

POLITECNICO DI MILANO  
Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale  
Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile  
Infrastrutture di Trasporto



# **Sviluppo di indicatori di vulnerabilità sistemica di una rete di trasporto in transitorio e a regime**

Relatore: Prof. Ing. Roberto Maja

Correlatore: Ing. Marco Ponti

Alessandra Bonicelli 731073

Michela Comella 734996

Anno Accademico 2009/2010

# Indice

Indice .....	1
Indice delle figure .....	3
Abstract.....	6
1 Introduzione.....	7
1.1 Organizzazione della tesi.....	8
2 Stato dell'arte.....	10
2.1 Il rischio.....	10
2.2 La vulnerabilità in letteratura .....	12
2.2.1 Il lavoro svolto dal Laboratorio di Mobilità e Trasporti del dipartimento INDACO del Politecnico di Milano .....	12
2.2.2 La definizione e lo studio di Berdica.....	19
2.2.3 L'analisi di Cafiso e altri .....	20
2.2.4 La vulnerabilità secondo Taylor e D'Este .....	23
2.2.5 Gli studi di Jenelius .....	25
2.2.6 Husdal e la vulnerabilità in termini di analisi costi benefici .....	36
2.2.7 Scott, Novak, Aultman-Hall e Guo: l'indice NRI .....	38
2.2.8 Issacharoff L., Lämmer S., Rosato V., Helbing D .....	41
2.3 Spunti derivanti dallo studio dello stato dell'arte.....	44
3 Sviluppo della metodologia per il calcolo della vulnerabilità sistemica .....	46
3.1 Due diverse tipologie di vulnerabilità .....	46
3.2 Concetti di base .....	47
3.3 Metodologia di assegnazione e definizione di scenari .....	47
3.3.1 Ipotesi di base .....	48
3.3.2 Gli scenari simulati.....	50
3.4 Calcolo della vulnerabilità sistemica. Definizione degli indicatori.....	53
3.4.1 Calcolo aumento di costo assoluto e relativo .....	53
3.4.2 Calcolo di indicatori di disagio.....	54
3.4.3 La procedura ciclica.....	55
3.5 Ottimizzazione del metodo.....	55

4	Applicazione alla rete nazionale italiana.....	57
4.1	La costruzione del grafo .....	57
4.2	La matrice OD .....	65
4.3	Implementazione dei modelli di calcolo.....	68
4.3.1	Scenario zero .....	68
4.3.2	Scenario in transitorio.....	71
4.3.3	Scenario a regime .....	73
4.3.4	Calcolo indicatori aumento di costo e aumento percentuale. ....	74
4.3.5	Calcolo indicatore di ritardo .....	75
4.3.6	Analisi risultati .....	78
5	Analisi dei risultati .....	80
5.1	Assegnazione dei flussi di domanda alla rete intatta (scenario “zero”) .....	80
5.2	Distribuzione dell’indicatore di vulnerabilità sistemica: scenario a regime.....	81
5.3	Distribuzione dell’indicatore di vulnerabilità sistemica: scenario in transitorio .....	83
5.4	Differenze di vulnerabilità negli scenari a regime e in transitorio .....	85
5.4.1	Esempio: chiusura tratta dell’A14 tra Pesaro e Rimini (direzione Nord).....	88
5.4.2	Esempio: chiusura tratto di A1 tra Roma e Caserta (direzione Sud).....	92
5.5	Relazione fra la vulnerabilità e alcuni parametri del sistema.....	96
6	Conclusioni.....	103
6.1	Sviluppi futuri.....	105
7	Allegati .....	107
7.1	Il codice per la semplificazione della rete .....	107
7.2	Lo scenario “zero” .....	111
7.3	Lo scenario a regime.....	116
7.4	Lo scenario in transitorio .....	127
7.5	Il calcolo dell’indicatore di ritardo .....	139
	Bibliografia.....	145

## Indice delle figure

Figura 1 Curve di isorischio .....	11
Figura 2 Componenti della vulnerabilità .....	16
Figura 3 Esempi di griglie di forme differenti.....	34
Figura 4 Vulnerabilità e affidabilità .....	37
Figura 5 Esempio di rete.....	38
Figura 6 Frammentazione iniziale della rete globale.....	59
Figura 7 Italia: FRC 0, FRC 1 e FRC 2 .....	59
Figura 8 Rete italiana nel formato CUBE .....	65
Figura 9 Scenario "zero" .....	70
Figura 10 Scenario in transitorio .....	72
Figura 11 Scenario a Regime.....	73
Figura 12 Calcolo Indicatori.....	74
Figura 13 Indicatore di Ritardo a regime.....	76
Figura 14 Indicatore di Ritardo in transitorio .....	77
Figura 15 Analisi Risultati a regime.....	78
Figura 16 Analisi Risultati in transitorio .....	79
Figura 17 Flussi di traffico sulla rete completamente funzionante (scenario "zero").....	81
Figura 18 Distribuzione sulla rete dell'indicatore di vulnerabilità sistemica nello scenario a regime .....	82
Figura 19 Snodo A1-A21 .....	83
Figura 20 Distribuzione dell'indicatore di vulnerabilità sistemica nello scenario in transitorio .....	84
Figura 21 Collegamento Rimini-Pesaro .....	85
Figura 22 Differenza tra l'indicatore di vulnerabilità in transitorio e a regime .....	86
Figura 23 Tratte caratterizzate da differenze elevate fra l'indicatore di vulnerabilità sistemica calcolato per lo scenario in transitorio e quello calcolato per lo scenario a regime .....	87
Figura 24 Flussi assegnati delle OD passanti per l'arco prima dell'interruzione (scenario "zero") .....	88
Figura 25 Flussi assegnati delle OD precedentemente passanti per l'arco, ridistribuite nello scenario di transitorio .....	89
Figura 26 Flussi assegnati delle OD precedentemente passanti per l'arco, ridistribuite nello scenario a regime .....	90

Figura 27 Flussi assegnati delle OD che originariamente non passavano per l'arco interrotto assegnati nella scenario in transitorio .....	91
Figura 28 Flussi assegnati delle OD che ordinariamente non passavano per l'arco interrotto, assegnati nello scenario a regime .....	92
Figura 29 Flussi assegnati delle OD passanti per l'arco sulla rete prima dell'interruzione (scenario "zero").....	93
Figura 30 Flussi assegnati delle OD precedentemente passanti per l'arco, ridistribuite nello scenario in transitorio .....	93
Figura 31 Flussi assegnati delle OD precedentemente passanti per l'arco, ridistribuite nello scenario a regime .....	94
Figura 32 Flussi assegnati delle OD precedentemente non passanti per l'arco, assegnati nello scenario in transitorio .....	95
Figura 33 Flussi assegnati delle OD precedentemente non passanti per l'arco, assegnati nello scenario a regime .....	96
Figura 34 Relazione flusso-indicatore di vulnerabilità sistemica nello scenario a regime .....	97
Figura 35 Relazione flusso-indicatore di vulnerabilità sistemica nello scenario in transitorio	98
Figura 36 Relazione fra l'indicatore negli intervalli discreti di flusso e il flusso transitante...	99
Figura 37 Relazione f/c-indicatore di vulnerabilità sistemica nello scenario a regime.....	100
Figura 38 Relazione f/c- indicatore di vulnerabilità sistemica nello scenario in transitorio ..	100
Figura 39 Relazione capacità-indicatore di vulnerabilità sistemica per lo scenario a regime	101
Figura 40 Relazione capacità- indicatore di vulnerabilità sistemica per lo scenario in transitorio.....	102
Figura 41 Primo blocco dello scenario "zero" .....	111
Figura 42 Secondo blocco dello scenario "zero" .....	112
Figura 43 Terzo blocco dello scenario "zero" .....	112
Figura 44 Quarto blocco dello scenario "zero" .....	113
Figura 45 Quinto blocco dello scenario " zero" .....	114
Figura 46 Scenario "zero".....	115
Figura 47 Loop per lo scenario a regime .....	116
Figura 48 Secondo modello dello scenario a regime.....	116
Figura 49 Terzo modulo dello scenario a regime .....	117
Figura 50 Quarto modulo dello scenario a regime .....	118
Figura 51 Quinto modulo dello scenario a regime .....	119

---

Figura 52 Sesto modulo dello scenario a regime.....	120
Figura 53 Settimo modulo dello scenario a regime.....	120
Figura 54 Ottavo modulo dello scenario a regime .....	121
Figura 55 Nono modulo dello scenario a regime .....	121
Figura 56 Decimo modulo dello scenario a regime.....	123
Figura 57 Undicesimo modulo dello scenario a regime .....	123
Figura 58 Scenario a regime.....	124
Figura 59 Dodicesimo modulo dello scenario a regime .....	125
Figura 60 Tredicesimo modulo dello scenario a regime .....	126
Figura 61 Quattordicesimo modulo dello scenario a regime.....	126
Figura 62 Primo modulo dello scenario in transitorio.....	127
Figura 63 Secondo modulo dello scenario in transitorio.....	127
Figura 64 Terzo modulo dello scenario in transitorio .....	128
Figura 65 Quarto modulo dello scenario in transitorio.....	130
Figura 66 Quindi modulo dello scenario in transitorio .....	130
Figura 67 Sesto modulo dello scenario in transitorio .....	132
Figura 68 Settimo modulo dello scenario in transitorio .....	134
Figura 69 Ottavo modulo dello scenario in transitorio.....	134
Figura 70 Nono modulo dello scenario in transitorio.....	135
Figura 71 Decimo modulo dello scenario in transitorio .....	136
Figura 72 Undicesimo modulo dello scenario in transitorio .....	137
Figura 73 Dodicesimo modulo dello scenario in transitorio .....	137
Figura 74 Scenario in transitorio .....	138
Figura 75 Primo modulo per l'indicatore di ritardo .....	139
Figura 76 Secondo modulo per l'indicatore di ritardo .....	140
Figura 77 Terzo modulo per l'indicatore di ritardo .....	141
Figura 78 Quarto modulo per l'indicatore di ritardo .....	142
Figura 79 Indicatore di Ritardo a regime.....	143
Figura 80 Indicatore di Ritardo in trasitorio .....	144

## **Abstract**

Il lavoro di tesi verte sullo studio della vulnerabilità sistemica di una rete stradale mediante la definizione e il calcolo di indicatori di vulnerabilità che permettono di caratterizzarla. Essi vengono associati a ciascun arco stradale e rappresentano l'aumento di costo della mobilità dovuto all'interruzione dell'arco stesso. Si implementano dei modelli per la valutazione di indicatori connessi all'aumento medio dei costi della mobilità ed altri per la valutazione dell'incremento dei costi per la mobilità sostenuti dalle singole relazioni OD. Si prevedono due scenari di analisi: in transitorio e a regime. Nel primo caso viene simulato il comportamento degli utenti durante eventi di breve durata o nella prima fase di un evento mentre il secondo analizza la situazione di equilibrio che si viene a generare dopo un dato intervallo di tempo.

Lo studio, svolto per conto del Laboratorio Mobilità e Trasporti del Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano all'interno di un progetto legato al Dipartimento della Protezione Civile Nazionale, si propone di valutare come il danneggiamento di uno o più elementi della rete si ripercuota sulla stessa e quindi giungere ad una classificazione degli archi stradali basata sulla gravità del danno causato al funzionamento della rete globale. Risulta importante determinare gli elementi il cui danneggiamento provoca conseguenze più gravi sul sistema, al fine di prevedere maggiori accorgimenti sia per quanto riguarda la manutenzione ordinaria e straordinaria sia per la progettazione e gestione dell'informazione all'utenza sia per la pianificazione degli interventi in caso di emergenza.

# 1 Introduzione

Le infrastrutture stradali costituiscono una componente fondamentale per lo sviluppo economico e sociale di un Paese. Il trasporto di merci prodotte e acquistate, la mobilità delle persone per motivi di lavoro, svago, salute produce un beneficio sia economico sia di qualità della vita per la popolazione che ne usufruisce. Il vantaggio che un individuo trae nel compiere uno spostamento sta nella differenza di utilità che percepisce tra il suo trovarsi nel luogo di origine e quello di destinazione. Tale differenza deve essere tale da giustificare il costo da affrontare per lo spostamento. Il costo di uno spostamento può essere definito come la disutilità al compimento dello stesso; è obiettivo delle amministrazioni delle comunità civili prodigarsi al fine di ridurre la disutilità degli spostamenti e, soprattutto, garantire la continuità nell'offerta di trasporto. Questo tipo di attenzione verso le infrastrutture di trasporto e in particolare per quelle stradali è bene sia posta in tutte le fasi della progettazione, infrastrutturale e gestionale. La pianificazione di una corretta gestione dell'infrastruttura e della circolazione è fondamentale al fine di ridurre i costi sia degli utenti dell'infrastruttura sia della popolazione che pur non usufruendone è costretta a subirne alcuni costi (inquinamento, rumore ecc ...). Inoltre, la continuità dell'offerta di trasporto è garantita dalla pianificazione di un adeguato sistema di intervento in caso di emergenza, al fine di mantenere inalterata la funzionalità del sistema o ripristinarla nel più breve tempo possibile. Al fine di poter sviluppare una corretta pianificazione della gestione delle risorse disponibili da investire nel sistema di viabilità è necessario che il decisore sia in possesso di tutti i dati utili che gli permettano di individuare le soluzioni ottimali per il bene della collettività.

Quando una rete viene privata della funzionalità di un elemento, i danni non sono limitati all'elemento in questione, ma si ripercuotono su tutta la rete in termini di aumento della disutilità alla mobilità. Questo tipo di danni che l'interruzione di un elemento provoca su tutto il sistema di trasporto sono associati al concetto di vulnerabilità sistemica. La vulnerabilità sistemica può essere considerata indipendentemente dalle cause dell'interruzione; esse possono derivare da eventi accidentali naturali o antropici ovvero da chiusure programmate per lavori o manifestazioni.

A questo proposito, al fine di fornire elementi decisionali alle amministrazioni e agli enti di gestione, in questo lavoro di tesi si è deciso di proseguire con il filone di ricerca già intrapreso dal Laboratorio Mobilità e Trasporti del Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano



che, in collaborazione con il Dipartimento di Protezione Civile nazionale e, come “Gruppo di Ricerca per la gestione e la sicurezza dei trasporti”, sta sviluppando un progetto di ricerca nell’ambito della vulnerabilità stradale.

Le ricerche sul tema della vulnerabilità ed in particolare sulla vulnerabilità sistemica che si sono svolte nel dipartimento INDACO e in centri di ricerca in tutto il mondo si prefiggono di valutare cosa accade alla mobilità del sistema all’interruzione di un elemento. Dopo aver effettuato un’analisi approfondita dei lavori di ricerca reperibili in letteratura e di quelli intrapresi presso il dipartimento INDACO, si è deciso di elaborare una metodologia di calcolo di indicatori della vulnerabilità sistemica, che permettesse di superare alcuni dei limiti individuati nei precedenti lavori. In particolare si sono introdotti e perfezionati gli aspetti legati al tempo di percorrenza su archi congestionati e si sono differenziati vari scenari per simulare diverse situazioni nelle quali si andrà a trovare il sistema di trasporto dopo la perdita di funzionalità di un elemento.

Gli obiettivi che si prefigge questo lavoro di tesi sono:

- definire il concetto di vulnerabilità sistemica di una rete di trasporto e ricercare degli indicatori che la rappresentino e possano essere associati ad ogni elemento della rete;
- implementare una metodologia per il calcolo degli indicatori di vulnerabilità sistemica;
- stilare una classifica degli elementi in base al livello di vulnerabilità riscontrato tramite gli indicatori;
- ricercare una metodologia per l’ottimizzazione del calcolo.

## **1.1 Organizzazione della tesi**

Si descrive, in estrema sintesi, l’organizzazione del presente elaborato di tesi e i contenuti dei successivi capitoli:

- Capitolo 2 Cenni di pianificazione dei trasporti, per consentire una migliore comprensione della metodologia applicata;

- Capitolo 3 Analisi degli studi presenti in letteratura riguardanti la definizione del concetto di vulnerabilità e il calcolo della stessa;
- Capitolo 4 Sviluppo e presentazione della metodologia implementata per il calcolo della vulnerabilità sistemica;
- Capitolo 5 Applicazione della metodologia sviluppata a una rete test costituita dalla rete stradale principale italiana;
- Capitolo 6 Analisi dei risultati ottenuti in seguito all'applicazione alla rete stradale nazionale e considerazioni sul tema dell'ottimizzazione del metodo di calcolo;
- Capitolo 7 Riflessioni conclusive e presentazione di eventuali sviluppi futuri della ricerca;
- Capitolo 9 Allegati al lavoro di tesi, ovvero dettagli dei codici di calcolo implementati e utilizzati.

## 2 Stato dell'arte

La definizione di un indicatore di vulnerabilità non può esulare dalla conoscenza del significato del termine stesso. In questo capitolo, pertanto, verranno definiti i concetti di vulnerabilità e degli elementi ad essa collegati e descritti i risultati, in termini di indicatori, ottenuti fin qui da numerosi autori riscontrabili in letteratura.

### 2.1 Il rischio

Il concetto di vulnerabilità è spesso legato al concetto di rischio. Infatti, sebbene possa essere definito in svariati modi, la definizione più comune del rischio è quella che lo identifica abitualmente con una funzione che lega la probabilità, la vulnerabilità e l'esposizione:

$$R = f(P, V, E) \quad (2.1)$$

dove per probabilità  $P$  si intende la frequenza con cui un evento critico di intensità data si verifica su una determinata area; la vulnerabilità  $V$  è il grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi a seguito di un evento critico di nota intensità e l'esposizione  $E$  è la quantificazione degli elementi che sono sottoposti al rischio e che potenzialmente possono subire un danno. Il prodotto vulnerabilità per esposizione indica le conseguenze derivanti, in termini sia di perdite di vite umane, che di danni materiali agli edifici, alle infrastrutture ed al sistema produttivo.

Il rischio esprime dunque il numero atteso di perdite di vite umane, di feriti, di danni a proprietà, di distruzione di attività economiche o di risorse naturali, dovuti ad un particolare evento dannoso; in altre parole il rischio è il prodotto della probabilità di accadimento di un evento per le dimensioni del danno atteso.

Il rischio è rappresentabile mediante curve, dette curve di isorischio, che rappresentano sull'asse delle ascisse la magnitudo di un evento e sull'asse delle ordinate la frequenza di accadimento. Le curve sono simili a quelle rappresentate nella Figura 1. La figura rappresenta una serie di iperboli che corrispondono ciascuna a livelli di rischio differenti. Dalla figura è evidente come eventi con magnitudo limitata possano comportare rischi notevoli qualora la

loro frequenza risulti essere sufficientemente elevata. Inoltre, è possibile notare come la riduzione del rischio possa avvenire muovendosi orizzontalmente, verticalmente o in obliquo all'interno del diagramma: interventi che consentono la diminuzione della magnitudo sono detti interventi di protezione, mentre quelli che riducono la probabilità di accadimento sono interventi preventivi. La combinazione di questi interventi rientra nell'attività della mitigazione del rischio. La riduzione del rischio comporta la riduzione delle perdite sia per quel che riguarda la sua gravità sia per quel che riguarda il verificarsi di una perdita stessa. In generale, le strategie per gestire il rischio si basano sul trasferimento del rischio da un'altra parte o sulla riduzione dell'effetto negativo del rischio.

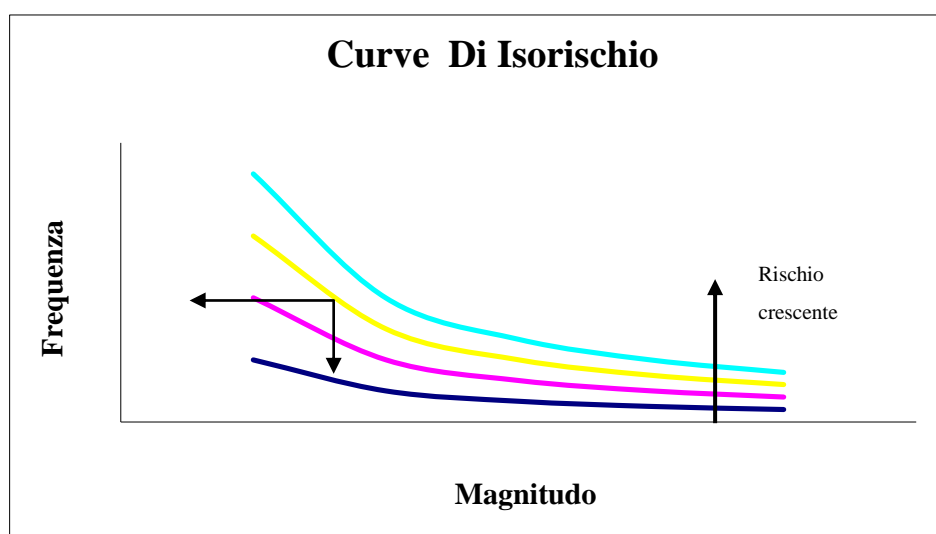


Figura 1 Curve di isorischio

Ogni analisi di rischio deve essere svolta volta per volta in relazione al contesto per il quale si stanno valutando gli effetti. È possibile quindi definire differenti tipologie di rischio quali ad esempio il rischio idrogeologico, il rischio sismico, il rischio vulcanico, piuttosto che il rischio chimico, sanitario e industriale e, in particolare, è di interesse rilevante al fine di questo lavoro di tesi definire il concetto di rischio trasporti. Esso insorge in relazione ad attività di spostamento sul territorio, di qualsivoglia natura, di persone o cose e può manifestarsi in forma "attiva" e/o "passiva". Il rischio trasporti attivo si presenta quando insorgono pericoli a persone o cose che non sono direttamente coinvolte con l'attività di trasporto stessa, ovvero nasce quando l'attività di trasporto stessa reca danni a qualcuno o qualcosa. Il rischio trasporti passivo invece scaturisce quando il normale svolgersi dell'attività di trasporto è minato da possibili eventi calamitosi e conseguentemente l'incolumità delle persone e la loro sopravvivenza risulta essere in pericolo.

## 2.2 La vulnerabilità in letteratura

In letteratura diversi autori hanno studiato, discusso e analizzato il concetto di vulnerabilità stradale. Pertanto esistono numerosi articoli accademici e svariate pubblicazioni che trattano dell'argomento e, oltre a presentare differenti definizioni del termine, propongono metodi alternativi per valutare la vulnerabilità. In questo paragrafo verranno, quindi, presentate le analisi di alcuni autori.

### 2.2.1 Il lavoro svolto dal Laboratorio di Mobilità e Trasporti del dipartimento INDACO del Politecnico di Milano

Maja e altri [45], all'intero di un progetto di ricerca del Laboratorio di Mobilità e Trasporti del dipartimento INDACO del Politecnico di Milano, hanno sviluppato il tema della vulnerabilità di una rete stradale sia per quanto riguarda la sua definizione, sia per quanto riguarda lo sviluppo di una metodologia di calcolo.

In particolare, il concetto di vulnerabilità di una rete stradale non è definibile univocamente, infatti il termine presenta significati e accezioni che si differenziano fra loro a seconda del contesto a cui si riferiscono.

In particolare, si possono distinguere due grandi categorie differenziabili fra loro per il tipo di variabili che le identificano e i danni che provocano. I due gruppi si distinguono poiché l'uno riguarda prettamente una dimensione locale e pertanto considera i singoli elementi e i singoli effetti su di essi, mentre l'altro invece riguarda la dimensione globale e considera gli effetti che un evento provoca sull'intera rete, tenendo in considerazione le relazioni reciproche fra i vari elementi che compongono la rete stessa. Esistono, pertanto, differenti definizioni di vulnerabilità.

A livello locale, si può quindi definire una vulnerabilità fisica e una vulnerabilità funzionale locale, mentre a livello globale esiste la vulnerabilità globale e la vulnerabilità sistemica di una rete di trasporto.

La vulnerabilità fisica, come visto sopra, è definita a livello locale ed è legata direttamente agli elementi strutturali di una rete: essa, infatti, identifica la propensione a subire un danno di una rete stradale in relazione ad un dato evento calamitoso. Pertanto, risulta chiaro che la vulnerabilità fisica dipende direttamente dalle caratteristiche fisico-costruttive

dell'infrastruttura, quali ad esempio materiali utilizzati, tecniche costruttive, presenza di eventuali elementi protettivi eccetera e dalle caratteristiche dell'evento calamitoso (tipo di evento, durata e entità). Inoltre, non può prescindere dalla relazione esistente fra l'evento e le caratteristiche della rete stessa: maggiore è l'entità dell'evento, maggiore sarà la vulnerabilità fisica della rete. Tuttavia, conoscendo gli eventuali eventi calamitosi a cui potrebbe essere soggetta una rete, è possibile programmare interventi da adottare o definire accorgimenti costruttivi per limitare i danni e ridurre quindi la vulnerabilità fisica.

La vulnerabilità funzionale esprime l'attitudine di un tratto stradale a subire danni funzionali in seguito ad un evento disastroso. Essa quindi non è solamente legata alle caratteristiche fisiche della strada, ma riguarda le sue caratteristiche funzionali ed è pertanto connessa ad eventi che, anche non provocando danni fisici alla strada, ne riducono la sua funzionalità e, talvolta, ne precludono l'utilizzo da parte degli utenti. La vulnerabilità funzionale è quindi legata a concetti come capacità della strada, velocità, curve di deflusso, eccetera. Per spiegare meglio il concetto di vulnerabilità funzionale si prenda come esempio il caso di una abbondante nevicata. La neve non provoca, nella maggior parte dei casi, danni fisici alla strada pertanto la vulnerabilità fisica nei confronti di una nevicata è molto bassa e trascurabile, tuttavia la funzionalità dell'arco o della rete risulta essere ridotta o addirittura nulla.

Esistono invece casi in cui la vulnerabilità funzionale è strettamente legata alla vulnerabilità fisica: si consideri, ad esempio, il caso in cui in seguito ad un evento idrogeologico una strada venga invasa e parzialmente danneggiata da detriti che rendono impraticabile una parte della sua sezione. In questo caso essa presenta una vulnerabilità fisica agli effetti di questo evento, unitamente a una vulnerabilità funzionale.

La vulnerabilità funzionale può essere definita sia a livello locale che a livello globale: quella locale, come è facile intuire, riguarda ogni singolo tratto stradale e, quindi, dipende direttamente dalle caratteristiche funzionali dell'arco a cui si riferisce indipendentemente da quelle relative agli altri archi che compongono la rete; a livello globale, invece, la vulnerabilità funzionale è strettamente legata a caratteristiche della rete quali la sua configurazione, il grado di connessione, la presenza di sistemi informativi efficaci per gli utenti e, inoltre, essa dipende anche dalla bontà dei piani di gestione del traffico e delle emergenze che permettono di gestire situazioni più o meno gravi per quel che riguarda la circolazione dei veicoli e la congestione.

La vulnerabilità topologica è determinabile in funzione della configurazione di una rete e costituisce una sua caratteristica intrinseca e indipendente dagli eventi critici ai quali è soggetta e dal traffico che vi circola: una rete è topologicamente vulnerabile se la perdita di funzionalità di un arco della rete provoca ad esempio l'isolamento di una parte di essa. Essa quindi dipende dalle caratteristiche del grafo e in particolare dal grado di connessione di esso. A titolo di esempio, è chiaro che la chiusura di un arco al confine o di un arco che costituisce l'unico collegamento con un centroide, comporta una vulnerabilità topologica di gran lunga più elevata rispetto a quella di un arco che connette zone accessibili tramite percorsi alternativi relativamente brevi.

La vulnerabilità organizzativa, come è suggerito dal nome, rappresenta l'inefficienza di eventuali interventi in seguito ad eventi che provocano un mutamento delle condizioni di normale esercizio ed equilibrio della rete. Essa può essere definita sia a livello locale che a livello globale a seconda dell'entità del danno provocato ed è direttamente connessa con lo studio delle procedure organizzative di soccorso in caso di evento calamitoso.

La vulnerabilità organizzativa risulta essere strettamente dipendente dalle caratteristiche accessorie delle infrastrutture coinvolte quali ad esempio la presenza di impianti di sicurezza e di impianti per l'informazione dell'utente. Tuttavia, la presenza di tali allestimenti non garantisce una vulnerabilità organizzativa limitata: essa, infatti, è influenzata molto anche dal comportamento dell'utente in caso di emergenza e dall'ambiente esterno. È quindi necessario pianificare in modo adeguato gli interventi da effettuare, tramite l'adozione di piani di emergenze definibili grazie ad un'analisi di rischio, mediante l'identificazione e la simulazione di scenari futuri.

La vulnerabilità sistemica si riferisce agli effetti che si manifestano globalmente su una rete indipendentemente dall'evento che li provocano. Essa è connessa con la funzionalità della rete stessa e in particolare può influenzare la mobilità su di essa. Pertanto, un'elevata vulnerabilità sistemica comporta danni non solo per quel che riguarda la viabilità, ma anche per tutto ciò che ad essa risulta essere collegato e strettamente dipendente come ad esempio il normale svolgersi delle attività economiche o sociali di una determinata area.

La vulnerabilità sistemica è una caratteristica intrinseca della rete dipendente non solo dalla configurazione spaziale della rete (è pertanto connessa alla vulnerabilità topologica) ma anche dai flussi che vi circolano. L'interruzione di un arco della rete può provocare la congestione di altri archi in seguito alla redistribuzione dei flussi normalmente circolanti sull'arco "caduto". Tuttavia la vulnerabilità sistemica è indipendente dall'entità dell'evento che genera

l'interruzione di un arco. L'indipendenza di tale vulnerabilità da un evento specifico permette di stimare la vulnerabilità di una rete senza dover analizzare eventi che, spesso, sono caratterizzati da proprietà difficilmente quantificabili e prevedibili.

Lo studio della vulnerabilità sistemica indipendente dall'evento è importante perché ci permette di valutare quali archi risultano essere maggiormente vulnerabili in caso di perdita di funzionalità.

La vulnerabilità complessiva è concettualmente simile alla vulnerabilità sistemica, ma dipende anche dalla vulnerabilità funzionale e, quindi, dalla tipologia e dall'intensità degli eventi calamitosi o incidentali. Essa quindi permette di programmare interventi e piani di emergenza in relazione ad un dato evento che ci si aspetta potrebbe svilupparsi nell'area oggetto di studio. Ad esempio, lo studio della vulnerabilità complessiva permette di stabilire quanto una parte di una rete risulta essere esposta al rischio frana e consente quindi, nel caso specifico, la progettazione di barriere di protezione e di sicurezza contro il pericolo di frane. Se invece una zona è soggetta a rischio neve, lo studio della vulnerabilità complessiva permette la definizione di adeguati piani neve, che comportano non solo l'organizzazione dei mezzi spargisale e spazzaneve ma anche l'informazione preventiva agli utenti.

Per meglio chiarire i concetti fin qui esposti si riporta uno schema riassuntivo (Figura 2).



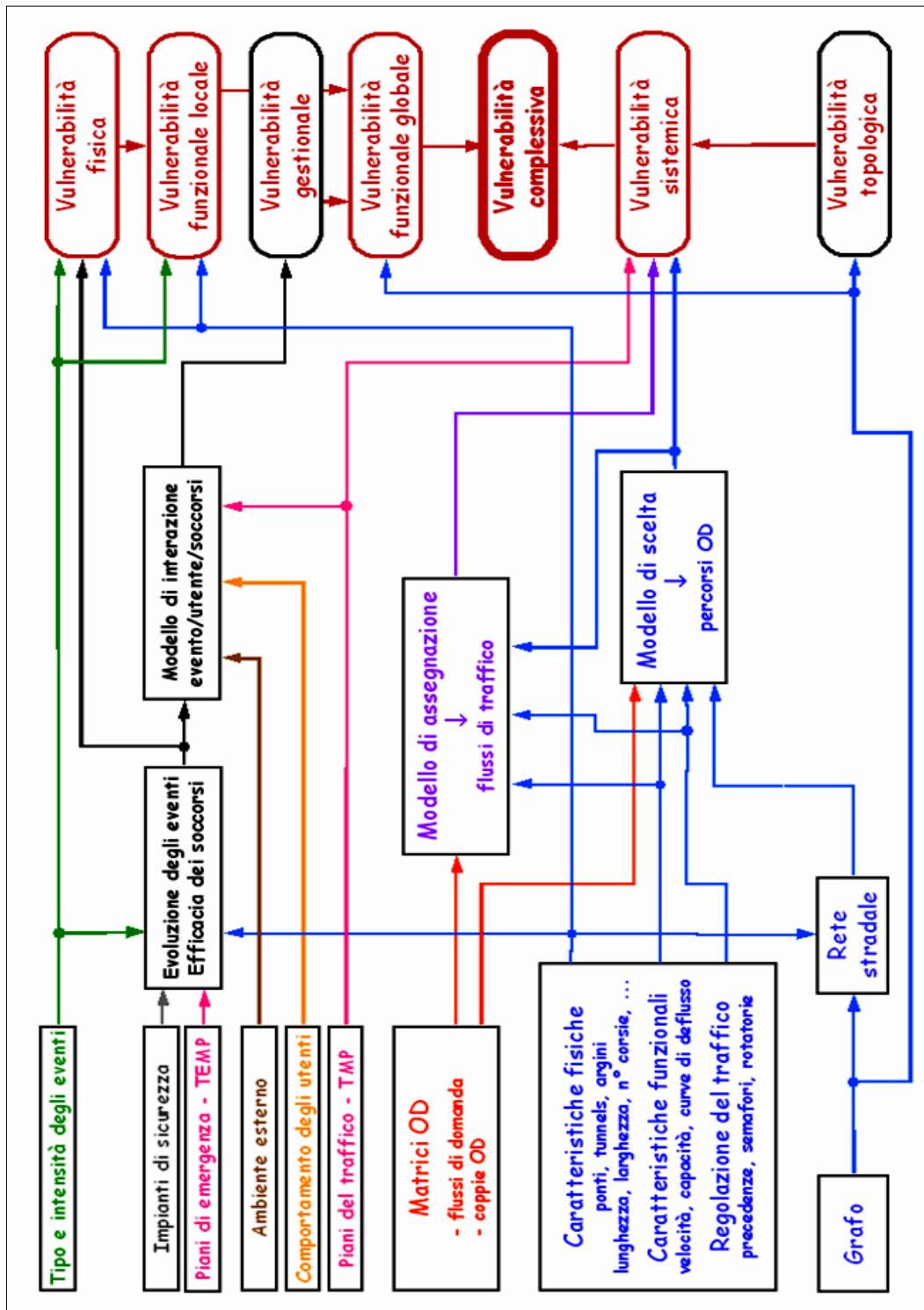


Figura 2 Componenti della vulnerabilità

All'interno dell'attività di ricerca di dipartimento, è stata redatta una tesi di laurea presso il Laboratorio di Mobilità e Trasporti che tratta dell'argomento e ha sviluppato una metodologia per la ricerca della vulnerabilità sistemica di una rete stradale.

In particolare, il lavoro di tesi svolto [46] pone come obiettivo la definizione di una metodologia per la stima della vulnerabilità sistemica di una rete stradale considerando come fattori discriminanti la connettività e la capacità degli archi. Occorre quindi considerare la conformazione della rete stradale, in particolare il grado di connessione degli archi, ovvero quanto i nodi sono direttamente collegati gli uni agli altri (la condizione migliore è che tutti i nodi siano connessi fra loro senza intermediari, poiché si crea il maggior numero possibile di percorsi alternativi), e la domanda di trasporto che genera i flussi di traffico sulla rete. Una volta definiti i flussi di traffico circolanti sulla rete iniziale è possibile valutare la capacità residua di ciascun arco e pertanto è possibile applicare la procedura di ricerca della vulnerabilità che in sostanza si articola nelle seguenti fasi:

- per ogni arco della rete si identificano i percorsi OD che lo attraversano : ogni arco apparterrà ad un numero  $n$  di percorsi OD, noti dalla matrice archi/percorsi;
- per ogni percorso  $n$  che attraversa il generico arco  $a$ , si analizzano gli effetti della rimozione dell'arco stesso dalla rete. L'analisi di ogni coppia OD, viene eseguita separatamente dalle altre in quanto si terrà conto del flusso relativo alla medesima coppia;
- si rimuove dall'intera rete il flusso  $F_{OD_i}$ , relativo alla  $i$ -esima coppia OD. Il prodotto di questa operazione è un grafo  $G_{aperto}$ , i cui flussi sono variati rispetto a quello completo, in quanto si elimina il flusso  $F_{OD_i}$  dagli archi appartenenti all' $i$ -esimo percorso OD. Si verifica quindi un aumento delle capacità residue (pari in valore assoluto alla quantità di flusso relativa alla coppia OD <sub>$i$</sub> ) lungo tali archi;
- si calcola il taglio minimo fra la coppia OD <sub>$i$</sub> : si associa l'indice  $R_{OD_i,aperto}$ . Per il teorema del "Taglio minimo - Capacità Massima", tale indice rappresenta la capacità massima sulla rete  $G_{aperto}$ , cioè il flusso massimo che può spostarsi da O a D;
- si ipotizza che la capacità residua dell'arco  $a$  sia nulla, cioè che non vi possa transitare ulteriore flusso, rispetto a quello precedentemente assegnato. Il prodotto di questa operazione consiste in un grafo  $G_{chiuso}$ ;

- si calcola nuovamente il taglio minimo fra O e D; ottenendo l'indice  $R_{OD}^{i, chiuso}$ . Tale parametro rappresenta il valore della capacità residua massima relativa alla rete  $G_{chiuso}$ . Si determina quindi il valore del massimo flusso che può partire da O con destinazione D senza poter attraversare l'arco a. Tale calcolo implica la redistribuzione teorica dei flussi fra la coppia  $OD_i$  nel grafo, ovvero si identificano i cammini alternativi per collegare O e D, senza tuttavia ripartire numericamente i flussi nelle differenti alternative identificate;
- si calcola l'indice di capacità residua relativo all'arco a e alla relazione OD, in condizioni di arco transitabile (Gaperto):

$$I_{OD}^{i, aperto} = R_{OD}^{i, aperto} - R_{OD} \quad (2.2)$$

- tale indice rappresenta la differenza fra la capacità residua massima della rete  $G_{aperto}$ , cioè il flusso massimo che può spostarsi da O a D, nel rispetto dei vincoli prestazionali precedentemente definiti, e il flusso di domanda relativo alla coppia  $OD_i$ ;
- si calcola l'indice di capacità residua relativo all'arco a, assunto all'interno del grafo  $G_{chiuso}$ , ovvero il grafo in cui l'arco a ha capacità residua nulla:

$$I_{OD}^{i, chiuso} = R_{OD}^{i, chiuso} - R_{OD} \quad (2.3)$$

Tale indice rappresenta la differenza fra la capacità residua massima della rete  $G_{chiuso}$ , cioè quanto flusso può essere inviato da O a D, nel rispetto dei vincoli prestazionali precedentemente definiti, e il flusso di domanda relativo alla coppia  $OD_i$ . L'indice può assumere sia valori positivi che negativi: nel primo caso la domanda si distribuisce nella rete restante, mentre nel secondo caso parte del flusso non riesce a raggiungere la destinazione;

- si calcola infine l'indicatore, che esprime gli effetti causati dall'annullamento della capacità residua dell'arco a sul flusso della coppia OD<sub>i</sub>, come combinazione dei risultati fino qui ottenuti:

$$I_{OD}^i = I_{OD}^{i,aperto} - I_{OD}^{i,chiuso} \text{ se } I_{OD}^{i,chiuso} \geq 0 \quad (2.4)$$

$$I_{OD}^i = I_{OD}^{i,aperto} - I_{OD}^{i,chiuso} \cdot e^{-I_{OD}^{i,chiuso}} \text{ se } I_{OD}^{i,chiuso} < 0 \quad (2.5)$$

- una volta definito il valore di tali indici per ciascun percorso transitante per l'arco a si definisce un indicatore univoco di vulnerabilità per l'arco in esame, calcolato come combinazione di ciascun indice elementare trovato pesato sul flusso circolante. Tale indicatore è:

$$VULNERABILITA' = \frac{\sum_{i=1}^n I_{OD}^i \cdot F_{OD}^i}{F^a} \quad (2.6)$$

dove:

- $I_{OD}^i$  è l'indice determinato per ogni relazione OD che transita sull'arco a, in
  - funzione delle variazioni di capacità residue massime calcolate nel caso di
  - arco aperto e chiuso e del flusso del percorso OD<sub>i</sub>;
- $F_{OD}^i$  è il flusso che ha origine in O e destinazione in D;
- $F^a$  è il flusso dell'arco a.

### 2.2.2 La definizione e lo studio di Berdica

Berdica definisce la vulnerabilità come la suscettibilità a incidenti che possono avere come conseguenza la riduzione della funzionalità della rete, cioè la capacità della rete di assolvere ai propri compiti, in un determinato periodo di tempo. Questi eventi possono essere più o meno prevedibili, di origine accidentale o dolosa, naturale o antropica. Pertanto, l'autrice non

distingue il concetto di vulnerabilità da quello di affidabilità: misurare l'affidabilità di una rete vuol dire valutarne anche la vulnerabilità in quanto l'affidabilità è vista come un complemento della vulnerabilità stessa.

L'autrice inoltre collega al concetto di vulnerabilità anche i concetti di resilienza, ossia la capacità di un sistema di tornare alla normalità dopo aver subito degli eventi; che in ambito stradale si traduce come arrivo a nuovo stato di equilibrio nella rete; tuttavia nel caso di incidenti stradali, difficilmente la riduzione di capacità si protrae per un tempo sufficiente a determinare un nuovo equilibrio; di ridondanza, ossia la duplicazione di componenti di un sistema, in modo da sopperire a condizioni non operative da parte della rete; e di robustezza, ossia la capacità del sistema di compensare le deformazioni. In questi termini il concetto è opposto a quello di vulnerabilità; quindi un sistema che è poco vulnerabile sarà di conseguenza molto robusto.

Inoltre definisce anche tre differenti tipi di affidabilità:

- l'affidabilità della connettività ovvero la probabilità che tutti gli utenti della rete possano raggiungere la località di destinazione;
- l'affidabilità del tempo di viaggio, ossia la probabilità di poter raggiungere la destinazione prefissata in un dato periodo di tempo;
- l'affidabilità della capacità, ovvero la probabilità che la rete possa smaltire un certo ammontare di traffico.

Valutando questi parametri è possibile identificare un certo livello di vulnerabilità.

Berdica [37] afferma che un'analisi di vulnerabilità deve essere condotta studiando una rete intera, analizzando gli incidenti avvenuti sulla rete e stimando il rischio.

Inoltre Berdica e altri [38] valutano la vulnerabilità legandola al concetto di accessibilità e, in particolare, misurano la variazione della stessa nel passaggio da una situazione normale a una situazione di crisi, generata dalla chiusura di un arco.

### **2.2.3 L'analisi di Cafiso e altri**

Cafiso e altri [34] definiscono la vulnerabilità come la propensione di beni, persone o attività a subire danni o mutamenti, in seguito al verificarsi dell'evento e in particolare essa può essere interpretata come una perdita di efficienza del sistema territoriale e la capacità residua

di esplicitare ancora le funzioni proprie del sistema. In questo senso, la vulnerabilità è quindi una propensione degli elementi o di sistemi complessi a subire danni in relazione alle proprie caratteristiche intrinseche. Gli autori differenziano poi due tipi di vulnerabilità: la vulnerabilità indotta e la vulnerabilità diretta. La prima si riferisce agli effetti dovuti alla crisi dell'organizzazione del territorio, la seconda, invece, riguarda la propensione di un singolo elemento a subire danni.

In relazione alle definizioni proposte, gli autori definiscono un indicatore di vulnerabilità, concentrandosi principalmente sul rischio sismico [36].

Propongono un metodo basato sull'analisi di tronchi stradali con caratteristiche omogenee e privo di intersezioni al proprio interno. Per ciascun tronco la vulnerabilità è valutata in due passaggi. Per prima cosa, si valuta un indice di vulnerabilità geometrica, definito in base alla larghezza della strada e alle dimensioni degli edifici vicini ad essa:

$$I_{gv} = \min [ L - H_1 + H_2 ] \quad (2.7)$$

Dove: -  $L$  è la larghezza utile della strada;

-  $H_1, H_2$  sono le altezze massime di due edifici adiacenti al tronco stradale.

$I_{gv}$  è un indice che rappresenta la larghezza residua della strada disponibile nell'ipotesi di ribaltamento sul tronco stradale degli edifici adiacenti.

In secondo luogo, si procede al calcolo dell'indice di danno complessivo, che tiene conto anche della vulnerabilità strutturale degli edifici al margine della strada tramite gli indici di danno *ide* dei due edifici presi in considerazione:

$$idc = \min [ L - ide_1 \cdot H_1 + ide_2 \cdot H_2 ] \quad (2.8)$$

La metodologia proposta è stata applicata alla rete stradale della città di Catania.

Oltre al calcolo appena esposto, gli stessi autori propongono un metodo per valutare la vulnerabilità sia in modo qualitativo che in modo quantitativo. Qualitativamente è possibile valutare la vulnerabilità derivante da eventi sismici come combinazione della vulnerabilità strutturale  $V_s$ , determinata utilizzando le cosiddette *check list*, ovvero mediante la

compilazione di schede riferite a elementi del tracciato che risultano essere maggiormente interessati dal fenomeno, contenuti un giudizio di vulnerabilità espresso in termini di classe di vulnerabilità per ciascun elemento; e della vulnerabilità funzionale  $V_f$ , che dipende dalla presenza di percorsi alternativi individuabili nella rete e dalle caratteristiche geometriche dell'infrastruttura stradale. Pertanto la vulnerabilità di un tronco stradale risulta essere pari a:

$$V_g = V_s \cdot G \cdot R_e \quad (2.9)$$

dove: - $V_g$  è la vulnerabilità globale del tronco stradale,

- $V_s$  è la vulnerabilità strutturale determinata in base alle *check-list*,

- $G$  sono le caratteristiche geometriche,

- $R_e$  misura dei percorsi alternativi al tronco considerato.

Per quanto riguarda la valutazione quantitativa, l'esempio proposto da Cafiso fa riferimento a modelli del danno, infatti il concetto di vulnerabilità risulta essere fortemente connesso al concetto di danno. Per consentire una valutazione di vulnerabilità si ricorre a una serie di indici capaci di individuare un certo numero di "stati" di funzionalità: dalla funzionalità completa alla funzionalità nulla, fino ad arrivare al collasso e alla definizione delle cosiddette curve di vulnerabilità, che determinano la relazione esistente fra danno e pericolosità:

$$D = V \cdot P \quad (2.10)$$

Esistono due categorie principali di curve di vulnerabilità:

- categoria 1: in tale categoria il danno viene quantificato analiticamente, schematizzando la risposta strutturale allo stato tensionale e deformativo corrispondente, ossia valutando i danni al variare della forza specifica. I metodi sviluppati in questa categoria sono applicabili ad un'unica struttura;
- categoria 2: il danno è identificato nella struttura mediante un numero di indicatori di vulnerabilità determinati in base a caratteristiche tipologiche, costitutive e strutturali dell'infrastruttura stessa. Il metodo sviluppato è applicabile a più strutture contemporaneamente.

La categoria 2 è a sua volta suddivisa in due sottocategorie:

- sottocategoria 2a: ogni infrastruttura viene collocata in una classe di vulnerabilità. Le classi sono costruite in base a indicatori tipologici, per esempio materiali, età di costruzione, tipologia costruttiva, ecc., e a ciascuna di queste viene assegnata una curva di vulnerabilità o una matrice di probabilità di danno;
- sottocategoria 2b: a ogni struttura viene attribuito un indice di vulnerabilità stabilito in base a indicatori che definiscono l' idoneità a sopportare i terremoti.

#### 2.2.4 La vulnerabilità secondo Taylor e D'Este

Taylor e D'Este [39] trattano il tema della vulnerabilità distinguendola dal concetto di affidabilità. Infatti, secondo quanto affermato dagli autori, la vulnerabilità è legata alle conseguenze dell'evento e dipende dalla debolezza della rete, mentre l'affidabilità è legata alla probabilità di accadimento di un evento ed è, quindi, dipendente dalla connettività della rete.

Secondo gli autori [39] una misura della vulnerabilità è rappresentata dalla variazione del costo generalizzato di trasporto tra due centroidi di una rete quando un arco della rete si interrompe. Per costo generalizzato, si intende una misura della disutilità creata dal collasso dell'arco, come l'aumento delle distanze da percorrere, del tempo di viaggio, del costo di trasporto, ecc.

Considerando una rete di  $N$  nodi e  $E$  archi, nel caso del collasso di un arco, vengono calcolate le variazioni dei tempi di percorrenza tra i diversi centroidi della rete. A ogni centroide viene quindi associato un valore pesato in funzione degli spostamenti generati dal centroide stesso. Il risultato dello studio è una matrice contenente la perdita di accessibilità da attribuire a ogni centroide in caso di collasso di un arco. Il termine accessibilità si identifica come la facilità con cui ogni individuo proveniente da una qualsiasi area può partecipare a qualsiasi attività che si svolga in qualsiasi altra regione, utilizzando un sistema di trasporto arbitrario per raggiungere il luogo in questione.

Nel caso specifico, la perdita di accessibilità di una comunità che fa riferimento a una rete è valutata come:

$$V_{rs} = \sum_i \sum_j d_{ij} \cdot v_{ijrs} \quad (2.11)$$



dove:  $-V_{rs}$  è la vulnerabilità dell'arco  $rs$ ,

-  $i$  e  $j$  è la coppia origine-destinazione,

-  $d_{ij}$  è il flusso di domanda della coppia OD  $i-j$ ,

-  $v_{ijrs}$  è la differenza di costo tra i centroidi  $i$  e  $j$  quando l'arco  $e_{rs}$  non è più funzionante;

Il valore di  $v_{ijrs}$  si calcola a sua volta con la formula:

$$v_{ijrs} = s[ij, G(N, E)] - s[ij, G(N, E - rs)] \quad (2.12)$$

dove:  $-s[ij, G(N, E)]$  è la generica funzione di costo di trasporto del percorso da  $i$  a  $j$  con rete intatta;

-  $s[ij, G(N, E - rs)]$  è la generica funzione di costo di trasporto del percorso da  $i$  a  $j$  con rete priva dell'arco  $rs$ .

La formula (2.12) rappresenta quindi la differenza del costo di trasporto lungo il percorso  $i-j$  nel caso di rete intatta  $G(N, E)$  e nel caso di rete funzionante senza il collegamento  $rs$   $G(N, E - e_{rs})$ .

In una pubblicazione successiva [1], gli autori descrivono la procedura di ricerca dei nodi maggiormente critici mediante la scansione di una rete (in particolare la rete stradale Australiana) attraverso l'uso di indici di accessibilità. In particolare essi utilizzano due differenti indici.

Il primo è l'indice Hansen dato da

$$A_i = \sum_j B_j f_{ij} c_{ij} \quad (2.13)$$

Dove  $-B_j$  è l'attrattività dei luoghi, definita, ad esempio, in relazione al numero di "opportunità" disponibili e nel caso specifico, è identificata dal numero di abitanti della zona.

-  $f_{ij} = \frac{1}{x_{ij}}$  è la funzione di impedenza, che rappresenta la separazione fra

le città considerate. Essa è definita in modo tale che maggiore è il costo di viaggio fra le due città, minore sarà l'accessibilità fra esse.

L'indice di Hansen è utile per studiare casi in cui le città risultano essere ben correlate rispetto alle altre, mentre non è molto utilizzato in caso di studi riguardanti aree rurali o zone remote, con popolazione sparsa.

Secondariamente, gli autori propongono l'utilizzo dell'indice ARIA, un indice che permette di valutare quanto una città sia isolata attraverso misure di distanza fra le aree popolate e aree in cui sono concentrati i centri di produzione.

ARIA è un indice continuo che varia da 0 a 15: 0 rappresenta zone con maggior accessibilità, mentre il valore 15 si riferisce a aree molto isolate. Esso è calcolato considerando 5 differenti categorie di centri di servizio, che si differenziano fra loro per il numero di popolazione presente. Si va dalla categoria A che corrisponde ad una popolazione superiore ai 250.000 abitanti, alla categoria E con popolazione compresa fra 1.000 e 4.900 abitanti. L'indice è calcolato considerando la distanza  $x_{iL}$  di una località  $i$  dal più vicino centro di servizio per ciascuna categoria  $L$ :

$$ARIA_{iL} = \sum_L \min \left\{ 3, \frac{x_{iL}}{x_L} \right\} \quad (2.14)$$

Con  $\bar{x}_L$  si identifica la distanza media di tutte le località dal più vicino centro di servizio della categoria  $L$ . Il limite massimo 3 da affidare a ciascuna categoria, permette di ottenere con valore massimo di ARIA pari a 15, come già anticipato in precedenza.

L'indice ARIA rappresenta una misura puramente geografica e non include considerazioni di tipo socio-economico.

### 2.2.5 Gli studi di Jenelius

Erik Jenelius propone una definizione di vulnerabilità legata al concetto di criticità dei diversi componenti di una rete. La criticità di un elemento dipende da quanto esso risulta essere debole, ma anche dalla sua importanza. Un elemento è definito debole se la probabilità che

accada un incidente è elevata, mentre l'elemento è importante se le conseguenze dovute alla sua perdita sono elevate. La valutazione di queste due caratteristiche permette di stabilire l'esposizione di nodi e archi.

Jenelius [2] [24] sviluppa il suo lavoro interrompendo volta per volta un arco e considerando l'importanza degli archi e l'esposizione dei nodi in relazione all'incremento del tempo di viaggio da ogni centroide, pesati in base agli spostamenti generati dallo stesso centroide verso il centroide di destinazione.

Le misure di importanze ed esposizione vengono condotte utilizzando la formula:

$$\Delta c_{ij}^{(e)} = c_{ij}^{(e)} - c_{ij}^{(0)} \quad (2.15)$$

Che rappresenta la differenza fra il costo di trasporto fra due centroidi  $i$  e  $j$  con interruzione di un arco  $c_{ij}^{(e)}$  e senza interruzione di nessun arco  $c_{ij}^{(0)}$ . L'autore, inoltre, distingue due casi a seconda che l'arco interrotto provochi una separazione della rete (cut links) o meno (no cut links).

Nel caso in cui non vi sia separazione della rete, l'importanza è valutata attraverso la formula:

$$IMPOTANCE_{net} \quad k = \frac{\sum_i \sum_{j=i} w_{ij} \cdot c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)}}{\sum_i \sum_{j \neq i} w_{ij}}, k \in E^{NC} \quad (2.16)$$

Con: - pari all'arco per il quale si valuta l'importanza;

- $w_{ij}$  pesi attribuiti per valutare l'importanza di ciascun nodo;
- $c_{ij}^{(k)}$  costo di viaggio fra i centroidi  $i$  e  $j$  quando l'arco  $k$  è interrotto;
- $c_{ij}^{(0)}$  costo di viaggio fra i centroidi  $i$  e  $j$  nel caso di completo funzionamento della rete;
- $E^{NC}$  insieme dagli archi che non determinano una separazione della rete.

Nel caso invece si considerino gli archi che provocano interruzione della rete si ha:

$$IMPOTANCE_{net}^{uns} k = \frac{\sum_i \sum_{j \neq i} u_{ij}^{(e)}}{\sum_i \sum_{j \neq i} x_{ij}}, k \in E \quad (2.17)$$

Con  $u_{ij}^{(e)}$  domanda insoddisfatta nel caso in cui un collegamento non dovesse

funzionare;

$x_{ij}$  domanda di trasporto tra due centroidi  $i$  e  $j$ .

La domanda insoddisfatta risulta essere uguale alla domanda di trasporto qualora il tempo e il costo di viaggio risultasse infinito. Se il costo di viaggio è minore di infinito allora la domanda insoddisfatta è nulla:

$$u_{ij}^{(e)} = \begin{cases} x_{ij} & \text{se } c_{ij}^{(e)} = \infty \\ 0 & \text{se } c_{ij}^{(e)} < \infty \end{cases}$$

Jenelius definisce anche il concetto di esposizione, legato alle caratteristiche relative di un centroide o di un gruppo di centroidi, che, tuttavia, esprime comunque una misura di vulnerabilità:

$$Exposure_{rand}(m) = \frac{\sum_{k \in E^{NC}} \sum_{i \in V_{md}} \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{L^{NC} \sum_{i \in V_{md}} \sum_{j \neq i} w_{ij}} \quad (2.18)$$

dove:-  $m$  è l'insieme di centroidi;

- $E^{NC}$  è l'insieme dagli archi che non determinano una separazione della rete;
- $V_{md}$  è l'insieme dei centroidi all'interno della municipalità  $m$  che generano domanda;
- $w_{ij}$  sono i pesi attribuibili per valutare l'importanza dei singoli centroidi della rete;
- $c_{ij}^{(k)}$  è il costo di trasporto tra due centroidi  $i$  e  $j$ , quando l'arco  $k$  non è più funzionante;
- $c_{ij}^{(0)}$  è il costo tra due centroidi  $i$  e  $j$  nella situazione di perfetto funzionamento della rete;

-  $L^{NC}$  è il numero di collegamenti che non determinano una separazione della rete.

Nel caso peggiore, ossia quando si determina la chiusura dell'arco più importante della rete, l'esposizione di Jenelius della municipalità  $m$  viene determinata con la formula seguente:

$$\text{Exposure}_{\max}(m) = \max_{k \in E^{NC}} \frac{\sum_{i \in V_{md}} \sum_{j \neq i} w_{ij} (c_{ij}^{(k)} - c_{ij}^{(0)})}{L^{NC} \sum_{i \in V_{md}} \sum_{j \neq i} w_{ij}} \quad (2.19)$$

In un lavoro successivo [19] l'autore integra lo studio svolto in precedenza con la misura della disuguaglianza per gli utenti non più soltanto rispetto al livello zonale, ma considerando ogni arco separatamente invece che in uno scenario medio. L'autore decide di valutare l'importanza degli archi valutando anche questa volta l'incremento del tempo di viaggio durante il periodo di chiusura dell'arco stesso e definendo due indicatori: l'efficienza, misurata come somma dei tempi di viaggio, e l'equità, valutata come coefficiente di variazione del tempo di viaggio in quanto gli incrementi dei tempi di viaggio non presentano una distribuzione uniforme fra i viaggiatori.

L'efficienza economica risulta quindi pari a:

$$I_{eff}(k) = \sum_{i, j \neq i} \Delta T_{ij}^k \quad (2.20)$$

dove: -  $k$  è l' arco chiuso in esame;

-  $i, j$  sono l' origine e la destinazione del viaggio;

-  $\Delta T_{ij}^k$  è l' incremento totale del tempo di viaggio per tutti gli utenti, o veicoli equivalenti, relativo al percorso  $(i, j)$ , durante la chiusura dell'arco  $k$ .

Per valutare l'equità Jenelius utilizza il coefficiente di variazione

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\sum_u P_u (y_u - \bar{y})^2}}{\bar{y}} = \frac{\sqrt{\sum_u P_u \cdot y_u^2 - \bar{y}^2}}{\bar{y}} \quad (2.21)$$

con -  $u$  pari alla coppia OD di riferimento;

- $y_u$  uguale al numero di membri della popolazione;
- $p_u$  pari al peso assegnato da ogni membro della popolazione  $y_u$ ;

$$\mu = \bar{y} = \sum_u p_u \cdot y_u$$

Se si volesse specificare il coefficiente di variazione per un singolo arco, considerando che il parametro  $y_u$ , rappresentante il numero di membri della popolazione dell'arco  $k$  in esame, può essere specificato come

$$y_u^k = \frac{\Delta T_{ij}^k}{x_{ij} \cdot \tau} \quad (2.22)$$

con  $x_{ij}$  pari alla media della domanda di viaggio espressa in utenti o veicoli per unità di tempo e  $\tau$  pari al tempo di ripristino della situazione di traffico preesistente alla chiusura dell'arco, si otterrebbe

$$\begin{aligned}
 CV_k &= \frac{\sqrt{\sum_{i,j \neq i} \frac{x_{ij}}{x} \left( \frac{\Delta T_{ij}^k}{x_{ij} \cdot \tau} \right)^2 - \left( \sum_{i,j \neq i} \frac{x_{ij}}{x} \frac{\Delta T_{ij}^k}{x_{ij} \cdot \tau} \right)^2}}{\sum_{i,j \neq i} \frac{x_{ij}}{x} \frac{\Delta T_{ij}^k}{x_{ij} \cdot \tau}} = \\
 &= \frac{\sqrt{x \cdot \sum_{i,j \neq i} \frac{\Delta T_{ij}^k{}^2}{x_{ij}} - \sum_{i,j \neq i} \Delta T_{ij}^k{}^2}}{\sum_{i,j \neq i} \Delta T_{ij}^k}
 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Dove :  $x_{ij}$  è la media della domanda di viaggio espressa in utenti o veicoli per unità di tempo.

L'equità risulta essere pertanto pari a:

$$I_{eq}(k) = CV_k = \frac{\sqrt{x \cdot \sum_{i,j \neq i} \frac{\Delta T_{ij}^k{}^2}{x_{ij}} - \sum_{i,j \neq i} \Delta T_{ij}^k{}^2}}{\sum_{i,j \neq i} \Delta T_{ij}^k} \quad (2.24)$$

Una proprietà importante del coefficiente di variazione, usato per determinare l'importanza dell'equità di ripartizione, è la costanza della scala: se i tempi di viaggio vengono moltiplicato per lo stesso fattore, allora il coefficiente di variazione rimane invariato.

L'autore espone anche una procedura adatta a ricavare un unico indice per ogni arco, tenendo conto delle grandezze appena ricavate. Questo nuovo indicatore comprende la media pesata delle due misure normalizzate:

$$\begin{aligned}\hat{I}_{eff}(k) &= \frac{I_{eff}(k) - \min_l I_{eff}(k)}{\max I_{eff}(k) - \min_l I_{eff}(k)} \\ \hat{I}_{eq}(k) &= \frac{I_{eq}(k) - \min_l I_{eq}(k)}{\max I_{eq}(k) - \min_l I_{eq}(k)}\end{aligned}\quad (2.25)$$

e vale quindi:

$$I_{ev}(k) = (I_{eff}(k))^{1-\alpha} (I_{eq}(k))^\alpha, \quad \alpha \in [0,1] \quad (2.26)$$

Con  $\alpha$  pari ad un parametro che permette di controllare l'effetto dell'equità della distribuzione.

Jenelius, inoltre, tratta il problema della ricerca di un indice di vulnerabilità non solo dal punto di vista statico ma anche dal punto di vista dinamico, introducendo nell'analisi il tempo di chiusura di un arco [3] e proponendo un'estensione al modello statico all'equilibrio senza congestione. In questo modo si ottiene una stima migliore dei danni provocati dalla chiusura di un arco.

Il modello proposto permette di analizzare sia i casi in cui gli utenti abbiano la possibilità di trovare un percorso alternativo, sia il caso in cui non esistano percorsi differenti. Inoltre, il modello considera anche il fatto che gli utenti spesso non sono in grado di valutare immediatamente quale sia il percorso alternativo migliore, considerando quindi anche il periodo di transizione fra la situazione iniziale di equilibrio e quella finale di nuovo equilibrio. Infatti, considerando, per semplicità, una sola coppia OD collegata da un solo percorso (che è il percorso più breve)  $r_{orig}$  e un arco  $k$  di tale percorso, la chiusura di tale arco al tempo  $t$  comporta anche un processo di informazione degli utenti che si protrae per un certo tempo indipendente dal tempo di chiusura dell'arco stesso. Per  $t < 0$ , la porzione di utenti informata

della chiusura dell'arco è pari a  $a(t) = 0$ , mentre, trascorso un certo periodo di tempo  $t_{clinf}$ , tutti gli utenti saranno informati e pertanto risulterà  $a(t) = 1$ . Nell'intervallo di tempo compreso fra 0 e  $t_{clinf}$  la porzione di utenti informata non è nota, ma è sicuramente crescente.

Al tempo  $t_{open}$  l'arco è riaperto e si instaura un processo simile al precedente, che comporta quindi un aumento progressivo degli utenti che sono informati della riapertura dell'arco:  $0 \leq b(t) \leq 1$  con  $t \in [t_{open}, t_{opinf}]$ .

È chiaro che se  $t_{open} \geq t_{clinf}$ , allora tutti gli utenti, prima della riapertura dell'arco, avranno ricevuto informazioni riguardanti la chiusura di esso, viceversa, esisterà una porzione di utenti che non sarà raggiunta dall'informazione della chiusura.

Durante la chiusura, come già anticipato, potranno esserci o non esserci percorsi alternativi disponibili.

Nel caso in cui esistano percorsi alternativi, in seguito alla chiusura dell'arco  $k$ , la porzione di utenti che è informata per tempo  $a(t)$  modifica il proprio percorso seguendo la rotta più breve ora possibile. Jenelius identifica tale rotta con  $r_{short}$  e chiama  $\tau_{short}$  il nuovo tempo di percorrenza dall'origine  $I$  alla destinazione  $O$ , ovviamente tali grandezze sono maggiori delle omologhe  $r_{orig}$  e  $\tau_{orig}$ , corrispondenti al caso di rete imperturbata. La porzione di utenti che invece non è informata per tempo della chiusura dell'arco, continua a viaggiare lungo il percorso originale fino a che non raggiunge l'arco interrotto. A quel punto ricerca una nuova rotta che è identificata con  $r_{long}$  ed è caratterizzata da un tempo di percorrenza  $\tau_{long}$ .

Chiaramente, sussiste la relazione  $\tau_{long} \geq \tau_{short} \geq \tau_{orig}$ .

Nel momento in cui l'arco  $k$  è riaperto ( $t \geq t_{open}$ ), teoricamente è possibile riprendere a percorrere la rotta originale. Tuttavia, il comportamento degli utenti è differente a seconda che essi siano stati informati della riapertura, che siano stati informati unicamente della chiusura ma non della riapertura o che non siano stati informati né dell'apertura né della chiusura. Pertanto, l'incremento nel tempo di viaggio dovuto alla chiusura dell'arco  $k$  nell'intervallo

$[0, t_{opinf}]$  è pari a:



$$\Delta T_k = x \int_0^{t_{open}} a t \tau_{short} - \tau_{orig} + 1 - a t \tau_{long} - \tau_{orig} dt + x \int_{t_{open}}^{t_{opinf}} a t 1 - b t \tau_{short} - \tau_{orig} dt \quad (2.27)$$

considerato che  $a t 1 - b t$  è la porzione di utenti che al tempo  $t$  è stata informata della chiusura ma non ancora della riapertura dell'arco  $k$ .

Chiamando,  $A = \int_0^{t_{open}} a t dt$  e  $B = \int_{t_{open}}^{t_{opinf}} a t 1 - b t dt$ , si ottiene:

$$\Delta T_k = x \left[ A + B \tau_{short} - \tau_{orig} + t_{open} - A \tau_{long} - \tau_{orig} \right]$$

Nel caso in cui, invece, non ci siano rotte alternative, in seguito alla chiusura di un arco gli utenti informati della chiusura prima della partenza cancellano il proprio viaggio, mentre quelli che non sono informati per tempo, raggiungono l'arco interrotto e poi tornano indietro. In entrambi i casi, l'incremento del tempo di viaggio è valutato nello stesso modo infatti il modello proposto non tiene conto, per semplicità, del disagio e dell'aumento di costo dovuto al viaggio di ritorno sostenuto dagli utenti che non sono stati informati preventivamente.

L'aumento del tempo di viaggio durante la chiusura è definito da due componenti: il ritardo dovuto al tempo vero e proprio di chiusura dell'arco pari a  $\frac{t_{open}}{2}$  e il ritardo dovuto al periodo di tempo che intercorre fra la riapertura dell'arco e il tempo in cui gli utenti sono informati

della riapertura pari a  $\int_{t_{open}}^{t_{opinf}} 1 - b t dt$ . Pertanto, considerato che il numero totale di utenti che sarebbe dovuto partire durante la chiusura è pari a  $x t_{open}$ , l'incremento di tempo di viaggio durante tale periodo può essere stimato come:

$$\Delta T_k^{close} = x \left[ \frac{t_{open}^2}{2} + t_{open} \int_{t_{open}}^{t_{opinf}} 1 - b t dt \right] \quad (2.28)$$

Quando l'arco  $k$  è riaperto, gli utenti possono partire e ripercorrere la loro rotta originale. Tuttavia una parte di essi subirà un ritardo dovuto al fatto che l'informazione della riapertura non è immediata:

$$\int_t^{t_{op\,inf}} 1 - b_s \, t \, ds = \int_t^{t_{op\,inf}} \frac{1 - b_s}{1 - b_t} ds \quad (2.29)$$

con  $b_s \, t = \frac{b_s - b_t}{1 - b_t}$  e  $s$  pari all'intervallo di tempo successivo a  $t$  corrispondente al momento in cui gli utenti sono informati della riapertura dell'arco.

Considerato che al momento dell'apertura gli utenti informati sono pari a  $a \, t \, 1 - b_t$ , l'incremento nel tempo di viaggio in questo periodo risulta:

$$\begin{aligned} \Delta T_k^{open} &= x \int_{t_{open}}^{t_{op\,inf}} a \, t \, 1 - b_t \left( \frac{1}{1 - b_t} \int_t^{t_{op\,inf}} 1 - b_s \, ds \right) dt = \\ &= x \int_{t_{open}}^{t_{op\,inf}} a \, t \int_t^{t_{op\,inf}} 1 - b_s \, ds dt \end{aligned} \quad (2.30)$$

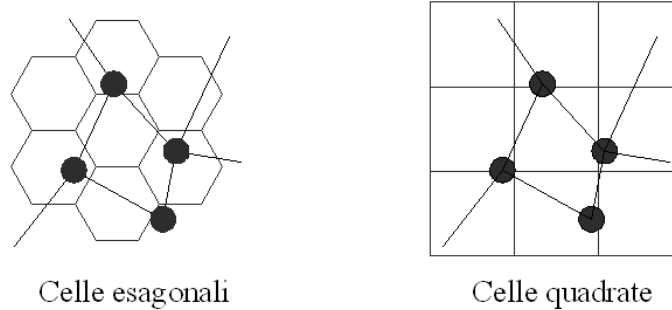
Pertanto, ponendo  $E \, t = \int_t^{t_{op\,inf}} 1 - b_s \, ds$ ,  $C = E \, t_{open}$  e  $D = \int_{t_{open}}^{t_{op\,inf}} a \, t \, E \, t \, dt$ ,

si ottiene l'incremento totale nel tempo di viaggio:

$$\Delta T_k = \Delta T_k^{close} + \Delta T_k^{open} = x \left[ \frac{t_{open}^2}{2} + t_{open} C + D \right] \quad (2.31)$$

In uno studio ancora più successivo [4] Jenelius analizza la vulnerabilità di una rete stradale sottoposta ad un evento di entità spaziale sufficientemente estesa. In questa ricerca, pertanto, l'autore analizza la vulnerabilità non solo per i singoli archi ma considera anche la perdita di funzionalità simultanea di più archi posti in una stessa area soggetta ad un evento calamitoso. La metodologia di studio proposta consiste nel coprire l'area interessata con una serie di

griglie costituite da celle di forma e dimensione omogenea, in cui ogni cella rappresenta l'estensione di un evento.



**Figura 3 Esempi di griglie di forme differenti**

Per ogni cella si identificano gli archi che la intersecano e si calcolano gli effetti che si hanno in seguito alla rimozione simultanea di tutti gli archi contenuti nella cella stessa. L'impatto è calcolato in termini di domanda insoddisfatta e di ritardi per gli utenti, permettendo così di valutare la sempre più decrescente accessibilità a fronte di un aumento di costo di viaggio.

Il ritardo complessivo  $\Delta T_{ij}^c \tau$  per tutti gli utenti che viaggiano dall'origine  $i$  alla destinazione  $j$  durante la chiusura di tutti gli archi contenuti nella cella  $c$  per una durata  $\tau$  può essere espresso, considerando la domanda di trasporto costante nell'unità di tempo, come:

$$\Delta T_{ij}^c \tau = \begin{cases} x_{ij} \Delta t_{ij}^c \left( \tau - \frac{\Delta t_{ij}^c}{2} \right) & \text{se } 0 \leq \Delta t_{ij}^c \leq \tau \\ \frac{x_{ij} \tau^2}{2} & \text{se } \tau \leq \Delta t_{ij}^c \leq \infty \end{cases} \quad (2.32)$$

Dove  $\Delta t_{ij}^c$  denota la differenza di tempo di viaggio fra il percorso originale più breve e il nuovo percorso e  $x_{ij}$  la domanda di viaggio media tra  $i$  e  $j$  durante la chiusura.

Se non ci sono rotte alternative, l'utente è portato ad aspettare fino a che la chiusura non termina. Analiticamente parlando, ciò è esprimibile ponendo  $\Delta t_{ij}^c = \infty$ . Il ritardo totale in questo caso risulta pari a:

$$\Delta T_{ij}^c \tau = \frac{x_{ij} \tau^2}{2} \text{ se } \Delta t_{ij}^c = \infty \quad (2.33)$$

L'impatto totale dovuto alla chiusura di tutti gli archi contenuti all'interno di una griglia è valutato attraverso la definizione di importanza di una griglia, analogamente a quanto fatto per gli archi. L'importanza di una cella  $c$  durante un evento di durata  $\tau$  è definita come la somma dei ritardi totali  $\Delta T_{ij}^c \tau$  per tutte le relazioni OD:

$$I_{c/\tau} = \sum_i \sum_{j \neq i} \Delta T_{ij}^c \tau \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} I_{c/\tau} &= \sum_{i \in c} \sum_{j \in c} \Delta T_{ij}^c \tau + \sum_{i \notin c} \sum_{j \in c} \Delta T_{ij}^c \tau + \sum_{i \in c} \sum_{j \notin c} \Delta T_{ij}^c \tau + \sum_{i \notin c} \sum_{j \notin c} \Delta T_{ij}^c \tau = \\ &= \frac{\tau^2}{2} \sum_{i \in c} \sum_{j \in c} x_{ij} + \frac{\tau^2}{2} \sum_{i \notin c} \sum_{j \in c} x_{ij} + \frac{\tau^2}{2} \sum_{i \in c} \sum_{j \notin c} x_{ij} + \sum_{i \notin c} \sum_{j \notin c} \Delta T_{ij}^c \tau = \\ &= I_{intern} c/\tau + I_{out} c/\tau + I_{in} c/\tau + I_{cross} c/\tau \end{aligned}$$

Pertanto, l'importanza è data dalla somma delle componenti di ritardo che subiscono rispettivamente la domanda interna alla zona  $I_{intern} c/\tau$ , la domanda che proviene dall'esterno  $I_{out} c/\tau$ , quella che proviene dall'interno della zona  $I_{in} c/\tau$  e infine la domanda che attraversa la zona  $I_{cross} c/\tau$ .

Alcuni utenti che normalmente attraversano la zona hanno a disposizione percorsi alternativi, mentre altri no. Di conseguenza, la  $I_{cross} c/\tau$  può essere ulteriormente scomposta in:

$$\begin{aligned} I_{cross} c/\tau &= \sum_{i \notin c} \sum_{j \notin c | \Delta T_{ij}^c = \infty} \Delta T_{ij}^c \tau + \sum_{i \notin c} \sum_{j \notin c | \Delta T_{ij}^c < \infty} \Delta T_{ij}^c \tau = \\ &= \frac{\tau^2}{2} \sum_{i \notin c} \sum_{j \notin c | \Delta T_{ij}^c = \infty} x_{ij} + \sum_{i \notin c} \sum_{j \notin c | \Delta T_{ij}^c < \infty} \Delta T_{ij}^c \tau = \\ &= I_{unscr} c/\tau + I_{detrs} c/\tau \end{aligned} \quad (2.35)$$

Dove  $I_{unscr} c/\tau$  è la componente dovuta alla domanda insoddisfatta, mentre  $I_{detrs} c/\tau$  rappresenta la componente di disagio per la parte di domanda che sceglie un percorso alternativo.

L'autore definisce poi il concetto di esposizione per gli utenti di una rete come l'impatto medio per utente, a differenza dell'esposizione totale che è invece definita come l'impatto

totale sugli utenti [25]. L'esposizione per gli utenti può essere utilizzata come misura di vulnerabilità, in quanto gli utenti percependo la propria esposizione sono in grado di attribuire un valore di vulnerabilità alla rete.

Ipotizzando il verificarsi di uno scenario calamitoso, Jenelius definisce il concetto di esposizione per gli utenti di una regione analiticamente come:

$$UE_{wc} \quad r | \tau, G = \max_{c \in G} \frac{\sum_{i \in r} \sum_{j \neq i} \Delta T_{ij}^c \tau}{\sum_{i \in r} \sum_{j \neq i} x_{ij} \tau} \quad (2.36)$$

Considerando  $r$  come la regione di studio,  $i$  l'origine,  $\tau$  il tempo di durata dell'evento e  $G$  un insieme di griglie di forma definita.

Tutta la procedura è stata applicata alla rete di trasporto svedese e i risultati mostrano che i fattori che determinano conseguenze maggiori in seguito alla "caduta" di un'intera area sono differenti da quelli che riguardano la distruzione di un singolo arco. Infatti, nel caso di chiusura di un singolo arco, i parametri che influenzano maggiormente la vulnerabilità sono il flusso sull'arco stesso e la disponibilità di percorsi alternativi; invece, nel caso di chiusura di più archi inseriti in un'area più o meno estesa e interessata da evento calamitoso, la ridondanza di percorsi ha importanza minore, infatti gli archi più vicini potrebbero risultare in ogni caso inutilizzabili. Pertanto, è la domanda insoddisfatta che influisce maggiormente sulla vulnerabilità della rete. Ovviamente, la domanda di trasporto è strettamente connessa con la popolazione residente nell'area e quindi la distribuzione e la densità demografica di una regione influenza la vulnerabilità della rete stradale.

### 2.2.6 Husdal e la vulnerabilità in termini di analisi costi benefici

Secondo Husdal la vulnerabilità può essere definita come un aumento di costi, conseguente ad una mancanza di affidabilità in alcune circostanze. In questi termini è chiaro che l'autore separa il concetto di vulnerabilità dal concetto di affidabilità: la vulnerabilità è infatti legata alle conseguenze dovute alla chiusura di un arco della rete, mentre l'affidabilità è una misura del grado di stabilità di una rete.

L'autore inoltre afferma che una rete può essere soggetta a tre tipologie differenti di vulnerabilità dovute alla struttura, all'ambiente e al traffico.

La vulnerabilità strutturale, secondo l'autore, si riferisce al modo in cui la strada è stata costruita, sia per quanto riguarda la topologia e il grado di connessione esistente che per quel che riguarda gli elementi geometrici veri e propri come larghezza, numero di corsie, presenza di ponti, gallerie o viadotti, eccetera. La vulnerabilità naturale, invece, riguarda la topografia e i rischi naturali della zona di analisi. Infine, la vulnerabilità legata o generata dal traffico è associata agli attributi che generalmente descrivono i flussi di traffico e le condizioni che derivano dal variare di essi in particolari condizioni (ore di punta, nevicata, eccetera).

L'autore inoltre definisce la vulnerabilità come la suscettibilità di una rete a fallire, mentre l'affidabilità è vista come la probabilità che una rete funzioni. In questi termini, l'affidabilità può essere intesa come il beneficio, mentre la vulnerabilità come il costo, infatti, sebbene non esista una definizione univocamente accettata del concetto di vulnerabilità, è invece globalmente chiaro che qualsiasi tipo di vulnerabilità porta alla società un aumento di costo. Pertanto l'autore propone di valutare la vulnerabilità nelle analisi costi-benefici o in un'analisi multicriteria per valutare la fattibilità di un progetto, in quanto essa risulta essere un costo che può essere quantificato.

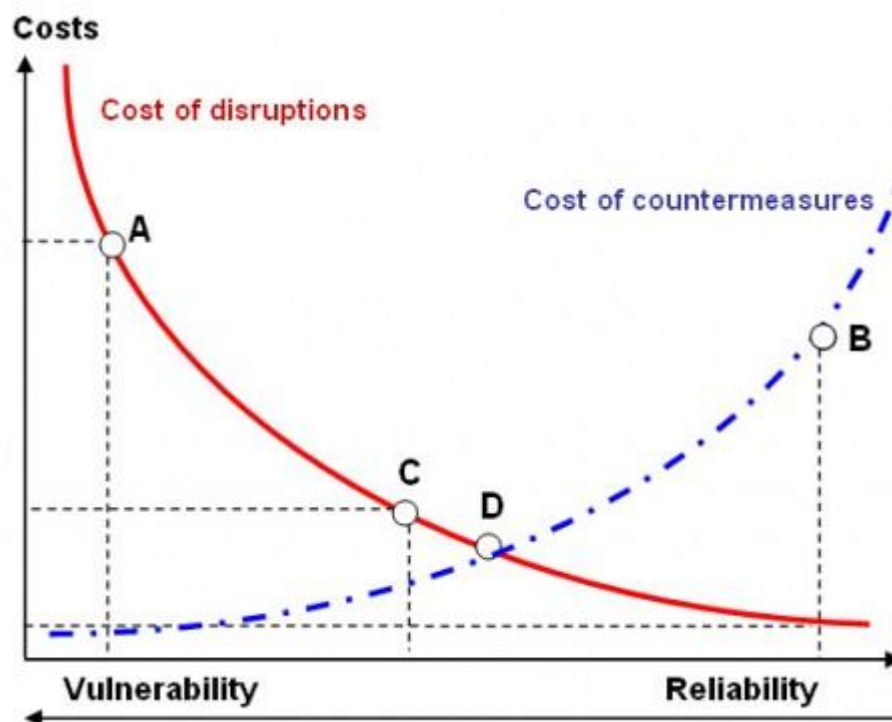


Figura 4 Vulnerabilità e affidabilità

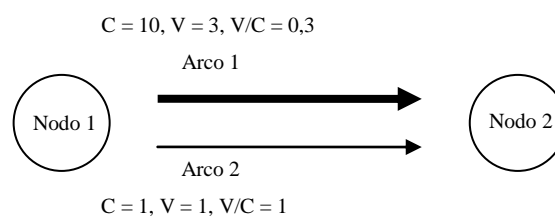
### 2.2.7 Scott, Novak, Aultman-Hall e Guo: l'indice NRI

La flessibilità di una rete è un attributo della rete stessa legato alla sua geometria (caratteristiche fisiche) e al livello di servizio che essa garantisce ed è una caratteristica molto importante per quel che riguarda l'organizzazione spaziale di una rete.

La flessibilità della capacità sistemica di una rete è l'abilità di una rete di trasporto di adattarsi alle variazioni di domanda, in modo tale da garantire, in ogni situazione, un adeguato livello di servizio. Una rete flessibile, sarà in grado di accomodare variazioni di flussi di traffico, sia per quel che riguarda la quantità di veicoli, sia per quel che riguarda la loro distribuzione spaziale.

Altra caratteristica importante per una rete di trasporto è la sua affidabilità. Essa può essere espressa in termini di costo di viaggio: se il costo di viaggio è accettabile e concorde con quello atteso dagli utenti anche in situazioni in cui gli utenti sono pessimisti, allora la rete è affidabile; viceversa, la rete non lo è. Essa è legata al grado di connessione della rete (maggiore è la connessione, maggiori saranno le possibilità di collegamento fra più aree e quindi maggiore sarà l'affidabilità) ma anche al comportamento degli utenti. Alcuni autori definiscono anche il concetto di affidabilità in termini di capacità come la probabilità che una rete possa soddisfare una certa domanda di traffico in relazione ad un determinato livello di servizio, tenendo conto delle scelte di percorso degli utenti. In questi termini, l'affidabilità è intesa come un indice di performance di una rete.

Gli autori [41] analizzano il concetto di flessibilità e affidabilità di una rete a partire da quanto fatto da autori precedenti. In particolare, si è visto come in tutti gli altri studi si fosse proceduto analizzando i concetti sopra descritti tramite misure localizzate di livello di servizio, sfruttando ad esempio il rapporto volume/capacità. Se  $V/C > 1$  allora la rete è congestionata. Tuttavia tale approccio permette solamente un'analisi localizzata e spesso risulta essere inefficace e non rappresentativo della realtà. Infatti se si considera il seguente problema:



**Figura 5 Esempio di rete**

e lo si analizza unicamente dal punto di vista del rapporto V/C, l'arco 2 risulta essere il più critico in quanto è al limite della capacità. In realtà però, poiché l'arco 1 deve smaltire un volume di traffico tre volte maggiore rispetto a quello dell'arco 2, se dovesse cadere l'arco 1 non si riuscirebbe a ridistribuire i flussi. Pertanto l'arco più critico è in realtà l'1.

Gli autori poi presentano un secondo indice, che considera non solo i flussi di traffico e la capacità ma anche il grado di connessione della rete: esso è l'indice di connettività o gamma index. Esso dipende unicamente dalla geometria e considera la relazione esistente fra il numero attuale di archi presente nella rete  $e$  e il massimo numero di archi possibile  $e_{max}$

$$\gamma = \frac{e}{e_{max}} \quad (2.37)$$

Esso varia fra 0 e 1: 1 corrisponde a rete completamente connessa.

Il valore massimo di archi possibile per una rete si esprime analiticamente come:

$$e_{max} = 3 \nu - 2 \quad (2.38)$$

Con  $\nu$  pari al numero di nodi totale della rete.

I due indici presentati, non permettono di analizzare in modo adeguato una rete se usati separatamente. È pertanto utile definire un nuovo indice basato sull'analisi dei tempi di viaggio. L'analisi svolta considera non solo la capacità dei singoli archi ma anche la possibilità di trovare un percorso alternativo che permetta di mantenere i costi, definiti in termini di tempo di viaggio, accettabili. Il nuovo indice definito è NRI, Network Robustness Index. La procedura per la definizione di tale indice è descritta sotto.

Innanzitutto, si definiscono i tempi di viaggio in relazione ai flussi:

$$t_a = \text{tempi di viaggio} = t_a \cdot x_a$$

$$x_a = \text{flussi}$$

Successivamente, si definisce per ogni arco un indice di costo:

$$c_a = \sum_a t_a \cdot x_a \cdot \delta_a \quad (2.39)$$



pari al costo generalizzato dovuto alla rimozione di un arco. Il parametro  $\delta_a$  può assumere due valori differenti a seconda che l'arco di cui si stia valutando il costo sia quello rimosso o meno:

$$\delta_a = \begin{cases} 1 \rightarrow \text{se l'arco rimosso è } a \\ 0 \rightarrow \text{se l'arco rimosso non è } a \end{cases}$$

Parallelamente, si valuta il costo di viaggio nel caso in cui tutti gli archi siano transitabili:

$$c = \sum_a t_a \cdot x_a \quad (2.40)$$

Infine, si può definire l'NRI:

$$NRI = c_a - c \quad (2.41)$$

L'indice proposto tiene conto dei reali flussi di traffico in quanto si inseriscono nel modello le curve di deflusso ( $t_a = t_a \cdot x_a$ ). In questo modo, si riesce a considerare il reale comportamento degli utenti in relazione a differenti gradi di congestione della rete. In particolare si riesce a tenere in considerazione il fatto che gli utenti non scelgono sempre il percorso più breve ma variano la propria scelta in relazione ai flussi reali sulla rete. Inoltre il modello permette anche di considerare il fatto che è probabile che anche gli utenti che non usano direttamente l'arco "caduto" siano costretti a cambiare percorso, a causa dell'aumento di flusso provocato dalla redistribuzione dei flussi che utilizzavano l'arco ora inutilizzabile.

Praticamente, gli autori applicano l'indice a tre differenti reti che si differenziano fra loro per il grado di connessione esistente fra i nodi. È stato dimostrato che esiste una relazione inversamente proporzionale fra il costo di viaggio e il grado di connessione  $\gamma$ : i costi aumentano al decrescere del grado di connessione. Pertanto, il costo di viaggio, definito in termini di tempo, è influenzato sia dai flussi che dal grado di connessione della rete.

### 2.2.8 Issacharoff L., Lämmer S., Rosato V., Helbing D

Gli autori nel loro articolo [42] descrivono il concetto di vulnerabilità legata alle rete autostradale distinguendo fra la vulnerabilità topologica, ovvero quella dovuta a caratteristiche topologiche della rete, e vulnerabilità dovuta ai flussi di traffico.

Secondo gli autori, una rete è vulnerabile se la sua funzionalità è ridotta significativamente da un evento più o meno grave. Pertanto, essi associano al concetto di vulnerabilità il concetto di funzionalità e determinano un indicatore di vulnerabilità in funzione della possibilità di caduta di un rete in seguito alla perdita di funzionalità di determinati archi. La vulnerabilità è quindi definita come:

$$L = \frac{df}{du} \quad (2.42)$$

Dove  $f$  è la funzionalità della rete che può essere espressa in termini di efficienza o qualità del servizio offerto, mentre  $u$  rappresenta l'estensione del collasso.

Il collasso di una rete può essere causato da circostanze che concernono le caratteristiche interne della rete come ad esempio il malfunzionamento di alcuni elementi della rete, il cedimento di alcuni materiali, oppure può essere causato da eventi esterni che minano la funzionalità della rete. In termini di rete autostradale, il collasso è spesso associato alla chiusura di uno o più archi.

La chiusura di un arco è direttamente collegata alle caratteristiche topologiche della rete stessa come la posizione degli archi, il grado di connessione della rete e la sua "centralità" e tali caratteristiche influenzano l'entità del danno provocato dalla chiusura dell'arco stesso.

Per studiare una rete dal punto di vista topologico, gli autori analizzano i concetti di "Betweenness Centrality" e di efficienza topologica.

La "Betweenness Centrality" è definita come:

$$b_{ij} = \frac{n_{ij}}{N-1} \frac{1}{N-2} \quad (2.43)$$

Dove  $n_{ij}$  è il numero dei percorsi più brevi fra ogni coppia di nodi contenente l'arco  $ij$  e  $N$  è il numero totale di nodi nel grafo.

Mentre l'efficienza topologica è:

$$E_T G = \frac{1}{N-1} \sum_{i,j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (2.44)$$

Dove  $d_{ij}$  è il percorso più breve fra  $i$  e  $j$ . L'efficienza topologica rappresenta una stima della probabilità per cui in una rete tutti i nodi risultano essere raggiungibili.

Dalla definizione di efficienza topologica si può ricavare il concetto di Information Centrality  $IC_{ij}$  del generico arco  $ij$  che permette di valutare le variazioni di efficienza della rete in seguito alla rimozione dell'arco in questione:

$$IC_{ij} = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E G - E G'}{E G} \quad (2.45)$$

Dove  $E G$  rappresenta l'efficienza della rete imperturbata, mentre  $E G'$  è l'efficienza della rete in seguito alla rimozione dell'arco  $ij$ . Chiaramente, tanto maggiore è  $IC_{ij}$ , tanto più importante sarà l'arco  $ij$ .

Collegando l'efficienza alla funzionalità della rete  $f$  e considerando la chiusura di un arco come  $u$ , si può affermare che la vulnerabilità topologica è

$$L_T = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E[G 0] - E[G u]}{E[G 0]} \quad (2.46)$$

Gli autori successivamente determinano la vulnerabilità dovuta ai flussi di traffico. Essi usano un modello di traffico statico e la rete in condizioni stazionarie, considerando quindi situazioni a lungo termine. Inoltre non considerano le variazioni dei flussi di traffico nell'arco della giornata.

Gli autori introducono una funzione di costo per valutare e quantificare l'efficienza con cui la rete è in grado di soddisfare un certo flusso:

$$C = \sum_{ij} C_{ij} = \sum_{ij} D_{ij} T_{ij} \quad (2.47)$$

Dove  $C_{ij}$  è il costo di tutti i viaggi passanti per l'arco  $ij$ ,  $D_{ij}$  è il flusso e  $T_{ij}$  è il tempo di viaggio fra l'origine  $i$  e la destinazione  $j$ .

Nota la funzione di costo, gli autori definiscono l'efficienza dipendente dai flussi come:

$$E_T G = \frac{1}{N-1} \sum_{i,j \in G} \frac{1}{C_{ij}} \quad (2.48)$$

Con  $C_{ij} = q_{ij} T_{ij}$ .

Gli autori indicano inoltre la qualità del servizio  $Q$  come il rapporto fra il costo minimo e il costo effettivo del viaggio:

$$Q = \frac{C_{\min}}{C} \quad (2.49)$$

La qualità di servizio della rete, tuttavia, viene anche espressa in termini di efficienza dipendente dai flussi come:

$$Q = \frac{E_F}{E_{F \max}} = \frac{\sum_{ij} C_{ij}^{-1}}{\sum_{ij} C_{ij}^{\min -1}} \quad (2.50)$$

Dove  $E_{F \max}$  è l'efficienza massima della rete dipendente dai flussi che è definita come

$$E_{F \max} = \frac{1}{N} \frac{1}{N-1} \sum_{i,j \in D} \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{C_{ij}^k} = \frac{1}{D_{ij} T_{ij}^0} \quad (2.51)$$

Alla fine, la vulnerabilità dipendente dai flussi è espressa come:

$$L_F^{(u)} = 1 - \left\langle \frac{Q \ u}{Q \ 0} \right\rangle \quad (2.52)$$

Con  $Q_u$  e  $Q_0$  pari alla qualità del servizio nei casi, rispettivamente, di rete perturbata e di rete non perturbata.

### 2.3 Spunti derivanti dallo studio dello stato dell'arte

La ricerca bibliografica è stata fondamentale per lo sviluppo della metodologia per lo studio della vulnerabilità descritta in questo elaborato di tesi. In primo luogo perché ha permesso di comprendere a fondo la tematica della vulnerabilità e le molteplici interpretazioni che ad essa sono associate. Come è stato descritto nei precedenti paragrafi, gli autori danno una propria definizione del concetto di vulnerabilità; per la metodologia sviluppata si è deciso di riferirsi alla definizione di vulnerabilità sistemica di Maja e altri ([45] [46]). In accordo con il lavoro portato avanti dal “Laboratorio di Mobilità e Trasporti” presso il Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano si è scelto di seguire il procedimento di valutazione della vulnerabilità sistemica derivante dalla valutazione delle conseguenze della sottrazione dalla rete di un arco alla volta. Questo concetto per il quale la vulnerabilità è definita in base alle conseguenze che un'interruzione provoca alla rete nel suo complesso riprende anche le teorie di Taylor e D'Este, Jenelius e Scott.

Si è inoltre deciso di considerare la vulnerabilità indipendentemente sia dal danno subito dall'elemento per il quale la si sta valutando (non si fa riferimento al concetto di vulnerabilità intrinseca trattato da Cafiso) sia dell'evento fisico che può aver provocato l'interruzione (alcuni autori hanno sviluppato, per esempio, una metodologia specifica per valutare la vulnerabilità di un elemento derivante dall'avvenimento sismico o incidentale).

In accordo con alcuni autori trattati nei paragrafi precedenti (quali Taylor e D'Este, Jenelius, Husdal e Scott) si è scelto di valutare la vulnerabilità sistemica in termini di aumento di costo per la mobilità che nel caso specifico di questo lavoro di tesi si identifica con la sommatoria dei tempi di percorrenza di tutti gli archi della rete moltiplicati per i flussi che li percorrono. In questo lavoro non si valuta la vulnerabilità sistemica in termini di capacità del sistema di riassorbire i flussi deviati (come invece viene trattata dal precedente lavoro svolto presso il “Laboratorio di Mobilità e trasporti” del Dipartimento INDACO [46] e da Berdica [37]) tuttavia la capacità degli archi è tenuta in considerazione indirettamente nel calcolo. Infatti il tempo

che si utilizza per definire le funzioni di costo non è il tempo di percorrenza a libero deflusso bensì è legato al flusso transitante sull'arco rapportato alla sua capacità mediante l'utilizzo di curve di deflusso; tali curve vanno definite in base alle caratteristiche della circolazione nella rete considerata.

Anche per quanto riguarda la scelta dell'indicatore si è fatto riferimento allo studio portato avanti da autori quali Jenelius e Scott, i quali effettuano la valutazione di vulnerabilità in termini di incremento di costo generalizzato calcolato nella situazione iniziale e la "situazione di rete interrotta".

Nel capitolo 3 sono approfonditi gli aspetti per i quali questo lavoro di tesi prende le distanze da dallo stato dell'arte e sviluppa concetti innovativi legati alla definizione di vulnerabilità sistemica, alle metodologie di calcolo e alla definizione di indicatori che consentano il confronto anche tra archi di reti diverse.

Concludendo, è bene sottolineare che gli studi sulla vulnerabilità stradale sono di grande attualità e pertanto in continua evoluzione negli ambienti di ricerca nell'ambito dei trasporti. Questo lavoro si inserisce quindi all'interno di questo filone.

### **3 Sviluppo della metodologia per il calcolo della vulnerabilità sistemica**

Il presente lavoro di tesi, che nasce all'interno di un progetto di ricerca sviluppato presso il Politecnico di Milano, Dipartimento INDACO "Laboratorio di Mobilità e Trasporti", si prefigge di studiare il concetto di vulnerabilità sistemica (si veda, per la definizione il paragrafo 2.2.1) e sviluppare una metodologia per il calcolo della stessa. Lo scopo è quello di implementare una procedura che permetta di stimare la vulnerabilità sistemica di un arco di una rete. A partire dal lavoro precedentemente sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca suddetto [45] e [46], è stata elaborata una metodologia che permettesse di modificarne alcuni aspetti, in particolare la definizione stessa dell'indicatore e le ipotesi dei modelli di assegnazione; e permettesse di mantenerne altri, nello specifico, la ricerca della vulnerabilità sistemica di un arco associata alle conseguenze sul sistema dovute alla perdita di funzionalità dell'arco stesso. Inoltre è stata introdotta una visione completamente innovativa del concetto di vulnerabilità sistemica, infatti essa verrà valutata in modi diversi a seconda dell'istante in cui viene stimata.

#### **3.1 Due diverse tipologie di vulnerabilità**

Analizzando quanto avviene nella realtà, successivamente alla impraticabilità di un arco di una rete, si può osservare che il sistema impiega un determinato lasso di tempo per assumere una nuova configurazione di equilibrio. Pertanto si è pensato di differenziare il calcolo della vulnerabilità in due momenti, la fase di transizione dallo stato iniziale di equilibrio della rete intatta a quello che si viene a generare in seguito alla chiusura di un arco e la fase ove l'equilibrio si è ripristinato. Poiché il disturbo prodotto sulla mobilità è molto diverso nelle due configurazioni del sistema si definiscono due diverse tipologie di vulnerabilità sistemica:

- **vulnerabilità sistemica in transitorio**: rappresenta la vulnerabilità sistemica per eventi di breve durata o nella prima fase di un evento;

- **vulnerabilità sistemica a regime**: rappresenta la vulnerabilità sistemica per eventi di lunga durata o per situazioni per le quali il sistema ha raggiunto un nuovo assetto di equilibrio.

Questo approccio si differenzia da quanto emerso in letteratura fino ad oggi dove l'analisi di vulnerabilità era condotta per un'unica configurazione dei flussi sulla rete interrotta.

## 3.2 Concetti di base

La valutazione di vulnerabilità sistemica proposta si basa sul concetto di costo della mobilità, calcolato come la sommatoria su tutti gli archi del prodotto del flusso di arco moltiplicato per il tempo di percorrenza dello stesso:

$$c = \sum f \cdot t(f) \quad (3.1)$$

Come si nota dalla formula (3.1), il tempo utilizzato per il calcolo del costo della mobilità è dipendente dal flusso di percorrenza. Pertanto è stato necessario scegliere delle curve di deflusso che fossero adatte a rappresentare il fenomeno sulla rete considerata. In questo modo si tiene in conto anche della capacità degli archi, seppur in modo indiretto, legandola ai fenomeni di congestione. Essa deriva infatti sia dai flussi di arco sia dalle caratteristiche fisiche e funzionali dello stesso.

La perdita di funzionalità di un arco comporta l'impossibilità di transito su tale arco e la conseguente redistribuzione sui rimanenti archi della rete dei flussi di percorso interessati dalla chiusura. La metodologia elaborata si differenzia dai lavori svolti in precedenza poiché permette la riassegnazione contemporanea di tutte le relazioni OD coinvolte.

## 3.3 Metodologia di assegnazione e definizione di scenari

Al fine di valutare le diverse tipologie di vulnerabilità sistemica associate ad un arco di una rete e già introdotte in precedenza, è necessario eseguire alcune simulazioni di traffico che



consentano di riprodurre diverse situazioni in cui si può venire a trovare la rete. Punto chiave delle simulazioni di traffico è la fase di assegnazione dove si verifica l'interazione tra il modello di domanda e quello di offerta. Attraverso questa fase si definiscono i criteri di scelta del percorso da parte degli utenti e si assegnano i flussi alla rete. Si ottengono inoltre i valori di flusso di arco, dato fondamentale per la definizione del tempo di percorrenza dello stesso e quindi del costo di percorrenza. Le ipotesi [47] [48] che si formulano nei modelli di assegnazione creati, permettono di simulare le diverse situazioni nelle quali si può trovare il sistema reale. In questo paragrafo vengono presentati gli scenari di simulazione previsti per il calcolo della vulnerabilità sistemica applicato ad una rete e le ipotesi che ne stanno alla base.

### 3.3.1 Ipotesi di base

Si elencano le ipotesi generali, formulate per la definizione dei parametri del modello di assegnazione:

- **Scelta curva di deflusso:** poiché i modelli per il calcolo della vulnerabilità sistemica sono stati implementati per l'applicazione a reti congestionate, dove il tempo di percorrenza degli archi è dipendente dai flussi circolanti, i modelli di assegnazione considerati richiedono la definizione di un modello di deflusso. Esistono differenti tipologie di modelli di deflusso che si differenziano innanzitutto in base al tipo di flusso presente sulla strada considerata: si distinguono quindi modelli di deflusso adatti a descrivere un flusso ininterrotto e modelli adatti a flussi interrotti. Per il lavoro di tesi svolto si è deciso di prendere in considerazione i soli modelli relativi al flusso ininterrotto per poter applicare il modello di calcolo della vulnerabilità sistemica a reti principali e, in generale, costituite da archi corrispondenti a tratte in cui il flusso può considerarsi ininterrotto. Differenti autori hanno studiato i modelli di deflusso per strade a flusso ininterrotto e hanno ottenuto formule differenziabili fra loro in base ai parametri considerati. Ad esempio Cascetta fornisce un legame tra costo del trasporto (che coincide con il tempo di percorrenza dell'arco) e i parametri flusso e velocità:

$$t = \frac{l}{v} + \alpha \cdot \left( \frac{l}{v_0} - \frac{l}{v_f} \right) \left( \frac{f}{c} \right)^\beta \quad (3.2)$$

tale relazione ha carattere statistico, ma non tiene conto del ramo instabile, cioè non considera la congestione e, pertanto, il modello è stato scartato.

Il modello di assegnazione all'equilibrio impiegato si fonda quindi sull'utilizzo di funzioni di costo basate sulle curve BPR, simili al modello Cascetta. In particolare la curva scelta è del tipo:

$$t = \frac{l}{v} + \alpha \cdot \left( \frac{f}{c} \right)^\beta \quad (3.3)$$

dove  $\frac{l}{v}$  corrisponde al tempo di percorrenza a libero deflusso;  $f$  il flusso circolante e  $c$  la capacità dell'arco considerato. I coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  sono differenti a seconda della tipologia di strada. Il modello BPR ha il vantaggio di essere molto più flessibile e più facilmente applicabile rispetto al modello di Cascetta. I parametri presenti nel modello BPR sono però stati valutati anche dal Cascetta e sono forniti anche da manuale HCM. Essi presentano valori differenti a seconda che ci sia o meno il casello autostradale. Poiché la maggior parte delle strade nazionali principali sono autostrade il cui accesso è regolato da casello, si è deciso di considerare i parametri relativi a tale tipologia di strada:

Con casello	HCM		Cascetta	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
I CNR	0.73	4	0.46	3
	0.73	12		
II CNR	0.62	3	0.46	3
	0.62	5.5		
III CNR	0.60	3.5	1	3
	0.60	6.6		

**Tabella 1**

Per il lavoro di tesi si è deciso quindi di considerare un valore di  $\alpha$  pari a 0,46 e di  $\beta$  pari a 3.

- **Scelta della funzione di costo:** i modelli di assegnazione si differenziano inoltre in funzione del modello di scelta del percorso: esso può essere di deterministico e di tipo

stocastico. Si è deciso di considerare una scelta del percorso di tipo deterministico basata su una funzione di costo che è funzione unicamente del tempo congestionato. La scelta di utilizzare come unico parametro il tempo di percorrenza è dettata dal fatto che si ritiene che esso sia il parametro che l'utenza tiene maggiormente in considerazione al momento di effettuare la scelta del percorso. Pertanto, il tempo di percorrenza di cui si tiene conto nel modello di scelta di percorso è pertanto pari al tempo valutabile attraverso la curva di deflusso scelta (3.3).

Le funzioni BPR garantiscono l'esistenza e l'unicità dell'equilibrio; infatti sono funzioni continue e con derivate continue, inoltre sono anche separabili: il costo di ciascun arco è infatti derivante unicamente dal flusso su tale arco ed è pertanto indipendente dal flusso sugli altri archi. Questa condizione è molto restrittiva ma è indispensabile per garantire l'unicità della soluzione. Infatti, ci sono casi in cui essa non è rispettata: si consideri, ad esempio, il caso di una rete extraurbana a carreggiata unica e doppio senso di marcia, cioè la gran parte della rete stradale, in cui la velocità di deflusso di un veicolo è condizionata dalla velocità dei veicoli che lo precedono, ma anche da quella dei veicoli circolanti in senso opposto, la densità dei quali determina la possibilità di effettuare il sorpasso dei veicoli più lenti oppure nel caso di reti urbane, il costo di arco è fortemente influenzato dai flussi presenti sugli archi che insistono sulla stessa intersezione.

### 3.3.2 Gli scenari simulati

Operativamente, sono stati effettuate differenti simulazioni che consentono di rappresentare tre diverse situazioni in cui una rete può trovarsi:

- **Ipotesi di scenario “zero”**: con tale terminologia si intende lo scenario relativo alla rete intatta ovvero si intende la situazioni di equilibrio iniziale in cui la rete opera in condizioni di regolare funzionalità del sistema.

Per simulare tale situazione si utilizza un modello di assegnazione all'equilibrio basata su scelta del percorso di tipo deterministica in funzione del costo minore associato, come già precisato nel paragrafo 3.3.1, al tempo di percorrenza. L'assegnazione all'equilibrio si compone di differenti iterazioni di calcolo che consentono di giungere

alla definizione finale della condizione di equilibrio. Nel caso in esame, la prima iterazione della fase calcola i costi riferendosi ai tempi di percorrenza degli archi a libero deflusso; nelle fasi successive, fino al raggiungimento dell'equilibrio, i tempi utilizzati sono invece legati alle curve di deflusso.

Questo scenario rappresenta la situazione iniziale ed è, pertanto, valevole per ogni arco di cui si voglia valutare la vulnerabilità sistemica.

- **Ipotesi di scenario in transitorio**: lo scenario in transitorio permette di analizzare una situazione in cui per la prima volta l'utente si trova ad utilizzare una rete diversa da quella attesa. La rete offerta infatti è privata di un *i*-esimo arco e si simulano frangenti immediatamente successivi l'interruzione dell'*i*-esimo arco: gli utenti che in condizioni ottimali avrebbero scelto di transitare su tale arco sono costretti a modificare il proprio itinerario andando ad impegnare archi di cui non conoscono il livello di traffico, mentre i restanti utenti della rete non modificano le loro scelte di percorso ignari del fatto che le condizioni di traffico andranno a modificarsi. Lo scenario è definito in transitorio in quanto rappresenta la fase di transizione fra due differenti stati di equilibrio della rete ovvero il passaggio dalla situazione di equilibrio della rete intatta e, in generale, con tutti gli elementi normalmente funzionanti e la situazione di equilibrio che si verrà a creare in seguito all'interruzione dell'*i*-esimo arco. Questo scenario intende rappresentare la situazione più gravosa per il sistema che può essere mitigata da una corretta progettazione dell'informazione all'utenza. Operativamente, si chiude l'arco *i*-esimo della rete e si analizza come si ridistribuiscono i flussi circolanti in un istante temporale immediatamente successivo all'interruzione dell'arco stesso. In questo caso si ipotizza quindi che i flussi dei percorsi che non transitano per l'arco interrotto rimangano invariati e che avvenga la redistribuzione dei percorsi che precedentemente transitavano per l'arco interrotto. Dal punto di vista della simulazione, quindi, si utilizza un modello di assegnazione multi classe:
  - assegnazione di tipo deterministico a rete non congestionata utilizzando i tempi a libero deflusso come parametro delle funzioni di costo per gli la parte di utenti che devono modificare il proprio percorso in quanto impossibilitati a transitare sull'arco interrotto;

- assegnazione di tipo deterministico basata sui tempi di percorrenza risultanti dallo scenario “zero” per gli utenti che, non essendo direttamente interessati dalla chiusura dell’arco, non modificano il proprio percorso.

Così facendo, si riescono a simulare le scelte di utenti che, dovendo variare il proprio percorso abituale, si lasciano guidare da un navigatore satellitare, che indica la via più breve o veloce da seguire e non dall’esperienza. Il flusso totale viene quindi calcolato sommando i flussi rimasti invariati con quelli ridistribuiti. I tempi di percorrenza vengono invece ricalcolati al termine dell’assegnazione per tener conto delle nuove condizioni di traffico che si verificano sugli archi della rete rimasti funzionanti. Il calcolo dei tempi di percorrenza si basa sull’utilizzo della curva di deflusso scelta (3.3).

- **Ipotesi di scenario a regime**: lo scenario a regime permette di simulare una situazione in cui la rete offerta è privata di un arco *i*-esimo e l’interruzione dell’arco ha una durata tale da poter ipotizzare che dopo un certo periodo i flussi tendano ad un naturale assetto che minimizzi i costi di ciascun utente, andando così a ottenere una situazione di equilibrio della rete che rappresenta il raggiungimento del cosiddetto “ottimo individuale”. Lo scenario simula inoltre le situazioni in cui all’utenza sia stata fornita una sufficiente base di informazioni per conoscere la nuova configurazione della rete e effettuare una scelta del percorso più consapevole. In quest’ottica, l’utilizzo di tale tipo di scenario può essere finalizzato allo sviluppo di un sistema di informazione agli utenti che consenta di giungere all’equilibrio della rete in tempi minori di quelli normalmente necessari. Le informazioni possono essere fornite sia prima del viaggio (informazioni PRE TRIP) sia durante lo spostamento (informazioni ON TRIP).

È importante sottolineare che l’ottimo individuale spesso non coincide con l’ottimo di sistema, tuttavia questa è la migliore configurazione che gli utenti sono in grado di raggiungere autonomamente.

A livello pratico, lo scenario a regime si basa su un modello di assegnazione di tipo deterministico valevole per tutti gli utenti ovvero sia per chi è interessato direttamente dalla chiusura dell’*i*-esimo arco, sia per chi invece nemmeno in origine transitava per l’arco interrotto. Le iterazioni successive che il processo di assegnazione compie per

giungere alla definizione del nuovo equilibrio si basano sul costo inteso come tempo di percorrenza degli archi calcolato in base alle curve di deflusso (3.3).

### **3.4 Calcolo della vulnerabilità sistemica. Definizione degli indicatori.**

Il criterio generale per il calcolo degli indicatori consiste nell'effettuare un paragone tra la situazione di base (scenario "zero") con i due assetti diversi che il sistema può raggiungere in seguito all'interruzione di un arco (scenario in transitorio e scenario a regime).

Nel seguente paragrafo verranno descritte le varie proposte di indicatore di vulnerabilità che sono state implementate. Per ciascuna alternativa si descriverà il metodo di calcolo, le caratteristiche che ci si aspetta di ottenere dai risultati e le possibili applicazioni di ciascun indicatore.

#### **3.4.1 Calcolo aumento di costo assoluto e relativo**

Un primo indicatore che si è scelto di implementare rappresenta l'aumento del costo della mobilità in termini assoluti nella rete privata di un arco (scenario in transitorio e scenario a regime) rispetto al costo della stessa calcolato nello "scenario zero". L'aumento di costo consiste nella differenza tra il costo negli scenari a rete interrotta ovvero privata di un arco e il costo relativo agli spostamenti sulla rete iniziale:

$$\Delta c = c_{regime,transitorio} - c_{iniziale} \quad (3.4)$$

Dove  $c_{regime,transitorio}$  e  $c_{iniziale}$  rappresentano i costi della mobilità calcolati attraverso la formula (3.1) per gli scenari a regime, in transitorio e "zero".

Il risultato del calcolo è espresso in minuti e rappresenta la somma dei minuti persi da tutti gli utenti della rete. Il fatto che il risultato sia espresso in una grandezza fisica permette l'utilizzo di tale dato per effettuare calcoli anche di natura economica. Il risultato finale è un indicatore "medio", che non tiene conto degli aumenti di costo prodotti per ciascuna coppia OD in relazione all'aumento del tempo di viaggio causato dall'interruzione, ma considera l'aumento

globale dei tempi di viaggio. Per agevolare l'analisi dei risultati si può procedere nei seguenti modi:

- Per avere una visione immediata dell'aumento dei costi per la mobilità provocato dall'interruzione di un arco si calcola l'aumento percentuale:

$$\Delta C_{\%} = \frac{C_{regime,transitorio} - C_{iniziale}}{C_{iniziale}} \cdot 100 \quad (3.5)$$

Questa elaborazione permette un confronto più agile tra i risultati ottenuti per vari archi di una stessa rete;

- Per effettuare confronti tra i risultati applicati a reti differenti si può procedere alla normalizzazione del risultato espresso in termini assoluti:

$$\Delta C_{normalizzato} = \frac{\Delta c - \min \Delta c}{\max \Delta c - \min \Delta c} \quad (3.6)$$

La percentuale non è adatta a questo tipo di analisi perché, al variare delle dimensioni della rete che si sta considerando, l'influenza percentuale sui costi di mobilità della chiusura di un arco sarà via via più ridotta man mano che cresce il numero di archi di cui è composta la rete.

### 3.4.2 Calcolo di indicatori di disagio

Alla chiusura di un arco l'aumento dei tempi di percorrenza può essere molto diverso se si considerano gli incrementi nei tempi di percorso tra relazioni OD prese singolarmente. Possono esserci relazioni che sono caratterizzate da un tempo di percorrenza nell'ipotesi di scenario iniziale (scenario "zero") molto inferiore rispetto a quello che si trovano ad dover affrontare negli scenari a rete interrotta (scenario in transitorio e scenario a regime), mentre altre relazioni OD contraddistinte da tempi di percorrenza praticamente inalterati. A parità di aumento medio con l'indicatore di disagio si intende mettere in luce questo fenomeno e quantificarlo.

Il criterio per il calcolo è, anche in questo caso, basato sul confronto con lo scenario “zero”: per ogni relazione OD si effettua il calcolo del tempo di percorrenza dei percorsi che collegano l’origine con la destinazione nella situazione iniziale e si confronta con quello degli scenari a rete interrotta sottraendo il tempo a rete intatta da quello a rete privata dell’arco i-esimo per il quale si sta valutando la vulnerabilità. Un’altra ipotesi fondamentale per il calcolo di questo indicatore sta nel fatto che gli aumenti di costo per l’utenza provocati dalle variazioni delle condizioni della viabilità dovute all’interruzione di un arco crescono più che linearmente rispetto all’aumento di tempo causato. Tale ipotesi deriva da considerazioni quali il fatto che un incremento eccessivo del tempo di viaggio può portare in alcuni casi alla rinuncia al viaggio nonché nel caso di trasporto di merci deteriorabili alla perdita del bene, a cui deve essere associato il massimo disagio. Assunta tale ipotesi, si associa ad ogni valore di ritardo nella percorrenza dei percorsi tra le varie relazioni OD interrotto un peso ricavato dall’andamento della curva esponenziale, creando range di ritardo discretizzati. Questi valori di disagio assegnati a ogni relazione OD vengono successivamente sommati tra loro in modo da ottenere un indicatore che mantenga un valore globale, cioè si riferisca alla vulnerabilità sistemica dell’intera rete.

### **3.4.3 La procedura ciclica**

Il calcolo degli indicatori, presentati nei paragrafi precedenti, può essere applicato ad una rete attraverso la procedura ciclica che è stata implementata. Operativamente, il ciclo sottrae alla rete l’arco per il quale si intende calcolare la vulnerabilità sistemica e, una volta concluse le procedure per il calcolo degli indicatori, memorizza il dato relativo all’arco analizzato in una tabella. Alla fine di ogni ciclo si scrive una riga nella tabella relativa all’arco di volta in volta considerato.

## **3.5 Ottimizzazione del metodo**

Attraverso un’analisi empirica dei risultati della procedura di ricerca della vulnerabilità sistemica, si è ricercato un criterio che consenta di ottimizzare la metodologia di calcolo riducendo i tempi. In particolare si è pensato di individuare una regola per poter escludere a



priori dal calcolo di vulnerabilità sistemica gli archi per i quali la vulnerabilità emersa è risultata così bassa, tanto da poter ritenere l'arco ininfluenza in termini sistemici.

Quindi si è pensato di svolgere un'analisi statistica sugli archi che presentino vulnerabilità contenuta, al fine di individuare eventuali caratteristiche che li accomunino.

In particolare, si è posta l'attenzione sulle caratteristiche fisiche e funzionali degli archi e il flusso transitante sull'arco a rete intatta derivante dall'assegnazione nello scenario "zero".

Questo deriva dalla considerazione che il flusso iniziale passante per l'arco di cui si vuole valutare la vulnerabilità è la somma di tutti i flussi di percorso delle relazione OD che, successivamente all'interruzione, devono essere ridistribuiti; la situazione si immagina che sarà tanto più gravosa quanto più consistenti saranno questi flussi.

## **4 Applicazione alla rete nazionale italiana**

Il lavoro di tesi è finalizzato all'analisi del livello di vulnerabilità sistemica della rete stradale nazionale italiana e si inserisce all'interno di una attività di ricerca svolta dal Laboratorio di Mobilità e Trasporti del Dipartimento INDACO del Politecnico di Milano per conto del Dipartimento della Protezione Civile Nazionale. Pertanto, una volta perfezionato il concetto di vulnerabilità sistemica e implementata una metodologia per il calcolo della stessa, si è scelto di testare la suddetta metodologia su una rete test costituita dalla rete viaria nazionale principale. La finalità ultima è quella di catalogare gli archi della rete analizzata in base alla loro vulnerabilità sistemica. In questo modo si riesce a definire quali siano gli archi più vulnerabili e i punti maggiormente critici per poter quindi fornire al Dipartimento di Protezione Civile uno strumento valido che permetta una migliore pianificazione degli interventi in caso di emergenza e, più in generale, di quelli manutentivi. Infatti, conoscendo il livello di vulnerabilità sistemica associato a ciascun arco sarà possibile pianificare in modo intelligente la manutenzione della rete e stanziare le corrette risorse destinate alla manutenzione della rete stradale dando la priorità a quegli archi che risultano essere maggiormente vulnerabili. Infatti, il malfunzionamento di tali archi provocherà danni a livello sistemico ingenti.

Poiché gli input fondamentali del modello proposto sono il grafo della rete e la matrice OD è stato necessario preventivamente identificare e sviluppare tali elementi. Pertanto nel seguente capitolo, si analizzano le procedure necessarie all'identificazione del grafo e della matrice OD e successivamente si analizzano i risultati ottenuti sulla rete italiana.

### **4.1 La costruzione del grafo**

Fase fondamentale del lavoro di tesi è stata la costruzione del grafo della rete nazionale italiana.

Poiché l'analisi è stata effettuata su una scala spaziale di livello nazionale si è deciso di considerare solo le categorie stradali di maggiore importanza, eliminando dall'analisi tutte le strade secondarie, poco adatte per assorbire i flussi di traffico di lunga percorrenza.

La costruzione del grafo della rete nazionale principale italiana è stata eseguita a partire dal database cartografico MultiNet di Tele Atlas di proprietà del Dipartimento della Protezione Civile. Tale archivio racchiude tutte le strade Italiane raggruppate gerarchicamente in differenti categorie secondo un indice FRC (Functional Road Class), così come segue:

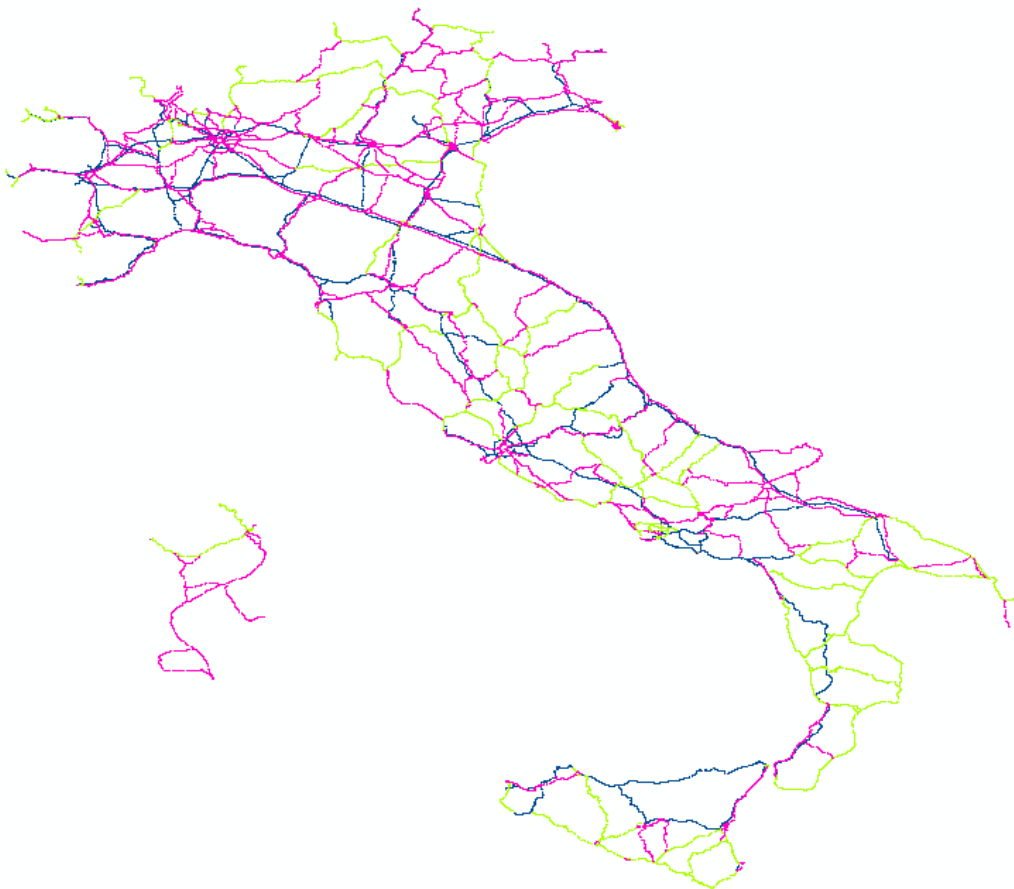
- 0: Autostrade e altre Strade Maggiori;
- 1: Strade Maggiori meno importanti delle Autostrade;
- 2: Altre Strade Maggiori;
- 3: Strade Secondarie;
- 4: Strade Locali di collegamento;
- 5: Strade Locali di maggior importanza;
- 6: Strade Locali;
- 7: Strade Locali di minor importanza;
- 8: Altre Strade.

Poiché la rete che si vuole considerare coincide con la rete nazionale autostradale e con le strade principali, si è deciso di prendere in considerazione unicamente le strade appartenenti alla categoria FRC 0 e FRC 1 integrando la rete con strade di categoria FRC 2 laddove alcune intersezioni richiedessero l'aggiunta di tale categoria per garantire la possibilità di seguire determinati percorsi ed eseguire specifiche manovre.

Dovendo produrre un database della sola rete autostradale, e quindi utilizzare solamente la rete principale, e non l'intero grafo contenente anche le strade locali, la rete MultiNet di partenza è risultata essere molto frammentata, essendo costituita da un elevato numero di archi di piccole dimensioni. Infatti gli archi sono divisi in corrispondenza di intersezioni che, eliminando alcune categorie di strade minori, non sono più presenti o di intersezioni a livelli differenti. Inoltre il database di partenza divide gli archi anche in corrispondenza di variazioni di alcuni attributi che, per i fini per i quali si è svolto il lavoro di tesi, non sono rilevanti. È stato necessario quindi trovare uno strumento che permettesse di aggregare gli archi e di ridurre quindi la frammentazione della rete.



**Figura 6 Frammentazione iniziale della rete globale**



**Figura 7 Italia: FRC 0, FRC 1 e FRC 2**

È stato pertanto implementato un codice che permettesse di semplificare la rete stradale molto complessa derivante dai dati MultiNet in modo tale da aggregare gli archi e mantenere le interruzioni della rete in corrispondenza delle sole intersezioni sullo stesso livello altimetrico, unicamente dove ci fosse realmente la possibilità di effettuare una o più manovre. Inoltre tramite la procedura implementata è stato anche possibile semplificare il database associato alla rete e mantenere esclusivamente gli attributi effettivamente rilevanti per i fini prefissati. Il programma sviluppato infatti permette l'eliminazione di alcuni attributi e la determinazione dei rimanenti per i macro archi risultanti tramite specifiche funzioni di aggregazione.

Per affrontare i molteplici scopi che ci si è proposti, è risultato necessario utilizzare differenti software GIS Open Source, ognuno dei quali in grado di svolgere una determinata funzione. Su un sistema operativo Ubuntu 8.04 si è utilizzato Grass per l'interfaccia grafica del comando e la creazione delle polilinee, PostgreSQL con l'estensione spaziale PostGIS per la gestione degli attributi e le funzioni di raggruppamento e Python come linguaggio di programmazione per sviluppare lo script.

La procedura di semplificazione che permette di ottenere una rete finale con le caratteristiche sopra indicate è composta dalle seguenti fasi:

1. importazione dello shape file in formato PostGIS;
2. estrusione in 3D della rete tenendo conto del livello di intersezione del nodo iniziale e del nodo finale;
3. inversione degli archi a senso unico con digitalizzazione inversa al senso di marcia;
4. individuazione del macro-arco con topologia 3D;
5. semplificazione geometrica degli archi in base agli attributi di interesse e raggruppamento dei rimanenti attributi;
6. esportazione in formato shape file.

La seconda fase della procedura è necessaria in quanto, all'interno del database cartografico MultiNet, gli archi risultano interrotti nella loro intersezione planimetrica anche se fisicamente non è possibile nessun scambio di flusso tra le due strade. La procedura sviluppata inserisce il livello di intersezione del nodo iniziale e finale di ogni arco, riportando questo attributo come altitudine dell'arco. Questo espediente permette di evitare l'intersezione di strade su livelli differenti, proprietà utile nella successiva fase di semplificazione topologica 3D.

Nel MultiNet esiste un attributo associato a ciascun arco che indica se esso è a senso unico o a doppio senso di marcia. Nel caso di arco a senso unico viene indicato se il verso di percorrenza è concorde o discorde al verso di digitalizzazione, attraverso i valori FT (verso di percorrenza da From a To, concorde al senso di digitalizzazione) o TF (verso di percorrenza da To a From, inverso al senso di digitalizzazione). Per avere la correttezza del verso di costruzione degli archi aggregati a partire da archi con differenti versi di digitalizzazione si è ritenuto necessario invertire gli archi a senso unico aventi digitalizzazione inversa al senso di marcia. Tale operazione è necessaria per definire in modo univoco il verso di percorrenza di ciascun arco.

A questo punto è possibile identificare i macro archi. Con tale definizione si intende un arco che ha inizio da una intersezione fisica allo stesso livello, quindi una intersezione reale che permette uno scambio di flusso, e termina in un'altra intersezione reale. Il processo di identificazione dei macro archi prevede inizialmente l'aggiunta di un attributo a tutti gli archi elementari che permetta di definire il macro arco di appartenenza finale e successivamente l'aggregazione vera e proprio degli archi elementari. Nella fase di aggregazione si uniscono gli archi elementari sulla base della geometria reale e si determinano i valori degli attributi che si ritengono interessanti sulla base di funzioni di aggregazione. In particolare per il caso studiato si è deciso di mantenere gli attributi seguenti:

- ID ovvero codice univoco di identificazione dell'arco secondo MultiNet valutato come il minore fra gli ID relativi agli archi elementari appartenenti al macro arco finale;
- METERS ovvero la lunghezza totale del macro arco identificata come la somma dell'attributo METERS degli archi elementari;
- ONEWAY identificato come il minimo fra i ONEWAY per gli archi elementari. Tale attributo identifica il verso di percorrenza di ciascun arco;
- KPH definita come la media dell'attributo KPH dei singoli archi. KPH è il valore della velocità di percorrenza di ciascun arco in condizioni di libero deflusso;
- MINUTES definita come la somma dell'attributo MINUTES dei singoli archi che rappresenta il tempo di percorrenza in minuti di ciascun arco in condizioni di libero deflusso;
- N\_CARR identificato dal valore minore di N\_CARR della rete non semplificata e rappresentante il numero di carreggiate dell'arco in questione;

- N\_CORSIE identificato dal valore minore di N\_CORSIE della rete non semplificata e rappresentante il numero di corsie dell'arco in questione;
- CAPACITA' identificato dal valore minore di CAPACITA' della rete non semplificata e rappresentante la capacità dell'arco in questione.

Importante è sottolineare il fatto che gli ultimi tre attributi identificati non sono presenti nell'archivio cartografico MultiNet, ma sono stati aggiunti alla rete rielaborando i dati disponibili presso il Dipartimento di Mobilità e Trasporto INDACO grazie ad altri lavori di ricerca e di tesi. Si precisa che il valore della capacità di ciascun arco è stato definito in funzione del numero di carreggiate e di corsie di ciascuna strada e del tipo di sezione longitudinale e di raccordo seguendo una procedura già implementata e sviluppata nell'ambito del progetto Euro-regionale Serti MIP denominata: "Italy-Switzerland transport plan model handling intermodality and liaison with the CORVETTE area". Tale procedura richiede anche la definizione delle curve di deflusso specifiche per ogni strada considerata. Esistono differenti tipologie di curve di deflusso, ma per tale lavoro si è scelto di utilizzare le curve BPR che tra l'altro sono anche quelle che vengono utilizzate nel modello di assegnazione implementato.

Inoltre è importante anche aggiungere che la rete di partenza, essendo piuttosto datata, non comprendeva alcuni tratti stradali di nuova costruzione come il Passante di Mestre e un raccordo autostradale fra L'Aquila e l'Adriatico. Pertanto si è proceduto all'inserimento di tali parti mancanti nella rete non semplificata lavorando anche per questa fase utilizzando un software Gis.

Per poter effettuare le simulazione è necessario zonizzare [47], [48] l'area oggetto di studio al fine di identificare le possibili zone di origine e di destinazione. Data la vastità della rete test utilizzata, si è deciso di utilizzare come zone le Province italiana e, pertanto, è stato necessario inserire all'interno della rete originale non semplificata i nodi centroidi corrispondenti ai capoluoghi di Provincia e i relativi archi connettori, che permettono l'unione dei centroidi di zona con il grafo della rete. La necessità di inserire gli archi connettori alla rete non semplificata deriva dall'esigenza di "spezzare" i macro archi della rete semplificata in corrispondenza del nodo in cui l'arco connettore si lega alla rete e pertanto tale operazione doveva essere effettuata prima dell'avvio della procedura di semplificazione.

Il risultato della semplificazione è una rete costituita da circa 9000 macro archi a fronte dei 54.282 archi di partenza, ai quali è associato un database contenente le informazioni

precedentemente elencate. La diminuzione del numero di archi costituisce un valore notevole della procedura di semplificazione, infatti gli oneri di calcolo successivi risulteranno essere notevolmente semplificati. L'utilizzo dei macroarchi per il calcolo della vulnerabilità sistemica è supportata dal fatto che lungo l'intera lunghezza di esso la vulnerabilità non cambia: infatti, essa è dipendente dai flussi circolanti e, per come sono stati costruiti i macroarchi, il flusso non può essere differente perché all'interno di un macroarco non vi è possibilità di svolta.

Tuttavia un limite della procedura di semplificazione risiede nel fatto che il database cartografico che si ottiene non contiene informazioni riguardanti i nodi iniziali e finali degli archi necessari per la creazione di un grafo in quanto elementi fondamentali e di base per la definizione stessa di grafo. È stato quindi necessario ricavare un metodo che permettesse di associare in modo univoco a ciascun arco il valore del nodo iniziale e finale. Questa operazione è stata eseguita utilizzando il software di simulazione CUBE Voyager, che permette di creare un grafo di una rete a partire da uno shapefile grazie alla funzione "build network from shapefile" una volta specificato il numero di zone considerate e impostati prioritariamente i campi A-node e B-node dello shapefile dove sono contenuti rispettivamente i valori dei nodi iniziali e finali degli archi. Importante è sottolineare il fatto che è necessario indicare se gli archi della rete creata potranno essere percorsi tutti a doppio senso, tutti a senso unico oppure se dovranno assumere il senso indicato in un determinato campo. Il caso analizzato appartiene all'ultima delle categorie descritte e pertanto è stato definito un campo DIREZIONE, aggiunto alla rete semplificata, che può assumere i seguenti valori a seconda del verso di percorrenza:

- 1 = arco a doppio senso;
- -1 = arco a senso unico con direzione inversa a quella di digitalizzazione dell'arco stesso;
- altri valori = arco a senso unico con direzione diretta.

La rete finale risultante è quindi un file di estensione .net, tipico del software CUBE Voyager contenente le seguenti informazioni sottoforma di attributi associati a ciascun arco:

- A, nodo iniziale dell'arco;
- B, nodo finale dell'arco;



- METERS, lunghezza totale dell'arco;
- LUNGH\_TOT, lunghezza totale dell'arco;
- ONEWAY, attributo che identifica il verso di percorrenza di ciascun arco;
- KPH, velocità di percorrenza di ciascun arco in condizioni di libero deflusso;
- MINUTES, tempo di percorrenza in minuti di ciascun arco in condizioni di libero deflusso;
- CAPACITA' identificato dal valore minore di CAPACITA' della rete non semplificata e rappresentante la capacità dell'arco in questione;
- CONNETTORI, attributo che permette di distinguere gli archi connettori (CONNETTORI=1) dagli altri archi (CONNETTORI=0);
- DIREZIONE, attributo che definisce il senso di percorrenza di ciascun arco assumendo valori variabili e definiti poco sopra.

Nella figura seguente (Figura 8) si riporta la rete italiana creata e utilizzata successivamente per l'applicazione delle procedure di calcolo implementate.



**Figura 8 Rete italiana nel formato CUBE**

## 4.2 La matrice OD

La definizione della domanda di trasporto è di fondamentale importanza al fine di valutare i flussi circolanti sulla rete.

Essendo la rete test scelta rappresentata dalla rete nazionale italiana, si è deciso di considerare come zone le Province italiane. La fase di zonizzazione si è quindi risolta considerando come confini di zona i confini amministrativi di ciascuna Provincia e come centroidi di zona i capoluoghi di Provincia stessi escludendo nell'analisi le Province delle isole. Infatti tali aree risultano essere isolate da un punto di vista stradale rispetto alla restante rete nazionale e sarebbe quindi necessario ricavare i grafi relativi alle due principali isole italiane e la domanda di trasporto delle stesse per poter applicare in modo indipendente la procedura di calcolo della vulnerabilità.

Per quanto riguarda la parte peninsulare italiana, una matrice OD riferita ai centroidi così individuati non è facilmente reperibile o determinabile. È stato quindi necessario stimare la domanda di trasporto sfruttando alcuni dati disponibili e i modelli di calcolo noti. Poiché si hanno a disposizione dati relativi alla popolazione residente e agli addetti e impiegati in ciascuna Provincia ricavabili dal sito internet dell'ISTAT, Istituto Nazionale di Statistica [43], e poiché sono note in alcune sezioni specifiche della rete informazioni relative ai valori effettivi rilevati dall'AISCAT (Associazione Italiana Società Concessionarie Autostrade e Trafori) di flusso, quali il numero giornaliero di veicoli in transito([44]), i valori teorici medi giornalieri e i veicoli-km, si è deciso di procedere alla definizione di una matrice OD preliminare mediante l'uso del noto modello gravitazionale e successivamente si è calibrata e aggiornata la matrice attraverso l'assegnazione della stessa alla rete e il confronto dei flussi risultanti ottenuti e di quelli disponibili dal sito [www.aiscat.it](http://www.aiscat.it) [44].

Il modello gravitazionale si ispira alla legge gravitazionale di Newton: per analogia il numero dei viaggi che si realizzano tra le diverse zone è direttamente proporzionale al loro potere di generazione e attrazione, espresso con gli attributi di attrattività  $A_o$  e  $B_d$ , e inversamente proporzionale a una funzione espressa con gli attributi di costo  $C_{od}$ :

$$t_{od} = k \cdot A_o \cdot B_d \cdot C_{od} \quad (4.1)$$

Nel caso in esame il potere di generazione e attrazione di una zona ( $A_o$  e  $B_d$ ) è identificato nella popolazione residente e nel numero di addetti nella provincia di origine  $i$  e di destinazione  $j$  dello spostamento, per il quale si sta calcolando il flusso. Per quanto riguarda invece la funzione di impedenza si considera un fattore pari all'inverso della distanza che separa l'origine e la destinazione. Il calcolo delle distanze è stato eseguito mediante l'uso del software CUBE, infatti uno dei prodotti dell'assegnazione che il programma restituisce è una matrice contenente le distanze fra i centroidi. Si è assegnata quindi una matrice unitaria alla rete test ricavata come specificato nel paragrafo 4.1 e si sono calcolate così le distanze fra i diversi centroidi.

Nell'espressione del modello gravitazionale compare anche un parametro  $k$  che deve essere opportunamente calibrato e stimato per iterazioni successive: si assegna alla rete una matrice calcolata con un valore del parametro arbitrario, si confrontano i flussi di arco ottenuti con il valore dei flussi di arco disponibili su alcune sezioni (si veda [44]) e si modifica  $k$  in modo

tale da ottenere la convergenza dei risultati e ridurre l'errore. I dati AISCAT di cui si è in possesso sono valori di flusso, misurati in sezioni definite, espressi in veicoli teorici medi giornalieri. Al fine di creare una matrice OD oraria è stato necessario effettuare una serie di considerazioni. Infatti, l'ipotesi di dividere il flusso medio giornaliero per 24 sarebbe stata troppo approssimativa in quanto nelle ore notturne il flusso è di gran lunga inferiore a quello che si verifica durante la giornata; la matrice OD risultante da tale calcolo avrebbe presentato valori di flusso molto più ridotti che quelli riscontrati nella realtà. Ci si è pertanto riferiti ai dati ISFORT (Istituto Superiore di Formazione e Ricerca per i Trasporti) [49] relativi alla distribuzione statistica dei flussi su strade extraurbane nelle varie ore del giorno. Si è deciso di non individuare una particolare ora di punta poiché gli spostamenti considerati hanno una durata spesso molto lunga e i veicoli occupano gli archi della rete anche per molte ore dopo il loro accesso nella rete; si è invece preferito utilizzare un valore medio della percentuale degli spostamenti totali che avviene nelle ore diurne. In base ai dati ISFORT, nelle 14 ore che vanno dalle 8:00 alle 22:00 avvengono il 92% degli spostamenti. Poiché dalla calibrazione del modello gravitazionale tramite sezioni di misura AISCAT si è già in possesso di dati riferiti alla sola modalità di trasporto desiderata, si è in grado di ottenere una matrice oraria rappresentativa della situazione sulla rete principale italiana nelle ore diurne per le quali si verificano le condizioni più sfavorevoli dal punto di vista della circolazione rispetto alle restanti ore del dì.

## 4.3 Implementazione dei modelli di calcolo

Per implementare il modello ci si è serviti del software Cube voyager di Citilabs. Questo programma permette di simulare il comportamento degli utenti delle reti di trasporto. Il programma si basa su varie metodologie tra le quali si è scelto di seguire quella standard del modello a quattro stadi. Il modello richiede in ingresso, per quanto riguarda i flussi di domanda la matrice OD creata come descritto nel paragrafo precedente, mentre per quanto riguarda la schematizzazione dell'offerta il grafo della rete realizzato come spiegato nel paragrafo 0.

Per lo sviluppo del programma ci si è serviti delle applicazioni che il software dispone per ogni fase del modello a quattro stadi e si sono implementate le funzioni desiderate in modo personalizzato e specifico per il problema incontrato di volta in volta; si è quindi giunti all'assegnazione dei flussi alla rete e alla creazione di files rappresentanti le reti cariche nei ai tre scenari previsti. Giunti a tali risultati è stato poi possibile implementare dei programmi che permettano di ricavare i valori degli indicatori e associarli anche graficamente ad ogni arco. Si sono sviluppati inoltre programmi per la visualizzazione dei percorsi e per il confronto grafico delle scelte di percorso nello scenario iniziale, in transitorio e a regime evidenziando gli effetti delle interruzioni di archi particolarmente critici.

Di seguito vengono presentati i programmi realizzati.

### 4.3.1 Scenario zero

In questa fase si è utilizzato il software CUBE Voyager per simulare il traffico esistente sulla rete utilizzando, come già anticipato, un modello di assegnazione all'equilibrio.

Il software utilizzato si compone di differenti modelli di calcolo già implementati che possono, tuttavia, essere modificati attraverso l'utilizzo di un linguaggio di programmazione proprio del software.

Il software CUBE consente di effettuare l'assegnazione all'equilibrio mediante il sottomodello HIGHWAY avendo l'accortezza di scegliere la tipologia di assegnazione desiderata. Il sottomodello HIGHWAY richiede in ingresso il grafo della rete e la matrice OD. Entrambi gli input devono essere forniti nel formato supportato dal CUBE che è .net per la rete e .mat per la matrice. CUBE fornisce dei sottomodelli che permettono di ottenere i file nei corretti formati. Pertanto nell'applicazione relativa allo scenario "zero" è stato inserito un

sottomodello MATRIX con script standard per la trasformazione di un file .csv nel corretto file .mat per la matrice. In questo modo, è possibile ottenere la matrice OD per la rete considerata in un formato .csv facilmente ricavabile mediante software di uso comune e trasformarla nel corretto file supportato da CUBE.

Per quanto riguarda la rete, bisogna precisare che il software permette la realizzazione di una rete nel formato corretto a partire da uno shapefile, tipico formato per le reti.

Il programma implementato si compone dei sottomodelli riportati in Figura 9. Per quanto riguarda la spiegazione dettagliata degli algoritmi implementati si veda il capitolo 7 degli allegati.

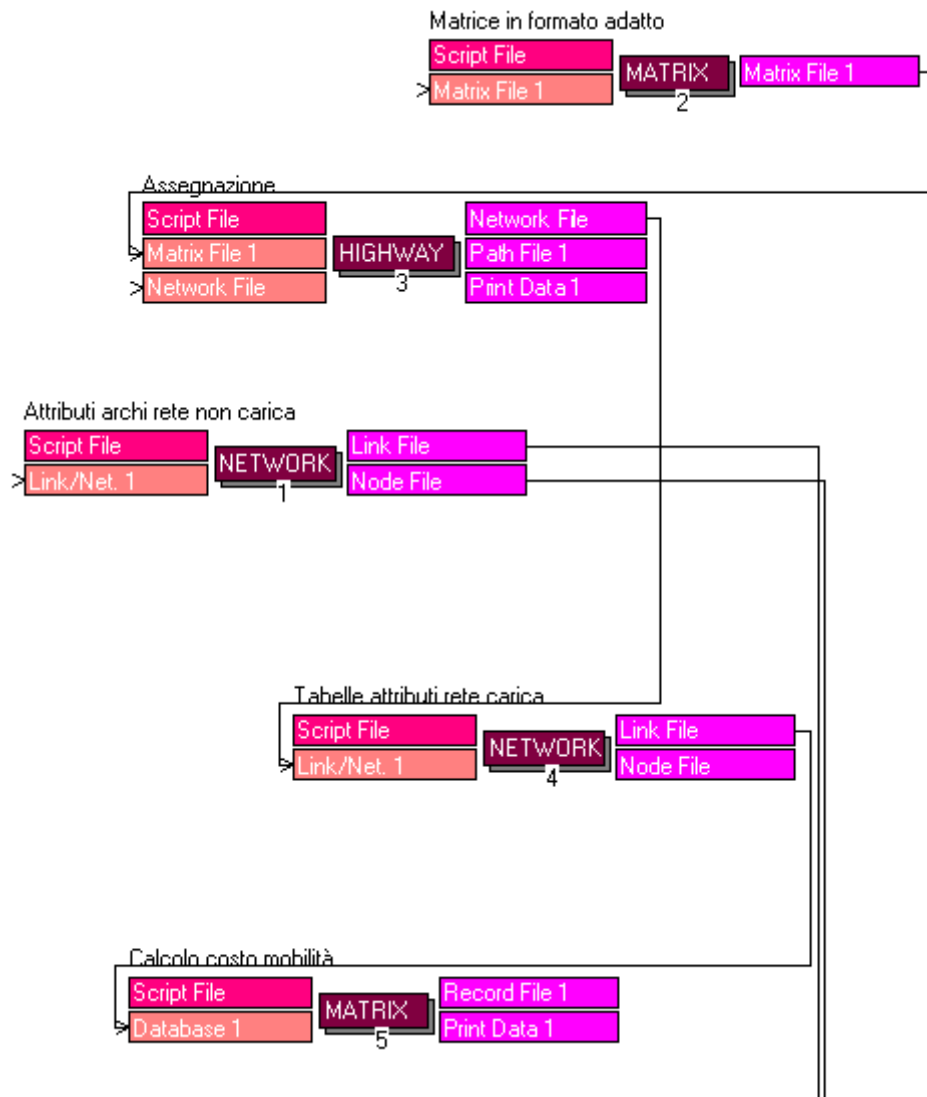


Figura 9 Scenario "zero"

### **4.3.2 Scenario in transitorio**

Si ricorda che lo scenario in transitorio si prefigge di simulare il comportamento degli utenti che si trovano per la prima volta di fronte alla variazione di configurazione della rete. In tale ipotesi si è supposto che gli utenti che non transitavano per l'arco che è stato interrotto mantengano le scelte di percorso abitualmente effettuate mentre gli utenti che sono stati costretti a cambiare percorso effettuino la scelta sulla base dei tempi di percorrenza degli archi a libero deflusso senza valutare gli effetti del grado di congestione.

Anche in questo caso è stato necessario implementare un algoritmo di calcolo basato sia su modelli preimpostati di CUBE che su modelli scritti ad hoc. In particolare le applicazioni implementate si compongono di un ciclo che di volta in volta simula la chiusura di un arco, la creazione della matrice delle OD che effettuavano percorsi contenenti l'arco selezionato e la matrice delle OD che invece non avevano scelto percorsi passanti per l'arco. Si effettuano le assegnazioni delle due matrici con criteri differenti. Si calcola il tempo di percorrenza degli archi alla luce del flusso che li percorre e si calcola infine il valore di costo della mobilità dato dalla sommatoria arco per arco del tempo di percorrenza per il flusso che lo attraversa.



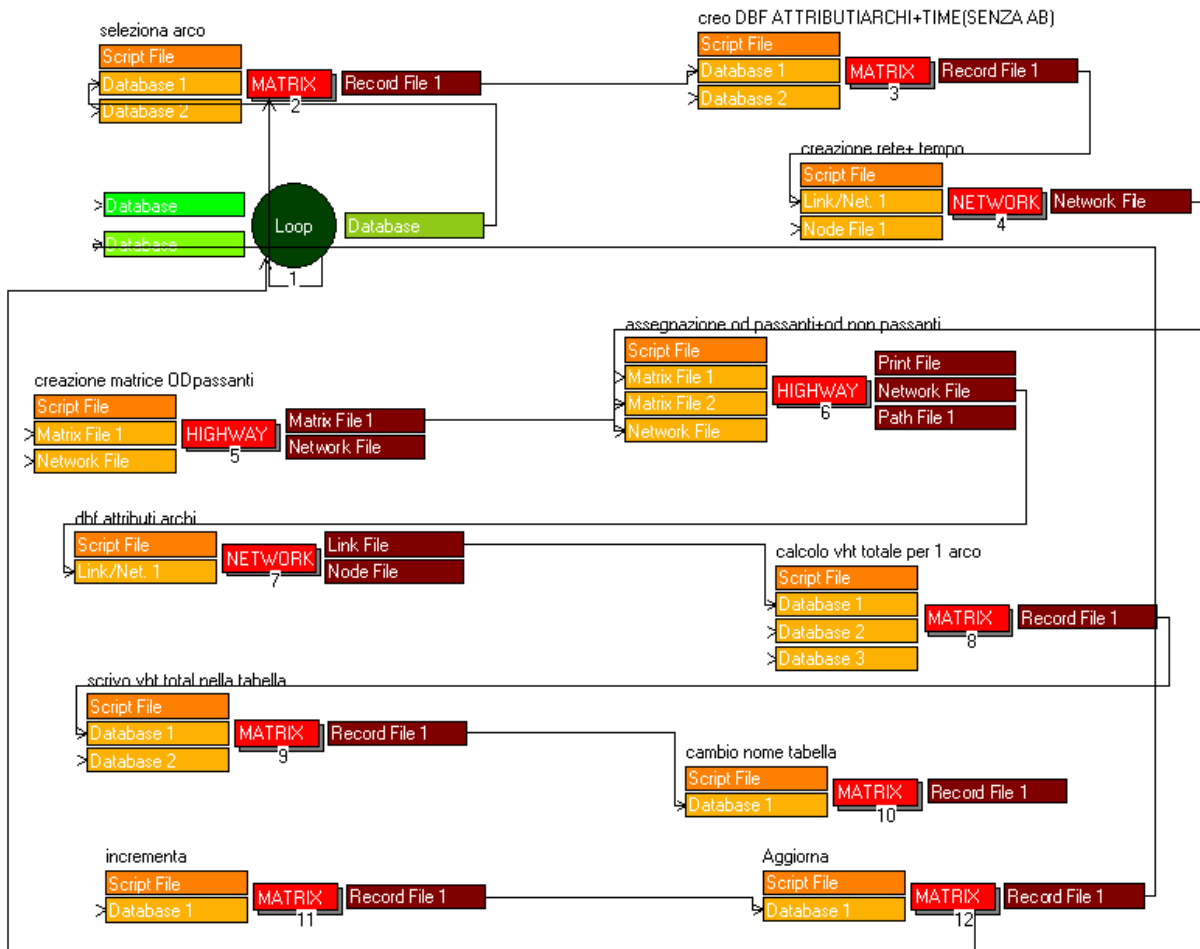


Figura 10 Scenario in transitorio

### 4.3.3 Scenario a regime

La realizzazione di questo scenario permette la simulazione della situazione in cui gli utenti o hanno già avuto esperienza della nuova configurazione della rete ovvero sono stati informati in anticipo sia dell'interruzione sia delle condizioni di traffico degli archi alternativi. L'utente razionale che ha come obiettivo di minimizzare la propria disutilità allo spostamento sceglierà il percorso a minor tempo. L'assegnazione è all'equilibrio, della matrice di tutte le OD che si presume seguano la stessa funzione di costo legata ai tempi di percorrenza congestionati. Il processo per il raggiungimento dell'equilibrio è iterativo.

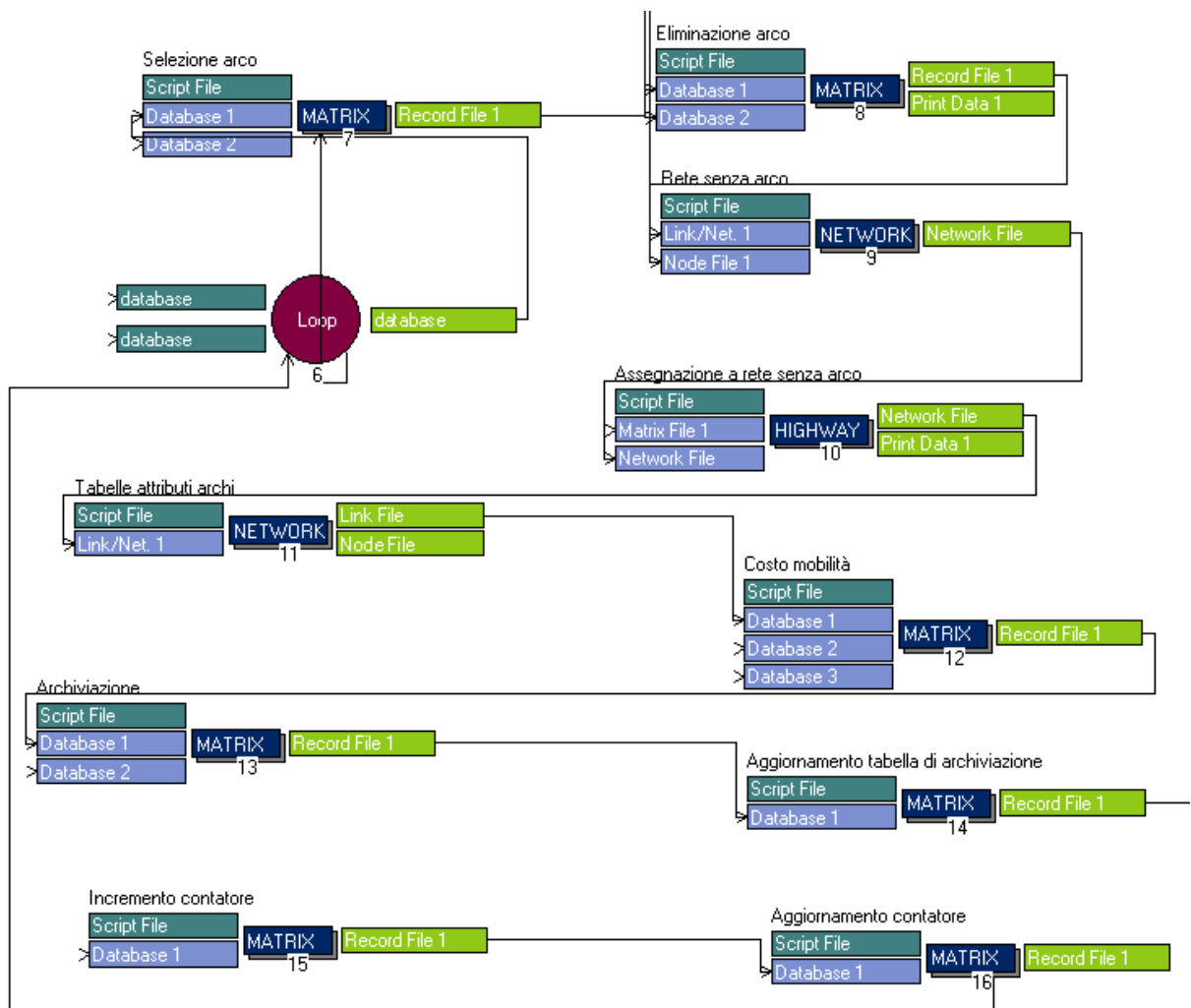


Figura 11 Scenario a Regime

#### 4.3.4 Calcolo indicatori aumento di costo e aumento percentuale.

Per il calcolo degli indicatori quali l'aumento di costo della mobilità in termini assoluti e percentuali si è sviluppato il programma di cui segue la rappresentazione nell'interfaccia del software.

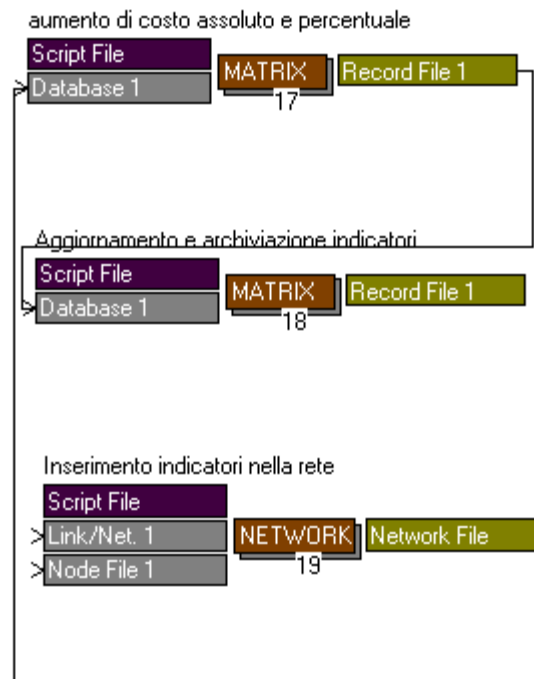


Figura 12 Calcolo Indicatori

### **4.3.5 Calcolo indicatore di ritardo**

Per valutare il ritardo subito dagli utenti è necessario analizzare l'incremento di costo dei percorsi presi singolarmente. Dando pesi diversi ai valori di ritardo ottenuti, l'indicatore che si trova permette di mettere in risalto la disomogeneità della penalizzazione di alcune OD. Si è calcolato per ogni coppia OD il ritardo generato dall'interruzione di un determinato arco sia a regime che in transitorio. Il programma sviluppato per il calcolo di questo indicatore è espresso in alcuni blocchi da inserire all'interno del programma già realizzato per gli scenari in transitorio e a regime.

È stato quindi necessario ricavare i tempi di percorrenza totali dei percorsi fra le varie coppie OD sia nel caso di rete intatta che nel caso di rete privata di un arco oltre che i dati relativi ai singoli archi. Il software CUBE permette di ricavare tali informazioni grazie al modulo HIGHWAY specifico per le fasi di assegnazione e in particolare grazie alla definizione di una "matrice di skim". Una volta stabiliti i valori dei tempi di percorrenza totali ovvero dei costi dei vari percorsi è stato possibile valutare le differenze o i rapporti percentuali.

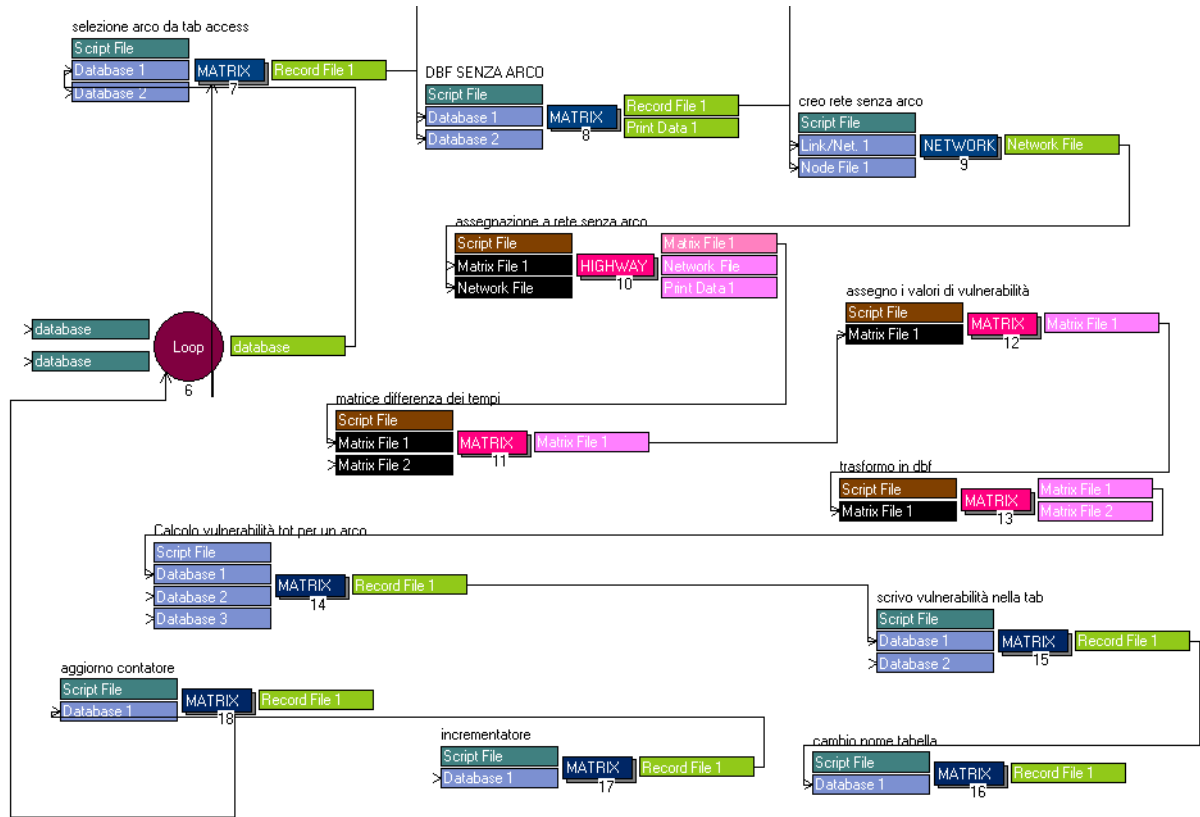


Figura 13 Indicatore di Ritardo a regime.

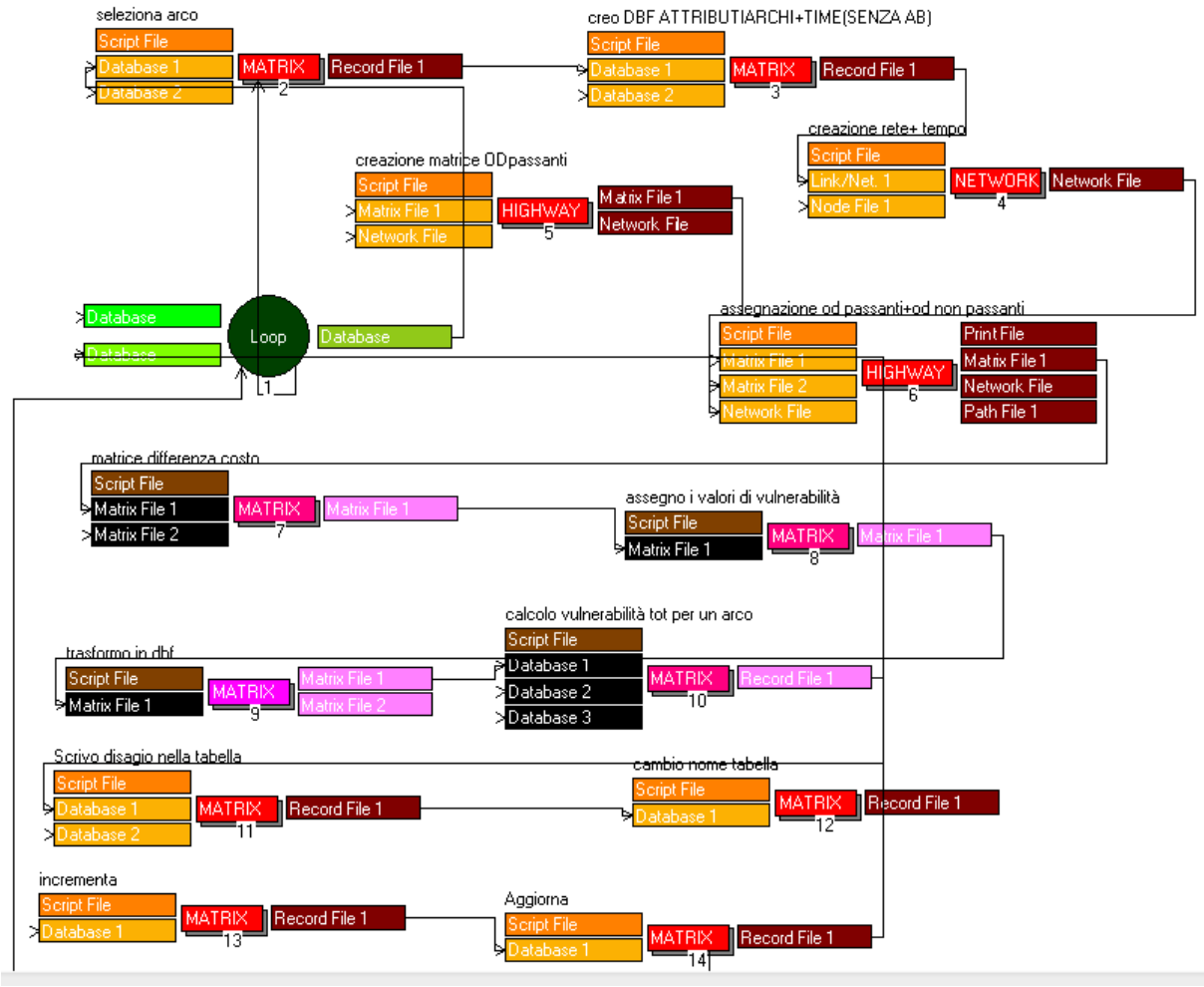


Figura 14 Indicatore di Ritardo in trasitorio

### 4.3.6 Analisi risultati

L'analisi dei risultati viene svolta con vari metodi a seconda dell'aspetto che si intende evidenziare. Ci si appoggia a diversi tipi di software tra cui anche il Cube. In particolare si sviluppano due programmi destinati agli archi che sono risultati più vulnerabili dalle risultanze delle analisi effettuate, gli archi per i quali si associa un incremento di costo dovuto alla chiusura molto diverso tra lo scenario in transitorio e a regime e le risultanze inaspettate. Tali codici permettono di visualizzare la redistribuzione dei flussi delle OD che transitavano per l'arco considerato prima della chiusura. Il risultato è una rete carica dei soli flussi di tali OD sulla quale è possibile effettuare dei confronti numerici e grafici. L'interfaccia grafica, consente una comprensione immediata del fenomeno in esame.

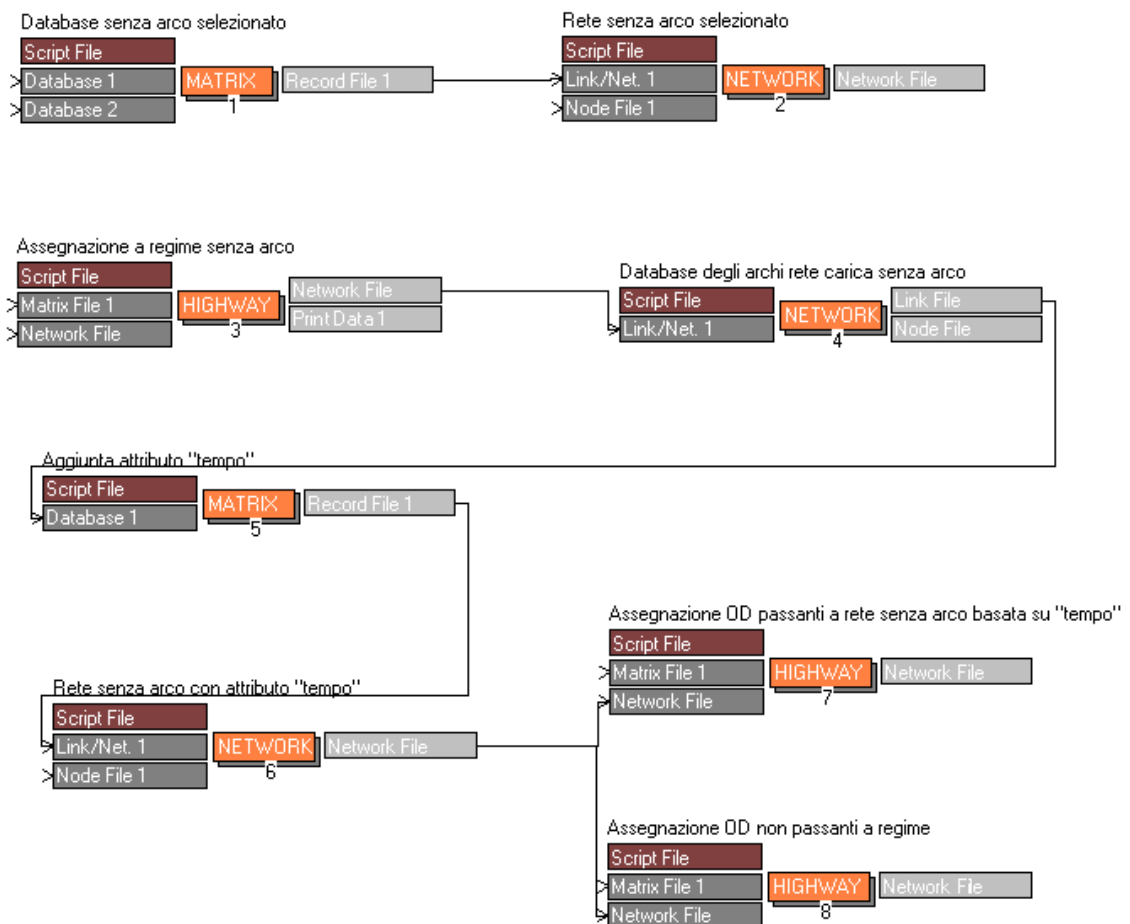


Figura 15 Analisi Risultati a regime

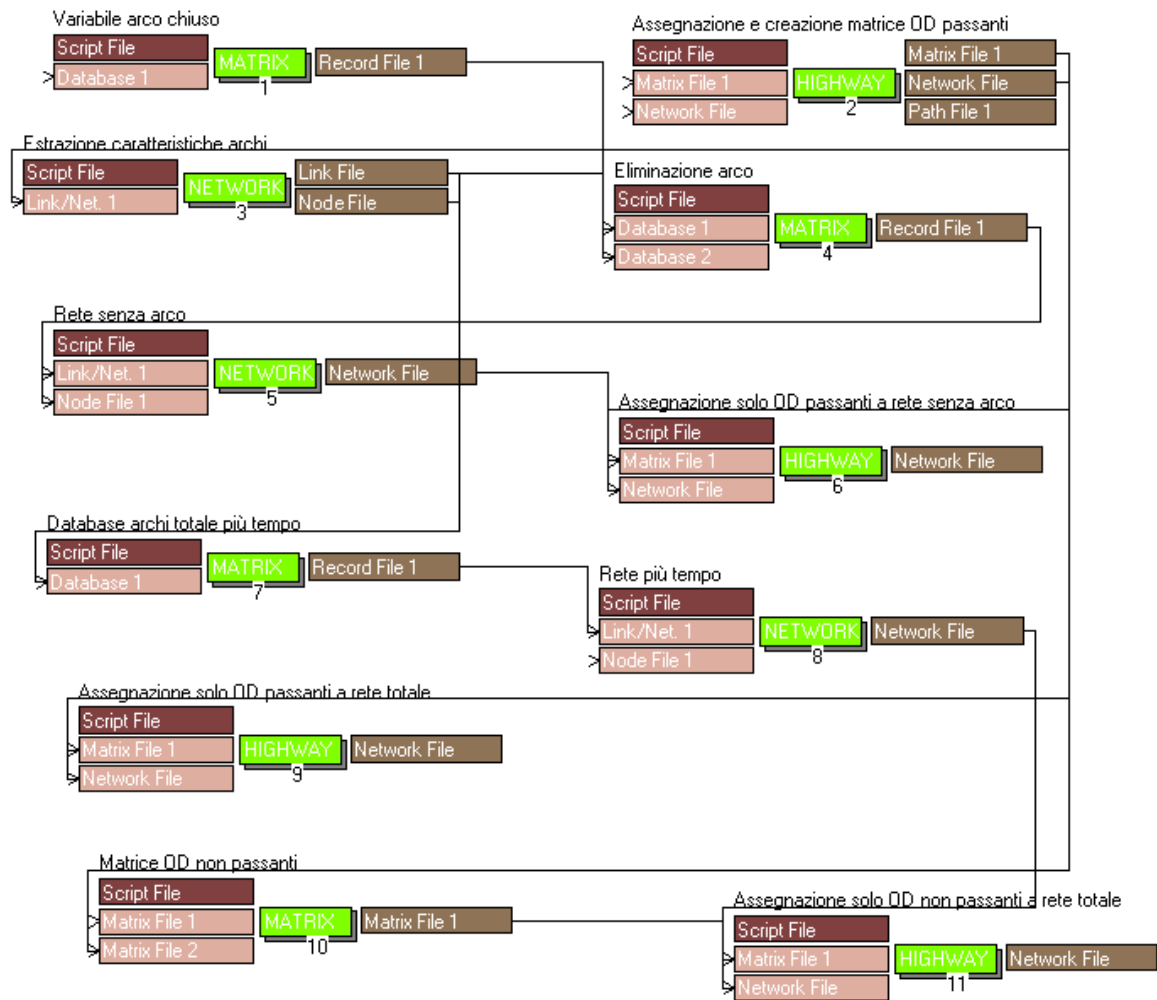


Figura 16 Analisi Risultati in transitorio



## **5 Analisi dei risultati**

In questo capitolo, si analizzano i risultati ottenuti sulla rete test alla quale è stata applicata la metodologia per il calcolo della vulnerabilità sistemica. In particolare, si descrivono i risultati ottenuti nel transitorio e a regime e si analizzano criticamente gli stessi in relazione alle caratteristiche della rete alla quale fanno riferimento.

Inoltre, si riportano anche considerazioni sul legame fra i risultati ottenuti e alcuni parametri che permettono di descrivere da un punto di vista trasportistico la rete a fine di ottenere un metodo efficace per l'ottimizzazione della procedura di calcolo.

Nei paragrafi dal 5.1 al 5.5, si presentano i risultati relativi al calcolo dell'indicatore di vulnerabilità valutato come aumento percentuale dei costi della mobilità negli scenari in transitorio e a regime rispetto al costo associato allo scenario "zero".

### **5.1 Assegnazione dei flussi di domanda alla rete intatta (scenario "zero")**

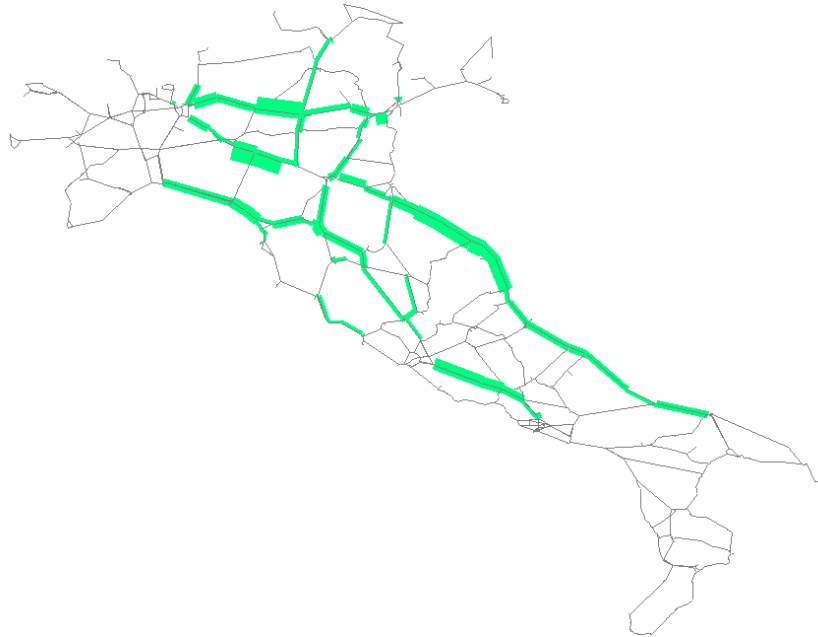
Il risultato della fase di assegnazione della matrice OD alla rete è il grafo carico. Nell'immagine vengono evidenziati con spessore crescente i flussi di traffico più elevati. Nello specifico si può notare che le tratte autostradali Milano – Venezia (A4), Milano – Bologna (A1), Bologna - Ancona (A14) e Milano - Napoli (A1) risultano essere quelle caratterizzate da maggior traffico in base ai risultati dell'assegnazione.



**Figura 17** Flussi di traffico sulla rete completamente funzionante (scenario “zero”)

## **5.2 Distribuzione dell'indicatore di vulnerabilità sistemica: scenario a regime.**

Lo scenario a regime rappresenta la situazione di equilibrio che si viene a creare quando, dopo l'interruzione della rete, intercorre un lasso di tempo tale per cui gli utenti riescono a ridistribuirsi e riorganizzare i loro spostamenti, in seguito a viaggi successivi, in modo da minimizzare la disutilità dei loro spostamenti. Nella Figura 20, vengono messi in evidenza gli archi che presentano aumenti di costo percentuale più elevati e quindi una vulnerabilità sistemica a regime elevata.



**Figura 18 Distribuzione sulla rete dell'indicatore di vulnerabilità sistemica nello scenario a regime**

Notiamo, già da una prima analisi grafica, che gli assi per i quali a rete intatta transitano i flussi più consistenti sono anche quelli che risultano più vulnerabili in termini sistemici. L'asse Milano - Venezia, Milano – Ancona e in generale tutto l'asse adriatico fino a Bari risultano molto vulnerabili; sul lato tirrenico invece spiccano le tratte Genova - La Spezia, le tratte stradali immediatamente adiacenti a Firenze, la Firenze - Roma, e il collegamento tra Napoli e la Capitale. In generale la media dei valori assunti dall'indicatore nello scenario a regime è 0,19%. Per molti archi la vulnerabilità sistemica, calcolata tramite questo indicatore, nello scenario a regime è molto bassa: la moda degli aumenti di costo è infatti pari a 0,12%. In particolare, dove i flussi associati agli archi sono bassi, l'indicatore si mantiene a valori prossimi alla moda; invece da un certo valore di flusso fino a flussi molto alti, come verrà spiegato meglio in seguito, il valore di vulnerabilità sistemica diventa considerevole nonostante, si sta considerando lo scenario a regime dove il sistema sta operando in una nuova condizione di equilibrio e nel quale gli spostamenti si considerano ottimizzati. Il valore massimo dell'indicatore di incremento dei costi viene assunto dall'arco dell'A1 a Sud di Piacenza direzione Sud ed è pari a 21,51%. Si conferma quando emerso da una prima analisi puramente grafica che vulnerabilità maggiori si presentano ove i flussi sono elevati. Inoltre anche topologicamente, tale arco si trova in prossimità di un nodo nevralgico della rete, l'intersezione tra la A1 (Milano - Napoli) e la A21 (Torino - Brescia). Si veda la Figura 19



Figura 19 Snodo A1-A21

Dall'analisi dei risultati emergono anche dati la cui comprensione è meno intuitiva. Infatti vi sono degli archi in cui l'indicatore risulta leggermente negativo, ovvero archi per i quali la redistribuzione dei flussi in seguito alla loro chiusura porta ad un leggero miglioramento complessivo della mobilità. La spiegazione a questo fenomeno è che l'assegnazione viene effettuata secondo i criteri di ottimo individuale (ovvero che il singolo sceglie il percorso secondo il criterio di perseguire il proprio ottimo) mentre l'indicatore si riferisce alla vulnerabilità sistemica, ovvero si riferisce a grandezze di sistema. Nei casi in cui si verifica un miglioramento in seguito alla chiusura di un arco, a discapito di alcuni flussi di domanda che saranno comunque penalizzati, la nuova configurazione sarà più vicina all'ottimo di sistema (ovvero la configurazione per la quale, la totalità delle disutilità è minima, configurazione non raggiungibile naturalmente dal sistema perché porterebbe alcuni individui ad effettuare scelte che li penalizzano).

### 5.3 Distribuzione dell'indicatore di vulnerabilità sistemica: scenario in transitorio

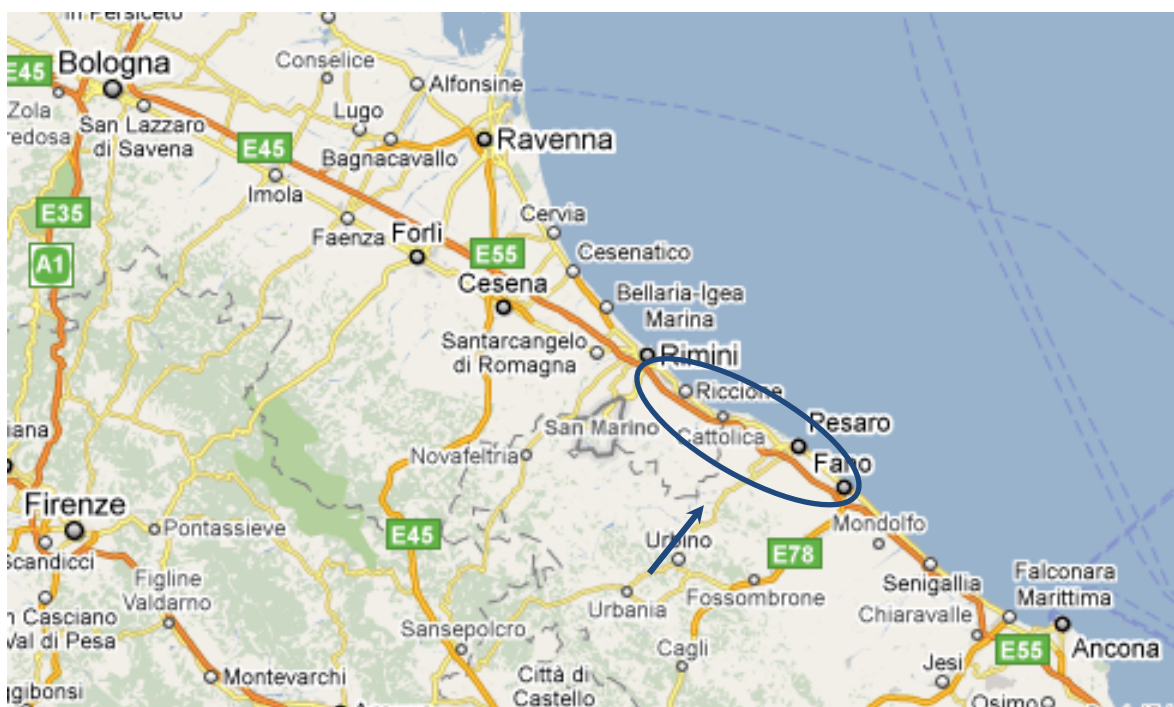
Il grafo rappresentato in Figura 20 è relativo agli incrementi di costo che in percentuale produce la chiusura di un arco. Ad ogni arco è associato l'aumento di costo che produce, se

impraticabile, sulla mobilità di tutta la rete italiana. Lo scenario rappresentato è quello in transitorio che, come spiegato nei precedenti capitoli, rappresenta il caso più gravoso, dove l'utenza non ha a disposizione strumenti di informazione per poter effettuare una scelta ponderata e razionale.



**Figura 20** Distribuzione dell'indicatore di vulnerabilità sistemica nello scenario in transitorio

Dalla rappresentazione si nota come tutti gli archi siano caratterizzati da un indice di vulnerabilità significativo. La media degli aumenti di costo della mobilità è infatti pari a 19,96% e la moda, molto simile alla media, è pari a 19,86%. I valori massimi si riscontrano su archi caratterizzati da flussi elevati, per questo gli archi più vulnerabili nello scenario in transitorio e a regime in parte coincidono. Il tratto stradale che presenta maggiore vulnerabilità nella scenario in transitorio, pari a 49,96%, è il tratto di A14 tra Pesaro e Rimini in direzione Nord (Figura 21). Infatti la chiusura di tale arco porterebbe gli utenti che sono costretti a cambiare percorso ad allungare considerevolmente il percorso da seguire; inoltre sarebbero costretti a servirsi di tratte già fortemente battute da flussi di traffico che per le ipotesi di scenario in transitorio non variano le loro scelte di percorso in base alle nuove condizioni di traffico.



**Figura 21 Collegamento Rimini-Pesaro**

Gli aumenti minimi si riscontrano invece sugli archi che si trovano in zone della rete test dove la densità di archi è particolarmente fitta e i percorsi alternativi non comportano ritardi elevati.

## **5.4 Differenze di vulnerabilità negli scenari a regime e in transitorio**

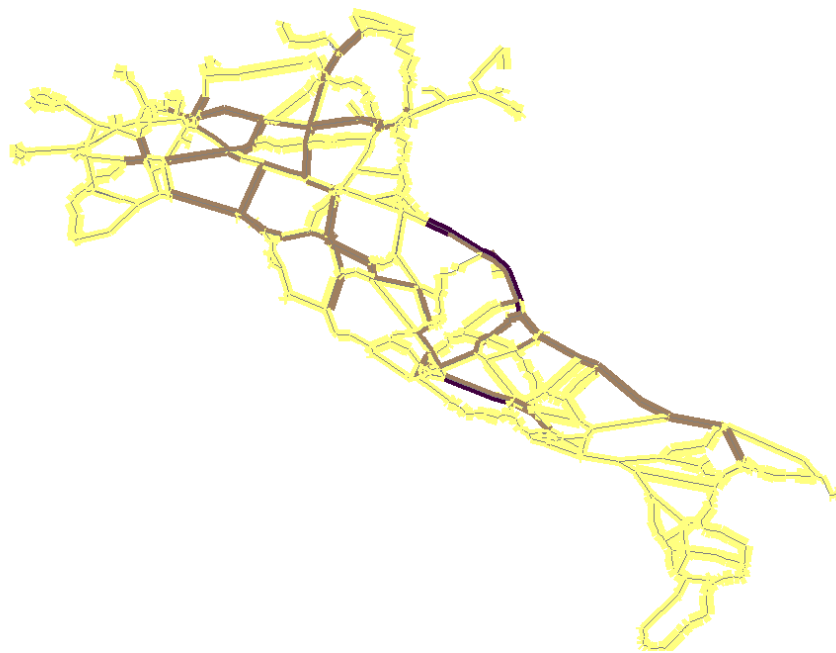
Dopo aver effettuato l'analisi della vulnerabilità sistemica negli scenari in transitorio e a regime separatamente, alla luce dei risultati ottenuti e delle riflessioni effettuate si è ritenuto utile confrontare i risultati emersi nei due scenari.

In particolare per ogni arco si è valutata la differenza tra l'indicatore di vulnerabilità calcolato per lo scenario in transitorio (dove gli aumenti di costo della mobilità sono considerevoli) e per quello a regime, ovvero a equilibrio ristabilito (dove gli incrementi suddetti sono più ridotti).

In generale spesso gli archi che sono risultati più vulnerabili a regime sono risultati tali anche nello scenario in transitorio, tuttavia tale considerazione non è sempre vera. Si è pensato di

stilare una classifica degli archi nella situazione a regime che presentano un miglioramento più consistente rispetto alla configurazione che si verifica in transitorio. In altre parole, alcuni archi presentano una vulnerabilità molto alta in transitorio e di gran lunga più bassa nello scenario a regime. Questo significa che se l'interruzione di tali archi avvenisse improvvisamente e senza adeguata informazione all'utenza i disagi prodotti alla mobilità sarebbero elevatissimi e di gran lunga superiori alla media; mentre se tali interruzioni venissero precedute o accompagnate da un adeguato sistema di informazione il disagio prodotto dalla chiusura degli stessi archi sarebbe molto inferiore e in generale in linea con la media della vulnerabilità nello scenario a regime.

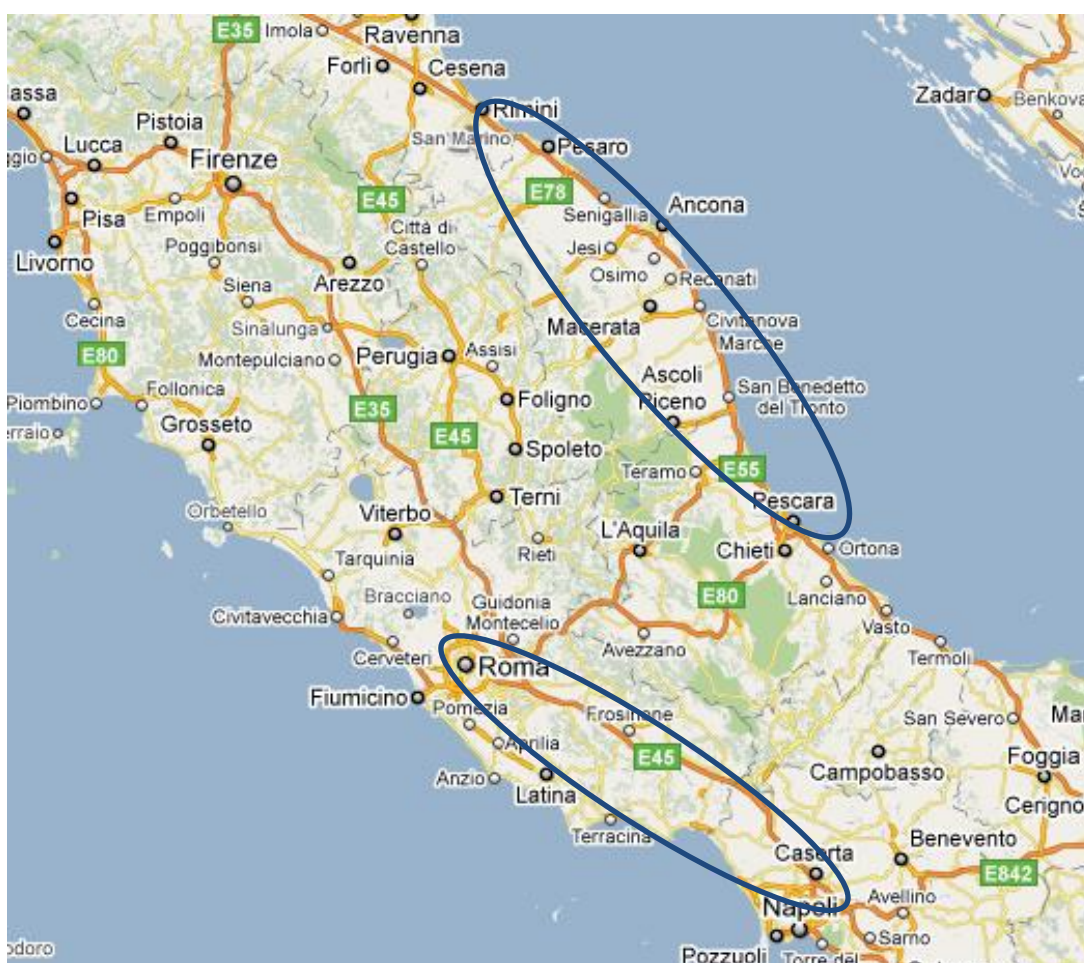
Nel grafo in Figura 22, si rappresenta la distribuzione delle variazioni di vulnerabilità sistemica in transitorio e a regime sulla rete test considerata.



**Figura 22 Differenza tra l'indicatore di vulnerabilità in transitorio e a regime**

Si evidenziano nelle tonalità di viola gli archi a cui corrisponde una differenza di vulnerabilità sistemica elevata tra lo scenario in transitorio e lo scenario a regime. Gli archi colorati di giallo hanno comunque vulnerabilità maggiori nello scenario in transitorio rispetto a quelle riscontrate a regime, ma tale differenza è contenuta e in linea con le ipotesi effettuate nella definizione degli scenari stessi.

Gli archi che presentano maggior disparità tra i valori di vulnerabilità calcolati nei due casi sono gli archi ad elevata percorrenza della Pianura Padana, gli archi compresi fra tra Milano e Venezia e l'asse Piacenza - Torino, la zona di Firenze, il tratto Roma - Napoli e l'asse adriatico. Puntualmente i dati maggiori si rilevano tra Roma e Caserta (direzione Sud) dove la differenza fra gli indicatori calcolati nelle scenario in transitorio e in quello a regime è pari al 43% e il tratto di A14 tra Pescara e Rimini (direzione Nord) dove la differenza sopra descritta è pari al 38,9% (si veda la Figura 23).



**Figura 23** Tratte caratterizzate da differenze elevate fra l'indicatore di vulnerabilità sistemica calcolato per lo scenario in transitorio e quello calcolato per lo scenario a regime

Anche in questo caso si può notare la correlazione tra le situazioni per le quali la differenza fra gli indicatori calcolati per i due scenari analizzati è notevole e i flussi degli archi più elevati. Inoltre si tratta di archi per i quali la redistribuzione dei flussi che a rete intatta passano per l'arco avviene su archi molto carichi. Questo comportamento, normale per un utente che non dispone degli strumenti per effettuare una scelta oculata, porta ad un



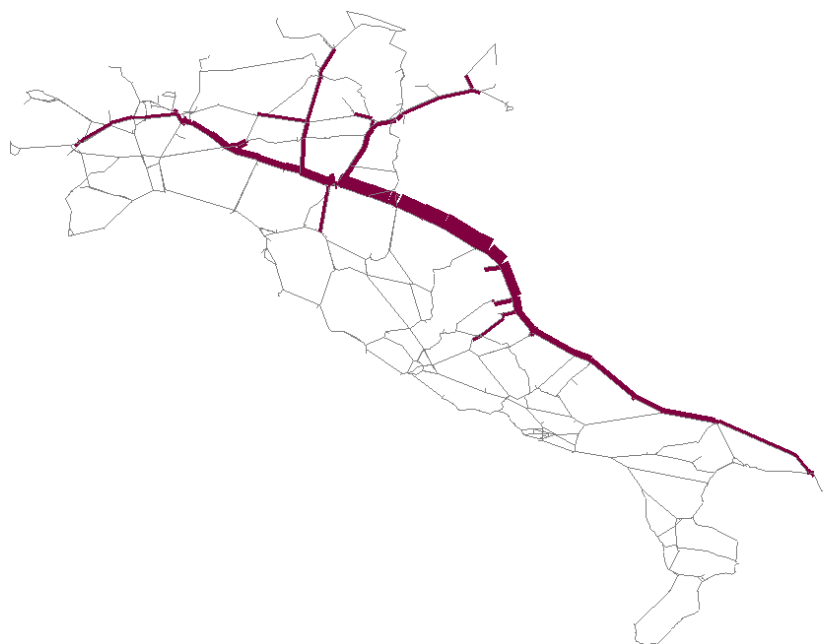
incremento dei tempi complessivi di percorrenza molto elevato. Nella situazione a regime invece anche gli utenti che non hanno dovuto cambiare percorso in un primo momento, poiché nessuno degli archi che intendevano percorrere era stato chiuso, possono decidere di variare il percorso alla luce dell'incremento di traffico che si riverserà sugli archi che abitualmente si trovavano a percorrere. Gli archi che presentano un differenza fra gli indicatori tra i due scenari più elevata, sono quelli che, a nostro avviso, vanno considerati primariamente al momento di elaborare studi di informazione e gestione del traffico.

Nei paragrafi a seguire si riportano, a titolo esemplificativo, le analisi di dettaglio delle dinamiche dei flussi nei diversi scenari, relative alla chiusura degli archi che si sono dimostrati più critici in base ai risultati mostrati nel paragrafo presente.

#### **5.4.1 Esempio: chiusura tratta dell'A14 tra Pesaro e Rimini (direzione Nord).**

Di seguito si riportano in modo schematico differenti immagini che permettono un confronto visivo e immediato delle differenze esistenti fra i diversi scenari analizzati:

- 1) Si mostra la distribuzione di flussi relativi alle relazioni OD che normalmente transitano per l'arco (rete intatta o scenario "zero")



**Figura 24** Flussi assegnati delle OD passanti per l'arco prima dell'interruzione (scenario "zero")

- 2) Si mostra la redistribuzione dei flussi delle stesse relazioni OD di cui sopra dopo che l'arco è stato interrotto. Lo scenario rappresentato è quello di transitorio; ovvero la scelta del percorso (che, si ricorda, avviene tramite una scelta deterministica tale da minimizzare il tempo di percorrenza) è stata effettuata sulla base del tempo di percorrenza a libero deflusso dei rimanenti archi senza considerare il tempo reale di percorrenza che è condizionato dal grado di congestione.



**Figura 25** Flussi assegnati delle OD precedentemente passanti per l'arco, ridistribuite nello scenario di transitorio

- 3) Si rappresenta l'andamento nello scenario a regime dei flussi delle relazioni OD che dopo l'interruzione dell'arco sono state costrette a cambiare percorso.



**Figura 26** Flussi assegnati delle OD precedentemente passanti per l'arco, ridistribuite nello scenario a regime

Si nota che rispetto allo scenario in transitorio non vi sono variazioni considerevoli nella scelta del percorso da parte delle relazioni OD che già avevano dovuto allungare di molti chilometri il proprio tragitto nella fase di transitorio. La variazione di costo totale che si verifica tra lo scenario in transitorio e quello a regime è dunque determinata dalle scelte delle relazioni OD che originariamente non transitavano per l'arco interrotto e che nello scenario a regime rimodulano i propri percorsi in base alle nuove condizioni di congestione riscontrate.

- 4) Si rappresenta l'andamento dei flussi delle relazioni OD che non passavano per l'arco interrotto e che, nel transitorio, non modificano la loro scelta di percorso, mantenendo così la scelta effettuata nelle condizioni di rete intatta.



**Figura 27** Flussi assegnati delle OD che originariamente non passavano per l'arco interrotto assegnati nella scenario in transitorio

- 5) Infine, si riportano i flussi delle relazioni OD che non transitavano per l'arco interrotto, ma che a differenza di quanto accade nello scenario in transitorio modificano il loro percorso in base alla variazione dei flussi sugli archi percorsi. Il sistema raggiunge una nuova configurazione di equilibrio, nella quale anche i flussi appartenenti alle relazioni OD che non transitavano per l'arco interrotto cambiano percorso al fine di minimizzare la loro disutilità, migliorando così i costi di mobilità del sistema nel suo complesso.



**Figura 28** Flussi assegnati delle OD che ordinariamente non passavano per l'arco interrotto, assegnati nello scenario a regime

#### **5.4.2 Esempio: chiusura tratto di A1 tra Roma e Caserta (direzione Sud).**

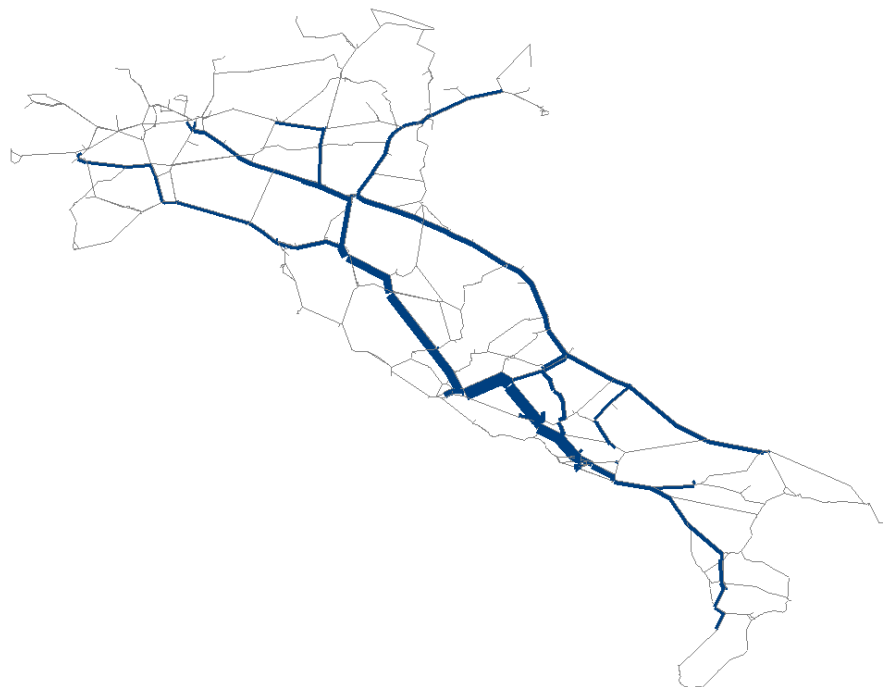
Anche per questo esempio, si riportano immagini di grafi carichi per meglio visualizzare le differenze fra i vari scenari analizzati:

- 1) Si rappresentano i flussi delle relazioni OD che transitano per l'arco che verrà chiuso. In questa configurazione la rete è intatta (scenario "zero").



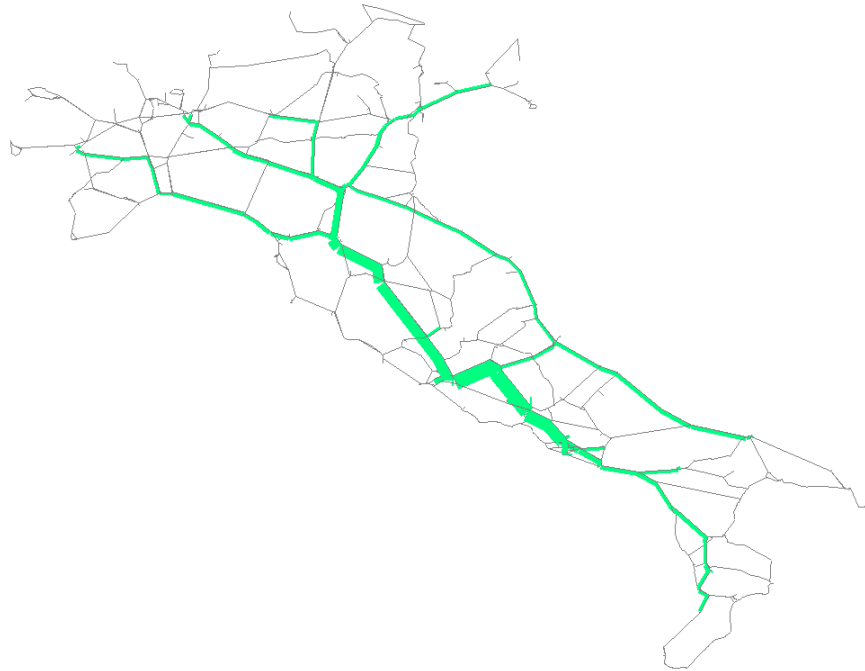
**Figura 29** Flussi assegnati delle OD passanti per l'arco sulla rete prima dell'interruzione (scenario "zero")

- 2) Si riportano i flussi delle relazioni OD che transitavano per l'arco, ora interrotto, e cambiano i loro percorsi senza avere cognizione del grado di congestione dei percorsi delle scelte effettuate. Le scelte si basano sul tempo a libero deflusso degli archi alternativi.



**Figura 30** Flussi assegnati delle OD precedentemente passanti per l'arco, ridistribuite nello scenario in transitorio

- 3) Si rappresentano i flussi delle relazioni OD che transitavano per l'arco interrotto e hanno cambiato percorso alla luce della nuova distribuzione equilibrata che si verifica dopo un sufficiente lasso di tempo dall'avvenuta interruzione.



**Figura 31** Flussi assegnati delle OD precedentemente passanti per l'arco, ridistribuite nello scenario a regime

Come nell'esempio del paragrafo 5.4.1, anche in questo caso non si nota una sensibile variazione nelle scelte dei percorsi delle relazioni OD passanti per l'arco nello scenario in transitorio e nello scenario a regime. Questo deriva del fatto che esse hanno già sostenuto un incremento di costi considerevole sia in termini di tempo sia in termini di chilometri percorsi. La differenza nel costo della mobilità che si riscontra nel caso dello scenario a regime rispetto a quello di transitorio dipenderà, anche in questo caso, dal comportamento delle relazioni OD non passanti inizialmente per l'arco in analisi.

- 4) Si riporta la distribuzione dei flussi delle relazioni OD non passanti, nello scenario in transitorio. Non conoscendo anticipatamente la variazione dei flussi che si produrrà in seguito alla variazione dei percorsi delle OD che hanno trovato interrotto l'arco del percorso scelto inizialmente, in questo scenario i flussi delle relazioni OD

precedentemente non passanti per l'arco non variano la scelta di percorso rispetto a quella effettuata nel caso di rete intatta.



**Figura 32** Flussi assegnati delle OD precedentemente non passanti per l'arco, assegnati nello scenario in transitorio

- 5) Di seguito, sono rappresentati i flussi delle relazioni OD che non passavano per l'arco interrotto nello scenario "zero". Inizialmente, nello scenario in transitorio, tali flussi di domanda non variano il loro percorso ma successivamente, visti gli aumenti dei tempi di percorrenza di alcuni archi dovuti alla nuova distribuzione dei flussi, modificano la loro scelta minimizzando i loro tempi di percorrenza. Così facendo, i flussi su alcuni archi rispetto al caso in transitorio risultano essere inferiori, riducendo i tempi di percorrenze e riducendo così complessivamente il costo della mobilità.





**Figura 33** Flussi assegnati delle OD precedentemente non passanti per l'arco, assegnati nello scenario a regime

## **5.5 Relazione fra la vulnerabilità e alcuni parametri del sistema**

Operativamente, l'algoritmo di calcolo automatico implementato per la ricerca della vulnerabilità sistemica prevede il calcolo del valore dell'indicatore associato ad un arco e quindi la ripetizione ciclica dell'operazione per tutti gli archi che costituiscono la rete in esame. Poiché le reti alle quali potrebbe essere applicata la procedura di calcolo (come ad esempio reti nazionali) sono generalmente composte da un numero molto elevato di archi e poiché i tempi di calcolo risultano essere direttamente crescenti rispetto a tale numero, si è pensato di individuare un metodo che consenta di ridurre il numero degli archi da valutare, di velocizzare il calcolo e di ottimizzare quindi la procedura.

Dal momento che l'indicatore di vulnerabilità sistemica è legato al prodotto fra il flusso circolante su ogni arco e il tempo di percorrenza dell'arco stesso e considerando anche il fatto che la chiusura di un arco comporta la redistribuzione del flusso ivi circolante, è possibile affermare che archi il cui flusso iniziale risulta essere basso saranno caratterizzati da un valore di vulnerabilità piuttosto contenuta. A prova di questo, si mostrano due grafici (Figura 34 e

Figura 35) nei quali si riporta sull'asse delle ascisse il valore del flusso iniziale transitante per l'arco da valutare e sull'asse delle ordinate il valore dell'aumento percentuale di costo di mobilità calcolato per i due orizzonti temporali analizzati: il transitorio e a regime. Per ogni arco della rete si identifica un punto sul grafico relativo al flusso di traffico e all'indicatore di vulnerabilità associati all'arco.

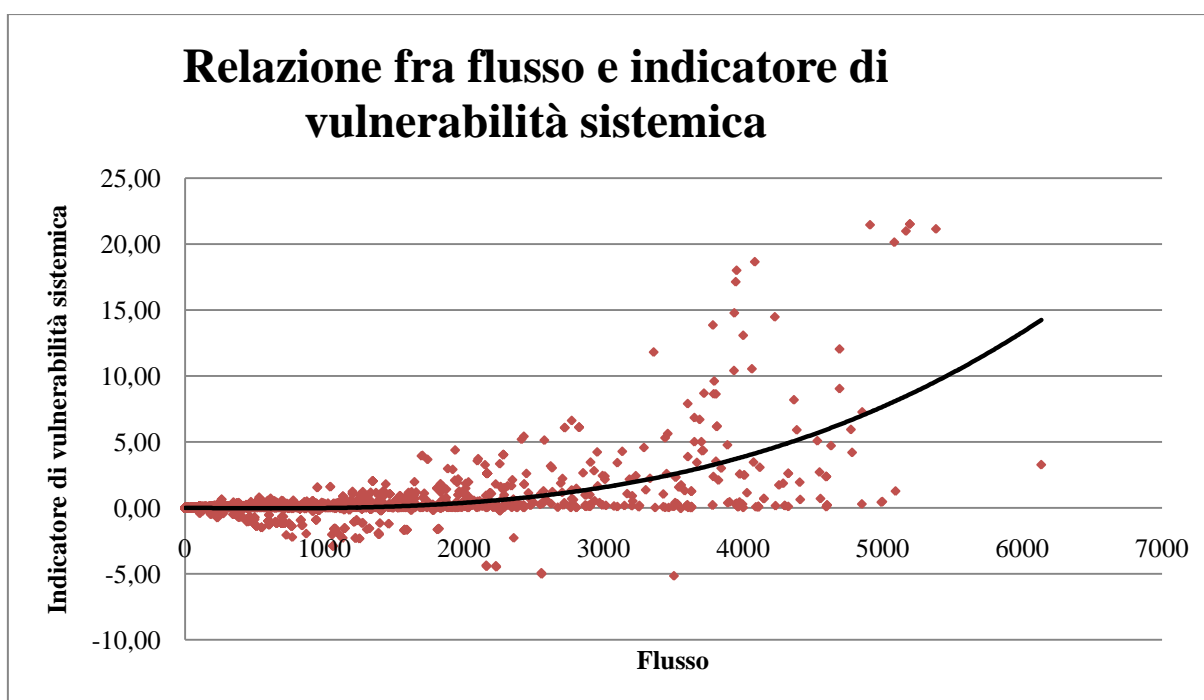
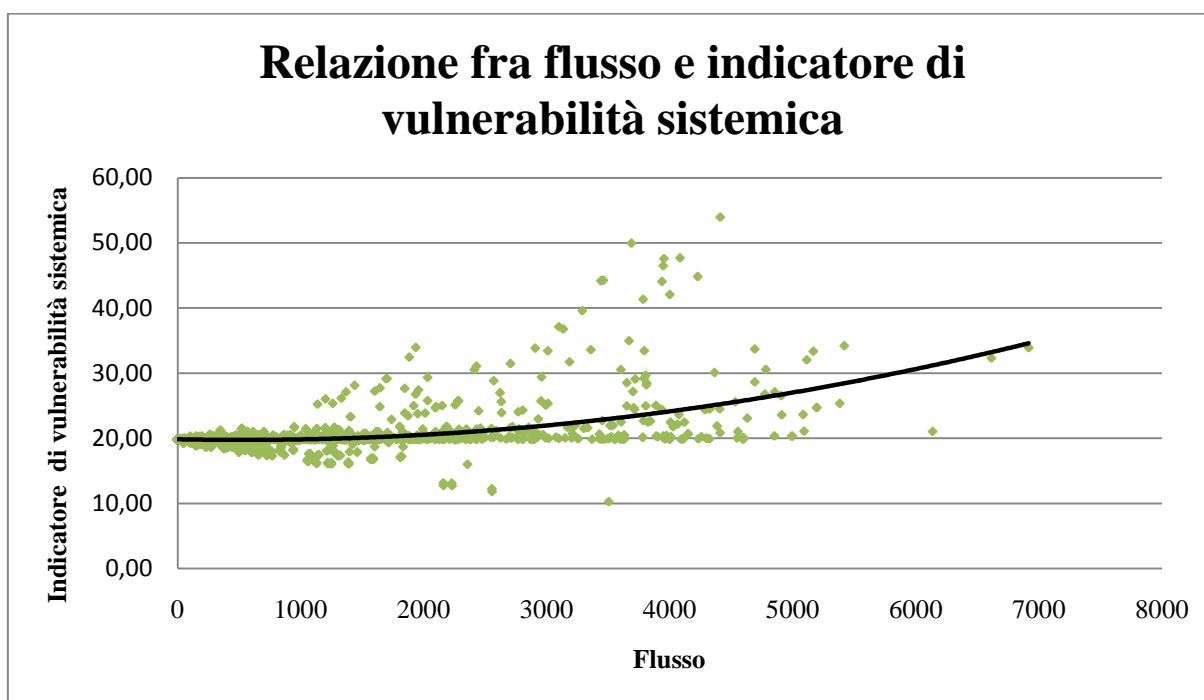


Figura 34 Relazione flusso-indicatore di vulnerabilità sistemica nello scenario a regime

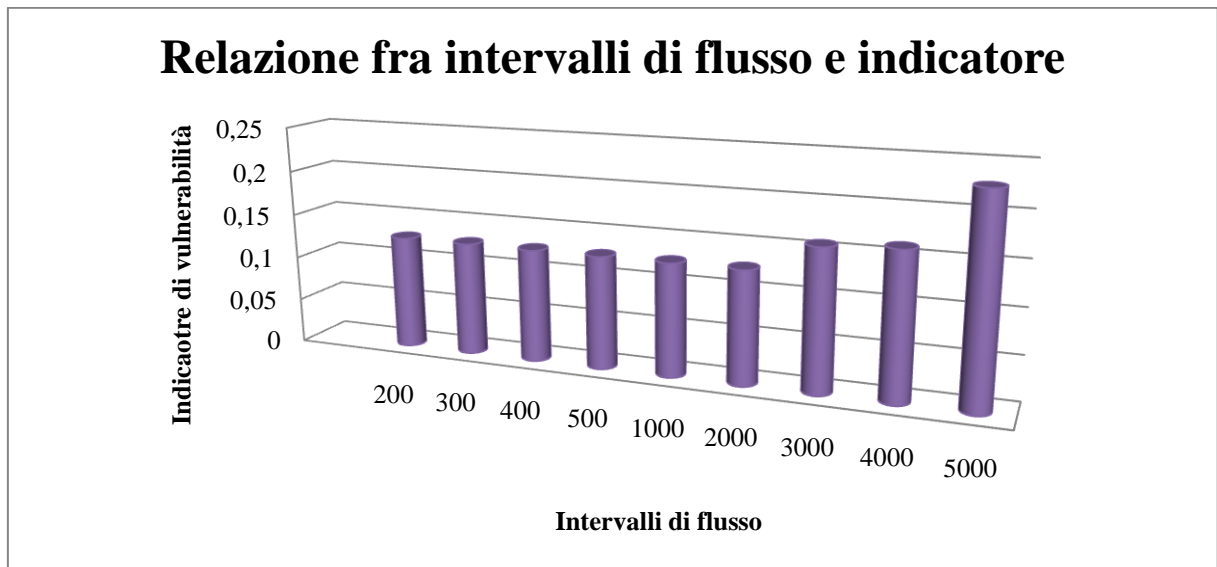


**Figura 35 Relazione flusso-indicatore di vulnerabilità sistemica nello scenario in transitorio**

Analizzando i dati e le dispersioni ottenute si osserva che, in entrambi i casi, la linea di tendenza è crescente con il flusso seppur in transitorio l'aumento risulta essere meno marcato. In ogni caso è possibile affermare con sufficiente sicurezza che la vulnerabilità calcolata è fortemente correlata con il flusso ed è quindi lecito, al fine di ottimizzare i tempi di calcolo, ridurre il numero di archi su cui effettuare l'analisi in relazione al flusso circolante, escludendo gli archi caratterizzati da bassi valori del flusso transitante.

Se si raggruppano gli archi in base al flusso transitante e si calcolano per questi intervalli discreti i valori medi dell'indicatore di vulnerabilità, si nota che le medie dei valori dell'indicatore rimangono pressoché costanti e contenute fino ad un certo valore di flusso mentre per valori di flusso maggiori tendono ad aumentare. Si osservino, per chiarire meglio questo concetto, il grafico posto in Figura 36 e la tabella ad esso associata

Tabella 2. Pertanto, anche da questa osservazione si evince che il valore della vulnerabilità sistemica è fortemente dipendente dal flusso che occupa l'arco considerato e quindi limitare il calcolo della vulnerabilità ad archi interessati dai flussi maggiori e considerare i restanti poco vulnerabili porta a risultati poco distorti.



**Figura 36** Relazione fra l'indicatore negli intervalli discreti di flusso e il flusso transitante

Intervallo di flusso	Media
100-200	0,13
200-300	0,13
300-400	0,13
400-500	0,13
500-1000	0,13
1000-2000	0,13
2000-3000	0,16
3000-4000	0,16
4000-5000	0,23

**Tabella 2**

Oltre ad analizzare la relazione della vulnerabilità sistemica con il flusso è interessante verificare se esiste una qualche correlazione con un altro parametro importante nel campo della simulazione dei sistemi di trasporto: il rapporto flusso capacità (Figura 37 e Figura 38). Esso infatti rappresenta le condizioni di congestione degli archi e costituisce una caratteristica importante in quanto determina il livello di servizio della tratta.

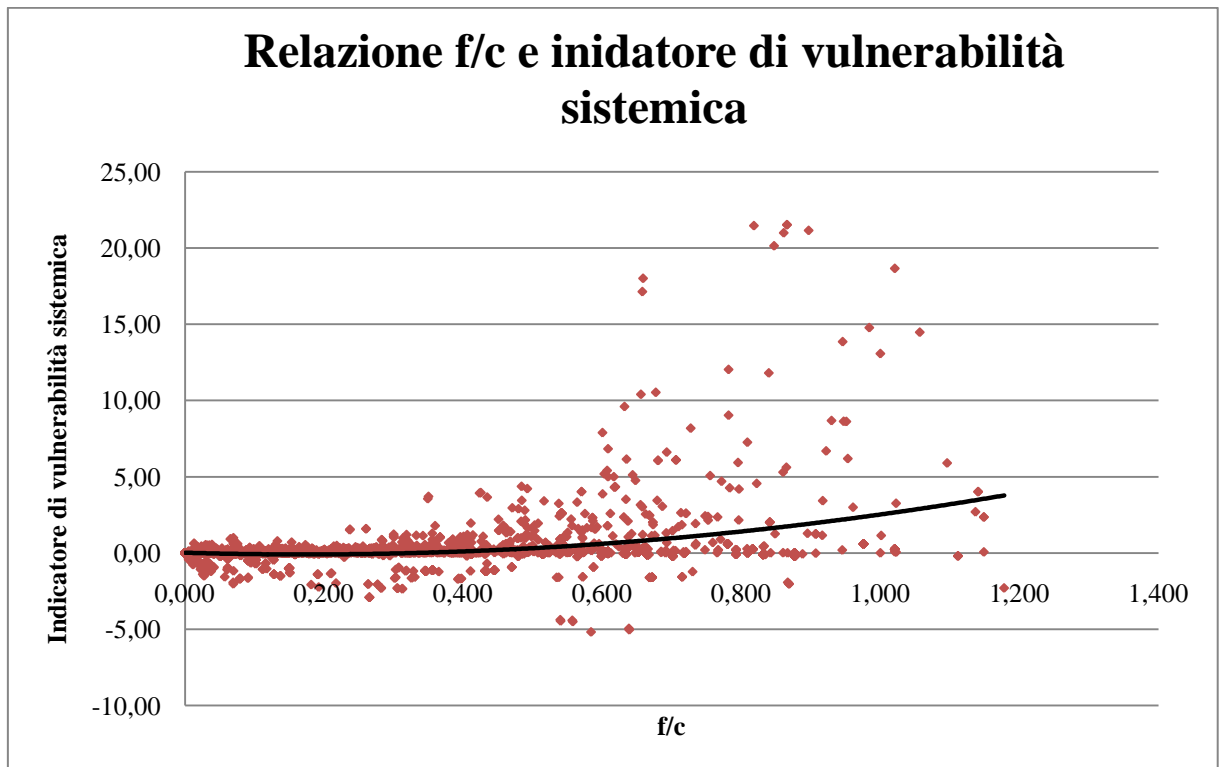


Figura 37 Relazione f/c-indicatore di vulnerabilità sistemica nello scenario a regime

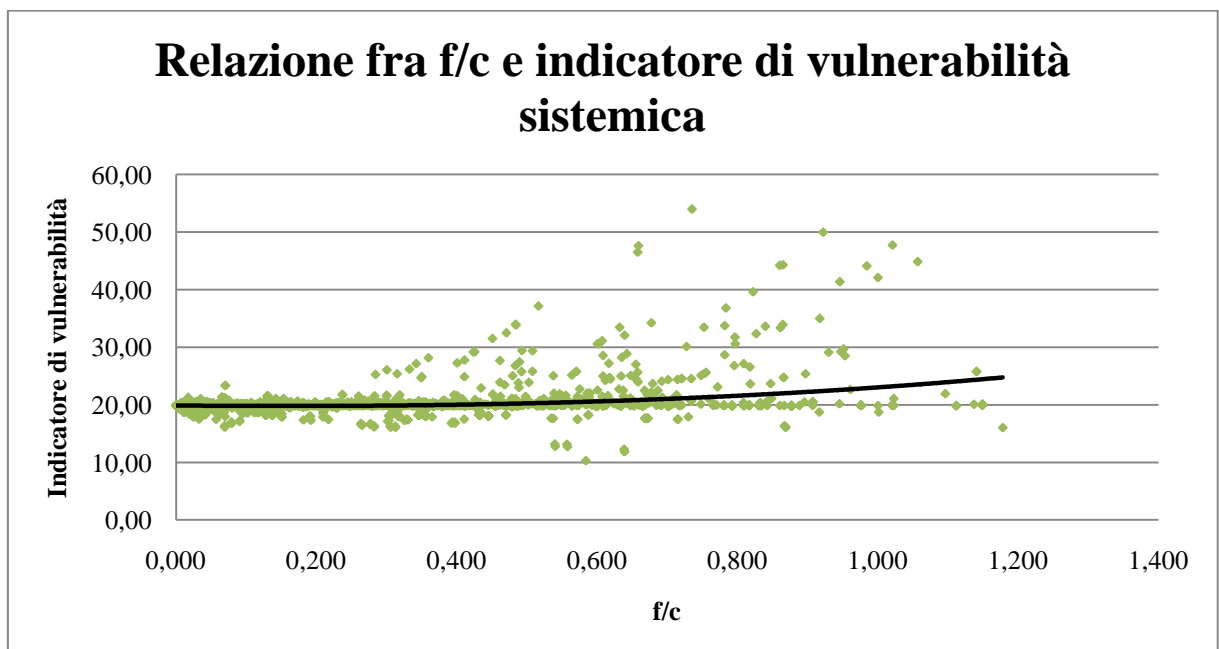
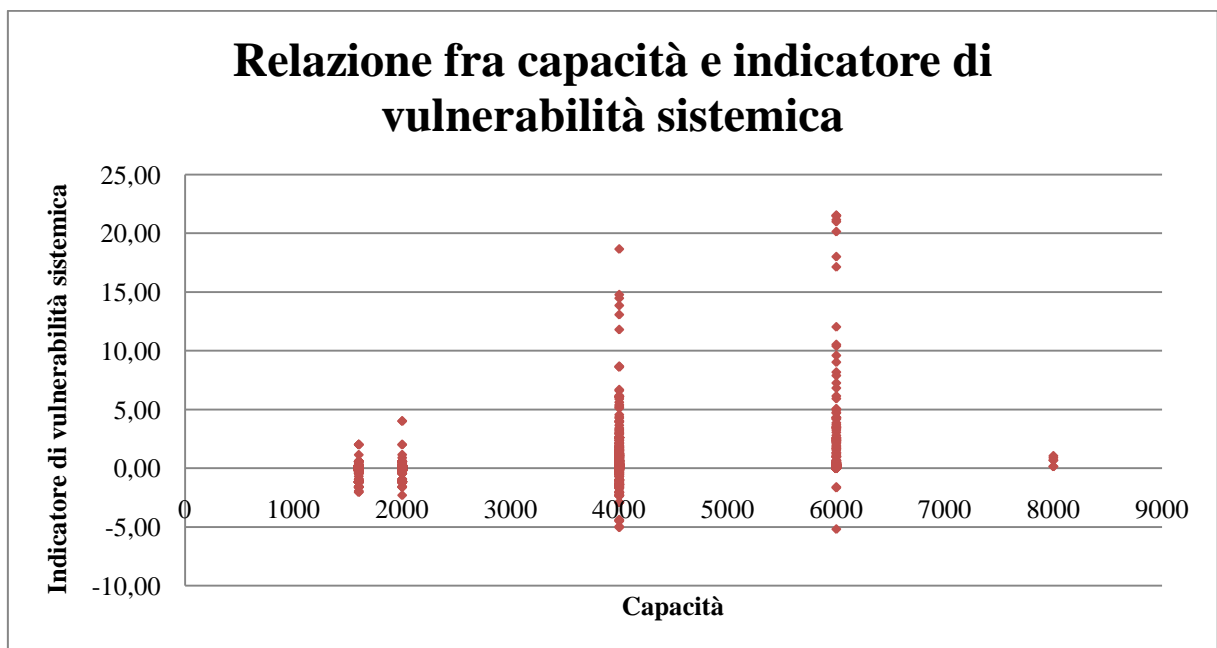


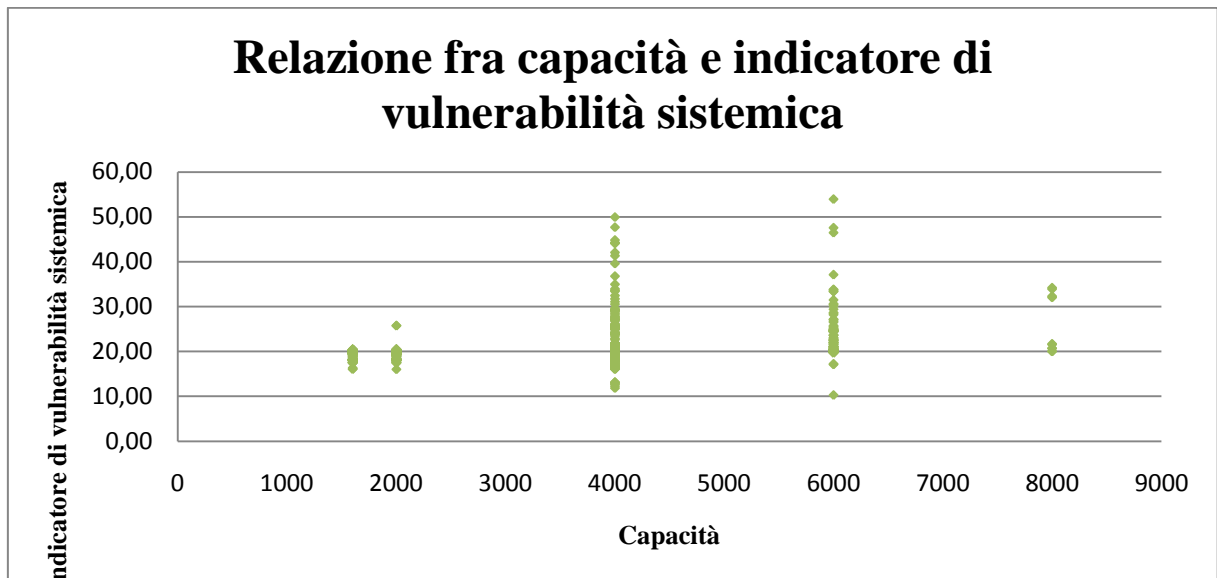
Figura 38 Relazione f/c- indicatore di vulnerabilità sistemica nello scenario in transitorio

La correlazione fra il rapporto flusso/capacità e il valore dell'aumento di costo di mobilità percentuale è meno marcata rispetto a quella che si è riscontrata per la relazione fra vulnerabilità sistemica e flusso. Questo fatto può essere legato proprio alla metodologia di calcolo dell'indicatore. Infatti, esso è calcolato per ciascun arco come confronto fra la situazione esistente nello scenario "zero" a rete intatta e quella che si viene a creare nel momento in cui l'arco in questione è chiuso e non transitabile, situazione nella quale il flusso circolante sull'arco deve essere ridistribuito sui rimanenti archi della rete, indipendentemente dal rapporto flusso/capacità che l'arco presentava prima di essere interrotto.

Può essere quindi maggiormente interessante verificare la relazione esistente direttamente fra la capacità dell'arco e l'aumento di costo percentuale. I grafici relativi ai due scenari di intervento proposti sono riportati in Figura 39 e Figura 40.



**Figura 39** Relazione capacità-indicatore di vulnerabilità sistemica per lo scenario a regime



**Figura 40** Relazione capacità- indicatore di vulnerabilità sistemica per lo scenario in transitorio

Come si può osservare dai grafici, per valori di capacità ridotti si hanno valori di vulnerabilità sistemica bassi; infatti tendenzialmente archi con capacità bassa corrispondono nella rete test analizzata ad arterie minori, che sono quindi generalmente meno trafficate. Quindi è lecito pensare che valori di capacità bassi comportino anche valori di flusso iniziale ridotto e quindi vulnerabilità sistemica limitata.

Vulnerabilità più elevate si riscontrano invece per capacità superiori, ovvero per quegli archi corrispondenti alle principali arterie italiane nel caso in esame. Anche questo risultato non stupisce, infatti si presuppone che le strade principali siano anche quelle maggiormente battute e chiudere un arco appartenente alla viabilità principale non può che comportare maggiore affaticamento delle strade minori vicine con conseguente aumento della vulnerabilità sistemica associata all'arco chiuso.

Volendo concludere, al fine di ottimizzare i tempi di calcolo è possibile effettuare una analisi preventiva della rete dal punto di vista delle capacità e dei flussi circolanti, eliminando dal calcolo quegli archi aventi capacità ridotta. Successivamente alla prima assegnazione, invece, si possono ulteriormente ridurre gli archi su cui effettuare il calcolo della vulnerabilità sistemica in relazione ai flussi risultanti.

## 6 Conclusioni

Il principale obiettivo del presente lavoro di tesi è stato l'implementazione di una metodologia per la stima della vulnerabilità sistemica di una rete stradale e lo sviluppo di questo tema ha permesso di ottenere importanti risultati. Infatti è stato possibile implementare differenti metodologie per la stima della vulnerabilità sistemica che permettono di analizzare situazioni contestuali differenti della rete. In particolare, è stato sviluppato un metodo che consente di effettuare una valutazione sulla vulnerabilità in una fase di transitorio della rete, ovvero in una situazione immediatamente successiva ad un evento generico che provoca la mutazione delle condizioni di equilibrio originario della rete, e uno che ne permette l'analisi in una fase successiva, in cui la rete raggiunge un nuovo assetto di equilibrio.

I modelli implementati sono stati realizzati all'interno di un progetto di ricerca sviluppato congiuntamente dal dipartimento di Protezione Civile Nazionale dal Laboratorio Mobilità e Trasporti del dipartimento INDACO del Politecnico di Milano. Grazie all'applicazione della metodologia alla rete test rappresentata dalla rete stradale principale italiana, è stato possibile catalogare gli archi della rete in funzione del loro livello di vulnerabilità sistemica e fornire quindi al Dipartimento di Protezione Civile Nazionale un importante strumento per la pianificazione degli interventi in caso di emergenza.

Inoltre, grazie alla versatilità dei modelli, le metodologie sviluppate possono essere applicate anche a differenti reti di trasporto e, pertanto, possono essere utili anche agli Enti gestori stradali che potrebbero sfruttarli per programmare interventi manutentivi, stanziare in modo corretto le risorse e fornire priorità di intervento a quegli archi che risultano essere maggiormente vulnerabili a livello sistemico, oltre che redigere appositi piani di gestione del traffico per fronteggiare emergenze causate dall'interruzione di queste tratte.

La metodologia implementata consente di ottenere informazioni in merito alla vulnerabilità sistemica di una rete indipendentemente dall'evento che causa la variazione dell'assetto di normale equilibrio della rete. Lo scopo è quello di definire le conseguenze che si ripercuotono sulla mobilità di tutto il sistema stradale in seguito all'interruzione di un arco, qualsivoglia sia il motivo di tale interruzione. Questo principio permette una classificazione più generale degli archi, indipendente da fattori esterni al sistema e influenzata solo dai flussi di domanda e dalle caratteristiche dell'offerta.



L'analisi condotta ha inoltre consentito di trovare la correlazione esistente fra la vulnerabilità sistemica e alcune caratteristiche funzionali della rete, quali il flusso circolante sugli archi, la capacità e il rapporto flusso/capacità. Grazie a questo risultato è possibile ridurre il numero degli archi su cui effettuare il calcolo e ottimizzare la procedura di calcolo.

In merito ai tempi di calcolo, le procedure implementate richiedono tempi differenti a seconda degli scenari alle quali sono riferite e delle caratteristiche dei sottomodelli che le compongono. In particolare, i tempi dipendono fortemente dal modello di assegnazione che nel processo di ricerca dell'equilibrio prevede successive iterazioni. Nel caso del modello per il calcolo della vulnerabilità in transitorio dove l'assegnazione è di tipo tutto o niente, il calcolo è piuttosto rapido (in poche ore è possibile completare l'analisi di tutta la rete) mentre il modello per il calcolo a regime, prevedendo un tipo di assegnazione all'equilibrio può richiedere anche alcuni giorni. Tuttavia i suddetti tempi di calcolo sono riferiti al caso in cui non si effettuino delle considerazioni preliminari, che permettano di escludere a priori alcuni archi dal calcolo potendo assumere a priori che la loro vulnerabilità sia molto bassa. Effettuando un'analisi sui flussi di arco è possibile ridurre i tempi di calcolo portandoli ben sotto la metà del tempo di quanto precedentemente descritto.

Rispetto a differenti analisi sul tema, alcune delle quali eseguite all'interno del dipartimento INDACO, aspetti innovativi del lavoro di tesi svolto risiedono nel fatto che tutti i modelli implementati tengono in considerazione i reali tempi di percorrenza e, conseguentemente, nei modelli rientrano tutti gli aspetti legati alla congestione. La dipendenza dei tempi di percorrenza dal flusso circolante sugli archi e, in particolare, dal rapporto flusso/capacità, consente di tenere in considerazione non solo gli aspetti legati alla circolazione, ma anche quelli legati all'infrastruttura.

Il principale aspetto di innovazione della metodologia implementata per il calcolo degli indicatori di vulnerabilità sistemica risiede nel fatto che vengano considerate separatamente due situazioni della rete differenti, a regime e in transitorio, legate alle diverse ipotesi di assegnazione dei flussi che si effettuano per i due scenari.

Inoltre, l'originalità del metodo risiede nel fatto di poter analizzare separatamente il ritardo prodotto sui singoli percorsi. In questo modo si tiene in conto della proporzione non lineare fra aumento di tempi e aumento di costi di uno spostamento.

## 6.1 Sviluppi futuri

Questo lavoro di tesi può essere visto come un ottimo punto di partenza per ulteriori e molteplici sviluppi. In particolare, si elencano alcune considerazioni e idee per il proseguimento del lavoro di ricerca, emerse durante il lavoro di tesi connesse con il concetto di vulnerabilità sistemica:

- Concetto di accelerazione dell'equilibrio. Nota la condizione ottimale di equilibrio (scenario a regime) e quella del momento appena successivo all'interruzione (scenario transitorio), si può studiare quali procedure operative (di gestione del traffico e di infomobilità) potrebbero favorire il raggiungimento di una situazione meno gravosa in seguito all'interruzione di un arco senza attendere l'assestamento naturale (che richiede tempi maggiori).
- Concetto di vulnerabilità legato all'informazione all'utenza. Si può pensare ad un'analisi di vulnerabilità della rete che tenga conto dell'informazione all'utenza; studiando come può variare la vulnerabilità degli archi interessati da una interruzione di percorso, se si progetta un'adeguata gestione degli eventi.
- Non tutti gli spostamenti subiscono una variazione a partire dall'origine; infatti ci sono percorsi che si differenzieranno rispetto al cammino originale oltre il nodo di origine e alcuni nodi prima del nodo iniziale dell'arco interrotto. Allora si può affrontare uno studio finalizzato a definire come indirizzare ottimamente flussi in corrispondenza di un intorno dell'ultimo nodo che consente una variazione del percorso seguito.

Ne consegue:

- un'analisi più attinente alla realtà;
- studio sulla gestione dell'informazione: determinare in quali nodi ha senso dare indicazioni e quali indicazioni vanno fornite;
- individuazione di quei nodi che permettono di gestire la maggior parte del flusso;

- Importante potrebbe risultare la ricerca del punto di deviazione, ovvero il punto sulla rete ove ciascun percorso ottimale seguito dopo l'interruzione si differenzia da quello originale seguito su rete integra. Paragonando il percorso originale con quello riassegnato all'equilibrio si può individuare il punto della deviazione, quindi il punto in cui ha senso iniziare a dare informazioni all'utenza (queste considerazioni, nell'ambito del presente lavoro di tesi possono essere fatte in casi particolari esemplificativi, lasciando lo sviluppo e la generalizzazione del processo a studi futuri).
- Considerazione all'interno dei flussi considerati (in veicoli equivalenti) delle varie componenti di traffico, in particolare dei mezzi pesanti, ai quali spesso non è concesso il transito su tutti gli archi della rete.
- Utilizzo di modelli dinamici per la rappresentazione degli spostamenti che hanno già avuto inizio nel momento in cui avviene l'interruzione di un arco della rete.

## 7 Allegati

In questo capitolo si spiegano in dettaglio i programmi implementati e utilizzati nel lavoro di tesi e se ne riporta lo script e la struttura.

### 7.1 Il codice per la semplificazione della rete

Di seguito si riporta il codice scritto in linguaggio di programmazione Python utilizzato per eseguire la semplificazione della rete e ottenere così una rete semplificata costituita da macro archi.

```
#!/usr/bin/python
# -*- coding: utf-8 -*-
#%%Module
#%% description: Semplifica una rete stradale Multinet 2005, secondo i
parametri definiti nello script
#%%End
#%%option
#%% key: input
#%% type: string
#%% description: nome del file con la rete stradale da semplificare senza
estensione
#%% required: no
#%%end
#%%option
#%% key: dir
#%% type: string
#%% description: percorso completo del file. Inserire "/" alla fine del
percorso
#%% required : no
#%%end

import subprocess #modulo con le classi per eseguire istruzioni da shell
import os #modulo per riconoscere i paramentri passati inseriti
import csv #modulo per leggere i dati da file
import time #mudulo per fare fermare il programma per qualche
secondo

#FUNZIONI UTILIZZATE
#funzione per eseguire un comando in shell
def comando(comando):
    output = subprocess.Popen(comando, shell=True)
    subprocess.Popen.wait(output)
    return

#funzione per eseguire comandi grass
def grass(comando):
    output = subprocess.Popen(comando, shell=True)
    subprocess.Popen.wait(output)
```

```

return

#funzione per eseguire comandi grass senza output
def grass_no_output(comando):
    output =
subprocess.Popen(comando,shell=True,stdout=open("output_buildpolylinee.txt"
, "w"))
    subprocess.Popen.wait(output)
    return

#funzione per eseguire comandi sql
def sql(query):
    f = open("PostgresqlQuery.txt","w")
    f.write(query)
    f.close()
    grass("psql -f PostgresqlQuery.txt GeoDataBase -h localhost ricky")
#parametri di connessione al database postgis
    return

#VARIABILI
##### NOME DELLA RETE
SENZA ESTENZIONE
##### NOME DELLA RETE
SENZA ESTENZIONE
##### NOME DELLA RETE
SENZA ESTENZIONE
rete_input = "retel"
##### NOME DELLA RETE
SENZA ESTENZIONE
##### NOME DELLA RETE
SENZA ESTENZIONE
##### NOME DELLA RETE
SENZA ESTENZIONE # "+ rete_input +"
dir_rete_input= "/home/scarinci/Scrivania/Semplificazione/rete/" # "+
dir_rete_input+"

#PROCEDURA
#importo la rete in postgis
comando("shp2pgsql -W LATIN1 -I "+dir_rete_input+rete_input+".shp
da_semplificare -> importatore") #attenzione al 32767 perchÃ¨ potrebbe non
essere presente nel db
comando("psql -h localhost -U ricky -d GeoDataBase -f importatore -q")
#parametri di connessione al database postgis

#aggiungo una colonna con un identificativo
sql("ALTER TABLE da_semplificare ADD COLUMN id_mio serial;")

#faccio diventare la rete 3d
sql("ALTER TABLE da_semplificare DROP CONSTRAINT enforce_dims_the_geom;")

sql("update da_semplificare set the_geom=st_force_3d(the_geom)")

#aggiorno la z del nodo iniziale a f_elev (attenzione se lavoro con i
gradi)
sql("update da_semplificare set "\
    "the_geom=ST_GeomFromEWKT(overlay(ST_asEWKT(the_geom) "\
    "                                placing cast((f_elev*0.001) as
varchar) "\
    "                                from position(' 0,' in
ST_asEWKT(the_geom))+1 for 1))")

```

```

#aggiorno la z del nodo finale a t_elev (attenzione se lavoro con i gradi)
sql("update da_semplificare set "\
    "the_geom=ST_GeomFromEWKT(overlay(ST_asEWKT(the_geom) "\
    "                                                                placing cast((t_elev*0.001) as
varchar) "\
    "                                                                from position(' 0') in
ST_asEWKT(the_geom))+1 for 1))")

#inverto gli archi con digitalizzazione inversa al senso di percorrenza
sql("update da_semplificare "\
    " set the_geom=ST_reverse(the_geom),"\
    " oneway='FT'"\
    " where oneway='TF'")

#connessione al database
grass("db.connect driver=pg database=host=localhost,dbname=GeoDataBase")
#parametri di connessione al database postgis
grass("db.login driver=pg database=host=localhost,dbname=GeoDataBase
user=ricky password=pappax") #parametri di connessione al database postgis

#importo lo strato postgis in grass
grass("v.in.ogr -z -o 'dsn=PG:host=localhost dbname=GeoDataBase user=ricky'
"\
    "output=da_semplificare_grass
layer=da_semplificare min_area=0.0001 snap=-1") #parametri di connessione
al database postgis

#elimino tutte le colonne non utili in grass
sql("create table da_semplificare_grass_as "\
    "select cat,id_mio "\
    "from da_semplificare_grass; "\
    "drop table da_semplificare_grass; "\
    "ALTER TABLE da_semplificare_grass_ RENAME TO
da_semplificare_grass; ")

#costruisco la polilineea
grass_no_output("v.build.polylines input=da_semplificare_grass
output=semplificata_grass cats=multi ")

#esporto in postgis le geometrie
grass("v.out.ogr input=semplificata_grass type=line "\
    "'dsn=PG:host=localhost dbname=GeoDataBase
user=ricky password=pappax' "\
    "olayer=semplificata layer=1
format=PostgreSQL ")

#aggiungo la colonna nodo nodo
sql("ALTER TABLE da_semplificare "\
    "ADD COLUMN geometria_nodo_nodo geometry; "\
    "update da_semplificare "\
    "set geometria_nodo_nodo=wkb_geometry from
semplificata s where da_semplificare.id_mio=s.id_mio")

##### GESTIONE DEGLI
ATTRIBUTI, NOMI DEI CAMPI
##### GESTIONE DEGLI
ATTRIBUTI, NOMI DEI CAMPI
##### GESTIONE DEGLI
ATTRIBUTI, NOMI DEI CAMPI

```

```

#aggrego le geometrie
sql("create table "+rete_input+"_semplificata as "\
    "select "\
    "    count(gid) as num_ele_aggr, "\

##### INIZIO CAMPI CHE
Ã^ POSSIBILE MODIFICARE DA AGGREGARE
    "    min(id) as id_mult, "\
    "    sum(meters) as meters, "\
    "    min(name) as name, "\
    "    min(oneway) as oneway, "\
    "    avg(kph) as media_kph, "\
    "    sum(minutes) as minutes, "\
    "    min(routenum) as routenum, "\
    "    min.freeway) as freeway, "\
    "    min(tollrd) as tollrd, "\
    "    min(nome_comun) as nome_comun, "\
    "    min(cod_provin) as cod_provin, "\
    "    min(nome_provi) as nome_provi, "\
    "    min(cod_region) as cod_region, "\
    "    min(nome_regio) as nome_regio, "\
    "    min(n_carr) as n_carr, "\
    "    min(n_corsie) as n_corsie, "\
    "    min(capacita) as capacita, "\

##### FINE CAMPI CHE Ã^
POSSIBILE MODIFICARE DA AGGREGARE

    "    ST_union(the_geom) as the_geom "\
    "from da_semplificare "\
    "group by "\
    "    geometria_nodo_nodo; ")

##### INIZIO CAMPI CHE
Ã^ POSSIBILE MODIFICARE PER INTERRUZIONI

##### FINE CAMPI CHE Ã^
POSSIBILE MODIFICARE PER INTERRUZIONI (attenzione, l'ultimo attributo deve
avere il punto e virgola, quelli prima solo la virgola

##### GESTIONE DEGLI
ATTRIBUTI, NOMI DEI CAMPI
##### GESTIONE DEGLI
ATTRIBUTI, NOMI DEI CAMPI
##### GESTIONE DEGLI
ATTRIBUTI, NOMI DEI CAMPI

#aggiungo una chiave primaria
sql("ALTER TABLE "+rete_input+"_semplificata ADD COLUMN gid serial;")
sql("ALTER TABLE "+rete_input+"_semplificata ADD CONSTRAINT
chiave_"+rete_input+"_gid PRIMARY KEY (gid);")

#forzo la geometria in 2d
sql("update "+rete_input+"_semplificata set
the_geom=st_force_2d(the_geom)")

#esporto in shp
comando("pgsql2shp -h localhost -p 5432 -P pappax -u ricky GeoDataBase
"+rete_input+"_semplificata") #parametri di connessione al database postgres

```

```

#rimuovo le mappe in grass
grass("g.remove vect=da_semplificare_grass,semplificata_grass")

#rimuovo le tabelle in postgis
sql("select DropGeometryColumn('public','da_semplificare','the_geom')")
sql("DROP TABLE da_semplificare;")

sql("select DropGeometryColumn('public','semplificata','wkb_geometry')")
sql("DROP TABLE semplificata;")

sql("DROP TABLE "+rete_input+"_semplificata;")

#rimuovere i file temporanei
os.remove("importatore")
os.remove("output_buildpolylinee.txt")
os.remove("PostgresqlQuery.txt")

#riporto le impostazioni iniziali di grass al db dbf (quello di default)
grass("db.connect driver=dbf
database='$GISDBASE/$LOCATION_NAME/$MAPSET/dbf/'")

```

## 7.2 Lo scenario “zero”

Di seguito si riporta una descrizione dettagliata dell’applicazione creata con il software CUBE per le simulazioni dello scenario “zero”.

L’applicazione completa è riportata in Figura 46

Il primo blocco di comandi è composto da un sottomodello NETWORK e nel caso in esame permette di estrarre dal file della rete in input i database contenenti le informazioni relative agli archi e ai nodi della rete iniziale.



**Figura 41** Primo blocco dello scenario "zero"

Lo script del programma è il seguente:



```
RUN PGM=NETWORK MSG='Attributi archi rete non carica'
```

```
FILEI LINKI[1] = {NETI.Q}
FILEO NODEO = {NODEO.Q},
  FORMAT=DBF
FILEO LINKO = {LINKO.Q},
  FORMAT=DBF
```

```
ENDRUN
```

Il secondo blocco permette la creazione della matrice OD nel formato supportato da CUBE a partire da un file in formato .csv:



**Figura 42 Secondo blocco dello scenario "zero"**

Lo script è riportato di seguito:

```
RUN PGM=MATRIX MSG='Matrice in formato adatto'
```

```
FILEI MATI[1] = {MATI1.Q},
  PATTERN=IJ:V FIELDS=#1,2,3
```

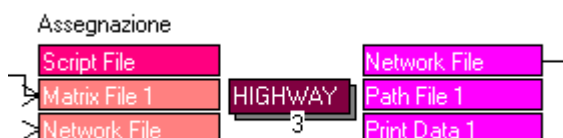
```
FILEO MATO[1] = {MATO.Q},
  MO=1 NAME=TRIPS
```

```
ZONES={zones}
```

```
MW[1]=MI.1.1
```

```
ENDRUN
```

Il passo successivo è l'assegnazione della matrice OD appena creata alla rete. Questa operazione viene eseguita attraverso un sottomodello HIGHWAY:



**Figura 43 Terzo blocco dello scenario "zero"**

Il codice di tale passaggio è:

```
RUN PGM=HIGHWAY MSG='Assegnazione'
```

```
FILEO PATHO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\PERCORSI.PTH"
FILEO PRINTO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\TABTRACEEQUIL.C
SV"
```

```
FILEI NETI = {NETI.Q}
FILEI MATI[1] = {MATI.Q}
FILEO NETO = {NETO.Q}
```

```
PAR MAXITERS={NPATH}
```

```
PROCESS PHASE=LINKREAD
  T0=LI.minutes,
  c=LI.CAPACITA,
  SPEED=LI.KPH,
  DISTANCE=LI.meters
ENDPROCESS
```

```
PROCESS PHASE=ILOOP
  PATHLOAD PATH=COST, VOL[1]=MI.1.1, PATHO=1,NAME='PERCORSO',
  TRACE=(I=1-100&J=1-100) list=I(6),J(6),A(6),B(6),iteration
printO=1 CSV=T
ENDPROCESS
```

```
PROCESS PHASE=ADJUST
function {
cost={cost_fun}
}
PARAMETERS COMBINE=WTD,WEIGHTS=
1 2
, MAXITERS=4,GAP=0.001
ENDPROCESS
```

```
ENDRUN
```

Una volta ottenuta la rete carica, è stato necessario estrarre anche per la nuova rete assegnata i database contenenti le informazioni relative a ciascun arco e nodo in modo tale da avere a disposizione anche i dati dei flussi circolanti sulla rete per poter effettuare le valutazioni successive:



Figura 44 Quarto blocco dello scenario "zero"

Lo script di quest'ultimo blocco è:

```
RUN PGM=NETWORK MSG='Tabelle attributi rete carica'
```

```
FILEI LINKI[1] = {NETI.Q}
FILEO NODEO = {NODEO.Q},
  FORMAT=DBF
FILEO LINKO = {LINKO.Q},
  FORMAT=DBF
```

```
ENDRUN
```

L'ultimo blocco dello scenario zero è quello che permette il calcolo del costo di mobilità come precisato in precedenza:



**Figura 45** Quinto blocco dello scenario " zero"

Lo script per questo ultimo passaggio è:

```
RUN PGM=MATRIX MSG='Calcolo costo mobilità'
```

```
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\PROGRAMMAINPUTOK\COSTOINIZIALE.D
BF",
FIELDS=A,B,COSTOINIZIA
FILEO PRINTO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\TABTRACEEQUIL.P
RN"
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\RETECARICAEQUIL
ARCHI.DBF"

PAR ZONES=1

loop kk=1, DBI.1.NUMRECORDS
x= DBIReadRecord(1, kk)
vht_2Total=vht_2Total+DI.1.vht_2

endloop

loop k=1, DBI.1.NUMRECORDS
x=DBIReadRecord(1, k)
A=DI.1.A
B=DI.1.B
COSTOINIZIA=vht_2Total
WRITE RECO=1
```

```

endloop
print printo=1 list= 'vht_2Total=', vht_2Total

```

**ENDRUN**

Al termine di questa applicazione, il software CUBE restituisce quindi un file di testo che permette di visualizzare il valore del costo della mobilità per la rete intatta che servirà nei passaggi successivi come confronto con i risultati ottenuti per la rete privata di un arco per volta.

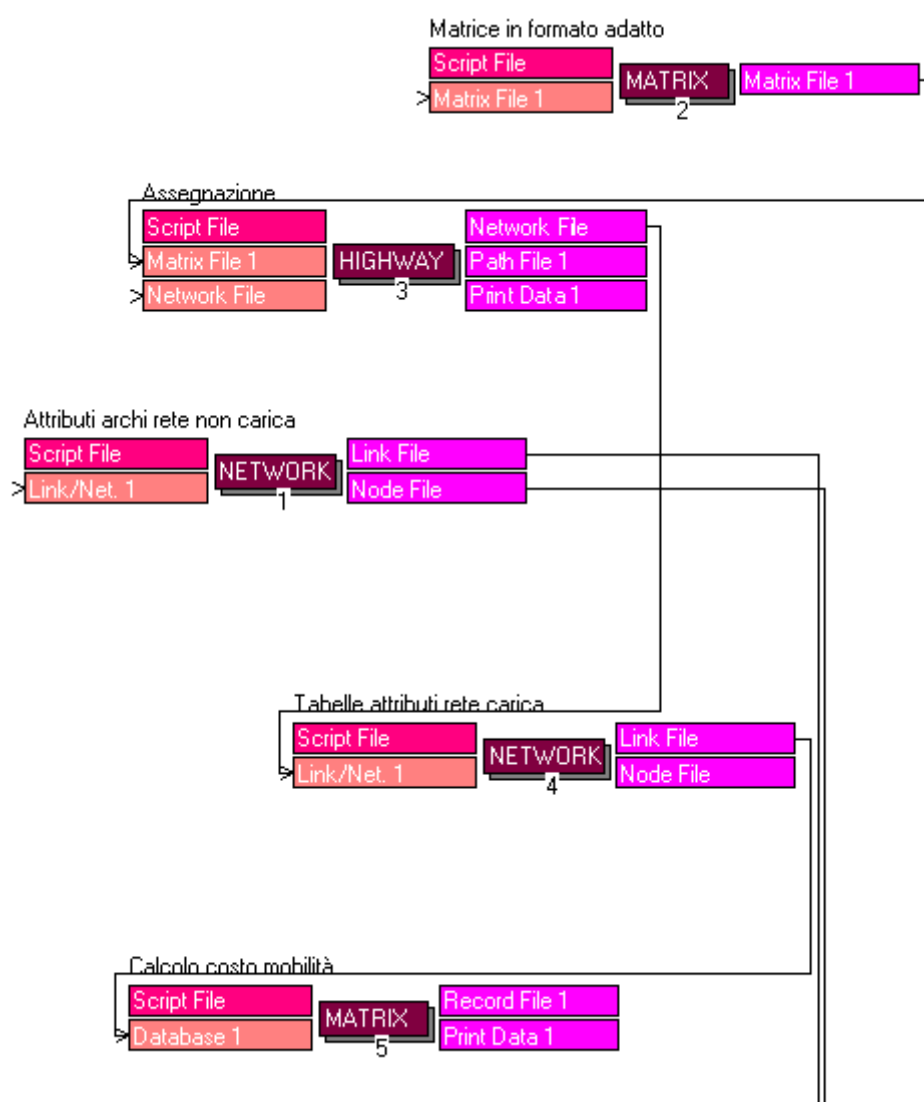


Figura 46 Scenario "zero"

### 7.3 Lo scenario a regime

La procedura implementata per il calcolo dell'indicatore a regime si compone di un ciclo riportato in Figura 58. Il ciclo è composto da differenti sottomodelli ognuno dei quali permette di ottenere specifici risultati. In particolare, il primo modulo costituisce il fulcro centrale del ciclo ovvero permette l'avvio del ciclo stesso (LOOP):

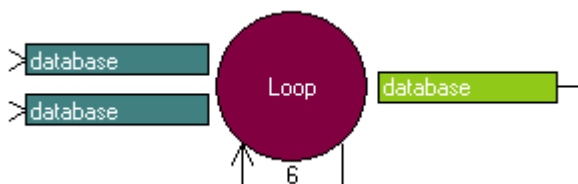


Figura 47 Loop per lo scenario a regime

Il secondo modello è un modulo MATRIX

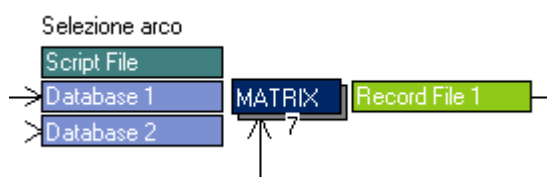


Figura 48 Secondo modello dello scenario a regime

che consente di selezionare un arco differente per ogni giro del ciclo, infatti gli input di tale programma sono due differenti database in formato .dbf: l'uno contenente una tabella con tutti gli archi della rete caratterizzati da un valore di flusso iniziale superiore a 500 veicoli/h (si escludono dal ciclo gli altri archi, in quanto si ipotizza che, a causa del loro utilizzo ridotto presentino valori di vulnerabilità molto bassi) identificati da un numero ID e i nodi iniziali A e finali B e l'altro costituito da un contatore che ad ogni giro del ciclo si aggiorna. Il modulo restituisce come output un database contenente il nodo iniziale A e finale B dell'arco che ha contatore e numero ID uguali. Il codice di lavoro del modulo è riportato di seguito:

```
RUN PGM=MATRIX MSG='Selezione arco'
```

```
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\01LOO00A.DBF"
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\ARCOSELEZ.DBF",
          FIELDS=A,B
```

```
FILEI DBI[2] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\A-B_V100.DBF"
```

```
ZONES=1
```

```
C=DBIReadREcord(1,1)
CONTATORE=DI.1.CONT
```

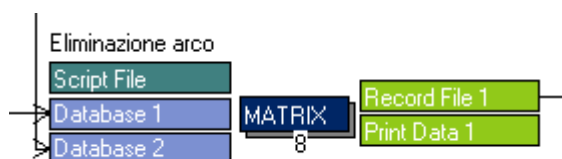
```
C=DBIReadREcord(2,CONTATORE)
```

```
COMP A=DI.2.A
COMP B=DI.2.B
```

```
WRITE RECO=1
```

**ENDRUN**

Il terzo modulo è nuovamente un modulo MATRIX che consente la creazione di un database, con tutte le caratteristiche degli archi necessarie in seguito, a partire dal database relativo agli archi della rete iniziale e il database dell'arco selezionato precedentemente ricavato. Il risultato finale è un database contenente tutti gli archi tranne quello selezionato.



**Figura 49 Terzo modulo dello scenario a regime**

Di seguito si riporta lo script:

```
RUN PGM=MATRIX MSG='Dbf senza arco'
```

```
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\ARCOSELEZ.DBF"
```

```
FILEO PRINTO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\KPHNULLOARCHI.T
XT"
```

```
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\KPHNULLOARCHI.D
BF",
```

```
FIELDS=A,B,FID_1,ID_RIDOTTO,METERS,LUNGH_TOT,ONEWAY,KPH,MINUTES,CAPACITA,CO
NNETTORI,DIREZIONE
```

```
FILEI DBI[2] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\RETEINIZARCHI.D
BF"
```

```
ZONES=1
```

```
C=DBIReadREcord(1,1)
N_A=DI.1.A
```

```

N_B=DI.1.B

LOOP K=1, DBI.2.NUMRECORDS
C=DBIReadRecord(2,K)

A= DI.2.A
B= DI.2.B
FID_1=DI.2.FID_1
ID_RIDOTTO= DI.2.ID_RIDOTTO
METERS= DI.2.METERS
LUNGH_TOT=DI.2.LUNGH_TOT
ONEWAY=DI.2.ONEWAY
KPH= DI.2.KPH
MINUTES= DI.2.MINUTES
CAPACITA= DI.2.CAPACITA
CONNETTORI= DI.2.CONNETTORI
DIREZIONE= DI.2.DIREZIONE

IF (A=N_A & B=N_B)
  CONTINUE
ENDIF

WRITE RECO=1
PRINT LIST=A(10), B(10), CAPACITA(10) PRINTO=1

ENDLOOP

ENDRUN

```

Grazie al risultato dell'ultimo modulo ed ad un database contenente informazioni sui nodi ricavabile facilmente dalla rete di partenza (si veda il modulo 1 dello scenario zero), il quarto modulo consente la creazione di una rete privata dell'arco selezionato. Il modulo è un NETWORK

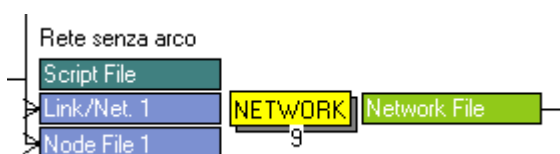


Figura 50 Quarto modulo dello scenario a regime

che presenta il seguente script:

```

RUN PGM=NETWORK MSG='Creazione rete senza arco'

FILEI LINKI[1] = {LINKI.Q}
FILEI NODEI[1] = {NODEI.Q}
FILEO NETO = {NETO.Q}
  ZONES={zones}

ENDRUN

```

Nel quinto modulo si assegna la matrice OD alla rete appena creata e privata di un arco. Come già anticipato, l'assegnazione è di tipo deterministico, ovvero si ipotizza che tutti gli utenti scelgano un unico percorso per spostarsi da una origine O ad una destinazione D, e all'equilibrio. L'assegnazione viene eseguita tramite un modulo HIGHWAY



**Figura 51** Quinto modulo dello scenario a regime

con il seguente script:

```
RUN PGM=HIGHWAY MSG='Assegnazione a rete senza arco'
```

```
FILEO PRINTO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\TABTRACEKPHNULL
O.CSV"
```

```
FILEI NETI = {NETI.Q}
FILEI MATI[1] = {MATI.Q}
FILEO NETO = {NETO.Q}
```

```
PAR MAXITERS={NPATH}
```

```
PROCESS PHASE=LINKREAD
  T0=LI.minutes,
  c=LI.CAPACITA,
  SPEED=LI.KPH,
  DISTANCE=LI.meters
```

```
ENDPROCESS
```

```
PROCESS PHASE=ILOOP
  PATHLOAD PATH=COST, VOL[1]=MI.1.1,
  TRACE=(I=1-100&J=1-100) list=I(6),J(6), Iteration,
  A(6),B(6),VOL[1],LI.CAPACITA,LI.minutes,TIME printO=1 CSV=T
```

```
ENDPROCESS
```

```
PROCESS PHASE=ADJUST
function {
cost={cost_fun}
}
PARAMETERS COMBINE=WTD,WEIGHTS=
1 2
, MAXITERS=4,GAP=0.001
```

```
ENDPROCESS
```

```
ENDRUN
```



Una volta eseguita l'assegnazione, il ciclo prevede l'estrazione dalla rete assegnata delle tabelle contenenti le informazioni riferite agli archi ed ai nodi. Questa operazione viene eseguita attraverso un modulo NETWORK

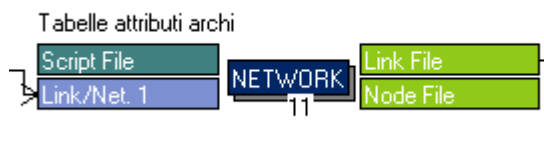


Figura 52 Sesto modulo dello scenario a regime

che richiede in input la rete assegnata e restituisce come output due database con le informazioni appena descritte:

```
RUN PGM=NETWORK MSG='Tabelle attributi archi'
```

```
FILEI LINKI[1] = {NETI.Q}
FILEO NODEO = {NODEO.Q},
FORMAT=DBF
FILEO LINKO = {LINKO.Q},
FORMAT=DBF
```

```
ENDRUN
```

Il modulo successivo permette il calcolo vero e proprio dell'indicatore ovvero il valore del costo di mobilità associato alla rete privata dell'arco selezionato. Esso è costituito da un modulo MATRIX che ha come input tre differenti database: la tabella con le caratteristiche degli archi appena ricavata tramite il modulo precedente, il contatore e l'arco selezionato. L'output di questo modulo è un database contenente il contatore, il valore di A e di B dell'arco selezionato e il costo della mobilità.

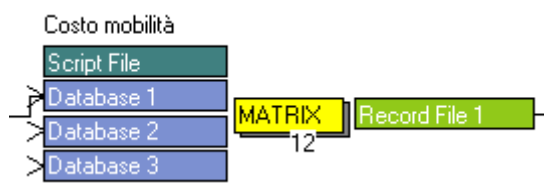


Figura 53 Settimo modulo dello scenario a regime

Lo script per il calcolo è il seguente:

```
RUN PGM=MATRIX MSG='Costo mobilità'
```

```
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\RETECARICAKPHNU
LLOARCHI.DBF"
FILEI DBI[2] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\01LOO00A.DBF"
FILEI DBI[3] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\ARCOSELEZ.DBF"
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\INDICATORE1ARCO
.DBF",
          FIELDS=CONT,A,B,vht_2Total
```

```
PAR ZONES=1
```

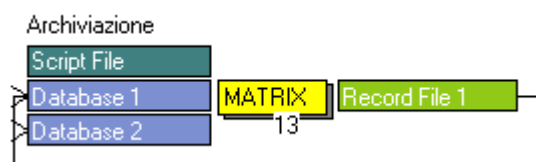
```
loop kk=1, DBI.1.NUMRECORDS
x= DBIReadRecord(1, kk)
vht_2Total=vht_2Total+DI.1.vht_2
endloop
```

```
C=DBIReadREcord(2,1)
CONT=DI.2.CONT
```

```
C=DBIReadREcord(3,1)
A=DI.3.A
B=DI.3.B
```

```
WRITE RECO=1
ENDRUN
```

I successivi due moduli permettono l'archiviazione dei risultati in una tabella che riporta per ciascun arco il valore dell'indicatore calcolato.



**Figura 54** Ottavo modulo dello scenario a regime



**Figura 55** Nono modulo dello scenario a regime

Di seguito si riporta nell'ordine lo script dei due moduli MATRIX:

```
RUN PGM=MATRIX MSG='Archiviazione'
```

```
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\TABIND_INCREMENTATO.DBF",
                FIELDS=A,B,vht_2Total
FILEI DBI[2] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\TABIND_AGGIORNATO.DBF"
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\INDICATORE1ARCO.DBF"

ZONES=1

C=DBIReadREcord(1,1)
N_A=DI.1.A
N_B=DI.1.B

LOOP K=1, DBI.2.NUMRECORDS
C=DBIReadRecord(2,K)

A=DI.2.A
B=DI.2.B
vht_2Total=DI.2.vht_2Total

IF (N_A=DI.2.A & N_B=DI.2.B)

vht_2Total=DI.1.vht_2Total

ENDIF

WRITE RECO=1

ENDLOOP

ENDRUN
```

```
RUN PGM=MATRIX MSG='Aggiornamento tabella di archiviazione'
```

```
FILEO RECO[1] = "C:\DOCUMENTS AND
SETTINGS\MICHELA\DOCUMENTI\UNIVERSITÀ\TESI\PROGRAMMAINPUTOK\TABIND_AGGIORNATO.DBF",
                FIELDS=A,B,vht_2Total
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\TABIND_INCREMENTATO.DBF"

ZONES=1

LOOP K=1, DBI.1.NUMRECORDS
C=DBIReadRecord(1,K)

A=DI.1.A
B=DI.1.B
vht_2Total=DI.1.vht_2Total

WRITE RECO=1
```

```
ENDLOOP
```

```
ENDRUN
```

I successivi e ultimi due moduli permettono l'incremento e l'aggiornamento del contatore:

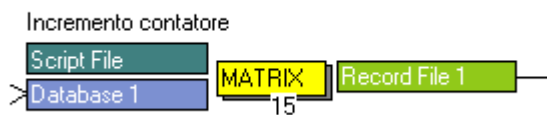


Figura 56 Decimo modulo dello scenario a regime

```
RUN PGM=MATRIX MSG='Incremento contatore'
```

```
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\INCREMENTATO.DB
F",
```

```
        FIELDS=INCR
```

```
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\AGGIORNATO.DBF"
```

```
ZONES=1
```

```
C=DBIReadREcord(1,1)
```

```
COMP INCR=DI.1.CONT+1
```

```
WRITE RECO=1
```

```
ENDRUN
```

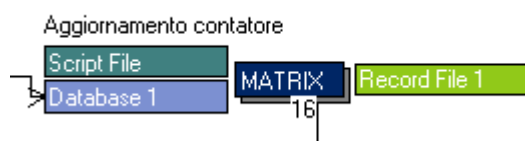


Figura 57 Undicesimo modulo dello scenario a regime

```
RUN PGM=MATRIX MSG='Aggiornamento contatore'
```

```
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\INCREMENTATO.DB
F"
```

```
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaINPUTok\AGGIORNATO.DBF"
,
```

```
        FIELDS=CONT
```

```
ZONES=1
```

```
C=DBIReadREcord(1,1)
```

```
CONT=DI.1.INCR
```

```
WRITE RECO=1
```

```
ENDRUN
```

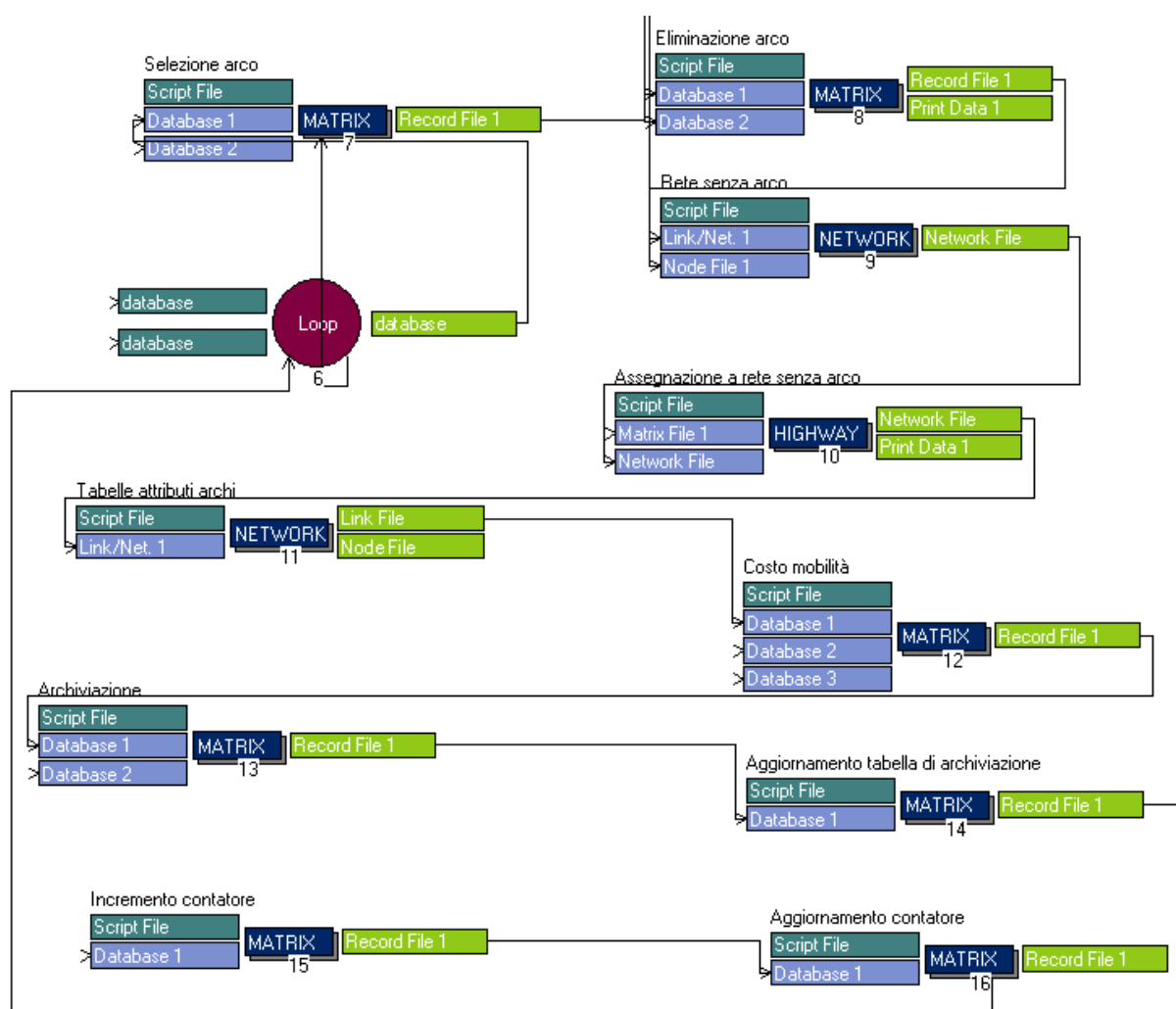


Figura 58 Scenario a regime

Al termine del ciclo sono stati implementati i moduli necessari al calcolo delle varie proposte di indicatore di vulnerabilità analizzate. In particolare, attraverso un modulo MATRIX si calcolano l'aumento di costo assoluto e percentuale fra la rete intatta e quella privata di un arco. Il modulo richiede in input la tabella di archiviazione, risultato del ciclo, e restituisce in output una tabella contenente i valori dell'aumento di costo percentuale e assoluto riferiti a ciascun arco.

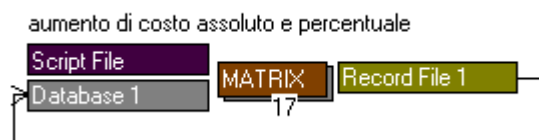


Figura 59 Dodicesimo modulo dello scenario a regime

Lo script di questo modulo è:

```
RUN PGM=MATRIX MSG='Aumento di costo assoluto e percentuale'
```

```
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\PROGRAMMAINPUTOK\DIFFERENZE.DBF"
/
FIELDS=A,B,COSTOINIZIA,COSTOREG,DIFFERENZA,RAPPORTO
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\PROGRAMMAINPUTOK\TABIND_AGGIORNA
TO.DBF"

ZONES=1

LOOP K=1, DBI.1.NUMRECORDS
C=DBIReadRecord(1,K)

A=DI.1.A
B=DI.1.B
COSTOINIZIA=219346
COSTOREG=DI.1.VHT_2TOTAL
DIFFERENZA=DI.1.VHT_2TOTAL-219346
RAPPORTO=((DI.1.VHT_2TOTAL-219346)/219346)*100

WRITE RECO=1

ENDLOOP

ENDRUN
```

Il successivo modulo MATRIX permette di archiviare i risultati e aggiornare la tabella contenente i valori degli indicatori di vulnerabilità.



Figura 60 Tredicesimo modulo dello scenario a regime

Il codice di questo modulo è

```
RUN PGM=MATRIX MSG='Aggiornamento e archiviazione indicatori'
```

```
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\PROGRAMMAINPUTOK\RAPPERC.DBF",
FIELDS=A,B,COSTOINIZIA,COSTOREG,DIFFERENZA,AUMENTOPERC
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\PROGRAMMAINPUTOK\DIFFERENZE.DBF"
```

```
ZONES=1
```

```
LOOP K=1, DBI.1.NUMRECORDS
C=DBIReadRecord(1,K)
```

```
A= DI.1.A
B= DI.1.B
COSTOINIZIA=DI.1.COSTOINIZIA
COSTOREG=DI.1.COSTOREG
DIFFERENZA=DI.1.DIFFERENZA
```

```
IF (DI.1.RAPPORTO<0)
AUMENTOPERC=0
ELSE
AUMENTOPERC=DI.1.RAPPORTO
```

```
ENDIF
WRITE RECO=1
ENDLOOP
```

```
ENDRUN
```

L'ultimo modulo è un modulo NETWORK che consente di inserire nei database associati alla rete i valori degli indicatori di vulnerabilità.



Figura 61 Quattordicesimo modulo dello scenario a regime

Il codice è

```
RUN PGM=NETWORK MSG='Inserimento indicatori nella rete'
```

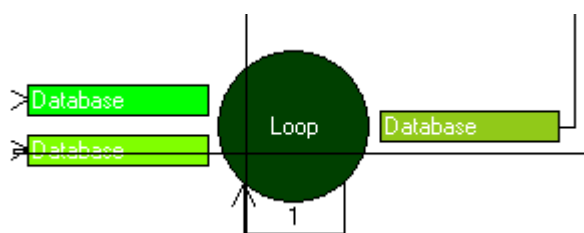
```
FILEI LINKI[1] = {LINKI.Q}
FILEI NODEI[1] = {NODEI.Q}
FILEO NETO = {NETO.Q}
      ZONES={zones}
```

```
ENDRUN
```

## 7.4 Lo scenario in transitorio

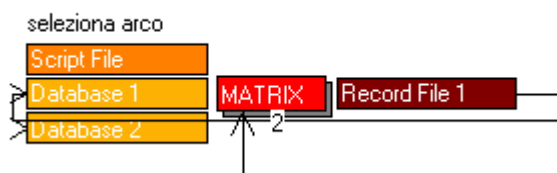
Anche per lo scenario in transitorio è stato implementato un ciclo che è riportato in Figura 74. In particolare, i moduli di cui è composto il ciclo appena inserito relativo alla situazione di transitorio sono descritti di seguito.

Il primo modulo permette l'avvio del ciclo stesso (LOOP);



**Figura 62 Primo modulo dello scenario in transitorio**

Il secondo è un modulo MATRIX che, come nel caso a regime, consente di selezionare un arco differente per ogni giro del ciclo e restituisce un database che ha come campi A (nodo iniziale), B (nodo finale) e un campo A-B.



**Figura 63 Secondo modulo dello scenario in transitorio**

Il codice di tale modulo è

```
RUN PGM=MATRIX MSG='seleziona arco'
```



```

FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Universit \TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI
BP\ARCOSELEZ.DBF",
          FIELDS=A,B,A_B
FILEI DBI[2] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Universit \TESI\programma
BPbisINPUTok\input\A_B.DBF"

FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Universit \TESI\programma
BPbisINPUTok\01LOO00A.DBF"

ZONES=1

C=DBIReadREcord(1,1)
CONTATORE=DI.1.CONT

C=DBIReadREcord(2,CONTATORE)

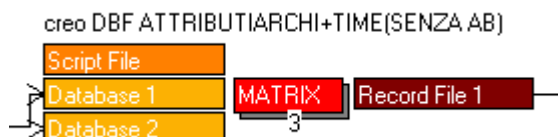
COMP A=DI.2.A
COMP B=DI.2.B
COMP A_B=DI.2.A_B
COMP ID=DI.2.ID

WRITE RECO=1

```

**ENDRUN**

Il terzo modulo è nuovamente un modulo MATRIX che consente la creazione di una tabella contenente gli attributi di tutti gli archi ad esclusione di quello precedentemente selezionato alla quale però viene aggiunto un campo TEMPO che viene riempito con il valore del tempo di percorrenza per ciascun arco calcolato nel caso di rete intatta (si vedano i risultati del modulo di assegnazione dello scenario “zero”). All’interno di questo modulo viene poi creata una variabile ARC\_CHIUSO che contiene in formato di testo il valore del nodo iniziale e finale dell’arco interrotto separati da un trattino come ad esempio 2023-2013.



**Figura 64 Terzo modulo dello scenario in transitorio**

Il codice di testo necessario al funzionamento del blocco in esame è:

```

RUN PGM=MATRIX MSG='creo DBF ATTRIBUTIARCHI+TIME (SENZA AB)'
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Universit \TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI
BP\ARCHISENZA-AB.DBF",

FIELDS=A,B,FID_1,ID_RIDOTTO,METERS,LUNGH_TOT,ONEWAY,KPH,MINUTES,CAPACITA,CO
NNETTORI,DIREZIONE,TEMPO

FILEI DBI[2] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Universit \TESI\programma
BPbisINPUTok\input\RETECARICAEQUILARCHI.DBF"
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Universit \TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI
BP\ARCOSELEZ.DBF"

ZONES=1

C=DBIReadREcord(1,1)
N_A=DI.1.A
N_B=DI.1.B
COMP ARC_CHIUSO=DI.1.A_B

LOG VAR=ARC_CHIUSO

LOOP K=1, DBI.2.NUMRECORDS
C=DBIReadRecord(2,K)

A= DI.2.A
B= DI.2.B
FID_1=DI.2.FID_1
ID_RIDOTTO= DI.2.ID_RIDOTTO
METERS= DI.2.METERS
LUNGH_TOT= DI.2.LUNGH_TOT
ONEWAY= DI.2.ONEWAY
KPH= DI.2.KPH
MINUTES= DI.2.MINUTES
CAPACITA= DI.2.CAPACITA
CONNETTORI= DI.2.CONNETTORI
DIREZIONE= DI.2.DIREZIONE
TEMPO= DI.2.TIME_2

IF (A=N_A & B=N_B)
    CONTINUE
ENDIF

WRITE RECO=1

ENDLOOP

ENDRUN

```

Una volta ottenuto il database contenente le informazioni di ciascun arco, è possibile costruire una nuova rete, privata dell'arco selezionato e i cui archi contengono le nuove informazioni

ricavate con il modulo precedente. Tale operazioni vengono eseguite attraverso un modulo NETWORK che, oltre al database appena citato, richiede in input il database relativo ai nodi della rete:



Figura 65 Quarto modulo dello scenario in transitorio

Lo script di questo modulo è:

```
RUN PGM=NETWORK MSG='creazione rete+ tempo'
```

```
FILEI LINKI[1] = {LINKI.Q}
FILEI NODEI[1] = {NODEI.Q}
FILEO NETO = {NETO.Q}
      ZONES={zones}
```

```
ENDRUN
```

Il passaggio successivo permette la definizione della matrice OD dei soli flussi di domanda interessati dal passaggio sull'arco selezionato. È necessario conoscere tali flussi di domanda in quanto sono i soli flussi che, nel fase di transitorio, devono essere deviati su altri percorsi dal momento che si è ipotizzato che i flussi non passanti per l'arco interrotto non hanno la possibilità di modificare il proprio percorso in un lasso temporale così breve. Per eseguire tale operazione è stato implementato un modello HIGHWAY che assegna i flussi di domanda totali alla rete iniziale intatta e permette di estrarre la matrice OD relativa ai flussi assegnati ad un determinato arco selezionato grazie alla funzione di "select link".



Figura 66 Quindi modulo dello scenario in transitorio

Lo script di tale modulo è:

```
RUN PGM=HIGHWAY MSG='creazione matrice ODpassanti'
```

```

FILEO MATO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Universit \TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI
BP\MATODPASSANTI.MAT",
    MO=1 NAME=TRIPS
FILEI NETI = {NETI.Q}
FILEI MATI[1] = {MATI.Q}
FILEO NETO = {NETO.Q}

PAR MAXITERS={NPATH}

PROCESS PHASE=LINKREAD
    T0=LI.minutes,
    c=LI.CAPACITA,
    SPEED=LI.KPH,
    DISTANCE=LI.meters

ENDPROCESS

PROCESS PHASE=ILOOP
    PATHLOAD PATH=COST, VOL[1]=MI.1.1, MW[1]=mi.1.1,
SELECTLINK=(L=@MATRIX.ARC_CHIUSO@), VOL[2]=mw[1] ; load trips

ENDPROCESS

PROCESS PHASE=ADJUST
function {
cost={cost_fun}
}
PARAMETERS COMBINE=WTD,WEIGHTS=
1 2
, MAXITERS=4,GAP=0.001

ENDPROCESS

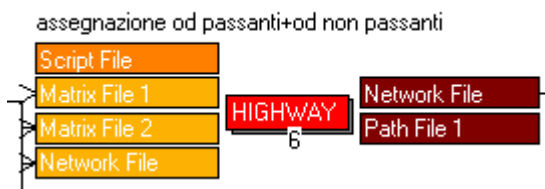
ENDRUN

```

Una volta ottenuta la matrice dei flussi di domanda passanti per l'arco chiuso, non rimane che assegnarla alla rete privata di un arco. Con il seguente modulo si assegna quindi la matrice delle OD passanti per l'arco selezionato alla rete carica mantenendo fissi i percorsi dei flussi di domanda non passanti per l'arco selezionato. Per eseguire tale operazione si utilizza un modulo HIGHWAY che permette di eseguire l'assegnazione separata delle due differenti matrici OD attraverso la definizione di due diverse funzioni di costo: per la matrice contenente i flussi di domanda non interessati dal passaggio per l'arco chiuso la funzione di costo è basata semplicemente sull'attributo TEMPO corrispondente al tempo di percorrenza degli archi nella situazione iniziale di rete intatta (scenario "zero"); mentre per i flussi di domanda interessati dalla chiusura dell'arco la funzione di costo corrisponde direttamente con il tempo di percorrenza a flusso libero ovvero all'attributo MINUTES. Questa scelta permette

di mantenere invariati i flussi non passanti per l'arco selezionato in quanto la scelta del percorso avviene in modo deterministico sulla base del tempo di percorrenza reale della rete ottenuto dopo la prima assegnazione a rete intatta (scenario "zero") e consente di simulare la scelta del percorso degli utenti che sono costretti a variare il proprio percorso iniziale sulla base di un attributo indipendente dalle reali condizioni di traffico presenti sulle strade. Infatti gli utenti in questione, dovendo modificare il proprio percorso, si trovano costretti a scegliere un'alternativa senza conoscere la situazione di congestione degli altri archi e pertanto possono scegliere il loro percorso solamente in base al tempo di percorrenza a libero deflusso.

Gli input di tale modulo sono quindi la matrice delle OD passanti appena valutata, la matrice totale e la rete privata dell'arco selezionato. Come output il modulo restituisce la rete assegnata e un file contenente i percorsi che collegano le varie origini e destinazioni.



**Figura 67** Sesto modulo dello scenario in transitorio

Lo script di tale modulo risulta essere pertanto:

```
RUN PGM=HIGHWAY PRNFILE="C:\DOCUMENTS AND  
SETTINGS\MICHELA\DOCUMENTI\UNIVERSITÀ\TESI\PROGRAMMA BPBISINPUTOK\RISULTATI  
BP\HIGHWAY.PRN" MSG='assegnazione od passanti+od non passanti'
```

```
FILEO PATHO[1] = "C:\Documents and  
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI  
BP\PERCORSIBP.PTH"  
FILEO NETO = "C:\Documents and  
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI  
BP\RETEASSBP.NET",  
INCLUDE=LW.TCONG,  
INCLUDE=LW.FLUSSO,  
INCLUDE=LW.VHT
```

```
FILEI NETI = "C:\Documents and  
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI  
BP\RETETIME.NET"  
FILEI MATI[2] = "C:\Documents and  
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI  
BP\MATODPASSANTI.MAT"  
FILEI MATI[1] = "C:\Documents and  
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma  
BPbisINPUTok\input\MATRICERMAT.MAT"
```

```
PAR MAXITERS=1

PROCESS PHASE=LINKREAD
  T0=LI.minutes,
  c=LI.CAPACITA,
  SPEED=LI.KPH,
  DISTANCE=LI.METERS,
  LINKCLASS=1,
  LW.FLUSSO=VOL[1]+VOL[2],
  LW.TCONG=T0*(1+0.46*(LW.FLUSSO/c)^3),
  LW.VHT=LW.FLUSSO*LW.TCONG/60

ENDPROCESS

PROCESS PHASE=ILOOP

  MW[1]=MI.1.1
  MW[2]=MI.2.1
  MW[3]=MW[1]-MW[2]

  PATHLOAD PATH = COST, VOL[1]=MW[3],
    PATHO=1, NAME='nocambiopercorso',ALLJ=T,
    INCLUDECOSTS=T

  PATHLOAD PATH = COST, VOL[2]=MW[2],
    PATHO=1, NAME='cambiopercorso',ALLJ=T,
    INCLUDECOSTS=T

ENDPROCESS

PROCESS PHASE=ADJUST

function {
  COST[1]=LI.TEMPO
  COST[2]=LI.MINUTES
}
PARAMETERS COMBINE=WTD,WEIGHTS=
1 2
, MAXITERS=4,GAP=0.001

ENDPROCESS

ENDRUN
```

Una volta nota la rete assegnata, è necessario estrarre i file contenenti le informazioni legati agli archi e quindi si utilizza un modulo NETWORK che permette di estrarre i database relativi ai nodi ed agli archi:

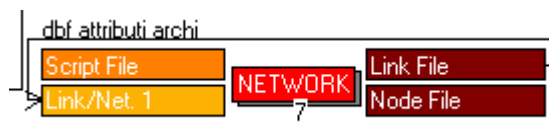


Figura 68 Settimo modulo dello scenario in transitorio

Il codice di tale modulo è il seguente:

```
RUN PGM=NETWORK MSG='dbf attributi archi'
```

```
FILEI LINKI[1] = {NETI.Q}
FILEO NODEO = {NODEO.Q},
  FORMAT=DBF
FILEO LINKO = {LINKO.Q},
  FORMAT=DBF
```

```
ENDRUN
```

A questo punto è possibile procedere al calcolo dell'indicatore vero e proprio. I passaggi per il calcolo di tale indicatore sono sostanzialmente gli stessi di quelli eseguiti per lo scenario a regime ovvero un modulo per il calcolo dell'indicatore riferito ad un arco e due per l'archiviazione dei risultati di tutti gli archi. Di seguito si riportano i moduli e i codici di ciascun modulo.



Figura 69 Ottavo modulo dello scenario in transitorio

```
RUN PGM=MATRIX MSG='calcolo vht totale per 1 arco'
```

```
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Universit \TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI
BP\INDICATOREBP1ARCO.DBF",
  FIELDS=CONT,A,B,vht_1Total
```

```

FILEI DBI[3] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma BPbisINPUTok\risultati
bp\ARCOSELEZ.DBF"
FILEI DBI[2] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma
BPbisINPUTok\01LOO00A.dbf"
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI
BP\ARCHIBPRETECARICA.DBF"

```

```
PAR ZONES=1
```

```

loop kk=1, DBI.1.NUMRECORDS
x= DBIReadRecord(1, kk)
vht_1Total=vht_1Total+DI.1.LW_VHT_1
endloop

```

```

C=DBIReadREcord(2,1)
CONT=DI.2.CONT

```

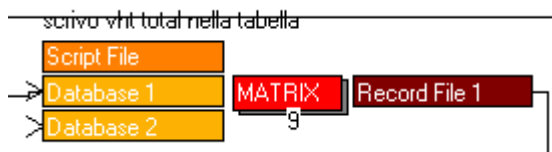
```

C=DBIReadREcord(3,1)
A=DI.3.A
B=DI.3.B

```

```
WRITE RECO=1
```

```
ENDRUN
```



**Figura 70** Nono modulo dello scenario in transitorio

```
RUN PGM=MATRIX MSG='scrivo vht total nella tabella'
```

```

FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI
BP\TABINDBPINCREMENTATO.DBF",
          FIELDS=A,B,vht_1Total
FILEI DBI[2] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma
BPbisINPUTok\input\TABINDBp.DBF"
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI
BP\INDICATOREBP1ARCO.DBF"

```

```
ZONES=1
```

```

C=DBIReadREcord(1,1)
N_A=DI.1.A
N_B=DI.1.B

```

```

LOOP K=1, DBI.2.NUMRECORDS
C=DBIReadRecord(2,K)

```



```

A=DI.2.A
B=DI.2.B
vht_1Total=DI.2.VHT_1TOTAL

IF (N_A=DI.2.A & N_B=DI.2.B)

vht_1Total=DI.1.VHT_1TOTAL

ENDIF

WRITE RECO=1

ENDLOOP

```

**ENDRUN**



**Figura 71 Decimo modulo dello scenario in transitorio**

**RUN PGM=MATRIX MSG='cambio nome tabella'**

```

FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma
BPbisINPUTok\INPUT\TABINDBP.DBF",
      FIELDS=A,B,vht_1Total
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma BPbisINPUTok\RISULTATI
BP\TABINDBPINCREMENTATO.DBF"

ZONES=1

LOOP K=1, DBI.1.NUMRECORDS
C=DBIReadRecord(1,K)

A=DI.1.A
B=DI.1.B
vht_1Total=DI.1.VHT_1TOTAL

WRITE RECO=1
ENDLOOP

ENDRUN

```

Gi ultimi due moduli del ciclo permettono di incrementare e aggiornare il contatore:



Figura 72 Undicesimo modulo dello scenario in transitorio

```
RUN PGM=MATRIX MSG='incrementa'
```

```
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma
BPbisINPUTok\INPUT\INCREMENTATO-BP.DBF",
      FIELDS=INCR
```

```
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma
BPbisINPUTok\INPUT\AGGIORNATO-BP.DBF"
```

```
ZONES=1
```

```
C=DBIReadREcord(1,1)
```

```
COMP INCR=DI.1.CONT+1
```

```
WRITE RECO=1
```

```
ENDRUN
```

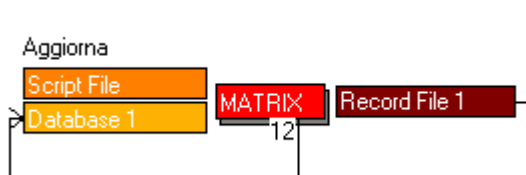


Figura 73 Dodicesimo modulo dello scenario in transitorio

```
RUN PGM=MATRIX MSG='Aggiorna'
```

```
FILEI DBI[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma
BPbisINPUTok\INPUT\INCREMENTATO-BP.DBF"
FILEO RECO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\programma
BPbisINPUTok\INPUT\AGGIORNATO-BP.DBF",
      FIELDS=CONT
```

```
ZONES=1
```

```
C=DBIReadREcord(1,1)
```

```
CONT=DI.1.INCR
```

WRITE RECO=1

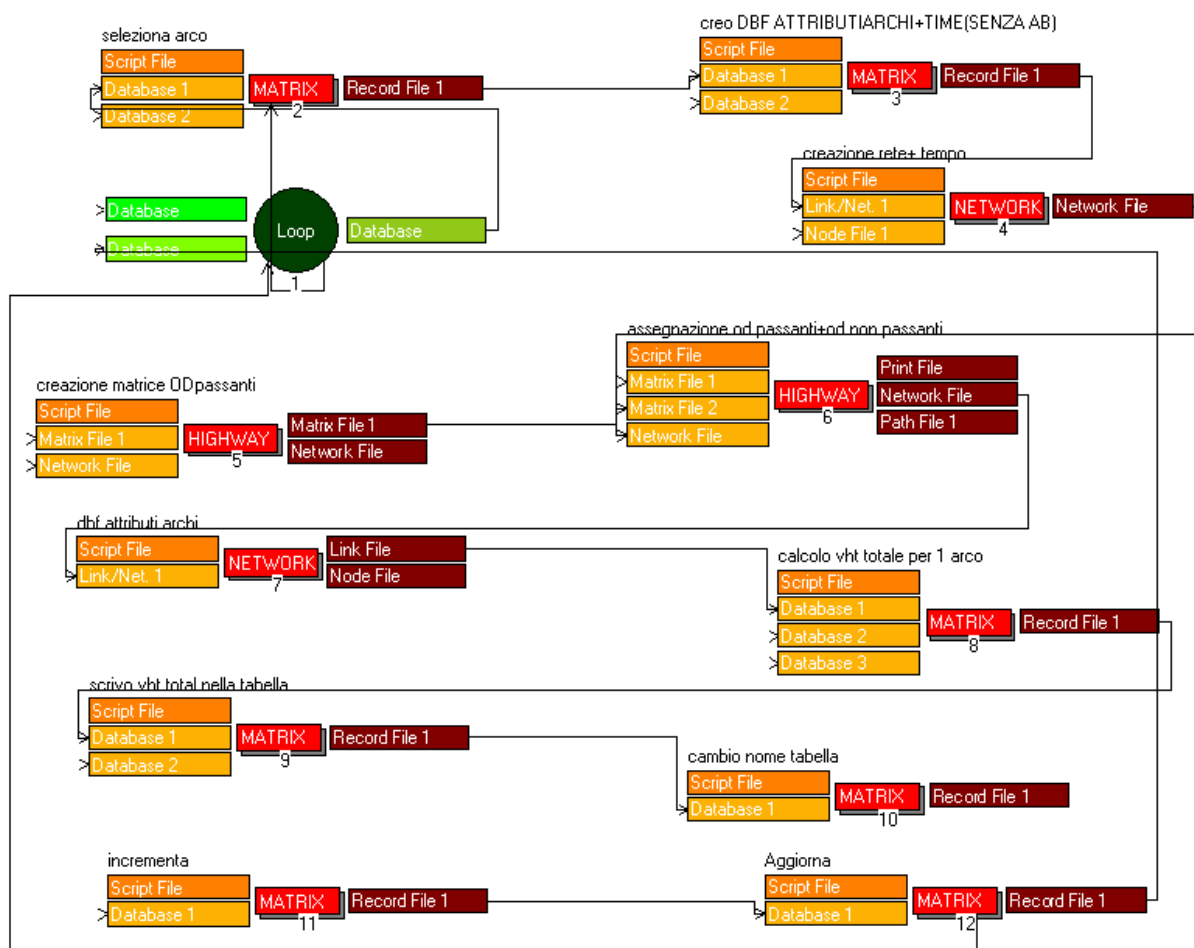
**ENDRUN**

Figura 74 Scenario in transitorio

## 7.5 Il calcolo dell'indicatore di ritardo

Di seguito verranno riportati gli script dei moduli necessari al calcolo dell'indicatore di ritardo che sono differenti rispetto a quanto già presentato per gli scenari a regime e in transitorio.

In particolare, si evidenziano in Figura 79 e Figura 80 i moduli in questione in quanto sono rappresentati con colori differenti e si riporta di seguito la descrizione e gli script di tali moduli.

Il primo modulo per la stima dell'indicatore di ritardo è un modulo HIGHWAY che consente l'assegnazione alla rete privata dell'arco per il quale si sta valutando la vulnerabilità sistemica e di ricavare la matrice dei tempi di percorrenza di ciascun percorso:



Figura 75 Primo modulo per l'indicatore di ritardo

Con script:

```
RUN PGM=HIGHWAY MSG='assegnazione a rete senza arco'
```

```
FILEO PRINTO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaDisagioINPUTok\TABTRACE
KPHNULLO.CSV"
```

```
FILEI NETI = {NETI.Q}
FILEI MATI[1] = {MATI.Q}
FILEO NETO = {NETO.Q}
FILEO MATO[1] = "C:\Documents and
Settings\Michela\Documenti\Università\TESI\ProgrammaDisagioINPUTok\SKIMSENZ
AARCO.MAT",
          MO=1, NAME='SKIMcostosenzaarco'
```

```
PAR MAXITERS={NPATH}
```

```
PROCESS PHASE=LINKREAD
  T0=LI.minutes,
  c=LI.CAPACITA,
  SPEED=LI.KPH,
  DISTANCE=LI.meters
```

```
ENDPROCESS
```

```
PROCESS PHASE=ILOOP
```

```

        PATHLOAD PATH=COST, VOL[1]=MI.1.1, ; load trips
        MW[1]=PATHTRACE(cost), TRACE=(I=1-100&J=1-100) list=I(6),J(6),
Iteration, A(6),B(6),VOL[1],LI.CAPACITA,LI.minutes,TIME printO=1 CSV=T

ENDPROCESS

PROCESS PHASE=ADJUST
function {
cost={cost_fun}
}
PARAMETERS COMBINE=WTD,WEIGHTS=
1 2
, MAXITERS=4,GAP=0.001
ENDPROCESS

```

**ENDRUN**

Con il secondo modulo si calcola la matrice contenente la differenza di tempo fra i percorsi originali e quelli ricalcolati in seguito alla chiusura dell'arco:



**Figura 76 Secondo modulo per l'indicatore di ritardo**

Lo script di tale modulo è:

```
RUN PGM=MATRIX MSG='matrice differenza dei tempi'
```

```

FILEI MATI[1] = {MATI1.Q}
FILEI MATI[2] = {MATI2.Q}

FILEO MATO[1] = {MATO.Q},
      MO=10

MW[1]=mi.1.1
MW[2]=mi.2.1

if ('{operator}'<>'/')
    MW[10]=MW[1]{operator}MW[2]

else
    JLOOP
    if (MW[2]<>0) MW[10]=MW[1]{operator}MW[2]
    ENDJLOOP
ENDIF

```

**ENDRUN**

Il terzo modulo è un modulo che permette di assegnare i valori di vulnerabilità in relazione ai differenti ritardi calcolati:



**Figura 77 Terzo modulo per l'indicatore di ritardo**

Di seguito si riporta il codice:

```
RUN PGM=MATRIX MSG='assegno i valori di vulnerabilità'
```

```
FILEO MATO[1] = "C:\Documents and  
Settings\Michela\Documenti\Universit \TESI\ProgrammaDisagioINPUTok\DISAGIO.  
MAT",
```

```
MO=2
```

```
FILEI MATI[1] = "C:\Documents and  
Settings\Michela\Documenti\Universit \TESI\ProgrammaDisagioINPUTok\SKIMDIFF  
ERENZA.MAT"
```

```
MW[1]=mi.1.1
```

```
jloop
```

```
if (mw [1][j]<0.01)  
    COMP mw[2]=0
```

```
ELSEIF (mw [1][j]>0.01 & mw [1][j]<10)  
    COMP mw[2]=1
```

```
ELSEIF (mw [1][j]>10 & mw [1][j]<30)  
    COMP mw[2]=2
```

```
ELSEIF (mw [1][j]>30 & mw [1][j]<60)  
    COMP mw[2]=3
```

```
ELSEIF (mw [1][j]>60 & mw [1][j]<120)  
    COMP mw[2]=7
```

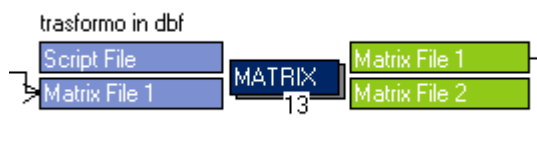
```
ELSEIF (mw [1][j]>120)  
    COMP mw[2]=10
```

```
ENDIF
```

```
ENDJLOOP
```

```
ENDRUN
```

L'ultimo modulo consente di trasformare i risultati fino qui ottenuti in un file .dbf:



**Figura 78** Quarto modulo per l'indicatore di ritardo

```
RUN PGM=MATRIX MSG='trasformo in dbf'
```

```
FILEI MATI[1] = {MATI1.Q}
```

```
FILEO MATO[1] = {MATO1.Q},  
MO=1, FORMAT=DBF, PATTERN=IJ:V
```

```
FILEO MATO[2] = {MATO2.Q},  
MO=1, FORMAT = CSV, PATTERN = IJ:V MAXFIELDS=1
```

```
MW[1]=mi.1.1
```

```
ENDRUN
```

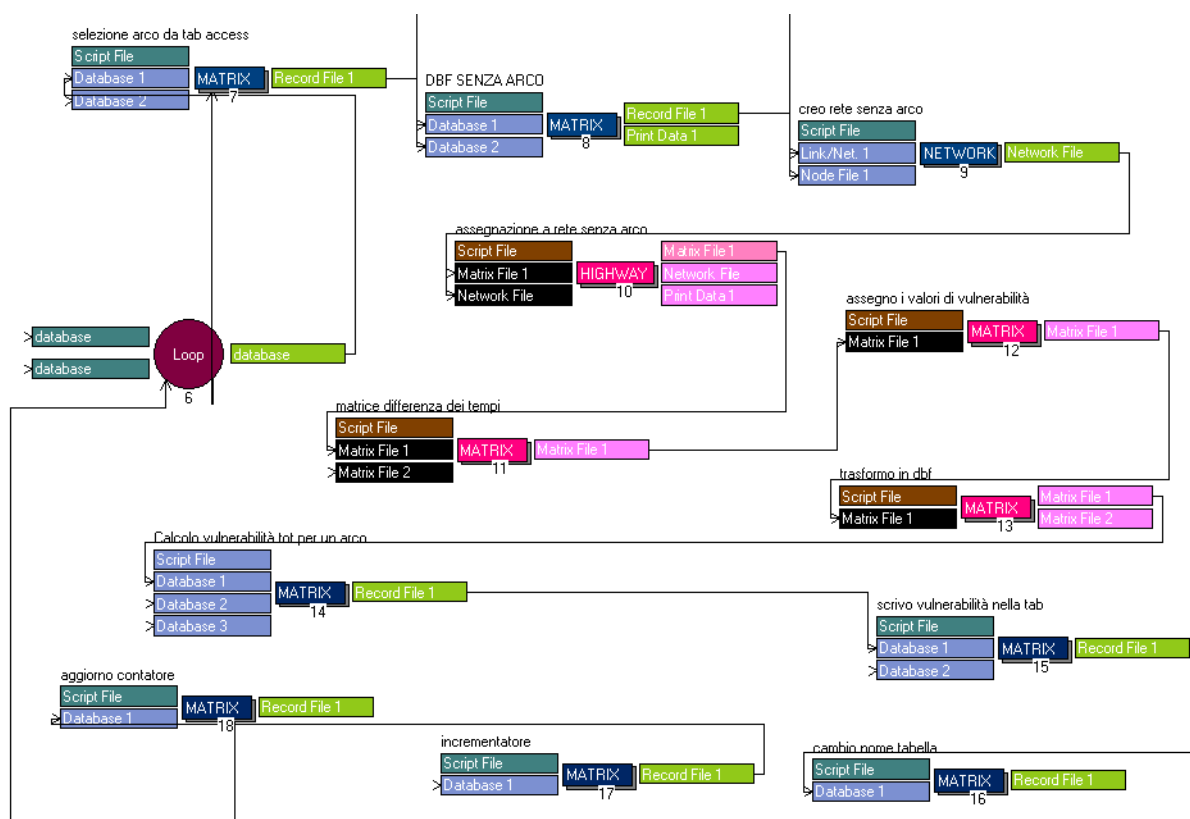


Figura 79 Indicatore di Ritardo a regime.



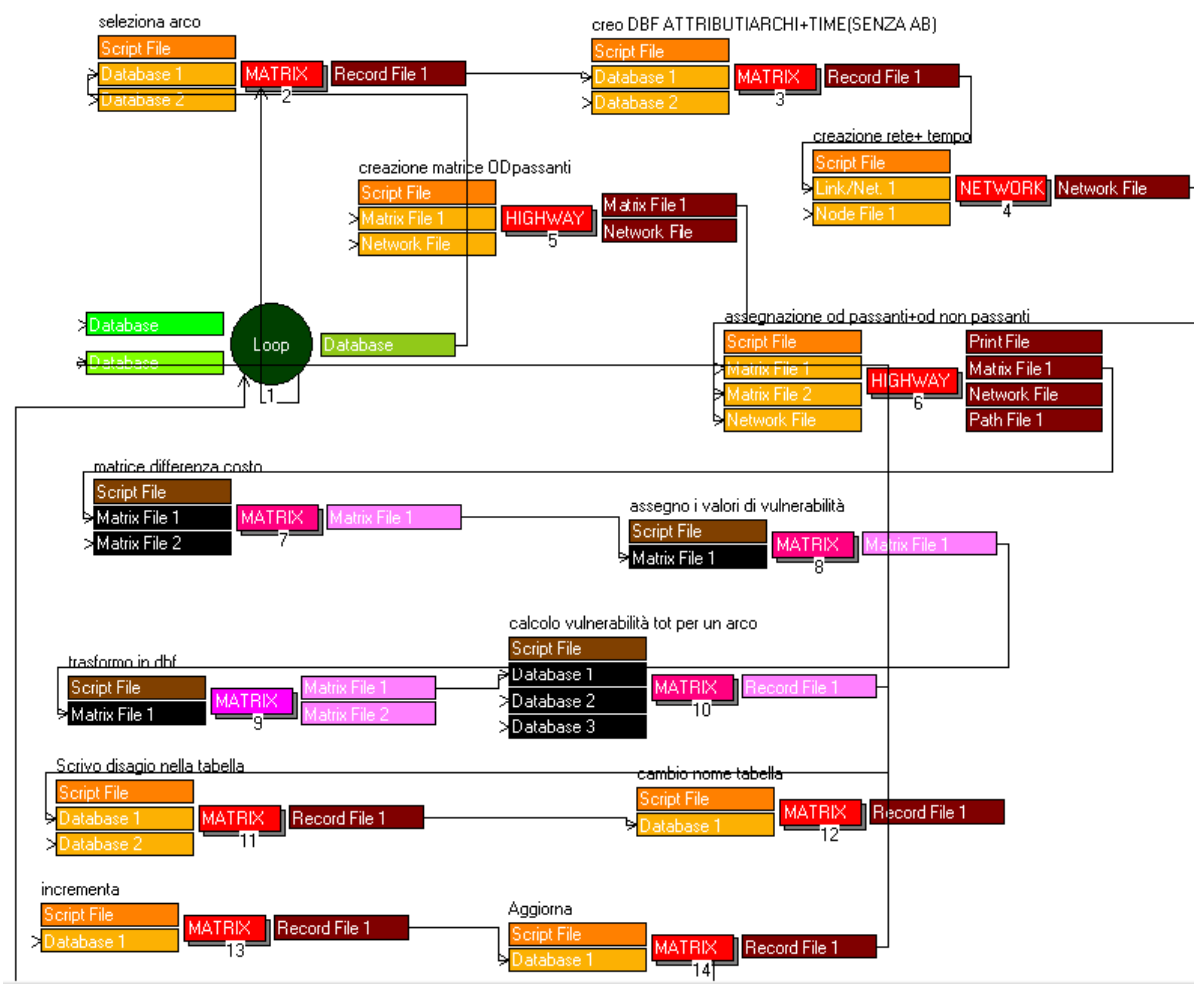


Figura 80 Indicatore di Ritardo in transitorio

## Bibliografia

- [1] Taylor M. A. P., Sekhar S. V. C., D'Este G. M., *Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Network*, Network and Spatial economics, volume 6 number 3-4, settembre 2006, p 267-291
- [2] Jenelius E., Mattsson L. G., *Developing a methodology for road network vulnerability analysis*, Nectar Cluster 1 Seminar, 12<sup>th</sup> – 13<sup>th</sup> May 2006, Molde University College, Molde (Norvegia)
- [3] Jenelius E., *Incorporating Dynamics and Information in a Consequence Model for Road Network Vulnerability Analysis*, The Third International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR), The Hague, The Netherlands, 19-20 luglio 2007
- [4] Jenelius E., Mattsson L. G., *Road network vulnerability analysis of area-covering disruptions: A grid-based approach with case study*, 2009
- [5] Jenelius E., *Secondary link importance: Links as rerouting alternatives during road network disruptions*, the First International Conference on Evacuation Modeling and Management (ICEM), The Hague, The Netherlands, 22-25 settembre 2009
- [6] Jenelius E., Mattsson L.-G., Levinson D. M. *The travel costs of unplanned transport network disruptions: An activity-based modeling approach*, 2009
- [7] Jenelius E., Mattsson L.-G., *The vulnerability of road networks under area-covering disruptions*, INFORMS Annual Meeting, Washington D.C., U.S.A., 12-15 ottobre 2008
- [8] Erath A., Birdsall J., Axhausen K.W, Hajdin R., *Vulnerability Assessment of the Swiss Road Network*

- 
- [9] Husdal J. (2004). *Reliability and vulnerability – a non-issue in cost-benefit analyses?*, Samferdsel (Journal of the Norwegian Institute for Transport Economics), 2/2004, pp. 28-30
- [10] Bengtsson J., Tómasson B, *Vulnerability and risk analysis of the road infrastructure in Reykjavik*, 2008
- [11] Susilawati, S. ; Taylor, Michael A. P. ; Somenahalli, Sekhar V. C., *Travel time variability and reliability (the south road corridor study case)*, Proceedings for the 30th conference of the Australian institute of transport research: CAITR 2008, 1-16
- [12] Husdal J., *The vulnerability of road networks in a cost-benefit perspective* presentato a TRB2005, the Transportation Research Board Annual Meeting 2005, Washington DC, USA, 9-13 Gennaio 2005
- [13] Taylor M. A. P, Susilavati, *The Assessment of the Regional Network Vulnerability: The Case Study of The Green Triangle Region* presentato alla 29th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR) 5-7 Dicembre 2007 Transport System Centre, University of South Australia, Adelaide, Australia
- [14] Berdica K., Andijc Z., Nicholson A. J., *Simulating Road Traffic Interruptions - Does it Matter What Model We Use?*
- [15] Goran B. Tegnér, V.Lucassi, *An Analysis of Urban Road Traffic Safety in Stockholm*, European Transport Conference 1997
- [16] Petreska I., Tomovski I., Gutierrez E., Kocarev L., Bono F., Poljansek K.. *Application of modal analysis in assessing attack vulnerability of complex networks*, Commun Nonlinear Sci Numer Simulat, 2009

- 
- [17] Jenelius E., *Approaches to Road Network Vulnerability Analysis*, Licentiate Thesis, Dept. of Transport and Economics, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm 2007
- [18] Bell M., Kanturska U., Schmocker J. , Fonzone A., *Attacker-defender models and road network vulnerability*, Philosophical Transactions of the royal society 2008
- [19] Jenelius E., *Considering the user inequity of road network vulnerability*. Journal of Transport and Land Use 2010
- [20] Limor Issacharoff, Stefan Lämmer, Vittorio Rosato, Dirk Helbing *Critical Infrastructures Vulnerability The Highway Networks*, Managing Complexity: Insights, Concepts, Applications 2008
- [21] Nicholson A., Zhen Ping Du., *Degradable transportation system an integreted equilibrium model.*, University of Canterbury, Private Bag 4800, Christchurch, New Zealand Transpn Rev.-B. Vol. 31, No. 3, pp. 209-223. 1997
- [22] Jenelius E. *Geography and road network vulnerability regional equity vs. economic efficiency*, the 9th Nectar Conference, Porto, Portugal, May 9-12 2007
- [23] Jenelius E., *Graph Models of Infrastructures and the Robustness of Power Grids* M.Sc. Thesis, Dept. of Mathematics, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm 2004
- [24] Jenelius E., Petersen T., *Importance and exposure in road network vulnerability analysis*, the 8th Nectar Conference, Las Palmas, Spain, June 2-4 2005
- [25] Jenelius E., *Network structure and travel patterns explaining the geographical disparities of road network vulnerability* Journal of Transport Geography, 17(3), pp. 234-244, 2009

- 
- [26] Jenelius E., Petersen T., Mattsson L. G., *Road network vulnerability Identifying important links and exposed regions*, Transport Research Arena, Göteborg, June 12-15 2006
- [27] Cutter S. L., Mitchell J. T., Scott M. S., (2000) *Revealing the vulnerability of people and places: a case study of Georgetown County, South Carolina* Annals of the Association of American Geographers 11, p. 713 – 737
- [28] Scott D. M., Novak D., Aultman-Hall L., (2005) *Network Robustness Index: A New Method for Identifying Critical Links and Evaluating the Performance of Transportation Networks*
- [29] Dalziell E., Nicholson A., *Risk and Impact of Natural Hazards on a Road Network*, J. Transp Enrg Volume 127, Issue2, pp 159-166 ( 2001)
- [30] Husdal J., *The reliability and vulnerability of transportation lifelines*, presented at ETC2004, the European Transport Conference 2004, Strasbourg, France, 4-6 October 2004
- [31] Husdal J., *Transport Network Vulnerability which metrics should be used?*, the NECTAR Cluster 1 Seminar, Molde, Norway, 12-13 May 2006
- [32] Husdal J., *Reliability and vulnerability versus costs and benefits*, ETC2004, the European Transport Conference 2004, Strasbourg, France, 4-6 October 2004
- [33] Di Gangi M., Luongo A., *Transportation network vulnerability indicators for risk evaluation and exposure reduction* 2005
- [34] Cafiso S., Colombritta R., D'Andrea A., Mussumeci G., Colombritta E., Condorelli A., *Un modello GIS per la valutazione del rischio sulle infrastrutture stradali nelle emergenze della protezione civile*, Atti XI Convegno Nazionale SIIV, Società Italiana Infrastrutture Viarie "Progettazione ed adeguamento

- funzionale delle infrastrutture viarie. Occasioni di recupero dell'ambiente e di contributo per la protezione civile", Verona, Italy, 2001
- [35] D'Andrea A., Condorelli A., *Metodologie di valutazione del rischio sismico sulle infrastrutture viarie*, Comitato Tecnico 3.2 "Gestione dei rischi legati alle strade" Associazione Nazionale della Strada – AIPCR – Comitato Nazionale Italiano XXV Convegno Nazionale Stradale, Napoli, 4-7 ottobre 2006
- [36] Cafiso S., Condorelli A., Mussumeci G., *Valutazione del rischio sismico di infrastrutture viarie urbane: analisi funzionale della rete in condizioni di emergenza*, in "Metodologie di valutazione del rischio sismico sulle infrastrutture viarie" Comitato Tecnico 3.2 "Gestione dei rischi legati alle strade" Associazione Nazionale della Strada – AIPCR – Comitato Nazionale Italiano XXV Convegno Nazionale Stradale, Napoli, 4-7 ottobre 2006, p. 69-104;
- [37] Berdica K., *An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done*, Transport Policy 9, 2001, p 117-127
- [38] Berdica K., Eliasson J., *Regional accessibility analysis from a vulnerability perspective*, 2nd International Symposium on Transportation Network Reliability, Queeston and Christchurch, New Zealand, 2004, p 89 – 95;
- [39] Taylor M. A. P., D'Este G. M., *Concepts of network vulnerability and applications to the identification of critical element of transportation infrastructure*, 26nd Australasian Transport Research Forum. Wellington, New Zealand, 1-3 Ottobre 2004;
- [40] Taylor M. A. P., D'Este G. M., *Critical infrastructure and transport network vulnerability: developing a method for diagnosis and assessment*, 2nd International Symposium on Transportation Network Reliability. Queeston and Christchurch, New Zealand, 2004, p 96 – 102;

- 
- [41] Scott D. M., Novak D. C., Aultman-Hall L., Guo F., *A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks*, Journal of transport Geography 14, 2006
- [42] Issacharoff L., Lämmer S., Rosato V., Helbing D., *Critical infrastructures vulnerability: the highway networks*
- [43] [www.istat.it](http://www.istat.it)
- [44] [www.aiscat.it](http://www.aiscat.it)
- [45] Maja R., Bruglieri M., Marchionni G., Ponti M., *Territory vulnerability analysis and support to mobility management during flood events*
- [46] Cattaneo A., *Stima della vulnerabilità sistemica di una rete di trasporto: sviluppo metodologico e applicazione alla viabilità principale italiana*
- [47] Maja R., *Modellizzazione e simulazione dei sistemi di trasporto*
- [48] Cascetta E., *Teoria e metodi dell'ingegneria dei sistemi di trasporto*
- [49] [www.isfort.it](http://www.isfort.it)