenza, l’ambiente di sviluppo di Netlogo interpreta direttamente il codice senza compilarlo, dunque è in grado di eseguire istruzioni o richiamare procedure su richiesta dell’utente: la pressione dei pulsanti consente esattamente di effettuare questo tipo di richieste, non solo prima ma anche durante l’esecuzione di un’applicazione.

In Fig. 63 è mostrata la finestra di dialogo che appare al momento dell’inserimento dell’elemento *Button*: nel campo *Commands* va indicato il nome della procedura da richiamare mentre nel campo *Display name* va inserita l’etichetta che desideriamo appaia sul pulsante all’interno dell’interfaccia grafica.

Nella parte superiore sinistra della finestra il menù a tendina *Agent(s)* permette di selezionare chi dovrà eseguire l’istruzione o la procedura attivata dal pulsante: l’Observer, le Patches o le Turtles.

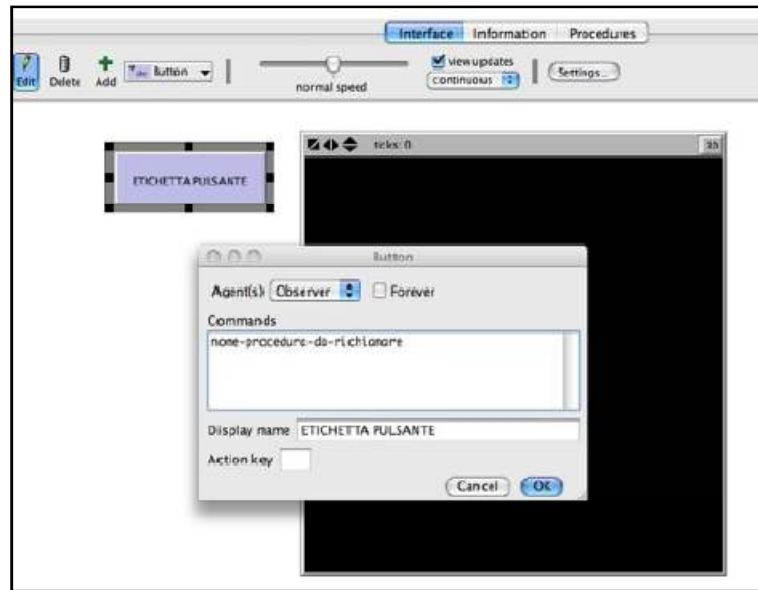


Fig. 63 - L'elemento Button e la relativa finestra di dialogo

A fianco invece una casella di controllo permette di attivare o meno l'opzione *Forever*: in caso di attivazione il pulsante resterà premuto e ripeterà all'infinito la procedura o l'istruzione da esso richiamata, in caso contrario la eseguirà soltanto una volta.

Il campo *Action key*, nella parte inferiore della finestra, consente infine di inserire una lettera da tastiera da associare al pulsante, in modo da attivarlo velocemente.

Un altro importante elemento dell'interfaccia grafica è lo *Slider* (Fig. 64). Questo è un cursore mobile che permette all'utente di variare manualmente e rapidamente il valore di certe variabili globali (che definiremo di seguito). Solitamente si tratta di variabili che regolano le condizioni iniziali di una simulazione o che rappresentano parametri di controllo della simulazione stessa. La finestra di dialogo dello *Slider* permette di attribuire un nome della variabile globale (da inserire nel campo *Global variable*), il minimo e il massimo valore del range di variazione della variabile, il passo di incremento del cursore, un valore di default e una eventuale unità di misura.

Gli altri due elementi grafici che mettono l'utente in grado di interferire manualmente con il valore delle variabili globali sono lo *Switch* e il *Chooser* (Fig. 64). Il primo gestisce delle variabili di tipo logico, cioè variabili dicotomiche in grado di assumere solo il valore True (vero) o False (falso), quindi la sua finestra di dialogo richiede solo l'inserimento del nome della variabile, mentre il secondo permette di selezionare il valore di una certa variabile globale attraverso un menù a tendina, dunque oltre al nome della variabile la sua finestra di dialogo richiederà l'inserimento dei valori di default del menù, i quali andranno inseriti all'interno del campo *Choices*.

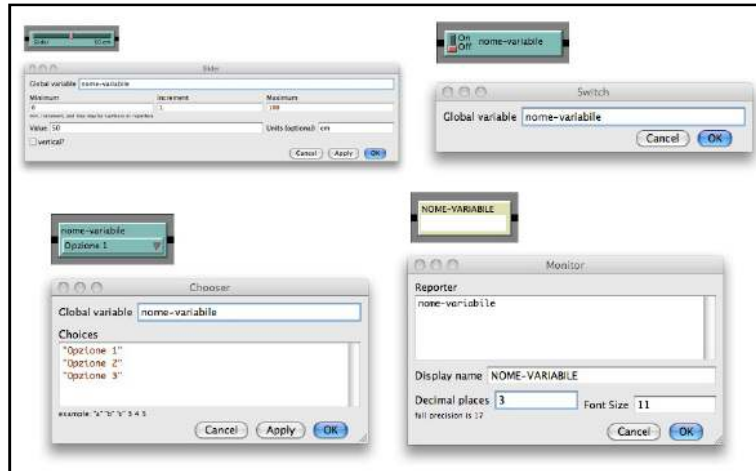


Fig. 64 - Altri elementi dell'interfaccia grafica: Slider, Switch, Chooser e Monitor

Ultimo elemento grafico presente in Fig. 64 è il *Monitor*, che serve per monitorare l'andamento di una certa variabile globale o di un'altra quantità relativa alla simulazione in esecuzione: nel primo caso basta inserire il nome della variabile da monitorare nel campo *Reporter*; nel secondo caso invece il campo *Reporter* dovrà contenere una istruzione che calcoli la grandezza a cui siamo interessati.

L'elemento *Plot*, riportato in Fig. 65, mostra in tempo reale tutti i grafici e/o gli istogrammi relativi alla simulazione in esecuzione, consentendo di tenere sotto controllo i parametri più significativi della simulazione stessa.

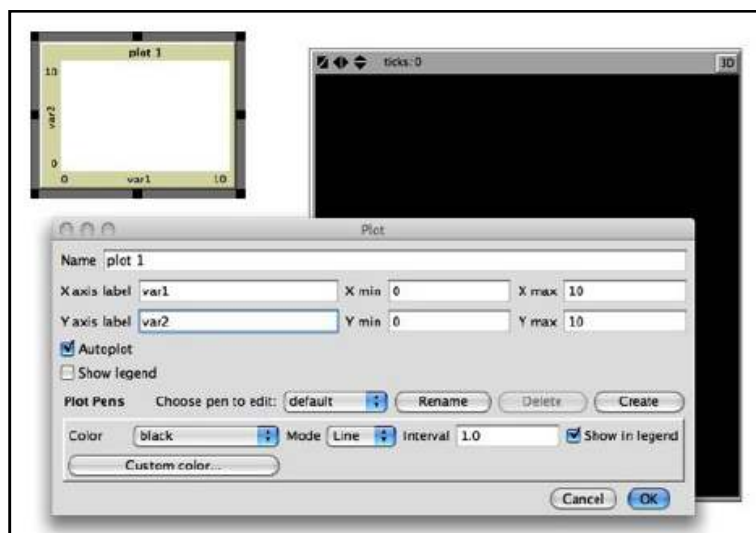


Fig. 65 - L'elemento Plot dell'interfaccia grafica

La sua finestra di dialogo permette di inserire il nome del plot e i nomi da assegnare agli assi x e y, accompagnati dai relativi range delle variabili corrispondenti, oltre al nome, al colore ed alla modalità della penna o delle penne necessarie a colmare le esigenze del grafico in oggetto.

Passiamo adesso a descrivere alcuni aspetti di NetLogo relativi alla programmazione. In Netlogo esistono tre tipi fondamentali di variabili: le *variabili globali*, le *variabili locali* e le *variabili proprietarie*.

Le variabili globali esistono in esemplari unici e sono visibili da qualunque punto del codice. E’ importante notare che in Netlogo, diversamente da quanto accade nella maggior parte dei linguaggi di programmazione, non è necessario specificare il tipo della variabile dichiarata ma solo il nome: sarà l’interprete a decidere, a seconda dell’utilizzo e del contesto, se si tratta di una variabile intera, reale, logica o di tipo stringa. Peculiare di Netlogo è anche la modalità con cui si assegna un valore numerico alle variabili globali già dichiarate. In luogo della classica istruzione di assegnazione *nome-var = valore*, il metalinguaggio di Netlogo fornisce infatti l’istruzione *set nome-var valore*. La stessa istruzione vale anche per gli altri due tipi di variabili.

Le variabili locali esistono anch’esse in esemplari unici, come le variabili globali, ma al contrario di queste ultime sono visibili solo all’interno della procedura dove sono state dichiarate. Nelle ultime versioni di Netlogo la dichiarazione delle variabili locali si può effettuare in qualsiasi punto di una procedura e contemporaneamente si può assegnare loro un valore, il tutto per mezzo dell’istruzione *let nome-var valore*. Per modifiche successive al valore della variabile si dovrà invece usare, come già anticipato, l’istruzione *set nome-var valore*.

Le variabili proprietarie, infine, sono una caratteristica peculiare del metalinguaggio di Netlogo. Si tratta di particolari variabili globali riferite ad intere categorie di agenti e che esistono in più copie, una per ciascun agente (o istanza) della categoria. Netlogo dispone di due categorie di variabili proprietarie già definite di default e che si riferiscono alle due principali categorie di agenti: le turtles e le patches. Riguardo alle turtles, le variabili proprietarie predefinite servono ad indicarne l’identificativo (*who*), la posizione (*xcor*, *ycor*), l’orientamento (*heading*), il colore (*color*), la forma (*shape*), la dimensione (*size*) o l’etichetta (*label*). Per quanto riguarda le patches, invece, le variabili proprietarie definiscono solo le coordinate (*pxcor*, *pycor*), il colore (*pcolor*) e l’etichetta (*plabel*).

Le reali potenzialità del metalinguaggio di Netlogo risiedono però nella possibilità di definire altre variabili proprietarie sia per le turtles che per le patches, rispettivamente attraverso i blocchi:

turtles-own[nome-var1 nome-var2 ...]

patches-own[nome-var1 nome-var2 ...].

E’ inoltre possibile definire delle “sottospecie” (*breeds*) di turtles per mezzo del blocco *breed [nomespecie]*. Queste nuove specie, oltre ad ereditare dalle turtles tutte le loro variabili proprietarie predefinite, possono essere a loro volta munite di ulteriori variabili proprietarie definite dall'utente per mezzo del blocco *nomespecie-own[nome-var1 nome-var2 ...]*. Questi blocchi definiscono dei veri e propri nuovi insiemi di agenti, chiamati *agentset*, per i quali, come già accade di default per turtles e patches, sono previste tutta una serie di istruzioni e comandi predefiniti.

Per quanto riguarda le forme e i colori disponibili per gli agenti all'interno di Netlogo, le prime (*shapes*) sono disponibili solo per le turtles e possono essere o selezionate da un elenco situato all'interno dello *Shapes Editor* o create dall'utente (Fig. 66).

I colori sono invece disponibili sia per le turtles che per le patches (Fig. 67) e risultano caratterizzati da un numero (intero o decimale) che ne identifica la tonalità.

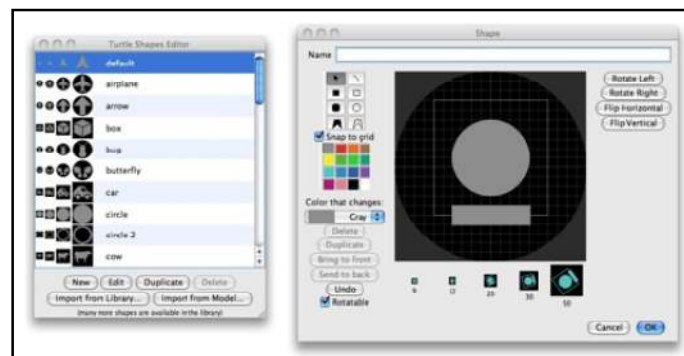


Fig. 66 - La finestra di dialogo dello Shapes Editor e la finestra che permette di creare nuove forme

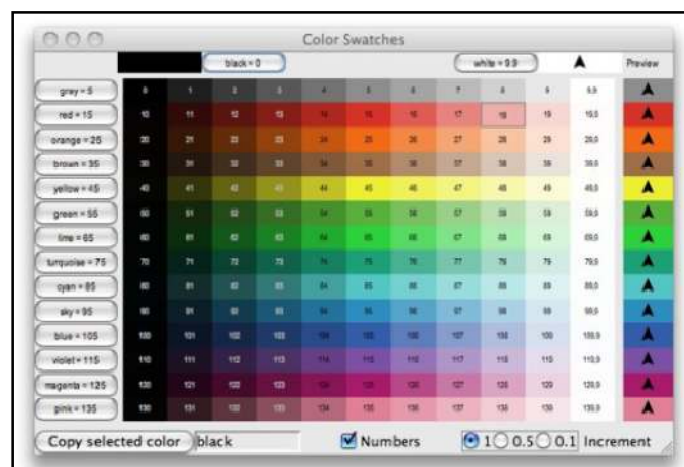


Fig. 67 - La finestra di dialogo Color Swatches

In NetLogo il codice di una simulazione risiede in un unico listato, suddiviso in procedure che possono essere destinate all’esecuzione da parte dell’observer, delle patches o delle turtles. E’ utile distinguere due diverse tipologie di procedure: le *subroutines* e i *reporters*.

Le subroutines sono costituite da una sequenza di comandi, cioè di azioni che gli agenti o l’observer devono compiere, delimitati una riga contenente la parola chiave to seguita dal nome della subroutine (all’inizio), e dalla parola chiave end (alla fine). Ad esempio:

to Nome Subroutine

comando 1

comando 2

.....

end

Le subroutines possono essere richiamate dall’interno di altre subroutines oppure, direttamente dall’interfaccia grafica per mezzo della pressione di un pulsante (button). La loro caratteristica principale è che possono accettare valori in ingresso ma non restituiscono direttamente alcun valore in uscita. Di fondamentale importanza per l’implementazione di un modello in NetLogo sono il pulsante *Setup* e il pulsante *Go*. Questi pulsanti sono collegati rispettivamente alle due subroutines principali di una simulazione di Netlogo, che di solito prendono lo stesso nome:

- la subroutine *setup*, che serve a dichiarare ed inizializzare le variabili globali e quelle proprietarie, la griglia del World e gli eventuali grafici (plot o istogrammi) presenti nel modello; di solito serve anche ad inizializzare le patches e le turtles che verranno usate nella simulazione, fissandone le condizioni iniziali, la posizione, la forma, etc.
- la subroutine *go*, che serve a fare partire la simulazione vera e propria, cioè a far muovere le turtles, a far cambiare stato alle patches e a tracciare le curve dei grafici;

Per quanto riguarda i Reporters, questi sono composti da sequenze ordinate di comandi come le subroutines ma, a differenza di quest’ultime, ricevono più spesso degli inputs in ingresso e soprattutto restituiscono sempre un valore in uscita, come risultato delle operazioni in essi contenute, per mezzo del comando *report*. L’aspetto tipico di un reporter è il seguente:

to-report Nome Function [input1 input2 ...]

comando 1

comando 2

.....

report valore-in-uscita

end

Passiamo adesso ad introdurre le principali strutture per il controllo di flusso fornite dal metalinguaggio di Netlogo e mostrate in Fig. 68.

```

if condition [ commands ]           ...dove condition è un'espressione boo.eia
ifelse condition [ commands1 ] [ commands2 ]
ifelse-value condition [ value1 ] [ value2 ]
loop [ commands ]                   ...per uscire dal loop si usa il comando stop
repeat number [ commands ]
while [ conditions ] [ commands ]
foreach list [ commands ]           ; si applica agli elementi di 'liste' tipo
                                     ; mylist = [2 7 10 "Bob" ]. Con:
                                     ; set mylist lput 42 my-list
                                     ; mylist diventa [2 7 10 "Bob" 42]

```

sono in pratica degli array

Fig. 68 - Principali strutture per il controllo di flusso

Come si può vedere Netlogo prevede innanzitutto tre tipi diversi di istruzioni condizionali:

- *if condizione [comandi]*: è il tipo più semplice, in quanto richiede soltanto di specificare una condizione (che deve restituire un valore di tipo booleano, cioè true o false) e un blocco di comandi che vengono eseguiti solo se la condizione è vera (true);
- *ifelse condizione [comandi1] [comandi2]*: oltre alla condizione e al primo blocco di comandi da eseguire se la condizione è vera, richiede di specificare anche un secondo blocco di comandi da eseguire se la condizione è falsa;
- *ifelse-value condizione [valore1] [valore2]*: si comporta come un reporter, che a seconda del fatto che la condizione sia vera o falsa, restituisce direttamente il valore1 o il valore2;

e quattro tipi diversi di strutture iterative:

- *loop [comandi]*: consente di iterare un blocco di comandi per un numero indefinito di volte, a meno che all'interno del blocco non venga inserita una istruzione condizionale che, al verificarsi di certe condizioni, attivi il comando *stop*, nel qual caso si esce dalla

procedura in cui ci si trova (si badi bene: si esce dalla intera procedura e non solo dal blocco loop, il che a volte può rappresentare un problema e quindi limita l'utilizzo dell'istruzione loop);

- *repeat num-volte [comandi]*: ripete il blocco dei comandi un numero di volte pari al valore della variabile intera “num-volte”;
- *while [condizione] [comandi]*: ripete il blocco dei comandi finché la condizione è vera ed esce appena la condizione diventa falsa;
- *foreach nome-lista [comandi]*: ripete il blocco dei comandi per ogni elemento della lista nome-lista.

Per concludere si sottolinea il fatto che è possibile approfondire la conoscenza di NetLogo e del suo metalinguaggio consultando il dizionario ipertestuale di primitive disponibile nello *User Manual* di Netlogo, che appare all'utente come mostrato in Fig. 69.

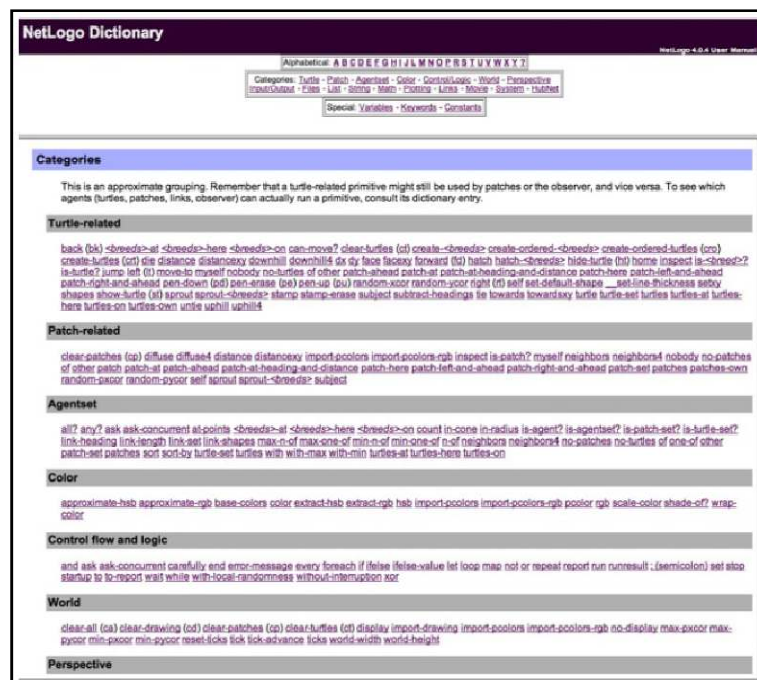


Fig. 69 - Il dizionario di primitive disponibile nello User Manual di Netlogo

4.3 La topologia della rete: il paradosso di Braess

Per quanto riguarda la topologia della rete di trasporto su cui costruire il modello di simulazione ad agenti, la nostra scelta è ricaduta sulla rete con cui Braess nel 1968 mostrò il noto paradosso. Questo consiste nel fatto che, in una semplice rete a forma di rombo, sotto determinate condizioni, l’aggiunta di una nuova infrastruttura (una diagonale del rombo) induce un aumento dei costi per gli spostamenti compiuti tra una predefinita coppia OD.

Come può evincersi dalla letteratura scientifica di riferimento [71] [72] [73] (Fig. 70), per capire tramite la simulazione ad agenti quale impatto possa avere su una rete di trasporto fornire informazioni ai guidatori, non è opportuno prendere in considerazione reti dalla topologia complessa; la complessità del sistema è, infatti, insita nella dinamica con cui gli agenti reagiscono alle informazioni ed apprendono dall’esperienza pregressa ed anzi, modellizzare reti dalla topologia eccessivamente complessa potrebbe risultare svantaggioso per le finalità della ricerca.

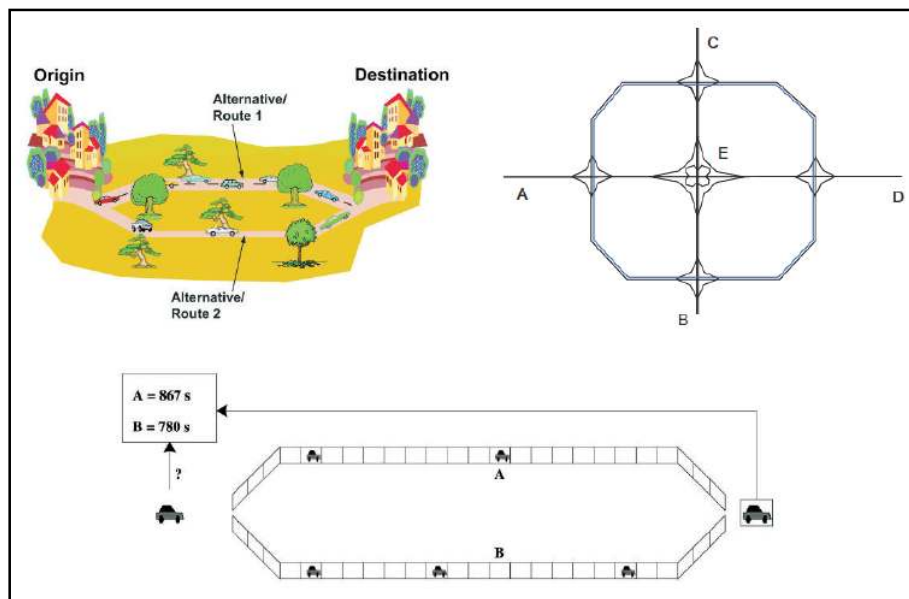


Fig. 70 - Esempi della topologia delle reti di traffico considerate in letteratura [71] [72] [73]

Il problema della determinazione dei flussi di equilibrio in una rete stradale consiste nel determinare, data una fissata domanda di spostamenti per ciascuna coppia di nodi Origine-Destinazione (OD) della rete, i flussi di traffico sugli archi in accordo con un usuale criterio di equilibrio secondo il principio di Wardrop.

In accordo cioè con il principio che nessun utente possa ridurre i propri costi con una decisione unilaterale di cambiare il proprio percorso. Il costo dello spostamento dipende in maniera ben determinata dall’equilibrio dei flussi.

Conseguenza di questo principio è che, all’equilibrio, tutti gli utenti di una medesima OD presenteranno lo stesso costo per effettuare lo stesso spostamento, indipendentemente dal percorso seguito.

Si è naturalmente portati a pensare che, ad un incremento nella domanda di spostamenti, corrisponderà sempre un aumento dei costi necessari per effettuarli, mentre alla costruzione di una nuova infrastruttura stradale si associa una riduzione della congestione del traffico e, di conseguenza, un decremento dei costi per effettuare gli spostamenti.

In realtà, la non linearità del “sistema trasporti” rende le cose complesse e poco intuitive.

Braess, prese in esame la rete di trasporto di Fig. 71, dove esistono 2 percorsi per andare da A a D, uno che passa attraverso B e l’altro attraverso C. Sugli archi della rete sono indicati i tempi unitari di percorrenza, che sono della forma $a + bx$, dove x è il flusso di veicoli che attraversa gli archi ed a e b sono delle costanti. Come si vede il tempo di percorrenza ha una componente costante ed una dipendente dal numero di veicoli che transitano sull’arco, cioè dalla congestione. Ad esempio nell’arco (A-B) il tempo di percorrenza che ciascun veicolo sperimenta vale $1 + 5 = 6$ se l’arco viene percorso da un solo veicolo, vale invece $1 + 5 * 3 = 16$, se esso è utilizzato da 3 veicoli.

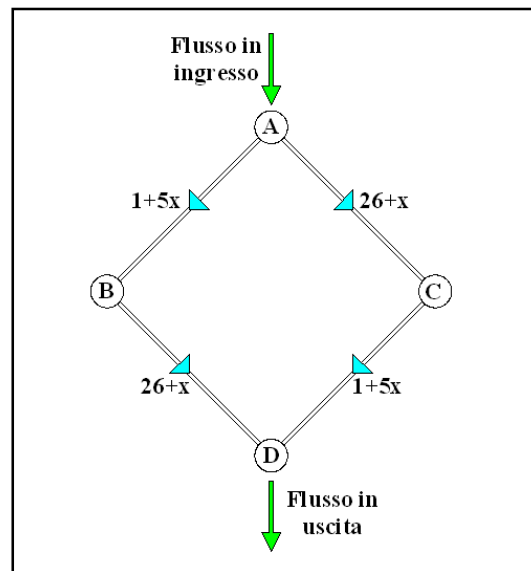


Fig. 71 - La rete del paradosso di Braess

Per mostrare la consistenza del paradosso facciamo un esempio banale: immaginiamo che ci siano 6 persone che ogni mattina alla stessa ora si devono recare da A a D (il tipico percorso casa-lavoro dell'ora di punta della mattina) e che lo facciano usando la propria auto. Ciascuna di esse presumibilmente cercherà di scegliere il percorso più breve (in termini di tempo di percorrenza) e possiamo immaginare che inizi, nei primi giorni, facendo dei tentativi fino a stabilizzarsi alla fine sul percorso che gli appare più breve.

Dopo un certo tempo viene così raggiunta una situazione di equilibrio caratterizzata dal fatto che nessuno dei sei guidatori riuscirebbe a migliorare la sua situazione cambiando percorso. L'assunzione qui è che i guidatori non comunichino fra di loro e che quindi non possano mettersi d'accordo: ciascuno si preoccupa solamente di se stesso e del proprio percorso (comportamento competitivo).

E' facile verificare che una situazione di equilibrio si ha quando tre guidatori scelgono il percorso A-B-D e gli altri tre il percorso alternativo A-C-D. In questo caso ciascuno impiega $27+6*3 = 45$ unità di tempo.

La situazione è riassunta nella seguente Tab. 14.

Percorso	n° di viaggiatori	Tempo di percorrenza
A-B-D	3	45
A-C-D	3	45

Tab. 14 - Costo dei percorsi all'equilibrio per la rete di Braess a due percorsi

Immaginiamo ora che, per diminuire la congestione del traffico e le esternalità ad essa associate, si realizzi un tratto di strada fra B e C, una strada così ampia che il tempo di percorrenza sia sempre pari ad 1 indipendentemente dal traffico. La situazione diventa allora quella della Fig. 72.

Ma la nuova strada migliora davvero la situazione del traffico? L'intuizione suggerisce che se non la migliora comunque non la può peggiorare dato che i guidatori possono sempre astenersi dall'usarla. Vediamo nei fatti cosa accade, esaminando il comportamento degli utenti che si trovavano nella situazione di equilibrio descritta precedentemente. Immaginiamo che il loro cambiamento di percorso avvenga step by step.

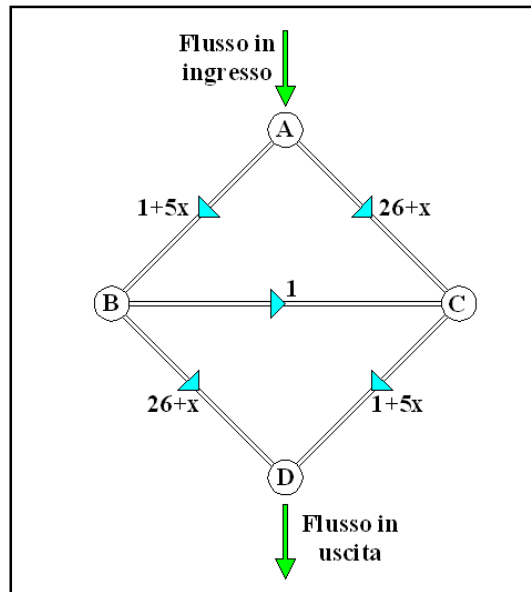


Fig. 72 - La rete del paradosso di Braess con l’aggiunta dell’arco B-C

Anzitutto osserviamo che quella che prima era una situazione di equilibrio, ora non lo è più. È stato, infatti, aggiunto il percorso: A-B-C-D. Se uno dei guidatori che prima seguivano il percorso A-B-D decidesse ora di non andare direttamente da B a D, ma piuttosto di passare per C, passerebbe da un tempo di percorrenza di 45 unità di tempo ad un tempo di percorrenza di 38, guadagnando così 7 unità di tempo. Questo, naturalmente, nell’ipotesi che gli altri guidatori non cambiano il loro percorso.

Infatti, seguendo il nuovo percorso, il guidatore impiegherebbe $1 + 5 * 3 = 16$ unità di tempo ad andare da A a B, una unità di tempo per andare da B a C e $1 + 5 * 4 = 21$ per l’ultimo tratto da C a D (qui si aggiunge agli altri 3 guidatori che seguono il percorso A-C-D). Abbiamo allora la situazione riportata in Tab. 15:

Percorso	n° di viaggiatori	Tempo di percorrenza
A-B-D	2	44
A-C-D	3	50
A-B-C-D	1	38

Tab. 15 - Costo dei percorsi (Step I) per la rete di Braess a tre percorsi

Osserviamo che per effetto della scelta di uno dei guidatori, quelli che sono rimasti sul percorso A-B-D hanno guadagnato una unità di tempo, ma quelli che seguivano il percorso A-C-D ne hanno

perse 5 e risultano quindi penalizzati. Immaginiamo ora che uno di questi ultimi decida di cambiare percorso seguendo l’itinerario A-B-C-D, con il risultato di avere un tempo di percorrenza di 43 unità e quindi ottenendo un risparmio di 7 unità di tempo. La situazione è allora quella della Tab. 16:

Percorso	n° di viaggiatori	Tempo di percorrenza
A-B-D	2	49
A-C-D	2	49
A-B-C-D	2	43

Tab. 16 - Costo dei percorsi (Step II) per la rete di Braess a tre percorsi

Possiamo ora assumere che uno di coloro che seguivano il percorso A-B-D decida di passare ad A-B-C-D migliorando il suo tempo di percorrenza di una unità di tempo passando a livello 48. Lo stesso vale per il viaggiatore che continua a seguire il percorso A-B-D. La nuova situazione è la seguente (Tab. 17):

Percorso	n° di viaggiatori	Tempo di percorrenza
A-B-D	1	48
A-C-D	2	54
A-B-C-D	3	48

Tab. 17 - Costo dei percorsi (Step III) per la rete di Braess a tre percorsi

Il tempo di percorrenza per coloro che seguivano il percorso A-C-D è però cresciuto di 5 unità di tempo. Di conseguenza uno di loro si sposterà sul percorso A-B-C-D per migliorare la propria condizione, riuscendo in effetti a risparmiare una unità di tempo. La nuova condizione è quella della seguente Tab. 18, che rappresenta una situazione di equilibrio stabile.

Questi spostamenti successivi in cui ciascuno ha cercato di migliorare la propria situazione hanno portato ad un incremento dei tempi di percorrenza per ciascuno dei guidatori. Globalmente mentre prima le 6 auto impiegavano $45 \cdot 6 = 270$ unità di tempo per muoversi da A a D, ora ne impiegano $53 \cdot 6 = 318$, cioè ben 48 in più. Alla fine si è ottenuto un peggioramento complessivo della congestione ed un incremento delle esternalità negative, cioè l’opposto di ciò che si voleva ottenere.

Percorso	n° di viaggiatori	Tempo di percorrenza
A-B-D	1	53
A-C-D	1	53
A-B-C-D	4	53

Tab. 18 - Costo dei percorsi all’equilibrio per la rete di Braess a tre percorsi

Chiaramente l'esempio fatto ha un valore solo teorico, ma è importante notare che la situazione potrebbe essere migliorata se tutti i guidatori si mettessero d'accordo, cioè se cooperassero tra loro.

La scelta di costruire il nostro modello di simulazione ad agenti su una rete di trasporto che riprenda la topologia della rete di Braess è dovuta anzitutto all’interesse che il paradosso suscita da anni nell’ambito della ricerca. Di questo paradosso sono stati presentati da Murchland (1970), Stewart (1980), Frank (1981), etc. delle varianti, sia con riferimento alla topologia della rete che alle funzioni di costo, ottenendo il medesimo risultato.

Nell’ottica di limitare gli effetti negativi che, ad esempio, emergono dall’analisi del paradosso di Braess cioè per incentivare il comportamento cooperativo dei guidatori rispetto a quello competitivo e per ottimizzare la distribuzione dei flussi di traffico sulle reti di trasporto, i sistemi di informazione ai guidatori si pongono come uno strumento innovativo e dalle grandi potenzialità.

In questo senso, come vedremo di seguito, saranno presi in esame gli effetti (vantaggiosi o svantaggiosi) che diverse strategie di informazione possono determinare, in termini di tempi di percorrenza, su una rete di trasporto avente la medesima topologia rispetto alla rete di Braess.

Ci preme sottolineare che, come vedremo, verificare il manifestarsi del paradosso di Braess è stato il primo risultato ottenuto dalla simulazione ad agenti condotta nel presente lavoro e che questo risultato ha, in parte, contribuito a validare la calibrazione dei parametri (velocità, accelerazione, decelerazione, flusso in ingresso, etc.) propri del moto dei veicoli a livello microscopico (microscopic layer).

Capitolo V

5 CASO STUDIO E RISULTATI

Il modello di simulazione sviluppato nel presente lavoro di ricerca è il risultato di un processo complesso, evolutosi step by step a seguito anche del prezioso contributo apportato dai Proff. Alessandro Pluchino ed Andrea Rapisarda del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Catania. In verità, tale sviluppo potrebbe non considerarsi esaurito in quanto, mantenendo la struttura di base del modello, è comunque possibile apportare delle modifiche al modello per studiarne nuove forme e nuovi scenari.

Quindi, si espliciteranno le caratteristiche fisico-geometriche del modello (paragrafo 5.1), le strategie di informazione ed i modelli di scelta del percorso (paragrafo 5.2) ed, infine, si esporrà in merito alle simulazioni ed all’analisi dei risultati ottenuti (paragrafo 5.3).

Per comprendere meglio la logica con cui sono state sviluppate diverse versioni del modello, procederemo nella nostra esposizione in maniera sequenziale, partendo dal primo degli obiettivi che ci siamo prefissati (verificare il manifestarsi del paradosso di Braess e studiare l’impatto che un sistema di informazione ai guidatori determina sulla rete) per poi analizzare, sulla base sugli spunti provenienti dai risultati stessi, nuovi scenari del modello, caratterizzati da diverse strategie di informazione e di scelta del percorso.

Si riporta in APPENDICE I la pubblicazione scientifica: D. Buscema, M. Ignaccolo, G. Inturri, A. Pluchino, A. Rapisarda, C. Santoro, S. Tudisco. “The impact of real time information on transport network routing through Intelligent Agent-Based Simulation” – 2009 IEEE Toronto International Conference – Science and Technology for Humanity.

L’APPENDICE II e l’APPENDICE III riportano gli script dell’interfaccia di programmazione (metalinguaggio NetLogo) relativi alle due versioni definitive (che indichiamo con “A e “B”), tra le molteplici sviluppate, del modello di simulazione.

5.1 Caratteristiche fisico-geometriche del modello

Le Fig. 73 e Fig. 74 mostrano l’interfaccia di simulazione in NetLogo dei modelli sviluppati.

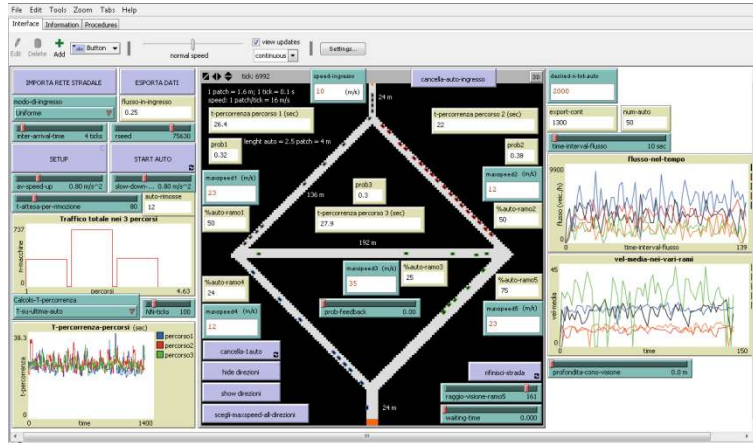


Fig. 73 - Interfaccia di simulazione in NetLogo (versione A del modello)

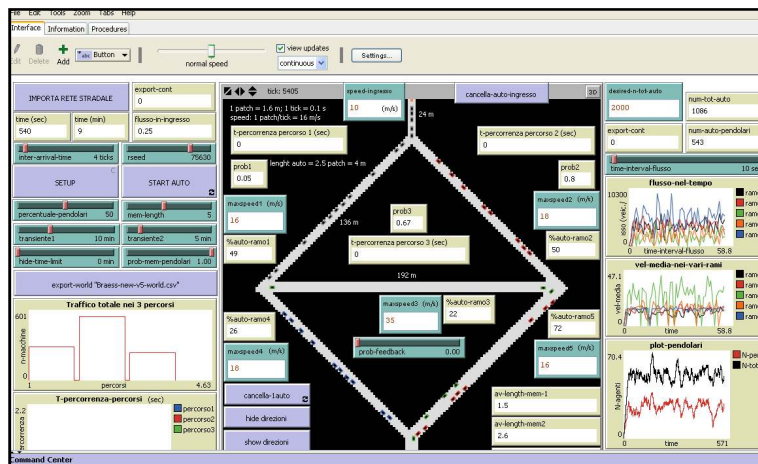


Fig. 74 - Interfaccia di simulazione in NetLogo (versione B del modello)

Per quanto riguarda l’ambiente di simulazione (world) si è scelta una topologia della griglia cilindrica, cioè limitata in direzione orizzontale ed illimitata in direzione verticale (secondo il verso di ingresso ed uscita dei veicoli), fissando una origine del sistema di riferimento baricentrica (Fig. 75).

Le dimensioni del world sono state fissate in 150 pixel sia verticalmente che orizzontalmente, pertanto, ciascuna patch si è assunto che abbia una dimensione pari a 3,83 pixel (Fig. 75).

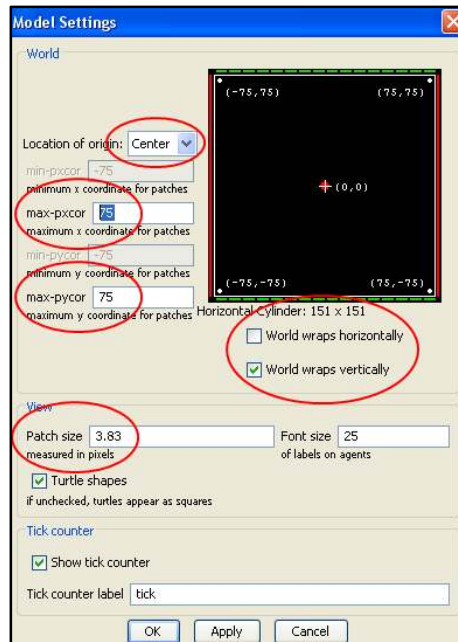


Fig. 75 - La finestra Model Settings

Posto che la topologia della rete sia quella con cui Braess mostrò il noto paradosso, si è scelta una geometria della rete di forma quadrata. La dimensione di ciascun agente (veicolo) è stata fissata pari a 2,5 patch. Pertanto, assumendo che la lunghezza di un veicolo possa essere in media pari a 4 metri, risultano (Fig. 76):

- ciascuna patch di lunghezza pari 1.6 metri;
- i quattro archi simmetrici della rete di lunghezza pari a 136 metri;
- l’arco centrale della rete di lunghezza pari a 192 metri.

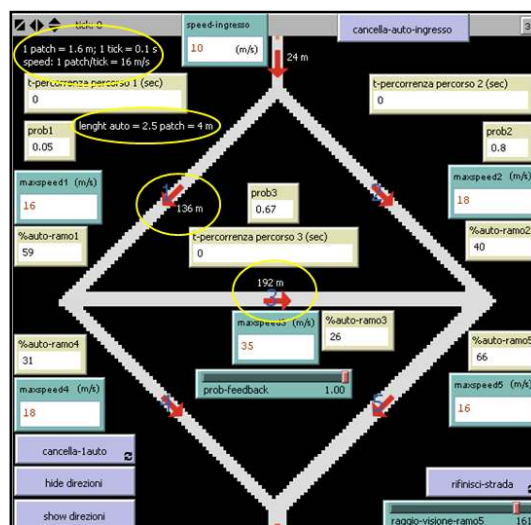


Fig. 76 - Dimensioni reali di patch, auto, archi della rete, ticks

Per quanto riguarda il contatore temporale proprio del software, si è posto che ogni tick corrisponda ad un intervallo di tempo pari a 0,1 sec (Fig. 76).

Pertanto, avendo fissato le unità di misura spazio-temporali, un agente che si muove nell’intervallo temporale di un tick di uno spazio pari ad una patch, avrà una velocità pari a:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{1.6}{0.1} = \frac{16m}{s} = 57,6 \text{ Km/h}$$

L’ingresso dei veicoli nella rete può avvenire secondo due diverse modalità: in maniera uniforme, fissato un intervallo temporale di riferimento, ovvero secondo una distribuzione di probabilità di tipo Poissoniano intorno ad un valore medio. Sia l’intervallo temporale di riferimento per la modalità di ingresso uniforme che il valore medio nel caso di ingresso Poissoniano sono assegnati tramite uno slider (Fig. 77).

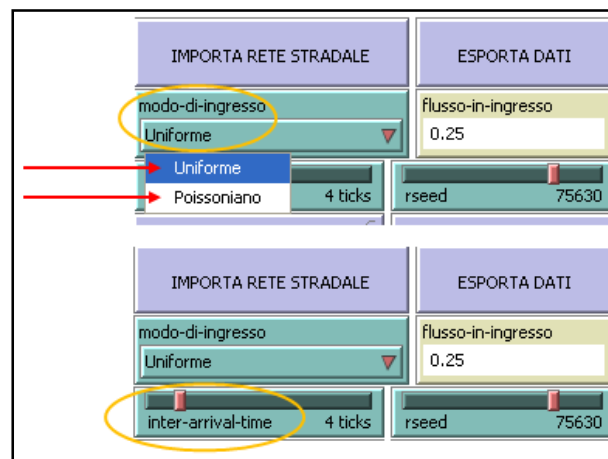


Fig. 77 - Modalità di ingresso dei veicoli

Per quanto riguarda il moto dei veicoli, si è detto che questi, in pieno accordo con l’approccio bottom-up proprio della simulazione ad agenti, si muovono seguendo semplici regole fondate sui modelli di micro simulazione (microscopic layer).

Nel caso specifico i veicoli, sulla base di un modello car following semplificato, si muovono sulla rete secondo la logica di viaggiare alla velocità massima loro consentita (velocità desiderata) qualora davanti a se non trovino alcun veicolo ovvero, qualora trovino davanti a se un veicolo più lento, di adeguare la propria velocità e di accodarsi.

Nel modello è possibile assegnare delle velocità caratteristiche (Fig. 78) per ciascun ramo della rete, quindi, per rendere la simulazione più aderente alle reali condizioni di deflusso, i veicoli adottano

una velocità desiderata variabile entro un range di 1/5 della velocità caratteristica del ramo, secondo una distribuzione normale di probabilità (valore medio pari alla velocità caratteristica del ramo, varianza 1/5 del valore medio).

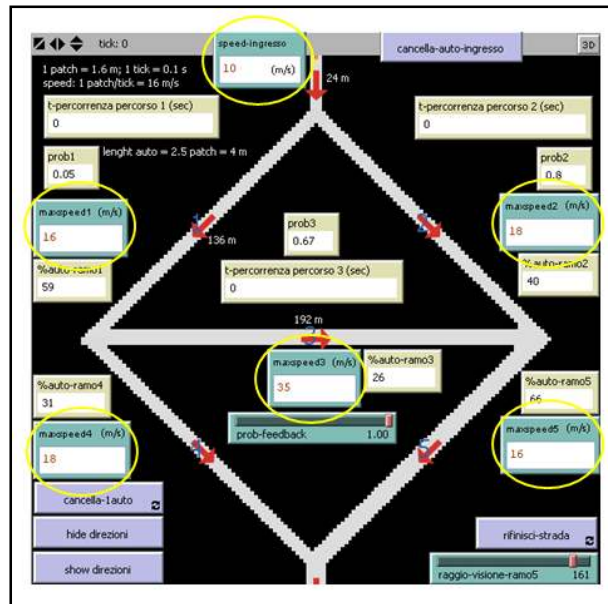


Fig. 78 - Velocità caratteristiche sugli arche della rete

Infine, per quanto attiene alla micro-simulazione dei veicoli, è possibile assegnare dei valori caratteristici di accelerazione e decelerazione tramite gli slider mostrati in Fig. 79.

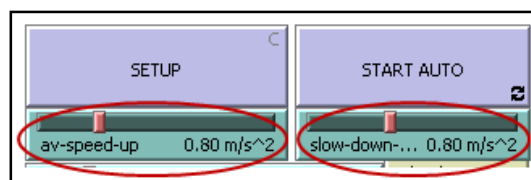


Fig. 79 - Slider accelerazione e decelerazione

In primo luogo si è proceduto con la calibrazione del modello in modo da stabilire dei valori corretti di accelerazione, decelerazione, valore medio e varianza (quest’ultima si è già detto che è stata assunta pari ad 1/5 del valore medio) della velocità sui rami della rete, flusso in ingresso.

In questo senso, si è proceduto verificando che:

- si determinasse nelle simulazioni una corrispondenza con le curve teoriche di deflusso (modello di Greenshield);

- fosse verificato il paradosso di Braess (di fatto, le velocità caratteristiche sugli archi della rete ne rappresentano le funzioni di costo).

Si è verificato che, in base alle caratteristiche fisico-geometriche del presente modello, entrambe le precedenti condizioni risultano verificate (Fig. 80 per la prima condizione, della seconda sarà detto in maniera dettagliata nel prosieguo della trattazione dopo avere introdotto ulteriori in peculiarità del modello di simulazione) in maniera abbastanza robusta, fissando per accelerazione e decelerazione un valore pari a $0,8 \text{ m/s}^2$, scegliendo la modalità di ingresso delle auto di tipo uniforme con frequenza pari ad un’auto ogni 4 ticks, fissando la velocità caratteristica degli archi 1 e 5 pari a 16 m/s , degli archi 2 e 4 pari a 18 m/s , dell’arco 3 pari a 35 m/s e, come detto, una velocità desiderata variabile entro un range di $1/5$ della velocità caratteristica degli archi.

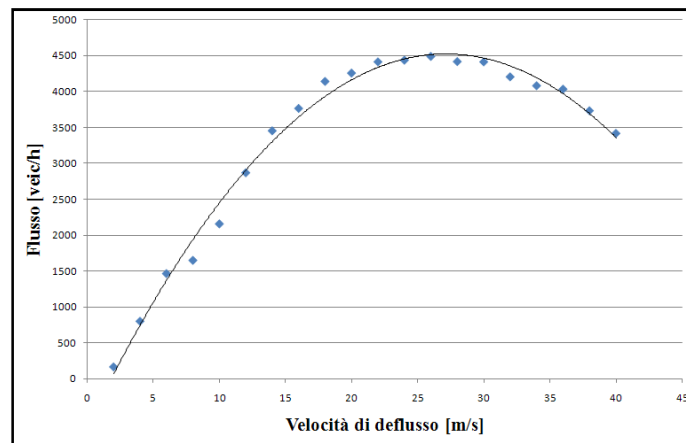


Fig. 80 - Velocità di deflusso-flusso su un arco della rete

5.2 Gli scenari: strategie di informazione e modelli di scelta del percorso

Passiamo adesso ad analizzare le caratteristiche del modello di simulazione ad agenti con cui è possibile riprodurre le strategie di scelta del percorso dei guidatori sulla base delle informazioni che ricevono da un sistema di informazione ITS o, relativamente allo scenario IV, sulla base delle condizioni locali di traffico che verosimilmente un guidatore è in grado di stimare.

Sono stati simulati ed analizzati 5 scenari differenti, le cui caratteristiche sono riportate nella seguente Tab. 19.

La sequenza degli scenari non è, come vedremo in dettaglio nel paragrafo successivo, casuale ma, dopo aver verificato il manifestarsi del paradosso di Braess (operazione fondamentale anche con riferimento alla calibrazione di alcuni parametri del modello) ed analizzato l’impatto che una iniziale strategia di informazione ai guidatori determina sulle performance della rete (scenari I e II), sulla base dei risultati trovati e dei fenomeni emersi si sono, procedendo step by step, introdotte nuove funzionalità nel modello per simulare strategie di informazione e di scelta del percorso alternative (scenari III, IV, V).

Di centrale importanza nel modello è la probabilità di feedback, variabile in maniera continua mediante uno slider tra i valori 0 ed 1 (Fig. 81).

Nel caso in cui la probabilità di feedback sia impostata pari a 0, i veicoli giungendo in ciascun nodo ove è necessario effettuare una scelta (Fig. 81), la effettueranno in maniera random. Qualora suddetta probabilità venga impostata su un valore diverso da zero (ad esempio pari a 0.3), la corrispondente percentuale di veicoli (nell’esempio il 30%) sceglierà il percorso sulla base delle informazioni fornitegli riguardo ai tempi di percorrenza mentre la restante percentuale di veicoli (il 70 %) continuerà ed effettuare le proprie scelte in maniera random.

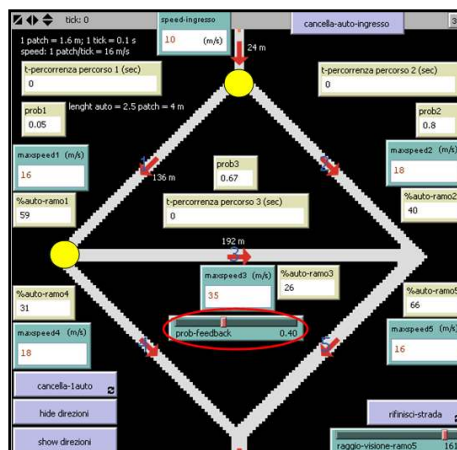


Fig. 81 - Nodi di scelta del percorso e slider per settare la probabilità di feedback

SCENARI SIMULATI	Peculiarità dello scenario		
	Configurazione della rete	Numero di percorsi	Tipologia di informazioni – modello di scelta del percorso
Scenario I	4 nodi; 4 archi	2	<ul style="list-style-type: none"> • Informazioni sui tempi di percorrenza fornite dall’ultimo veicolo transitato dalla rete. • Scelta del percorso: aliquota f → feedback, aliquota (1-f) → random
Scenario II	4 nodi; 5 archi	3	<ul style="list-style-type: none"> • Informazioni sui tempi di percorrenza fornite dall’ultimo veicolo transitato dalla rete. • Scelta del percorso: aliquota f → feedback, aliquota (1-f) → random
Scenario III	4 nodi; 5 archi	3	<ul style="list-style-type: none"> • Informazioni sui tempi di percorrenza fornite dalle auto sonda • Scelta del percorso: aliquota f → feedback, aliquota (1-f) → random
Scenario IV	4 nodi; 5 archi	3	<ul style="list-style-type: none"> • Informazioni sulle condizioni locali di traffico (profondità del cono di visione pari a 25 m) e sui tempi di percorrenza fornite dall’ultimo veicolo transitato dalla rete • Scelta del percorso: se significative, sulla base delle condizioni locali di traffico; viceversa aliquota f → feedback, aliquota (1-f) → random
Scenario V	4 nodi; 5 archi	3	<ul style="list-style-type: none"> • Informazioni sui tempi di percorrenza registrati in memoria dal sistema • Scelta del percorso: aliquota f → feedback, aliquota (1-f) → random

Tab. 19 - Peculiarità degli scenari simulati

Ciascun “veicolo informato” confronterà le tre quantità (probabilità di scelta del percorso) di seguito riportate e sceglierà il percorso a cui corrisponde la probabilità maggiore (Fig. 82 in verde):

$$P_1 = \frac{\frac{1}{t_1}}{\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3}} ; P_2 = \frac{\frac{1}{t_2}}{\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3}} ; P_3 = \frac{\frac{1}{t_3}}{\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} + \frac{1}{t_3}}$$

I tempi di percorrenza t_1, t_2, t_3 (Fig. 82 in giallo) possono essere determinati secondo due modalità differenti (Fig. 82 in rosso).

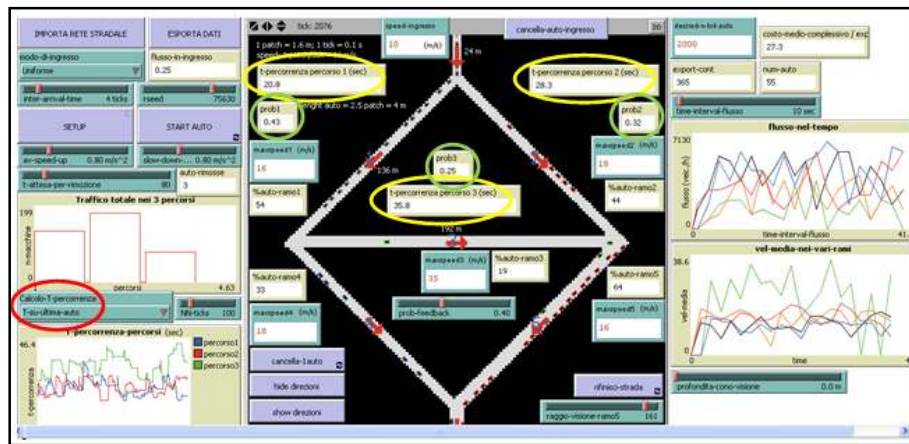


Fig. 82 - Strategie di informazione, tempi di percorrenza e probabilità di scelta dei percorsi

La prima di queste (real-time information) prevede che ciascun veicolo transitato dalla rete, una volta uscito da questa, fornisca al sistema l’informazione sul tempo di percorrenza del proprio itinerario. Il sistema, ad ogni informazione ricevuta sui tempi t_1, t_2, t_3 , modifica le quantità P_1, P_2, P_3 ed, in base al valore della probabilità di feedback, fornisce queste informazioni ad una percentuale di veicoli che entrano nella rete.

Una seconda modalità di diffusione delle informazioni vede la presenza nella rete di 3 “veicoli sonda” (Fig. 83), a ciascuno dei quali è assegnato di percorrere uno dei tre possibili itinerari, a prescindere dei tempi di percorrenza sulla rete. In maniera continua, appena un veicolo sonda esce dalla rete, trasferisce l’informazione sul proprio tempo di percorrenza al sistema e, simultaneamente, ne viene introdotto uno nuovo.

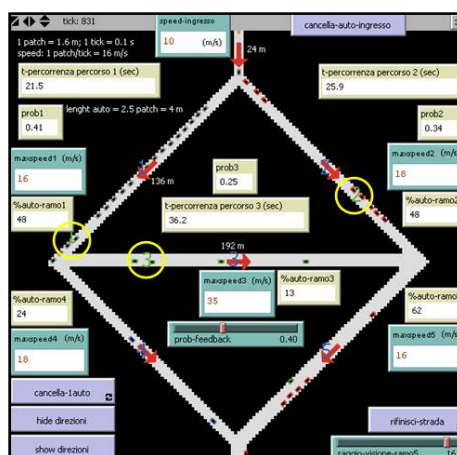


Fig. 83 - Le auto sonda

Inoltre, nel presente modello è stata introdotta una importante funzione che permette di simulare il comportamento di quei guidatori che, pur avendo a disposizione le informazioni sui tempi di percorrenza degli itinerari della rete, decidono di compiere le proprie scelte basandosi sul percorso che ritengono essere meno trafficato. In questo modo si è cercato di riprodurre il comportamento di quegli utenti che preferiscono fidarsi di ciò che vedono con i propri occhi per effettuare la scelta del percorso.

Pertanto, tali guidatori giunti in prossimità di un nodo di scelta (Fig. 81), hanno la capacità di contare il numero di veicoli che, entro un “cono di visione” la cui profondità è possibile impostare mediante uno slider (Fig. 84), ricadono sui percorsi loro disponibili e scelgono il percorso che, nei dintorni del nodo di scelta, risulta essere meno trafficato. Qualora si verifichi che entro il cono di visione ricadano il medesimo numero di veicoli, gli utenti sceglieranno il percorso sulla base delle informazioni fornite loro dall’ITS secondo una delle due modalità anzidette.

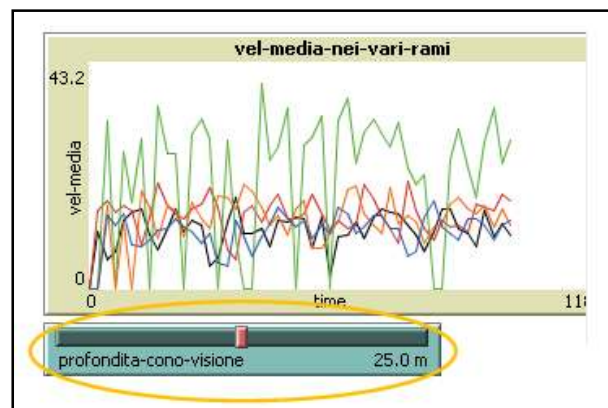


Fig. 84 - Lo slider per settare la profondità del cono di visione

Infine, si comprenderà meglio in appresso il motivo di questa scelta, nello scenario V si è scelto di riprodurre un modello di scelta del percorso basato su una memoria storica propria di ciascun agente.

In questa versione del modello (B) sono state introdotte nuove funzionalità ed, in particolare, gli slider transiente e mem-length (Fig. 85).



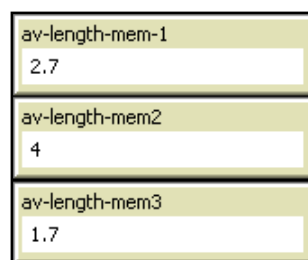
Fig. 85 - Gli slider transiente e mem-length

Durante la fase “transiente”, sia gli agenti muniti di feedback o, per meglio dire in questo caso, di memoria, che gli agenti non muniti di feedback effettuano la scelta del percorso in maniera random. I primi, però, registrano i tempi di percorrenza che hanno rilevato su una memoria a breve termine relativa a ciascun percorso (in realtà sarà sempre un sistema centrale, ad esempio georeferenziato col veicolo, ad acquisire i dati rilevati sui tempi di percorrenza, ad elaborarli e, successivamente, a fornire le informazioni).

La memoria anzidetta è rappresentata da una lista (array), di lunghezza variabile tramite lo slider `mem-length`, che abbiamo fissato pari a 5. In questo modo il sistema registra cinque esperienze (tempi di percorrenza) per percorso ed ogni nuova esplorazione della rete aggiorna il registro relativo al percorso scelto, andando a sostituire l’informazione più vecchia.

La durata della fase “transiente”, calibrata (mediante i monitor in Fig. 86) in maniera da essere sufficiente al riempimento completo delle tre memorie (5 tempi di percorrenza su ciascun percorso), è stata impostata pari a 15 minuti (9000 ticks).

Ciascun veicolo munito di memoria una volta uscito dalla rete vi rientrerà dopo un intervallo di tempo pari ad 1 minuto (600 ticks). Questa scelta non è stata fatta in maniera arbitraria in quanto si è appurato che ai fini dei risultati non è significativa la frequenza con cui i veicoli muniti di memoria attraversano la rete ma, piuttosto, la percentuale di veicoli muniti di memoria presenti sulla rete (fissata tramite la probabilità di feedback) rispetto ai veicoli che scelgono i percorsi in maniera casuale. Per fare chiarezza, alla fine di un generico ciclo n -esimo relativo ad un veicolo x , il sistema calcolerà il tempo medio di percorrenza rispetto all’ n -esimo aggiornamento dei valori presenti su ciascuna delle tre liste e, all’inizio del ciclo $(n+1)$ -esimo fornirà al veicolo x l’informazione sul percorso più conveniente in termini di tempo di percorrenza.



av-length-mem-1	2.7
av-length-mem2	4
av-length-mem3	1.7

Fig. 86 - Monitor per la verifica del riempimento della memoria nella fase “transiente”

Per quanto riguarda tutte le variabili random del modello, tramite uno slider è possibile variare il “seme” della distribuzione random (Fig. 87).

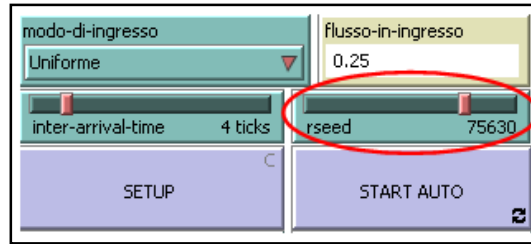


Fig. 87 - Lo slider per variare il seme della distribuzione random

I principali dati di output forniti dal modello sono:

- i tempi di percorrenza dei tre percorsi, forniti sia in modo puntuale (Fig. 82 in giallo) che mediante un diagramma al variare del tempo (Fig. 88);

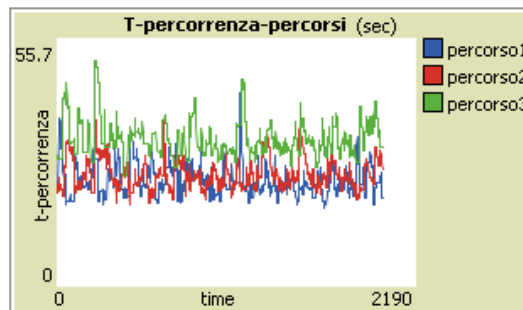


Fig. 88 - Diagramma tempo della simulazione-tempi di percorrenza sui percorsi

- il numero di veicoli presenti sulla rete ad ogni tick (Fig. 89 in giallo) e la percentuale di veicoli presenti su ciascun ramo della rete (Fig. 89 in rosso);

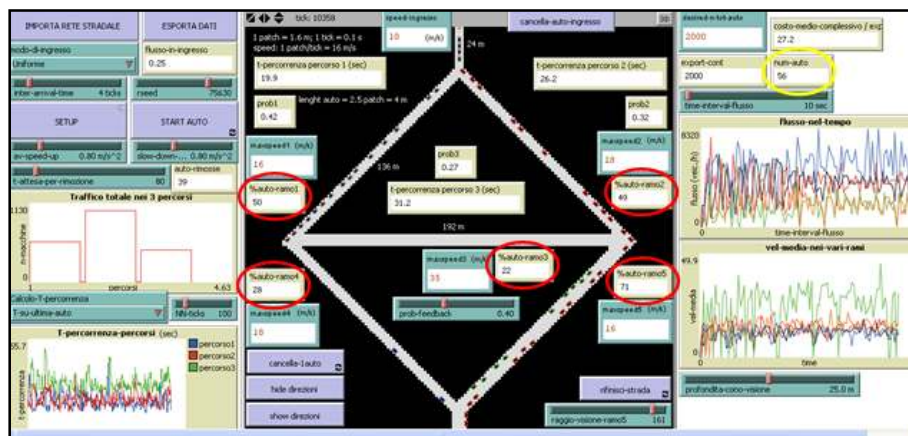


Fig. 89 - Numero di veicoli presenti sulla rete, percentuale di veicoli sui rami della rete

- il numero complessivo di veicoli transitati su ciascun percorso (Fig. 90);

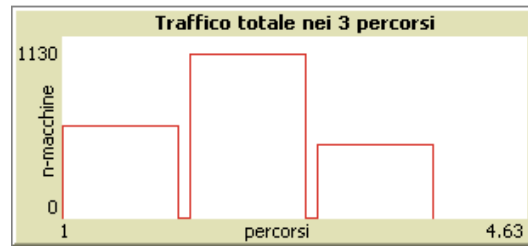


Fig. 90 - Numero complessivo di veicoli transitati su ciascun percorso

- i valori puntuali delle probabilità P_1, P_2, P_3 (Fig. 82 in verde);
- il flusso relativo a ciascuno dei 5 rami della rete espresso in veic/h (Fig. 91);



Fig. 91 - Diagramma tempo - flusso sugli archi della rete

- la velocità media dei veicoli che occupano ciascuno dei 5 rami (Fig. 92);

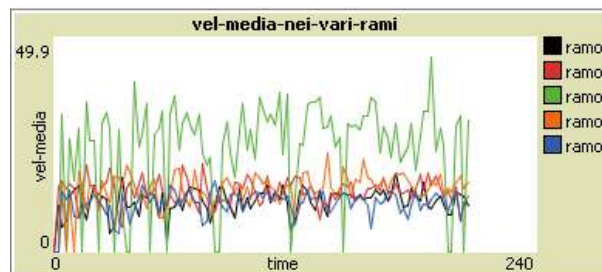


Fig. 92 - Diagramma tempo - velocità media sugli archi della rete

5.3 Simulazioni ed analisi dei risultati

Per quanto riguarda le simulazioni, si è anzitutto scelta la grandezza ottimale del campione di auto da processare in ciascuna simulazione. Infatti, un numero troppo basso di agenti porterebbe a risultati falsati a causa del transitorio iniziale proprio di ciascuna simulazione, viceversa, un numero troppo elevato di agenti determinerebbe un inutile costo in termini di tempo in quanto il sistema, a regime, risulta stabile. Tale numero è stato posto pari a 2000 auto (per lo scenario V si devono escludere i veicoli processati durante la fase transiente).

L’indicatore a cui ci si è riferiti per misurare le performance della rete, al variare delle strategie di informazione agli utenti e di scelta del percorso precedentemente descritte, è il costo medio complessivo della rete.

Questo indicatore è pari alla media dei tempi di percorrenza di ciascun veicolo transitato attraverso la rete e, per un campione di 2000 veicoli, si esprime mediante le relazioni:

$$\bar{C}_{3percorsi} = \frac{\sum t_1+t_2+t_3}{2000} \quad ; \quad \bar{C}_{2percorsi} = \frac{\sum t_1+t_2}{2000}$$

Come mostra in maniera schematica la Fig. 93, per ciascuno scenario si è determinato il costo medio complessivo della rete per valori della probabilità di feedback compresi tra 0 ed 1, facendo variare tale probabilità con un passo di 0,1 tra due eventi successivi (11 eventi per scenario).

Per valutare l’entità della varianza, di ciascun evento sono state lanciate dieci simulazioni, modificando di volta in volta il seme della distribuzione random. Quindi si è calcolato il valore medio del costo medio complessivo risultante dalle dieci simulazioni ed, infine, lo si è normalizzato rispetto all’evento di riferimento probabilità di feedback pari a 0 – scenario 1.

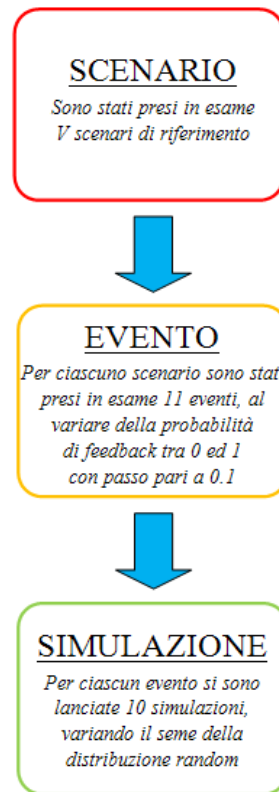


Fig. 93 - Dagli scenari alle simulazioni

Le seguenti Fig. 94, Fig. 95, Fig. 96, mostrano come variano i tempi di percorrenza sui 3 percorsi della rete in una simulazione, rispettivamente per gli eventi feedback pari a 0, feedback pari a 0.5, feedback pari ed 1, con riferimento allo scenario II.

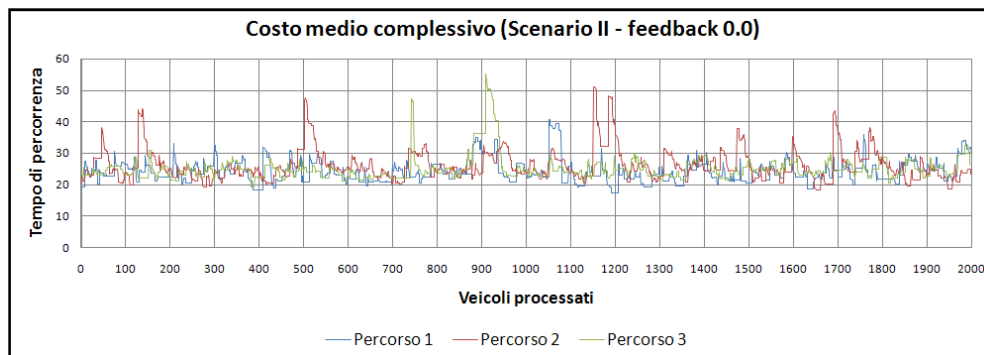


Fig. 94 - Andamento del tempo di percorrenza in una simulazione (evento feedback 0 – scenario II)

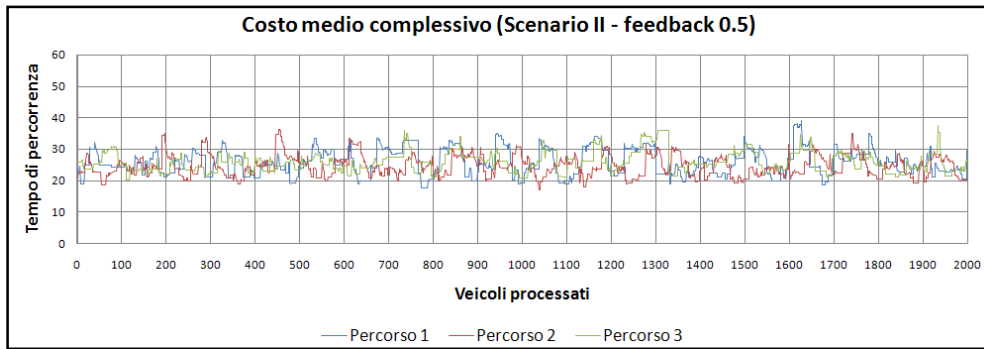


Fig. 95 - Andamento del tempo di percorrenza in una simulazione (evento feedback 0.5 – scenario II)

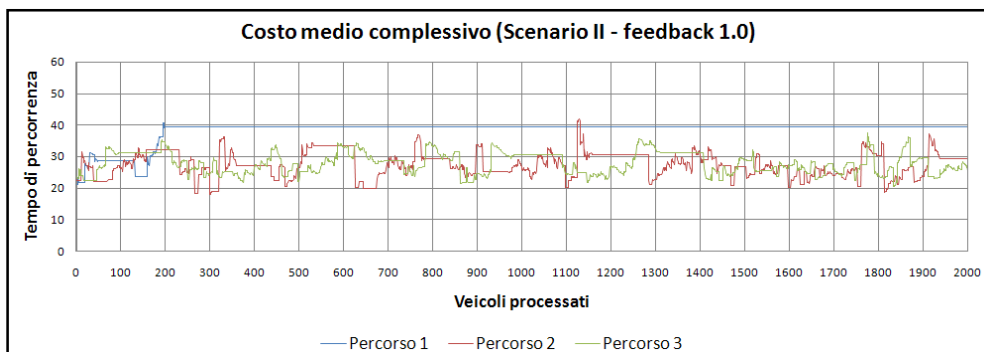


Fig. 96 - Andamento del tempo di percorrenza in una simulazione (evento feedback 1 – scenario II)

La Fig. 97, mostra l’andamento del costo medio complessivo della rete per i cinque scenari presi in esame.

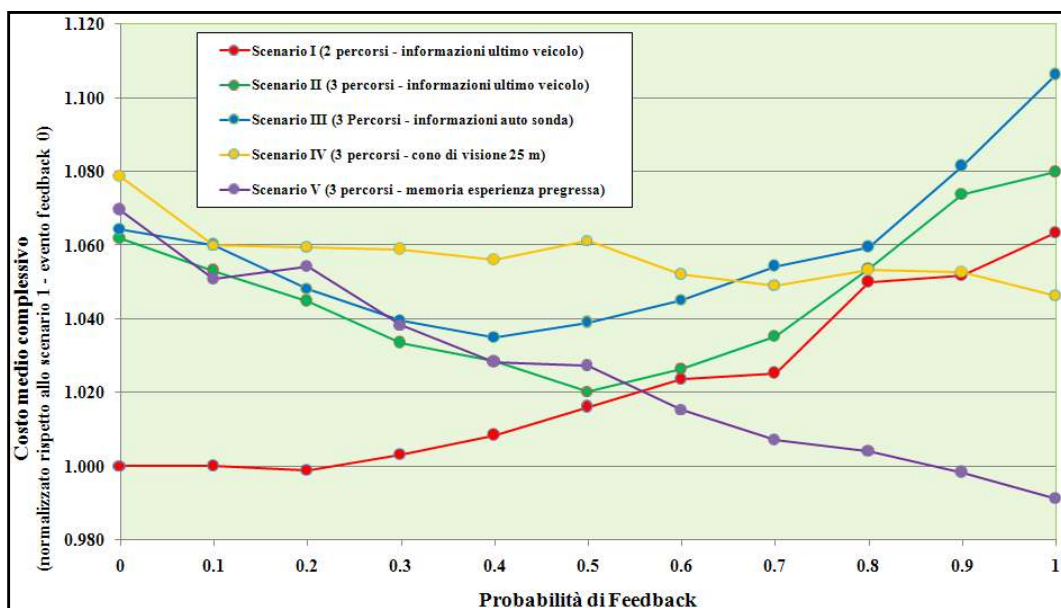


Fig. 97 - Confronto tra i risultati ottenuti per i cinque scenari in esame

Il primo risultato che può evincersi è il manifestarsi del paradosso di Braess. Infatti, a parità di tipologia di informazioni e di modello di scelta del percorso, in tutti gli 11 eventi analizzati il costo medio complessivo della rete nello scenario II risulta essere maggiore che nello scenario I (Fig. 98). Si osserva inoltre che la presenza di informazioni nello scenario I ha, in maniera crescente al crescere della probabilità di feedback, un impatto negativo sulle performance della rete. Questo risultato è dovuto al fatto che nello scenario I la topologia della rete è molto semplice e, soprattutto, al fatto che a rete scarica i due percorsi hanno medesimo costo (stessa percorrenza e stessa velocità di percorrenza). Pertanto, considerando un campione significativo di eventi e di simulazioni (legge dei grandi numeri), in assenza di feedback gli utenti si distribuiranno in maniera equa sui due percorsi, minimizzando il costo complessivo della rete. La presenza delle informazioni tende, invece, a destabilizzare questo equilibrio e, per valori elevati di feedback, determina un fenomeno di sovra reazione alle informazioni (Fig. 98 in blu), del quale parleremo più in dettaglio analizzando i risultati ottenuti per lo scenario II.

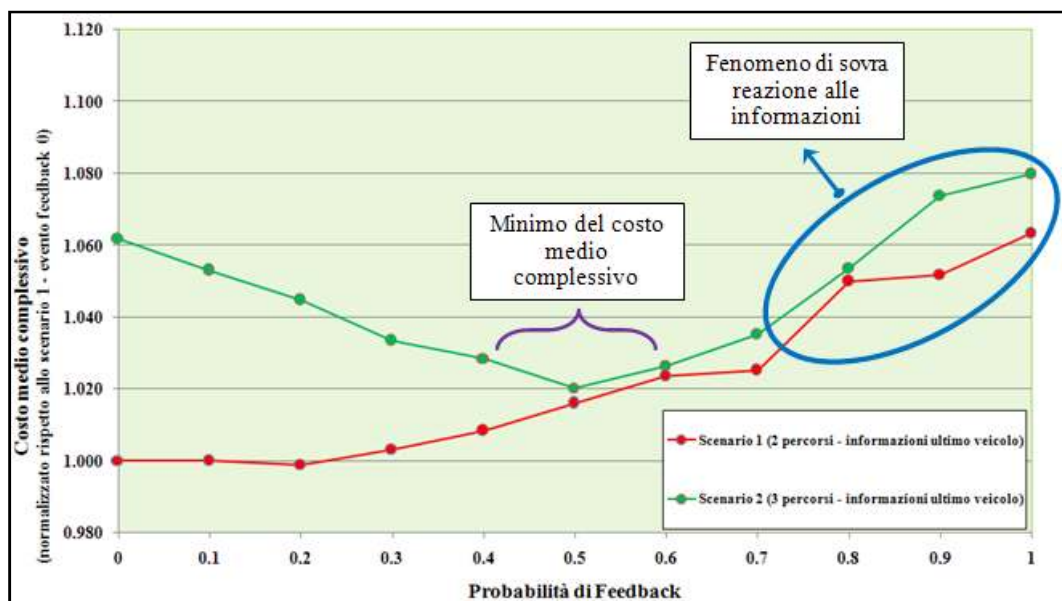


Fig. 98 - Fenomeno di sovra reazione alle informazioni (scenario I e II) e minimo del costo medio complessivo per lo scenario II

Nello scenario II, a causa della maggiore complessità della rete a tre percorsi, è, invece, possibile osservare (Fig. 98 in viola) un minimo pronunciato del costo medio complessivo in corrispondenza di una probabilità di feedback pari a circa 0,5 (le informazioni sui tempi di percorrenza sono fornite al 50% degli agenti). Come per lo scenario I, si osserva un fenomeno di sovra reazione alle informazioni (Fig. 98 in blu): imporre valori di feedback elevati implica che un’aliquota cospicua di

guidatori scelga il percorso da seguire sulla base delle informazioni ricevute ma, al tempo stesso, la qualità delle informazioni si impoverisce!

Per capire quali sono le cause che determinano questo fenomeno, si analizzi l’evento estremo in cui la probabilità di feedback sia posta pari ad 1. All’avvio della simulazione non sarà disponibile alcuna informazione sui tempi di percorrenza (nessun veicolo ha percorso ancora alcun itinerario) e, in questa fase, la scelta dei guidatori avverrà in maniera random. Il sistema, quindi, comincerà ad evolvere e gli agenti che avranno percorso la rete inizieranno a fornire al sistema informazioni sui tempi di percorrenza che hanno rilevato.

Verrà così ad instaurarsi una situazione di regime quasi stabile, in cui ad uno dei tre percorsi della rete (ad esempio il percorso 1) verrà attribuito un tempo di percorrenza più basso rispetto agli altri percorsi disponibili (con riferimento a questo esempio, percorsi 2 e 3) mentre questi ultimi, di fatto, rimarranno scarichi.

Questo equilibrio potrà venire meno, ad esempio, quando, a causa della elevata congestione del percorso 1, il suo tempo di percorrenza risulterà più elevato rispetto all’ultimo rilevato sui percorsi 2 e 3.

Pertanto (Fig. 99), in queste condizioni ovviamente di valenza prettamente teorica, si generano dei lunghi plateaux nel valore dei tempi di percorrenza della rete che determinano un aumento del costo medio complessivo e, pertanto, una scadente gestione della rete stessa.

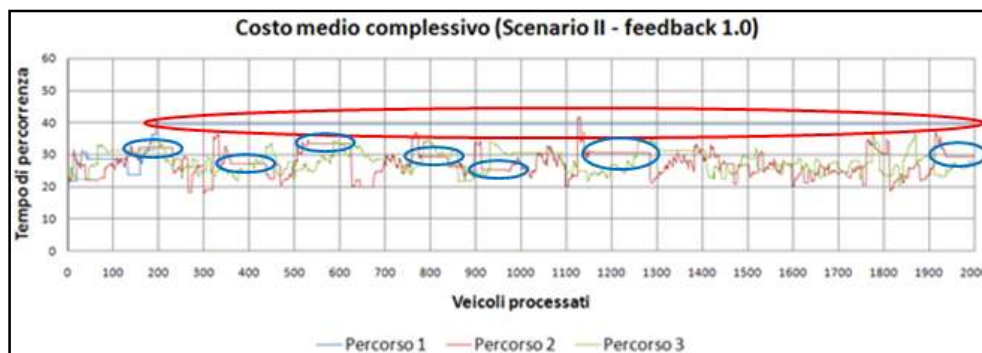


Fig. 99 - Sovra reazione alle informazioni: plateaux dei tempi di percorrenza in una simulazione (evento feedback 1 – scenario II)

Viceversa, se si analizza per lo scenario II l’evento in cui la probabilità di feedback è posta pari a 0, si osserva che una scelta casuale dei percorsi genera dei picchi dei tempi di percorrenza (Fig. 100) a causa del congestionamento dei percorsi e, quindi, un aumento del costo medio complessivo della rete.

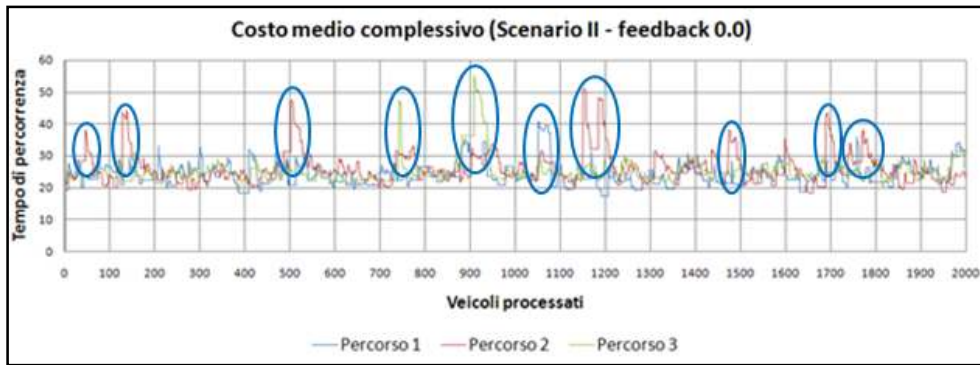


Fig. 100 - Picchi dei tempi di percorrenza in una simulazione (evento feedback 0 – scenario II)

Pertanto, come mostra la Fig. 95, un valore di probabilità di feedback intermedio tra 0 ed 1, non comporta il manifestarsi ne di plateau ne di picchi nell’andamento dei tempi di percorrenza nelle simulazioni, anzi, determina un utilizzo ottimale della rete ed una riduzione del costo medio complessivo della stessa.

Come abbiamo detto, lo sviluppo del presente modello è stato un processo che si evoluto step by step sulla base dei risultati ottenuti in progress.

In questo senso, in particolare per cercare di ovviare al fenomeno di sovra reazione alle informazioni, si sono introdotte nel modello le peculiarità e le funzionalità dello scenario III.

In questo scenario a fornire le informazioni sui tempi di percorrenza sono 3 “veicoli sonda” che, in maniera continua, a prescindere dai tempi di percorrenza registrati, esplorano i tre possibili percorsi della rete.

Dalle simulazioni relative allo scenario III è emerso che la presenza di auto sonda se da un lato evita che si abbia mancanza di informazioni a causa di percorsi raramente utilizzati per valori elevati della probabilità di feedback, dall’altro determina una frequenza delle informazioni inferiore rispetto allo scenario II. Infatti nello scenario III il sistema è aggiornato rispetto alle condizioni della rete solo quando le auto sonda hanno completato il proprio itinerario.

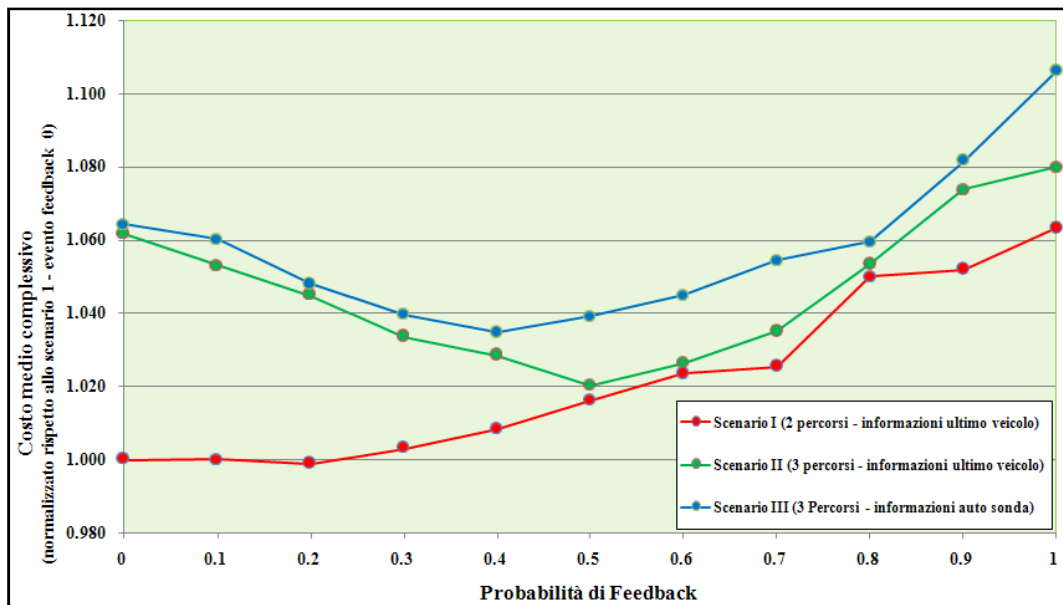


Fig. 101 - Risultati ottenuti per lo scenario III rispetto agli scenari I e II

Come mostra la Fig. 101, l’andamento del costo medio complessivo al variare della probabilità di feedback per lo scenario III è simile a quello relativo allo scenario II. Tuttavia, si osserva un peggioramento delle prestazioni del sistema in quanto, per qualsiasi valore di probabilità di feedback il costo medio complessivo della rete è per lo scenario III maggiore che per lo scenario II. Quest’ultimo, pertanto, identifica per valori medi di feedback la strategia di informazione ai guidatori che, fino a questo stadio di evoluzione del modello, risulta migliore.

Per raffrontare i risultati emersi (positivi e negativi) dovuti alla presenza di sistemi ITS per l’indirizzamento del traffico rispetto alla capacità di scelta del percorso che ciascun guidatore ha sulla base delle condizioni di traffico locale (noi tutti, dovendo scegliere un percorso, scegliamo quello che “vediamo” essere meno trafficato) si è arricchito il modello con le funzionalità intrinseche allo scenario IV.

In questo scenario la strategia di scelta del percorso prevede che i guidatori, giunti in prossimità di un nodo di scelta, riescano a stimare entro un “cono di visione” di profondità pari a 25 metri il numero di veicoli che si trovano sui percorsi disponibili e, ovviamente, scelgono il percorso che risulta essere meno trafficato. Qualora si verifici che entro il cono di visione ricadano il medesimo numero di veicoli, i guidatori scelgono il percorso sulla base delle informazioni fornite loro dall’ITS, secondo la strategia di informazione dello scenario II.

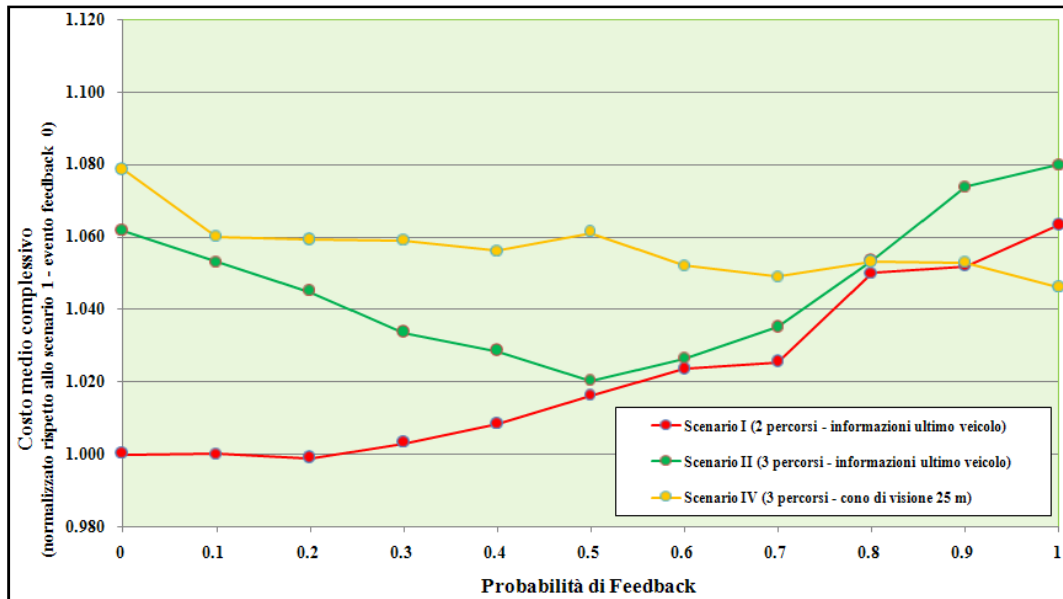


Fig. 102 - Risultati ottenuti per lo scenario IV rispetto agli scenari I e II

Come mostrato in Fig. 102 il risultato che si è ottenuto per lo scenario IV è una progressiva riduzione del costo medio complessivo della rete al crescere della probabilità di feedback.

In questo caso la strategia di scelta del percorso non risente del fenomeno di sovra reazione alle informazioni e, pertanto, il costo medio complessivo della rete riscontrato per valori elevati di feedback è più basso rispetto agli altri scenari analizzati. Tuttavia, per valori ottimali della probabilità di feedback, la riduzione del costo medio complessivo osservata in particolare per lo scenario II risulta essere di entità maggiore e, pertanto, se opportunamente calibrata, la diffusione di informazioni sui tempi di percorrenza secondo le modalità di quest’ultimo scenario risulta essere la strategia che apporta maggiori benefici.

Questi ultimi risultati ci hanno suggerito l’idea di spostare l’attenzione verso nuove strategie di raccolta e gestione delle informazioni (scenario V), basate su informazioni storiche e non più real-time, il cui utilizzo potrebbe determinare miglioramenti considerevoli nelle performance di una rete normalmente affetta dai decrementi di efficienza dovuti al paradosso di Braess.

La nuova strategia di raccolta delle informazioni prevede, come detto in precedenza, di scegliere il percorso che ha il minore tempo di percorrenza ricavato calcolando la media dei tempi riferiti alle ultime cinque esperienze memorizzate per ciascun agente dal sistema relativamente allo stesso percorso.

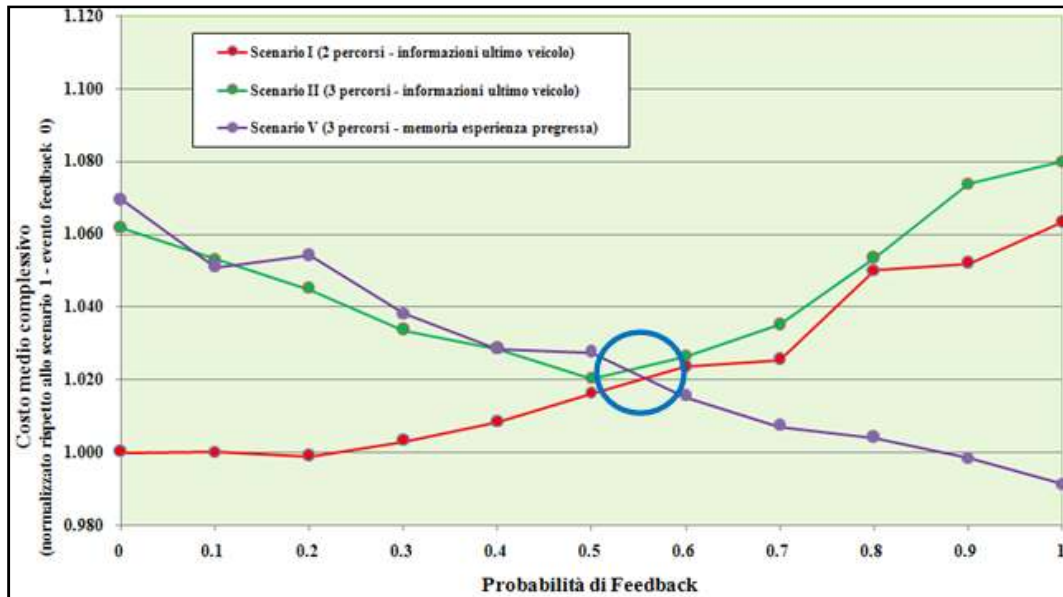


Fig. 103 - Risultati ottenuti per lo scenario V rispetto agli scenari I e II

Come può evincersi dalla Fig. 103, il costo medio complessivo della rete per lo scenario V presenta, al crescere della probabilità di feedback, un andamento decrescente che può considerarsi, con buona approssimazione quello di una retta.

Alla luce di questi risultati ci sembra di avere trovato una strategia di raccolta e gestione delle informazioni che, rispetto allo scenario II il quale per opportuni valori della probabilità di feedback forniva la massima riduzione del costo medio complessivo della rete, individua ulteriori progressi.

Infatti, mentre per valori della probabilità di feedback compresi tra 0 e 0.6 il costo medio complessivo è pressoché coincidente negli scenari II e V, diffondendo le informazioni ad un’aliquota maggiore di guidatori nello scenario II si osserva un incremento del costo medio complessivo dovuto al fenomeno di sovra reazione alle informazioni mentre nello scenario V le performance della rete migliorano in maniera crescente ed il costo medio complessivo risulta essere inferiore anche rispetto allo scenario I.

A potere usufruire dei vantaggi di una simile strategia di informazione sarebbero soprattutto dei guidatori pendolari che, ad esempio con riferimento agli spostamenti casa-lavoro o casa-scuola, si spostano in maniera reiterata tra un’origine ed una destinazione.

In definitiva, da un punto di vista applicativo, questi ultimi risultati suggeriscono che occorrerebbe dotare le autovetture di un sistema ITS personalizzato e non più centralizzato. Un tale sistema permetterebbe agli utenti di ricevere informazioni basate non più su tempi di percorrenza real-time ma sui tempi medi da essi stessi registrati lungo i loro percorsi abituali. Inoltre poiché nelle reti reali le condizioni del traffico sono influenzate sia dal giorno della settimana che dalla fascia oraria di

percorrenza, i sistemi ITS in questione potrebbero memorizzare i tempi di percorrenza tenendo conto di questi ulteriori aspetti e fornire informazioni ai guidatori riferite ad un dato giorno della settimana ed ad una data fascia oraria.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Le esternalità negative connesse al sistema dei trasporti, a causa dei crescenti costi monetari e sociali a queste correlati, rappresentano oggi un tema di grande interesse a livello globale.

Pertanto, sono state e saranno impiegate risorse nella ricerca applicata alla mitigazione di tali esternalità.

Una strategia di mitigazione è rappresentata dai Sistemi Intelligenti di Trasporto ITS. Come risultato, nei prossimi anni, gli utenti della strada saranno dotati di sofisticati strumenti quali, ad esempio, gli Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) e gli In-Vehicle Information Systems (IVIS).

L’effetto auspicato dalla diffusione di tali dispositivi è la realizzazione di un sistema di trasporto più pulito, più sicuro e più efficiente. Ciò però dipenderà molto dall’effettivo utilizzo che gli utenti che ne saranno dotati ne faranno.

Analizzare l’impatto che la diffusione di questi sistemi potrà, nel bene e nel male, determinare sulle performance di una rete di trasporto richiede la modellizzazione di un sistema complesso adattivo.

Il lavoro svolto ha portato alla luce dei risultati pratici/concettuali ed alcuni spunti su cui è possibile soffermare ulteriormente l’attenzione della ricerca che, per grandi linee, riportiamo di seguito:

- la modellizzazione ad agenti intelligenti, supportata da regole di movimento dei veicoli tipiche dei modelli di simulazione microscopici, rappresenta una valida strategia, anche se dispendiosa in termini di tempo a causa della attuale non esistenza di software commerciali, per analizzare l’interazione tra informazioni fornite ai guidatori e tempi di percorrenza sulla rete. In questo senso, si è osservato come varia il costo medio complessivo di una rete di trasporto aumentando la diffusione delle informazioni ai guidatori sui tempi di percorrenza registrati secondo diverse strategie (analogamente può intendersi variabile la percentuale di guidatori che scelgono di seguire le informazioni che vengono, in questo caso, fornite a ciascuno di loro);
- al crescere della diffusione di informazioni centralizzate sui tempi di percorrenza si determina su una rete avente soli due percorsi (uguali in termini di percorrenza ed aventi le medesime funzioni di costo – scenario I) un crescente aumento del costo medio complessivo rispetto ad una strategia di scelta del percorso casuale;
- i sistemi centralizzati di informazione ai guidatori (scenario II e III) determinano un andamento tipico del costo medio complessivo al crescere della diffusione delle

informazioni. Tale andamento presenta un minimo pronunciato del costo medio complessivo per valori intermedi di diffusione delle informazioni. Inoltre si osserva che una bassa diffusione delle informazioni sui tempi di percorrenza registrati dal sistema determina dei fenomeni di congestione della rete (picchi nell’andamento del tempo di percorrenza), mentre una elevata diffusione di tali informazioni determina un fenomeno di sovrareazione alle stesse che porta ad una gestione scadente della rete (plateaux nell’andamento del tempo di percorrenza);

- nel caso in cui le informazioni sui tempi di percorrenza rilevati vengono fornite al sistema centralizzato da ciascun veicolo transitato sulla rete (scenario II) si riscontrano, per valori ottimali di diffusione delle informazioni, dei benefici maggiori rispetto al caso in cui a fornire le informazioni sono dei veicoli sonda (scenario III);
- per valori ottimali di feedback, i sistemi centralizzati di informazione ai guidatori, ed in particolare nel caso in cui a fornire le informazioni è ciascun veicolo transitato sulla rete (scenario II), risultano decisamente più efficaci rispetto alla capacità di rilievo delle condizioni locali di traffico propria di ciascun guidatore (scenario IV);
- un sistema di diffusione delle informazioni personalizzato per guidatori abitudinali che compiono, ad esempio, spostamenti casa-scuola o casa-lavoro (scenario V), basato sui tempi medi di percorrenza registrati dai guidatori stessi, non risente di fenomeni di sovra reazione alle informazioni. Pertanto, al crescere della diffusione delle informazioni, si determinano sulla rete benefici maggiori rispetto a quelli riscontrati con riferimento ai sistemi centralizzati di informazione (scenario II e scenario III).

Per quanto attiene agli sviluppi futuri del presente lavoro di ricerca si ritiene che possa essere fruttuoso dotare il modello di simulazione di peculiarità che consentano di prendere in considerazione alcuni aspetti emotivi tipici dell’uomo (intenzioni, impulsività, resistenza nei confronti di cambiare abitudini, etc.).

Infatti, focalizzare l’attenzione sui complessi meccanismi che stanno alla base del reale comportamento di scelta del percorso dei guidatori è un aspetto fondamentale per lo sviluppo dei sistemi di informazione agli utenti e, pertanto, da adito ad un miglioramento delle potenzialità del modello con riferimento alla sua capacità di prevedere gli effetti che la diffusione di informazioni ai guidatori determina sul traffico stradale, all’interno di uno specifico contesto socio-culturale.

In questo senso, sarebbe funzionale considerare nel modello di simulazione la contemporanea presenza di diverse categorie di utenti che, ad esempio, possano rappresentare:

- gli utenti che scelgono il proprio percorso sulla base delle informazioni loro fornite (secondo le strategie di informazione dello scenario II, III o V);
- gli utenti che rigettano le indicazioni loro fornite dai sistemi di informazione e procedono sul loro percorso abituale;
- gli utenti che rigettano le indicazioni loro fornite dai sistemi di informazione e scelgono il proprio percorso sulla base delle condizioni locali di traffico (scenario IV);
- una ulteriore categoria di utenti che segue, ad esempio, una strategia di scelta del percorso di tipo emulativo (utenti che effettuano la propria scelta sulla base di quella del veicolo che li precede - effetto Herding).

In questo modo, calibrando le aliquote di ciascuna delle tipologie di guidatori anzidette, il modello fornirebbe dei risultati specifici per un determinato contesto sociale.

Il processo di calibrazione potrebbe essere supportato, ad esempio, da censimenti (mail back - i cui dati, per semplificare il processo, potrebbero essere inviati dai guidatori anche tramite email) riguardanti le scelte ed il comportamento di uno spettro completo di guidatori interni al contesto di interesse. In questo senso, come riportato in [74], è significativo che i questionari vengano solloposti a categorie di guidatori diversificate in base dei seguenti parametri:

- genere;
- età (per range d’età);
- livello di istruzione (media inferiore, media superiore, laurea, post-laurea);
- livello di reddito (per range di livello di reddito);
- residenza e numero di anni di residenza nell’area oggetto di studio (per range di anzianità di residenza).

Appendice I: pubblicazione scientifica

TIC-STH 2009

The impact of real time information on transport network routing through Intelligent Agent-Based Simulation

Daniele Buscema, Matteo Ignaccolo, Giuseppe Inturri, Alessandro Pluchino, Andrea Rapisarda, Corrado Santoro, Salvatore Tudisco

University of Catania, Italy

dbuscema@dica.unict.it, mignaccolo@dica.unict.it, ginturri@dica.unict.it, alessandro.pluchino@ct.infn.it,
andrea.rapisarda@ct.infn.it, csanto@diit.unict.it, tudisco@infn.lns.it

Abstract—Advance Traveller Information Systems (ATIS) are considered a promising tool to alleviate traffic congestion and improve road network performance. They provide real time traffic information and route recommendation to road users, in order to increase their ability to choose the best alternative path. Though such systems have reached a high technical standard, their actual impact in traffic pattern and network performance is controversial. The methodology used is based on a Multi Agent Simulation to model how the presence of information influences the driver's reactive behavior and the network efficiency. The case study is the well known network of the Braess' paradox and the specific aim is to find the proper route recommendation strategy to avoid that adding a new road to traffic network may result in increasing the total travel time. Through a software platform able to simulate a virtual road network, where single drivers interact with each other and with the spatial environment according to a defined behavior, that is their reaction to external outputs, two behavioral patterns will be simultaneously considered. The first refers to the driver's path choice among those available for a fixed origin-destination pair; the second refers, once the path is chosen, to the microscopic motion of each vehicle as a function of the leader vehicle along each link of the network. To simulate the presence of drivers equipped with ATIS system and drivers who are not, or equivalently to simulate different reactive behavior to the information provided, it has been used a variable “probability of feedback”. Pattern arrival vehicle flow can be varied together with speed and acceleration of the vehicles. The general purpose of the paper is to contribute to the analysis of the impact of ITS (Intelligent Transport Systems) technology in traffic pattern and network performance. The specific objective is modelling driver's behavior in road networks when real time traffic information is provided. The results show that a proper rate of provided information is able to reduce the effect of the Braess' paradox and that network performance increases when drivers' behavior is affected by their ability to see local traffic conditions.

Keywords: Multi-agent-system; road traffic control; Intelligent Transportation Systems; NetLogo; Braess' paradox; route choice model; cooperative traffic management.

I. INTRODUCTION AND LITERATURE REVIEW

Traffic congestion is one of the most difficult problem to solve in our cities. Therefore a lot of work in network transport research is currently under continuous development. Network User Equilibrium [1] is today a widely used traffic assignment technique. It is based on the assumptions that, given a transport network represented by a set of nodes (road intersections or origin/destination of traffic zones) and a set of links (roads) connecting the nodes, users (drivers) traveling from origin to destination have a perfect knowledge of the costs they will incur in each available path and that they have a rational path choice behavior, trying to minimize the relative cost. On the other hand, in a congested network, each path cost is not constant, but is affected by how many users have chosen it. Then a competitive behavior is set up since, according to the first Wardrop principle [2], a stable configuration (in terms of link average flows) is reached when no user can unilaterally change the chosen path without incurring in higher costs: this state of the network is called User Equilibrium [1].

Of course, in real world, users do not have a stiff rationale behavior and do not have a perfect knowledge of path costs as well. To match the first problem, stochastic path choice models based on random utility theory [3] [4] have been developed and are now a well consolidated technique. To match the second one the development of Intelligent Transport Systems are considered a promising tool to provide real time current or predictive information to road users in order to increase their knowledge of the exact cost of each alternative path they can choose. Besides, dynamic route guidance systems, such as Advance Traveller Information Systems (ATIS), will umbersoon be available for a large number of drivers. Therefore underestimating

drivers’ response to these systems is critical to the design and operation of effective intelligent transport technologies.

Actually, the impact of ATIS in traffic pattern and network performance is controversial for several reasons:

1. even if all users had a perfect knowledge of the travel cost associated to each available path and User Equilibrium was achieved, this could be very far from an optimum configuration of the whole network in terms of total cost sustained by all users; the Braess’ paradox is a well known example of that;
2. even if we find how to distribute traffic on the different paths and over time in order to minimize the total network cost, and provide the appropriate information, what will the driver reactions be to our suggestions?
3. how will the proportion of equipped and not equipped drivers with ATIS impact the network performance?
4. an overreaction can occur if too many drivers respond to the information, transferring congestion from one path to another, causing oscillations of traffic flows among alternatives.

Most of these considerations stress how relevant is to improve the modelling of the drivers’ behavior. The scope of the paper is, therefore, to build a dynamic vehicle routing model that incorporates real time information on travel time. We use agent based simulation both to update travel times by a traffic micro-simulation algorithm and to reproduce the reactive behavior of drivers under the influence of travel time information. In the literature it is possible to find several different implementation of this approach.

Bazzan et al. [5] use agent simulation to divert from the classical view of route choice as an individual issue, and opt to study the social aspects of the problem to model decision making drivers within an intelligent transport system. Adler and Blue [6] develop a real-time approach to manage roadway network congestion based on cooperative multi-agent negotiation between agents that represent network managers, information service providers and drivers equipped with route guidance systems. Whale et al. [7] address a basic two-routes scenario with different types of ATIS information and study the impact of it using simulations. The road users are modelled as agents, and different ways of generating current information are tested, finding that the nature of the information very much influences the potential benefits of the ATIS.

Bazzan and Kuhl [8], using a cellular automaton model of traffic, show that it is useful to manipulate the route information given to the drivers of a road network to avoid the Braess’ paradox. In the following, we will extend the Bazzan-Kuhl approach using the potential of the agent-based micro-simulation in order to evaluate how the performance of Braess’ network is affected by a mixture of local and ATIS information.

II. AGENT-BASED SIMULATION AND NETLOGO PLATFORM

Agent-based simulation [9] is a computer technique simulating a system whose main components are agents. Agents are entities which, situated in some environment, are capable of autonomous action in order to meet their fixed objectives. Each agent is modelled by variables and algorithms which set his behavior and evolution over time is recorded both for each individual and for the overall system. Agents do not have a stiff behavior, but they are capable of reactive, proactive and social behavior. Reactive means they can perceive and respond to changes in their environment, proactive means they can take the initiative to achieve their goals, and social means they can interact with other agents to satisfy their objectives.

The consequence is that agent simulation has the capability of capturing emerging systems behaviors which cannot be described as a simple aggregation of individual behaviors and that often are very far from intuition and hardly foreseeable by experience and common sense. Ideally, each driver, with his/her knowledge, preferences, socio-economic characteristics and personal targets can be modelled using an agent. Traditional behavioral travel demand models (e.g. discrete choice models) are able to include detailed choice attributes based on socio-economic characteristics of the users and on relative attractiveness of the travel options, but the updating of driver’s knowledge and decisions depend on a day-to-day approach. Agent simulation, instead, allows to model a dynamic choice behavior emerging from the mutual interaction of many individuals, which do not act according to a pre-defined set of rules, but as a consequence of the mutual interaction of many individuals, each with his own beliefs, goals and reaction to real time information coming from the environment [10].

In this paper we use agent simulation to evaluate the impact of real time information in a network scenario, taking into account different reaction behaviors. Besides, we will simulate how the mutual interaction of vehicles affects travel time in each link, through a microscopic model of the motion of vehicles rather than using theoretical flow-speed functions, as is done in current literature. There are different integrated development environments to assist agent-based simulation. They allow model development, code scripting and simulation running to be done all in the same graphical interface.

We use NetLogo Software [11], which is a programmable modelling environment designed for simulating complex systems developing over time. It runs on any platform that supports Java and is mainly used to simulate natural and social phenomena. NetLogo consists of two basic components: (1) a two dimensional grid of “patches” (World) that models the environment and (2) a set of agents (“turtles”) with their own attributes and a number of procedures they can carry out. All independents “agents” move simultaneously in the “patch” environment and can read and react to the attributes attached to the patches in their

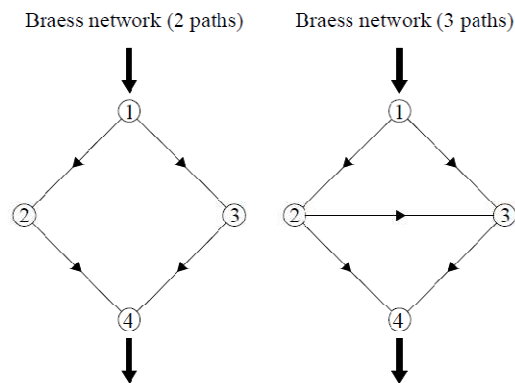


Fig. 1. Braess network topology

vicinity. Then the interaction among agents and among agents and the environment can be modelled.

NetLogo allows the creation of an interface for each model with commands in the form of procedures, activated by buttons on the interface, or entered directly in the command console. It provides many built-in tools to modify simulation parameters at runtime, including sliders, buttons and drop-down menus and allows output in the form of graphs and variable counters. Simulation is measured in discrete arbitrary time units, called “ticks”. Speed simulation can be varied anytime by a slider.

NetLogo has already proved to be able to carry on traffic micro-simulation. Of course, like all multi-purpose simulation environment, the creation of a road network with NetLogo is not as easy as with built ad hoc traffic micro-simulation tools. On the other hand, it allows a very easy implementation of complex behavioral models, such as the capability “to see” a larger part of the network and the drivers’ reaction to the combination of provided real time information, previous network experiences and personal characteristics.

III. CASE STUDY – BRAESS’ PARADOX NETWORK SIMULATION WITH NETLOGO

The model was applied to a test road network. Our main aim is to analyse how route recommendations affect the network total travel time, therefore we decided to use the well known network of the Braess’ paradox (Fig.1).

In 1968 Braess [13] [14], presented an example of an equilibrium assignment problem where the addition of a new link to the network determines the paradoxical results of an increasing of the total time on the network. Many analysis have shown that under certain flow and network conditions

examples of Braess’ paradox are likely to occur in sets of road network improvement [15].

Transport planners use Braess’ paradox to highlight how transport networks are a complex system and proper improvement measures cannot be addressed by using common sense, but require a lot of mathematical modelling and simulation. Most of the research efforts has been up to now devoted to examine the conditions under which the paradox occurs, focusing on the range of demand, on the link travel time-volume relationship speed-flow or on network topology. But actually, the fundamental nature of the phenomenon is based on the competitive behavior of the users, each attempting to minimize his travel time, even if this may have a negative impact on other drivers.

A. Behavioral patterns and NetLogo interface

As we already said, it is controversial to affirm that the provision of perfect information will automatically lead us to the most effective use of the transport capacity. Besides we are not sure that drivers have a rationale behavior and they all do not react the same to information. This is why agent simulation is a promising approach to deal with these kind of problems.

Two behavioral patterns have been modelled: the first refers to the users’ path choice among those available for a fixed origin-destination pair; the second refers, once the path is chosen, to the microscopic motion of each vehicle as a function of the leader vehicle along each link of the network. To simulate the presence of drivers equipped with ATIS system and drivers who are not, or equivalently to simulate different reactive behavior to the information provided, it has been used the variable “probability of feedback”. For instance, if the probability is 0.4, it means that 40% of drivers will adapt to follow the provided information, while

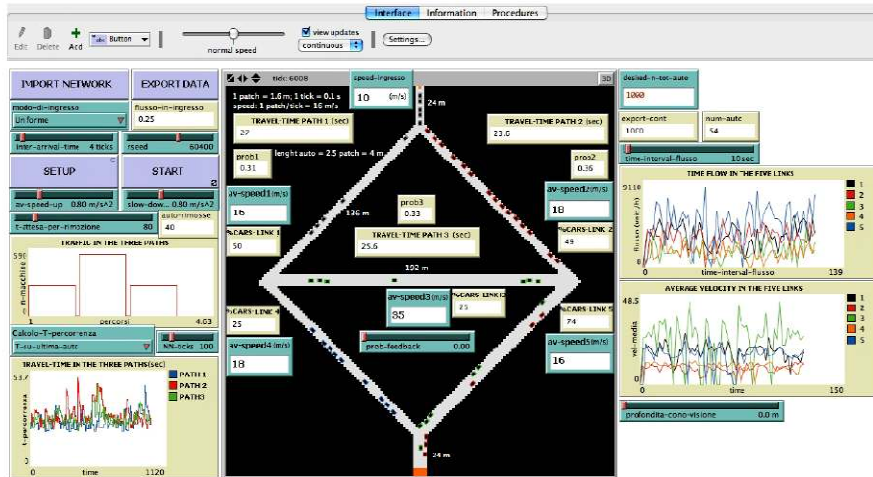


Fig. 2. NetLogo model interface

60% will choose their path randomly. Pattern arrival flow can be varied together with speed and acceleration of the vehicles.

Fig. 2 shows the NetLogo interface we have built to implement our simulation. In the central part of the interface is visible a snapshot of the Braess network, modelled over the NetLogo square grid (World). The size of the grid is 150x150 patches and the size of an agent vehicle is 2.5 patch. Assuming 4 m per vehicle, each patch corresponds to 1.6 m. In this scale, the four symmetric links of the network measure 136 m, while the central horizontal link 192 m.

The acceleration and deceleration rates of each vehicle are fixed by sliders on the left of the World, while the average speed allowed in each link is fixed by the correspondent input box visible near the link. Each time-step of the simulation (tick) is assumed to correspond to 0.1 sec and all the relevant dynamical quantities introduced before have been calibrated using this equivalence, in order to give them a real meaning and also to respect the Braess' paradox prescriptions (symmetry of velocities on the opposite links, and so on). In the left side of the interface are also visible the 'Setup' button, which launches a procedure to reset the model to its initial state, and the 'Start' button, which activates a procedure that carries out all actions for each time step. Several plots and output boxes allow to follow the real-time evolution of the interesting quantities (the travel time in the three paths, the percentage of vehicles passing through each link and their average speed, the flow in the different links, and so on).

B. Simulation features

The simulation architecture is multi-agent with two layers: a tactical level controls the rules of motion of vehicles on the road where agents behave in a reactive way, and a strategic level models path choice where agents behave in a proactive way.

The hypotheses are that demand is rigid, average flow is constant over time, vehicles have the same length and own the same average performance.

Vehicles enter in node 1 (Fig. 1) with a uniform distributed inter-arrival time, then move on each link of the network at a speed normally distributed with mean equal to the average speed of the link and with a 20% standard deviation; if a slower vehicle is found ahead, they slow down their speed until it equals that of the preceding vehicle. Each driver can use different paths to reach node 4 from node 1. Path choice is random but it can also be affected by:

- information provided to drivers by an ATIS system and their attitude to follow external information which is modelled through an assigned "probability of feedback" p ;
- what drivers "see" through their "radius of vision" in correspondence of each node where different paths can be selected.

If the option "radius of vision" is not activated, in each node where driver must choose among different paths vehicles receive the most updated information on relative travel times and a percentage p of drivers follow the suggestion, while the other $(1-p)\%$ choose randomly. If the option "radius of vision" is activated, drivers look at traffic

on the links departing from the node within a fixed distance of vision and choose the less congested link; if both the links are equally congested, a percentage p of drivers makes a choice consistent with the information provided by ATIS, while the other $(1-p)\%$ drivers choose randomly.

The real time information provided by ATIS is based on two different strategies: (i) the best travel time experienced on each path by the last vehicle going out from node 4; (ii) the best travel time experienced by floating cars providing real-time data for each route. This information is updated each time a new vehicle covers its path. Each simulation run is launched using a different random seed and stops when 2000 vehicles go out from node 4. This traffic volume has proved to be optimal between lower values, which lead to results affected by the transitory phase of the simulation, and higher values leading to a highly congested network. The main outputs of the simulation are the evolution on time of the travel time on each path, the number of vehicle in the network, the amount of vehicles on each path, the total vehicles in the network, the link flows, the average link speed and the total average travel time in the network. At the end of each simulation, network performance has been measured by the total average travel time, calculated as the ratio between the sum of all vehicles’ travel time and the total vehicles which passed through the network.

IV. RESULTS

The main results are shown in terms of normalized total average travel time (Fig. 3), measured by running 10 simulations for each different value of feedback’s probability varying from 0 to 1 with step 0.1 and for the five scenarios reported (see Tab.1 and Fig. 1). The coefficient of variation for each points (not reported) always less than 2%.

The first found result is that Braess’ paradox occurs. In fact the line referred to scenario 1 (two paths’ network, four links), is always lower than that of scenario 2 (three paths’ network, five links) which has been obtained under the same dynamical conditions (ATIS information: on the last vehicle

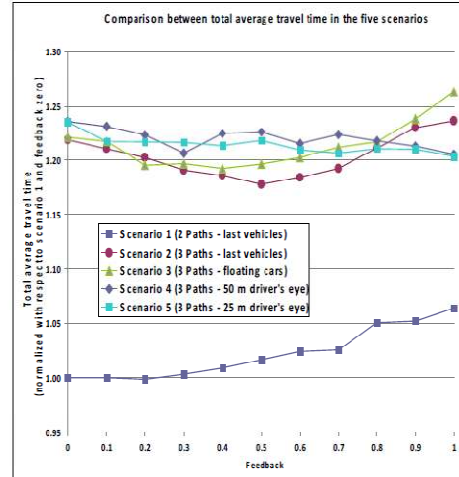


Fig. 3 Total average travel time (see text).

differently from Braess’ work where travel times on links are calculated by theoretical cost functions, here they emerge dynamically by the agent-based micro-simulation of the traffic.

Second result is that the provided time information seems to have an impact on both the two and three paths networks, but while in scenario 1 the performance steadily decreases with rising feedback, in the three paths scenarios, an optimum feedback value has been observed, probably due the higher complexity of the network. In fact in scenario 2 the network presents a pronounced minimum of the total average travel time when the probability of feedback is around 0.5, rapidly increasing as far as feedback reaches the values 1.0. The reason is probably that, growing feedback implies that drivers comply more and more to provided information, but, at the same time the quality of information they receive is poorer. This happens because, if everybody follows the path suggested by the ATIS system (feedback 1.0), no further information is available on other paths that meanwhile could have become less congested. This effect is visible in the lower panel of Fig. 4, where long standing plateaux in the travel time can be observed. On the other hand, when the probability of feedback is zero (Fig. 4, upper panel), drivers randomly choose their paths: such a behavior, if frequently generates peaks in the travel time due to jams formation, also allows a more uniform exploration of all the paths. An intermediate level of feedback (Fig. 4, medium panel) seems therefore to realize the proper trade-off between these two situations, then justifying the behavior observed in Fig.3. In the same figure we show a scenario where feedback is due to the presence of floating cars providing real-time data with uniform frequency for each route (scenario 3). But, if on one hand this avoids lack of information due to seldom utilized paths, on the other hand

TABLE I. FEATURES OF THE SIMULATED SCENARIOS

Simulated scenarios	Description of scenarios			
	Network config.	Number of paths	Path choice model	Ref.
Scenario 1	4 nodes 4 links	2	Real time information based on last vehicles	Fig 3
Scenario 2	4 nodes 5 links	3	Real time information based on last vehicles	Fig 3 Fig 4
Scenario 3	4 nodes 5 links	3	Real time information based on floating cars	Fig 3
Scenario 4	4 nodes 5 links	3	Real time information on last vehicles and local traffic condition within 50 m from the driver's eye	Fig 3
Scenario 5	4 nodes 5 links	3	Real time information on last vehicles and local traffic condition within 25 m from the driver's eye	Fig 3

without driver’s eye). It is worthwhile to point out that,

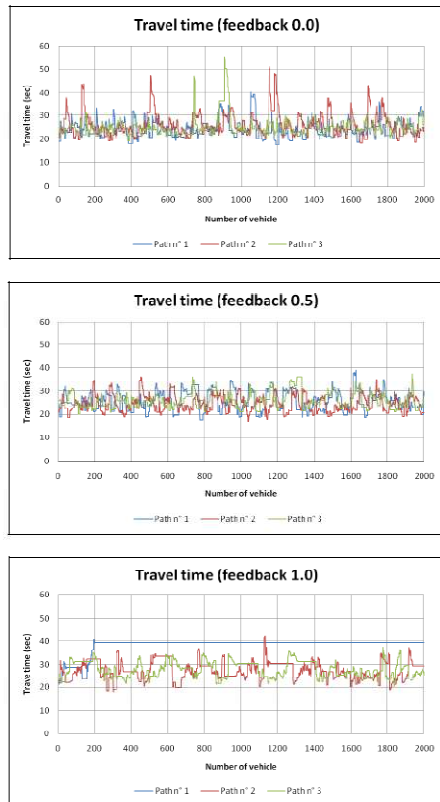


Fig. 4 Evolution of path travel time for three different feedback probabilities (0.0, 0.5, 1.0).

the frequency of the information received by the users is lower than in the previous case, so the resulting performance is globally worse. Finally, we explore what happens when path decision making is made combining local traffic perceived conditions with external real time information. This was realized in scenarios 4 and 5, where a different length of the drivers’s radius of vision has been adopted, with values of 50m and 25m respectively. Both cases show that the total average travel time progressively reduces as feedback increases, but with a lower extent than in the other scenarios. Only for high values of feedback (greater than 0.8) the performance of scenarios 4 and 5 is better than in the previous ones because the local mechanism of choice in some way restore the random exploration of all the paths.

V. CONCLUSIONS

We built an agent based simulation model to measure the impact of giving real-time information on best paths in a road network. A Braess’ paradox network has been tested as case study, using different network configuration, level of

information through hypothetical advanced traveler information systems (ATIS) and drivers’ behavior while choosing their path from origin to destination.

We used NetLogo agent-based modeling environment to implement a route choice model and a feedback probability mechanism in order to analyze how the overall cost of the Braess network varies according to the acceptance by the drivers of the information received. The results can be used to address a behavior space where optimal information strategies can be selected and a contribute to the basis for an intelligent agent approach to the on-line management and control of transportation networks. Future developments will involve the improvement of the realism of simulation by adding new psychological features to the agents in order to make them able to perform more complex choice strategies.

REFERENCES

- [1] Sheffi, Y., *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1985
- [2] Wardrop, J.G., “Some theoretical aspects of road traffic research”, *Proceedings of the Institute of Civil Engineers Part II*, 325-378, 1952.
- [3] Cascetta, E., *Modelli per i sistemi di trasporto. Teoria e applicazioni*, Torino: UTET, 2006
- [4] Ortúzar, JD and Willumsen, LG, *Modelling transport (3rd Edition)*, John Wiley & Sons, England, 2001
- [5] Bazzan, A. L. C., Whale, J., Klugl, F., KI-99, LNAI 1701, in W. Burgard, T. Christaller, A.B. Cremers (Eds.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 303-306, 1999
- [6] Adler J. L., Blue, V. J., “A cooperative multi-agent transportation management and route guidance system”, *Transportation Research Part C*, Vol. 10, pp.433-454, 2002
- [7] Wahle, J., Bazzan, A. L. C., Klugl, F., Schreckenberg, M., “The impact of real-time information in a two-route scenario using agent-based simulation”, *Transportation Research Part C*, Vol. 10, pp. 399-417, 2002
- [8] Bazzan, A. L. C., Klugl, F., “Case studies on the Braess’ Paradox: Simulating route recommendation and learning in abstract and microscopic models” *Transportation Research Part C*, Vol. 13, pp.299-319, 2005
- [9] Muller, J. P., Wooldridge, M. J., Jennings N. R., *Intelligent agents III. Agents Theories, Architectures and languages*, Springer, 1997
- [10] Helbing, D., *Agent-Based Simulation of Traffic Jams, Crowds, and Supply Networks* <https://ama.umn.edu/talks/workshops/11-4-6/2003/helbing/ima.pdf>; Bloy, L. A. K., *An investigation into Braess’ Paradox*, Master of Science degree thesis, University of South Africa, 2007
- [11] U. Wilensky (1999) *NetLogo* <http://csl.northwestern.edu/netlogo>, Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL.
- [12] Pigou, A. C., *The Economics of Welfare*, Macmillan, London, 1920.
- [13] Braess, D., “Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung *Unternehmensforschung*”, vol.12, pp.258-268, 1968
- [14] Braess, D., Nagurney, A. and Wakolbinger, T., “On a Paradox of Traffic Planning” *Transportation Science*, 39(4), pp. 446-450, 2005
- [15] Bloy, L. A. K., *An investigation into Braess’ Paradox*, Master of Science degree thesis, University of South Africa, 2007
- [16] Dia, H., “An agent-based approach to modelling driver route choice behavior under the influence of real-time information, *Transportation Research Part C*, Vol. 10, pp.331-349, 2009
- [17] Rouwendal, J., Verhoef, E.T., “Basic economic principles of road pricing. From theory to applications”, *Transportation Policy*, Vol. 13, 2006

Appendice II: script dell’interfaccia di programmazione A

globals [colore-strada target-heading flag-auto pccolor tpatch tpflag cflag g-old-color g-new-color num-auto-stopped monitor-n-macchine num-auto-tempo-max-di-arresto size-auto auto-rimosse somma-t1 somma-n1 somma-t2 somma-n2 somma-t3 somma-n3 t-tot-percorso1 t-tot-percorso2 t-tot-percorso3 prob1 prob2 prob3 prob-flag flusso-in-ingresso cont-ticks-poisson ticks-poisson flag-sonda1 flag-sonda2 flag-sonda3 export-cont flag-stop iter-flusso colore-ramo-1 colore-ramo-2 colore-ramo-3 colore-ramo-4 colore-ramo-5 colore-incroci colore-ramo-ingresso colore-ramo-uscita costo-medio-complessivo %auto-ramo1 %auto-ramo2 %auto-ramo3 %auto-ramo4 %auto-ramo5 n-auto-entrate]

breed [auto auto1]

breed [direzioni direzione]

breed [pennello]

patches-own [central-flag]

direzioni-own [d-color n-identita n-macchine d-speed flusso]

auto-own [speed speed-old speed-limit speed-min speed-up slow-down incrocio-flag old-color new-color p-old-color auto-davanti t-percorrenza percorso x-old y-old n-sonda flag-flusso]

to importa-mappa

ca

importa-world

setup

end

to setup

file-close

clear-all-plots

reset-ticks

random-seed rseed

ask auto [die]

ask direzioni [set n-macchine 0]

ask direzione 3 [set d-speed (maxspeed1 / 16)]

ask direzione 9 [set d-speed (maxspeed2 / 16)]

ask direzione 13 [set d-speed (maxspeed3 / 16)]

ask direzione 5 [set d-speed (maxspeed4 / 16)]

ask direzione 11 [set d-speed (maxspeed5 / 16)]

set-default-shape auto "car-2"

set flag-auto false

set cflag true

set num-auto 0

set size-auto 2.5

set auto-rimosse 0

set flag-stop false

set iter-flusso 0

set n-auto-entrate 0

set costo-medio-complessivo 0

```
set-current-plot "Traffico totale nei 3 percorsi"
set-plot-x-range 1 2
set-plot-y-range 0 1

set somma-t1 0
set somma-t2 0
set somma-t3 0
set somma-n1 0
set somma-n2 0
set somma-n3 0
set t-tot-percorso1 0
set t-tot-percorso2 0
set t-tot-percorso3 0
set prob1 random-float 1
set prob2 random-float 1
set prob3 random-float 1
set prob-flag false
set flag-sonda1 true
set flag-sonda2 true
set flag-sonda3 true
set colore-ramo-1 8.51
set colore-ramo-2 8.54
set colore-ramo-3 8.56
set colore-ramo-4 8.52
set colore-ramo-5 8.55
set colore-ramo-ingresso 8.5
set colore-ramo-uscita 8.53
set colore-incroci 8.49

set flusso-in-ingresso ( 1 / inter-arrival-time )
set cont-ticks-poisson 0
set ticks-poisson random-poisson inter-arrival-time

let file-h "dati-3percorsi.dat"
if ( file-h != false)
[
  if ( file-exists? file-h) [file-delete file-h]
  file-open file-h
]
set export-cont 0

set-current-plot "flusso-nel-tempo"
ask direzioni with [n-identita = 1] [set-current-plot-pen "ramo1" plotxy 0 0 set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 2] [set-current-plot-pen "ramo2" plotxy 0 0 set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 3] [set-current-plot-pen "ramo3" plotxy 0 0 set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 4] [set-current-plot-pen "ramo4" plotxy 0 0 set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 5] [set-current-plot-pen "ramo5" plotxy 0 0 set flusso 0]
```

```
set-current-plot "vel-media-nei-vari-rami"
ask direzioni with [n-identita = 1] [set-current-plot-pen "ramo1" plotxy 0 0]
ask direzioni with [n-identita = 2] [set-current-plot-pen "ramo2" plotxy 0 0]
ask direzioni with [n-identita = 3] [set-current-plot-pen "ramo3" plotxy 0 0]
ask direzioni with [n-identita = 4] [set-current-plot-pen "ramo4" plotxy 0 0]
ask direzioni with [n-identita = 5] [set-current-plot-pen "ramo5" plotxy 0 0]

end

to importa-world

import-world "Braess-v18-world.csv"
ask direzioni [ set n-macchine 0 set flusso 0]
setup

end

to settaggi-auto

  set size size-auto
  set heading 180
  set speed (speed-ingresso / 16)
  set speed-limit (speed-ingresso / 16)
  set speed-min 0
  set speed-up (av-speed-up / 16) ;(av-speed-up / 80)
  set slow-down (slow-down-global / 16)
  set color gray

  set incrocio-flag false
  set flag-flusso true
  set old-color colore-ramo-ingresso
  set p-old-color colore-ramo-ingresso
  set t-percorrenza 0
  set n-sonda 0
  fd size-auto
  if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-auto-sonda" and flag-sonda3)
  [set n-sonda 3 set label "3" set label-color green set flag-sonda3 false stop]
  if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-auto-sonda" and flag-sonda2)
  [set n-sonda 2 set label "2" set label-color green set flag-sonda2 false stop]
  if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-auto-sonda" and flag-sonda1)
  [set n-sonda 1 set label "1" set label-color green set flag-sonda1 false stop]

end

to slow-down-car
  set speed speed - slow-down
end

to speed-up-car
```

```

set speed ( speed + speed-up) ; 0.1 = 16 m/s^2
end

to crea-nuove-auto

let n-auto count auto

ifelse (modo-di-ingresso = "Uniforme")
;ingresso uniforme
[
if (( ticks mod inter-arrival-time) = 0)
[
ask one-of patches with [central-flag = true and pcolor = (orange + 1)]
[
let ccolor pcolor
sprout-auto 1 [ settaggi-auto]
set n-auto-entrate n-auto-entrate + 1
]
]
]
;ingresso poissoniano
[
ifelse (cont-ticks-poisson < ticks-poisson)
[set cont-ticks-poisson cont-ticks-poisson + 1]
[
ask one-of patches with [central-flag = true and pcolor = (orange + 1)]
[
let ccolor pcolor
sprout-auto 1 [ settaggi-auto]
set n-auto-entrate n-auto-entrate + 1
]
set cont-ticks-poisson 0
set ticks-poisson random-poisson inter-arrival-time
]
]

end

to start-auto

if flag-stop [stop]
tick
wait waiting-time
if (count auto with [color = gray ] < 5) [crea-nuove-auto]
if (ticks mod t-attesa-per-rimozione = 0)
[if any? (auto with [xcor = x-old and ycor = y-old])
[ let list-auto auto with [xcor = x-old and ycor = y-old]
ifelse (count list-auto > 10)

```

```

[ask min-n-of 3 list-auto [who]
  [set auto-rimosse auto-rimosse + 1
    if (n-sonda = 1)
      [if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-auto-sonda") [set somma-t1 t-percorrenza] set flag-sonda1 true]
    if (n-sonda = 2)
      [if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-auto-sonda") [set somma-t2 t-percorrenza] set flag-sonda2 true]
    if (n-sonda = 3)
      [if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-auto-sonda") [set somma-t3 t-percorrenza] set flag-sonda3 true]
    die]
  ]
[ask min-one-of list-auto [who]
  [set auto-rimosse auto-rimosse + 1
    if (n-sonda = 1) [set flag-sonda1 true]
    if (n-sonda = 2) [set flag-sonda2 true]
    if (n-sonda = 3) [set flag-sonda3 true]
    die]
  ]
]
]

```

ask auto

```

[
  if (pcolor = orange)
  [
    if (percorso = 1)
      [if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-ultima-auto") [set somma-t1 t-percorrenza set costo-medio-complessivo costo-medio-complessivo + (somma-t1 / 10)
        plot-t-percorrenza-ultima-auto set export-cont export-cont + 1 if (export-cont = desired-n-tot-auto) [esporta-dati] ]
        if (Calcolo-T-percorrenza = "T-sommato-su-ultimi-NN-ticks") [set somma-t1 (somma-t1 + t-percorrenza)]
        if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-auto-sonda" and (n-sonda = 0 or n-sonda = 1))
          [set costo-medio-complessivo costo-medio-complessivo + (t-percorrenza / 10) set export-cont export-cont + 1 if (export-cont = desired-n-tot-auto) [esporta-dati]
            if (n-sonda = 1) [set somma-t1 t-percorrenza set flag-sonda1 true plot-t-percorrenza-ultima-auto]]]
    if (percorso = 2)
      [if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-ultima-auto") [set somma-t2 t-percorrenza set costo-medio-complessivo costo-medio-complessivo + (somma-t2 / 10)
        plot-t-percorrenza-ultima-auto set export-cont export-cont + 1 if (export-cont = desired-n-tot-auto) [esporta-dati] ]
        if (Calcolo-T-percorrenza = "T-sommato-su-ultimi-NN-ticks") [set somma-t2 (somma-t2 + t-percorrenza)]
        if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-auto-sonda" and (n-sonda = 0 or n-sonda = 2))
          [set costo-medio-complessivo costo-medio-complessivo + (t-percorrenza / 10) set export-cont export-cont + 1 if (export-cont = desired-n-tot-auto) [esporta-dati]
            if (n-sonda = 2) [set somma-t2 t-percorrenza set flag-sonda2 true plot-t-percorrenza-ultima-auto]]]
    if (percorso = 3)
      [if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-ultima-auto") [set somma-t3 t-percorrenza set costo-medio-complessivo costo-medio-complessivo + (somma-t3 / 10)
        plot-t-percorrenza-ultima-auto set export-cont export-cont + 1 if (export-cont = desired-n-tot-auto) [esporta-dati] ]
        if (Calcolo-T-percorrenza = "T-sommato-su-ultimi-NN-ticks") [set somma-t3 (somma-t3 + t-percorrenza)]
        if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-auto-sonda" and (n-sonda = 0 or n-sonda = 3))

```

```

[set costo-medio-complessivo costo-medio-complessivo + (t-percorrenza / 10) set export-cont export-cont + 1 if (export-cont =
desired-n-tot-auto) [esporta-dati]
    if (n-sonda = 3) [set somma-t3 t-percorrenza set flag-sonda3 true plot-t-percorrenza-ultima-auto]]]
die
]

set x-old xcor
set y-old ycor

if (pcolor = 0)
[ ifelse any? neighbors with [pcolor != 0 and pcolor != colore-incroci ]
[let xxcor 0 let yykor 0
ask one-of neighbors with [pcolor != 0 and pcolor != colore-incroci] [ set xxcor pxcor set yykor pycor ]
setxy xxcor yykor
]
[if (any? patches in-cone 5 270 with [pcolor != 0 and pcolor != colore-incroci])
[let xxcor 0 let yykor 0
ask one-of patches in-cone 5 270 with [pcolor != 0 and pcolor != colore-incroci] [ set xxcor pxcor set yykor pycor ]
setxy xxcor yykor]
]
]

if (pcolor = 0) [set auto-rimosse auto-rimosse + 1
    if (n-sonda = 1) [set flag-sonda1 true]
    if (n-sonda = 2) [set flag-sonda2 true]
    if (n-sonda = 3) [set flag-sonda3 true]
die]

let ccolor pcolor
if (ccolor = colore-incroci and p-old-color != colore-incroci) [set incrocio-flag true]
set g-old-color old-color
let n-percorso 0

if incrocio-flag ;questa flag si disattiva subito dopo il primo passaggio su una patch di incrocio
[
let c-speed 0
let p-heading 0
ifelse (prob-flag and (random-float 1 < prob-feedback))
[;si attiva se la probabilit^ di feedback ? diversa da zero
ifelse (color = gray)
[
let n-auto1 count auto with [self != myself and pcolor = colore-ramo-1] in-radius (profondita-cono-visione / 1.6)
let n-auto2 count auto with [self != myself and pcolor = colore-ramo-2] in-radius (profondita-cono-visione / 1.6)
ifelse (n-sonda = 0)
[ ifelse (prob2 > prob1 and prob2 > prob3) [ifelse (n-auto1 < n-auto2) [set ccolor colore-ramo-1] [set ccolor colore-ramo-2]]
[ifelse (n-auto2 < n-auto1) [set ccolor colore-ramo-2] [set ccolor colore-ramo-1]]]
[ ifelse (n-sonda = 2) [set ccolor colore-ramo-2] [set ccolor colore-ramo-1] ]
]
]

```

```

let n-auto4 count auto with [self != myself and pcolor = colore-ramo-4] in-radius (profondita-cono-visione / 1.6)
let n-auto3 count auto with [self != myself and pcolor = colore-ramo-3] in-radius (profondita-cono-visione / 1.6)
ifelse (n-sonda = 0)
[ ifelse (prob3 > prob1) [ifelse (n-auto4 < n-auto3) [set ccolor colore-ramo-4] [set ccolor colore-ramo-3]]
  [ifelse (n-auto3 < n-auto4) [set ccolor colore-ramo-3] [set ccolor colore-ramo-4]]]
[ ifelse (n-sonda = 3) [set ccolor colore-ramo-3] [set ccolor colore-ramo-4] ]
]
]
[
ifelse (color = gray)
[
let n-auto1 count auto with [self != myself and pcolor = colore-ramo-1] in-radius (profondita-cono-visione / 1.6)
let n-auto2 count auto with [self != myself and pcolor = colore-ramo-2] in-radius (profondita-cono-visione / 1.6)
ifelse (n-sonda = 0)
[
if (n-auto2 < n-auto1) [set ccolor colore-ramo-2]
if (n-auto1 < n-auto2) [set ccolor colore-ramo-1]
if (n-auto1 = n-auto2) [set ccolor one-of list colore-ramo-1 colore-ramo-2]
]
];[ ask one-of patches in-radius 10 with [pcolor != 0 and pcolor != colore-incroci and pcolor != g-old-color] [set ccolor pcolor]]
[ ifelse (n-sonda = 2) [set ccolor colore-ramo-2] [set ccolor colore-ramo-1] ]
]
[
let n-auto4 count auto with [self != myself and pcolor = colore-ramo-4] in-radius (profondita-cono-visione / 1.6)
let n-auto3 count auto with [self != myself and pcolor = colore-ramo-3] in-radius (profondita-cono-visione / 1.6)
ifelse (n-sonda = 0)
[
if (n-auto3 < n-auto4) [set ccolor colore-ramo-3]
if (n-auto4 < n-auto3) [set ccolor colore-ramo-4]
if (n-auto4 = n-auto3) [set ccolor one-of list colore-ramo-4 colore-ramo-3]
]
];[ ask one-of patches in-radius 10 with [pcolor != 0 and pcolor != colore-incroci and pcolor != g-old-color] [set ccolor pcolor]]
[ ifelse (n-sonda = 3) [set ccolor colore-ramo-3] [set ccolor colore-ramo-4] ] ]
]
]
if (any? direzioni with [d-color = ccolor])
[ask one-of direzioni with [d-color = ccolor]
[set p-heading heading set c-speed d-speed set g-new-color d-color
if (g-new-color != g-old-color and g-new-color != colore-ramo-uscita)
[
set n-macchine n-macchine + 1
if (n-identita = 2) [set n-percorso 2]
if (n-identita = 3) [set n-percorso 3]
if (n-identita = 4) [set n-percorso 1]
if (n-identita = 1) [set n-percorso 9]
]
set g-old-color d-color
]
]
]

```



```

set incrocio-flag false
set heading p-heading
set speed-limit random-normal c-speed (c-speed / 5)
set flag-flusso true
jump 1
]

if (n-percorso != 0) [set percorso n-percorso
    if (percorso = 1) [set color blue]
    if (percorso = 2) [set color red]
    if (percorso = 3) [set color green]
    if (percorso = 9) [set color gray + 0.1]
]

if (pcolor != colore-incroci and old-color != colore-incroci and pcolor != old-color )
[ let p-heading 0 let c-speed 0
ask direzioni with [d-color = ccolor] [set p-heading heading set c-speed d-speed]
set heading p-heading
set speed-limit random-normal c-speed (c-speed / 5)
set flag-flusso true
jump 1
]

let pp-heading 0
ask direzioni with [d-color = ccolor] [set pp-heading heading]
if (pcolor != colore-incroci and heading != pp-heading)
    [set auto-rimosse auto-rimosse + 1
    if (n-sonda = 1) [set flag-sonda1 true]
    if (n-sonda = 2) [set flag-sonda2 true]
    if (n-sonda = 3) [set flag-sonda3 true]
    die]

set old-color pcolor
set p-old-color pcolor

ifelse any? auto in-cone (1.5 * size-auto) raggio-visione-ramo5 with [self != myself]
[
    set auto-davanti (one-of auto in-cone (1.5 * size-auto) raggio-visione-ramo5 with [self != myself])
    set speed ([speed] of auto-davanti) slow-down-car
]
[ speed-up-car set auto-davanti 0]

if speed < speed-min [ set speed speed-min ]
if speed > speed-limit [ set speed speed-limit ]
fd speed

if flag-flusso
[
    if any? direzioni in-radius 5 with [n-identita != 0 and n-identita != 6 ]

```

```

[ask one-of direzioni in-radius 5 with [n-identita != 0 and n-identita != 6 ] [set flusso flusso + 1] set flag-flusso false ]
]

set t-percorrenza t-percorrenza + 1

]
if (Calcolo-T-percorrenza = "T-sommato-su-ultimi-NN-ticks")
[if (ticks mod NN-ticks = 0)
  [plot-t-percorrenza-ultimi-NN-ticks
    set somma-t1 0 set somma-n1 0
    set somma-t2 0 set somma-n2 0
    set somma-t3 0 set somma-n3 0 ] ]

if (ticks mod (time-interval-flusso * 10) = 0) [ plot-flusso-nel-tempo plot-vel-media-nei-rami ]

if (ticks mod 100 = 0) [ istogramma-n-macchine ]
set num-auto count auto

if (count auto with [n-sonda = 1] = 0) [set flag-sonda1 true]
if (count auto with [n-sonda = 2] = 0) [set flag-sonda2 true]
if (count auto with [n-sonda = 3] = 0) [set flag-sonda3 true]

end

to plot-flusso-nel-tempo

set iter-flusso iter-flusso + 1
set-current-plot "flusso-nel-tempo"
ask direzioni with [n-identita = 1] [set-current-plot-pen "ramo1" plotxy iter-flusso (flusso * (3600 / time-interval-flusso)) set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 2] [set-current-plot-pen "ramo2" plotxy iter-flusso (flusso * (3600 / time-interval-flusso)) set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 3] [set-current-plot-pen "ramo3" plotxy iter-flusso (flusso * (3600 / time-interval-flusso)) set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 4] [set-current-plot-pen "ramo4" plotxy iter-flusso (flusso * (3600 / time-interval-flusso)) set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 5] [set-current-plot-pen "ramo5" plotxy iter-flusso (flusso * (3600 / time-interval-flusso)) set flusso 0]

end

to plot-vel-media-nei-rami

set iter-flusso iter-flusso + 1
set-current-plot "vel-media-nei-vari-rami"
ask direzioni with [n-identita = 1] [let av-speed 0 let iii 0 if any? auto with [pcolor = colore-ramo-1] [ask auto with [pcolor = colore-ramo-1] [set av-speed av-speed + speed set iii iii + 1]
  set av-speed (av-speed / iii)] set-current-plot-pen "ramo1" plotxy iter-flusso (av-speed * 16) set %auto-ramo1 ((n-macchine / n-auto-entrate) * 100) ]
ask direzioni with [n-identita = 2] [let av-speed 0 let iii 0 if any? auto with [pcolor = colore-ramo-2] [ask auto with [pcolor = colore-ramo-2] [set av-speed av-speed + speed set iii iii + 1]

```

```

        set av-speed (av-speed / iii) set-current-plot-pen "ramo2" plotxy iter-flusso (av-speed * 16) set %auto-ramo2 ((n-macchine / n-
auto-entrate) * 100) ]
ask direzioni with [n-identita = 3] [let av-speed 0 let iii 0 if any? auto with [pcolor = colore-ramo-3] [ask auto with [pcolor = colore-ramo-3] [set av-
speed av-speed + speed set iii iii + 1]
        set av-speed (av-speed / iii) set-current-plot-pen "ramo3" plotxy iter-flusso (av-speed * 16) set %auto-ramo3 ((n-macchine / n-
auto-entrate) * 100) ]
ask direzioni with [n-identita = 4] [let av-speed 0 let iii 0 if any? auto with [pcolor = colore-ramo-4] [ask auto with [pcolor = colore-ramo-4] [set av-
speed av-speed + speed set iii iii + 1]
        set av-speed (av-speed / iii) set-current-plot-pen "ramo4" plotxy iter-flusso (av-speed * 16) set %auto-ramo4 ((n-macchine / n-
auto-entrate) * 100) ]
ask direzioni with [n-identita = 5] [let av-speed 0 let iii 0 if any? auto with [pcolor = colore-ramo-5] [ask auto with [pcolor = colore-ramo-5] [set av-
speed av-speed + speed set iii iii + 1]
        set av-speed (av-speed / iii) set-current-plot-pen "ramo5" plotxy iter-flusso (av-speed * 16) set %auto-ramo5 (%auto-ramo2 +
%auto-ramo3) ]

end

to plot-t-percorrenza-ultima-auto

set-current-plot "T-percorrenza-percorsi"

set t-tot-percorso1 (somma-t1 / 10)
set t-tot-percorso2 (somma-t2 / 10)
set t-tot-percorso3 (somma-t3 / 10)

if (t-tot-percorso1 > 0 and t-tot-percorso2 > 0 and t-tot-percorso3 > 0)
[let t-tot-3percorsi ((1 / t-tot-percorso1) + (1 / t-tot-percorso2) + (1 / t-tot-percorso3) )
set prob1 (1 / t-tot-percorso1) / t-tot-3percorsi
set prob2 (1 / t-tot-percorso2) / t-tot-3percorsi
set prob3 (1 / t-tot-percorso3) / t-tot-3percorsi
set prob-flag true
set-current-plot-pen "percorso1" plot t-tot-percorso1
set-current-plot-pen "percorso2" plot t-tot-percorso2
set-current-plot-pen "percorso3" plot t-tot-percorso3
]

end

to plot-t-percorrenza-ultimi-NN-ticks

set-current-plot "T-percorrenza-percorsi"
ask direzioni with [ n-identita = 4 ] [ set somma-n1 n-macchine]
if (somma-n1 > 0) [set t-tot-percorso1 ((somma-t1 / 10) / somma-n1) ]
ask direzioni with [ n-identita = 2 ] [ set somma-n2 n-macchine]
if (somma-n2 > 0) [set t-tot-percorso2 ((somma-t2 / 10) / somma-n2) ]
ask direzioni with [ n-identita = 3 ] [ set somma-n3 n-macchine]
if (somma-n3 > 0) [set t-tot-percorso3 ((somma-t3 / 10) / somma-n3) ]

```

```

if (t-tot-percorso1 > 0 and t-tot-percorso2 > 0 and t-tot-percorso3 > 0)
[let t-tot-3percorsi ((1 / t-tot-percorso1) + (1 / t-tot-percorso2) + (1 / t-tot-percorso3) )
set prob1 (1 / t-tot-percorso1) / t-tot-3percorsi
set prob2 (1 / t-tot-percorso2) / t-tot-3percorsi
set prob3 (1 / t-tot-percorso3) / t-tot-3percorsi
set prob-flag true esporta-dati
set-current-plot-pen "percorso1" plot t-tot-percorso1
set-current-plot-pen "percorso2" plot t-tot-percorso2
set-current-plot-pen "percorso3" plot t-tot-percorso3
]

```

end

to istogramma-n-macchine

```

set-current-plot "Traffico totale nei 3 percorsi"
clear-plot
set-plot-x-range 1 2
let somma-hn1 0
let somma-hn2 0
let somma-hn3 0
ask direzioni with [ n-identita = 4 ] [ set somma-hn1 n-macchine]
ask direzioni with [ n-identita = 2 ] [ set somma-hn2 n-macchine]
ask direzioni with [ n-identita = 3 ] [ set somma-hn3 n-macchine]
plotxy 1 somma-hn1
plotxy 2 somma-hn2
plotxy 3 somma-hn3

```

end

to cancella-1 auto

```

if mouse-down?
[
ask patch round mouse-xcor round mouse-ycor
[ ask auto in-radius 2 [die]]
]

```

end

to esporta-dati

```

file-write desired-n-tot-auto file-print ""
file-write prob-feedback file-print ""
file-write profondita-cono-visione file-print ""
file-write %auto-ramo1 file-print ""
file-write %auto-ramo2 file-print ""
file-write %auto-ramo3 file-print ""
file-write %auto-ramo4 file-print ""
file-write %auto-ramo5 file-print ""

```

```
file-write (costo-medio-complessivo / desired-n-tot-auto) file-print ""  
file-close  
set flag-stop true
```

```
end
```

```
to esporta-dati-old  
  set export-cont export-cont + 1  
  file-write export-cont  
  file-write t-tot-percorso1  
  file-write t-tot-percorso2  
  file-write t-tot-percorso3  
  file-print ""  
  if (export-cont = desired-n-tot-auto) [file-close set flag-stop true]  
end
```

```
to rifinisci-strada
```

```
if mouse-down?  
  [  
    ask patch mouse-xcor mouse-ycor  
    [  
      if (pcolor = 0) [ set pcolor colore-ramo-5  
        ;ask neighbors [ set pcolor pccolor ]  
      ]  
    ]  
  ]  
end
```

Appendice III: script dell’interfaccia di programmazione B

```
globals [ colore-strada target-heading flag-auto pccolor tpatch tpflag cflag g-old-color g-new-color num-auto-stopped monitor-n-macchine num-auto
tempo-max-di-arresto size-auto auto-rimosse somma-t1 somma-n1 somma-t2 somma-n2 somma-t3 somma-n3 t-tot-percorso1 t-tot-percorso2 raggio-
visione-ramo5 t-tot-percorso3 prob1 prob2 prob3 prob-flag flusso-in-ingresso cont-ticks-poisson av-speed-up ticks-poisson flag-sonda1 flag-sonda2
flag-sonda3 export-cont flag-stop iter-flusso colore-ramo-1 colore-ramo-2 colore-ramo-3 colore-ramo-4 colore-ramo-5 colore-incroci colore-ramo-
ingresso colore-ramo-uscita costo-medio-complessivo Calcolo-T-percorrenza %auto-ramo1 %auto-ramo2 %auto-ramo3 %auto-ramo4 %auto-ramo5
slow-down-global NN-ticks n-auto-entrate n-auto-pend-entrate flag-transiente1 flag-transiente2 flag-debugging tav-length-mem-p1 tav-length-mem-
p2 tav-length-mem-p3 av-length-mem-p1 av-length-mem-p2 av-length-mem-p3 ]
```

```
breed [auto auto1]
```

```
breed [direzioni direzione]
```

```
breed [pennello]
```

```
patches-own [ central-flag ]
```

```
direzioni-own [ d-color n-identita n-macchine d-speed flusso ]
```

```
auto-own [ speed speed-old speed-limit speed-min speed-up slow-down incrocio-flag old-color new-color p-old-color auto-davanti t-percorrenza
percorso x-old y-old n-sonda flag-flusso memoria-percorso1 memoria-percorso2 memoria-percorso3 av-prob1 av-prob2 av-prob3 flag-pendolari hide-
time hide-time-max move-flag ]
```

```
to importa-mappa
```

```
ca
```

```
importa-world
```

```
setup
```

```
end
```

```
to setup
```

```
file-close
```

```
clear-all-plots
```

```
reset-ticks
```

```
random-seed rseed
```

```
ask auto [die]
```

```
ask direzioni [set n-macchine 0]
```

```
ask direzione 3 [set d-speed (maxspeed1 / 16)]
```

```
ask direzione 9 [set d-speed (maxspeed2 / 16)]
```

```
ask direzione 13 [set d-speed (maxspeed3 / 16)]
```

```
ask direzione 5 [set d-speed (maxspeed4 / 16)]
```

```
ask direzione 11 [set d-speed (maxspeed5 / 16)]
```

```
set-default-shape auto "car-2"
```

```
set flag-auto false
```

```
set cflag true
```

```
set num-auto 0
```

```
set size-auto 2.5
```

```
set auto-rimosse 0
```

```
set flag-stop false
set iter-flusso 0
set n-auto-entrate 0
set n-auto-pend-entrate 0
set costo-medio-complessivo 0
set raggio-visione-ramo5 161

set-current-plot "Traffico totale nei 3 percorsi"
set-plot-x-range 1 2
set-plot-y-range 0 1

set somma-t1 0
set somma-t2 0
set somma-t3 0
set somma-n1 0
set somma-n2 0
set somma-n3 0
set t-tot-percorso1 0
set t-tot-percorso2 0
set t-tot-percorso3 0
set prob1 random-float 1
set prob2 random-float 1
set prob3 random-float 1
set prob-flag false
set colore-ramo-1 8.51
set colore-ramo-2 8.54
set colore-ramo-3 8.56
set colore-ramo-4 8.52
set colore-ramo-5 8.55
set colore-ramo-ingresso 8.5
set colore-ramo-uscita 8.53
set colore-incroci 8.49
set av-length-mem-p1 0
set av-length-mem-p2 0
set av-length-mem-p3 0
set tav-length-mem-p1 0
set tav-length-mem-p2 0
set tav-length-mem-p3 0

set flag-transiente1 true
set flag-transiente2 false
set av-speed-up 0.8
set slow-down-global 0.8

set flusso-in-ingresso ( 1 / inter-arrival-time )
set cont-ticks-poisson 0
set ticks-poisson random-poisson inter-arrival-time

let file-h "dati-3percorsi.dat"
```

```

if ( file-h != false)
[
  if ( file-exists? file-h) [file-delete file-h]
  file-open file-h
]
set export-cont 0
set flag-debugging false

set Calcolo-T-percorrenza "T-su-ultima-auto"

set-current-plot "flusso-nel-tempo"
ask direzioni with [n-identita = 1] [set-current-plot-pen "ramo1" plotxy 0 0 set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 2] [set-current-plot-pen "ramo2" plotxy 0 0 set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 3] [set-current-plot-pen "ramo3" plotxy 0 0 set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 4] [set-current-plot-pen "ramo4" plotxy 0 0 set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 5] [set-current-plot-pen "ramo5" plotxy 0 0 set flusso 0]

set-current-plot "vel-media-nei-vari-rami"
ask direzioni with [n-identita = 1] [set-current-plot-pen "ramo1" plotxy 0 0]
ask direzioni with [n-identita = 2] [set-current-plot-pen "ramo2" plotxy 0 0]
ask direzioni with [n-identita = 3] [set-current-plot-pen "ramo3" plotxy 0 0]
ask direzioni with [n-identita = 4] [set-current-plot-pen "ramo4" plotxy 0 0]
ask direzioni with [n-identita = 5] [set-current-plot-pen "ramo5" plotxy 0 0]

end

to importa-world

import-world "Braess-new-v5-world.csv"
ask direzioni [ set n-macchine 0 set flusso 0]
setup

end

to crea-nuove-auto

let n-auto count auto

if (( ticks mod inter-arrival-time) = 0)
[
  ask one-of patches with [central-flag = true and pcolor = (orange + 1)]
  [
    let ccolor pcolor
    ifelse (random 100 < percentuale-pendolari)
    [
      ifelse (any? auto with [flag-pendolari and hide-time = hide-time-max])
      [
        ask one-of auto with [flag-pendolari and hide-time = hide-time-max]

```



```

[
  set heading 180
  set hide-time 0
  set hide-time-max (600 + random (hide-time-limit * 60 * 10)) ;in minuti
  set speed (speed-ingresso / 16)
  set speed-limit (speed-ingresso / 16)
  set speed-min 0
  set speed-up (av-speed-up / 16) ;(av-speed-up / 80)
  set slow-down (slow-down-global / 16)
  set color gray
  set incrocio-flag false
  set flag-flusso true
  set old-color colore-ramo-ingresso
  set p-old-color colore-ramo-ingresso
  set t-percorrenza 0
  set move-flag true
  move-to one-of patches with [central-flag = true and pcolor = (orange + 1)]
  show-turtle
  fd size-auto
]
]
[sprout-auto 1 [settaggi-auto-pendolari]]
set n-auto-pend-entrate n-auto-pend-entrate + 1
]
[sprout-auto 1 [settaggi-auto]]
set n-auto-entrate n-auto-entrate + 1
]
]

end

to settaggi-auto-pendolari

  settaggi-auto
  set memoria-percorso1 [] ;memorizza le probabilit^ relative al percorso 1
  set memoria-percorso2 [] ;memorizza le probabilit^ relative al percorso 2
  set memoria-percorso3 [] ;memorizza le probabilit^ relative al percorso 3
  set flag-pendolari true
  set hide-time-max (600 + random (hide-time-limit * 60 * 10)) ;in minuti

end

to settaggi-auto

  set size size-auto
  set move-flag true
  set heading 180
  set speed (speed-ingresso / 16)
  set speed-limit (speed-ingresso / 16)

```

```

set speed-min 0
set speed-up (av-speed-up / 16) ;(av-speed-up / 80)
set slow-down (slow-down-global / 16)
set color gray
set flag-pendolari false
set incrocio-flag false
set flag-flusso true
set old-color colore-ramo-ingresso
set p-old-color colore-ramo-ingresso
set t-percorrenza 0
set n-sonda 0
fd size-auto

end

to slow-down-car ;; turtle procedure
  set speed speed - slow-down
end

to speed-up-car ;; regola l'accelerazione delle auto
  set speed ( speed + speed-up) ; 0.1 = 16 m/s^2
end

to start-auto

if flag-stop [stop]
tick
wait 0
if (count auto with [color = gray ] < 5) [crea-nuove-auto]

if (ticks mod t-attesa-per-rimozione = 0)
  [if any? (auto with [xcor = x-old and ycor = y-old and move-flag])
    [ let list-auto []
      set list-auto auto with [xcor = x-old and ycor = y-old and pcolor != 0]
      ifelse (count list-auto > 10)
        [ask min-n-of 3 list-auto [who]
          [set auto-rimosse auto-rimosse + 1
            die ]
        ]
        [
          if (count list-auto > 0) [ask min-one-of list-auto [who] [set auto-rimosse auto-rimosse + 1 die ]]
        ]
      ]
  ]

ask auto
[
  if (pcolor = orange)
  [

```

```

if (percorso = 1)
[if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-ultima-auto")
[set somma-t1 t-percorrenza set costo-medio-complessivo costo-medio-complessivo + (somma-t1 / 10) plot-t-percorrenza-ultima-auto]]
if (percorso = 2)
[if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-ultima-auto")
[set somma-t2 t-percorrenza set costo-medio-complessivo costo-medio-complessivo + (somma-t1 / 10) plot-t-percorrenza-ultima-auto]]
if (percorso = 3)
[if (Calcolo-T-percorrenza = "T-su-ultima-auto")
[set somma-t3 t-percorrenza set costo-medio-complessivo costo-medio-complessivo + (somma-t1 / 10) plot-t-percorrenza-ultima-auto]]
routine-pendolari
]

if (flag-pendolari and pcolor = black) [ if (hide-time < hide-time-max) [set hide-time hide-time + 1 ] ]

set x-old xcor
set y-old ycor

if (pcolor = 0)
[ ifelse any? neighbors with [pcolor != 0 and pcolor != colore-incroci ]
[let xxcor 0 let yycor 0
ask one-of neighbors with [pcolor != 0 and pcolor != colore-incroci] [ set xxcor pxcor set yycor pycor ]
setxy xxcor yycor
]
]
[if (any? patches in-cone 5 270 with [pcolor != 0 and pcolor != colore-incroci])
[let xxcor 0 let yycor 0
ask one-of patches in-cone 5 270 with [pcolor != 0 and pcolor != colore-incroci] [ set xxcor pxcor set yycor pycor ]
setxy xxcor yycor]
]
]

if (move-flag and pcolor = 0) [set auto-rimosse auto-rimosse + 1 die ]

let ccolor pcolor
if (ccolor = colore-incroci and p-old-color != colore-incroci) [set incrocio-flag true]
set g-old-color old-color
let n-percorso 0

if (flag-pendolari and not flag-transiente1)
[
ifelse (length memoria-percorso1 > 0) [set av-prob1 mean memoria-percorso1][set av-prob1 0]
ifelse (length memoria-percorso2 > 0) [set av-prob2 mean memoria-percorso2][set av-prob2 0]
ifelse (length memoria-percorso3 > 0) [set av-prob3 mean memoria-percorso3][set av-prob3 0]
]

if incrocio-flag ;questa flag si disattiva subito dopo il primo passaggio su una patch di incrocio
[
let c-speed 0
let p-heading 0
ifelse (prob-flag and (random-float 1 < prob-feedback))

```

```

[
  ifelse (color = gray)
  [
    ifelse (prob2 > prob1 and prob2 > prob3) [set ccolor colore-ramo-2] [set ccolor colore-ramo-1]
    if (flag-pendolari and random-float 1 < prob-mem-pendolari)
      [ifelse (av-prob2 > av-prob1 and av-prob2 > av-prob3)
        [set ccolor colore-ramo-2][set ccolor colore-ramo-1]]
    ]
  [
    ifelse (prob3 > prob1) [set ccolor colore-ramo-3] [set ccolor colore-ramo-4]
    if (flag-pendolari and random-float 1 < prob-mem-pendolari)
      [ifelse (av-prob1 > av-prob3) [set ccolor colore-ramo-4][set ccolor colore-ramo-3]]
    ]
  ]
[
  ifelse (color = gray)
  [
    set ccolor one-of list colore-ramo-1 colore-ramo-2
    if (flag-pendolari and not flag-transiente1)
      [ifelse (av-prob2 > av-prob1 and av-prob2 > av-prob3) [set ccolor colore-ramo-2][set ccolor colore-ramo-1]]
    ]
  [
    set ccolor one-of list colore-ramo-4 colore-ramo-3
    if (flag-pendolari and not flag-transiente1)
      [ifelse (av-prob1 > av-prob3) [set ccolor colore-ramo-4][set ccolor colore-ramo-3]]
    ]
  ]
if (any? direzioni with [d-color = ccolor])
[ask one-of direzioni with [d-color = ccolor]
  [set p-heading heading set c-speed d-speed set g-new-color d-color
  if (g-new-color != g-old-color and g-new-color != colore-ramo-uscita)
    [
      set n-macchine n-macchine + 1
      if (n-identita = 2) [set n-percorso 2]
      if (n-identita = 3) [set n-percorso 3]
      if (n-identita = 4) [set n-percorso 1]
      if (n-identita = 1) [set n-percorso 9]
    ]
  set g-old-color d-color
  ]
]
set incrocio-flag false
set heading p-heading
set speed-limit random-normal c-speed (c-speed / 5)
set flag-flusso true
jump 1
]
if (n-percorso != 0) [set percorso n-percorso

```

```

        if (percorso = 1) [set color blue]
        if (percorso = 2) [set color red]
        if (percorso = 3) [set color green]
        if (percorso = 9) [set color gray + 0.1]
    ]

if (pcolor != colore-incroci and old-color != colore-incroci and pcolor != old-color )
[ let p-heading 0 let c-speed 0
  ask direzioni with [d-color = ccolor] [set p-heading heading set c-speed d-speed]
  set heading p-heading
  set speed-limit random-normal c-speed (c-speed / 10)
  set flag-flusso true
  jump 1
]

let pp-heading 0
ask direzioni with [d-color = ccolor] [set pp-heading heading]
if (move-flag and pcolor != colore-incroci and heading != pp-heading)
    [set auto-rimosse auto-rimosse + 1
     die ]

set old-color pcolor
set p-old-color pcolor

ifelse any? auto in-cone (1.5 * size-auto) raggio-visione-ramo5 with [self != myself]
[
  set auto-davanti (one-of auto in-cone (1.5 * size-auto) raggio-visione-ramo5 with [self != myself])
  set speed ([speed] of auto-davanti) slow-down-car
]
[ speed-up-car set auto-davanti 0]

if speed < speed-min [ set speed speed-min ]
if speed > speed-limit [ set speed speed-limit ]
fd speed ;fa avanzare le auto

if flag-flusso
[
  if any? direzioni in-radius 5 with [n-identita != 0 and n-identita != 6 ]
    [ask one-of direzioni in-radius 5 with [n-identita != 0 and n-identita != 6 ] [set flusso flusso + 1] set flag-flusso false ]
]

if (move-flag) [set t-percorrenza t-percorrenza + 1]

if (flag-pendolari)
[set tav-length-mem-p1 tav-length-mem-p1 + length memoria-percorso1
  set tav-length-mem-p2 tav-length-mem-p2 + length memoria-percorso2
  set tav-length-mem-p3 tav-length-mem-p3 + length memoria-percorso3]

```

```

]
if (tav-length-mem-p1 > 0) [ set av-length-mem-p1 tav-length-mem-p1 / n-auto-pend-entrate ]
if (tav-length-mem-p2 > 0) [ set av-length-mem-p2 tav-length-mem-p2 / n-auto-pend-entrate ]
if (tav-length-mem-p3 > 0) [ set av-length-mem-p3 tav-length-mem-p3 / n-auto-pend-entrate ]

set tav-length-mem-p1 0
set tav-length-mem-p2 0
set tav-length-mem-p3 0

if (ticks mod (time-interval-flusso * 10) = 0) [ set iter-flusso iter-flusso + 1 plot-flusso-nel-tempo plot-vel-media-nei-rami ]

if (ticks mod 100 = 0) [ istogramma-n-macchine ]

if (int (int (ticks / 10) / 60) > transiente1) [set flag-transiente1 false set flag-transiente2 true]
if (int (int (ticks / 10) / 60) > (transiente1 + transiente2)) [set flag-transiente2 false]

plotta-pendolari

end

to routine-pendolari

ifelse flag-pendolari
[
hide-turtle
set move-flag false
move-to patch -2 43 ;one-of patches with [pcolor = black]
let prob (1 / (t-percorrenza / 10))
if (percorso = 1)
[ set memoria-percorso1 fput precision prob 3 memoria-percorso1
if (length memoria-percorso1 > mem-length) [set memoria-percorso1 remove-item mem-length memoria-percorso1] ]
if (percorso = 2)
[ set memoria-percorso2 fput precision prob 3 memoria-percorso2
if (length memoria-percorso2 > mem-length) [set memoria-percorso2 remove-item mem-length memoria-percorso2] ]
if (percorso = 3)
[ set memoria-percorso3 fput precision prob 3 memoria-percorso3
if (length memoria-percorso3 > mem-length) [set memoria-percorso3 remove-item mem-length memoria-percorso3] ]
]
[die]

end

to plot-flusso-nel-tempo

set-current-plot "flusso-nel-tempo"
ask direzioni with [n-identita = 1] [set-current-plot-pen "ramo1" plotxy iter-flusso (flusso * (3600 / time-interval-flusso)) set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 2] [set-current-plot-pen "ramo2" plotxy iter-flusso (flusso * (3600 / time-interval-flusso)) set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 3] [set-current-plot-pen "ramo3" plotxy iter-flusso (flusso * (3600 / time-interval-flusso)) set flusso 0]

```

```

ask direzioni with [n-identita = 4] [set-current-plot-pen "ramo4" plotxy iter-flusso (flusso * (3600 / time-interval-flusso)) set flusso 0]
ask direzioni with [n-identita = 5] [set-current-plot-pen "ramo5" plotxy iter-flusso (flusso * (3600 / time-interval-flusso)) set flusso 0]

end

to plot-vel-media-nei-rami

set-current-plot "vel-media-nei-vari-rami"
ask direzioni with [n-identita = 1] [let av-speed 0 let iii 0 if any? auto with [pcolor = colore-ramo-1] [ask auto with [pcolor = colore-ramo-1] [set av-
speed av-speed + speed set iii iii + 1]
    set av-speed (av-speed / iii)] set-current-plot-pen "ramo1" plotxy iter-flusso (av-speed * 16) set %auto-ramo1 ((n-macchine / n-
auto-entrate) * 100) ]
ask direzioni with [n-identita = 2] [let av-speed 0 let iii 0 if any? auto with [pcolor = colore-ramo-2] [ask auto with [pcolor = colore-ramo-2] [set av-
speed av-speed + speed set iii iii + 1]
    set av-speed (av-speed / iii)] set-current-plot-pen "ramo2" plotxy iter-flusso (av-speed * 16) set %auto-ramo2 ((n-macchine / n-
auto-entrate) * 100) ]
ask direzioni with [n-identita = 3] [let av-speed 0 let iii 0 if any? auto with [pcolor = colore-ramo-3] [ask auto with [pcolor = colore-ramo-3] [set av-
speed av-speed + speed set iii iii + 1]
    set av-speed (av-speed / iii)] set-current-plot-pen "ramo3" plotxy iter-flusso (av-speed * 16) set %auto-ramo3 ((n-macchine / n-
auto-entrate) * 100) ]
ask direzioni with [n-identita = 4] [let av-speed 0 let iii 0 if any? auto with [pcolor = colore-ramo-4] [ask auto with [pcolor = colore-ramo-4] [set av-
speed av-speed + speed set iii iii + 1]
    set av-speed (av-speed / iii)] set-current-plot-pen "ramo4" plotxy iter-flusso (av-speed * 16) set %auto-ramo4 ((n-macchine / n-
auto-entrate) * 100) ]
ask direzioni with [n-identita = 5] [let av-speed 0 let iii 0 if any? auto with [pcolor = colore-ramo-5] [ask auto with [pcolor = colore-ramo-5] [set av-
speed av-speed + speed set iii iii + 1]
    set av-speed (av-speed / iii)] set-current-plot-pen "ramo5" plotxy iter-flusso (av-speed * 16) set %auto-ramo5 (%auto-ramo2 +
%auto-ramo3) ]

end

to plot-t-percorrenza-ultima-auto

if (not flag-transiente1 and not flag-transiente2)
[
    calcola-probabilita
    set-current-plot "T-percorrenza-percorsi"
    set-current-plot-pen "percorso1" plot t-tot-percorso1
    set-current-plot-pen "percorso2" plot t-tot-percorso2
    set-current-plot-pen "percorso3" plot t-tot-percorso3
]

end

to calcola-probabilita

set prob-flag true

set t-tot-percorso1 (somma-t1 / 10)

```

```

set t-tot-percorso2 (somma-t2 / 10)
set t-tot-percorso3 (somma-t3 / 10)

if (t-tot-percorso1 > 0 and t-tot-percorso2 > 0 and t-tot-percorso3 > 0)
[
  let t-tot-3percorsi ((1 / t-tot-percorso1) + (1 / t-tot-percorso2) + (1 / t-tot-percorso3))
  set prob1 (1 / t-tot-percorso1) / t-tot-3percorsi
  set prob2 (1 / t-tot-percorso2) / t-tot-3percorsi
  set prob3 (1 / t-tot-percorso3) / t-tot-3percorsi
  set export-cont export-cont + 1
  if (export-cont = desired-n-tot-auto) [esporta-dati]
]

end

to plotta-pendolari

set-current-plot "plot-pendolari"
set-current-plot-pen "N-pend" plotxy int (ticks / 10) count auto with [flag-pendolari = true and move-flag]
set-current-plot-pen "N-tot" plotxy int (ticks / 10) count auto with [move-flag]

end

to istogramma-n-macchine

set-current-plot "Traffico totale nei 3 percorsi"
clear-plot
set-plot-x-range 1 2
let somma-hn1 0
let somma-hn2 0
let somma-hn3 0
ask direzioni with [ n-identita = 4 ] [ set somma-hn1 n-macchine]
ask direzioni with [ n-identita = 2 ] [ set somma-hn2 n-macchine]
ask direzioni with [ n-identita = 3 ] [ set somma-hn3 n-macchine]
plotxy 1 somma-hn1
plotxy 2 somma-hn2
plotxy 3 somma-hn3

end

to cancella-1auto
if mouse-down?
[
  ask patch round mouse-xcor round mouse-ycor
  [ ask auto in-radius 2 [die]]
]
end

```


to esporta-dati

```

file-write "desired-n-tot-auto" file-write desired-n-tot-auto file-print ""
file-write "prob-feedback" file-write prob-feedback file-print ""
file-write "percentuale-pendolari" file-write percentuale-pendolari file-print ""
file-write "transiente1(min)" file-write transiente1 file-print ""
file-write "transiente2(min)" file-write transiente2 file-print ""
file-write "%auto-ramo1" file-write %auto-ramo1 file-print ""
file-write "%auto-ramo2" file-write %auto-ramo2 file-print ""
file-write "%auto-ramo3" file-write %auto-ramo3 file-print ""
file-write "%auto-ramo4" file-write %auto-ramo4 file-print ""
file-write "%auto-ramo5" file-write %auto-ramo5 file-print ""
file-write "costo-medio-compl/Nauto" file-write (costo-medio-complessivo / desired-n-tot-auto) file-print ""
file-close
set flag-stop true

```

end

to esporta-dati-old

```

set export-cont export-cont + 1
file-write export-cont
file-write t-tot-percorso1
file-write t-tot-percorso2
file-write t-tot-percorso3
file-print ""
if (export-cont = desired-n-tot-auto) [file-close set flag-stop true]

```

end

to rifinisci-strada

```

if mouse-down?
[
ask patch mouse-xcor mouse-ycor
[
if (pcolor = 0) [ set pcolor colore-ramo-5
;ask neighbors [ set pcolor pccolor ]
]
]
]

```

end

Bibliografia

- [1] Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti Anni 2007-2008 (file:conto_nazionale_mit.pdf);
- [2] “I costi ambientali e sociali della mobilità in Italia” – Associazione Amici della Terra in collaborazione con le FS – Venezia, Febbraio 2002; (da file: comp-cost-ferrociari.pdf)
- [3] Fonte ISTAT, *Statistica degli incidenti Stradali*, 2002 (da file: CNIT05 – Merci pericolose – full text.pdf);
- [4] Fonte: Elaborazioni DiAP Politecnico di Milano da dati Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, ISTAT – Statistica degli incidenti stradali (2000, 2001, 2002, 2003 – 2004) (da file: CNIT05 – Merci pericolose – full text.pdf);
- [5] Libro Bianco intitolato “La politica europea dei trasporti fino al 2010: il momento delle scelte”;
- [6] Cascetta E. (2001). *Transportation systems engineering: theory and methods*. Kluwer Academic Press, Dordrecht, The Netherlands.
- [7] Wardrop J.G. (1952). Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Part II, Vol. 1, pp. 325-378.
- [8] Potts R.B., Oliver R.M. (1972). *Flows in transportation networks*. Academic Press, New York.
- [9] Newell G.F. (1980). *Traffic flows in transportation networks*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- [10] Sheffi Y. (1985). *Urban transportation networks*. Prentice Hall, Englewood Cliff, N.J.
- [11] Ortuzar J. de, Willumsen L.G. (1994). *Modelling Transport*. John Wiley and Sons, New York.
- [12] Cascetta E. (1998). *Teoria e metodi dell’ingegneria dei sistemi di trasporto*. UTET, Torino, Italia.
- [13] M. J. Lighthill and G. Whitman, “On kinematics waves, ii. a theory of traffic flow on long crowded roads,” *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 4, pp. 229:317–345, 1955.
- [14] P. I. Richards, “Shock waves on the highway,” *Operations Research*, vol. 4, pp. 42–51, 1956.
- [15] H. Payne, “Models of freeway traffic and control,” *Simulation Council Proceedings 1*, pp. 51–61, 1971.

- [16] B. D. Greenshields, “A study in highway capacity,” *Highway Research Board Proceedings 14*, p. 458, 1935.
- [17] H. Greenberg, “An analysis of traffic flow,” *Operation Research 7*, pp. 79–85, 1959.
- [18] R. T. Underwood, “Speed, volume, and density relationships, quality and theory of traffic flow,” *Yale Bureau of Highway Traffic, New Haven*, pp. 141–188, 1968.
- [19] M. Papageorgiou and H. Haj-Salem, “Ramp metering impact on urban corridor traffic: Field results,” *Transportation Research Vol. 29A, No. 4*, pp. 303–319, 1995.
- [20] M. Papageorgiou, J. M. Blossville, and H. Hadj-Salem, “Modeling and real-time control of traffic flow on the southern part of boulevard peripherique in Paris part I: Modeling,” *Transportation Res. A*, vol. vol.24, pp. 345–359, 1990.
- [21] A. Kotsialos, M. Papageorgiou, C. Diakaki, Y. Pavlis, and F. Middelham, “Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool metanet,” *IEEE Transactions of Intelligent Transportation System*, vol. Vol.3, December 2002.
- [22] Bureau of Public Roads (1964). *Traffic Assignment Manual*. U.S. Dept. of Commerce, Urban Planning Division, Washington D.C.
- [23] Festa D.C., Nuzzolo A. (1989). Analisi sperimentale delle relazioni velocità-flusso per le strade urbane. *Le Strade*, No. 1226, pp. 459-464.
- [24] Transportation Research Board (2000). *Highway Capacity Manual*. National Research Council. Washington D.C.
- [25] Akcelik R. (1988). The Highway Capacity Manual delay formula for signalized intersections. *ITE Journal*, pp. 23-27.
- [26] Webster F.W. (1958). Traffic Signal Settings. *Road Research Technical Paper 39*, Road Research Laboratory, HMSO, London.
- [27] Webster F.W., Cobbe B.M. (1966). Traffic Signals. *Road Research Technical Paper 56*, Road Research Laboratory, HMSO, London.
- [28] Kleinrock L. (1975). *Queuing System*, vol. I e II, Wiley, New York.
- [29] Bifulco G.N. (1993). A stochastic user equilibrium assignment model for the evaluation of parking policies. *European Journal of Operational Research 71*, pp. 269-287.
- [30] Bhat C. (1997). Recent methodological advances relevant to activity and travel behaviour analysis. *Preprint 8th IATBR*, Austin, Texas.
- [31] Ben Akiva M., Lerman S. (1985). *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

- [32] Daganzo C.F. (1979). *Multinomial Probit: the theory and its application to demand forecasting*. Academic Press, New York.
- [33] Domencich T.A., McFadden D. (1975). *Urban travel demand: a behavioural analysis*. American Elsevier, New York.
- [34] Manski C. (1977). The structure of random utility models. *Theory and Decision*, 8, pp. 229-254.
- [35] Train K. (2003). *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge University Press.
- [36] Fedele V. (2004). *Analisi delle scelte degli utenti di un sistema di trasporto con modelli comportamentali: rappresentazione dell’incertezza dell’ utilità; simulazione dell’insieme di scelta*. Tesi di dottorato. Università Mediterranea di Reggio Calabria.
- [37] Williams H.C.W.L. (1977). On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit. *Environment and Planning* 9A, pp. 285-344.
- [38] Daganzo C.F., Kusnic M. (1992). Another look at the nested logit model. *Technical Report UCB-ITS-RTR 92-2*. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- [39] McFadden D. (1978). Modeling the choice of residential location. *Spatial interaction theory and residential location*, pp. 75-96. North-Holland. Amsterdam.
- [40] Papola A. (2000). Some developments on the cross-nested logit model. *Proceedings of the IX IATBR conference*, Gold Coast, Queensland, Australia.
- [41] Ben Akiva M., Francois B. (1983). “Homogeneous Generalized Extreme Value Model” - *Working paper*, Department of Civil Engineering, MIT Cambridge, Massachusetts.
- [42] Daganzo C.F., Sheffi Y. (1977). On stochastic models of traffic assignment. *Transportation Science*, N. 11(3), pp. 253-274.
- [43] Cascetta E., Nuzzolo A., Russo F., Vitetta A. (1996). A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems, specification and some calibration results for interurban networks. *Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Jean-Baptiste Lesort ed., Pergamon.
- [44] Dial R.B. (1971). A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration. *Transportation Research*, No. 5, pp. 83-111.
- [45] L. A. Pipes, “An operational analysis of traffic dynamics,” *Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. 3, pp. 274–281, 1953.
- [46] A. Reuschel, “Vehicle movements in a platoon,” *Oesterreichisches Ingenieur-Archiv*, vol. 4, pp. 193–215, 1950.

- [47] R. Chandler, R. Herman, and E. Montroll, “Traffic dynamics: Studies in car following,” *Opns. Res.*, vol. 6, pp. 317–45, 1958.
- [48] P. Gipps, “A behavioural car following for computer simulation,” *Transp. Res. B15*, pp. 105–111, 1981.
- [49] “TSS-transport simulation systems,” <http://www.tss-bcn.com>.
- [50] K. Li and P. Ioannou, “Modeling of traffic flow of automated vehicles,” *IEEE Transaction of Intelligent Trasportation System*, vol. vol.5, June 2004.
- [51] P. G. Gipps, “A model for the structure of lane-changing decisions,” *Transportation Research Part B*, vol. 5, pp. 403–414, 1986.
- [52] Q. Yang and H. Koutsopoulos, “A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 113–129, 1996.
- [53] K. Ahmed, E. Moshe, H. Koutsopoulos, and R. Mishalani, “Models of freeway lane changing and gap acceptance behavior,” 1996.
- [54] R. Herman and G. H. Weiss, “Comments on the highway crossing problem,” *Operations Research*, vol. 9, pp. 828–840, 1981.
- [55] D. R. Drew, L. R. LaMotte, J. H. Buhr, and J. A. Wattleworth, “Gap acceptance in the freeway merging process,” *Highway Research Record. No 208*, pp. 1–16, 1967.
- [56] A. J. Miller, “Nine estimators of gap acceptance parameters,” *Bulletin Transport Section, Civil Engineering*, pp. pp. 215–235, 1972.
- [57] C. F. Daganzo, “Estimation of gap acceptance parameters within and across the population from direct roadside observation,” *Transportation Research Part B 15B*, pp. 1–15, 1981.
- [58] H. Mahmassani and Y. Sheffi, “Using gap sequences to estimate gap acceptance functions,” *Transportation Research Part B 15B*, pp. 143–148, 1981.
- [59] “HCM - highway capacity manual,” *TRB Special Report 209*, Washington D.C.: Office of Research, FHWA.
- [60] M. J. Cassidy, S. M. Madanat, M. Wang, and F. Yang, “Unsignalized intersection capacity and level of service : Revisiting critical gap,” *Transportation Research Board, 74th Annual Meeting*, 1995.
- [61] H. Kita, “Effect of merging lane length on the merging behavior at expressway on ramps,” *Transportation and Traffic Theory*, pp. 37–51, 1993, in C. F. Daganzo (Ed.).

- [62] Ana L.C. Bazzan, Franziska Klügl – “Case studies on the Braess Paradox: Simulating route recommendation and learning in abstract and microscopic models” – *Transportation Research Part C 13*, pp 299-319, 2005.
- [63] S. Zhu, D.M. Levinson, L. Zhang – “Agent-based Route Choice with Learning and Exchange of Information” - *Transportation Research Board, Annual Meeting*, 2008.
- [64] S. Hallé, B. Chaib-draa – “A collaborative driving system based on multiagent modeling and simulations” - *Transportation Research Part C 13*, pp 320-345, 2005.
- [65] A. Doniec, R. Mandiau, S. Piechowiak, S. Espié – “A behavioral multi-agent model for road traffic simulation” – *Engineering Applications of Artificial Intelligence* (2008), doi:10.1016/j.engappai.2008.04.002.
- [66] J.Z. Hernández, S. Ossowski, A. G. Serrano – “Multiagent architectures for intelligent traffic management systems” - *Transportation Research Part C 10*, pp 473-506, 2002.
- [67] J.Z. Hernández, S. Ossowski, A. Garcia-Serrano – “On Multiagent Co-ordination Architectures: A Traffic Management Case Study” – *Proceedings of the 34th International conference on System Sciences* (2001).
- [68] R. V. Katwijk, P. V. Koningsbruggen – “Coordination of traffic management instruments using agent technology” - *Transportation Research Part C 10*, pp 455-471, 2002.
- [69] E. Altman, R. El Azouzi, O. Pourtallier – “Avoiding paradoxes in multi-agent competitive routing – *Computer Networks 43*, pp 133-146, (2003).
- [70] A. Bazzan, J. Wahle, F. Klügl – “Agents in Traffic Modelling – From Reactive to Social Behaviour” – *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp 303-306, 1999.
- [71] J.L. Adler, G. Satapathy, V. Manikonda, B. Bowles, V.J. Blue – “A multi-agent approach to cooperative traffic management and route guidance” - *Transportation Research Part B 39*, pp 297-318, 2005.
- [72] J. Wahle, A. Bazzan, F. Klügl, M. Schreckenberg – “The impact of real-time information in a two-route scenario using agent-based simulation” - *Transportation Research Part C 10*, pp 399-417, 2002.
- [73] D. Helbing – “Agent-Based Simulation of Traffic Jams, Crowds, and Supply Networks” – www.helbing.org.
- [74] Hussein Dia, Sakda Panway – “Modelling drivers’ compliance and route choice behavior in response to travel information” – *Springer, Nonlinear Dyn* (2007) 49:493-509; DOI 10.1007/s1107-006-9111-3.

- [75] Rosser J. B. Jr., (1999), On the complexities of complex economic dynamics, *Journal of Economic Perspective*, vol. 13, no. 4, pp. 169-192.
- [76] Tinti T., (1998), La “sfida della complessità” verso il Terzo Millennio, *Novecento*, anno 18, no. 12, pp. 7-12.
- [77] Sanders I. T., McCabe J. A., (2003), *The use of Complexity Science*, Washington Center for Complexity & Public Policy.
- [78] Langton C. G., (1992), *Vita Artificiale* (traduzione di Maurizio Riccucci), *Sistemi intelligenti*, IV, no. 2, pp. 189-246.
- [79] Terna P., (2003a), La simulazione come strumento di indagine per l'economia, *Sistemi Intelligenti*, XV, no. 2, pp. 347-376.
- [80] Axtell R., (2000), *Why agents? On the varied motivations for agent computing in the social sciences*, Center on Social and Economic Dynamics, Working Paper n° 17.
- [81] Conte R., (1998), *Il metodo simulativo*, in *La Ricerca Qualitativa* (a cura di Luca Ricolfi), Roma, Carocci Editore.
- [82] Edmonds B., (2003), *Simulation and Complexity. How they can relate*, presentato al workshop su “Virtual Worlds of Precision: Computer based Simulations in the Natural and Social Sciences”, Oxford, Gennaio 2003.
- [83] Wooldridge M., Jennings N. R., (1995), *Intelligent Agents: Theory and Practice*, *Knowledge Engineering Review*, vol. 10, no. 2, pp. 115-152.

Indice delle figure

Fig. 1 - Traffico totale interno di passeggeri per modo di trasporto [pass-km] - Anno 2007 [1]	6
Fig. 2 - Gli impatti dei trasporti sull’ambiente e sulla collettività	9
Fig. 3 - Esternalità dei trasporti (in termini di costi) in Europa nel 2004	9
Fig. 4 - Proiezioni al 2100: inquinamento e cambiamenti climatici (fonte: IPCC Third Assessment Report - "Climate Change 2001")	14
Fig. 5 - Sinistrosità stradale nei paesi dell’Unione Europea (numero di incidenti) – [3]	15
Fig. 6 - Sinistrosità stradale nei paesi dell’Unione Europea (numero di morti) – [3]	16
Fig. 7 - Ripartizione percentuale degli incidenti per rete stradale – Anno 2004 – [4]	17
Fig. 8 – Un episodio estremo di congestione	18
Fig. 9 - L’imposta sull’inquinamento atmosferico	22
Fig. 10 - L'imposta sulla congestione	23
Fig. 11 - Ingombro per diverse modalità di trasporto (Preseamt Münster)	27
Fig. 12 - Densità veicolare nei Comuni Capoluogo di Provincia - Anno 2007 [1]	30
Fig. 13 - Peculiarità della mobilità ciclistica	32
Fig. 14 - Spazio necessario per la sosta di auto e biciclette	33
Fig. 15 - Campi di applicazione dei sistemi ITS	36
Fig. 16 - Schematizzazione del sistema di gestione del traffico	38
Fig. 17 - Sistemi di input: contatori di traffico	39
Fig. 18 - Servizi di informazione ai guidatori forniti dagli ITS	40
Fig. 19 - Sistemi di informazione in viaggio: navigatore satellitare	42
Fig. 20 - Sistemi di informazione in viaggio: pannelli a messaggio variabile	43
Fig. 21 - Sistemi ITS di supporto alla guida	46
Fig. 22 - Sistema di gestione del traffico nel trasporto pubblico	47
Fig. 23 - Sistemi ITS di informazione all’utenza per il trasporto pubblico	48
Fig. 24 - Sistemi ITS nel trasporto pubblico: semafori intelligenti	48
Fig. 25 - Emergency Vehicle Preemption	51
Fig. 26 - Rilevatori pedonali e segnali di pericolo per i ciclisti in corrispondenza delle intersezioni	51
Fig. 27 - Gestione delle corsie di marcia tramite applicazioni ITS	52
Fig. 28 - Sistema di gestione intelligente degli accessi alle infrastrutture stradali	53
Fig. 29 – Esempi di ramp metering	53
Fig. 30 - Sistemi di informazione ai guidatori in caso di incidenti	54
Fig. 31 - Sistemi di sicurezza ITS in corrispondenza delle intersezioni stradali	55
Fig. 32 - Sistemi di sicurezza in corrispondenza degli attraversamenti pedonali	55
Fig. 33 - Limiti di velocità variabili	56
Fig. 34 - Sistemi di informazione ai guidatori in presenza di cantieri stradali	57
Fig. 35 - Sistemi di informazione ai guidatori rispetto alle condizioni del manto stradale	57
Fig. 36 - Sistemi di pagamento elettronico	58
Fig. 37 - Sistemi ITS nell’ambito del trasporto merci	58
Fig. 38 - Applicazioni ITS nei terminal container (simulazione)	59
Fig. 39 - Sistemi di avvertimento anticollisione	60
Fig. 40 - Sistemi anticollisione attivi	60
Fig. 41 - Sistemi di avvertimento del cambio di corsia	61
Fig. 42 - Intelligent Cruise Control	61
Fig. 43 - Identificazione dell’area di studio e suddivisione in zone di traffico	68
Fig. 44 - Interazione tra i modelli macroscopici	70

Fig. 45 - Schematizzazione della barriera per il calcolo del flusso.....	72
Fig. 46 - Relazione lineare densità-velocità secondo Greenshield	73
Fig. 47 - Andamento della velocità al variare della densità sugli archi	74
Fig. 48 - Curva caratteristica Flusso-Densità nell’ipotesi di Greenshield	75
Fig. 49 - Curva caratteristica Flusso-Densità in presenza di una relazione non lineare velocità- densità	76
Fig. 50 - Esempio di rete e di matrice di incidenza archi-percorsi	78
Fig. 51 - Modello di domanda a quattro stadi [6]	89
Fig. 52 - Matrice origine-destinazione e corrispondente vettore di domanda	90
Fig. 53 - Matrice delle probabilità di scelta del percorso.....	91
Fig. 54 - Schema del modello car-following.....	98
Fig. 55 - Il modello di Pipes.....	99
Fig. 56 - Schema della manovra di lane change	104
Fig. 57 - Un’esposizione del comportamento della formica di Langton [79].....	116
Fig. 58 - Peculiarità di un agente intelligente	120
Fig. 59 - L’interfaccia grafica di Netlogo	123
Fig. 60 - World: la griglia virtuale di Netlogo	124
Fig. 61 - Finestra Model Settings.....	125
Fig. 62 - Elementi dell’interfaccia grafica di Netlogo.....	126
Fig. 63 - L’elemento Button e la relativa finestra di dialogo	127
Fig. 64 - Altri elementi dell’interfaccia grafica: Slider, Switch, Chooser e Monitor	128
Fig. 65 - L’elemento Plot dell’interfaccia grafica.....	128
Fig. 66 - La finestra di dialogo dello Shapes Editor e la finestra che permette di creare nuove forme	130
Fig. 67 - La finestra di dialogo Color Swatches	130
Fig. 68 - Principali strutture per il controllo di flusso.....	132
Fig. 69 - Il dizionario di primitive disponibile nello User Manual di Netlogo	133
Fig. 70 - Esempi della topologia delle reti di traffico considerate in letteratura [71] [72] [73].....	134
Fig. 71 - La rete del paradosso di Braess	135
Fig. 72 - La rete del paradosso di Braess con l’aggiunta dell’arco B-C	137
Fig. 73 - Interfaccia di simulazione in NetLogo (versione A del modello).....	141
Fig. 74 - Interfaccia di simulazione in NetLogo (versione B del modello)	141
Fig. 75 - La finestra Model Settings	142
Fig. 76 - Dimensioni reali di patch, auto, archi della rete, ticks	142
Fig. 77 - Modalità di ingresso dei veicoli	143
Fig. 78 - Velocità caratteristiche sugli archi della rete.....	144
Fig. 79 - Slider accelerazione e decelerazione.....	144
Fig. 80 - Velocità di deflusso-flusso su un arco della rete.....	145
Fig. 81 - Nodi di scelta del percorso e slider per settare la probabilità di feedback	146
Fig. 82 - Strategie di informazione, tempi di percorrenza e probabilità di scelta dei percorsi	148
Fig. 83 - Le auto sonda.....	148
Fig. 84 - Lo slider per settare la profondità del cono di visione	149
Fig. 85 - Gli slider transiente e mem-length	149
Fig. 86 - Monitor per la verifica del riempimento della memoria nella fase “transiente”	150
Fig. 87 - Lo slider per variare il seme della distribuzione random	151
Fig. 88 - Diagramma tempo della simulazione-tempi di percorrenza sui percorsi	151
Fig. 89 - Numero di veicoli presenti sulla rete, percentuale di veicoli sui rami della rete	151
Fig. 90 - Numero complessivo di veicoli transitati su ciascun percorso.....	152

Fig. 91 - Diagramma tempo - flusso sugli archi della rete.....	152
Fig. 92 - Diagramma tempo - velocita media sugli archi della rete.....	152
Fig. 93 - Dagli scenari alle simulazioni	154
Fig. 94 - Andamento del tempo di percorrenza in una simulazione (evento feedback 0 – scenario II)	154
Fig. 95 - Andamento del tempo di percorrenza in una simulazione (evento feedback 0.5 – scenario II)	155
Fig. 96 - Andamento del tempo di percorrenza in una simulazione (evento feedback 1 – scenario II)	155
Fig. 97 - Confronto tra i risultati ottenuti per i cinque scenari in esame	155
Fig. 98 - Fenomeno di sovra reazione alle informazioni (scenario I e II) e minimo del costo medio complessivo per lo scenario II	156
Fig. 99 - Sovra reazione alle informazioni: plateaux dei tempi di percorrenza in una simulazione (evento feedback 1 – scenario II).....	157
Fig. 100 - Picchi dei tempi di percorrenza in una simulazione (evento feedback 0 – scenario II) ..	158
Fig. 101 - Risultati ottenuti per lo scenario III rispetto agli scenari I e II.....	159
Fig. 102 - Risultati ottenuti per lo scenario IV rispetto agli scenari I e II	160
Fig. 103 - Risultati ottenuti per lo scenario V rispetto agli scenari I e II.....	161

Indice delle tabelle

Tab. 1 - Traffico totale interno di passeggeri-km - Anni 1990, 1995, 2000, 2004-2008 [1].....	6
Tab. 2 - Stima delle emissioni di PM ₁₀ delle autovetture, alimentate a benzina e a gasolio, circolanti in ambito urbano - Anno 2007 [1]	11
Tab. 3 - Emissioni di anidride carbonica - Anni 1990, 1995, 2000, 2001, 2003-2008 [1].....	12
Tab. 4 - Emissioni di ossidi di azoto - Anni 1990, 1995, 2000, 2001, 2003-2008 [1].....	13
Tab. 5 - Emissioni di composti organici volatili non metanici - Anni 1990, 1995, 2000, 2001,.....	13
Tab. 6 - Costi esterni imputabili alla mobilità nel 1999 (milioni di euro) – [2]	15
Tab. 7 - Caratteristiche dei principali impatti	19
Tab. 8 - Consistenza del parco veicolare adibito al trasporto pubblico nei grandi Comuni Capoluogo di Provincia ed in quelli dotati di tram, filobus o metropolitana – Anno 2007 [1].....	28
Tab. 9 - Posti-Km offerti per modalità di trasporto pubblico nei grandi Comuni Capoluogo di Provincia ed in quelli dotati di tram, filobus o metropolitana – Anno 2007 [1].....	29
Tab. 10 - Passeggeri annui trasportati da autobus, tram, filobus, metropolitana e funicolari nei Comuni Capoluogo di Provincia, per classi di popolazione - Anni 2000-2007 [1].....	30
Tab. 11 - Classificazione dei modelli di deflusso veicolare	64
Tab. 12 - Classificazione dei modelli di assegnazione	96
Tab. 13 - Modellizzazione dei parametri di traffico in presenza di informazioni ai guidatori: peculiarità dei riferimenti bibliografici presi in esame	112
Tab. 14 - Costo dei percorsi all’equilibrio per la rete di Braess a due percorsi.....	136
Tab. 15 - Costo dei percorsi (Step I) per la rete di Braess a tre percorsi	137
Tab. 16 - Costo dei percorsi (Step II) per la rete di Braess a tre percorsi.....	138
Tab. 17 - Costo dei percorsi (Step III) per la rete di Braess a tre percorsi.....	138
Tab. 18 - Costo dei percorsi all’equilibrio per la rete di Braess a tre percorsi	139
Tab. 19 - Peculiarità degli scenari simulati.....	147

