

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in

Ingegneria Meccanica



APPROCCIO SIMULATIVO ALL'ANALISI DI RESILIENZA DI SISTEMI DI TRASPORTO IN SCENARI DI CRISI

Relatore: Prof. Paolo TRUCCO

Co-relatore: Prof. Nobuaki MINATO

Tesi di Laurea di:

Nicola Careri Matr. 754775

Anno Accademico 2011 - 2012.

Indice Generale

Sommario	xiii
Introduzione.....	1
Capitolo 1	5
Analisi di resilienza di sistemi socio-tecnici complessi.....	5
1.1 Definizioni.....	6
1.1.1 La resilienza organizzativa e d'impresa	7
1.1.2 La resilienza della <i>supply chain</i>	8
1.1.3 Protezione e resilienza delle infrastrutture critiche	9
1.2 Fasi della Resilienza.....	13
1.3 Capabilities di resilienza	16
1.4 Stato dell'arte su modelli e metodi per la gestione della resilienza.....	18
1.4.1 Analisi di caratterizzazione	20
1.4.2 Analisi di interdipendenza e vulnerabilità	22
1.4.3 Analisi e pianificazione della <i>business continuity</i>	30
1.4.4 Metodologie di pianificazione strategica e operativa della resilienza (<i>resilience strategy & planning</i>)	32
1.5 Posizionamento teorico del presente lavoro.....	34
1.6 Metriche di resilienza.....	40
Capitolo 2	47
Il grande terremoto e tsunami del Marzo 2011 nella regione del Tohoku (Giappone)	47
2.1 Il disastro in cifre	48

2.2 La minaccia di una catastrofe nucleare	49
2.3 Lo stato dei trasporti a seguito del cataclisma	51
2.3.1 Le condizioni del trasporto stradale e su rotaia	52
2.3.2 Le condizioni del sistema di trasporto aereo e l'inondazione dell'aeroporto di <i>Sendai</i>	53
2.3.3 Il ruolo degli aeroporti regionali e dell'aeroporto di Yamagata nella gestione dell'emergenza	57
Capitolo 3	63
Il modello sviluppato.....	63
3.1 Simulazioni processo centriche.....	63
3.2 Software utilizzato per lo sviluppo del modello	65
3.2.1 I moduli fondamentali della libreria " <i>Enterprise</i> "	66
3.3 Descrizione del modello realizzato	70
3.3.1 L'architettura macroscopica del modello	71
3.3.2 Il nodo di trasporto regionale terrestre (" <i>regional</i> ")	72
3.3.3 Il nodo stazione di <i>Yamagata</i> (" <i>yamagata_YamagataAirport</i> ")	78
3.3.4 Il nodo terminal aeroportuale di <i>Yamagata</i> (" <i>terminal</i> ")	81
3.3.5 Il nodo piazzale dell'aeroporto di <i>Yamagata</i> (" <i>apron</i> ")	86
3.3.6 Le entità e le risorse del sistema	93
3.4 Estrapolazione dei dati di input.....	95
3.5 Processo di validazione del modello	101
Capitolo 4.....	106
Analisi di resilienza del sistema	106
4.1 Scenario storico di riferimento (<i>baseline</i>).....	106
4.2 Definizione dei <i>Key Performance Indicator</i> del sistema	110

4.3	Analisi di sensitività sulle risorse.....	114
4.3.1	Trasporto regionale terrestre	115
4.3.2	Collegamento stazione-aeroporto	124
4.3.3	Aeroporto e risorse di trasporto aereo	136
4.4	Mappatura delle risorse del sistema	150
4.4.1	Mappatura delle risorse chiave di resilienza	150
4.4.2	Mappatura delle risorse chiave per il miglioramento prestazionale del sistema	153
	Capitolo 5	158
	Conclusioni.....	158
	Elenco degli acronimi.....	164
	Elenco dei simboli.....	166
	Bibliografia	169
	Appendice A.....	177
	ALLEGATO I.....	CD-ROM

Elenco delle Figure

Figura 1.1 – Istantanea dell’aeroporto di <i>Sendai</i> pochi minuti dopo l’impatto dello tsunami	1
Figura 1.1 – Fasi di resilienza	14
Figura 1.2 – Framework teorico: Attributi e <i>capabilities</i> di resilienza	18
Figura 1.3 – Tassonomia delle tipologie di analisi e fasi di resilienza	20
Figura 1.4 - Esempi di reti esponenziali e <i>scale-free networks</i>	22
Figura 1.5 - Rete di legami tra servizi critici	23
Figura 1.6 - Possibili fattori all’origine del malfunzionamento di una infrastruttura critica.....	25
Figura 1.7 - Numero di legami che ciascun servizio critico propaga e riceve dagli altri	27
Figura 1.8 - Quadro sinottico dei modelli di tipo funzionale presenti in letteratura.....	37
Figura 1.9 – Performance economica di un sistema industriale regionale sottoposto ad un evento destabilizzante	41
Figura 1.10 – Andamento funzione di servizio	43
Figura 1.11 – Struttura di calcolo indicatore qualitativo di resilienza	45
Figura 2.1 - Mappa del sisma del Marzo 2011.....	47
Figura 2.2 - Mappa dei trasporti nel <i>Tohoku</i> prima del sisma	51
Figura 2.3 - Mappa dei trasporti nel <i>Tohoku</i> dopo il sisma	53
Figura 2.4 – Mappa aeroporti giapponesi suddivisi per categoria	54
Figura 2.5 - Volumi di traffico aereo civile nel Tohoku per il triennio 2010-2011-2012	55
Figura 2.6 – Variazione traffico aereo complessivo nel Tohoku a cavallo del disastro	58
Figura 2.7 – Numero di passeggeri partiti dall’aeroporto di Yamagata nel Marzo 2010 e nel Marzo 2011.....	59
Figura 2.8 – Persone che pernottarono nell’aeroporto di Yamagata a seguito del sisma.....	60
Figura 2.9 – Persone in attesa al Terminal di Yamagata.....	61

Figura 2.10 – Persone in coda alla Stazione di Yamagata	61
Figura 3.1 – Elementi funzionali <i>source</i> e <i>sink</i>	66
Figura 3.2 – Elementi funzionali <i>queue</i> e <i>delay</i>	67
Figura 3.3 – Elementi funzionali <i>service</i> e <i>resource pool</i>	68
Figura 3.4 – Elementi funzionali <i>hold</i> e <i>select output</i>	68
Figura 3.5 – Elementi funzionali <i>pick-up</i> e <i>drop-off</i>	69
Figura 3.6 – Elementi funzionali <i>split</i> e <i>combine</i>	69
Figura 3.7 – Schermata di navigazione del sistema nel suo complesso.....	74
Figura 3.8 – Schermata di navigazione del nodo “ <i>regional</i> ”	76
Figura 3.9 - Distribuzione beta e distribuzione triangolare a confronto	77
Figura 3.10 - Schermata di navigazione del nodo “ <i>yamagata_YamagataAirport</i> ”	82
Figura 3.11 - Schermata di navigazione del nodo <i>terminal</i>	84
Figura 3.12 - Schermata di navigazione del nodo “ <i>airside</i> ”	87
Figura 3.13 – Sequenza delle operazioni di scalo	89
Figura 3.14 - Schermata di navigazione sezione “ <i>apron_operations</i> ”	90
Figura 3.15 – Andamento temporale della performance giornaliera del sistema di trasporto su ruota e dei tassi di arrivo giornalieri di primo tentativo e definitivi	98
Figura 3.16 – Confronto grafico tra dato storico sul <i>throughput</i> ed output medio del modello.....	102
Figura 3.17 - Confronto grafico tra dato storico sulle code a fine giornata nel terminal di <i>Yamagata</i> ed output medio del modello	103
Figura 4.1 – Baseline code presso le stazioni di Sendai, Sakata-Tsuruoka, Niigata.....	107
Figura 4.2 - Baseline dei flussi di passeggeri nel sistema.....	108
Figura 4.3 – Baseline tempi medi di attesa sistema bus regionali	109
Figura 4.4 - Baseline tempi medi di attesa stazione di Yamagata	109
Figura 4.5 – Baseline tempi di attesa medi terminal di Yamagata.....	109
Figura 4.6 - Baseline coefficiente globale di vulnerabilità dell’attesa per l’intero sistema di trasporto	111
Figura 4.7 - Baseline coefficiente globale di vulnerabilità di trasporto	113

Figura 4.8 – Rappresentazione triangolare degli indici di prestazione del sistema	114
Figura 4.9 – Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus regionali disponibili	116
Figura 4.10 – Code complessive nodi di trasporto regionale a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus regionali disponibili	117
Figura 4.11 - Code complessive nodo terminal a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus regionali disponibili	117
Figura 4.12 – Andamento indicatore vulnerabilità di trasporto a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus regionali disponibili	118
Figura 4.13 – Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di un aumento del numero massimo di bus regionali disponibili	119
Figura 4.14 - Code complessive nodi di trasporto regionale a fronte di un aumento del numero massimo di bus regionali disponibili.....	119
Figura 4.15 - Code complessive nodo terminal a fronte di un aumento del numero massimo di bus regionali disponibili	120
Figura 4.16 – Diagramma delle prestazioni complessive con utilizzo di bus regionali da 78 posti.....	121
Figura 4.17 - Indice globale di vulnerabilità dell’attesa con utilizzo di bus regionali da 78 posti.....	121
Figura 4.18 - Code complessive nodo terminal con utilizzo di bus regionali da 78 posti.....	122
Figura 4.19 – Quadro sinottico della variazione di prestazioni con +/- 10% di disponibilità risorse di trasporto regionale terrestre.....	123
Figura 4.20 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con +/-20% di disponibilità risorse di trasporto regionale terrestre.....	123
Figura 4.21 – Variazione code a fine giornata presso terminal di <i>Yamagata</i> con delta +/- 10%, +/- 20% sulle risorse di trasporto ed incremento della capacità dei bus	124
Figura 4.22 - Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus navetta disponibili	125
Figura 4.23 - Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di un aumento del numero massimo di bus navetta disponibili	125
Figura 4.24 – Andamento indicatore vulnerabilità di trasporto a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus navetta disponibili	126

Figura 4.25 - Code complessive nodo stazione a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus navetta disponibili	126
Figura 4.26 - Code complessive nodo terminal a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus navetta disponibili	127
Figura 4.27 - Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di un aumento del numero massimo di bus regionali disponibili	128
Figura 4.28 - Code complessive nodo stazione a fronte di un aumento del numero massimo di bus navetta disponibili	128
Figura 4.29 - Code complessive nodo terminal a fronte di un aumento del numero massimo di bus navetta disponibili	129
Figura 4.30 - Andamento indicatore vulnerabilità di trasporto a fronte di un aumento del numero massimo di bus navetta disponibili	129
Figura 4.31 - Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di un aumento della soglia di tolleranza nella scelta del mezzo da parte del passeggero	130
Figura 4.32 - Indice globale di vulnerabilità di trasporto a fronte di un aumento della soglia di tolleranza nella scelta del mezzo da parte del passeggero	131
Figura 4.33 - Indice globale di vulnerabilità dell'attesa a fronte di un aumento della soglia di tolleranza nella scelta del mezzo da parte del passeggero	131
Figura 4.34 - Code complessive nodo stazione a fronte di un aumento della soglia di tolleranza nella scelta del mezzo da parte del passeggero	132
Figura 4.35 - Code complessive nodo terminal a fronte di un aumento della soglia di tolleranza nella scelta del mezzo da parte del passeggero	132
Figura 4.36 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con variazioni del numero massimo di ciascun tipo di navetta di +/- 1	133
Figura 4.37 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con variazioni del numero massimo di ciascun tipo di navetta di +/- 2	133
Figura 4.38 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con variazioni del numero massimo di ciascun tipo di navetta di +/- 3	134
Figura 4.39 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con variazioni del numero massimo di ciascun tipo di navetta di +5 e +10	134
Figura 4.40 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con soglia di tolleranza della coda da parte dell'utente di 400, 800 e 1600 persone	135
Figura 4.41 - Variazione code presso la stazione e il terminal di <i>Yamagata</i> con soglia di tolleranza della coda da parte dell'utente di 400, 800 e 1600 persone	135

Figura 4.42 - Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di una diminuzione delle risorse addette al check-in	136
Figura 4.43 - Distribuzione nelle 20 giornate considerate del tempo di attesa medio dei passeggeri che usufruiscono del servizio di trasporto aereo a fronte di una diminuzione delle risorse addette al check-in	137
Figura 4.44 – Passeggeri partiti da terminal di Yamagata a fronte di una diminuzione delle risorse addette al check-in	137
Figura 4.45 - Code complessive nodo terminal a fronte di una diminuzione delle risorse addette al check-in	138
Figura 4.46 - Diagramma delle prestazioni globali a fronte di un aumento delle risorse per il check-in	138
Figura 4.47 - Diagramma delle prestazioni globali a fronte di un aumento delle risorse addette al setting a terra e alla manutenzione ordinaria dei velivoli	139
Figura 4.48 –Algoritmo utilizzato per la definizione dello <i>scheduling</i> nel caso di variazione nel numero di velivoli disponibili.....	141
Figura 4.49 – Distribuzione sui 20 giornate considerate del tempo di attesa medio dei passeggeri che usufruiscono del servizio di trasporto aereo a fronte di una diminuzione nel numero massimo di E70 o M90 o B767 o CRJ disponibili	144
Figura 4.50 - Code complessive nodo terminal a fronte di una diminuzione unitaria nel numero massimo di E70 o M90 o B767 o CRJ disponibili	144
Figura 4.51 - Passeggeri partiti da terminal di Yamagata a fronte di una diminuzione unitaria nel numero massimo di E70 o M90 o B767 o CRJ disponibili.....	145
Figura 4.52 - Code complessive nodo terminal a fronte di un aumento unitario nel numero massimo di E70 o M90 o B767 disponibili.....	146
Figura 4.53 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con delta di +/- 1 sulle risorse addette al check-in dei passeggeri.....	146
Figura 4.54 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con delta di +/- 3 sulle risorse addette al check-in dei passeggeri.....	147
Figura 4.55 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con delta di +/- 5 sulle risorse addette al check-in dei passeggeri.....	147
Figura 4.56 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con incremento di 1 e 2 unità sulle risorse addetta al setting a terra dei velivoli	148

Figura 4.57 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni a fronte di un decremento unitario nel numero massimo di CRJ o E70 o M90 o B767 disponibili.....	148
Figura 4.58 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni a fronte di un incremento unitario nel numero massimo di E70 o M90 o B767 disponibili ...	149
Figura 4.59 – Quadro sinottico della variazione indotta sui KPI da una diminuzione delle risorse del sistema	151
Figura 4.60 - Quadro sinottico della variazione indotta sui KPI da una diminuzione nella disponibilità delle risorse del sistema con indicazione delle variazioni delle code presso terminal di <i>Yamagata</i>	152
Figura 4.61 - Quadro sinottico della variazione indotta sui KPI da un aumento nella disponibilità delle risorse del sistema.....	155
Figura 4.62 - Quadro sinottico della variazione indotta sui KPI da un aumento nella disponibilità delle risorse del sistema.....	156
Figura 4.63 - Quadro sinottico della variazione indotta sui KPI da un aumento nella disponibilità delle risorse del sistema con indicazione delle variazioni delle code presso terminal di <i>Yamagata</i>	157

Elenco delle Tabelle

Tabella 1.1 - Settori e servizi critici per la società olandese	10
Tabella 1.2 - Infrastrutture Critiche	10
Tabella 1.3 – Valutazione qualitative <i>capabilities</i> modellistiche	39
Tabella 2.1 - Dati prefetture del <i>Tohoku</i>	48
Tabella 3.1 – Vincolo sul numero massimo di bus disponibili per giornata [72]	73
Tabella 3.2 – Distribuzione di probabilità delle origini dei passeggeri	73
Tabella 3.3 - Parametri che definiscono le distribuzioni <i>beta</i> dei tempi di trasferimento dei bus di trasporto regionale.....	78
Tabella 3.4 – Probabilità che un’entità passeggero proveniente da <i>regional</i> acceda al servizio di trasporto aereo.	79
Tabella 3.5 - Parametri che definiscono le distribuzioni <i>beta</i> dei tempi di viaggio dei mezzi navetta.....	81
Tabella 3.6 – Parametri caratterizzanti l’elemento funzionale <i>ticketing</i>	83
Tabella 3.7 - Parametri caratterizzanti l’elemento funzionale <i>check-in</i>	85
Tabella 3.8 - Parametri caratterizzanti l’elemento funzionale <i>security_screening</i>	86
Tabella 3.9 - Parametri caratterizzanti l’elemento funzionale <i>boarding</i>	86
Tabella 3.10 - Parametri caratterizzanti l’elemento funzionale <i>landing_taxiing_appToPier</i>	88
Tabella 3.11 - Parametri caratterizzanti i processi rappresentati nella sezione <i>apron_operations</i>	89
Tabella 3.12 - Parametri caratterizzanti i processi rappresentati nella sezione <i>airside</i>	91
Tabella 3.13 - Piano dei voli effettuati dall'aeroporto di Yamagata tra il 12 e il 31 Marzo 2011	92
Tabella 3.14 – Caratteristiche velivoli utilizzati da JAL per voli sullo scalo di Yamagata tra 12 e 31 Marzo 2011	93
Tabella 3.15 - Attributi della classe di entità <i>passenger</i>	94
Tabella 3.16 - Attributi della classe di entità <i>passenger</i>	94

Tabella 3.17 - Attributi della classe di entità <i>passenger</i>	95
Tabella 3.18 – Risultati finali del processo di calibrazione	100
Tabella 3.19 – MSE e MSPE relativi a code a fine giornata presso il terminal e <i>throughput</i> del sistema di trasporto aereo.	104
Tabella 3.20 - Risultato dei test di normalità dei residui sul <i>throughput</i> del sistema di trasporto aereo.....	105
Tabella 4.1 - Valori coefficiente di vulnerabilità dell’attesa.....	111
Tabella 4.2 – Valori coefficiente vulnerabilità di trasporto	112
Tabella 4.3 - Slot aerei trasferiti all'aeroporto di <i>Yamagata</i> a seguito della chiusura dell'aeroporto di <i>Sendai</i>	142
Tabella 4.4 - Diagramma delle prestazioni globali a fronte di una diminuzione nel numero massimo di E70,M90,B767 e CRJ disponibili.....	143

Sommario

Incrementare la resilienza di sistemi di infrastrutture al fine di limitare le conseguenze di eventi catastrofici e distruttivi, rappresenta uno dei temi maggiormente attuali nell'ambito del *Risk Management* e del *Disaster Management*. Il presente lavoro di tesi, inserito all'interno del progetto internazionale di ricerca CMAC, ha come obiettivo quello di capitalizzare quanto emerso dalla drammatica esperienza del grande terremoto e tsunami del Marzo 2011 in Giappone. In particolare si è preso in esame il caso dell'aeroporto della città di *Yamagata*, che contribuì in modo fondamentale all'eccellente prestazione in termini di resilienza del sistema di trasporto aereo regionale del *Tohoku* a fronte del cataclisma. Si è dunque sviluppato un modello di simulazione ad eventi discreti che fosse in grado di cogliere nel dettaglio le dimensioni operative e gestionali dell'oggetto analizzato. Il primo passo del lavoro è stato condurre una ricerca bibliografica sistematica riguardante sia le esistenti definizioni e gli attributi noti di resilienza, sia lo stato dell'arte dei modelli e gli strumenti attraverso cui il tema viene studiato in letteratura. Si è quindi proceduto allo sviluppo progressivo del modello dell'aeroporto di *Yamagata* e dei sistemi di trasporto terrestre ad esso connessi sulla base di informazioni tratte dal confronto con *stakeholder* direttamente coinvolti nella gestione del cataclisma del Marzo 2011 e mediante misurazioni sul campo di dati quantitativi. Al fine di fornire uno strumento di supporto decisionale a decisori e *policy makers*, dopo aver calibrato e validato il modello, si è condotta infine una estesa campagna di simulazioni volta ad ottenere una mappatura delle risorse del sistema sulla base della loro criticità in termini di contributo alla prestazione in termini di resilienza del sistema, prestazione che è stata valutata mediante la definizione di opportuni indicatori sintetici.

Parole chiave: analisi di resilienza, infrastrutture critiche, sistemi di trasporto, simulazione, transitorio, emergenza

Abstract

Improving infrastructural system resilience in order to limit consequences and impacts of catastrophic and disruptive events, it is a major concern for Risk Management and Disaster Management. The aim of this work, developed within

an international research project named Collaboration Management of Airports at Catastrophe (CMAC), it is to capitalize on what the dramatic experience of the great earthquake and tsunami of March 2011 in Japan showed. In particular the *Yamagata* airport case study was examined, due to its great contribution to the global resilience performance of the regional air transport system of *Tohoku* region. Therefore a discrete event simulation model was developed. The model, that represent the *Yamagata* airport and the related ground transportation systems, is able to describe in detail operational aspects and management dimensions of the system. First step of the work was a systematic literature review in order to frame both resilience definitions, and existing models and methodologies that represent the state of the art of resilience analysis tools. Information needed for the model development were provided by stakeholders involved in March 2011 catastrophe management or acquired through measurement on the field of quantitative data. After the model calibration and validation process, in order to provide a decision making support tool to transport system managers and policy makers, a simulation campaign was conducted. This campaign provided a map of all the resources of the system based on their contribution to the system resilience performance, that was described through the definition of some key performance indicators.

Keywords: resilience analysis, critical infrastructure, transport systems, simulation, transient, emergency

Introduzione

Il violento terremoto e conseguente tsunami che hanno colpito il Giappone nel Marzo 2011 presentano caratteristiche uniche nel loro genere, non solo per l'entità della devastazione portata e per il numero esorbitante di vittime causate, ma anche poiché è stato senza ombra di dubbio il più grave cataclisma che abbia mai colpito una nazione industrializzata. Casi simili come quello dell'uragano *Katrina* negli States del 2005 o del celebre terremoto di Kobe nel 1995, non si avvicinano nemmeno per estensione dell'area colpita o numero di vittime causate.

Al tragico bilancio di vite umane perse, va aggiunto quello delle numerosissime realtà industriali e manifatturiere che subirono danni, non solo a causa della perdita diretta dei propri *asset* fisici, ma anche per la perdita economica dovuta all'impossibilità di accedere a servizi veicolati da infrastrutture di fondamentale importanza. La prolungata indisponibilità di tali infrastrutture causò enormi disagi alla popolazione di un'area colpita, il *Tohoku*, vasta oltre 66.000 chilometri quadrati. Fra tali infrastrutture quella maggiormente danneggiata fu sicuramente l'infrastruttura di trasporto (ITr). Strade, ferrovie, aeroporti: come avremo modo di descrivere dettagliatamente in seguito la combinazione di terremoto e tsunami lasciò in funzione ben poco. Le immagini surreali del terminal dell'aeroporto di *Sendai* circondato dalle acque sono indubbiamente l'icona più efficace di questo stato di cose.



Figura 1.1 – Istantanea dell'aeroporto di *Sendai* pochi minuti dopo l'impatto dello tsunami

Si consideri poi che un disastro di tali proporzioni ha colpito una nazione, il Giappone, contraddistinta dal grado di preparazione ai disastri più elevato di tutto il pianeta. La secolare convivenza con terremoti a frequenza sostanzialmente quotidiana ha infuso nel popolo giapponese un'innata capacità di fronteggiare catastrofi di questo genere: edilizia rigorosamente antisismica, sistemi di protezione civile all'avanguardia, frequenti esercitazioni e campagne di sensibilizzazione dell'intera popolazione sono solo alcune manifestazioni di tale cultura. Il fatto che una catastrofe del genere sia accaduta in una nazione di questo tipo costituisce quindi un caso di studio unico nel suo genere, poiché consente di evidenziare alcuni limiti di misure di prevenzione e di risposta all'evento che rappresentano lo stato dell'arte nel campo del *risk management* e del *disaster management* ed offre un'occasione rara di osservare la risposta a sollecitazioni estreme di sistemi generalmente ritenuti all'avanguardia.

È da queste considerazioni che nasce il progetto Collaboration Management of Airports at Catastrophe (CMAC), un progetto di ricerca internazionale che ha come obiettivo quello di studiare forme di collaborazione che consentano di incrementare la resilienza di sistemi aeroportuali. Al progetto, nato nel Novembre 2012 ed ancora in pieno svolgimento, collaborano attivamente docenti e studenti della facoltà di System Design Management della Keio University of Tokyo, in particolare il prof. Masaru Nakano¹ e il prof. Nobuaki Minato² (a cui è affidato il coordinamento del progetto di ricerca), della facoltà di Technology, Policy & Management della Delft University of Technology, nella persona della prof.ssa Ellen Jagtman³, della facoltà di Aeronautics & Astronautics della Purdue University (West Lafayette, IN), nelle persone del prof. William A. Crossley⁴ e del prof. Daniel DeLaurentis⁵ e del Politecnico di Milano, nella persona del prof. Paolo Trucco⁶.

Tra gli obiettivi del progetto vi è quello di elaborare il modello di un sistema di trasporto aereo regionale attraverso il quale valutare, attraverso simulazioni,

¹ Masaru Nakano: Full professor presso Keio University of Tokyo, SDM, (http://www.sdm.keio.ac.jp/en/faculty/nakano_m.html)

² Nobuaki Minato, Project Associate professor presso Keio University of Tokyo, SDM (http://www.sdm.keio.ac.jp/en/faculty/minato_n.html)

³ Ellen Jagtman: Assistant Professor presso TU Delft, Technology, Policy & Management, (<http://tbm.tudelft.nl/over-faculteit/afdelingen/values-and-technology/sectie-vk/medewerkers/ellenjagtman/>)

⁴ William A. Crossley : Professor School of Aeronautics & Astronautics, Purdue University (West Lafayette, IN), (<https://engineering.purdue.edu/~crossley/>)

⁵ Daniel de Laurentis : Associate Professor School of Aeronautics & Astronautics, Purdue University (West Lafayette, IN), (https://engineering.purdue.edu/AAE/People/Faculty/showFaculty?resource_id=1429)

⁶ Paolo Trucco: Professore associato Scuola di Ingegneria Gestionale, Politecnico di Milano (http://www.dig.polimi.it/index.php?id=319&tx_wfqbe_pi1%5Bid%5D=31)

l'impatto sulle performance, in termini di resilienza, di un approccio collaborativo alla gestione del sistema stesso. La versione definitiva del modello comprenderà due *layer* principali:

- un modello dei processi operativi e gestionali di tutte le ITr della regione. Non ci si vuole limitare infatti ai soli nodi aeroportuali, ma si ritiene necessario comprendere anche tutte quelle infrastrutture che ne consentono la fruizione o si configurano come mezzi di trasporto alternativi, ovvero strade e ferrovie;
- un modello dei processi decisionali ed informativi che intercorrono tra tutti gli *stakeholder* presenti a vario titolo nel sistema: governo nazionale, amministrazioni centrali e locali, operatori o gestori pubblici e privati, compagnie di trasporto, l'ente nazionale di controllo del traffico aereo (ATC), forze dell'ordine, protezione civile, utenti, etc.

La sostanziale differenza tra gli oggetti dei due *layer*, ha indotto a far procedere su due binari paralleli la loro modellazione, cosa che si è riflessa anche in una eterogeneità degli strumenti modellistici usati per ciascuno di essi.

Il presente lavoro di tesi si inserisce in questo contesto. In particolare il suo specifico obiettivo è quello di costruire una base modellistica a partire dalla quale sia possibile sviluppare l'intero *layer* dei processi operativi e gestionali di una ITr regionale. In tale prospettiva, il contributo fondamentale del lavoro al progetto CMAC è stato quello di elaborare un modello di simulazione ad eventi discreti di un nodo aeroportuale, comprensivo di terminal e pista di atterraggio, e delle ITr terrestri ad esso connesse. La replica e l'adattamento futuro dei moduli paradigmatici progettati consentirà di pervenire al modello del sistema di trasporto regionale ricercato, comprendente numerosi nodi aeroportuali, le ITr e un modello dei processi decisionali ed informativi che lo governano.

Per la costruzione del modello si è preso come riferimento l'aeroporto di *Yamagata*, un aeroporto regionale del *Tohoku*, per il quale erano immediatamente disponibili dati ed informazioni in sufficiente quantità. Questa tesi espone la metodologia utilizzata per la costruzione del modello e ne illustra le caratteristiche principali. Il modello elaborato è stato inoltre utilizzato per due differenti tipologie di analisi riguardanti il sistema di trasporto del *Tohoku*:

- una valutazione della criticità delle diverse risorse del sistema di trasporto regionale ai fini della resilienza.
- una mappatura delle risorse del sistema in base al loro impatto sulle performance, così da creare uno strumento di supporto decisionale in grado di evidenziare in modo sintetico le conseguenze legate all'utilizzo di determinate leve operative per la risposta a situazioni di crisi.

La prima fase del lavoro è stata una revisione sistematica della letteratura riguardante la resilienza di sistemi complessi, tesa a delineare quell'impalcatura

teorica che consentisse di cogliere quali siano i principali fattori determinanti la resilienza anche di un sistema di trasporto. Si è inoltre analizzato quali siano le tipologie di modelli presenti in letteratura per lo studio della resilienza di infrastrutture critiche, mettendo in luce le attuali lacune di conoscenza teorica e applicazione pratica che il presente lavoro potesse proporsi di colmare. Questa fase è stata determinante anche nell'ottica di poter adattare metriche di resilienza esistenti e costruirne di nuove coerenti con l'oggetto di studio.

La seconda fase è stata completata attraverso un periodo di permanenza di oltre quattro mesi presso la Keio University of Tokyo (dal 25 Febbraio 2012 al 30 Giugno 2012). In questo periodo è stato possibile raccogliere sul campo dati ed informazioni indispensabili alla costruzione del modello, ottenuti intervistando *stakeholder* chiave nella gestione del trasporto aereo del *Tohoku*, partecipando a numerose conferenze sul tema del *risk management* e *disaster management* tenutesi in occasione del primo anniversario del disastro e collaborando attivamente al lavoro di ricerca dei docenti giapponesi e studenti internazionali afferenti a CMAC.

La terza fase, iniziata durante la permanenza a Tokyo, è stata dedicata alla costruzione del modello e alla sua validazione mediante i dati raccolti.

La quarta ed ultima fase è consistita nella campagna di simulazioni e nell'analisi dei risultati.

La struttura del documento rispecchia la sequenza delle fasi del lavoro. Nel primo capitolo sono quindi riportati i risultati della revisione bibliografica pervenendo ad una definizione di resilienza per quanto riguarda infrastrutture di trasporto e specificandone attributi e *capabilities*. Illustreremo inoltre un opportuno confronto con modelli simili esistenti in letteratura. Il secondo capitolo descrive gli eventi salienti del terremoto e tsunami del Marzo 2011 nel *Tohoku*, con particolare riferimento a quanto sperimentato dalle ITr aereo e terrestre. Anche sulla base di quanto esposto nel secondo capitolo, nel terzo sono esposte le ipotesi fondative del modello, oltre alla sua struttura, le dinamiche e principali funzioni. Il quarto capitolo comprende la descrizione delle campagne di simulazione e l'analisi dei risultati ottenuti. Il quinto riporta le conclusioni ed alcune proposte su possibili sviluppi futuri.

Capitolo 1

Analisi di resilienza di sistemi socio-tecnici complessi

Tutte le società sviluppate fondano il loro normale funzionamento, benessere e potenzialità di sviluppo su una serie di sistemi infrastrutturali che forniscono servizi e beni di cui la popolazione, oltre che gli operatori economici, necessita per la sopravvivenza, la sicurezza ed il mantenimento di elevati standard di qualità della vita. Si pensi ad esempio al servizio elettrico o delle telecomunicazioni, così come alle infrastrutture di trasporto o al sistema sanitario.

Lo sviluppo e i progressi della tecnologia hanno reso tali sistemi sempre più sofisticati ed articolati e di pari passo è cresciuta la loro importanza ed il grado di dipendenza da questi di persone, imprese e governi.

A partire da tali presupposti è facile capire come eventi che vadano ad inficiare significativamente il buon funzionamento di tali sistemi abbiano ricadute di enorme entità sulla società e l'economia di un Paese. Appartengono a tale categoria lo tsunami del 2004 in Indonesia o l'uragano *Katrina* del 2005 negli USA, ma anche fenomeni naturali certamente meno letali ma dall'incidenza economica non meno rilevante, quali l'eruzione del vulcano islandese *Eyjafjöll*, che nell'ottobre 2010 costrinse per diversi giorni la maggior parte degli aeroporti europei all'inoperatività. Benché questo tipo di catastrofi, che con un efficace termine Nassim Taleb definisce “*black swans*” [1], abbia probabilità di accadimento estremamente ridotte, il loro impatto e la difficoltà di prevederne le conseguenze sono talmente elevati da renderle minacce tutt'altro che trascurabili.

Se poi accanto a disastri naturali di questo genere si considerano anche azioni distruttive deliberate e finalizzate al terrorismo quali i tristemente famosi attentati alle *Twin Towers* del 11 settembre 2001, alla metro di Londra del 2005 e quello alla stazione di *Atocha* di Madrid nel Marzo 2004, emerge ancora più chiaramente quale sia il motivo per cui negli ultimi decenni il concetto di *resilienza dei sistemi* è stato oggetto di un interesse sempre maggiore da parte di accademici, *manager* e *policy maker*.

Non è quindi un caso che il Presidente USA Barack Obama si rivolgesse così ai cittadini americani in occasione della proclamazione del *National Preparedness Month*, il 27 Agosto 2012:

“Esorto tutti gli americani a riconoscere l’importanza della preparazione [della nazione] a qualsiasi evenienza e a vivere questo mese lavorando insieme per incrementare la sicurezza del Paese, la sua prontezza e resilienza” [2].

Cerchiamo ora di entrare nel merito del significato del termine resilienza in modo da far emergere con maggiore chiarezza quali siano gli aspetti del tema che riguardano il presente lavoro.

1.1 Definizioni

Scopo di questo paragrafo è di arrivare ad una definizione della resilienza per quanto riguarda il campo delle ITr. Per fare ciò si è proceduto ad una rassegna del significato che ricercatori afferenti a settori di ricerca anche molto lontani tra loro hanno dato al termine. Questo ha consentito di proporre una definizione originale, sintetica rispetto a quanto affermato da altri accademici in passato ed arricchita dal confronto con la produzione scientifica più rilevante.

La parola *resilienza* deriva dal verbo latino “*resilio*”, che significa “balzare indietro, ritornare ad uno stato precedente”. Il primo utilizzo del termine per la descrizione di proprietà di sistemi si deve ad Holling [3] che definisce la resilienza di un eco-sistema come “l’abilità di sopravvivere a fronte di un mutamento del valore delle proprie variabili di stato e parametri significativi”. Ancora in [3], dopo aver definito lo stabilità come la capacità del sistema di non subire significative variazioni del proprio stato a seguito di una perturbazione, si afferma che, ai fini della sopravvivenza del sistema, caratteristiche di resilienza sono decisamente più necessarie di quelle di stabilità. Sistemi scarsamente stabili ma resilienti saranno intrinsecamente soggetti a consistenti fluttuazioni del proprio stato a fronte di disturbi limitati, ma avranno maggiori possibilità di sopravvivenza nel caso di perturbazioni di grande entità. In un lavoro successivo, Holling enuncia tre fondamentali proprietà di resilienza [4]: a) la quantità di disturbo che il sistema è in grado di assorbire senza mutare il suo assetto strutturale e funzionale, b) il grado in cui il sistema è capace di riorganizzarsi, c) il grado di apprendimento ed adattamento di cui il sistema è capace.

Con una pubblicazione quasi contemporanea a quella di Holling, fu Garmezy ad introdurre il termine con riferimento alla medicina psichiatrica [5]. Egli constata, a seguito di studi approfonditi sulle patologie mentali nei bambini, che numerosi individui cresciuti in contesti familiari caratterizzati da genitori affetti da schizofrenia, non subiscono alcuna conseguenza sulla propria salute psichica, poiché dotati di una certa capacità di *resilienza*.

1.1.1 La resilienza organizzativa e d'impresa

Per quanto riguarda il mondo dell'impresa, dell'Ingegneria dei sistemi e del *Risk management*, l'adattamento e l'utilizzo estensivo del termine è più recente. Se infatti in passato una situazione economica globale relativamente stabile poteva consentire ad imprese ed organizzazioni di focalizzarsi su aspetti maggiormente "muscolari", quali efficienza e produttività, un contesto di incertezza e instabilità quale l'odierno, abbinato al ripresentarsi di eventi quali quelli citati nell'introduzione del presente capitolo, impongono di non trascurare aspetti di resilienza e flessibilità.

In [6] viene offerto un esaustivo elenco di definizioni di resilienza nel campo dell'organizzazione di impresa. Qui di seguito se ne citano solo alcune, ritenute più significative ai fini del presente studio. Wildavsky [7] si riferisce alla resilienza come ad una generica "capacità dinamica di adattamento" dell'impresa che si incrementa col passare del tempo. Mallak [8] arricchisce la definizione affermando che la resilienza è "l'abilità di un'organizzazione nel progettare rapidamente ed implementare comportamenti adattivi positivi congrui alla situazione contingente". Sulla stessa linea di pensiero si collocano Sutcliffe e Vogus [9], che asseriscono che "la resilienza organizzativa è la capacità di un positivo adattamento a fronte di condizioni critiche, in modo che l'impresa emerga da tali condizioni rafforzata e dotata di maggiori risorse". Infine, una delle più recenti proposte di definizione è quella di Lengnick-Hall et al. [10] secondo i quali la resilienza è "la propensione di un'organizzazione all'assorbire efficacemente imprevisti che costituiscono una minaccia potenziale alla sopravvivenza dell'organizzazione stessa, sviluppando azioni di risposta specifiche alla situazione e producendosi in attività che consentano di capitalizzare tali imprevisti".

Tutte le definizioni sopracitate condividono una visione della resilienza organizzativa che eccede i confini del concetto di "recupero" a fronte di un danno subito, avvicinando il termine alla sfera semantica della flessibilità e della capacità adattiva, come anche sottolineato in [11]. Questo aspetto è di fondamentale importanza quando si debbano fronteggiare situazioni impreviste ed imprevedibili (*unknown unknowns*), che, come avremo modo di specificare meglio in seguito, è aspetto cruciale nel contesto del presente lavoro.

Altro aspetto emerso dalle definizioni citate che vale la pena sottolineare è che la resilienza organizzativa non comprende semplicemente proprietà riguardanti l'abilità di resistere con successo e di recuperare rapidamente a seguito di un danno subito, ma anche la capacità di sfruttare eventi negativi o imprevisti per emendarsi ed instaurare processi di miglioramento continuo. È quello che si riscontra anche in Sharifi and Zhang [12]: " [la resilienza] è l'abilità di affrontare sfide inaspettate, di sopravvivere a minacce non presentatesi in passato e di trarre vantaggio dai cambiamenti, sfruttandoli come opportunità".

1.1.2 La resilienza della *supply chain*

Anche per quanto riguarda il *Supply Chain Management* è stato il mutamento del contesto economico globale a far crescere l'attenzione per strumenti di analisi capaci di valutare e pianificare la capacità del sistema di superare con successo eventi distruttivi e condizioni imprevedute. In un ambiente economico instabile e caratterizzato da una competitività in costante crescita le moderne *supply chain* hanno dovuto imparare a rispondere a richieste sempre più esigenti: offrire prodotti maggiormente personalizzati e complessi a bassi costi, incrementarne la qualità ed essere in grado di raggiungere clienti in qualsiasi parte del globo [13]. È dunque chiaro perché sistemi di approvvigionamento e distribuzione che dovettero incrementare la propria flessibilità e agilità in modo così spinto, abbiano di pari passo maturato una maggiore sensibilità a temi di protezione e resilienza.

Se si definisce la *supply chain* come la rete di organizzazioni che sono coinvolte, mediante collegamenti a monte e a valle, nei processi e nelle attività di creazione di valore in forma di prodotti e servizi e nella loro distribuzione al consumatore finale [14], una definizione di resilienza della *supply chain* potrebbe essere quella proposta da Fiksel [15]: “la capacità di sopravvivere, adattarsi e crescere a fronte di contesti turbolenti”. Similmente per Datta et al. [16] la resilienza della *supply chain* non è appena la capacità di riprendersi da un qualche evento capace di interrompere la continuità operativa, ma una proattiva, strutturata ed integrata ricerca di quelle *capabilities* all'interno della *supply chain* che consentano di rispondere ad eventi inaspettati. Falasca et al. [17], arricchiscono ulteriormente la definizione affermando che la resilienza è “la capacità del sistema di approvvigionamento e distribuzione di ridurre la probabilità di essere danneggiato da un qualsivoglia evento, di ridurre le conseguenze di tale evento e di ridurre il tempo di recupero della normale operatività. Infine con [6] si approda ad una formulazione incisivamente sintetica: “la resilienza della *supply chain* è la capacità di progettare in modo proattivo la rete della *supply chain* così da renderla preparata ad eventi inaspettati e rispondere in modo adattivo ad eventuali danni, mantenendo il controllo sulla propria struttura e funzione e raggiungendo al termine della fase di recupero uno stato operativo stabile, se possibile più favorevole di quello precedente all'evento in termini di posizionamento competitivo.

Ciò riassunto, sono tre gli aspetti principali da sottolineare. Il primo è quello di una ormai matura coscienza nel mondo accademico dello strettissimo nesso tra resilienza e flessibilità [11] [15], che vede la resilienza delinearsi come una proprietà di flessibilità innestata ad alto livello nelle strutture dell'organizzazione; il secondo è la possibilità di individuare una serie di precise *capabilities* di resilienza, specifiche al contesto oggetto di analisi; il terzo ed ultimo è quello di una visione della resilienza che eccede significativamente i

confini della capacità di risposta ad un disastro: a monte del disastro, arricchendosi di valenze di preparazione e capacità previsionale; a valle di esso, configurandosi come capacità di sfruttare cambiamenti e perturbazioni come opportunità per migliorare il proprio posizionamento rispetto ai competitori.

1.1.3 Protezione e resilienza delle infrastrutture critiche

Prima di proporre una definizione della resilienza di infrastrutture critiche, è forse opportuno chiarire brevemente cosa si intenda per *infrastrutture critiche* (IC).

Per una definizione sintetica ci rifaremo a quanto asserito dalla Commissione Europea nel 2008 [18]: le IC sono sistemi, reti o catene di approvvigionamento che supportano la fruizione di un servizio o di un prodotto essenziale.

Ad oggi non esiste ancora una classificazione unica e condivisa di quelli che sono da considerarsi prodotti e servizi critici, anche per il fatto che la criticità di un servizio o prodotto risulta in continua evoluzione con i cambiamenti economici e di sensibilità sociale e politica dei singoli Paesi. Luijff et al. [19] individuano undici settori che veicolano trentuno prodotti e servizi critici per la società olandese. (Tabella 1.1)

<i>N°</i>	<i>Settore Critico</i>	<i>Prodotto o servizio critico</i>
1	Energia	Energia elettrica
2		Gas naturale
3		Petrolio
4	Telecomunicazioni	Reti di telecomunicazione fissa
5		Reti di telecomunicazione mobile
6		Comunicazione radio
7		Comunicazione satellite/GPS
8		Servizio televisivo
9		Internet
10		Poste e corrieri espressi
11	Acqua potabile	Fornitura di acqua potabile
12	Cibo	Fornitura di cibo e sicurezza alimentare
13	Salute	Servizio sanitario
14	Finanza	Servizi ed infrastrutture finanziarie (settore privato)
15		Servizi finanziari di trasferimento (governo)
16	Conservazione e gestione dei bagni idrici	Gestione della qualità dell'acqua
17		Conservazione e gestione della quantità di acqua disponibile
18	Ordine pubblico e Sicurezza	Mantenimento dell'ordine pubblico
19		Garanzia della Sicurezza
20	Giustizia	Amministrazione della giustizia e della detenzione
21		Forze dell'ordine
22	Pubblica amministrazione	Diplomazia
23		Servizi di informazione alla popolazione

24		Forze armate/Difesa
25		Pubblica amministrazione
26	Trasporti	Trasporto stradale
27		Trasporto ferroviario
28		Trasporto Aereo
29		Navigazione interna
30		Navigazione Oceanica
31		<i>Pipeline</i>

Tabella 1.1 - Settori e servizi critici per la società olandese (Luijff et al., [19])

Inoltre il Dipartimento per la Sicurezza Nazionale degli Stati Uniti (*Department of Homeland Security*) ha stilato, nell'ambito del "National Infrastructure Protection Plan" del 2006, una lista di IC, come riportato in Tabella 1.2.

Agricoltura e Alimentare	Servizi di emergenza
Banche e strutture finanziarie	Energia
Impianti chimici	Strutture governative
Esercizi commerciali	Sistemi informativi
Nucleare civile	Monumenti nazionali
Manifatture critiche	Poste e spedizioni
Dighe	Sistema sanitario
Industria per la Difesa	Telecomunicazioni
Acqua potabile	Trasporti

Tabella 1.2 - Infrastrutture Critiche (US DHS, [20])

E' possibile notare come sussista una certa equivalenza tra le due classificazioni riportate, fatto che suggerisce come si possa ammettere una classificazione comune di alto livello per i paesi industrializzati.

È inoltre interessante considerare che un servizio o prodotto può manifestare la sua criticità nel tempo, e che dunque nel tempo varia anche l'importanza relativa di tali prodotti o servizi. Al fine di chiarire tale concetto, si prendano in considerazione i servizi critici acqua potabile ed energia elettrica. E' verosimile ritenere che l'interruzione per pochi istanti dell'erogazione dell'acqua potabile crei generalmente meno disagi dell'interruzione sempre per pochi istanti della fornitura di energia elettrica, che invece porta all'arresto repentino di tutti i sistemi non coperti da batterie o backup. Al contrario, però, è verosimile ipotizzare che la prolungata mancanza di acqua potabile comporti effetti ben più gravi del disagio associato alla prolungata mancanza di energia elettrica, in quanto sarebbe a repentaglio la sopravvivenza stessa della popolazione affetta dal disservizio.

Strettamente connesso al concetto di servizio critico risulta quello di IC. Si considerano critiche quelle infrastrutture che veicolano servizi critici. Queste

sono infatti descrivibili come un insieme di strutture e reti, nel quale rientrano per esempio industrie, strutture distributive ed istituzioni, che, agendo in maniera interconnessa, rendono disponibili quei servizi e beni necessari per l'organizzazione, la funzionalità e la stabilità economica di una nazione e la cui indisponibilità minaccia la vita quotidiana, l'economia ed anche la capacità di difesa del Paese stesso [21]. Il grado di criticità di una infrastruttura viene valutato a partire dalle conseguenze che un suo malfunzionamento ha su target di interesse. Nonostante anche tali target possano dipendere dalla specifica sensibilità di una nazione, rielaborando quanto proposto da McGill et al. [22], si ritiene che la criticità dell'infrastruttura possa essere misurata in termini di:

- morti equivalenti dovuti al malfunzionamento dell'infrastruttura;
- numero di persone che sperimentano la mancanza di servizio;
- danno all'attività economica causato dalla mancata erogazione del servizio;
- danno economico per l'operatore.

Come accennato in precedenza, tra le IC quelle su cui si concentra il presente lavoro sono le ITr. Rifacendosi a quanto asserito in [23] un sistema di trasporto è l'insieme dei componenti associati ad uno specifico mezzo di trasporto (e.g. il sistema di trasporto ferroviario). L'aggregazione dei singoli sistemi di trasporto all'interno di una nazione costituisce il sistema di trasporto nazionale. Similmente, un sistema di trasporto regionale può essere definito come la combinazione di mezzi di trasporto, infrastrutture ed operazioni che consentono il movimento, ovvero soddisfano "la domanda di mobilità", di persone e beni, all'interno di una regione [24].

Generalmente l'ITr costituisce il componente principale, nonché maggiormente critico del sistema di trasporto. Se si pensa ad esempio al sistema di trasporto ferroviario, è ragionevole pensare che sia relativamente facile reperire un locomotore alternativo in caso di guasti ai mezzi ferroviari non risolvibili in loco; ben altro impegno sarà necessario per far fronte a danni alla rete dei binari o a guasti al sistema di distribuzione dell'energia elettrica.

Inoltre il venir meno dell'infrastruttura origina effetti a catena sul sistema non paragonabili a quelli legati all'inoperatività di altri componenti. Se infatti l'avaria di un velivolo in aeroporto causa disagi limitati ai passeggeri del volo ed al più a quelli in attesa di coincidenza alla destinazione, l'inagibilità di una o tutte le piste di atterraggio conduce ad una paralisi generalizzata del traffico aereo sul nodo aeroportuale in questione con ripercussioni a catena su tutti i nodi del sistema di trasporto aereo ad esso connessi.

Vi sono un elevato numero di minacce e attacchi ai quali le ITr devono resistere durante il loro ciclo di vita. Parliamo di terremoti, azioni del vento, alluvioni, neve e ghiaccio, attività vulcaniche, frane, tsunami e incendi per quanto riguarda

quelli di tipo naturale. A questa lista vanno aggiunti attentati terroristici, errori di progettazione, utilizzo eccessivamente prolungato, degradazione dei materiali per invecchiamento e inadeguata manutenzione [25]. Vanno inoltre considerate minacce di tipo sociale, quali ad esempio eventuali tensioni sindacali o pressioni da parte dell'opinione pubblica per una maggiore sostenibilità e minore impatto ambientale dell'infrastruttura. Da ultimo ma non meno importante, presumendo che l'ITr debba supportare un conseguente servizio di trasporto profittevole o per lo meno in grado di autosostenersi, l'infrastruttura sarà soggetta anche a minacce e rischi di tipo finanziario ed economico, quali ad esempio condizioni di recessione globale e locale, aumento del costo delle risorse utilizzate o rischi di fallimento degli operatori. Approfondendo ulteriormente l'analisi si può anche affermare che le ITr sono soggette a minacce di tipo competitivo da parte di infrastrutture appartenenti a sistemi di trasporto di regioni o nazioni diverse o addirittura della medesima regione. Pensare al tipo di competizione che si riscontra tra gli *hub* aeroportuali europei consentirà di comprendere facilmente quanto appena detto.

A fronte di questo considerevole numero di minacce e rischi, nonostante la progressiva diffusione di attente analisi condotte su eventi passati, il miglioramento dei metodi di previsione e predizione, oltre che approcci alla progettazione e costruzione maggiormente conservativi, non si è ancora riusciti ad eliminare il riproporsi di disastrose paralisi se non distruzioni delle ITr [26]. Resta quindi centrale il tema dell'incremento della resilienza di tali sistemi.

La prima considerazione per entrare nel merito del concetto di resilienza delle infrastrutture è la distinzione tra infrastruttura intesa come struttura fisica, e la funzione che l'infrastruttura svolge o supporta. Sebbene in prima battuta possa essere naturale immaginare la resilienza di un'ITr coincidente con la solidità degli *asset* fisici che la costituiscono, è in realtà l'aspetto funzionale, il servizio che grazie a quegli *asset* fisici viene veicolato, l'aspetto su cui incardinare la definizione che stiamo cercando [25].

Inoltre, aspetto peculiare del servizio di trasporto è quello di prevedere un'ampia gamma di modalità di fruizione. Considerata ad esempio una generica origine e destinazione, per movimentare persone o merci dall'una all'altra, potremmo scegliere di utilizzare la rete autostradale oppure il servizio ferroviario, se non il trasporto aereo o su nave. Esistono dunque filoni di analisi che comprendono all'interno dello studio della resilienza del sistema di trasporto anche il grado di resilienza degli utenti che ne fanno uso, dove per resilienza degli utenti si intende la persistenza di questi ultimi nell'utilizzo di uno specifico sistema di trasporto (ad esempio il sistema di trasporto aereo piuttosto che quello ferroviario), a fronte di disagi o danneggiamenti sperimentati dal sistema, o di cambiamenti in qualsivoglia parametro caratterizzante il sistema di trasporto (si pensi ad esempio a variazioni nel costo del carburante o nel prezzo dei biglietti

per il trasporto pubblico). Cox et al. [27] presentano un interessante applicazione di questa tipologia di analisi al sistema di trasporto pubblico londinese a seguito degli attentati jihadisti del 2005. Sarà quindi possibile fare riferimento a due tipologie di resilienza: la *supply side resilience*, ovvero la resilienza funzionale dell'infrastruttura, e la *customer side resilience*, ovvero la resilienza nell'utilizzo dell'infrastruttura da parte dei suoi utenti. La nostra analisi, come specificheremo meglio in seguito, si concentrerà sostanzialmente sulla *supply side resilience*.

Chiariti i precedenti presupposti cerchiamo di pervenire alla definizione cercata. La nostra definizione dovrà tenere conto di tutti i contributi citati rispetto alla resilienza di sistemi, dei concetti esposti riguardo alle IC e da ultimo di precedenti tentativi definitivi presenti in letteratura, specifici al caso delle ITr. Questi ultimi possono essere sinteticamente rappresentati da:

- Tamaro [28] per cui essa è “una caratteristica che consente al sistema di compensare eventuali danni subiti e permette ad esso di mantenere attiva la propria funzione anche quando l'infrastruttura risulta danneggiata o distrutta”;
- Langewiesche [29], Freckleton et al. [30] e quanto affermato dalla già citata *President's Commission on Critical Infrastructure Protection* (PCCIP) [21], che condividono una visione della resilienza come capacità di assorbire agevolmente eventi distruttivi e di tornare in modo naturale ed in breve tempo ad un livello di servizio maggiore o uguale a quello precedente l'evento.

Nel presente lavoro di tesi ci riferiremo alla resilienza di ITr come alla:

“capacità intrinseca dell'infrastruttura di trasporto di ri-ordinare la propria struttura interna e ri-orientare i propri *asset* e processi a fronte di una significativa perturbazione del suo stato di funzionamento, dovuta ad agenti esterni od interni, in modo da mantenere un accettabile grado di operatività e raggiungere il più brevemente possibile una nuova condizione di equilibrio con i livelli di prestazione desiderati”

Chiarito dunque il significato che intendiamo dare all'oggetto del nostro studio vediamo ora di capitalizzare alcuni spunti emersi dalla revisione della letteratura riguardante la definizione di resilienza, enunciando attributi e *capabilities* di resilienza.

1.2 Fasi della Resilienza

A partire dalla definizione data è possibile far discendere una serie di dimensioni caratterizzanti la resilienza delle infrastrutture. Per comprenderle al

meglio sarà utile rifarsi allo schema proposto da Sheffi & Rice [31], riportato in Figura 1.1.

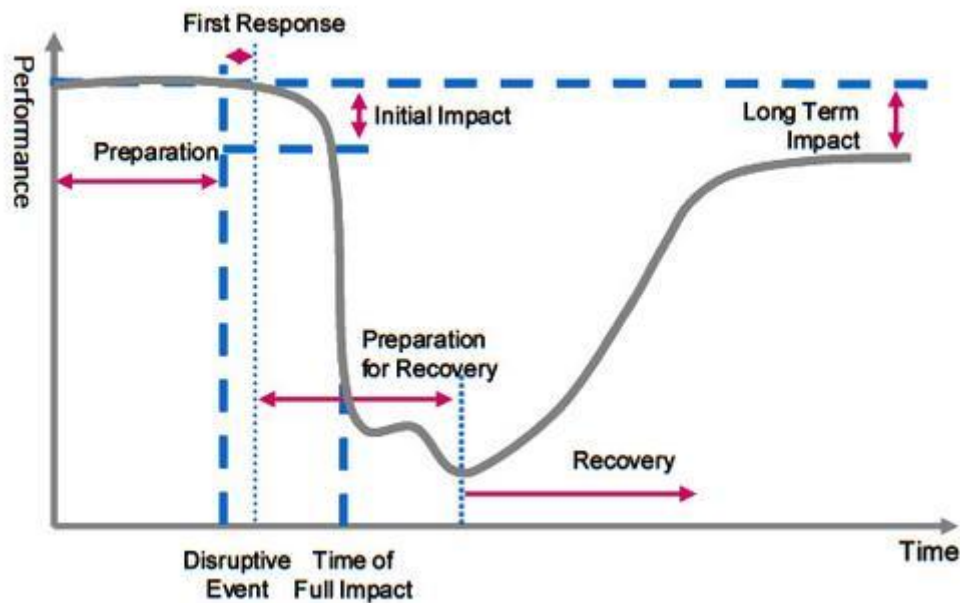


Figura 1.1 – Fasi di resilienza (Sheffi & Rice, [31])

Il grafico riporta l'andamento della performance in funzione del tempo di un sistema soggetto ad un evento distruttivo. Nel caso di un sistema di trasporto potremmo intendere la performance come capacità del sistema di movimentare passeggeri, limitando al massimo grado l'esposizione di questi ad eventuali rischi. E' diffusa in letteratura l'abitudine di riferirsi al primo aspetto con il termine *mobility*, mentre si fa solitamente riferimento al secondo quando si parla di *safety* [32]. Su entrambi gli assi è possibile individuare grandezze che è possibile mettere in relazione con un attributo fondamentale di resilienza. Vediamoli brevemente:

- *Monitoring*: dal momento che il tema della resilienza ha a che fare principalmente con la risposta ad eventi inattesi e cambiamenti repentini del contesto economico, è centrale la problematica di come i soggetti responsabili dell'infrastruttura sono in grado di individuare indicatori e *proxy* che consentano di captare l'imminenza di cambiamenti rilevanti e ed eventualmente stimarne l'impatto prima che questi avvengano [33]: tale attributo viene detto *monitoring* e caratterizza le fasi temporali di normale operatività prima dell'evento. Per ovvi motivi questo attributo si riferisce solo in misura limitata ad eventi catastrofici dovuti a calamità naturali, per definizione imprevedibili, mentre resta un tema di

fondamentale importanza per le altre tipologie di imprevisti elencate in precedenza.

- *Preparedness*: con questo termine si vuole indicare la capacità dell'infrastruttura di maturare al suo interno quelle *capabilities* (che elencheremo nel prossimo paragrafo) che le consentano di essere resiliente. E' quindi un attributo che caratterizza il tempo di normale operatività ma che viene messo in luce contestualmente al presentarsi dell'evento.
- *Robustness*: è la capacità del sistema di subire limitati cali di performance in corrispondenza del momento di massimo impatto dell'evento. Generalmente azioni volte all'incremento della *robustness* sono dette di mitigazione. Centrale per la corretta interpretazione della robustezza è la già citata differenza tra l'integrità dei componenti fisici dell'infrastruttura e l'integrità della funzione da essa supportata. Sebbene esista generalmente un forte nesso tra lo stato di salute della struttura fisica dell'infrastruttura e la sua capacità di veicolare il servizio, i due concetti non sono sovrapponibili. Consideriamo ad esempio un sistema di trasporto ferroviario regionale. Se la regione fosse colpita da un violento cataclisma che causasse gravi danni strutturali ad ampie sezioni della rete, la performance complessiva potrebbe non risentirne significativamente, se immaginiamo ad esempio che esistano possibilità di bypassare le tratte colpite attraverso percorsi alternativi. A fronte di un grave danneggiamento dei propri *asset*, il sistema potrebbe in ogni caso dirsi robusto. E' invece possibile che a causa di un banale malfunzionamento del software di gestione dei turni del personale dell'operatore, il servizio abbia un collasso generalizzato, con disagi estesi a tutta la rete. In questo caso l'evento non arreca alcun danno a componenti fisici del sistema, ma la robustezza di quest'ultimo sarebbe da considerarsi limitata.
- *Responsiveness*: è intesa come il livello di servizio che il sistema è in grado di mantenere nell'intervallo compreso tra il momento di massimo impatto dell'evento e il manifestarsi degli effetti di azioni strutturate finalizzate a riportare il sistema ad un equilibrio stabile. Il manifestarsi di questi effetti sulla performance costituisce l'inizio della fase di *recovery*. Alternativamente si può intendere la *responsiveness* come la rapidità con cui il sistema passa dall'istante di massima degradazione della performance a quello di inizio del processo di *recovery*. Il sistema avrà *responsiveness* tanto maggiore quanto minore è il lasso di tempo intercorso tra i due momenti. In questo intervallo temporale eventuali azioni mirate al reintegro della performance non portano alcun effetto

visibile e il livello di servizio del sistema dipende esclusivamente da proprietà intrinseche del sistema.

- *Recovery*: È la fase in cui il sistema inizia a ri-incrementare la sua performance fino al raggiungimento di un nuovo stato di equilibrio. Questo attributo possiede due accezioni fondamentali: la prima, che riguarda la velocità con cui il sistema riesce a portarsi all'equilibrio; la seconda, che è invece il livello di servizio e performance che il sistema è in grado di fornire alla fine della fase di *recovery*. Lo stato raggiunto dal sistema non è infatti necessariamente coincidente con quello precedente l'evento. Questa potrà infatti essere caratterizzata da un livello di servizio anche maggiore rispetto a quello espresso prima dell'evento distruttivo e da una migliorata capacità di far fronte ad imprevisti, conseguenza di auspicabili capitalizzazioni dell'esperienza passata [34].

1.3 Capabilities di resilienza

Cerchiamo ora di descrivere quali sono le *capabilities* di resilienza. Queste sono fattori abilitanti la resilienza, ovvero procedure organizzative e strategiche attraverso le quali è possibile raggiungere una riconfigurazione delle risorse che consenta una maggiore resilienza [35]. Procedendo ad elencarle queste sono:

- *Prevention*: è capacità di ridurre l'impatto di eventi di *disturbance* o *disruption* diminuendo la loro probabilità d'accadimento. Possibili esempi sono interventi di manutenzione sui mezzi o sulla rete, la messa in sicurezza di terreni a rischio smottamento o il potenziamento dei sistemi di sorveglianza al fine di prevenire possibili atti terroristici.
- *Protection*: si riferisce alla capacità di ridurre l'impatto di eventi di *disturbance* o *disruption* diminuendo la *magnitudo* delle conseguenze dell'evento sull'infrastruttura. Sono esempi di iniziative di *protection* l'installazione di barriere frangi-flutti in corrispondenza di tratti stradali o ferroviari costieri ovvero prevedere reti di contenimento slavine in zone soggette a pesante innevamento.
- *Redundancy*: ci riferiamo con questo termine tanto alla presenza di potenzialità di trasporto insatura all'interno del sistema, quanto alla presenza di componenti e risorse di riserva che non incrementano la potenzialità in circostanze normali ma possono essere utilizzati in caso di danni subiti da omologhi elementi del sistema. [27]
- *Situational Awareness*: è la capacità di singoli elementi del sistema infrastrutturale di avere consapevolezza dello stato del sistema, di intuire

minacce/opportunità e di conoscere le operazioni degli altri elementi dell'infrastruttura.

- *Collaboration*: indica la capacità degli *stakeholder* coinvolti a vario titolo nella gestione e nell'esercizio dell'infrastruttura, di mettere in atto processi di condivisione delle informazioni e delle risorse, di cooperare e di prendere decisioni ed elaborare strategie in modo condiviso, al fine di migliorare la capacità di risposta e *recovery* di ciascun attore e del sistema nel suo complesso [32].
- *Learning*: E' la capacità del sistema infrastrutturale di apprendere dalle esperienze passate, capitalizzando limiti e punti di forza emersi al fine di instaurare quel circolo virtuoso di miglioramento continuo della resilienza che descritto in Figura 1.1 e costituito dalle fasi di normale operatività, crisi, *learning* e recupero. La *capability* di *learning* può comportare la revisione di piani di gestione dell'emergenza, la modifica di procedure e l'introduzione di nuovi strumenti e tecnologie.
- *Adaptability (Flexibility/Agility)*: a nostro avviso la principale *capability* di resilienza, rappresenta la capacità del sistema di adattarsi ai cambiamenti mantenendo un sufficiente livello di performance in termini di servizio, ma anche manutenibilità e profittabilità. I cambiamenti a cui facciamo riferimento possono essere la perdita di strutture e componenti, cambiamenti nel livello della domanda, cambiamenti nella disponibilità o nel prezzo delle risorse, etc [36]. Ci sembra corretta l'interpretazione di Godschalk [37] e Murray-Tuite [32] che si riferiscono al connubio di *learning* e *flexibility* con il termine *adaptiveness*.

Concluso l'elenco delle *capabilities* di resilienza per un sistema di infrastrutture, si riassume in Figura 1.2 la tassonomia di riferimento del presente lavoro di tesi, che contiene in forma sinottica le cinque fasi del ciclo di miglioramento continuo della resilienza e le sette *capabilities* di cui sopra.

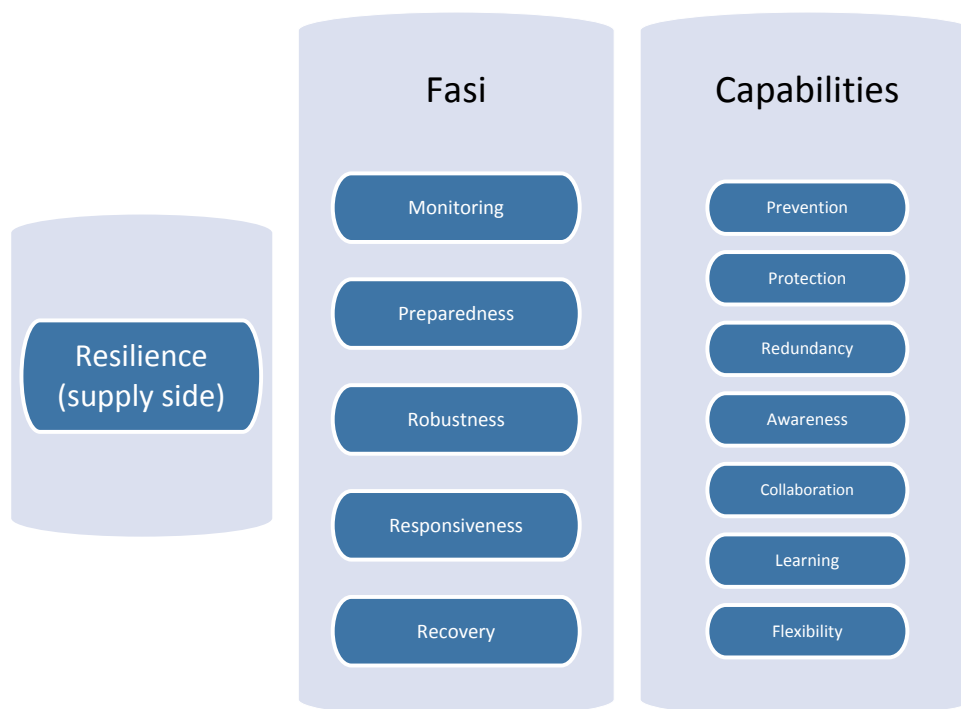


Figura 1.2 – Framework teorico: Attributi e capabilities di resilienza

L'utilità fondamentale di tale tassonomia è quella di fornire opportuni riferimenti teorici per un confronto del modello elaborato con i modelli esistenti in letteratura riguardanti analisi di resilienza di IC. Il confronto consentirà un corretto collocamento di quanto sviluppato con la presente tesi all'interno della produzione scientifica sul tema della resilienza di IC e di evidenziare quali siano i *gap* di conoscenza che essa va a colmare.

1.4 Stato dell'arte su modelli e metodi per la gestione della resilienza

Per il corretto posizionamento del presente lavoro all'interno della recente produzione scientifica e per un opportuno confronto con modelli di analisi esistenti, tra cui individuare lo strumento modellistico più indicato per le esigenze del progetto CMAC, si è resa necessaria una valutazione di quanto presente in letteratura a riguardo di analisi di resilienza di infrastrutture. La metodologia con la quale si è condotta tale revisione è stata una ricerca bibliografica condotta online. I motori di ricerca utilizzati sono stati "Google scholar"⁷, "Science Direct"⁸ ed "Engineering Village"⁹. Le combinazioni di

⁷ <http://scholar.google.it/>

parole chiave utilizzate per la ricerca sono state: *resilience* AND (*critical infrastructure* OR *transport* o *airport*); (*critical infrastructure* OR *transport* OR *airport*) AND (*catastrophe* OR *disaster* OR *emergency*); (*critical infrastructure* OR *transport* OR *airport*) AND (*robustness* OR *flexibility* OR *adaptiveness*); (*resilience* OR *robustness* OR *flexibility* OR *adaptiveness*) AND (*model* OR *simulation* OR *analysis*).

Il risultato finale della revisione sarà un quadro sinottico all'interno del quale sia possibile individuare la posizione del modello oggetto della tesi. Per la costruzione di questo quadro di sintesi la prima modalità secondo cui si sono discriminati tipologie di analisi e i modelli individuati è stato il punto di vista prevalente che questi assumono nel descrivere diverse IC e la loro interazione. Le IC possono infatti essere modellate secondo tre fondamentali approcci: l'approccio **socio-economico**, quello **funzionale** e quello **fisico** [38].

I modelli che si concentrano sulla struttura fisica, si riferiscono a componenti e sottosistemi, riproducendone modalità di funzionamento e guasto più significativi, ivi incluse le interazioni con componenti di altre IC. La modellazione funzionale, guarda invece alla relazione funzionale esistente tra diverse porzioni di IC tra loro omogenee per tipologia ed estensione del servizio erogato. Anche le interazioni tra IC differenti possono essere modellate attraverso parametri di prestazione funzionale (es. livello di servizio) od operativa (es. potenza o flusso). La modellazione sul piano socio-economico mira invece a rappresentare le interazioni tra settori o IC della società mediante gli scambi economici e di servizio, valutati in maniera aggregata, senza alcuna diretta relazione con la conformazione territoriale della domanda e delle infrastrutture.

Come accennato nell'Introduzione, il progetto CMAC richiedeva l'elaborazione di un modello capace di descrivere i processi operativi e gestionali delle tre ITr fondamentali, considerate nella loro interezza. Da un punto di vista modellistico, un approccio funzionale è quindi sembrato sin da subito il più appropriato, principalmente per la possibilità di mettere in luce i processi prima che i componenti ed elementi fisici che ne sono coinvolti o gli impatti economici e sociali dei suddetti processi. Nella ricerca ci si è quindi concentrati su modelli appartenenti a tale categoria, o per lo meno su modelli che si collocano in aree di confine tra modelli fisici e modelli funzionali e tra modelli funzionali e modelli socio economici.

All'interno della categoria delle analisi e dei modelli funzionali è poi possibile un'ulteriore modalità di discriminazione secondo la tipologia di analisi che

⁸ <http://www.sciencedirect.com/>

⁹ <http://www.engineeringvillage.com>

viene condotta. Si avranno quindi: analisi di caratterizzazione, analisi di vulnerabilità ed interdipendenza, analisi di *business continuity* e studi di *resilience strategy & planning*. In Figura 1.3 si riportano le tipologie di analisi appena elencate, specificando quali attributi di resilienza è possibile valutare con ciascuna di esse. Con la diversa colorazione abbiamo voluto indicare il grado di pertinenza di ciascun attributo alla tipologia di analisi: pertinenza molto alta sarà indicata dal rosso, alta pertinenza dall'arancione, media pertinenza dal giallo e scarsa pertinenza dal verde.

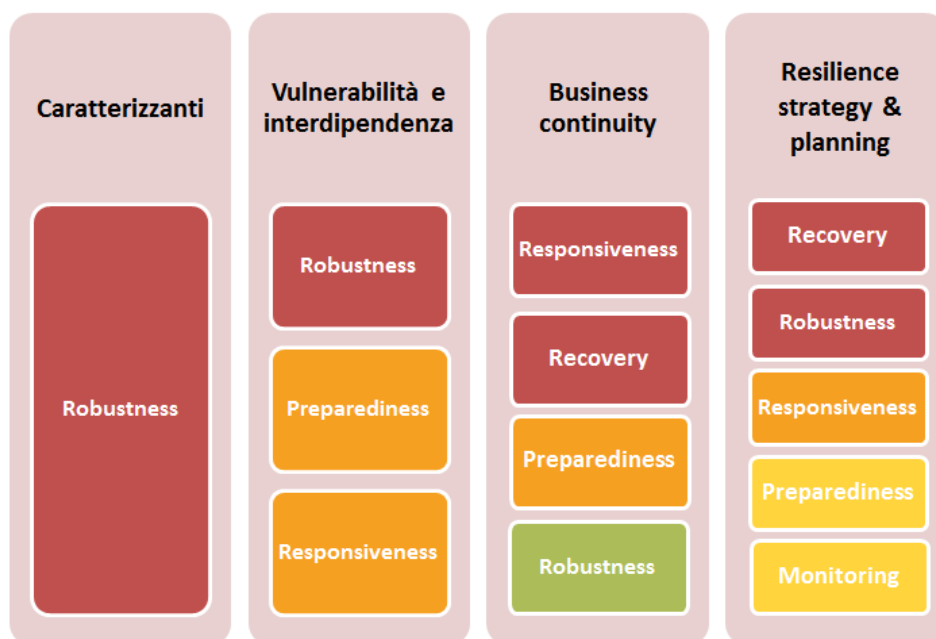


Figura 1.3 – Tassonomia delle tipologie di analisi e fasi di resilienza

Nei successivi paragrafi si procederà all'esposizione dettagliata degli aspetti salienti di ciascuna di queste tipologie di analisi, citando opportuni esempi di modelli specifici. Se da un punto di vista delle tipologie di analisi di resilienza presenti in letteratura si ritiene di aver citato tutte quelle esistenti, per ovvi motivi non si pretende, né la si ritiene necessaria allo scopo, l'eshaustività riguardo agli specifici modelli e approcci di analisi prodotti. Quelli descritti saranno citati a puro titolo esemplificativo della categoria di appartenenza.

1.4.1 Analisi di caratterizzazione

L'obiettivo di analisi caratterizzanti è quello di valutare la resilienza del sistema in senso "statico", descrivendo lo stato dell'infrastruttura in una condizione di normale operatività e cercando di cogliere il nesso tra sue caratteristiche ed

attributi di resilienza. Per sua natura questa tipologia di analisi si presta sostanzialmente ad analisi di *robustness*.

Un interessante esempio sono le analisi che riguardano l'influenza della topologia di una rete sulla resilienza. Queste si avvalgono di modelli che descrivono insiemi di IC o componenti di esse come strutture reticolari di nodi e archi. Le analisi si concentrano sulla robustezza della rete rispetto alla propagazione degli effetti del venir meno di uno dei nodi. Come osservato da Reggiani [39] le topologie di riferimento per l'analisi sono due:

- reti esponenziali o *random network*, in cui la distribuzione statistica degli archi tra nodi è descritta dalla relazione:

$$P(k) \propto e^{-\langle k \rangle} \frac{\langle k \rangle^k}{k!} \quad (1.1)$$

dove $P(k)$ è la probabilità che un dato nodo, appartenente ad una certa rete, abbia esattamente k collegamenti. Come deducibile dalla formula, il nome "rete esponenziale" deriva dal fatto che la probabilità che un nodo sia connesso ad altri k nodi decresce esponenzialmente all'aumentare di k .

- *Power law* o *scale-free network* per cui la distribuzione di probabilità delle relazioni tra i nodi della rete è del tipo:

$$P(k) \propto k^{-\gamma} \quad (1.2)$$

dove γ è l'esponente. In reti descritte da questo tipo di distribuzione è possibile la presenza di *hub* o nodi preferenziali. Un *hub* è un nodo caratterizzato da un numero di legami molto maggiore rispetto alla media di legami dei nodi nella rete. Secondo Barabàsi e Oltvai [40] si hanno configurazioni di rete ad *hub* per $2 \leq \gamma \leq 3$. In ogni caso la rilevanza di un *hub* non è data solamente dal numero delle sue connessioni, ma dal peso relativo di tali nessi, ad esempio in termini di flusso di passeggeri o merci nel caso di reti di trasporto.

In Figura 1.4 è possibile osservare una rappresentazione delle due topologie descritte. In generale *scale free networks* saranno molto resilienti per quanto riguarda cedimenti *random*, in quanto un gran numero di nodi ed archi può venir meno senza in questo modo inficiare significativamente la performance complessiva. Al contrario saranno molto vulnerabili rispetto ad attacchi deliberati ai propri *hub* principali, come nel caso di attentati terroristici. Reti esponenziali presenteranno invece caratteristiche speculari. Validi esempi di

questa tipologia di modelli possono essere riscontrati in Kim et al. [41] e in Shintler et al. [42].

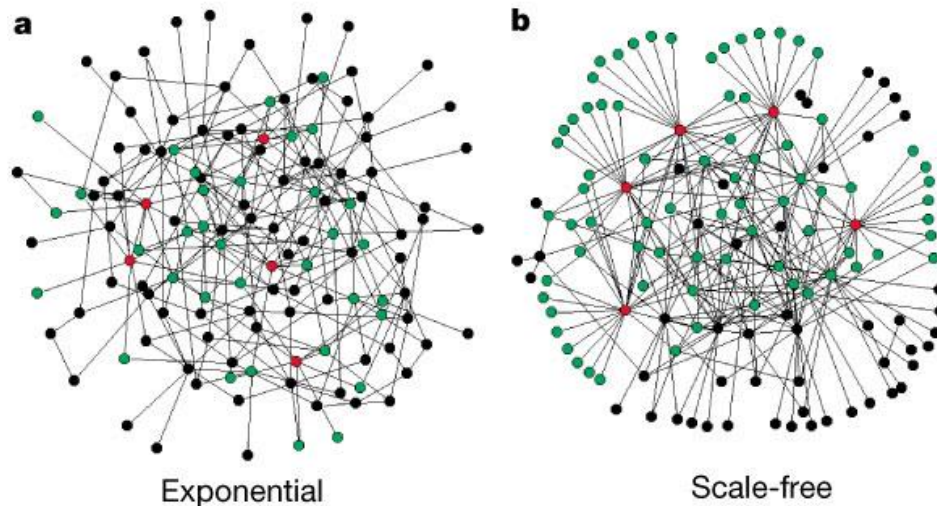


Figura 1.4 - Esempi di reti esponenziali e *scale-free networks*

Altri modelli utilizzati per analisi caratterizzanti sono quelli riconducibili all'*Inoperability Input-Output Model* (IIM), strumento sviluppato per analizzare l'impatto di determinati eventi su una infrastruttura e l'effetto domino derivante da questo. Le conseguenze vengono valutate sia in termini di impatto economico, che di inoperabilità. Il modello si basa sui dati raccolti dal *Bureau of Economic Analysis* per la definizione di interdipendenze economiche presenti tra i settori considerati, e consente di identificare quali sono i settori maggiormente critici sia dal punto di vista economico, che dal punto di vista operativo per quanto riguarda la fase di ripristino a seguito di un determinato evento di perturbazione del sistema. Si tratta quindi di modelli denotati da un approccio ibrido tra quello socio-economico e quello funzionale. La base del metodo è costituita dal modello Input/Output di Leontief per l'analisi di interdipendenza tra i settori economici, adattata da Yacov Y. Haimes della University of Virginia [43] per studiare fenomeni di natura molteplice. Inoltre sono state riscontrate due diverse applicazioni del metodo IIM, [43], [44]. IIM è stato utilizzato per diverse applicazioni, tra cui la modellazione del sistema di trasporto di diverse città dello stato statunitense della Virginia.

1.4.2 Analisi di interdipendenza e vulnerabilità

A questa categoria appartengono la grande maggioranza degli strumenti per analisi di resilienza che è possibile riscontrare in letteratura. È stato quindi inevitabile dedicarvi uno spazio considerevolmente maggiore rispetto alle altre

tre tipologie, corredando la sintesi degli strumenti disponibili con un'ampia introduzione riguardante la problematica delle interdipendenze tra IC.

Come si è già avuto modo di sottolineare, la natura delle infrastrutture si è profondamente modificata negli ultimi decenni. Principalmente a motivo dell'enorme sviluppo delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione non è più possibile considerare la singola infrastruttura come un sistema a sé stante ed autonomo, indipendente e gestito da operatori verticalmente integrati. È infatti in continua crescita il grado di interconnessione tra infrastrutture, in misura tale che la capacità dell'infrastruttura di veicolare correttamente i servizi ad essa associati dipende strettamente dal buon funzionamento di numerose altre infrastrutture [45]. Per mostrare quanto affermato si riporta in Figura 1.5 la complessa rete di legami tra servizi critici individuata da Luijff et al. [19]. Ovviamente tali legami si ripercuotono sulle infrastrutture che erogano i relativi servizi.

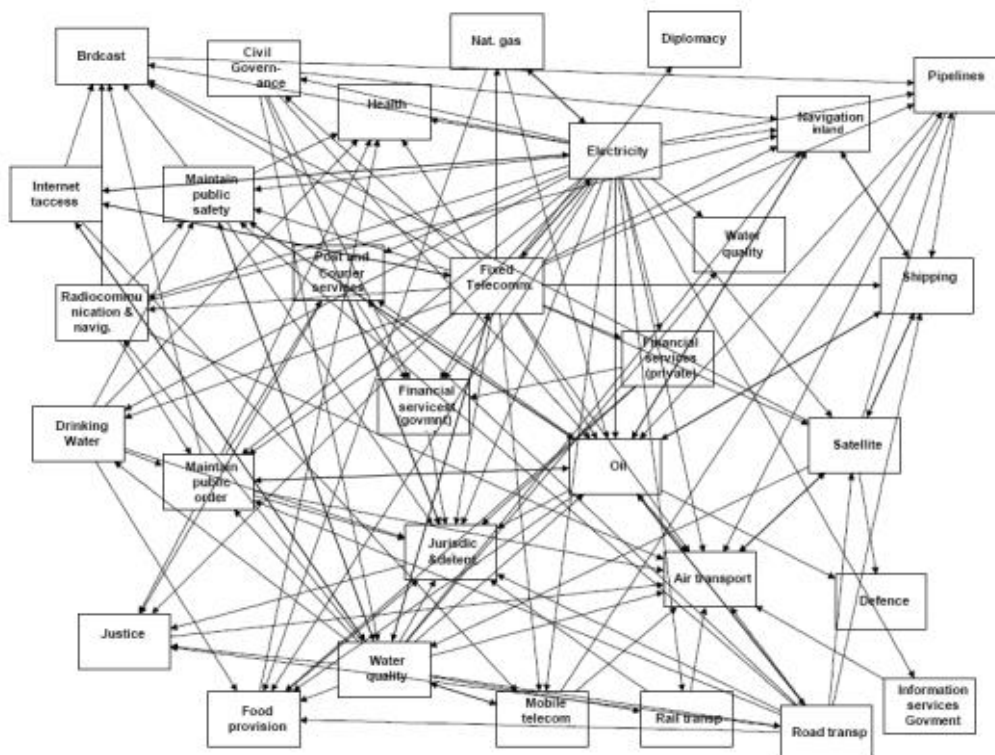


Figura 1.5 - Rete di legami tra servizi critici (Luijff et al., [19])

Volendo procedere ad una organizzazione sistematica di tali legami, è sembrato opportuno rifarsi a quanto proposto da Rinaldi et al [46]. Si definisce dunque “interdipendenza” il generico legame che sussiste tra IC o loro parti. Tale legame può essere monodirezionale o bidirezionale. Nel primo caso una IC

influenza l'altra, ma non avviene il contrario. Questo legame in letteratura viene talvolta definito "dipendenza". Nel secondo caso invece le due infrastrutture interconnesse si influenzano vicendevolmente. E' possibile identificare quattro differenti tipologie di interdipendenza:

- **interdipendenza funzionale:** qualora una infrastruttura eroghi un servizio inferiore al richiesto, anche la infrastruttura che da essa dipende vede ridotto il massimo servizio erogabile. Ad esempio, qualora la rete elettrica fornisca alla rete ferroviaria una potenza inferiore alla necessaria, la circolazione dei convogli ferroviari risulta ridotta. In questo caso un calo di servizio elettrico si traduce direttamente in un calo di servizio del trasporto ferroviario.
- **interdipendenza informativa:** la infrastruttura sottoposta ad interdipendenza informativa subisce una diminuzione del servizio erogabile qualora vi sia carenza nella trasmissione di informazioni necessarie al corretto funzionamento da parte della infrastruttura da cui tali informazioni devono giungere.
- **interdipendenza di prossimità:** la diminuzione o interruzione di servizio è propagata a causa della contiguità. Un esempio è costituito dal caso in cui lo scoppio di una condotta di gas porti all'interruzione di una arteria stradale. Si fa notare quindi come tale interdipendenza dipenda non solo dalle specifiche infrastrutture considerate, ma anche dal particolare evento (nell'esempio, l'esplosione) che colpisce tali infrastrutture.
- **interdipendenza logica:** nella quarta classe ricadono tutte le tipologie di interdipendenze non riconducibili alle precedenti. Sebbene tale definizione possa risultare aleatoria, in quest'ultima classe ricadono interdipendenze tanto singolari quanto significative. Si pensi, ad esempio, all'eventualità in cui a causa di uno sciopero la domanda di trasporto pubblico si sposti da guida vincolata su strada.

Per effetto delle interdipendenze esistenti risulta impossibile oggi considerare le infrastrutture di una nazione o di una regione come singole entità indipendenti. Le IC costituiscono piuttosto una rete di infrastrutture mutuamente collegate, un "sistema di sistemi" [47].

È immediato comprendere come questo elevato grado di interdipendenza, se in condizioni di normale operatività ne migliora globalmente il servizio, porti con sé un intrinseco aumento del rischio gravante sull'infrastruttura. Se una infrastruttura dovesse infatti sperimentare una qualche sorta di inoperatività, questa si tradurrebbe immediatamente in disagi per tutte le infrastrutture ad essa collegate. L'interdipendenza tra nodi infrastrutturali fa dunque sì che da crisi "locali" non conseguano esclusivamente effetti da esse "direttamente" dipendenti, ma anche diminuzioni della capacità di altre infrastrutture di mantenere il livello di servizio normalmente fornito. Si definiscono questi effetti

indiretti come “effetti di interdipendenza del prim’ordine” [25]. L’impatto del venir meno di una infrastruttura può però non limitarsi al prim’ordine, innescando effetti domino tanto più devastanti quanto più è fitta la rete di interdipendenza. In questo modo è possibile che vengano colpite anche zone che, con il punto di origine del problema, non hanno alcun tipo di legame, sia per quanto riguarda aspetti topologici, che per aspetti funzionali. La diffusione del danno raggiunge il culmine del suo impatto negativo quando l’effetto domino assume una forma che potremmo definire “circolare”, ovvero quando questi va ad aggravare la severità dell’impatto sull’origine della catena di malfunzionamenti.

Gli eventi che possono compromettere il funzionamento di un’infrastruttura possono avere natura sia interna che esterna ad essa. Nel primo caso si pensi ad esempio ad un guasto, piuttosto che ad un problema di gestione operativa. Nel secondo caso si considerino ad esempio un evento naturale o un attacco intenzionale. Gli eventi che compromettono il funzionamento delle infrastrutture critiche possono avere quindi origini considerevolmente differenti. Si riporta in Figura 1.6 una classificazione di alto livello dei fattori che possono causare malfunzionamenti nelle IC secondo Kroger [47].

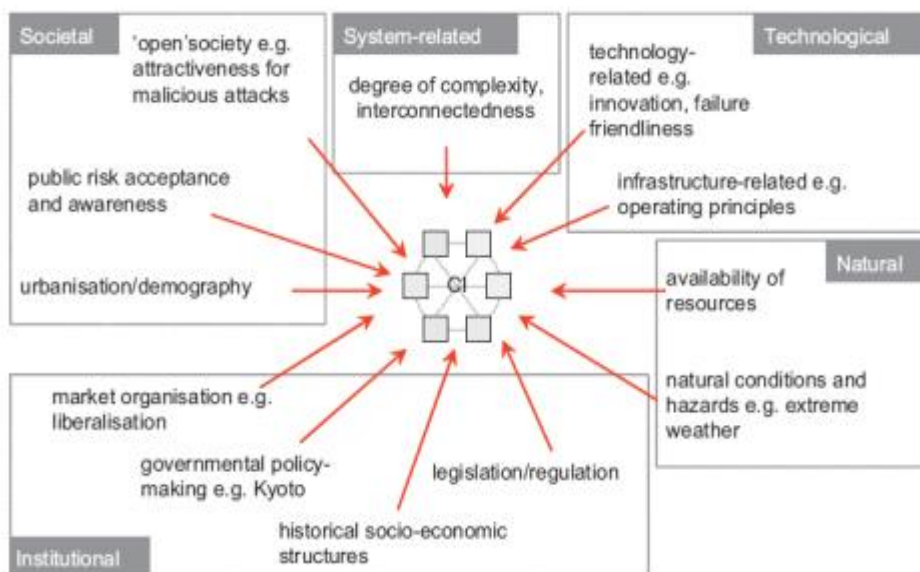


Figura 1.6 - Possibili fattori all’origine del malfunzionamento di una infrastruttura critica (Kroger, [47])

Rispetto agli eventi elencati ciascuna infrastruttura sarà più o meno “vulnerabile”, dove intendiamo la vulnerabilità come un difetto o debolezza nelle procedure di sicurezza di sistema, progettazione, realizzazione o controllo interno, che potrebbe manifestarsi, sia per un evento accidentale, che

intenzionale, in un deficit di operatività e/o in una violazione della politica di sicurezza del sistema. Un'infrastruttura risulterà tanto più vulnerabile quanto maggiore è il numero di relazioni di dipendenza che la legano ad altre infrastrutture. In quest'ottica è interessante mettere in luce quali infrastrutture trasferiscano un maggior numero di dipendenze alle altre e quali invece subiscano più dipendenze dalle altre, con attenzione particolare al comportamento dell'ITr. Per fare ciò è possibile estrapolare ulteriori informazioni dalla Figura 1.5. Considerando per ogni blocco riportato in figura sia il numero di connessioni entranti, sia quelle uscenti, e posizionando ogni blocco su un piano cartesiano in cui sull'asse delle ascisse è rappresentato il numero di connessioni uscenti, e su quello delle ordinate il numero di quelle entranti, si ottiene il grafico di Figura 1.7.

Con questo diagramma si tenta di dare un'indicazione sintetica riguardo la criticità e la vulnerabilità di un settore o prodotto/servizio. Un prodotto-servizio sarà da considerarsi tanto più critico quanto più esso si trova a destra nel grafico, ovvero nel caso in cui da esso dipendano un elevato numero di prodotti-servizi. La collocazione verticale indica invece il numero di prodotti-servizi di cui il blocco in esame necessita per essere correttamente fornito. Un elevato valore dell'ordinata sarà un moltiplicatore della vulnerabilità del prodotto-servizio, in quanto questi sarà soggetto non solo a minacce che lo riguardano direttamente, ma anche a quelle che gravano su tutti i prodotti-servizi necessari al suo funzionamento.

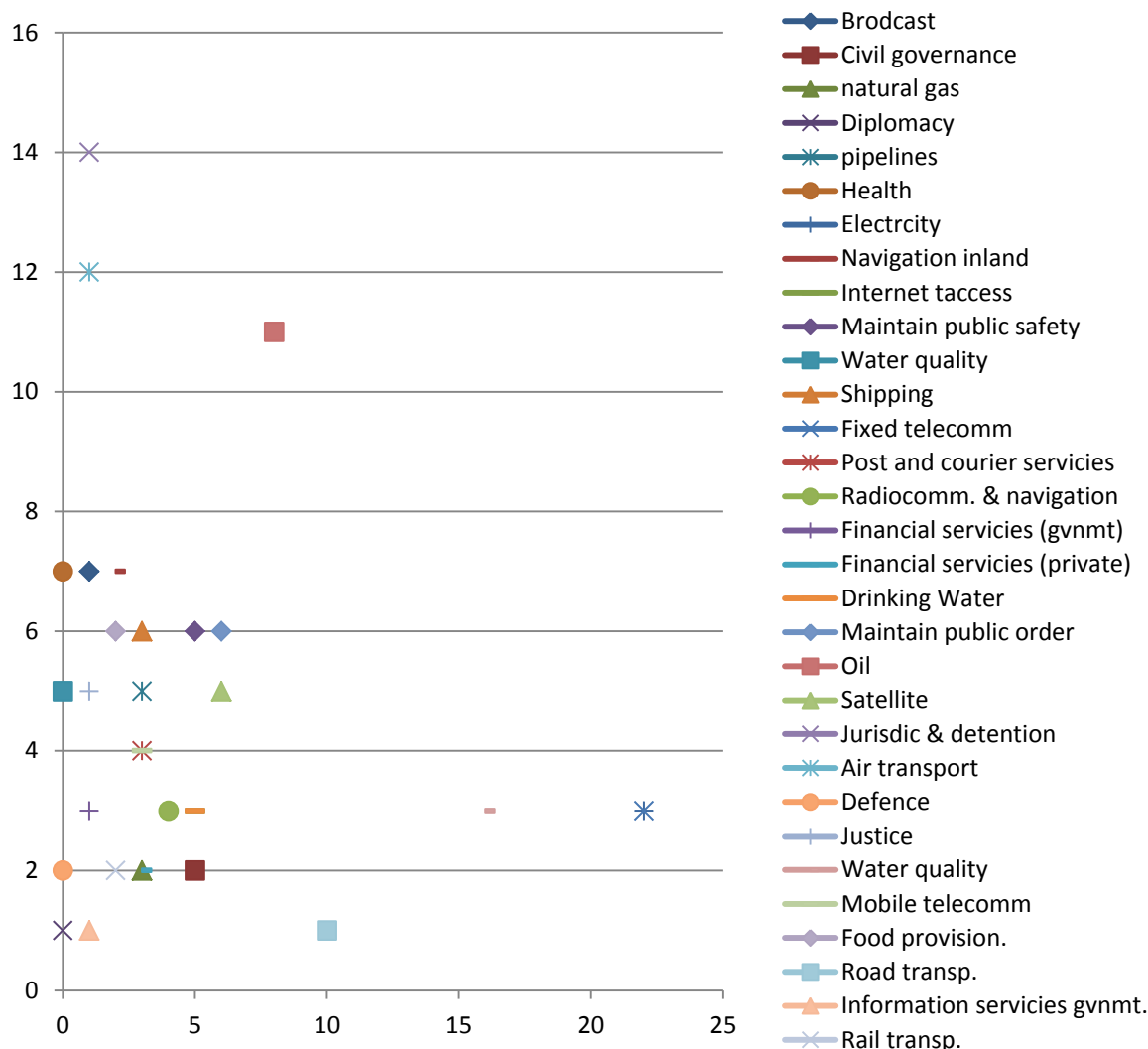


Figura 1.7 - Numero di legami che ciascun servizio critico propaga e riceve dagli altri (Luijff et al., [19])

Dal grafico risulta che la maggior criticità risiede nel settore elettrico ed in quello di telecomunicazione (sovrapposti nel grafico); per quanto riguarda le ITr, ovvero l'infrastruttura ferroviaria, quella stradale e quella di trasporto aereo, rileviamo come da un punto di vista della criticità il trasporto su strada sia, secondo questa analisi, il terzo servizio maggiormente critico, mentre criticità limitata presentano il servizio di trasporto aereo e su rotaia. Diverso invece il discorso riguardo la vulnerabilità, dove troviamo il trasporto aereo come seconda infrastruttura maggiormente dipendente da altri prodotti-servizi, e quindi maggiormente vulnerabile.

Dal concetto di vulnerabilità deriva direttamente la necessità di proteggere le IC. Nella storia recente si sono verificati numerosi eventi che hanno messo in luce il

problema della protezione delle IC dal punto di vista dell'interdipendenza e della vulnerabilità. Il tema nasce e si sviluppa principalmente negli Stati Uniti nel contesto della guerra fredda e viene accantonato con la fine del relativo periodo storico. Il ritorno in auge di questo ambito di ricerca è legato ad avvenimenti di varia natura che si sono verificati a cavallo del nuovo millennio, ma principalmente alla crescente minaccia dovuta al terrorismo, che sfocia nel drammatico attacco dell'11 Settembre 2001. Il crollo delle Twin Towers causò infatti l'interruzione del servizio di fornitura di energia elettrica, gas e servizi telefonici per una vasta area della città di New York. La presenza di importanti nodi della rete di telecomunicazione nella zona interessata dal crollo provocò inoltre il blocco di diversi servizi di comunicazione per una utenza molto più ampia, anche per l'impossibilità sia di intervento degli operatori nella zona, che di rifornimento dei generatori di emergenza. Possono essere considerati ulteriori esempi di eventi che hanno accentuato il problema della protezione delle IC alcuni eventi citati nell'Introduzione di questo capitolo ed i blackout nella costa est degli U.S. (Agosto 2003) ed in Europa (Novembre 2006).

Sono stati sviluppati un considerevole numero di studi legati alla valutazione dell'interdipendenza in IC e la loro vulnerabilità, cercando di costituire elementi di previsione dell'impatto di diversi scenari al fine di limitarne, per quanto possibile le conseguenze. Anche se non mancano modelli di diversa natura [48] [49], i modelli utilizzati si avvalgono sostanzialmente di strumenti di simulazione che tentano di riprodurre il comportamento di sistemi complessi di infrastrutture. Gli obiettivi sono quelli di determinare le conseguenze indotte dalla perdita di uno o più elementi dell'infrastruttura, studiare il comportamento del sistema complessivo in seguito all'occorrenza di eventi catastrofici quali calamità naturali o attacchi terroristici, sviluppare, analizzare e verificare strategie di protezione delle IC e pianificare le attività di ripristino.

Come già detto, all'interno della famiglia dei modelli utilizzati per la valutazione della resilienza di un sistema, quelli mirati ad analisi di interdipendenza e vulnerabilità sono di gran lunga i più diffusi in letteratura. Un ricco elenco di questi è contenuto nel rapporto pubblicato dall'Idaho National Laboratory [50] nel 2006, al quale rimandiamo per approfondimenti sul tema. Tra questi alcuni esempi emblematici che ci sembra opportuno citare sono:

- **Fast Analysis Infrastructure Tool (FAIT)** [51], sistema sviluppato dal National Infrastructure Simulation and Analysis Center (Stati Uniti) con l'obiettivo di valutare l'importanza dei componenti delle infrastrutture critiche nazionali e le interdipendenze esistenti tra questi. Per definire le interdipendenze, FAIT tiene in considerazione diversi aspetti, quali ad esempio la prossimità, l'area di influenza, il gestore, la collocazione spaziale ed altri ancora. Ulteriore caratteristica di questo lavoro risiede nella possibilità di eseguire analisi di stima delle conseguenze

economiche legate al venir meno di un *asset* del sistema infrastrutturale. Questa sezione del modello è sviluppata tramite un approccio di tipo Input/Output che utilizza dati economici del Bureau of the Census (USA). Le infrastrutture che il sistema permette di analizzare sono: energia elettrica, rete di telecomunicazione e rete gas. Oltre a queste si tiene conto della presenza dei servizi di emergenza e di elementi politico-legislativi. Come applicazione di FAIT sono state modellate le interdipendenze di primo ordine tra diversi *assets* di rete elettrica, telecomunicazione, servizi di emergenza e sanitari degli Stati Uniti. Sono in atto studi per consentire estendere il modello ad altre tipologie di infrastrutture, in particolare quella di trasporto.

- **Critical Infrastructure Protection Decision Support System (CIP-DSS)**, modello che esegue la simulazione della dinamica di diverse infrastrutture, ritenendo accoppiati gli effetti dinamici di infrastrutture che presentano interdipendenza. Questo modello è particolarmente interessante per il buon livello di dettaglio con il quale i processi ospitati dalle infrastrutture considerate vengono analizzati. La dinamica di tali processi viene regolata per mezzo di equazioni differenziali e predefinite regole operative che agiscono su un modello ad eventi discreti. Tuttavia lo strumento consente di condurre esclusivamente analisi di tipo aggregato, ovvero i risultati forniti sono rappresentativi di tutta l'area presa in considerazione, senza possibilità di poter indagare effetti locali specifici alla singola infrastruttura o componente di essa. Altra caratteristica saliente è il numero di infrastrutture che il sistema è in grado di considerare, ovvero praticamente tutte le infrastrutture ritenute critiche da Parfomak (2008). CIP-DSS è stato sviluppato da Los Alamos National Laboratory con lo scopo di fornire un certo supporto agli organi decisori, ed è stato testato mediante uno scenario di disservizio della rete elettrica degli USA. Al fine di approfondire la conoscenza di questo metodo si rimanda a [52].
- **MIT Screening Methodology**, il cui scopo è quello di sviluppare un approccio per identificare e classificare elementi di vulnerabilità ad azioni terroristiche presenti nelle infrastrutture critiche. Le infrastrutture sono modellate mediante grafi, che vengono analizzati al fine di determinare un insieme di possibili scenari. In seguito tutti i possibili scenari vengono studiati al fine di stilare una classifica dei diversi tipi di vulnerabilità. Questa classificazione viene stilata sulla base del livello di disservizio imposto dal singolo scenario. L'analisi viene eseguita ad un livello di dettaglio molto vicino al livello fisico, ovvero le reti di infrastrutture critiche sono definite mediante tutti i singoli componenti (ad esempio per la rete gas sono definiti i punti di presa dalla rete, le valvole del sistema, le costruzioni servite, etc.). La metodologia è stata

testata su una porzione del campus del Massachusetts Institute of Technology, dove peraltro è stata sviluppata, in cui sono state considerate le infrastrutture energia elettrica, gas e la fornitura di acqua potabile. Una descrizione dettagliata dell'approccio descritto è fornita in [53].

1.4.3 Analisi e pianificazione della *business continuity*

In questa tipologia rientrano quelle analisi che si concentrano sulla valutazione della capacità dell'infrastruttura di continuare a veicolare il proprio prodotto-servizio anche nel periodo immediatamente successivo ad eventi che causano danni più o meno gravi alla sua struttura fisica ed ai suoi mezzi, o in seguito a significativi mutamenti del contesto, quali consistenti espansioni o contrazioni della domanda di servizio-prodotto. Gli attributi ai quali questo tipo di analisi sono sensibili saranno dunque *responsiveness* e *recovery* e in misura minore *preparedness* e *robustness*. Un modello di questo tipo è quello sviluppato dall'Argonne National Laboratory in collaborazione con il Department of Energy degli Stati Uniti, il **Critical Infrastructure Interdependencies Integrator (CI³)**. Lo strumento si presta ad analisi di *recovery* ed il suo obiettivo è effettuare una stima di tempi e costi necessari per riportare un componente di una infrastruttura, una porzione estesa di essa o un insieme di infrastrutture interdipendenti ad un livello operativo standard. L'analisi non viene condotta in termini di ricerca della soluzione ottima, ma si vuole piuttosto valutare la capacità del sistema di ricollocarsi rapidamente ad un livello di servizio accettabile, ed eventuali oneri correlati a questo processo. Lo strumento introduce un certo livello di incertezza nel sistema di infrastrutture interdipendenti per via dell'adozione di un metodo di simulazione di tipo Monte Carlo. Il modello è applicabile a diverse infrastrutture critiche: energia elettrica, gas, telecomunicazione ed inoltre a sistemi *Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)*. Per un'applicazione del modello si rimanda a [54].

Il **Network Security Risk Assessment Model (NSRAM)**, sviluppato presso la James Madison University dall'Institute for Infrastructure and Information Assurance (USA), come strumento di supporto all'interno del Critical Infrastructure Protection Project, è un programma utile per modellare e simulare complessi sistemi a rete, e si presta in maniera adeguata ad analisi di continuità di operazioni di sistemi multi-infrastrutturali. Tramite NSRAM è infatti possibile analizzare il comportamento del sistema affetto dalla caduta di determinati punti della rete. In particolare questo programma consente di studiare gli effetti globali del disservizio per tutto il tempo necessario al ripristino del sistema per mezzo di caratteristici elementi di ripristino. Lo strumento è di tipo generico e si presta allo studio di diverse infrastrutture a rete, come il sistema elettrico, l'autostrada o anche una rete di computer. Come

applicazione di tale sistema è stato sviluppato un caso studio che ha prodotto il modello della rete elettrica di Valleyville, che riportiamo in [55].

Obiettivi simili, ma un più ampio respiro, caratterizzano il **Multi-Network Interdependent Critical Infrastructure Program for Analysis of Lifelines (MUNICIPAL)**. Questo è un sistema studiato per analizzare un insieme di infrastrutture civili. Lo strumento è in grado di analizzare quali sono gli effetti indotti da un'infrastruttura affetta da disservizio sulle altre infrastrutture prese in considerazione. L'approccio utilizzato risulta di tipo generico, ovvero il sistema non è legato a una particolare area geografica o ad una determinata classe di eventi. La metodologia di simulazione è analoga all'utilizzo degli alberi di guasto, ovvero il sistema analizza tutti gli accoppiamenti tra componenti di cui almeno uno risulta fuori servizio. La caratteristica per cui ci sembra opportuno presentare questo modello tra le analisi di business continuity è la possibilità di effettuare analisi di ridondanza, ovvero di ricercare automaticamente l'esistenza di percorsi alternativi per supplire all'assenza dei componenti guasti. Il lavoro è stato sviluppato da Rensselaer Polytechnic Institute (RPI) e consente di analizzare le infrastrutture di telecomunicazione, di erogazione di energia elettrica e la rete ferroviaria. Mediante tale approccio sono state modellate le città di Los Angeles ed il quartiere di Manhattan a New York. La metodologia sviluppata in MUNICIPAL è presentata in [56].

Analisi che si collocano a metà strada tra quelle di *business continuity* e quelle di *resilience strategy & planning* (che illustreremo nel sottoparagrafo successivo), sono poi i modelli di simulazione del traffico su una rete di trasporto e le simulazioni di evacuazione. Si tratta di studi tesi a verificare in quale misura il sistema di trasporto stradale sia in grado di sopportare situazioni di traffico estreme senza incorrere nella paralisi totale della sua potenzialità di trasporto. Un esempio recente di questo tipo di strumenti è quello che è in procinto di realizzare una collaborazione di ricerca tra l'australiana Queensland University of Technology, il National Institute of Informatics di Tokyo e la Technical University di Delft [57]. Lo strumento, denominato **OpenTraffic** (poiché sarà disponibile in open source sulla rete) è costituito da un'interfaccia in grado di ricevere in input dati caratterizzanti una qualsiasi rete di trasporto stradale, un modello di simulazione del traffico in cui centrale è il ruolo degli algoritmi che regolano la scelta degli utenti della rete tra diversi percorsi alternativi, ed infine una interfaccia che consenta una visualizzazione immediata dei dati e dei risultati dell'analisi.

Si avvalgono di modelli simili a quelli appena descritti le simulazioni di traffico nel caso di evacuazioni repentine di un'area abitata. In questo caso l'analisi non si limita a sottoporre il sistema a stress test e a valutarne la performance in termini di congestione, ma ricerca anche soluzioni ottime di evacuazione, sconfinando quindi nella categoria di *resilience strategy & planning*. La qualità

della soluzione trovata avrà un forte grado di dipendenza dalla funzione obiettivo utilizzata per vagliare strategie di evacuazione alternative. Un modello di questo genere è quello sviluppato da **Nan et al.** [58], che utilizza come caso di studio un'ipotetica evacuazione della città di Ocean City, nel Maryland, a causa della minaccia di un violento uragano.

1.4.4 Metodologie di pianificazione strategica e operativa della resilienza (*resilience strategy & planning*)

Dall'esigenza di dotare le infrastrutture di configurazioni ottime dal punto di vista della resilienza, nasce la gamma di analisi che raccogliamo all'interno della categoria *resilience strategy & planning*. In questi lavori si adotta un approccio proattivo alla resilienza, cercando di considerare nella fase di progettazione dell'infrastruttura e dei suoi processi misure e strategie che consentano una maggiore resilienza dell'una e degli altri. Questo tipo di analisi è particolarmente interessante nel caso in cui sia possibile utilizzarne i risultati per valutare in termini di efficacia ed efficienza piani di risposta alternativi a fronte di una situazione di emergenza. Questo può essere reso possibile dalla presenza di un opportuno apparato di "sensori" che consenta di rilevare in tempo reale il valore di grandezze di interesse, che siano esse necessarie alla costruzione di metriche di tipo *trigger* rispetto al manifestarsi di minacce o che vengano piuttosto integrate nel calcolo di opportune funzioni obiettivo quali il livello di servizio erogato, il grado di protezione e sicurezza degli utenti dell'infrastruttura o l'integrità degli *asset* del sistema. Uno strumento di capitale importanza per questo tipo di analisi sono i GIS (Geographic Information System), ovvero sistemi informativi territoriali che consentono di organizzare i dati in base alla loro provenienza geografica, permettendone una più agevole visualizzazione ed analisi [59].

Un esempio interessante di quanto appena descritto è il modello **Critical Infrastructure Resilience Decision Support System (CIR-DSS)** elaborato da Croope e McNeil [60] ad uso e consumo della statunitense Federal Emergency Management Agency (FEMA), nel 2011. Si tratta di uno strumento piuttosto completo dal punto di vista delle analisi di resilienza, che consiste in un sistema di supporto decisionale il cui obiettivo è di ottimizzare il processo di *recovery* e ridurre la vulnerabilità futura di infrastrutture attraverso l'implementazione di strategie di *mitigation*. Queste possono essere elaborate ai sensi di analisi prognostiche o in tempo reale. Le azioni di *mitigation* che vengono considerate si focalizzano su aspetti legati alla struttura fisica dell'infrastruttura e consistono in: opere civili di rinforzo, cambiamenti alla topologia della rete di infrastrutture, aggiunta di nuovi segmenti alla rete, sostituzione di infrastrutture o componenti esistenti con altre più moderne e resistenti, cambiamenti negli standard di progettazione.

Lo strumento si articola in un supporto GIS per la modellazione su base geografica e fisica dell'infrastruttura sulla quale possono essere simulati scenari di *disturbance* e *disruption*. Parimenti il GIS consente di visualizzare dati provenienti dal sistema nel caso di analisi in tempo reale. I dati forniti dal GIS costituiscono l'input di un modello che utilizza il *system dynamics* per valutare le conseguenze dell'evento e l'impatto di azioni di risposta. Gli elementi che costituiscono il modello a *system dynamics* sono:

- un sottosistema di gestione dell'infrastruttura che rappresenta il livello funzionale macro dell'infrastruttura
- un sottosistema che tiene conto delle risorse e dei vincoli finanziari associati ad azioni di risposta
- un sottostima che simula i processi decisionali considerando vincoli di natura istituzionale
- un sottosistema di "gestione della resilienza" , in grado di computare opportune metriche che consentono di discriminare dal punto di vista dell'impatto sulla resilienza del sistema le azioni di risposta considerate
- un sistema di rappresentazione dei risultati in grado di dialogare con il sistema GIS.

L'output finale del modello è la valutazione degli investimenti necessari a rendere operative le azioni di *recovery* o ricostruzione identificate, attraverso il calcolo dei NPV (Net Present Value). In ogni caso, nonostante l'estremo grado di complessità e completezza del modello, questo consente esclusivamente analisi a livello "elevato", che non entrano nel merito dei processi operativi o gestionali e dell'utilizzo delle risorse, se non quelle finanziarie, valutate però in modo aggregato. Inoltre lo strumento si concentra sulla sola *recovery*, trascurando la fase di *responsiveness*. Esulano inoltre dagli obiettivi del modello aspetti riguardanti la sicurezza degli utenti dell'infrastruttura.

Condivide con questo modello l'utilizzo di un sistema GIS il **Transportation Routing Analysis Geographic Information System (TRAGIS)**, un sistema assimilabile ai già citati simulatori di traffico in caso di evacuazione, sviluppato con lo scopo di valutare possibili itinerari all'interno di un sistema di infrastrutture di trasporto. La sua peculiarità è quella di non considerare la sola rete stradale ed autostradale ma anche la ferrovie e corsi d'acqua. La valutazione di diversi itinerari viene effettuata ottimizzando diverse funzioni obiettivo, come il percorso a distanza minima oppure il percorso a minimo tempo di percorrenza, su cui possono essere imposti alcuni vincoli, per esempio il trasporto di merci pericolose o rifiuti. Questo programma, sviluppato dall'Oak Ridge National Laboratory, rientra nel National Transport Program del Department of Energy degli Stati Uniti, ed è stato utilizzato per modellare l'intera nazione degli Stati Uniti [61].

1.5 Posizionamento teorico del presente lavoro

Delineato il quadro degli strumenti riscontrati in letteratura per l'esecuzione di studi di resilienza, si può procedere ora al collocamento teorico all'interno di tale quadro del modello sviluppato.

Prima di fare ciò è necessario però rimarcare un concetto introdotto nell'Introduzione al lavoro di tesi. Si è avuto modo di illustrare infatti come questo si collochi all'interno di un progetto di ricerca internazionale, CMAC, tra i cui obiettivi vi è quello di studiare l'impatto di forme di collaborazione sulla capacità di sistemi di trasporto aereo regionali di rispondere ad eventi imprevisti. La modalità con cui CMAC intende affrontare il tema è la costruzione di un modello dell'intero sistema socio-tecnico del trasporto regionale del *Tohoku*, studiandone il comportamento in occasione del terremoto e tsunami del Marzo 2011. Si sono già presentati i due *layer* fondamentali in cui il modello CMAC si articola ad un livello macroscopico, ovvero il *layer* dei processi operativi e gestionali e quello dei processi informativi e decisionali. Per quanto riguarda il primo dei due, era necessario sviluppare un modello dei nodi aeroportuali della regione del *Tohoku*, dando piena visibilità ai processi operativi e gestionali, al fine di osservarne il comportamento in seguito ad un evento destabilizzante e stimare il contributo alla resilienza di meccanismi di cooperazione. Inoltre la forte dipendenza della fruibilità del servizio aeroportuale dalla possibilità per gli utenti di raggiungere l'aeroporto, rendeva indispensabile comprendere nel modello anche altre infrastrutture di trasporto, in particolare strade e ferrovie. Come già specificato, il ruolo di questa tesi all'interno del progetto è stato fornire moduli e paradigmi modellistici che costituiscano una base per la costruzione del *layer* appena descritto.

Risulta ora evidente come esistano sostanziali differenze tra il modello complessivo in corso di sviluppo all'interno di CMAC e il modello oggetto di questa tesi. Per prima cosa quest'ultimo non comprende alcuna rappresentazione dei processi informativi e decisionali, che costituisce invece uno dei due componenti fondamentali del modello CMAC. Esiste dunque una differenza qualitativa tra i due. In secondo luogo il modello da noi sviluppato si differenzia dal modello complessivo CMAC anche quantitativamente, poiché non rappresenta l'intero sistema di trasporto aereo regionale, ma esclusivamente uno dei suoi nodi. Questo discende necessariamente dall'estrema onerosità dell'ottenere dati qualitativi e quantitativi riguardo lo stato delle infrastrutture a seguito del cataclisma. Tutte le informazioni necessarie sono infatti contenute in documenti e rapporti in lingua nipponica. Piuttosto che sottoporre i colleghi giapponesi ad un interminabile lavoro di trasposizione di tali testi in lingua inglese, si è ritenuto più efficiente richiedere solamente i dati sufficienti alla creazione di una esauriente base modellistica, che fornisse moduli e paradigmi, lasciando alla controparte giapponese esclusivamente l'onere di replicare ed

adattare quanto prodotto per il completamento del *layer* operativo. In ogni caso la scelta di sviluppare la suddetta base di riferimento modellando in modo completo il nodo aeroportuale di *Yamagata*, e le annesse infrastrutture di trasporto terrestre, non ha impedito di condurre interessanti analisi anche sulla porzione di modello realizzata. È d'altro canto evidente come queste analisi, pur mantenendosi in un alveo comune, presentino alcune differenze rispetto a quelle che sarà possibile condurre una volta completato lo sviluppo del modello globale CMAC. Tenendo presente quest'ultima affermazione, si può ora procedere agevolmente a delineare le caratteristiche salienti del modello sviluppato, in base alle categorie e i concetti esposti in 1.2, 1.3 ed 1.4.

Come si è già avuto modo di specificare al paragrafo 1.4, le esigenze fondamentali del progetto CMAC suggerivano la scelta di un approccio alla modellazione del sistema di tipo funzionale. Tali esigenze consistono nella necessità di una centralità dei processi operativi dei diversi sistemi di trasporto e delle connesse pratiche gestionali, pur non richiedendo di scendere ad un dettaglio estremo nella descrizione dei componenti fisici. Si è quindi adottato un punto di vista funzionale alla modellazione, molto vicino al livello fisico, ma in cui la risoluzione rimane al livello dei processi, delle operazioni e delle attività, piuttosto che delle dinamiche tecniche tipiche dei singoli componenti impiantistici. L'adozione di un punto di vista funzionale comporta peraltro rilevanti implicazioni rispetto all'utilizzo del modello da parte di operatori e decisori politici. Il modello non si limita a fornire loro risultati, ma adotta una descrizione del sistema con parametri e variabili dal significato intuitivo, in modo che tutti gli attori coinvolti siano in grado di comprendere non solo i risultati finali di proprio interesse, bensì anche i risultati di interesse degli altri attori e le dinamiche del sistema infrastrutturale che hanno portato a tali risultati. In altre parole la descrizione funzionale consente la comprensione del sistema infrastrutturale a tutti i soggetti interessati. Con riferimento generale alle infrastrutture, prescindere dal loro funzionamento tecnico di dettaglio non solo permette di rendere maggiormente partecipi i decisori politici, ma favorisce anche una maggiore comprensione tra i singoli operatori di infrastrutture eroganti servizi significativamente diversi, che, se rimanessero sul piano tecnico, avrebbero maggiori difficoltà di comunicazione. Tale aspetto assume una rilevanza capitale in un quadro nel quale spesso si rischia di affrontare il problema con modelli molto sofisticati, gestibili soltanto da esperti, e nei quali operatori e decisori politici vengono coinvolti marginalmente. Risulta quindi evidente come per CMAC, tra i cui obiettivi vi è quello di fornire un potente strumento decisionale e valutativo a decisori e operatori coinvolti nella gestione di emergenze ed imprevisti riguardanti l'infrastruttura di trasporto aereo, fosse appropriato l'utilizzo di un approccio funzionale alla modellazione. Da ultimo tale approccio ha il pregio di garantire, anche in sede di sviluppo del modello, la piena intelligibilità di esso da parte di *stakeholders* coinvolti a titolo di esperti al

fine di indirizzare scelte progettuali e fornire informazioni rilevanti. L'opportunità di utilizzare un approccio di questo tipo è stata ampiamente confermata da colloqui con *policy makers* del Ministero dei Trasporti giapponese¹⁰.

Considerando una classificazione a livello macro delle tipologia di analisi che è possibile effettuare, il modello CMAC e il modello qui sviluppato condividono la natura di analisi di *business continuity* e *resilience strategy & planning*. In entrambi i casi si vuole infatti valutare la capacità del sistema di mantenere un livello di servizio adeguato a seguito di eventi destabilizzanti, identificando possibili azioni ottimali di risposta e chiarendo la modalità migliore di agire sulle leve decisionali disponibili. Diversa è però nei due casi la natura di tali leve. CMAC è infatti focalizzato sull'influenza che meccanismi di collaborazione possono avere sul livello operativo. Sono queste forme di collaborazione che si collocano principalmente al livello dei processi decisionali ed informativi. Nello strumento elaborato nel presente lavoro le leve di decisione sono invece le diverse logiche di gestione delle risorse, rappresentate dal modello in modo dettagliato

Per quanto riguarda gli specifici attributi di resilienza che si vuole valutare, vi è una completa coincidenza tra i due strumenti. In entrambi i casi l'intenzione è infatti di considerare la fase temporale maggiormente critica, ovvero quella che inizia contestualmente all'evento distruttivo e termina con l'inizio della fase di *recovery*. Con riferimento a quanto definito in 1.2 gli attributi fondamentali che si è intenzionati a testare sono quindi:

- la *robustness* del sistema, ovvero in che misura il sistema è in grado di mantenere livelli di performance accettabili anche a fronte di eventi di *disruption* di elevata entità. Su questo aspetto i risultati ottenuti dalle analisi da noi condotte riguardano un singolo nodo del sistema di trasporto aereo regionale e mantengono una loro validità in senso assoluto. In ogni caso, stante quanto verrà esposto in 2.3.3, è anche possibile utilizzare tali risultati come una *proxy* del comportamento dell'intera infrastruttura di trasporto aereo, generalizzando dunque alcune conclusioni.
- la *responsiveness* dell'infrastruttura, come capacità del sistema di trasporto di mantenere un livello di servizio elevato, in termini di flusso di passeggeri processato e di sicurezza di questi ultimi, nel periodo temporale compreso tra il momento di massimo impatto dell'evento destabilizzante e il manifestarsi degli effetti di azioni strutturate

¹⁰ Informazioni tratte da colloquio con Masahiko Kurono, presidente *Institution for Transport Policy Studies* ed ex amministratore delegato della *Narita International Airport Corporation*, in data 5 Marzo 2012, presso *Japan International Transport Institute (JITI)*, Tokyo.

finalizzate al recupero di uno stato stabile, ovvero l'inizio della fase di *recovery*.

Chiariti questi aspetti è possibile infine eseguire il collocamento del modello sviluppato all'interno dell'insieme degli strumenti elencati in 1.4. In Figura 1.8 proponiamo una visualizzazione grafica del quadro sinottico che sistematizza quanto esposto nel precedente paragrafo.

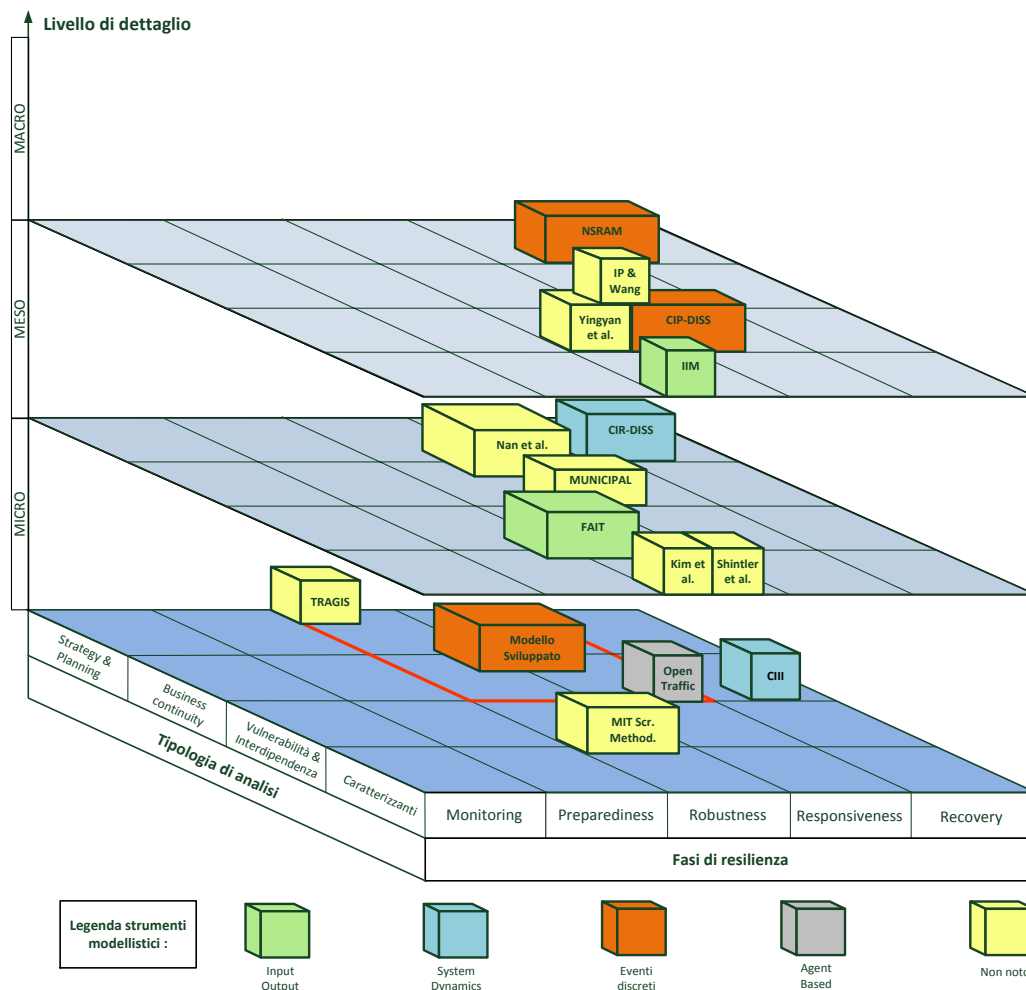


Figura 1.8 - Quadro sinottico dei modelli di tipo funzionale presenti in letteratura

Sugli assi del diagramma troviamo le ormai note tipologie di analisi, le fasi di resilienza coperte dall'analisi ed il grado di dettaglio con cui viene descritto il sistema, o meglio la risoluzione del modello. Quest'ultimo asse presenta tre livelli fondamentali: un livello macroscopico in cui i componenti dell'infrastruttura vengono condensati in una rappresentazione nodale sintetica nella quale i nodi vengono caratterizzati attraverso uno o pochi parametri sintetici, quali ad esempio il grado di operatività; un livello intermedio in cui si

ha la visibilità dei processi, pur non caratterizzandoli nel dettaglio; un livello microscopico in cui si ha piena visibilità dei processi, delle risorse da essi utilizzate e delle modalità di impiego di quest'ultime. Su ogni piano corrispondente ad un livello di dettaglio dell'analisi la combinazione di una tipologia di analisi e un attributo di resilienza testato, originerà un quadrante in grado di caratterizzare il modello che vi ricade. Uno stesso modello può coprire più di un quadrante. Come si può notare i modelli sono stati rappresentati con parallelepipedi e opportunamente collocati sul diagramma in base alle proprie caratteristiche. Il colore del parallelepipedo indica infine lo strumento modellistico utilizzato per la costruzione del modello e la conduzione delle analisi.

Al momento della scelta dello strumento modellistico da utilizzare si è effettuato un confronto con modelli che presentavano caratteristiche simili alle specifiche richieste dal modello CMAC, che, ripetiamo, doveva collocarsi a cavallo della coppia di tipologie di analisi *business continuity* e *resilience strategy and planning*, valutare sia l'attributo di *robustness* che quello di *responsiveness* e possedere un grado di risoluzione elevato, ovvero porsi ad un livello funzionale microscopico. Sul diagramma abbiamo evidenziato con un tratto di colore rosso i quadranti risultanti da questa combinazione di caratteristiche. Scopo del confronto è stato individuare lo strumento modellistico più indicato agli scopi del lavoro. I modelli considerati nel confronto, ritenuti rappresentativi della propria categoria di appartenenza, sono quelli che condividono con il modello sviluppato almeno due caratteristiche in termini di tipologia e fasi di resilienza coinvolte nell'analisi.

All'interno di questo insieme di modelli è necessario escludere dal confronto quelli che riguardano analisi di evacuazione, quali Nan et al [58] ed OpenTraffic [57]. Sebbene infatti essi condividano con il modello sviluppato obiettivi apparentemente assimilabili, quale quello di valutare la capacità del sistema di massimizzare il proprio *throughput* in condizioni di stress, il punto di vista è completamente differente da quello da noi ricercato. Essi infatti non caratterizzano il sistema attraverso quei processi che consentono l'erogazione del servizio di trasporto, ma si limitano a delineare i percorsi all'interno dei quali potranno muoversi gli utenti, in modo simile a quanto potrebbe avvenire in uno studio fluidodinamico di una rete di tubazioni. Il focus di questi modelli sono piuttosto gli algoritmi che consentono di ottimizzare lo smistamento dei flussi e le logiche e le equazioni che regolano il comportamento degli utenti o agenti. Sarebbe stato quindi fuorviante considerare gli strumenti da essi utilizzati come fonte di ispirazione per il nostro modello. Similmente il modello MUNICIPAL, che avrebbe potuto costituire un ottimo termine di riferimento in quanto collocato su quadranti molto simili a quelli del modello sviluppato, è da escludere dal confronto, in quanto i testi disponibili su di esso non specificano lo strumento modellistico utilizzato.

I riferimenti attendibili risultano essere quindi gli insiemi di modelli riconducibili a: NSRAM, CIP-DISS e CIR-DISS. I primi due rappresentano il sistema attraverso un sistema ad eventi discreti, il terzo con *System Dynamics*. La scelta dello strumento da utilizzare è stata quindi effettuata tra queste due alternative. Per compiere la scelta si è cercato di entrare maggiormente in dettaglio delle caratteristiche richieste al modello. In particolare si sono identificati i seguenti parametri rilevanti per il modello rispetto ai quali si sono in seguito confrontate le *performance* dei due strumenti modellistici:

- capacità di condurre analisi multi-attributo, ovvero la capacità dello strumento di caratterizzare gli elementi o le entità del sistema secondo una pluralità di attributi.
- capacità di descrivere la dinamica del sistema (Dinamica), ovvero capacità dello strumento di costruire modelli in cui sia presente una dimensione temporale effettiva e di descrivere in modo tempo dipendente la variazione dello stato degli elementi del sistema.
- capacità di diagnosi/prognosi, intesa come la possibilità di effettuare sia analisi *ex-post* che *ex-ante*.
- capacità di *multi event*, ovvero la capacità di contemplare il verificarsi di uno o più eventi contemporaneamente, prendendo in considerazione la mutua interazione tra i differenti eventi occorsi.
- capacità di implementare nel modello politiche e strategie di decisione
- capacità di gestire analisi di tipo probabilistico e statistico

I due strumenti modellistici sono stati valutati qualitativamente rispetto a ciascuno di questi parametri. I risultati della valutazione sono stati riportati in Tabella 1.3.

		<i>Eventi discreti</i>	<i>System Dynamics</i>
Capabilities modellistiche	Multi-attributo	xxx	-
	Dinamica	xxx	xxx
	Diagnosi /Prognosi	DP	P
	Multi-event	x	xxx
	Decisioni/Strategie	xx	xx
	Probabilistica	xxx	x

- Caratteristica non modellabile
- x Caratteristica parzialmente modellabile
- xx Caratteristica modellabile ma di difficile gestione
- xxx Caratteristica modellabile e facilmente gestibile

Tabella 1.3 – Valutazione qualitative *capabilities* modellistiche

Da questo primo confronto un modello ad eventi discreti è sembrato subito più adatto alla rappresentazione del sistema, in particolar modo per la possibilità di caratterizzazioni multi-attributo degli elementi del sistema e per la possibilità di eseguire analisi sia in sede diagnostica che prognostica. Quest'ultimo aspetto è stato ritenuto di fondamentale importanza all'interno di un progetto di ricerca che ha tra le sue ragioni d'essere la possibilità di capitalizzare quanto emerso nella drammatica esperienza del grande terremoto e tsunami del 2011.

Vi sono poi altri fattori che hanno fatto propendere per una modellazione ad eventi discreti. Per prima cosa si è partiti dal rilevare il fatto che modelli continui, quali il *System Dynamic*, descrivono lo stato del sistema sulla base di equazioni differenziali. Nel caso di un sistema di trasporto, per quel che riguarda la maggior parte dei processi che intervengono sullo stato degli elementi del sistema, è molto complicato, dove non impossibile, definire un'equazione differenziale funzione del tempo che li descriva in modo compiuto. È molto più appropriato modellare questi processi attraverso una logica *event-driven*, ovvero innescati e determinati dall'occorrere di particolari eventi. Si è poi ritenuto più adatto alle caratteristiche dell'oggetto del modello uno strumento che, piuttosto che descrivere con continuità nel tempo lo stato dei componenti dell'infrastruttura, evidenziasse i cambiamenti di stato degli elementi del sistema in corrispondenza di determinate istanze di operazioni nei loro confronti o di un loro impiego delle risorse, come fatto da un modello ad eventi discreti. Da ultimo si è considerata la centralità nel modello del ruolo degli utenti del sistema di trasporto che, in quanto persone, inducono intrinsecamente ad essere descritti mediante grandezze discrete piuttosto che continue. Nel terzo capitolo, introducendo da un punto di vista teorico la simulazione ad eventi discreti *process-oriented*, avremo modo di descriverne alcune caratteristiche, chiarendone ulteriormente l'appropriatezza alla tipologia di oggetto studiato.

1.6 Metriche di resilienza

Come documentazione di un ulteriore ambito in cui sono stati individuati utili contributi di letteratura, si riportano brevemente nel seguito alcune metriche di resilienza di carattere generale o riferite in modo specifico ad infrastrutture di trasporto.

Infatti, diversi tentativi sono stati fatti per cercare di quantificare la resilienza e di fornirne una misura attraverso indicatori sintetici [62] [63] [64].

Uno dei riferimenti più autorevoli riguardo a misure di resilienza è Rose, che in [65] ne propone alcune a proposito di performance economiche di singole organizzazioni o sistemi industriali. Tra queste compare l'indice Direct Static Economic Resilience (*DSE*R) ,e l'indice Total Dynamic Economic Resilience (*TDE*R). La *DSE*R è una misura che, rifacendoci al *framework* teorico delineato

in 1.3, potremmo ricondurre ad un indicatore di *robustness* e quantifica la misura in cui la riduzione di performance economica causata da un determinato evento devia dalla massima diminuzione possibile. È dunque possibile esprimerla come:

$$DSEER = \frac{\% \Delta DY^m - \% \Delta DY}{\% \Delta DY^m} \quad (1.3)$$

Dove $\% \Delta DY^m$ rappresenta la massima diminuzione percentuale dell'output economico sperimentabile e $\% \Delta DY$ quella effettivamente sperimentata. La *TDER* può essere invece ricondotta agli attributi di *responsiveness* ed interpretata come la riduzione della perdita di output economico imputabile ad un inizio della fase di *recovery* più repentino che in assenza di caratteristiche di resilienza.

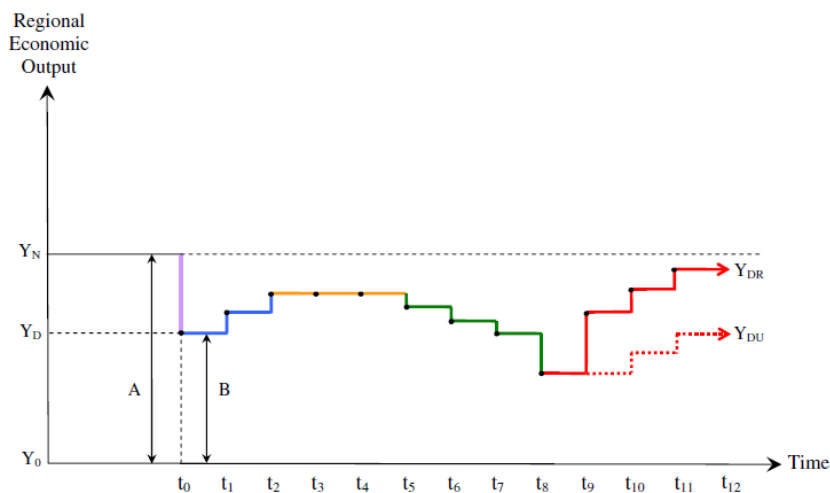


Figura 1.9 – Performance economica di un sistema industriale regionale sottoposto ad un evento destabilizzante (Rose, [65])

Con riferimento al grafico di Figura 1.9, che rappresenta la storia temporale della performance economica di un sistema industriale regionale sottoposto ad un evento destabilizzante, Rose definisce la *TDER* come:

$$TDER = \sum_{t=0}^n Y_{DR} - \sum_{t=0}^m Y_{DU} \quad (1.4)$$

con $m < n$, dove Y_{DR} è il livello di performance mantenuto nell'unità di tempo nel caso in cui il sistema sia in grado di accelerare l'inizio della fase di *recovery*,

Y_{DU} la grandezza duale corrispondente al caso in cui questo non avvenga ed n e m i periodi temporali in cui si suddivide la fase di *recovery* nei due casi. Dalle definizioni data di *TDER* appare evidente come il calcolo di un indicatore di questo tipo presupponga la conoscenza in termini quantitativi della differenza di performance tra un sistema denotato da un certo grado di resilienza ed un sistema che ne è totalmente privo. Tale conoscenza non è affatto immediata. Inoltre questa differenza di performance è in realtà proprio quanto si vuole stimare con l'indicatore *TDER* e ciò comporta una circolarità concettuale che rischia di creare una certa impasse nel caso si voglia implementare concretamente metriche di questo tipo. Questi dunque rimane un buon riferimento teorico, ma di difficile applicazione reale.

Altro contributo interessante alla creazione di metriche di resilienza è quello fornito da Henry e Ramirez-Marquez in [66]. Questi introducono una grandezza, detta $R_F()$ che caratterizza la resilienza di un generico sistema in ogni istante di tempo successivo ad un evento di *disturbance* o di *disruption*. La metrica da essi proposta è riconducibile ad una misura di *robustness* e *recovery*. Essi individuano una funzione di servizio $F(t_i, e_j)$, dove, rimandando a Figura 1.10, $t_e \leq t_i \leq t_f$ è un generico istante temporale compreso tra l'occorrere dell'evento $e_j \in E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, con E insieme di generici eventi, e l'istante di completo assorbimento delle conseguenze di tale evento. L'indicatore di resilienza viene quindi definito dalla formula:

$$R_F(t_i, e_j) = \frac{F(t_i, e_j) - F(t_d, e_j)}{F(t_0) - F(t_d, e_j)} \quad \forall e_j \in D \quad (1.5)$$

dove $D = \{e_j \in E | F(t_d, e_j) < F(t_0)\}$ insieme di eventi destabilizzanti che potrebbero occorrere al sistema. La metrica $R_F(t_i, e_j)$ indica, a partire dallo stato perturbato del sistema, la porzione di funzione di servizio che è stata ristabilita. $R_F(t_i, e_j)$ è esprimibile in termini quantitativi esclusivamente se lo è $F(t_i, e_j)$, è quindi decisivo il modo con cui tale funzione viene scelta ed espressa. Il valore minimo dell'indicatore è 0 e corrisponde al caso in cui non vi sia stato alcun recupero rispetto al momento di massimo impatto; $R_F(t_i, e_j)$ assumerà valore unitario in corrispondenza del pieno recupero di funzionalità da parte del sistema, ovvero non appena sia verificato $F(t_i, e_j) = F(t_0)$; teoricamente non esiste un limite superiore per $R_F(t_i, e_j)$, in quanto l'indicatore tende a crescere indefinitamente a partire dal momento in cui il sistema si porta ad un livello di servizio maggiore rispetto a quello precedente l'evento; l'indicatore risulta indefinito se $F(t_d, e_j) = F(t_0)$, ovvero nel caso in cui l'evento non comporti alcuna perdita di performance per il sistema, anche se

avendo definito $e_j \in D$, si è ristretta la definizione a quei valori di e_j che esulano da tale casistica.

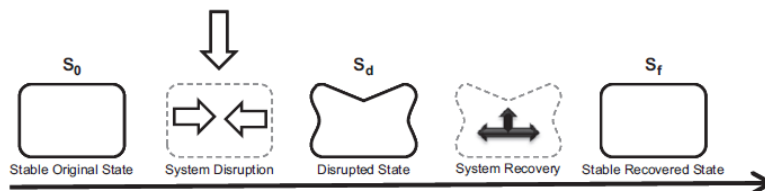


Fig. 1. System state transition in resilience.

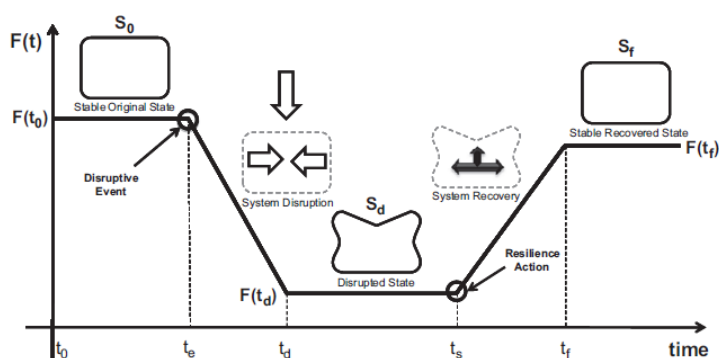


Figura 1.10 – Andamento funzione di servizio (Henry e Ramirez-Marquez, [66])

Ipotizzando poi che sia possibile il sistema S sia scomponibile in componenti s_i tali che $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, che ogni componente possa essere soggetto a danni specifici e che ad ogni danno nel componente sia associato un tempo di recupero $t(s_i)$ ed un costo di riparazione/sostituzione $c(s_i)$, vengono calcolati degli indicatori complessivi di *recovery* in termini di tempo e costo. Avremo quindi:

$$T_R(e_j) = \sum_{s_i \in S_j} t(s_i) \tag{1.6}$$

che, definito $S_j = \{S_d, S_s, S_f\}$ come uno degli stati assunti dal sistema tra il momento di massimo impatto e la piena *recovery*, indica il tempo complessivo necessario al sistema per tornare allo stato S_0 . Dichiariamo subito che, formulato in questi termini, l'indicatore è un puro supporto concettuale, in quanto l'operazione di somma non tiene conto di eventuali operazioni di ripristino che possono avvenire in parallelo. Similmente per quanto riguarda il costo della *recovery* si avrà:

$$C_R(e_j) = \sum_{s_i \in S_j} c(s_i) \tag{1.7}$$

Da notare come nell'indicatore di costo appena definito, il valore $c(s_i)$ non viene calcolato a partire dal solo costo associato al ripristino del componente, ma vi si include anche il costo legato alla perdita di servizio sperimentata, ai sensi di un costo opportunità.

Sviluppando quanto definito da Bruneau et al. in [67], Reed et al. propongono una metrica di resilienza basata su quella che viene chiamata un "funzione di qualità", concettualmente assimilabile a quella che abbiamo appena chiamato "funzione di servizio". La funzione di qualità $Q(t)$ viene definita come:

$$Q(t) = Q_\infty - (Q_\infty - Q_0)e^{-bt} \quad (1.8)$$

dove Q_∞ è il livello di servizio del sistema in una situazione indisturbata, Q_0 è il livello di servizio a seguito dell'evento, b una misura della rapidità di *recovery* del sistema e t il tempo in giorni. La funzione $Q(t)$ può assumere valori compresi tra 0 e 1, con $Q(t) = 1$ in corrispondenza della piena operatività del sistema e $Q(t) = 0$ in corrispondenza di completa inoperatività. Il rapporto $\frac{(Q_\infty - Q_0)}{Q_\infty}$ può quindi essere inteso come un indice della *robustness* del sistema. Utilizzando $Q(t)$ viene costruito un indicatore sintetico della resilienza del sistema:

$$R = \frac{\int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt}{(t_2 - t_1)} \quad (1.9)$$

Con t_2, t_1 estremi dell'intervallo di tempo considerato. Se si ha a che fare con una rete di n infrastrutture interdipendenti e ipotizzando che R_1 sia la resilienza dell'infrastruttura 1, R_2 dell'infrastruttura 2, etc, è possibile individuare una funzione $R_S = g(R_1, R_2, \dots, R_n)$ che descriva la resilienza dell'intera rete.

Da ultimo, accanto a queste misure di tipo quantitativo, Serulle et al. [68] ne propongono una di tipo qualitativo. Considerando il sistema stradale della città di Santo Domingo, l'indicatore viene costruito in modo progressivo a partire da dieci grandezze elementari: la capacità disponibile del sistema stradale, la densità della rete stradale, il numero e la prossimità di infrastrutture di trasporto alternative, il ritardo medio dei viaggiatori sulla rete stradale, velocità media sulla rete, costo di trasporto privato, costo di trasporto commerciale e industriale.

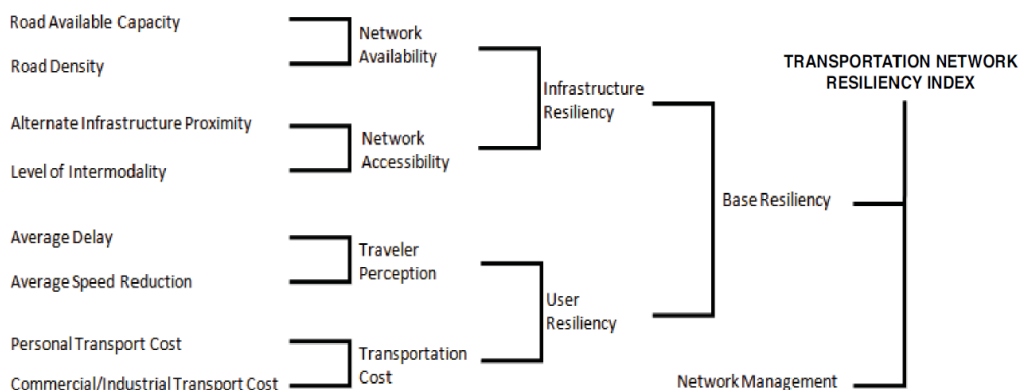


Figura 1.11 – Struttura di calcolo indicatore qualitativo di resilienza(Serulle et al., [68])

Ad ognuna di queste grandezze viene assegnato un valore qualitativo su una scala di cinque valori. Applicando una logica di tipo *if-then* vengono ricavati una serie di indicatori intermedi. Ripetendo il procedimento per i livelli successivi si arriva al computo di un indicatore di resilienza sintetico. In Figura 1.11 riportiamo lo schema di calcolo proposto in [68].

Capitolo 2

Il grande terremoto e tsunami del Marzo 2011 nella regione del Tohoku (Giappone)

Nel primo pomeriggio dell'11 Marzo 2011 la costa nord-orientale del Giappone veniva colpita da una serie di violente scosse sismiche di *magnitudo* 9.0 nella scala *Richter*. Con epicentro situato approssimativamente a 130 km al largo della città di *Sendai*, capoluogo della regione del *Tohoku*, ed originatosi ad una profondità di 24,4 km sotto il livello del mare, il terremoto fu di intensità tale da causare una deriva verso est dell'isola di *Honshu* (la maggiore dell'arcipelago giapponese) di 2,4 metri , e da provocare uno spostamento dell'asse terrestre di 25 cm.

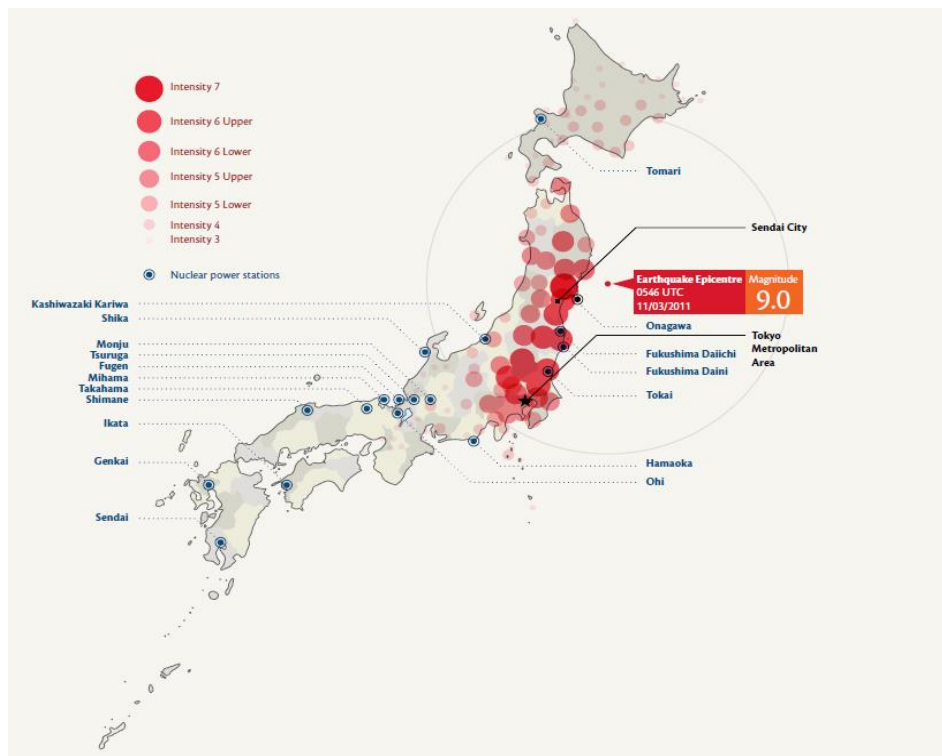


Figura 2.1 - Mappa del sisma del Marzo 2011(WHO, [69])

La conseguenza più grave del movimento tellurico sottomarino fu però la generazione di una serie di onde anomale, o tsunami , che colpirono le aree costiere del *Tohoku* e dell'*Hokkaido* meridionale approssimativamente 15 minuti dopo la prima scossa. Le onde, alte fino a 38 metri, si abbattono su più

di 500 km di costa, penetrando per diversi chilometri nell'entroterra e travolgendo tutto ciò che trovarono sul loro cammino. Interi villaggi costieri vennero letteralmente spazzati via dalla violenza delle acque.

Il grande terremoto del Marzo 2011 e il conseguente tsunami vengono considerati la peggior catastrofe che abbia colpito il Giappone nella storia. Il bilancio in termini di vite umane perse è impressionante: al 10 Febbraio 2012 si contano 15.848 vittime accertate e 3.305 dispersi. Il danno causato viene stimato in termini economici in 256 miliardi di dollari [69]. Le prefetture maggiormente colpite furono la prefettura di *Miyagi*, *Fukushima* ed *Iwate*.

Gli effetti della catastrofe non si limitarono però solo all'incredibile numero di vittime. Infrastrutture di fondamentale importanza per la sopravvivenza della popolazione e per la risposta al disastro vennero distrutte o rese inservibili. Fu proprio questa una delle caratteristiche più devastanti del cataclisma: la sua entità fu tale che strutture ed enti demandati a fornire azioni di risposta, di supporto logistico e di protezione civile sperimentarono a loro volta perdite e carenze di risorse talmente ingenti da vedere la propria operatività pesantemente diminuita, quando non totalmente azzerata.

Alcuni dati consentono di inquadrare le dimensioni della devastazione provocata dal terremoto e conseguente tsunami. L'esposizione dettagliata di fatti e cifre relative al disastro del Marzo 2011, si rende inoltre indispensabile per la comprensione di scelte progettuali ed ipotesi fondamentali alla base del modello elaborato e delle analisi condotte.

2.1 Il disastro in cifre

Per prima cosa in Tabella 2.1 presentiamo alcune informazioni riguardanti le prefetture della regione colpita, in modo da offrire più chiari riferimenti per la comprensione di quanto esposto in seguito.

<i>Dati prefetture Tohoku</i>				
Nome	Popolazione	Area [Km²]	Densità[ab/Km²]	Capoluogo
<i>Miyagi</i>	2.337.513	7.285,16	320,86	<i>Sendai</i>
<i>Fukushima</i>	2.028.752	13.782,54	157	<i>Fukushima</i>
<i>Aomori</i>	1.373.164	9.606,26	154	<i>Aomori</i>
<i>Iwate</i>	1.330.530	15.278,40	90	<i>Morioka</i>
<i>Yamagata</i>	1.166.309	9.323,34	125,1	<i>Yamagata</i>
<i>Akita</i>	1.106.050	11.612,22	95,2	<i>Akita</i>
Tot	9.342.318	66.889,55		

Tabella 2.1 - Dati prefetture del Tohoku

Possiamo notare come il *Tohoku* abbia una superficie totale che potremmo assimilare a quella risultante dalla somma delle regioni italiane Lombardia, Piemonte e Veneto, pur con una densità abitativa significativamente minore. Presentiamo ora alcune informazioni sull'impatto della catastrofe.

Secondo dati del *Fire and Disaster Management Agency of Japan (FDMA)* 800.000 edifici furono completamente o parzialmente distrutti [70].

L'11 Marzo 2011 si registravano 4,6 milioni di abitazioni senza luce elettrica nel *Tohoku*, 4 milioni nel Kanto, la regione comprendente l'area metropolitana di Tokyo e Yokohama. Una settimana dopo il disastro 353.358 abitazioni risultavano ancora prive di elettricità [69].

Il 16 Marzo 1.794.964 case erano prive di acqua corrente e 467.773 non avevano accesso alla fornitura di gas per il riscaldamento e l'uso domestico. A quasi un anno dal disastro, il 25 Gennaio 2012, circa 45.000 abitazioni erano ancora prive di connessione alla rete idrica [69].

Il 17 Marzo 2011 831.736 linee telefoniche risultavano isolate.

Particolarmente critica la situazione degli ospedali; secondo dati del Ministero della Salute giapponese, a due settimane dal sisma il 52% delle strutture sanitarie delle prefetture di *Miyagi*, *Fukushima* e *Iwate* si trovava nell'impossibilità di ricevere nuovi degenti, ed il 14% di esse vedeva completamente annullata la propria capacità operativa per mancanza di risorse, in particolare di personale [69].

La carenza di carburante, dovuta alla sospensione della produzione in sei delle nove raffinerie del *Tohoku* e alla difficoltà di approvvigionamento causata dai danni alle principali vie di trasporto, si presentò subito come una delle principali emergenze, in particolare per il suo effetto limitante sulle operazioni di soccorso.

2.2 La minaccia di una catastrofe nucleare

In corrispondenza delle prime violente scosse sismiche dell'11 Marzo, 10 reattori nucleari nei tre impianti di *Onagawa* (prefettura di *Miyagi*), *Fukushima Daini* e *Fukushima Daiichi* (prefettura di *Fukushima*), posti lungo la costa e il cui esercizio era ed è affidato alla TEPCO (*Tokyo Electric Power Company*), vennero posti in arresto precauzionale, sospendendo la produzione di potenza ed isolando gli impianti dalla rete elettrica nazionale giapponese. In questi casi l'alimentazione dei sistemi di raffreddamento del nucleo viene affidata a generatori di emergenza alimentati a combustibile diesel. Sfortunatamente l'insufficienza delle barriere frangiflutti dell'impianto di *Fukushima Daiichi* lo espose all'urto dello tsunami, che causò il guasto dei generatori diesel. La

possibilità di raffreddare i reattori 1,2 e 3 dell'impianto si ridusse significativamente e la temperatura dei nuclei iniziò a salire pericolosamente.

Il governo giapponese annunciò immediatamente lo stato di emergenza nucleare, con riferimento all'impianto di *Fukushima Daiichi*. Il 13 Marzo un secondo stato di emergenza fu diramato per l'impianto di *Onagawa* e *Fukushima Daini*, dove si erano riscontrati eccessivi livelli di radioattività. Il 15 Marzo, a causa della potenziale esposizione a radiazioni, la maggioranza delle 270.000 persone residenti in un'area di 20 km attorno all'impianto di *Fukushima Daiichi* e di 10 km per quello di *Fukushima Daini* venne evacuata. Nei giorni seguenti, mentre l'emergenza riguardante gli impianti di *Onagawa* e *Fukushima Daini* rientrava completamente, nell'impianto di *Fukushima Daiichi*, distante soli 250 km dalla capitale *Tokyo*, permanevano le difficoltà nel raffreddamento del nocciolo dei reattori, mentre il livello di radiazione nell'area continuava a salire. Il 18 Marzo il Governo giapponese portava a livello 5 nella scala INES (*International Nuclear and Radiological Event Scale*) la classificazione dell'incidente; contestualmente, constatata l'impossibilità di salvare i reattori, iniziava l'utilizzo di mezzi di terra antiincendio, elicotteri e canadair per il raffreddamento [69]. Nonostante i tentativi del personale TEPCO di limitare il rilascio di acque contaminate, una considerevole quantità di fluidi contenente elementi radioattivi deflù in mare e nei terreni circostanti l'impianto. Il 19 Marzo si riscontrarono per la prima volta livelli anomali di radioattività in alcuni alimenti provenienti da zone limitrofe la centrale [71]. Il governo giapponese predispose immediatamente che le autorità sanitarie locali analizzassero il livello di radiazione di qualsiasi derrata alimentare proveniente dalla propria area geografica di competenza. Disposizioni analoghe vennero diramate per l'acqua potabile.

Ad un mese dallo tsunami, il 12 Aprile 2011, la quantità complessiva di radiazioni emesse in ambiente e fluidi radioattivi fuoriusciti era tanto elevata da indurre le autorità giapponesi ad elevare la classificazione dell'incidente al livello 7 nella scala INES (il medesimo dell'incidente del 1986 all'impianto di Chernobyl). Fortunatamente nei giorni successivi gli sforzi per ridurre la temperatura nei reattori 1,2 e 3 iniziarono a dare i loro frutti portando ad un progressivo ridimensionamento dell'emergenza.

Nel breve periodo la maggiore conseguenza dell'incidente in termini effettivi fu un diffuso senso di panico nella popolazione residente nelle aree circostanti la centrale di *Fukushima Daiichi* che, per disposizione delle autorità o per propria iniziativa, abbandonò in massa la prefettura di *Fukushima*. Inoltre un elevato numero di persone che avrebbe avuto necessità di attraversare la prefettura per raggiungere qualche altra destinazione, fu spinto a ricercare percorsi alternativi elevando ulteriormente il carico gravante su un sistema dei trasporti già gravemente limitato nella propria potenzialità.

2.3 Lo stato dei trasporti a seguito del cataclisma

A livello nazionale il sistema di trasporto pubblico giapponese si basa su tre colonne portanti: il trasporto su rotaia, distinto in treni e treni ad alta velocità (*Shinkansen*), i bus regionali ed il trasporto aereo.

Il *Tohoku* non fa eccezione da questo punto di vista, come è possibile verificare dalla mappa di Figura 2.2. Da notare in figura la presenza nella regione del *Tohoku Shinkansen*, collegamento di fondamentale rilevanza tra l'area della capitale *Tokyo* e la parte settentrionale del Paese, di una fitta trama di collegamenti ferroviari convenzionali, gestiti dalla società *Japan Railways* (JR) e di altrettanti collegamenti stradali serviti da bus regionali autostradali.

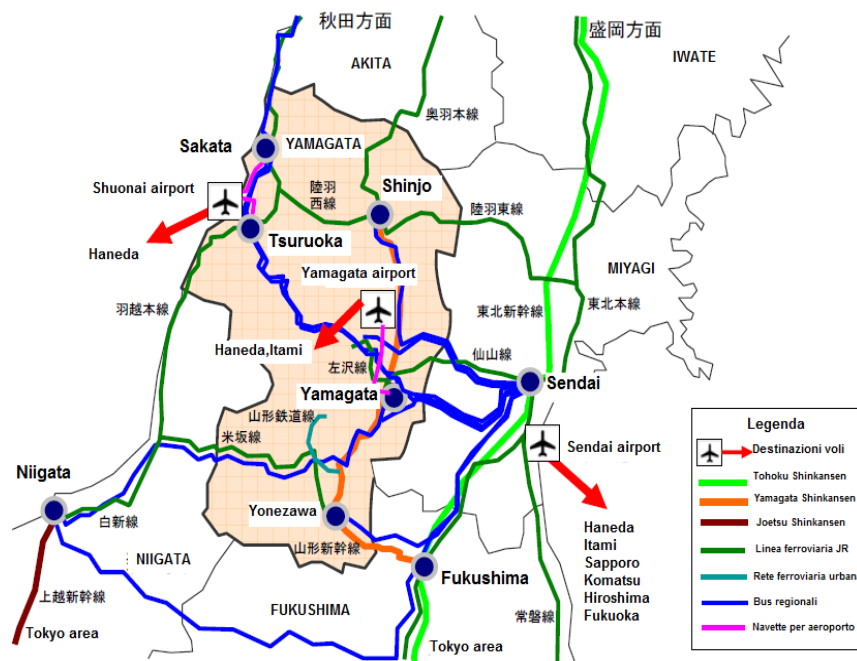


Figura 2.2 - Mappa dei trasporti nel *Tohoku* prima del sisma (YPG, [72])

Per quanto riguarda il trasporto aereo, in condizioni di normale operatività, l'aeroporto di *Sendai* assorbe la quasi totalità del volume di traffico nel *Tohoku*. Situato a 25 minuti dal capoluogo della regione l'aeroporto di *Sendai* è utilizzato da circa 2,5 milioni di passeggeri all'anno, la quasi totalità dei quali per voli domestici¹¹. L'aeroporto di *Sendai* è l'unico aeroporto della regione del *Tohoku*

¹¹ Informazioni tratte da colloquio con Masahiko Kurono, presidente *Institution for Transport Policy Studies* ed ex amministratore delegato della *Narita International Airport Corporation*, in data 5 Marzo 2012, presso *Japan International Transport Institute (JITI)*,Tokyo.

ad appartenere alla categoria di aeroporti “*Kun-Kari*”, ovvero aerostazioni gestite in modo diretto dal Ministero dei Trasporti giapponese. I numerosi nodi aeroportuali minori circostanti, che elencheremo nel dettaglio in seguito, appartengono invece alla classe “*Chiho-Kanri*”, ovvero aeroporti gestiti da amministratori designati dai governi prefetturali locali.

2.3.1 Le condizioni del trasporto stradale e su rotaia

A seguito del sisma e dello tsunami la potenzialità dei sistemi di trasporto stradale e ferroviario nell’area del *Tohoku* era drammaticamente diminuita.

1233 strade riportarono seri danni nelle prefetture di *Aomori, Miyagi, Yamagata, Akita, Ibaraki, Tochigi, Saitama, Gunma, Chiba* e *Iwate*. A causa del collasso di ponti o cavalcavia, le profonde crepe createsi nel manto stradale o per l’immane mole di detriti trasportata dalla forza dello tsunami, 540 tratti di strade a pedaggio, autostrade nazionali e autostrade regionali vennero chiusi. 72 di questi risultavano ancora non accessibili al 31 Gennaio 2012 [69]. A causa dell’estrema carenza di carburante ed al fine di agevolare le operazioni di soccorso riducendo al minimo il traffico sui tratti stradali integri, la popolazione fu immediatamente invitata dalle autorità ad evitare l’utilizzo delle proprie vetture.

Diversi operatori di trasporto pubblico su gomma nelle prefetture di *Iwate, Miyagi* e *Fukushima* subirono seri danni alle proprie risorse operative: 219 mezzi vennero distrutti o gravemente danneggiati dallo tsunami e numerosi dipendenti si trovarono nell’impossibilità di svolgere il proprio lavoro, o perché direttamente colpiti dal cataclisma, o a causa di danni alle proprie proprietà o di decessi ed infortuni gravi tra i propri familiari. Nelle prefetture sopracitate circa il 25% delle tratte servite prima del disastro risultavano non operative per insufficienza di risorse [73]. L’operatività fu ulteriormente ridotta dall’estrema carenza di carburante nei giorni immediatamente successivi al terremoto, sia per la ridotta possibilità di raffinare le scorte di greggio dovuta ai danni riportati dalla maggior parte delle raffinerie della regione, sia per l’impossibilità di approvvigionarsi di petrolio causata dallo stato di pesante devastazione di tutti i porti della regione e delle *pipeline* di trasporto dipartenti da punti di attracco *off-shore*. In Figura 2.3 è possibile vedere quali fossero le arterie stradali regionali ancora fruibili nei primi 20 giorni successivi al disastro, ovvero i tratti autostradali *Sakata-Yamagata, Niigata-Yamagata, Sendai-Yamagata, Shinjo-Sendai* e *Niigata-Fukushima-Sendai*. Restava inoltre intatto il collegamento tra la città di Yamagata e il suo aeroporto.

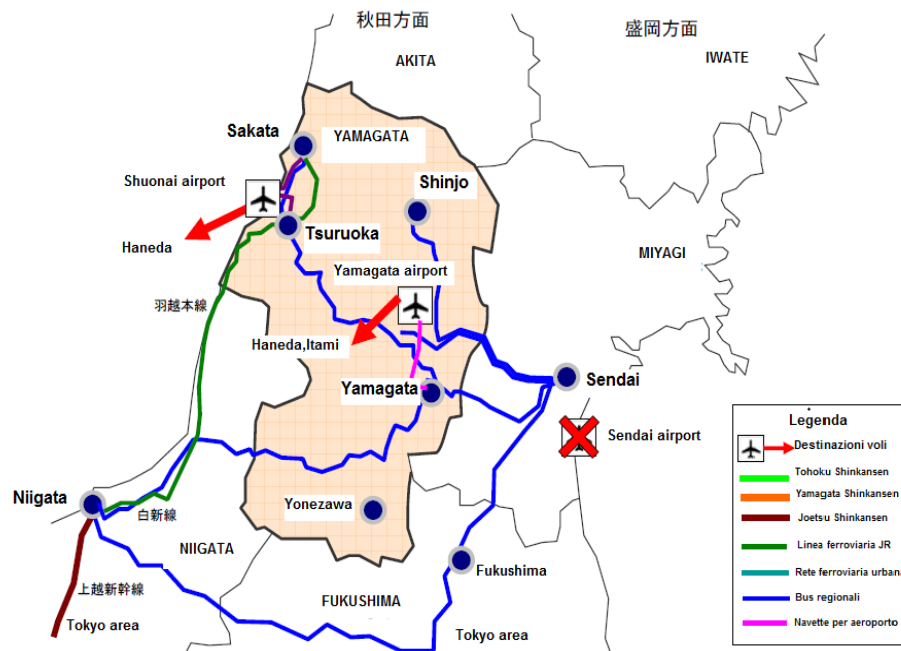


Figura 2.3 - Mappa dei trasporti nel Tohoku dopo il sisma (YPG, [72])

Per quanto riguarda invece il trasporto su rotaia, 64 linee ferroviarie furono rese inutilizzabili per i danni riportati dalla rete a causa delle scosse sismiche e delle inondazioni. Le linee convenzionali JR e la linea ad alta velocità *Tohoku Shinkansen* rimasero completamente inattive per 20 giorni dopo il disastro [73]. La normale operatività del servizio ferroviario riprese solo 50 giorni dopo il disastro. Ancora in Figura 2.3 si può vedere come la funzionalità della rete ferroviaria, sia ordinaria sia ad alta velocità, fosse completamente azzerata. Stante questo stato di cose, per almeno 20 giorni dopo il terremoto, l'unica soluzione di trasporto fruibile per chi volesse uscire ed entrare dalla regione rimaneva il trasporto aereo.

2.3.2 Le condizioni del sistema di trasporto aereo e l'inondazione dell'aeroporto di Sendai

Per ragioni storiche e politiche [74], il Giappone possiede un elevatissimo numero di strutture aeroportuali, come mostrato da Figura 2.4, in grado di supportare un traffico aereo di dimensioni ben maggiori di quelle effettive. Per quanto riguarda il *Tohoku* abbiamo già avuto modo di accennare al fatto che, in condizioni normali, la maggior parte del traffico aereo è assorbita dall'aeroporto di *Sendai*. Gli altri aeroporti della regione sono caratterizzati invece da flussi di passeggeri modesti, come riportato dal diagramma di Figura 2.5, che mostra i volumi complessivi di traffico per tutti gli aeroporti della regione nel triennio 2010-2011-2012. Nel medesimo grafico si evidenzia la netta flessione di traffico

sperimentata dall'aeroporto di *Sendai* nel 2011 a causa del cataclisma.(dati MLIT [75]).

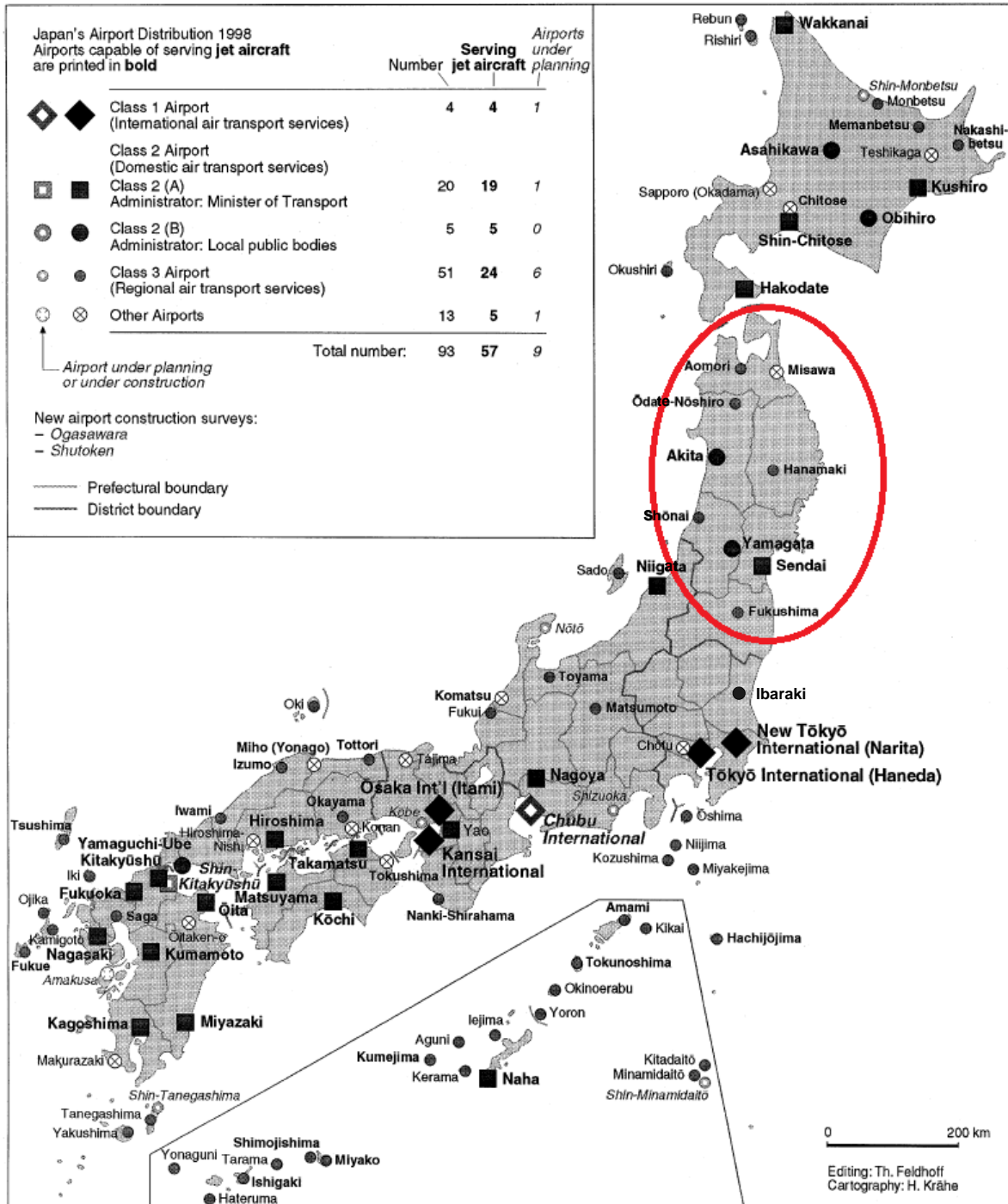


Figura 2.4 – Mappa aeroporti giapponesi suddivisi per categoria (Feldhoff, [74])

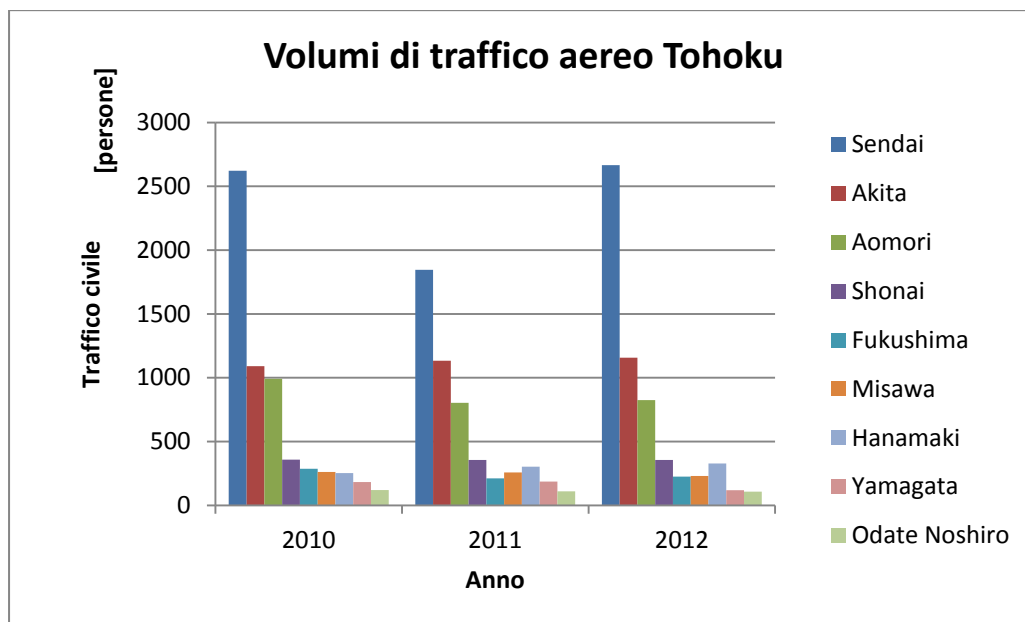


Figura 2.5 - Volumi di traffico aereo civile nel Tohoku per il triennio 2010-2011-2012 (MLIT, [75])

A seguito del sisma infatti, gli aeroporti di *Sendai*, *Hanamaki*, *Fukushima* ed *Ibaraki* subirono danni tali da comprometterne la continuità operativa. In particolare ad *Hanamaki* ed *Ibaraki* ampie porzioni dei pannelli di copertura del terminal crollarono a terra. A *Fukushima* le scosse causarono la frantumazione delle vetrate della torre di controllo, rendendola momentaneamente inservibile. In ogni caso nel giro di tre giorni dal disastro tali aeroporti avevano riacquisito piena operatività.

Molto diversa era la situazione dell'aeroporto di *Sendai*. Situato a poche centinaia di metri dal mare e privo di qualsiasi protezione frangiflutti, l'aeroporto fu investito in pieno dalla violenza dello tsunami. I danni riportati furono di entità impressionante. Le due piste di atterraggio, il piazzale e le *taxiways* vennero sommerse da diversi metri d'acqua mentre il terminal fu allagato fino alla quasi totalità del primo piano.

Ritiratesi le acque, l'aerostazione si trovava in condizioni di severissima devastazione. Ricoprivano l'area dell'aeroporto una quantità stimata intorno ai 300.000 metri cubi di detriti, tra cui 1000 automobili, alberi, piccoli velivoli e intere abitazioni prefabbricate. Fortunatamente nessun jet di linea si trovava sulla pista al momento dell'impatto dello tsunami. Oltre all'enorme cumulo di detriti, ricopriva l'asfalto dei 3000 metri di pista uno strato di fango e sabbia spesso oltre cinque centimetri. I generatori di emergenza dell'aeroporto e le apparecchiature ATC furono rese completamente inservibili dall'acqua. Subì inoltre gravi danni la principale via di accesso all'aeroporto: la *Sendai Airport*

Access Railway, bretella ferroviaria tra la città di *Sendai* e il suo aeroporto, che rimase inutilizzabile per diversi mesi dopo il disastro. Per due giorni l'aeroporto risultò completamente isolato e con esso le circa 1400 persone tra passeggeri, personale dell'aeroporto e abitanti delle zone limitrofe che trovarono rifugio nel terminal, come previsto dai protocolli di gestione dell'emergenza della protezione civile locale. Fu questo uno degli aspetti più immediati dell'emergenza. In condizioni di completo isolamento e all'interno di uno scenario di devastazione generalizzata, privi di sufficienti generi alimentari, di risorse e spazi adeguati, le autorità dell'aeroporto di *Sendai* dovettero provvedere per due giorni all'alimentazione ed alla sicurezza di tutti gli individui rifugiati all'interno del terminal¹².

La temporanea perdita dell'aeroporto di *Sendai* costituì uno dei principali problemi nella risposta alla catastrofe del Marzo 2011. Con strade, ferrovie e porti resi in gran parte inservibili per i danni strutturali patiti o per l'ostruzione costituita dai detriti trasportati dalla forza delle acque, la possibilità di utilizzare elicotteri ed aeroplani per le operazioni di soccorso e supporto divenne capitale. Inoltre si dovette far fronte ad una consistente domanda di trasporto aereo da parte della popolazione, dovuta a due fattori principali: da un lato la volontà di parte della popolazione di abbandonare zone disastrose o ritenute rischiose per la propria salute e sicurezza, quale la prefettura di *Fukushima*, interessata dagli incidenti agli impianti nucleari di *Fukushima-Daichi*; dall'altro i flussi in ingresso e in uscita causati dai numerosi giapponesi residenti nei centri economici e industriali del Paese, le megalopoli di *Tokyo* e *Osaka*, desiderosi di ricongiungersi con i propri cari residenti nelle zone colpite dal cataclisma. Anche il trasporto di beni di prima necessità, quali acqua, viveri e carburante, dipese sostanzialmente dal solo traffico aereo.

In questo quadro è facile capire come per le autorità locali e nazionali divennero una priorità assoluta tanto il recupero, nel più breve tempo possibile, della piena operatività del principale *hub* aeroportuale della regione quanto la possibilità, nell'immediato, di sopperire alla sua perdita attraverso aeroporti ancora operativi.

Rispetto al primo di questi due aspetti fu di fondamentale importanza il supporto fornito dall'esercito degli Stati Uniti d'America all'interno dell'operazione "*Tomodachi*". Questa consistette nel dispiegamento da parte del Governo USA, attraverso lo *U.S. Forces Japan* (USFJ) e lo *U.S. Pacific Command* (USPACOM), di 24.500 uomini, 22 navi, 2 portaerei, 189 velivoli e 122 veicoli terrestri per sostenere il governo giapponese e la *Japan Self Defense Force* (JSDF) nelle operazioni di soccorso, ricerca dei dispersi e risposta al disastro. Il

¹² Informazioni tratte da colloquio con personale Tokyo Regional Civil Aviation Bureau, *Sendai* Office, presso aeroporto di *Sendai* in data 15 Maggio 2012.

16 Marzo furono inviati a *Sendai* 300 *marines* ed un elevato numero di mezzi pesanti per la rimozione dei detriti. I militari americani, supportati da un'impresa di costruzione locale, lavorarono 24 ore su 24 per ristabilire l'operatività dell'aeroporto, ottenendo risultati sensazionali. Già nel pomeriggio del 16 Marzo il primo MC-130 della *US Air Force* poteva atterrare a *Sendai*. Il 28 Marzo 1000 metri di pista erano disponibili per l'atterraggio di velivoli militari. Il 13 Aprile, a poco più di un mese dal disastro, l'aeroporto riapriva a voli civili per *Osaka* e *Tokyo*. Da sottolineare il contributo fondamentale al realizzarsi di un recupero di funzionalità così rapido, dello staff del *Technical Emergency Control* (TEC), un'unità del MLIT specializzata nella gestione di situazioni di crisi, inviata all'aeroporto di *Sendai* nei giorni immediatamente successivi al disastro. Questi supportarono attivamente il personale dell'aerostazione e del terminal nell'affronto dell'emergenza e nell'accelerazione delle operazioni di *recovery*. In particolare si occuparono di gestire l'evacuazione della popolazione rifugiata nel terminal, della direzione delle operazioni di sgombero della pista di atterraggio da parte dei militari statunitensi, di fornire un dispositivo radar di emergenza per l'ATC e di coordinare le operazioni di ripristino delle recinzioni delle piste di atterraggio, totalmente divelte dallo tsunami.

2.3.3 Il ruolo degli aeroporti regionali e dell'aeroporto di Yamagata nella gestione dell'emergenza

Nonostante la straordinaria rapidità con cui l'aeroporto di *Sendai* fu reso nuovamente operativo questi rimase inutilizzabile per voli di soccorso per 17 giorni, e chiuso al traffico civile per un mese. In questo lasso di tempo si dovettero quindi trovare valide alternative, a maggior ragione per l'indisponibilità parziale o totale delle infrastrutture di trasporto stradale e ferroviario. La soluzione a questo problema fu trovata grazie all'utilizzo dei numerosi aeroporti regionali del *Tohoku*. Questi ultimi, notevolmente sottoutilizzati rispetto alla propria potenzialità massima in condizioni operative normali, funsero da riserva strategica per il sistema di trasporto aereo della regione, sopperendo inoltre alla mancanza di mezzi di trasporto alternativi. Il grafico di Figura 2.6 illustra in modo approssimato quanto appena detto. Considerato infatti il numero complessivo di passeggeri gestito dall'aeroporto di *Sendai* nel mese di Febbraio, lo si è confrontato con la somma degli incrementi nel numero di passeggeri sperimentato dagli altri aeroporti regionali nel mese di Marzo, mettendo così in luce come la diminuzione del traffico su *Sendai* sia stata di fatto compensata da tali incrementi.

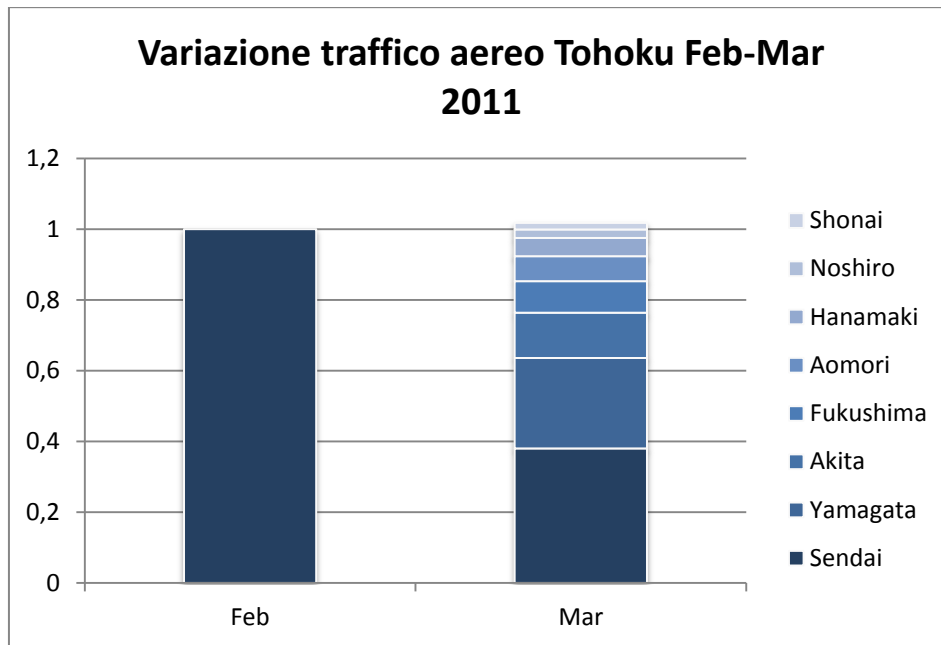


Figura 2.6 – Variazione traffico aereo complessivo nel Tohoku a cavallo del disastro (MLIT, [75])

In questo senso è possibile affermare che il sistema di trasporto aereo ebbe un comportamento fortemente resiliente, in quanto in corrispondenza dell'evento disastroso e nei giorni successivi, riuscì a mantenere il proprio livello di servizio sostanzialmente immutato. Nel conseguire tale risultato centrale fu il ruolo dell'aeroporto di *Yamagata*.

La necessità di recuperare al più presto un accettabile livello di potenzialità di trasporto aereo per il traffico civile, indusse le autorità giapponesi ad individuare nel più breve tempo possibile nodi aeroportuali sui quali trasferire i voli che *Sendai* non era momentaneamente in grado di operare [73]. Per motivi di prossimità geografica che possono essere verificati in Figura 2.4, la scelta ricadde sugli aeroporti di *Fukushima* (prefettura di *Fukushima*), *Hanamaki* (prefettura di *Miyagi*), e *Yamagata* (prefettura di *Yamagata*). I gestori delle tre aerostazioni citate e le compagnie aeree che servivano normalmente l'aeroporto di *Sendai*, si attivarono immediatamente per trasferirne i voli e si provvide ad esortare la popolazione a privilegiare l'utilizzo dei tre aeroporti per i propri spostamenti.

Nella realtà dei fatti l'aeroporto di *Yamagata* riscontrò però un incremento nel flusso di passeggeri gestiti decisamente superiore rispetto agli altri due. Questo si dovette principalmente a due motivi. Per prima cosa l'estrema vicinanza delle città di *Yamagata* e *Sendai* rendeva la scelta dell'aeroporto di *Yamagata* nettamente più conveniente per persone che necessitassero con urgenza del

servizio di trasporto aereo. In secondo luogo la minaccia di una catastrofe nucleare presso la centrale di *Fukushima Daiichi* indusse molti passeggeri ad evitare l'aeroporto di *Fukushima*. Per questo motivo dopo pochi giorni dal disastro i voli civili su *Fukushima* vennero ridotti al minimo, e l'aeroporto venne esclusivamente utilizzato come base per gli elicotteri di soccorso.

L'aeroporto di *Yamagata*, dotato di una pista di atterraggio di 2000 metri, opera in condizioni normali 4 voli al giorno: 3 per *Osaka* ed 1 per *Tokyo*, con un volume di passeggeri annuale che nel 2010 si attestava intorno ai 186.000 (Figura 2.5). Nei giorni successivi al disastro il numero dei voli e dei passeggeri aumentò esponenzialmente. Dal 12 al 31 del mese di Marzo si raggiunse un massimo di 32 voli al giorno, con l'incremento dei voli per le destinazioni già servite e l'aggiunta di voli speciali per *Sapporo* e *Nagoya*; nello stesso intervallo temporale il flusso di passeggeri ebbe un incremento medio di 15 volte rispetto a quanto osservato nei medesimi giorni del mese di Marzo dell'anno precedente, come mostrato in Figura 2.7.

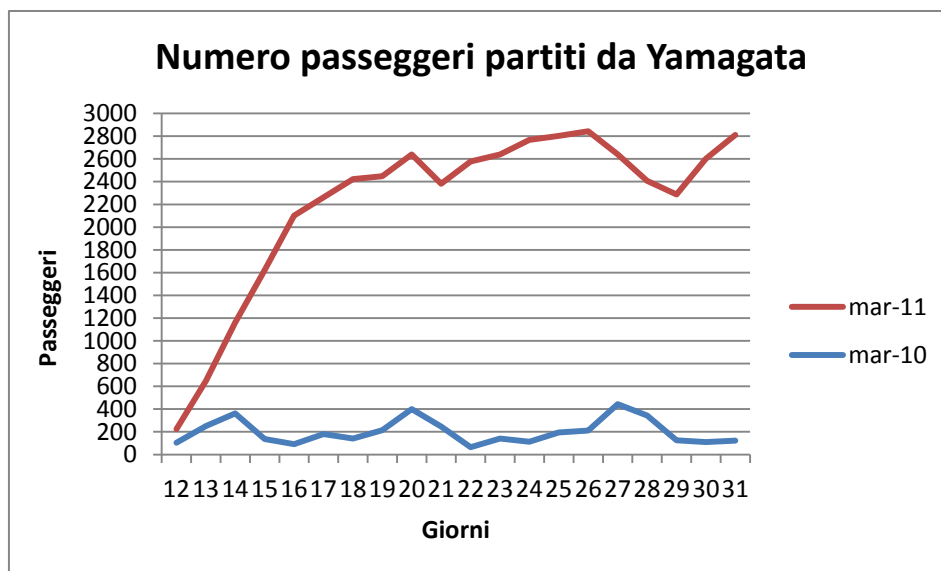


Figura 2.7 – Numero di passeggeri partiti dall'aeroporto di Yamagata nel Marzo 2010 e nel Marzo 2011 (MLIT, [75])

Per un considerevole numero di giorni l'aeroporto di *Yamagata* passò dunque da essere aerostazione sostanzialmente inutilizzata, sita in un'area esclusa dalle principali direttrici di trasporto del *Tohoku*, a nodo aeroportuale di primo piano della regione.

Questo cambiamento venne effettuato con estrema rapidità ed un grado di flessibilità sorprendenti. Tuttavia, fu inevitabile l'insorgere di alcune criticità operative. Sebbene infatti le compagnie aeree, gli amministratori dell'aeroporto, ovvero lo *Yamagata Airport Office* (YAO), il MLIT attraverso il *Tokyo Civil*

Aviation Bureau (TCAB) e l'ATC giapponese si fossero immediatamente prodigate per adeguare il più rapidamente possibile la potenzialità di trasporto dell'aeroporto di *Yamagata* alla crescente domanda, nei giorni immediatamente successivi al disastro non sempre si fu in grado di consentire a tutti i passeggeri arrivati al terminal dell'aeroporto di raggiungere le destinazioni desiderate. Il grafico di Figura 2.8 mostra, secondo quanto riportato dai rapporti del *Yamagata Prefectural Government* (YPG), il numero di persone che si vide costretta a pernottare in aeroporto nei giorni successivi al cataclisma.

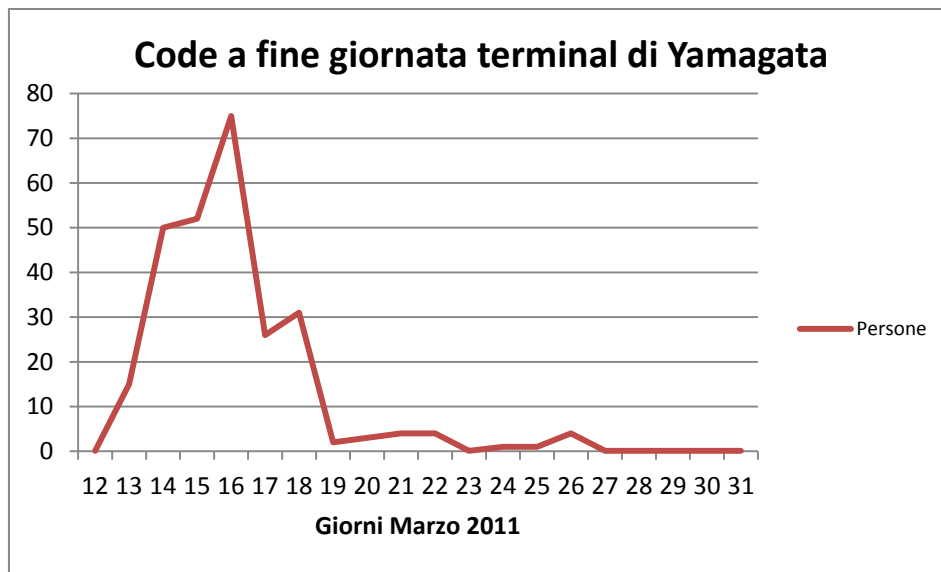


Figura 2.8 – Persone che pernottarono nell'aeroporto di Yamagata a seguito del sisma (YPG, [72])

L'indisponibilità del sistema di trasporto ferroviario, in particolare del *Tohoku Shinkansen*, ed il nuovo ruolo di perno del trasporto aereo regionale assunto da *Yamagata* si riflesse inoltre in una serie di scompensi sulla rete di trasporto pubblico terrestre regionale che dovette rispondere ad un notevole incremento della domanda di trasporto in direzione della stazione ferroviaria di *Yamagata*, punto di partenza per i bus navetta diretti all'aeroporto. Anche il servizio di mezzi navetta, a causa dell'indisponibilità (protrattasi dal giorno del sisma sino al 2 Aprile 2011) del collegamento su rotaia tra la città di *Yamagata* ed il suo aeroporto, fu interessato da un volume di passeggeri eccezionalmente superiore alla norma.



Figura 2.9 – Persone in attesa al Terminal di Yamagata(YPG, [72])



Figura 2.10 – Persone in coda alla Stazione di Yamagata(YPG, [72])

Come testimoniato da Figura 2.10, anche in questo caso il disallineamento tra la crescente domanda e la potenzialità che si riuscì ad esprimere, portò alla formazione di vaste code di persone in attesa, sia nel terminal e nella stazione ferroviaria di *Yamagata*, sia nelle località di partenza dei Bus di trasporto regionale, nelle città di *Sendai*, *Niigata*, *Sakata* e *Tsuruoka* (Figura 2.3).

Quanto appena descritto costituisce la realtà rappresentata dal modello elaborato all'interno del presente lavoro di tesi, e lo scenario a partire dal quale hanno preso le mosse le analisi condotte. In particolar modo, come chiariremo nel Capitolo 4, ci si è posti innanzitutto in una prospettiva diagnostica, cercando di stabilire l'importanza relativa dei diversi fattori operativi per il raggiungimento di performance di resilienza e flessibilità tanto elevate, per poi andare ad indagare il grado di stabilità di tali performance rispetto a variazioni nel livello di disponibilità di alcune risorse critiche. Prima di affrontare in modo esteso le analisi a cui si è qui accennato, nel capitolo che segue viene descritto il modello ad eventi discreti elaborato allo scopo e se ne espone il processo di validazione.

Capitolo 3

Il modello sviluppato

Dopo aver chiarito nel Capitolo 1 quale sia il collocamento del presente lavoro di tesi all'interno della produzione scientifica sulle analisi di resilienza ed aver esposto nel Capitolo 2 i fatti che costituiscono il contesto del presente caso di studio, in questo capitolo si presenta in dettaglio il modello di simulazione sviluppato, che ha costituito lo strumento base per l'analisi di resilienza del sistema di trasporto regionale durante la fase di emergenza immediatamente a valle dell'evento catastrofico.

Per prima cosa si approfondiranno alcune caratteristiche della simulazione ad eventi discreti, nella loro accezione di simulazioni *process-oriented*; si esporranno le caratteristiche fondamentali del software di simulazione utilizzato per lo sviluppo del modello specifico, presentando quegli elementi che costituiscono i moduli fondamentali del sistema, chiarendo nel dettaglio funzioni e proprietà dei macro componenti in cui sono stati aggregati a formare l'architettura globale del sistema; da ultimo si presenteranno le modalità seguite per la predisposizione dei dati di input, a partire dai dati disponibili raccolti sul campo, e il processo di validazione del modello.

3.1 Simulazioni processo centriche

In 1.5, proponendo un quadro di sintesi delle metodologie esistenti per analisi di resilienza e collocando al suo interno il presente lavoro di tesi, si era affermato di aver individuato nei modelli ad eventi discreti il miglior strumento per la rappresentazione del sistema oggetto di studio. In particolare la più volte citata necessità di una marcata centralità e visibilità dei processi operativi all'interno del modello, ha portato in modo naturale alla scelta di una modellazione di tipo *process-oriented* o processo centrica.

Nella modellazione di infrastrutture di trasporto è infatti spesso opportuno pensare le "entità" che popolano il sistema come elementi che fluiscono in modo passivo all'interno di opportune sequenze di processi, rappresentati da eventi che si succedono nel tempo. Nelle simulazioni processo centriche il comportamento del sistema è descritto attraverso catene e sequenze di tali processi, diversi per ciascuna entità del sistema [76]. La dinamica fondamentale attraverso la quale i processi descritti si sviluppano è quella secondo cui le entità: raggiungono un elemento di processo, entrano in una coda, generano una istanza di servizio nei confronti di una particolare risorsa che, se disponibile, viene prelevata ed utilizzata dall'entità per un determinato tempo di servizio,

quando il servizio è completo l'entità "rilascia" la risorsa ed abbandona l'elemento di processo. Appare evidente come tali dinamiche siano le più consone a descrivere il comportamento di entità di tipo utente, quali i passeggeri di un sistema di trasporto, che si palesano in determinati nodi del sistema, richiedono un servizio di trasporto, ne usufruiscono, ed escono dal sistema non appena il servizio è completo.

In generale è possibile rappresentare un processo come una sequenza di *funzioni*, che possono appartenere a due tipologie differenti [76]:

- Funzioni logiche, ovvero azioni istantanee intraprese dall'entità che attiva la funzione all'interno del processo. È un esempio di questo tipo di funzione l'operazione di verifica della disponibilità di una certa risorsa o l'aggiornamento di un set di dati al momento dell'ingresso di un'entità in un blocco operativo
- Funzioni di ritardo temporale, ovvero funzioni che trattengono un'entità per un dato periodo di tempo. Le funzioni di ritardo possono essere a tempo fissato, determinato ad esempio attraverso un generatore di numeri casuali all'interno di una distribuzione, a tempo non fissato, per le quali il tempo di ritardo dipende da particolari stati del sistema.

Elencando gli elementi fondamentali di sistemi simulativi processo-centrici si avrà:

- *Entità*: oggetti che richiedono un servizio attraversando peculiari sequenze di elementi di processo.
- *Attributi*: informazioni di qualsiasi genere che caratterizzano una particolare entità.
- *Funzioni di processo*: azioni istantanee o ritardi temporali sperimentati dalle entità, nei termini descritti in precedenza.
- *Risorse*: oggetti che forniscono un servizio alle entità, imponendo loro un ritardo temporale la cui estensione dipende dalla durata del servizio fruito e dal tempo di attesa necessario ad accedere alle risorse necessarie.
- *Code*: insiemi di entità dalle caratteristiche simili, generalmente il fatto che attendono la disponibilità di una determinata risorsa per usufruire di un particolare servizio. Una entità che fluisce nel sistema risulterà sempre collocata all'interno di una particolare coda a meno che non stia usufruendo di un certo servizio all'interno di un elemento di processo

Da un punto di vista operativo, il codice di calcolo necessario per rappresentare sistemi attraverso uno schema processo centrico è generalmente semplice, sebbene ponga talvolta alcune limitazioni alla flessibilità di rappresentazione, che viene invece maggiormente preservata da altre tipologie di simulazione ad eventi discreti, quale ad esempio simulazioni *event-oriented* ovvero simulazioni che, piuttosto che concentrarsi sulle azioni che determinati processi

intraprendono nei confronti delle entità del sistema, procedono attraverso il susseguirsi di eventi, a cui sono associate operazioni, attività e ri-schedulazioni degli eventi successivi. È questo il motivo per il quale i moderni linguaggi e software dedicati alla simulazione ad eventi discreti prevedono la possibilità di sviluppare modelli dove lo schema process-oriented include elementi propri della simulazione event-oriented. Il software utilizzato nel presente lavoro di tesi possiede tale caratteristica.

3.2 Software utilizzato per lo sviluppo del modello

In questo paragrafo si vuole descrivere brevemente lo strumento software utilizzato per la costruzione del modello di simulazione presentando le principali caratteristiche ed approfondendone l'applicazione a simulazioni *process-oriented* ad eventi discreti.

Come esposto nell'Introduzione al presente lavoro di tesi, il modello a cui CMAC vuole pervenire prevede la copresenza di livelli di astrazione profondamente differenti, integrati o coordinati all'interno di un'unica architettura modellistica coerente. Questa esigenza progettuale ha spinto a ricercare una piattaforma informatica per l'elaborazione del modello che garantisse il più elevato grado di flessibilità possibile. Era inoltre fondamentale l'utilizzo di uno strumento software intuitivo, le cui dinamiche di funzionamento fossero comprensibili in modo immediato a tutti i membri del gruppo di ricerca, anche a coloro il cui *background* formativo non comprendesse una approfondita conoscenza della programmazione informatica. Per questi motivi la scelta è ricaduta sul software Anylogic©, sviluppato dalla società russa Anylogic Company. Per informazioni dettagliate si rimanda a [77].

Anylogic© è uno strumento che supporta ed integra tre delle principali metodologie di simulazioni in uso allo stato dell'arte: il System Dynamics, simulazioni ad Agenti e simulazioni ad Eventi Discreti (o processo-centriche). Il software, caratterizzato da un ambiente di sviluppo Java, possiede un'articolata interfaccia grafica, che consente di ridurre significativamente i tempi di sviluppo di modelli complessi, facilitando la corretta interazione tra diverse tecniche di modellazione. La presenza di librerie dedicate agevola e velocizza ulteriormente la programmazione, fornendo ad esempio strumenti specifici per la trattazione di sistemi di trasporto ferroviario o per l'elaborazione di algoritmi complessi.

La libreria che è stata utilizzata per costruire il modello oggetto del presente studio è stata la libreria *Enterprise*, che fornisce elementi per la rappresentazione di ogni sorta di processo e di cui si presenteranno brevemente i componenti fondamentali.

3.2.1 I moduli fondamentali della libreria “Enterprise”

Nelle simulazioni ad eventi discreti di tipo “processo-centriche”, la rappresentazione del sistema avviene attraverso una sequenza di operazioni eseguite su determinate entità, siano esse utenti di un certo servizio, parti, documenti, dati, telefonate, veicoli. Come accennato in precedenza le entità sono passive, non operano in modo diretto sui processi del sistema, ma possono possedere attributi in grado di mutare le modalità di processamento. Da un punto di vista informatico in Anylogic© ciò avviene rappresentando le entità come “classi” e gli attributi come metodi, strutture fondamentali del linguaggio Java. Avremo modo di chiarire in 3.3.6 quali siano gli attributi con i quali si è scelto di caratterizzare le entità di cui si è popolato il modello elaborato.

Per la costruzione dei processi la libreria *Enterprise* mette a disposizione una serie di elementi di processo predefiniti, ciascuno caratterizzato da funzioni e proprietà specifiche. L’assemblaggio di tali “blocchi” funzionali in catene, consente la corretta rappresentazione funzionale dei processi che si desidera considerare. Le entità, una volta generate, attraverseranno tali elementi subendo di volta in volta operazioni consone ai propri attributi interni. Per ogni blocco è inoltre possibile definire, attraverso opportuni comandi, operazioni da eseguirsi in corrispondenza dell’ingresso e dell’uscita dell’entità. Prima di esporre l’architettura del modello sviluppato, si propone una breve presentazione dei principali tra tali blocchi funzionali, in modo da rendere immediata la comprensione del loro ruolo all’interno del simulatore.

Il blocco *source* immette le entità nel sistema, consentendo di impostare una distribuzione probabilistica per il tasso di arrivo o di legare la generazione a specifici eventi attivando l’inserimento di una nuova entità nel sistema in modo dinamico. I parametri necessari alla definizione della distribuzione di probabilità che regola la generazione delle entità possono essere variati in qualsiasi istante temporale della simulazione attraverso opportuni comandi. Al momento dell’introduzione dell’entità nel sistema questa viene caratterizzata attraverso la classe di appartenenza e gli eventuali attributi della classe. Il blocco *sink* costituisce il terminale delle catene di processi presenti nel modello. Le entità che entrano in un blocco *sink* abbandonano il sistema.



Figura 3.1 – Elementi funzionali *source* e *sink*

L'elemento *queue* rappresenta una coda di entità in attesa di essere processate da un blocco successivo. La logica di default che regola il deflusso delle entità dalla coda è di tipo FIFO, sebbene sia possibile definire regole di priorità a piacere. È possibile limitare la capacità della coda ad un intero positivo o permettere piuttosto alla coda di ospitare un numero infinito di entità.



Figura 3.2 – Elementi funzionali *queue* e *delay*

Il blocco funzionale *delay* rappresenta un ritardo e trattiene l'unità al suo interno per una certa quantità di tempo senza operare su di essa nessuna ulteriore operazione. All'interno di *delay* è possibile definire una qualsiasi distribuzione per il tempo di ritardo; la distribuzione di default del ritardo è di tipo triangolare e richiede che sia fornito un valore temporale di attesa minimo, massimo e medio. Anche per *delay* è possibile definire un valore di capacità massima. Se il numero di entità che stazionano all'interno di *delay* è inferiore alla capacità massima, le entità vengono ritardate in modo contemporaneo, secondo una logica *in parallelo*. In caso contrario le entità in attesa di impegnare il blocco dovranno attendere che almeno una delle entità ospitate al suo interno venga rilasciata.

Service è un elemento operatore che rappresenta l'accesso di un'entità ad un generico servizio. Per ogni blocco *service* è necessario definire un relativo blocco *resource pool* che rappresenta il bacino di risorse necessarie all'erogazione del servizio ad una singola entità. Ogni qual volta che un'entità entra in un blocco *service*, una risorsa viene prelevata dall'opportuno blocco *resource pool* e rimane indisponibile per un tempo la cui distribuzione di probabilità è possibile impostare a piacimento. La distribuzione di default per il tempo di servizio è anche in questo caso triangolare. Se il numero di risorse è insufficiente a servire tutte le unità che impegnano in uno stesso momento il blocco, le unità in attesa vengono poste in coda. All'interno di *resource pool* è possibile definire il numero di risorse necessarie alla fornitura del servizio per ogni singola entità che impegna il corrispondente blocco *service*.



Figura 3.3 – Elementi funzionali *service* e *resource pool*

Il blocco *hold* consente di interrompere il flusso delle entità. Il blocco è generalmente attivato in modo dinamico al verificarsi di determinate condizioni nel corso della simulazione. Tra le proprietà di *hold* vi è quella di poter essere impostato in modo da impedire alle entità il transito sin dall'inizio della simulazione o di farlo solo a seguito della ricezione di opportuni comandi dall'esterno. Il blocco *select output* consente di smistare le unità su diverse catene di processo. Lo smistamento può avvenire secondo due modalità: la definizione di una distribuzione di probabilità o il verificarsi di una o più condizioni. La libreria *Enterprise* mette anche a disposizione un blocco *select output* caratterizzato da 5 possibili uscite diverse, con dinamiche di funzionamento analoghe a quanto appena descritto

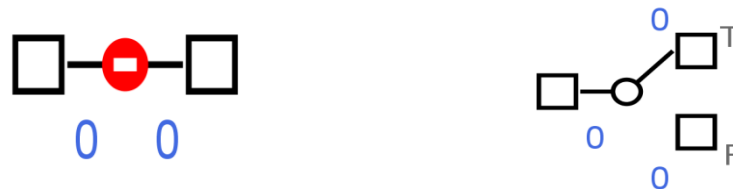


Figura 3.4 – Elementi funzionali *hold* e *select output*

L'elemento *pick-up* consente di rappresentare un qualsiasi mezzo di trasporto. Il blocco possiede una porta di ingresso e di uscita per l'entità mezzo di trasporto, ed un canale di ingresso, associato ad una coda, per le entità passeggeri. All'ingresso di una entità mezzo di trasporto nel blocco le entità passeggeri in coda vengono prelevate secondo una logica che può essere impostata a piacimento. È possibile selezionare il prelievo di tutte le entità disponibili oppure fare in modo che venga prelevato esclusivamente un numero prefissato di entità, se disponibili. Si sottolinea come al momento del prelievo non si crei alcuna identità fra l'entità mezzo di trasporto e le entità passeggeri. Una volta che il mezzo di trasporto ha ultimato il percorso previsto, è possibile separare mezzi e passeggeri attraverso un blocco *drop-off*.



Figura 3.5 – Elementi funzionali *pick-up* e *drop-off*

Da ultimo si introducono gli elementi *split* e *combine*. *Split* consente di generare, contestualmente all'ingresso nell'elemento di una entità, un qualsiasi numero di entità della stessa classe o di classi differenti. Al momento della generazione è inoltre possibile impostare il valore che ciascun attributo delle entità duplicate dovrà assumere. Il blocco *combine* consente invece di combinare due (e solo due) entità, appartenenti a classi qualsiasi, in una nuova entità unica, i cui attributi possono essere impostati a piacimento.



Figura 3.6 – Elementi funzionali *split* e *combine*

Con la presentazione di questi elementi di processo si è completata la presentazione degli strumenti fondamentali che Anylogic© mette a disposizione per lo sviluppo di simulazioni orientate ai processi. Come però già accennato il software consente di “sovrapporre” a questa tipologia di modelli, elementi propri di simulazioni orientate agli eventi. L'elemento “*event*” della libreria “*Main*” è uno di questi e consente la rappresentazione di eventi permettendo di specificare l'istante o gli istanti in cui esso deve avvenire implementando le azioni desiderate. È inoltre possibile condizionare il verificarsi di un evento a particolari stati del sistema, attivando l'elemento *event* in modo dinamico.

Esposta la funzione dei principali elementi operazionali e funzionali messi a disposizione dalla libreria *Enterprise* ed utilizzati per lo sviluppo del modello oggetto della presente tesi, si procede con la descrizione di dettaglio della modellistica elaborata, dichiarando la metodologia di sviluppo, le ipotesi fondative, l'architettura e le principali proprietà del modello, le modalità di estrapolazione dei dati ed il processo di validazione adottato.

3.3 Descrizione del modello realizzato

Come esposto nell'Introduzione al lavoro di tesi, la fase di sviluppo del modello è stata condotta durante la permanenza presso la Keio University di Tokyo, sotto la supervisione del prof. Nobuaki Minato. La metodologia attraverso la quale si è condotto il lavoro è stata quella di sviluppare ciascun macro-componente del modello in modo separato sulla base delle informazioni fornite dai docenti e studenti giapponesi partecipanti al progetto di ricerca. Ogni cluster del modello realizzato è stato discusso e verificato in modo collegiale attraverso meeting a cadenza settimanale, con diversi docenti e studenti della System Design Faculty presso la Keio University, anche estranei al progetto CMAC. I principali documenti dai quali si sono tratte informazioni per lo sviluppo del modello sono stati il documento redatto dal governo prefetturale di Yamagata riguardo al disastro del Marzo 2011 (YPG [72]), un documento analogo redatto a livello nazionale dal Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti Giapponese (MLIT, [73]), i dati messi a disposizione dallo stesso MLIT sul proprio sito web ([75]) ed infine il materiale raccolto a proposito dell'aeroporto di *Yamagata* dal prof. Minato, nell'ambito degli studi preliminari per la stesura del documento di analisi dei processi collaborativi messi in atto dagli operatori del trasporto aereo durante l'evento catastrofico del Marzo 2011 [70].

La fase di impostazione dello sviluppo ha previsto inoltre la raccolta di alcune fondamentali informazioni sul campo attraverso l'incontro con Masahiko Kuro, presidente dell'*Institution for Transport Policy Studies* ed ex amministratore delegato della *Narita International Airport Corporation*, in data 5 Marzo 2012, presso Japan International Transport Institute (JITI), Tokyo, l'incontro con personale del *Tokyo Air Traffic Control Center* presso Keio University in data 18 Aprile 2012, l'incontro con personale del *Tokyo Regional Civil Aviation Bureau, Sendai Office*, presso l'aeroporto di *Sendai* in data 15 Maggio 2012 e l'incontro con personale del *Fukushima Airport Office* e del *Fukushima Prefectural Government*, presso aeroporto di *Fukushima* in data 16 e 17 Maggio. Presso l'aeroporto di *Fukushima* e l'aeroporto di *Tokyo, Haneda* sono inoltre stati raccolti dati riguardanti la durata di alcune operazioni di gestione dei passeggeri all'interno del terminal e la durata delle operazioni di scalo effettuate sui velivoli, come specificheremo in 3.3.1.

La correttezza formale del programma che costituisce l'ossatura del modello è stata testata in modo estensivo, sottoponendo il programma a ripetute sessioni di debug, la cui conduzione è stata fortemente agevolata dai tool di debug messi a disposizione dal software, dal supporto tecnico fornito online da parte della casa produttrice e dall'interfaccia grafica di simulazione presente all'interno del software.

Di ciascun macro-componente del modello, progettato in modo tale da costituire un modulo capace di interfaccia sia orizzontale (con gli altri moduli del

modello), che verticale (con eventuali moduli da svilupparsi in futuro), si è prima testato il funzionamento in modo indipendente, procedendo progressivamente al suo assemblaggio nel modello complessivo e al collaudo di quest'ultimo ed alla sua validazione.

3.3.1 L'architettura macroscopica del modello

Come chiarito nei Capitoli 1 e 2, il principale scopo del presente lavoro di tesi è fornire paradigmi e basi di sviluppo per la costruzione di un modello dell'intero sistema di trasporto aereo del *Tohoku*, nello stato in cui esso si trovava a seguito del cataclisma del Marzo 2011. Per fare ciò si è scelto di creare un modello dell'aeroporto di *Yamagata*, corredato dai sistemi di trasporto terrestre ad esso connessi. In una situazione normale questi consisterebbero:

- nel sistema di trasporto terrestre su gomma, in particolare nel servizio di trasporto autostradale tra le città di *Sendai*, *Niigata*, *Sakata-Tsuruoka* e la città di *Yamagata*;
- nel servizio di bus navetta tra la stazione ferroviaria di *Yamagata* (che costituisce anche il punto di arrivo per i bus regionali sopra citati) e il terminal dell'aeroporto di *Yamagata*;
- nella rete ferroviaria, le cui direttrici possono essere visualizzate in Figura 2.2;
- nel collegamento ferroviario tra la stazione ferroviaria di *Yamagata* ed il suo aeroporto.

Tuttavia, dal momento che lo scopo del modello era quello di valutare le prestazioni di resilienza del sistema di trasporto del *Tohoku* nel lasso di tempo compreso tra il momento di massimo impatto dell'evento catastrofico e l'inizio della fase di *recovery*, si è scelto di comprendere nel modello esclusivamente i primi due dei quattro elementi citati, data l'indisponibilità della rete ferroviaria nei giorni successivi al disastro. Tale scelta coincide con il rilevare che la fase di *recovery* del sistema di trasporto del *Tohoku* a seguito dello tsunami, ebbe inizio nel momento in cui il trasporto ferroviario cominciò a tornare disponibile, ovvero il 1 Aprile 2011, data in cui una delle principali direttrici di trasporto su rotaia della regione, il treno ad alta velocità *Tohoku Shinkansen*, tornò in servizio. Il periodo di interesse è stato quindi identificato nel lasso di tempo intercorso fra il 12 ed il 31 Marzo 2011.

L'architettura macroscopica del modello sviluppato in Anylogic©, è mostrata in Figura 3.7, dove è riportata la schermata di navigazione principale del simulatore. Qui si evidenziano:

- i nodi di partenza dei bus di trasporto regionale (*regional*), ovvero le stazioni di *Sendai*, *Niigata*, *Sakata-Tsuruoka*

- la stazione ferroviaria di *Yamagata*(*yamagata_YamagataAirport*), nodo di arrivo dei mezzi di trasporto regionale stradale e punto di partenze dei mezzi navetta diretti al terminal aeroportuale di *Yamagata*
- l'aeroporto di *Yamagata* suddiviso nei componenti *terminal* e piazzale .

Si procede ora alla descrizione di dettaglio dei componenti del modello appena elencati, chiarendone ipotesi progettuali e dinamiche di funzionamento.

3.3.2 Il nodo di trasporto regionale terrestre (“*regional*”)

La città di Yamagata è collegata alle principali città del *Tohoku* da tre tratte autostradali principali: l'autostrada *Sakata/Tsuruoka-Yamagata*, l'autostrada *Niigata-Yamagata* e l'autostrada *Sendai-Yamagata*. Su ciascuno di questi percorsi operano compagnie di trasporto differenti, in particolare la *Yamako Bus* e la *Miyagi Traffic* sulla tratta *Sendai-Yamagata*, la *Yamako Bus* e la *Shuonai Travel* sulla tratta *Sakata/Tsuruoka-Yamagata* e la sola *Yamako Bus* sulla tratta *Niigata-Yamagata*.

Nel modello sviluppato, come verificabile in (Figura 3.8), si sono rappresentate le tre stazioni di partenza, modellate attraverso una sorgente di generazione dei bus per ogni compagnia operante sulla tratta, una coda di mezzi di trasporto pronti alla partenza, una coda di passeggeri in attesa ed un blocco funzionale *pick-up*, le cui dinamiche di funzionamento sono verificabili in 3.2.1 I valori relativi al numero massimo di mezzi disponibili per ciascuna compagnia sono tratti da [72] e ora riportati in Tabella 3.1:

<i>Vincolo sul numero massimo di bus disponibili</i>					
Giorno	Sendai		Sakata_Tsuruoka		Niigata
	Yamako	Miyagi	Yamako	Shuonai	Yamako
12-mar	4	4	2	0	8
13-mar	12	4	6	16	12
14-mar	12	8	12	16	12
15-mar	12	8	10	16	10
16-mar	12	10	10	16	10
17-mar	12	12	8	12	6
18-mar	14	12	8	10	6
19-mar	20	14	8	8	6
20-mar	20	14	8	8	6
21-mar	20	14	8	8	6
22-mar	20	16	8	8	6
23-mar	18	16	8	8	6
24-mar	18	16	8	8	6

25-mar	18	16	8	8	6
26-mar	20	16	8	8	6
27-mar	18	16	8	8	6
28-mar	20	20	8	8	6
29-mar	20	20	8	8	6
30-mar	20	20	8	8	6
31-mar	20	20	8	8	6

Tabella 3.1 – Vincolo sul numero massimo di bus disponibili per giornata [72]

L'inserimento dei bus nel sistema viene effettuata attraverso le sorgenti:

- source_Bus_Yamako_Sendai*,
- source_Bus_Miyagi_Sendai*,
- source_BusYamako_Sakata_Tsuruoka*,
- source_BusShuonai_Sakata_Tsuruoka*
- *source_Bus_Niigata*.

L'inserimento dei passeggeri avviene invece attraverso la sorgente *source_Pass*. Riguardo alle modalità di generazione delle entità passeggeri si rimanda a 3.4. Dopo la generazione le entità vengono inviate ad un blocco funzionale *select-output* che li suddivide tra le tre diverse origini sulla base di una distribuzione di probabilità discreta, riportata in Tabella 3.2:

<i>Origine</i>	<i>Probabilità</i>
Sendai	63,24%
Sakata-Tsuruoka	30,72%
Niigata	6,04%

Tabella 3.2 – Distribuzione di probabilità delle origini dei passeggeri

La distribuzione è stata ottenuta valutando i dati relativi al numero di passeggeri trasportati sulle singole tratte [72], che erano disponibili esclusivamente in modo aggregato rispetto alle 20 giornate considerate. Definito q_j il numero complessivo di passeggeri trasportati sulla j -esima tratta nei primi 20 giorni, la probabilità che il passeggero provenga da una delle tre destinazioni è stata calcolata come:

$$p_j = \frac{q_j}{\sum_j q_j} \quad (3.1)$$

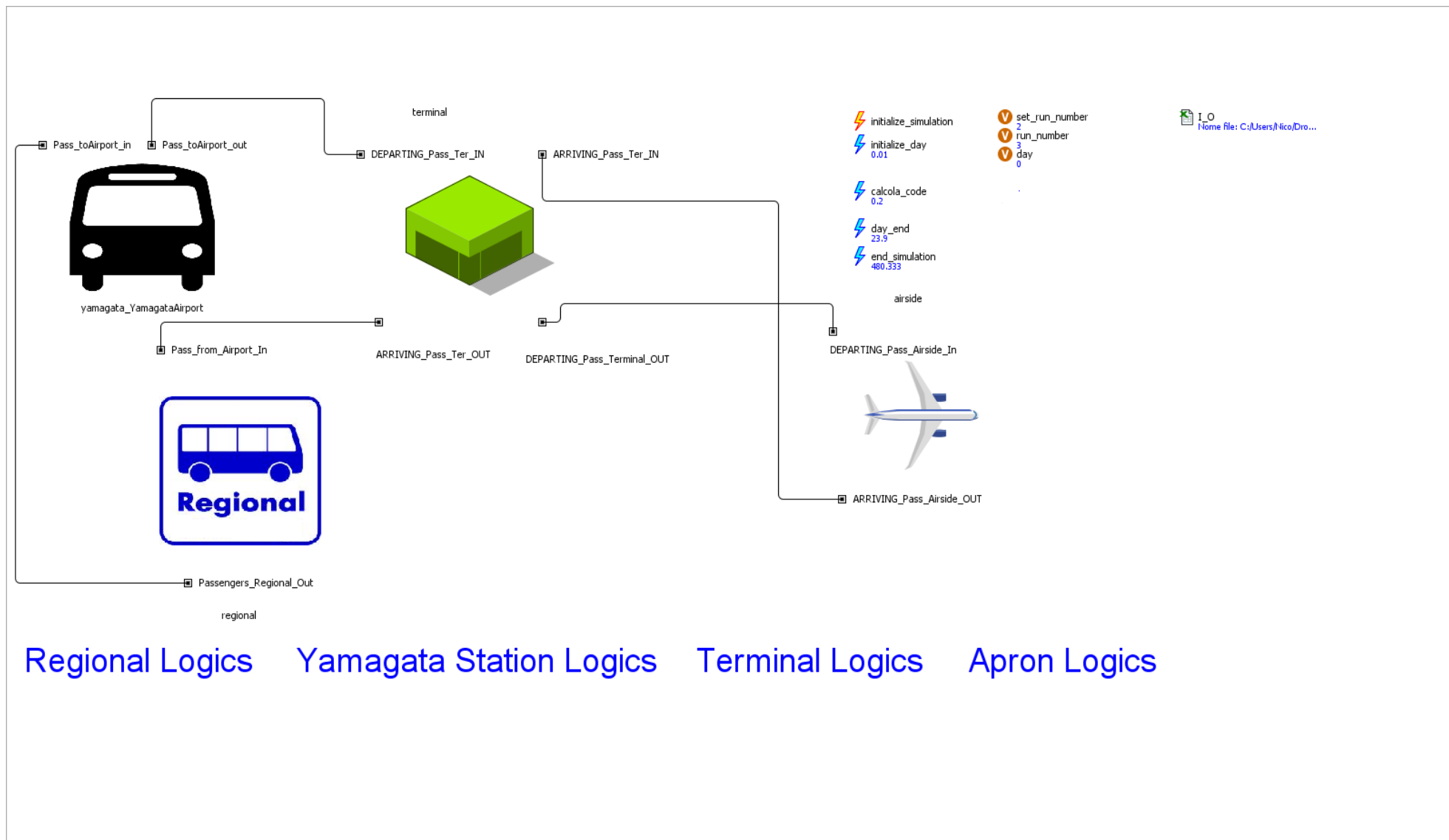


Figura 3.7 – Schermata di navigazione del sistema nel suo complesso

Per determinare la schedulazione giornaliera delle corse dei bus regionali, si è impostata una logica elementare, che calcola l'intervallo tra due corse successive per il giorno t a partire dai dati relativi alle corse effettuate nel giorno $t - 1$ e al numero medio di persone in coda nel giorno $t - 1$ secondo la relazione:

$$i_{t,n}^j = \frac{24 * 60}{corse_{t-1}^j + \frac{code_{t-1}^j}{capacità_{bus}} * k_{t,i}^j} \quad (3.2)$$

dove n è il pedice che identifica la compagnia operante sulla tratta j -esima, $corse_{t-1}^j$ è il numero di corse effettuate nella giornata precedente, $code_{t-1}^j$ il valore di coda media riscontrata nella giornata precedente e $k_{t,i}^j$ un coefficiente che “distribuisce” l'ammontare dei passeggeri non serviti tra le compagnie operanti sulla tratta in base al numero massimo di mezzi disponibile nella t -esima giornata per ciascuna di esse, ovvero:

$$k_{t,n}^j = \frac{bus_max_{t,n}}{\sum_n bus_max_{t,n}} \quad (3.3)$$

Il valore di intervallo tra corse consecutive calcolato viene usato per l'inserimento dei bus nel sistema, utilizzando lo stesso intertempo tra corse su tutta la giornata. L'inserimento avviene però nel rispetto dei vincoli di disponibilità, ovvero ad ogni orario di partenza di un bus individuato attraverso gli $i_{t,n}^j$, corrisponde l'inserimento di un mezzo solo se esiste un bus della compagnia n -esima disponibile. Se non esistono bus disponibili l'inserimento avverrà non appena uno dei bus impegnati farà ritorno alla stazione di partenza.

Una volta caricati i passeggeri sui mezzi di trasporto, la cui dimensione è stata impostata al valore standard di 52 posti, questi ultimi entrano in un blocco funzionale *delay*. Come per la quasi totalità dei blocchi di ritardo e di servizio utilizzati nel modello sviluppato, si è ipotizzata una distribuzione *beta* per la durata dei ritardi e dei tempi di servizio. Per approssimare la distribuzione *beta*, Anylogic© utilizza la tecnica PERT (Program Evaluation & Review Technique), richiedendo in ingresso i medesimi parametri richiesti per definire una distribuzione triangolare: un valore di durata minima (a), un valore più probabile (m) ed un valore di durata massima (b).

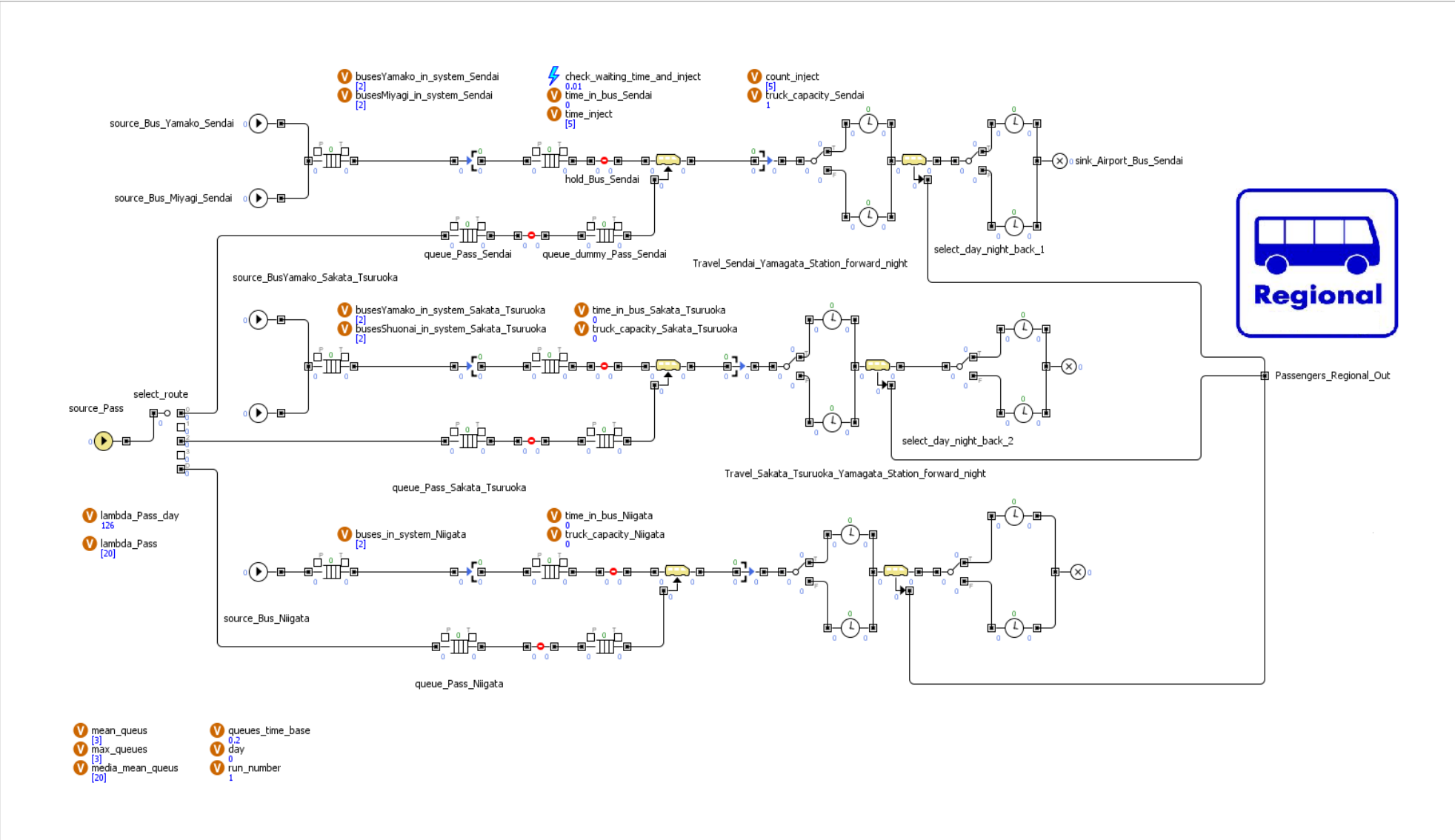


Figura 3.8 – Schermata di navigazione del nodo “regional”

Come mostrato in Figura 3.9, la distribuzione *beta* si differenzia da una distribuzione triangolare sostanzialmente per una minore varianza rispetto al valore più probabile, motivo per cui se ne è ritenuto più opportuno l'utilizzo all'interno del modello.

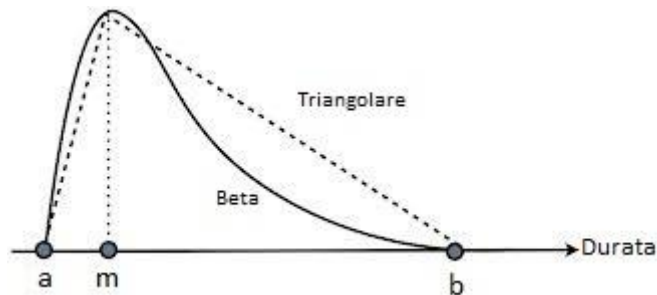


Figura 3.9 - Distribuzione beta e distribuzione triangolare a confronto

Approssimando la distribuzione *beta* attraverso la tecnica PERT si ha che la sua media è correttamente stimata da:

$$\mu_{PERT} = \frac{a + 4 * m + b}{6} \quad (3.4)$$

e la relativa varianza è correttamente stimata da

$$\sigma^2_{PERT} = \frac{(b - a)^2}{36} \quad (3.5)$$

Al parametro *m* si è attribuito il valore del tempo di percorrenza della relativa tratta in condizioni normali, dal momento che si è ritenuto che il disastro non causasse particolari ritardi su tratti stradali non danneggiati dal sisma, quali sono i collegamenti autostradali tra *Sendai*, *Niigata*, *Sakata-Tsuruoka* e la stazione di Yamagata. Si è poi calcolato il valore di *a* come $a = m * (0,9)$ e di *b* come $b = m * (1,5)$, poiché si ritiene in ogni caso l'entità del possibile ritardo molto superiore a quella dei possibili anticipi. Inoltre si è prevista un'alternativa nelle durate dei trasferimenti a seconda che il trasporto avvenga di notte o di giorno, ipotizzando che il trasporto effettuato nelle ore diurne abbia una durata superiore del 30% rispetto a quello che si svolge durante la notte. I valori attribuiti ai parametri che definiscono le distribuzioni dei tempi di trasferimento sulle tre tratte considerate sono riportati in Tabella 3.3.

<i>Parametri distribuzione tempi di trasferimento trasporto regionale</i>			
		Night [min]	Day [min]
Sendai	a [min]	60,3	78,39
	m [min]	67	87,1
	b [min]	100,5	130,65
Sakata-Tsuruoka	a [min]	101,7	132,21
	m [min]	113	146,9
	b [min]	169,5	220,35
Niigata	a [min]	199,8	259,74
	m [min]	222	288,6
	b [min]	333	432,9

Tabella 3.3 - Parametri che definiscono le distribuzioni *beta* dei tempi di trasferimento dei bus di trasporto regionale

Si è scelto di non rappresentare fermate intermedie del mezzo di trasporto e di concentrare tutta la generazione di passeggeri nei nodi di partenza dei bus. Un maggiore grado di dettaglio nella rappresentazione del processo di trasporto non avrebbe infatti aggiunto nulla ai fini delle analisi per le quali il modello è stato sviluppato.

Usciti dagli opportuni blocchi funzionali *delay* le entità passeggeri “scaricate” grazie ad un blocco *drop-off* ed inviate al nodo stazione di *Yamagata*. Le entità *bus* entrano invece in blocchi *delay* identici a quelli appena descritti, rappresentanti il viaggio di ritorno verso la città di partenza.

3.3.3 Il nodo stazione di *Yamagata* (“*yamagata_YamagataAirport*”)

Questo componente del modello è quello all’interno del quale avviene la separazione tra passeggeri che accedono al solo servizio di trasporto terrestre regionale, ed escono quindi dal sistema nel nodo stazione, e quelli che sono invece diretti all’aeroporto di *Yamagata*. Tale separazione avviene attraverso l’utilizzo di un blocco funzionale di tipo *select-output* a due vie, regolato da probabilità ricavate dai dati storici [72], in particolare dal rapporto tra il numero giornaliero di passeggeri che hanno usufruito del trasporto aereo (per i quali erano noti i dati con risoluzione giornaliera) e la media giornaliera di passeggeri trasportati dal sistema di trasporto regionale terrestre (i cui dati ricordiamo essere disponibili solo in forma aggregata sulle 20 giornate). Procedendo in questo modo da un punto di vista logico si è accettata implicitamente l’ipotesi che la città di *Yamagata* non contribuisca in modo rilevante al traffico aereo, dal momento che non è stata prevista una sorgente di passeggeri in aggiunta a quelli

provenienti dal resto della regione. Va però sottolineato che da un punto di vista numerico e quantitativo l'approssimazione effettuata non falsa in alcun modo il risultato. Definire infatti le probabilità giornaliere di accesso al trasporto aereo a partire dai dati di traffico aereo effettivi, fa sì che la riduzione nel numero di passeggeri diretti all'aeroporto dovuta alla mancanza di una sorgente di utenti della città di *Yamagata* sia automaticamente compensata da un aumento del numero di passeggeri provenienti dal sistema di trasporto su gomma. Si riportano in

<i>Giorno</i>	<i>Probabilità</i>	<i>Giorno</i>	<i>Probabilità</i>
12-mar	0,2144	22-mar	22,78%
13-mar	17,57%	23-mar	24,23%
14-mar	18,75%	24-mar	24,03%
15-mar	23,20%	25-mar	24,20%
16-mar	24,31%	26-mar	21,57%
17-mar	26,03%	27-mar	21,38%
18-mar	24,99%	28-mar	17,74%
19-mar	22,16%	29-mar	20,31%
20-mar	20,85%	30-mar	21,94%
21-mar	21,20%	31-mar	22,43%

Tabella 3.4 i valori giornalieri di probabilità utilizzati per lo smistamento delle entità passeggeri tra quelle che accedono al solo servizio di trasporto terrestre e quelle che usufruiscono di entrambi:

<i>Giorno</i>	<i>Probabilità</i>	<i>Giorno</i>	<i>Probabilità</i>
12-mar	0,2144	22-mar	22,78%
13-mar	17,57%	23-mar	24,23%
14-mar	18,75%	24-mar	24,03%
15-mar	23,20%	25-mar	24,20%
16-mar	24,31%	26-mar	21,57%
17-mar	26,03%	27-mar	21,38%
18-mar	24,99%	28-mar	17,74%
19-mar	22,16%	29-mar	20,31%
20-mar	20,85%	30-mar	21,94%
21-mar	21,20%	31-mar	22,43%

Tabella 3.4 – Probabilità che un'entità passeggero proveniente da *regional* acceda al servizio di trasporto aereo.

Le entità passeggero che superano la selezione degli utenti di trasporto aereo, entrano in un ulteriore blocco *select-output* che assegna il mezzo di trasporto che questi utilizzeranno per raggiungere il terminal. Tale assegnazione avviene in modo condizionale (e non probabilistico), sulla base del numero di utenti in coda per accedere al servizio navetta tra la stazione e l'aeroporto di *Yamagata*. Si è dunque impostata una soglia massima di coda tollerata dal passeggero, con valore di *baseline* fissato in 200 persone; oltre tale soglia l'utente sarà portato a scegliere un mezzo di trasporto alternativo, ad esempio un taxi o una vettura a noleggio. In questo modo si è voluto rappresentare la dinamica comportamentale secondo cui un passeggero eviterà di scegliere un mezzo di trasporto pubblico se l'attesa per accedervi è troppo elevata. Dal momento che i dati in nostro possesso non fornivano alcun dato quantitativo riguardo al numero di taxi e vetture a noleggio disponibili, si è scelto di non rappresentare tali mezzi come risorse del sistema, attribuendo loro una disponibilità illimitata. Questa assunzione, che potrebbe sembrare un'ipotesi piuttosto forte, è in realtà coerente con la realtà giapponese, dove, a causa delle limitazioni imposte dallo stato alla possibilità di acquisto di vetture personali, è largamente diffuso l'utilizzo dei taxi per gli spostamenti quotidiani. Basti pensare che nella prefettura di Tokyo solo il 18,13% dei residenti possiede un'automobile [78]. È dunque ragionevole supporre che mezzi di questo tipo fossero disponibili in abbondanza, anche in una situazione di emergenza come quella che si è venuta a creare.

Per quanto riguarda i mezzi che eseguono il servizio navetta, il modello, coerentemente con le informazioni fornite in [72], prevede due tipologie di mezzi: bus da 28 posti e vetture da 9 posti, la cui disponibilità, costante per l'intero periodo considerato, è stata impostata rispettivamente a 6 e 5 unità. La schedulazione delle corse dei mezzi avviene con modalità analoghe a quanto esposto in 3.3.2 a proposito del nodo *regional*. In questo caso l'intervallo tra corse successive verrà calcolato come:

$$i_t^m = \frac{24 * 60}{corse_{t-1}^m + \frac{code_{t-1}^m}{capacità^m} * k^m} \quad (3.6)$$

dove m apice che caratterizza la tipologia di mezzo navetta, e k^m un coefficiente che "distribuisce" l'ammontare dei passeggeri non serviti nel giorno $t - 1$ tra le due tipologie di mezzo navetta in base al numero massimo di mezzi disponibile nella t -esima giornata per ciascuna di esse, ovvero:

$$k^m = \frac{capacità^m * N^m}{\sum_m capacità^m * N^m} \quad (3.7)$$

dove N^m è il numero di mezzi navetta disponibile per l' m -esima tipologia. È immediato riscontrare l'indipendenza di k^m dal giorno considerato.

Completate le operazioni di carico dei passeggeri, le entità bus vengono inviate a blocchi *delay* che rappresentano il trasferimento dalla stazione al terminal aeroportuale di *Yamagata*. Le distribuzioni dei tempi di viaggio sono state impostate in modo del tutto analogo a quanto esposto in 3.3.2. Si riporta in Tabella 3.5 i parametri che le definiscono.

<i>Parametri distribuzione tempi di trasferimento servizio navetta</i>			
		Night [min]	Day [min]
Trasferimento stazione/terminal	a [min]	27	35,1
	m [min]	30	39
	b [min]	45	58,5

Tabella 3.5 - Parametri che definiscono le distribuzioni *beta* dei tempi di viaggio dei mezzi navetta

Si sottolinea come i mezzi navetta, una volta rilasciate le entità passeggero, non vengono immediatamente inviate ai blocchi *delay* che rappresentano il viaggio di ritorno, come avveniva in *regional*. Si è infatti rappresentato anche il processo di trasferimento fino alla stazione di *Yamagata* dei passeggeri provenienti dal terminal aeroportuale della città.

3.3.4 Il nodo terminal aeroportuale di *Yamagata* (“*terminal*”)

Il primo blocco funzionale che le entità attraversano una volta entrate nella sezione *terminal* è un blocco di tipo *select-output* a 4 vie, che caratterizza l'entità con una destinazione di volo. Coerentemente con quanto riportato dai dati storici le destinazioni considerate dal modello sono 4: l'aeroporto di *Haneda (Tokyo)*, l'aeroporto di *Itami (Osaka)*, l'aeroporto di *Chubu (Nagoya)* e l'aeroporto della città di *Sapporo*. La caratterizzazione avviene tramite una distribuzione di probabilità discreta, diversa per ciascuna giornata, ed ottenuta

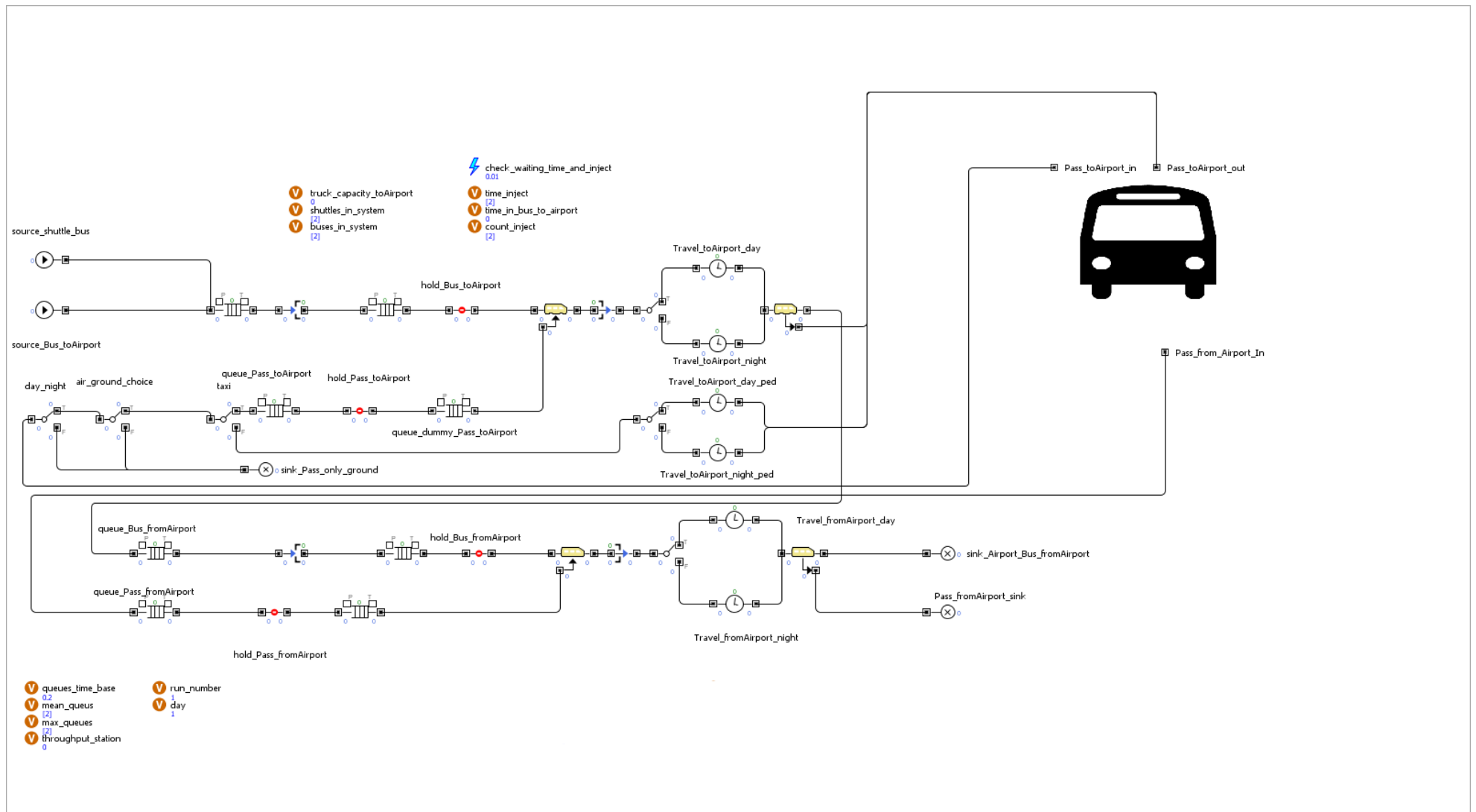


Figura 3.10 - Schermata di navigazione del nodo “yamagata_YamagataAirport”

dai dati storici [72], assumendo come probabilità di scelta di una certa destinazione il rapporto:

$$p_r = \frac{q_r}{\sum_r q_r} \quad (3.8)$$

dove con q_r si è identificato il numero complessivo effettivo di passeggeri partiti per la destinazione.

Una volta caratterizzate le entità con una destinazione queste vengono inviate ad un blocco *select-output* che stabilisce se le entità sono fornite di biglietto o meno. In una situazione normale sarebbe giustificato ritenere sostanzialmente nulla la percentuale di passeggeri che arrivano in aeroporto senza aver acquistato in precedenza il proprio volo. Si è però ritenuto che in una situazione di emergenza questa percentuale sia decisamente più elevata, a motivo dell'impossibilità per molti di accedere ai servizi di prenotazione online a causa della mancanza di energia elettrica, del più elevato grado di estemporaneità che caratterizza la decisione di spostarsi in una situazione caotica e di panico generalizzato o ancora dei cambiamenti repentini nel numero di voli messi a disposizione dalle compagnie aeree. Si è dunque stabilito un valore di *default* del 20% per la probabilità che l'entità debba acquistare in aeroporto il proprio biglietto. Le entità caratterizzate da questa esigenza vengono inviate ad un blocco funzionale *service*, che rappresenta le operazioni di acquisto del biglietto, senza però ancora associare l'entità passeggero ad uno specifico volo. Il blocco *service*, i cui tempi di servizio seguono anche in questo caso una distribuzione beta, è caratterizzato dai parametri riportati in Tabella 3.6:

<i>Elemento ticketing</i>				
Parametri distribuzione del tempo di servizio			Risorse per entità	Risorse totali
a [min]	m [min]	b [min]		
2,5	5	15	1	4

Tabella 3.6 – Parametri caratterizzanti l'elemento funzionale *ticketing*

Tanto le entità che fuoriescono dal blocco *ticketing*, quanto le altre, vengono inviate, a seconda della propria destinazione, a 4 blocchi *queue* distinti, seguiti da un blocco *hold* che arresta il flusso delle entità. Tale vincolo di stazionamento viene temporaneamente rimosso durante tutti gli istanti di tempo t che soddisfano la relazione:

$$t_{departure}^v - 120 < t < t_{departure}^v - 12 \quad [min] \quad (3.9)$$

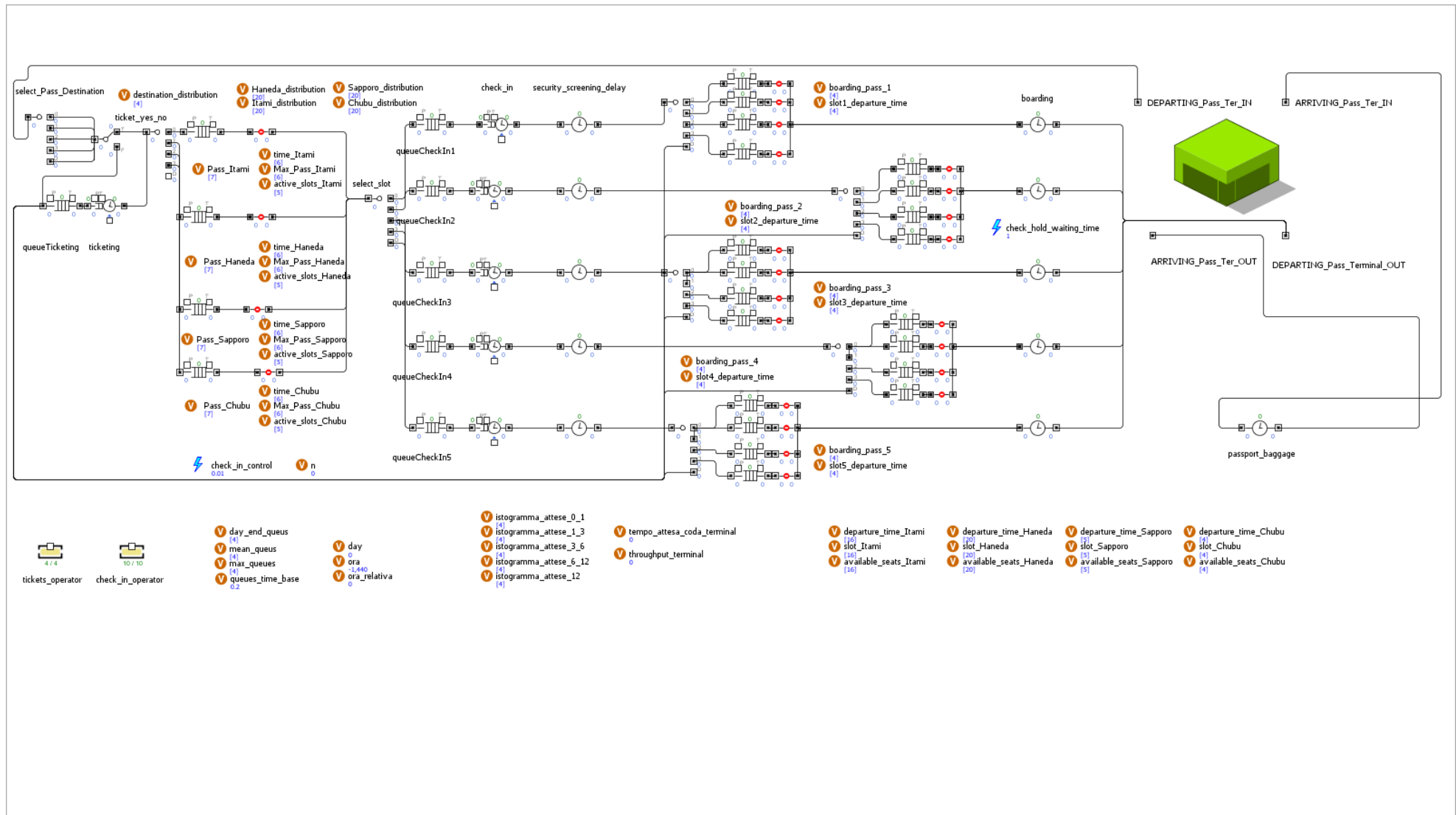


Figura 3.11 - Schermata di navigazione del nodo *terminal*

dove con $t_{departure}^v$ si è indicato l'orario di partenza del volo v-esimo (espresso in minuti considerando la mezzanotte del primo giorno il minuto 0) e si è ritenuto ragionevole che le operazioni di *check-in* siano iniziate 2 ore prima della partenza del volo e chiuse 12 minuti prima della partenza.

Nel momento in cui l'entità passeggero lascia la coda relativa alla propria destinazione e si avvia alle operazioni di check-in, questa viene caratterizzata in modo completo rispetto all'orario di partenza del proprio volo ed al *gate* di partenza. Ovviamente nel momento in cui il numero di passeggeri attribuiti ad un singolo volo eguaglia la capacità del velivolo con cui il volo viene effettuato, il blocco *hold* viene riattivato, a meno che non vi siano in corso operazioni di *check-in* di altri voli sulla medesima destinazione.

Le entità passeggero vengono a questo punto inviate ad un blocco *select-output* che li smista tra catene di processo differenti a seconda del *gate* ad esse attribuito. In questo modo si introduce un disallineamento tra il modello fisico ed il modello logico, in quanto operazioni che vengono eseguite in realtà nello stesso luogo vengono rappresentate da 5 linee di processo differenti, una per ciascun *gate* dell'aeroporto di *Yamagata*. La prima di queste operazioni è il *check-in*, rappresentato da un blocco funzionale di servizio caratterizzato dai seguenti parametri:

<i>Elemento check-in</i>				
Parametri distribuzione del tempo di servizio			Risorse per entità	Risorse totali
a [min]	m [min]	b [min]		
1	2,2	5,7	1	10

Tabella 3.7 - Parametri caratterizzanti l'elemento funzionale *check-in*

I parametri attraverso cui si è caratterizzata la distribuzione dei tempi di servizio per il blocco check-in sono stati ricavati da misurazioni sul campo effettuate presso il terminal dell'aeroporto di Fukushima, così come quelli che caratterizzano la distribuzione dei tempi di ritardo del blocco funzionale che segue il *check-in*, ovvero il blocco *security_screening*. Con questo elemento, costituito da un blocco *delay* e le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 3.8, si sono rappresentati i processi relativi a controlli di sicurezza. La scelta di utilizzare un elemento *delay* piuttosto che un elemento *service* è stata dettata dal rilevare il fatto che in uno scenario di calamità naturale è plausibile ritenere che le procedure di controllo siano molto meno stringenti rispetto al normale. È quindi ragionevole pensare che, per snellire le operazioni, non tutti gli utenti siano sottoposti all'utilizzo delle risorse proprie dei controlli di sicurezza, ovvero i dispositivi metal detector. Ad esempio l'aeroporto di *Yamagata*

possiede un solo metal detector, che serve tutti i gate del *terminal*. Questa dotazione di risorse è assolutamente sufficiente in una situazione in cui l'aeroporto è interessato da solo 4 voli al giorno, come avviene in condizioni ordinarie, , ma è irrealistico pensare che fosse possibile eseguire i controlli di sicurezza per l'imbarco contemporaneo di numerosi voli utilizzando un singolo scanner. Si è quindi scelto di rappresentare i controlli di sicurezza con un semplice ritardo:

<i>Elemento security_screening</i>		
Parametri distribuzione del tempo di ritardo		
a [min]	m [min]	b [min]
2,5	5	15

Tabella 3.8 - Parametri caratterizzanti l'elemento funzionale *security_screening*

Infine, recuperando la coincidenza tra modello fisico e logico, le entità passeggero vengono inviate a code rappresentanti le sale d'aspetto ai 5 *gate*. Da qui, in corrispondenza dell'orario di *boarding*, ovvero 2 minuti prima dell'orario di partenza programmato per il volo, vengono inviate ad un elemento *delay*, definito dai parametri di Tabella 3.9, che equivale alle operazioni di ingresso dei passeggeri sul velivolo.

<i>Elemento boarding</i>		
Parametri distribuzione del tempo di ritardo		
a [min]	m [min]	b [min]
0,2	0,5	1

Tabella 3.9 - Parametri caratterizzanti l'elemento funzionale *boarding*

L'inizio delle operazioni di *boarding* è in ogni caso vincolato al completamento da parte del velivolo di tutti i processi ospitati dalla sezione "*apron_operations*". Il *boarding* è quindi l'ultima operazione eseguita all'interno della sezione *terminal*. A seguito di essa le entità hanno accesso infatti alla sezione *airside*, rappresentante il piazzale dell'aeroporto.

3.3.5 Il nodo piazzale dell'aeroporto di *Yamagata* ("*apron*")

La sezione di modello "*apron*" è quella in cui si sono rappresentati i processi di scalo dei velivoli. Protagoniste di questa porzione del modello sono le entità "*Flight*", ovvero i voli eseguiti da e per lo scalo aeroportuale. Si rimanda a 3.3.6 per una definizione puntuale di tali entità.

Per prima cosa si sottolinea che nei giorni successivi al disastro l'aeroporto di *Yamagata* funzionò secondo uno schema *dot-to-dot*, ovvero questi non venne

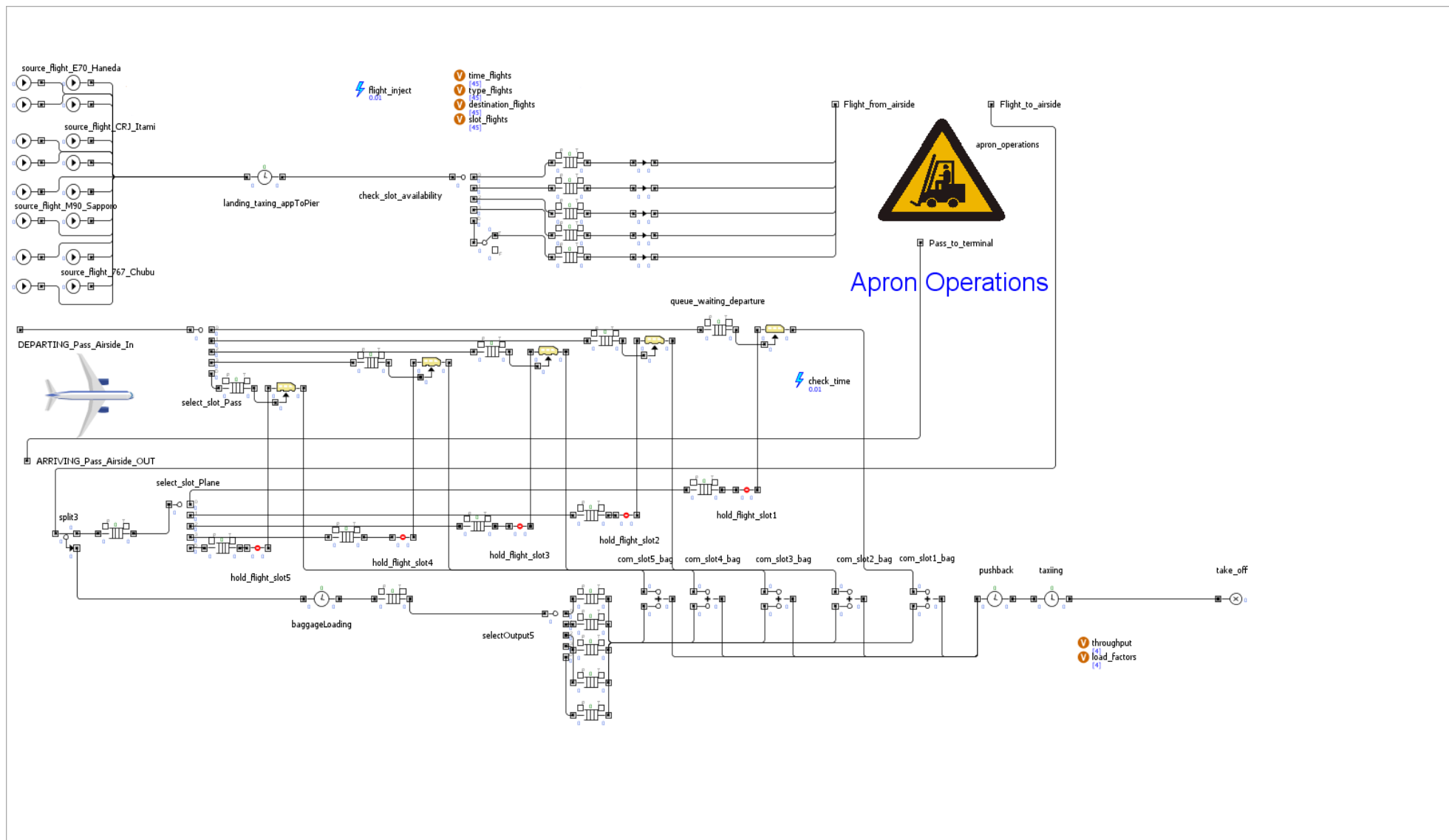


Figura 3.12 - Schermata di navigazione del nodo "airside"

mai usato come scalo temporaneo per velivoli in transito, ma operò in entrata esclusivamente voli la cui destinazione finale fosse *Yamagata*. Si è quindi mantenuta questa modalità di operazioni anche nel modello sviluppato, sebbene quest'ultimo si presti anche alla gestione di voli in scalo temporaneo, secondo una configurazione che vede un aeroporto regionale operare come *hub* temporaneo.

Le entità “*Flights*” vengono generate secondo la schedulazione giornaliera fornita, presso una serie di sorgenti che le caratterizzano immediatamente secondo i loro principali attributi: destinazione, tipologia di velivolo, orario di partenza, capacità massima, etc.. Fatto ciò le entità vengono inviate ad un elemento *delay* che rappresenta le operazioni di atterraggio, taxiing ed avvicinamento del velivolo alla banchina. I parametri che descrivono l'elemento sono stati desunti da dati raccolti sul campo presso gli aeroporti di *Fukushima*, e *Haneda* e presentati in Tabella 3.10.

<i>Elemento landing_taxiing_appToPier</i>		
Parametri distribuzione del tempo di ritardo		
a [min]	m [min]	b [min]
5,2	7,1	12,8

Tabella 3.10 - Parametri caratterizzanti l'elemento funzionale *landing_taxiing_appToPier*

Concluse le operazioni di posizionamento del velivolo presso la banchina ad esso assegnata, che nella realtà hanno come evento trigger conclusivo lo spegnimento dei motori, l'entità viene smistata tra 5 diverse catene di processo, ognuna di esse corrispondente ai 5 gate dell'aeroporto. Tali sequenze di elementi operatori rappresentano la successione delle operazioni di scalo e sono state rappresentate in una sezione separata del modello denominata “*apron_operations*”, la cui schermata di navigazione è riportata in Figura 3.14.

La logica secondo cui funziona la sezione *apron_operations*, dettata da vincoli peculiari del linguaggio Java, è quella di scindere l'entità volo ogni qual volta questa è soggetta ad operazioni che possono essere svolte in parallelo. Questo viene realizzato da elementi di tipo *split*. Il ricongiungimento delle due entità avviene non appena entrambe completano le relative operazioni, mediante blocchi funzionali *combine*. Lo schema logico e delle operazioni di scalo è riportato in Figura 3.13, dove sono state evidenziate in rosso le attività rappresentate nella sezione *apron_operations* ed in nero quelle contenute nella sezione *airside*.

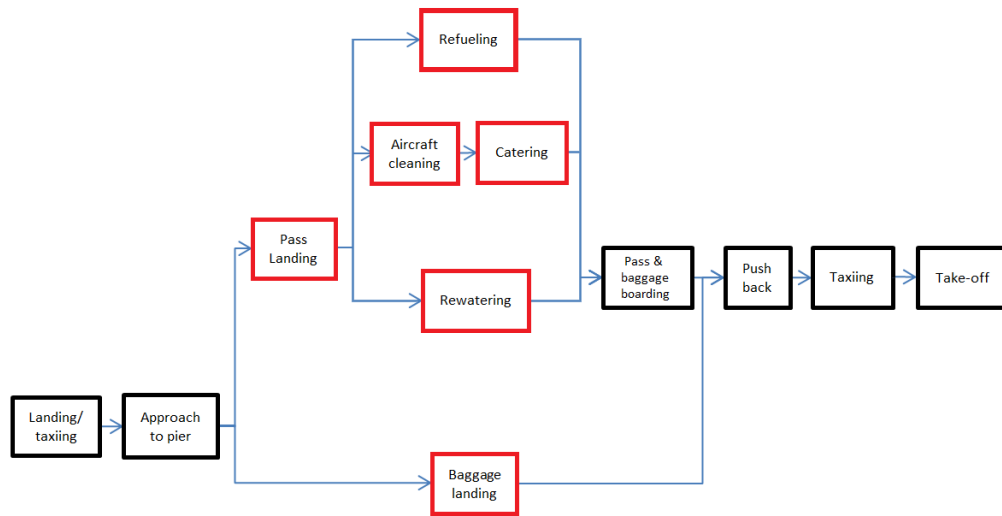


Figura 3.13 – Sequenza delle operazioni di scalo

Le attività che si svolgono all'interno di *apron_operations*, fatta eccezione per l'operazione di scaricamento dei passeggeri dal velivolo, richiedono tutte l'utilizzo di una particolare risorsa e sono state quindi modellate tramite elementi *service*. In particolare si avranno le seguenti coppie servizio-risorsa: refueling-autocisterna carburante, rewatering-autocisterna acqua, scarico bagagli-mezzo di trasporto bagagli, pulizia cabina-team addetto alla pulizia della cabina, catering-automezzo per trasporto e caricamento vivande. In Tabella 3.11 si riporta un quadro riassuntivo dei parametri rilevanti degli elementi *service* e *resource pool* appena descritti e del blocco *delay* che rappresenta l'operazione di scarico passeggeri.

Nome elemento funzionale	Parametri distribuzione del tempo di servizio			Risorse per entità	Risorse totali
	a [min]	m [min]	b [min]		
<i>passengerLanding</i>	4,7	6,0	10,1	/	/
<i>refueling</i>	6,4	9,2	18,6	1	1
<i>rewatering</i>	5,1	6,4	7,2	1	1
<i>aircraftCleaning</i>	6,3	7,1	10,9	1	1
<i>catering</i>	8,5	10,3	12,3	1	1
<i>baggageLanding</i>	7,1	14,1	18,0	1	1

Tabella 3.11 - Parametri caratterizzanti i processi rappresentati nella sezione *apron_operations*

Come si può notare la disponibilità delle risorse è in tutti i casi unitaria, in linea

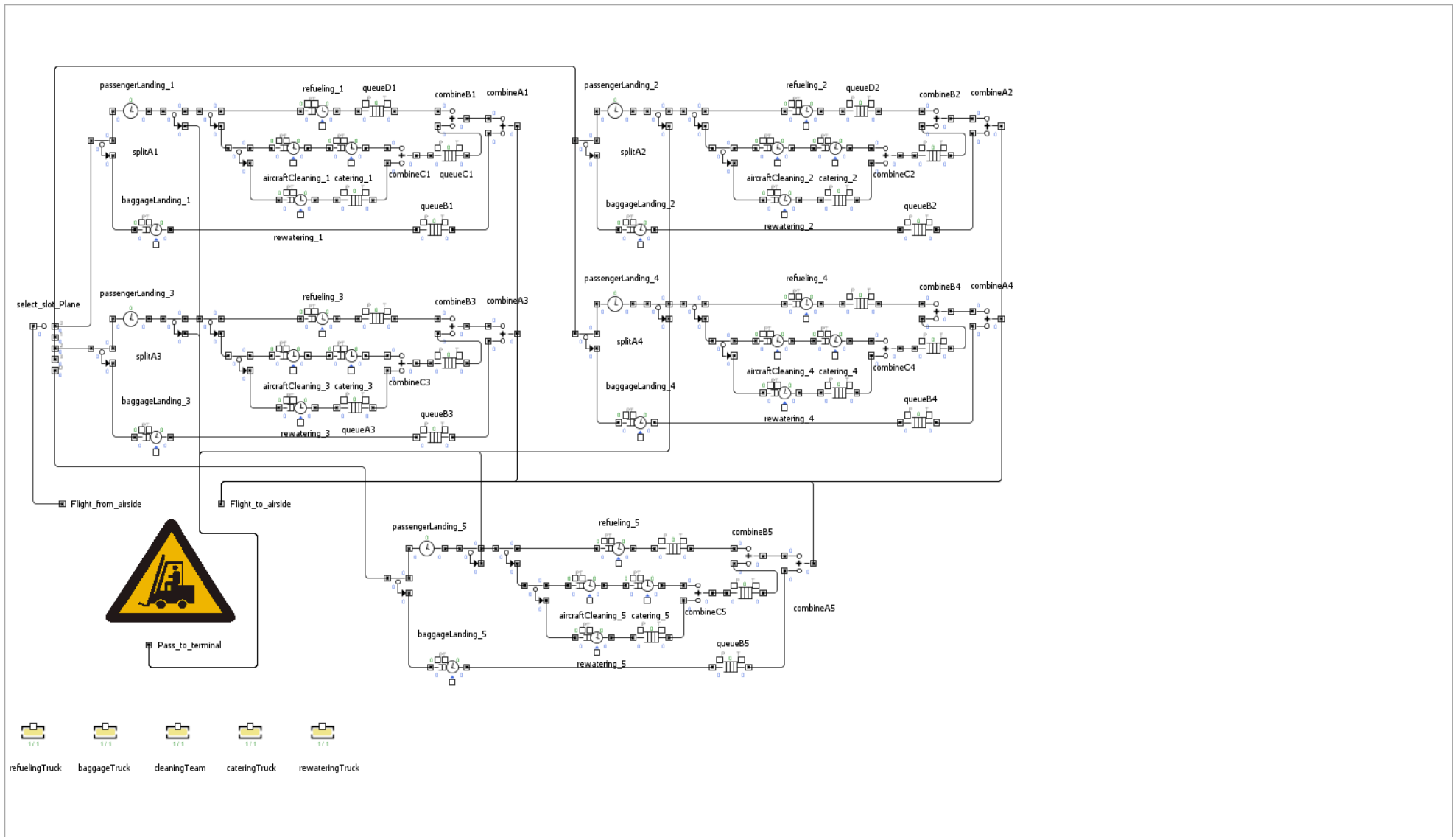


Figura 3.14 - Schermata di navigazione sezione “apron_operations”

con le informazioni fornite dallo YAO¹³.

All'uscita della sezione *apron_operations* l'entità volo torna alla sezione *airside*, dove, se t , ora fisica della simulazione misurata in minuti, soddisfa la condizione $t > t_{partenza\ volo}^m$ (con $t_{partenza\ volo}^m$ orario di partenza previsto per l' m -esimo volo), preleva le entità passeggeri in coda mentre in parallelo si sta svolgendo il processo di caricamento bagagli nel blocco *delay* "*baggageLoading*". Completata l'operazione di caricamento bagagli (nel caso in cui questa non termini prima che il velivolo imbarchi i passeggeri) l'entità volo viene inviata ai blocchi funzionali *delay* "*pushback*" e "*taxiing*", di cui si riportano in Tabella 3.12 i parametri caratteristici, anche in questo caso frutto di misurazioni sul campo.

Nome elemento funzionale <i>delay</i>	Parametri distribuzione del tempo di ritardo		
	a [min]	m [min]	b [min]
<i>baggageLoading</i>	7,8	18,1	25,3
<i>pushback</i>	1,5	2,2	3,4
<i>taxiing</i>	4,6	8,5	1,9

Tabella 3.12 - Parametri caratterizzanti i processi rappresentati nella sezione *airside*

Non appena l'entità volo esce dal sistema attraversando il blocco *sink* "*takeoff*" lo slot di terra ed il corrispondente gate da essa occupati vengono liberati per un nuovo volo.

Concludendo la descrizione della sezione del modello che rappresenta le operazioni di scalo dei velivoli, si riporta in Tabella 3.13 il dato storico del piano dei voli utilizzato dall'aeroporto nei primi 20 giorni dopo il cataclisma. Tale piano costituisce la schedulazione giornaliera utilizzata per la definizione dello scenario storico di riferimento che si descriverà in 4.1. Dalla tabella si può notare come le date di introduzione dei voli speciali per *Sapporo* e *Nagoya*, *Chubu* corrispondano al 17 Marzo 2011 e al 29 Marzo 2011.

¹³ Informazioni fornite da prof. Nobuaki Minato a seguito di suoi colloqui con YAO e YPG nell'Ottobre 2011 presso Yamagata airport.

<i>Piano dei voli 12-31 Marzo 2011</i>					
Data	Voli				
	<i>Haneda</i>	<i>Itami</i>	<i>Sapporo</i>	<i>Chubu</i>	Tot
12/03/2011	2	6	0	0	8
13/03/2011	7	9	0	0	16
14/03/2011	10	8	0	0	18
15/03/2011	14	10	0	0	24
16/03/2011	20	8	0	0	28
17/03/2011	17	8	2	0	27
18/03/2011	18	8	4	0	30
19/03/2011	18	8	4	0	30
20/03/2011	18	8	4	0	30
21/03/2011	18	8	4	0	30
22/03/2011	18	8	4	0	30
23/03/2011	18	8	4	0	30
24/03/2011	18	8	4	0	30
25/03/2011	18	8	4	0	30
26/03/2011	18	8	4	0	30
27/03/2011	15	10	3	0	28
28/03/2011	12	10	4	0	26
29/03/2011	12	14	4	2	32
30/03/2011	12	14	4	2	32
31/03/2011	12	14	4	2	32

Tabella 3.13 - Piano dei voli effettuati dall'aeroporto di Yamagata tra il 12 e il 31 Marzo 2011

Per semplicità nel modello sviluppato si ipotizza che sullo scalo aeroportuale operi una compagnia unica. Tale approssimazione risulta in ogni caso sostanzialmente coincidente con la realtà per quanto riguarda il mese di Marzo 2011, dove, fatta eccezione per 2 voli operati dalla All Nippon Airways (ANA) il 29 Marzo 2011, la sola compagnia attiva su *Yamagata* fu la Japan AirLines (JAL). I velivoli utilizzati dalla compagnia nella finestra temporale di interesse sono riportati in Tabella 3.14.

<i>Velivoli utilizzati nel modello</i>				
Modello	Lunghezza [m]	Apertura alare [m]	Capacità massima	Quantità disponibile
Embraer E70	29,90	26,00	76	6
Bombardier CRJ200	26,80	21,20	50	2
Boeing 767	54,90	47,60	213	1
McDonnell Douglas MD-90	45,10	32,80	150	2

Tabella 3.14 – Caratteristiche velivoli utilizzati da JAL per voli sullo scalo di Yamagata tra 12 e 31 Marzo 2011

Dal momento in cui l'aeroporto di *Yamagata* fu caratterizzato da un funzionamento di tipo *dot-to-dot*, tanto nella definizione della *baseline* quanto nelle successive analisi, si è ritenuto ragionevole supporre che i velivoli utilizzati per i voli su *Yamagata* fossero dedicati in modo esclusivo al servizio di trasporto in ingresso e in uscita da tale aeroporto. Questa ipotesi è confermata dall'osservazione del piano di dettaglio dei voli, da cui si evince che i velivoli utilizzati sull'aeroporto nella giornata non avrebbero avuto (nella quasi totalità dei casi), il tempo tecnico per servire ulteriori destinazioni.

Si sottolinea come in condizioni normali gli unici velivoli ad essere utilizzati dalla JAL per voli in ingresso o in uscita dall'aeroporto di *Yamagata* siano i jet regionali bimotore Embraer E70 e Bombardier CRJ200. Aerei di più grandi dimensioni come il McDonnell Douglas MD-90 e il Boeing 767, vennero utilizzati su *Yamagata* per rispondere allo straordinario aumento della domanda di traffico dovuto alle condizioni di emergenza.

3.3.6 Le entità e le risorse del sistema

Nel paragrafo precedente si è più volte fatto riferimento alle entità che popolano il sistema e alle risorse di cui si avvalgono i processi rappresentati. Si vuole qui fornire un quadro riassuntivo di entrambe.

Il modello è caratterizzato da tre diverse entità: l'entità passeggero ("*passenger*"), l'entità mezzo di terra ("*bus*") e l'entità volo ("*flight*"). Ciascuna corrisponde ad una diversa classe di Java e possiede "metodi" che rappresentano attributi specifici. Tali attributi presentano sempre un valore di default che può essere opportunamente variato in corrispondenza di determinati eventi o in seguito al completamento, da parte dell'entità stessa, di particolari attività. Gli attributi sono rappresentati da variabili che possono appartenere a 4 tipi fondamentali: "*boolean*" (variabili booleane), "*int*" (numeri interi), "*double*" (numeri reali), "*String*" (stringhe di caratteri). Si riportano in Tabella 3.15 gli attributi dell'entità passeggero.

<i>Attributi classe passenger</i>		
Classe entità	Attributo	Tipo attributo
passenger	Ticket	boolean
	CheckIn	boolean
	SecurityScreening	boolean
	Slot	int
	Maxpass	int
	TimeFlight	double
	BoardingIndex	int
	PassNumber	int
	TimeQueue	double
	DayQueue	int

Tabella 3.15 - Attributi della classe di entità *passenger*

Gli attributi “*Ticket*”, “*CheckIn*”, “*SecurityScreening*” descrivono la situazione del passeggero dal punto di vista delle operazioni che vengono eseguite sui di esso all’interno del terminal; “*Slot*”, “*Maxpass*” e “*TimeFlight*” si riferiscono rispettivamente al *gate* di partenza del volo su cui il passeggero dovrà salire, al numero massimo di passeggeri consentiti su quel volo e all’orario di partenza di quest’ultimo; “*BoardingIndex*” e “*PassNumber*” indicano quanti passeggeri sono stati imbarcati, cioè già attribuiti al volo rispettivamente al momento dell’imbarco e del check-in dell’entità passeggero. L’entità mezzo di trasporto su gomma possiede invece gli attributi elencati in Tabella 3.16:

<i>Attributi classe bus</i>		
Classe entità	Attributo	Tipo attributo
bus	Capacity	int
	Passenger	int
	Company	String

Tabella 3.16 - Attributi della classe di entità *passenger*

L’attributo “*Capacity*” definisce la capacità massima del mezzo (e di conseguenza la tipologia di veicolo), “*Passenger*” descrive il numero di passeggeri trasportati e “*Company*” la compagnia di trasporto a cui appartiene il mezzo. Infine si presentano in Tabella 3.17 gli attributi dell’entità volo:

<i>Attributi classe flight</i>		
Classe entità	Attributo	Tipo attributo
<i>flight</i>	Pass	int
	Destination	String
	Plane_Type	String
	Cleaning	boolean
	Refueling	boolean
	Rewatering	boolean
	Catering	boolean
	Baggage	boolean
	Slot	int
	Departure_Time	double

Tabella 3.17 - Attributi della classe di entità *passenger*

L'attributo "*Pass*" assume il valore del numero di passeggeri sul volo; "*Destination*" e "*Plane_Type*" definiscono la destinazione del volo e la tipologia del velivolo utilizzato; "*Cleaning*", "*Refueling*", "*Catering*" e "*Baggage*" descrivono la situazione del volo dal punto di vista delle operazioni di scalo all'interno della sezione *apron_operations*; "*Slot*" e "*Departure_Time*" indicano il gate associato al volo e il relativo orario di partenza.

Il modello sviluppato rappresenta le principali risorse operative del sistema di trasporto regionale in due modi differenti: in modo "diretto", attraverso elementi funzionali di tipo *resource pool*; in modo "indiretto" attraverso entità vere e proprie. Al primo gruppo appartengono: le risorse addette ai servizi ai passeggeri all'interno del terminal aeroportuale (elementi funzionali *resource pool tickets_operator* e *check_in_operator*) e le risorse attraverso cui si eseguono le operazioni di scalo nel piazzale dell'aeroporto (elementi funzionali *resource pool refuelingTruck*, *baggageTruck*, *cleaningTeam*, *cateringTruck* e *rewateringTruck*). La seconda modalità di rappresentazione è stata invece usata per tutte le risorse di trasporto, ovvero i bus di trasporto regionale, i mezzi per il servizio navetta tra la stazione e l'aeroporto di *Yamagata*, i velivoli. Per queste tipologie di risorse era infatti necessaria una articolazione e flessibilità modellistica che elementi di tipo *resource pool* non garantiscono.

3.4 Estrapolazione dei dati di input

Una delle principali problematiche affrontata in sede di sviluppo del modello è stata quella di estrapolare e calibrare correttamente i dati che costituiscono l'input del modello. In particolare è stato necessario decidere la modalità più

appropriata per descrivere il manifestarsi della domanda di mobilità, ovvero la generazione di un'entità passeggero all'interno del nodo sistema di trasporto regionale. Le difficoltà principali nell'individuare tale modalità di generazione dei passeggeri sono in questo caso legate principalmente a due aspetti:

- la naturale assenza di serie storiche di riferimento per una condizione operativa come quella presa in esame dal presente lavoro di tesi, riguardo la quale sono ovviamente disponibili i soli dati relativi ai fatti del Marzo 2011;
- l'elevato livello di aggregazione temporale di alcuni dei dati disponibili. Come già sottolineato, i dati relativi ai volumi di traffico sperimentati dal sistema di trasporto regionale su gomma sono infatti disponibili solo in modo aggregato rispetto al periodo preso in esame.

La prima delle due criticità risulta penalizzante nel momento in cui ci si ponga il problema di individuare quale distribuzione di probabilità sia la più indicata a descrivere la generazione di domanda di servizi di mobilità (espressa in numero di nuovi passeggeri nell'unità di tempo) all'interno del sistema. La carenza di serie storiche di riferimento, connaturata a fenomeni di questo tipo, ha reso necessario basare la scelta su ragionevoli ipotesi derivanti in modo diretto dalla natura del fenomeno considerato, ovvero il manifestarsi di una domanda di mobilità eccezionalmente elevata sulle tratte di trasporto regionale terrestre che collegano la città di *Yamagata* con le principali città del *Tohoku* a seguito del cataclisma del Marzo 2011. Rappresentando il manifestarsi della domanda attraverso il tempo che intercorre tra l'arrivo di due passeggeri, è ragionevole pensare che tale intervallo temporale sia caratterizzato da estrema variabilità, tanto sulla singola giornata quanto sull'intero periodo considerato. Inoltre si può affermare che l'arrivo di un passeggero presso i nodi stazione sia sostanzialmente indipendente rispetto agli arrivi di altri passeggeri e che, in una situazione di crisi tanto severa, si svolga con la medesima intensità in qualsiasi momento della giornata, ovvero in assenza dei comuni picchi di utenza, collocati in ore diurne, che si osservano in condizioni normali (tenendo anche conto del fatto che in Giappone è prassi utilizzare i bus di trasporto regionale durante l'intera notte) [79].

Stanti queste due considerazioni è possibile ipotizzare che, nell'arco di una singola giornata, l'arrivo di un passeggero presso le stazioni di *Sendai*, *Niigata* e *Sakata-Tsuruoka* sia un processo poissoniano. Sotto tale ipotesi l'intervallo temporale tra l'arrivo di due passeggeri sarà dunque distribuito come un'esponenziale del tipo:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (3.10)$$

con λ parametro caratterizzante la distribuzione e pari al tasso di arrivo orario medio. Tale distribuzione ha media $\mu = \frac{1}{\lambda}$ e varianza $\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}$. Posto in questi termini il processo di calibrazione dei dati si configura dunque come un problema di ricerca di valori adeguati per i tassi di arrivo medio λ sui 20 giorni considerati.

I dati disponibili a riguardo consistono nel dato di traffico complessivo sui 20 giorni sulle tratte considerate e nel numero di corse effettuate giornalmente da ciascuna compagnia su ciascuna tratta. Tali dati non consentono però una stima diretta dei tassi di arrivo giornaliero, non solo per la loro natura di osservazione singola, ma anche poiché non tengono conto dei passeggeri che i bus regionali non furono in grado di servire. Si è dunque reso necessario adottare un metodo di calcolo indiretto.

Per prima cosa si è calcolato il valore medio di passeggeri trasportati in un singolo viaggio sulle tre tratte considerate. Si riporta di seguito la formula utilizzata in modo da rendere chiaro il significato del calcolo effettuato.

$$P = \frac{\sum_j q_j}{\sum_t \sum_j \sum_n c_{j,n}^t} \quad (3.11)$$

dove P numero medio di passeggeri trasportati in un singolo viaggio (su tutte le tratte, in tutti i giorni), q_j numero complessivo di passeggeri trasportati sulla j -esima tratta nei 20 giorni considerati, $c_{j,n}^t$ numero di corse effettuate dall' n -esima compagnia, sulla j -esima tratta, nel t -esimo giorno. A questo punto si è calcolato un valore di prima approssimazione per la domanda giornaliera di trasporto terrestre attraverso la relazione:

$$D_I^t = P * c_{j,n}^t \quad (3.12)$$

A partire da D_I^t si sono ricavati i tassi orari di arrivo medi giornalieri λ_I^t , che non possono essere ritenuti una stima attendibile dei tassi di arrivo giornalieri reali per le ragioni poc'anzi esposte. Per colmare questa lacuna si è ricercata una modalità di stima che si basasse sugli unici dati in nostro possesso con risoluzione giornaliera, ovvero il *throughput* totale del sistema di trasporto aereo e le code a fine giornata presso il terminal aeroportuale di *Yamagata*.

Teoricamente il miglior modo di stimare i tassi di arrivo giornalieri reali, a partire dai due dati appena citati, sarebbe stato quello di utilizzare i λ_I^t come punto di partenza di un processo iterativo che consentisse di convergere a valori λ^t ottimi, ovvero cui corrisponda il valor minimo dell'errore rispetto a *throughput* e code a fine giornata. Tuttavia l'elevato numero di giornate

considerate, da una parte, e l'estrema difficoltà di stimare *range* di variazione ragionevoli per i valori λ^t_I , dall'altra, avrebbero comportato una onerosità di calcolo tale da rendere questa strada praticamente non percorribile. Si è quindi proceduto in modo differente. Osservando l'andamento nei 20 giorni considerati dei valori λ^t_I (rappresentato da una linea di colore blu in Figura 3.15) si è notato un trend piuttosto evidente, riconducibile ad una funzione esponenziale (nel tempo) del tipo:

$$\lambda(t) = \lambda_0 + (\lambda_{max} - \lambda_0)(1 - e^{-\gamma * t}) \quad (3.13)$$

con λ_0 valore di partenza funzione, λ_{max} valore asintotico a cui la funzione tende, γ parametro pari all'inverso della costante di tempo della funzione e t variabile temporale discreta tale che $0 < t < 19$.

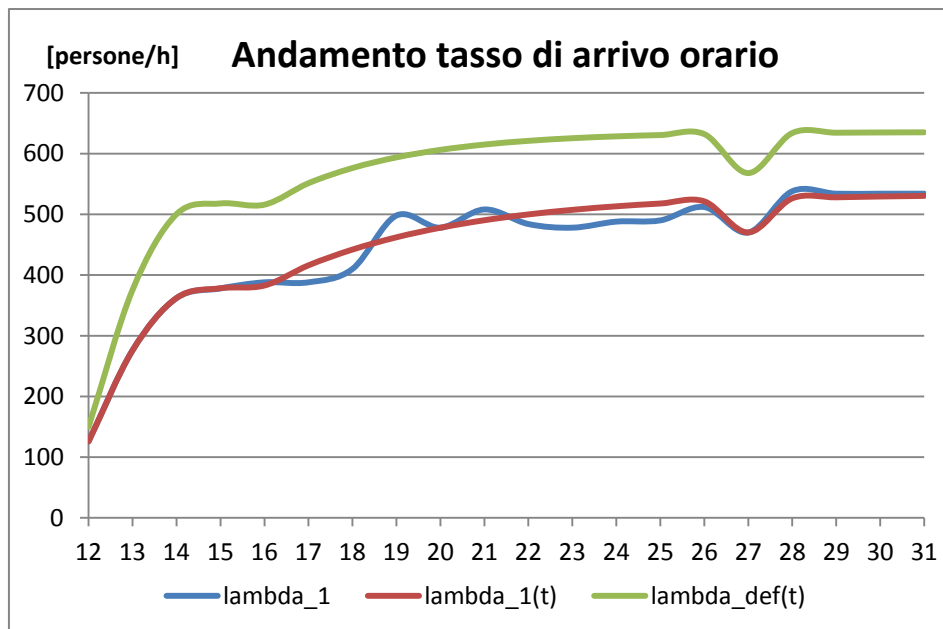


Figura 3.15 – Andamento temporale della performance giornaliera del sistema di trasporto su ruota e dei tassi di arrivo giornalieri di primo tentativo e definitivi

Assegnato a λ_0 il valore λ^1_I , e a λ_{max} il valore λ^{20}_I , si è ricavato per iterazioni successive il valore di γ che consente alla funzione $\lambda(t)$ la migliore approssimazione, ai sensi dei minimi quadrati, dell'andamento dei λ^t_I . Al fine di descrivere alcune discontinuità puntuali presenti nell'andamento dei λ^t_I , si è inoltre definita una “funzione di forma” $g(t)$ definita per punti, pari a:

$$g(t) = \begin{cases} \frac{\lambda^t_I}{\lambda(t)} & t = 1,2,3,15,16 \\ 1 & \forall t \neq 1,2,3,15,16 \end{cases} \quad (3.14)$$

Si è dunque pervenuti alla individuazione di una funzione $\lambda(t)_I$ data da:

$$\lambda(t)_I = g(t)\lambda(t) \quad (3.15)$$

che costituisce il punto di partenza per la calibrazione del modello e di cui si riporta l'andamento in Figura 3.15 con tratto di colore rosso. Procedendo in questo modo si è ottenuta una parametrizzazione dei valori λ^t_I che ha consentito una drastica diminuzione dell'onerosità in termini di calcolo del processo di calibrazione dell'input. Tale processo è consistito nella conduzione di una estesa campagna di simulazioni al fine di pervenire ad una terna di parametri λ_0 , λ_{max} e γ che restituissero valori di errore accettabili rispetto al *throughput* del sistema di trasporto aereo e alle code a fine giornata all'interno del terminal aeroportuale di *Yamagata*. Per ridurre ulteriormente l'onere del calcolo i parametri testati sono stati ricondotti a due, supponendo la costanza del rapporto $\frac{\lambda_{max}}{\lambda_0} = \vartheta$.

A motivo della natura stessa del problema oggetto del presente lavoro di tesi, ovvero del carattere di transitorio e non-stabilità del processo simulato, la modalità utilizzata per la calibrazione del simulatore non è riconducibile a procedure standard suggerite nei più comuni manuali di simulazione, le quali hanno come riferimento tipici processi stabili di cui si conosce, su base storica, il grado di aleatorietà intrinseca; in tali circostanze poi, ciò che generalmente si ricerca è proprio la durata del transitorio iniziale così da escludere dall'analisi dei dati porzioni di simulazione non significativi.. Del resto anche una ricerca bibliografica mirata, ancorché non esaustiva, su procedure di calibrazione per modelli di simulazione di transitori (di tipo *event-based*) non ha dato risultati significativi e comunque utili ai nostri scopi.

Pertanto, coerentemente con i criteri e la formulazione analitica sopra esposta, il processo di calibrazione delle funzioni di generazione della domanda è stato autonomamente impostato secondo i seguenti passi

1. Si sono individuati *range* di variazione massima per i parametri λ_0 e γ . Per quanto riguarda λ_0 , poiché non ha senso fisico considerare una domanda minore della performance effettiva e non ritenendo verosimile che il valore complessivo di domanda possa superare di più di tre volte il

numero medio di utenti effettivamente servito, si è impostato un *range* di variazione massimo di +200% rispetto al valore di primo tentativo. Per quanto riguarda γ si è invece osservato che, con λ_0 qualsiasi, la curva $\lambda(t)$ non presenta alcuna variazione apprezzabile per valori di γ superiori a 4; con γ inferiori a 0,06 l'andamento esponenziale viene invece distorto in misura tale da rendere tali casi privi di significato fisico.

1. Si sono creati i vettori $\overrightarrow{\lambda_{0I}}$ e $\overrightarrow{\gamma_I}$ imponendo i *range* di variazione massima ai valori di primo tentativo λ_0^I e γ^I e definendo un passo opportuno. Ad esempio la prima campagna di calibrazione ha previsto una variazione di λ_0^I del +200% con passo 10% (20 valori) ed un *range* da 0,06 a 4,26 con passo 0,3 per γ^I (15 valori).
2. Per ciascuna combinazione dei componenti di $\overrightarrow{\lambda_{0I}}$ e $\overrightarrow{\gamma_I}$ si è utilizzata la relativa funzione $\lambda(t)$ per definire i tassi di arrivo giornaliero dei passeggeri, effettuando un numero di campagne simulative pari al numero complessivo di combinazioni possibili.
3. Si sono calcolati gli errori quadratici medi su *throughput* e code a fine giornata presso il terminal, individuando la miglior combinazione di valori λ_0 e γ , dove con miglior combinazione si intende quella che minimizza la media degli errori su due dati di riferimento.
4. Si è utilizzata la migliore coppia $\lambda_0 - \gamma$ per definire λ_0^{II} e γ^{II} , che costituiscono il nuovo riferimento e attraverso i quali si sono costruiti i vettori $\overrightarrow{\lambda_{0II}}$ e $\overrightarrow{\gamma_{II}}$, dimezzando in questo caso sia il *range* che il passo di variazione.
5. Si sono ripetuti i passi 2-3-4 fino ad ottenere valori di errore accettabili, ovvero inferiori al 5% per quanto riguarda il *throughput* sul terminal aereo ed inferiori alle 15 persone. In particolare si riporta in Tabella 3.18 la combinazione ottima di λ_0 e γ , corredata dai i relativi errori medi percentuali (MSPE) sul *throughput* ed errori medi (MSE) sulle code a fine giornata. L'andamento della funzione $\lambda(t)_{def}$ è invece riportato in Figura 3.15 con tratto di colore verde.

Risultati della calibrazione			
λ_0^{def}	γ^{def}	$MSPE_{throughput}$	$MSE_{code_terminal}$
150	0,35	4,914%	8,475

Tabella 3.18 – Risultati finali del processo di calibrazione

3.5 Processo di validazione del modello

Il processo di validazione del modello ha dovuto tenere conto delle medesime problematiche esposte riguardo alla generalizzazione dei dati di input. La simulazione viene ampiamente utilizzata nell'ambito della gestione della produzione e del Supply Chain Management, ambiti nei quali si valutano opportunità di ottimizzazione di processi stabili e per i quali sono generalmente disponibili ampie basi di dati storici. L'oggetto trattato nel presente lavoro di tesi presenta invece, per sua natura, caratteristiche opposte, configurandosi come un processo transitorio, instabile e irripetibile, per il quale non esiste alcun riferimento storico pregresso significativo, se non la singola osservazione corrispondente all'evento oggetto di studio, ovvero il cataclisma del Marzo 2011. Il sistema rappresentato è dunque un oggetto il cui ciclo di vita inizia con il cataclisma citato e si conclude con il ripristino della normale funzionalità dell'ITr. La procedura adottata per la validazione del modello non ha potuto prescindere da queste peculiarità.

Per prima cosa si è reso necessario individuare un numero di *run* di simulazione adeguato ad avere risultati stabili. Per fare ciò si sono condotte una serie di simulazioni di test con numero di *run* crescente (a partire da 5 *run* e arrivando a 100, con passo 5), calcolando per ciascuna di esse i coefficienti di variazione C_v^t relativi al *throughput* del sistema di trasporto aereo. Il coefficiente di variazione è stato calcolato come:

$$C_v^t = \frac{\sigma_{camp}^t}{|\mu_{camp}^t|} \quad (3.16)$$

I coefficienti C_v^t , calcolati per ciascuna giornata *t* e dati dal rapporto tra la deviazione standard campionaria e la media campionaria sulle *run* effettuate, misurano il grado di stabilità degli output della simulazione.

I coefficienti di variazione relativi ai dati sulle code a fine giornata nel terminal aeroportuale di *Yamagata* non sono stati presi in considerazione, in quanto la presenza di una grande quantità di valori a media nulla, falsava significativamente la bontà dell'analisi. Il numero di *run* da effettuare è stato dunque fissato a quel valore per il quale il coefficiente di variazione si mantiene stabilmente su valori inferiori al 3% per ogni giornata considerata. Il numero di *run* che soddisfa le condizioni descritte è pari a 60.

Come già accennato nell'introduzione a questo paragrafo, la mancanza di distribuzioni note relative a ripetizioni passate dell'evento oggetto di studio non consente un confronto a livello di distribuzioni di probabilità tra dati storici e risultati della simulazione. Tuttavia, un elemento oggettivo di riferimento per la validazione del modello può essere desunto ricordando la natura e lo scopo

peculiari dello studio eseguito. Ci si attende infatti che, a parità di condizioni, il modello di simulazione sia in grado di riprodurre fedelmente le caratteristiche funzionali e prestazionali del transitorio di risposta all'emergenza del sistema studiato. La validazione è stata dunque basata sull'analisi dello scostamento tra le serie storiche, reale e simulata, che rappresentano l'evoluzione prestazionale del sistema in risposta all'evento catastrofico del Marzo 2011. In Figura 3.16 e Figura 3.17 si riportano gli andamenti, sulle 20 giornate considerate, dei dati storici relativi a *throughput* e code a fine giornata e dei corrispondenti risultati ottenuti dal simulatore (in questo caso si tratta di valori medi giornalieri, rispetto ai 60 *run* di simulazione).

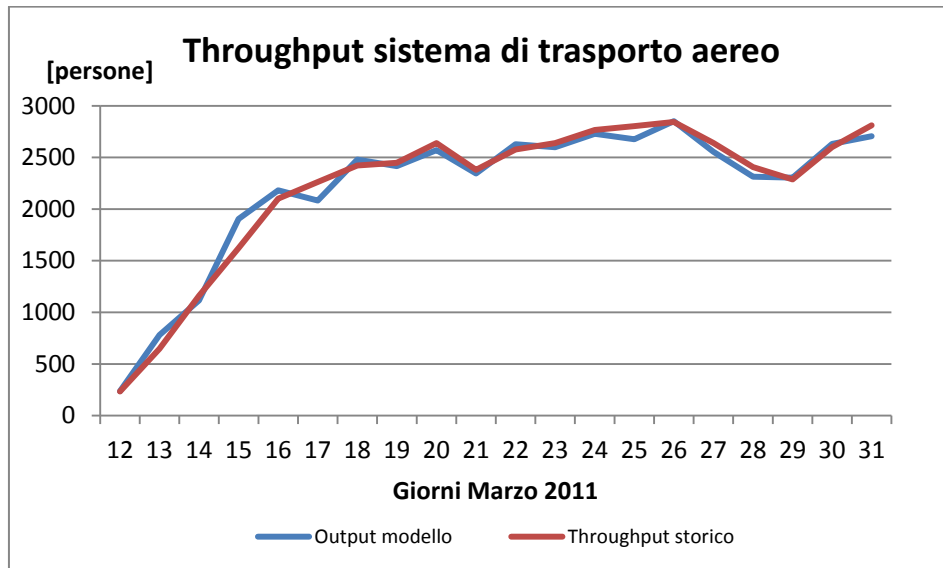


Figura 3.16 – Confronto grafico tra dato storico sul *throughput* ed output medio del modello

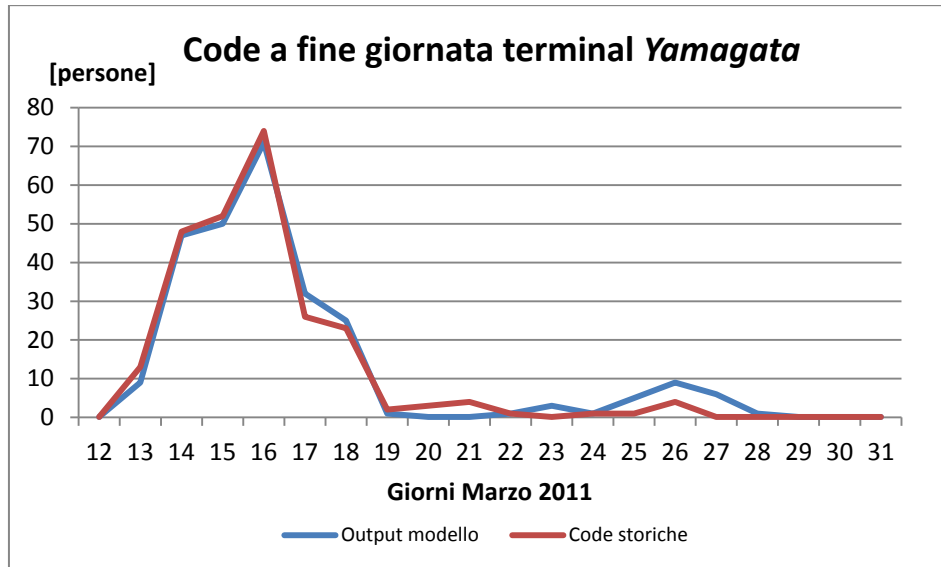


Figura 3.17 - Confronto grafico tra dato storico sulle code a fine giornata nel terminal di Yamagata ed output medio del modello

Come parametri di validazione si sono dunque adottati, per ogni giornata all'interno del periodo di interesse:

- lo scarto quadratico medio dell'errore assoluto (*Mean Squared Error*, MSE) delle code presso il terminal, ovvero:

$$MSE_{code\ terminal}^t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{run}} (x_i^t - \mu^t)^2}{N_{run}}} \quad (3.17)$$

con t apice relativo al giorno considerato, i indice della run, N_{run} numero complessivo di run, x_i^t dato in output dalla simulazione per il t -esimo giorno, nella i -esima run e μ^t dato storico di riferimento per il t -esimo giorno.

- lo scarto quadratico medio dell'errore percentuale (*Mean Squared Percentage Error*, MSPE) del *throughput* del sistema di trasporto aereo, ovvero:

$$MSPE_{throughput}^t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{run}} \left(\frac{x_i^t - \mu^t}{\mu^t}\right)^2}{N_{run}}} \quad (3.18)$$

Si è scelto di presentare l'indice di errore relativo alle code a fine giornata all'interno del terminal in termini assoluti e non percentuali in modo da consentirne una corretta interpretazione. Infatti, avendo dati storici relativi a

molte delle giornate considerate con valori di coda nulli o pari a poche unità, è poco significativo nonché fuorviante effettuare valutazioni sugli errori espressi in termini percentuali. La valutazione degli errori è stata effettuata alla luce delle dimensioni caratteristiche del problema in oggetto.

<i>Giorno</i>	$MSE_{code\ terminal}^t$	$MSPE_{throughput}^t$
12-mar	0,01	8,53%
13-mar	12,42	6,54%
14-mar	11,81	4,27%
15-mar	10,78	4,23%
16-mar	9,32	4,04%
17-mar	8,30	5,68%
18-mar	5,98	3,86%
19-mar	2,23	4,73%
20-mar	3,41	4,03%
21-mar	3,58	2,71%
22-mar	4,68	3,20%
23-mar	6,27	3,51%
24-mar	1,63	3,53%
25-mar	9,12	4,89%
26-mar	4,41	2,96%
27-mar	3,30	4,25%
28-mar	2,11	3,90%
29-mar	0,02	2,54%
30-mar	0,01	2,70%
31-mar	1,66	5,24%
<i>Errore_{medio}</i>	5,32	4,04%
<i>Errore_{max}</i>	12,42	6,54%
<i>Errore_{min}</i>	0,01	2,54%

Tabella 3.19 – MSE e MSPE relativi a code a fine giornata presso il terminal e *throughput* del sistema di trasporto aereo.

Come è possibile notare, gli errori sul numero di persone che pernottano in aeroporto si mantengono mediamente sotto le 6 persone, con un picco di circa 15 persone sulla seconda giornata che riteniamo però accettabile, in quanto un eventuale aggravio delle code di 15 unità non comporterebbe significative differenze dal punto di vista della criticità di gestione. Per quanto riguarda il *throughput* del sistema di trasporto aereo, si nota come gli errori percentuali si mantengano mediamente al di sotto del 5%. Se si valuta tale risultato in termini assoluti, ovvero di passeggeri serviti, si nota come l'errore medio tra le giornate

sia poco superiore alla capacità di un Embraere E70, uno dei velivoli di piccole dimensioni considerati dal modello, mentre il picco massimo in termini assoluti, che si verifica in corrispondenza del 25 Marzo, è ampiamente al di sotto del valore di capacità massima di un McDonnell Douglas MD-90, velivolo di medie dimensioni. Sebbene dunque gli errori commessi sul *throughput* non possano considerarsi trascurabili, li si ritiene accettabili e corrispondenti al limite di precisione possibile per il modello, in quanto corrispondenti al massimo ad un volo in più o in meno nell'intera giornata.

Infine, data la maggiore significatività degli errori relativi al *throughput* del sistema di trasporto aereo, si è proceduto, per questo dato, ad una verifica della distribuzione di normalità degli errori commessi. Nel caso infatti gli errori siano distribuiti secondo una distribuzione gaussiana si può escludere che essi siano dovuti a distorsioni sistematiche dell'output generate dal modello di simulazione. Si riportano in Tabella 3.20 i risultati dei test effettuati, presentando i relativi *p-value*, da cui si può osservare come il test di normalità sia ampiamente soddisfatto nella sostanziale totalità dei casi, fatta eccezione per il giorno 19 Marzo che presenta in ogni caso un *p-value* molto vicino all'accettabilità.

<i>Giorni</i>	$p - value_{throughput}$	<i>Giorni</i>	$p - value_{throughput}$
12-mar	0,478	22-mar	0,824
13-mar	0,114	23-mar	0,364
14-mar	0,381	24-mar	0,420
15-mar	0,194	25-mar	0,143
16-mar	0,756	26-mar	0,437
17-mar	0,804	27-mar	0,400
18-mar	0,405	28-mar	0,830
19-mar	0,047	29-mar	0,589
20-mar	0,477	30-mar	0,064
21-mar	0,254	31-mar	0,520

Tabella 3.20 - Risultato dei test di normalità dei residui sul *throughput* del sistema di trasporto aereo

Capitolo 4

Analisi di resilienza del sistema

In 2.3.3 si è sottolineato come il sistema di trasporto aereo del *Tohoku* abbia avuto performance eccellenti dal punto di vista della resilienza. Se si considerano infatti i primi 20 giorni a seguito dell'evento, l'ITr aereo regionale, a fronte di una catastrofe di enormi dimensioni, fu in grado di mantenere sostanzialmente inalterata la propria potenzialità di trasporto. È in questo senso che il grande terremoto e tsunami nel Giappone orientale costituiscono uno straordinario caso di studio nell'ambito del *Resilience Management*.

Sebbene il modello realizzato, come ampiamente chiarito in 1.5, sia quantitativamente e qualitativamente differente da una rappresentazione completa dell'intero sistema di trasporto aereo regionale, analizzare il comportamento del nodo aeroportuale di *Yamagata* e dei sistemi di trasporto su ruota ad esso connessi, consente valutazioni interessanti per quanto riguarda la *responsiveness* e la *robustness* del sistema stesso, secondo le accezioni definite in 1.2. In particolare, nell'ottica di fornire un valido supporto decisionale per l'elaborazione di piani operativi ottimi nella risposta all'emergenza, si è voluto caratterizzare ciascuna risorsa del sistema secondo il suo grado di criticità, ovvero rispetto all'influenza di una sua variazione sul livello di servizio del sistema. Il risultato finale di questo studio è una mappatura delle risorse critiche e l'identificazione delle leve operative dalle quali dipendono decadimenti o incrementi delle performance di resilienza del sistema stesso. Questo è stato ottenuto attraverso un'estesa campagna di simulazioni i cui risultati sono di seguito riportati e commentati.

4.1 Scenario storico di riferimento (*baseline*)

Per prima cosa si è proceduto a definire una *baseline* di riferimento per grandezze caratteristiche e performance del sistema. Sebbene infatti il già citato rapporto sul grande terremoto e tsunami stilato dal YPG [72], fornisca informazioni molto dettagliate su gran parte delle variabili di interesse del modello, vi erano invece grandezze riguardo alle quali non erano disponibili dati, quali l'andamento nei 20 giorni considerati del numero di persone in coda presso le stazioni delle località di generazione del traffico regionale, il *throughput* del trasporto terrestre e i tempi di attesa in coda relativi al sistema di trasporto regionale, ovvero in corrispondenza della stazione di *Yamagata* e presso il terminal aeroportuale. Per stimare tali valori si sono utilizzati i risultati

restituiti dalle simulazioni di validazione del modello, presentate in 3.5. In Figura 4.1 si riporta la *baseline* dell'andamento delle code presso le stazioni di *Sendai*, *Sakata-Tsuruoka* e *Niigata*..

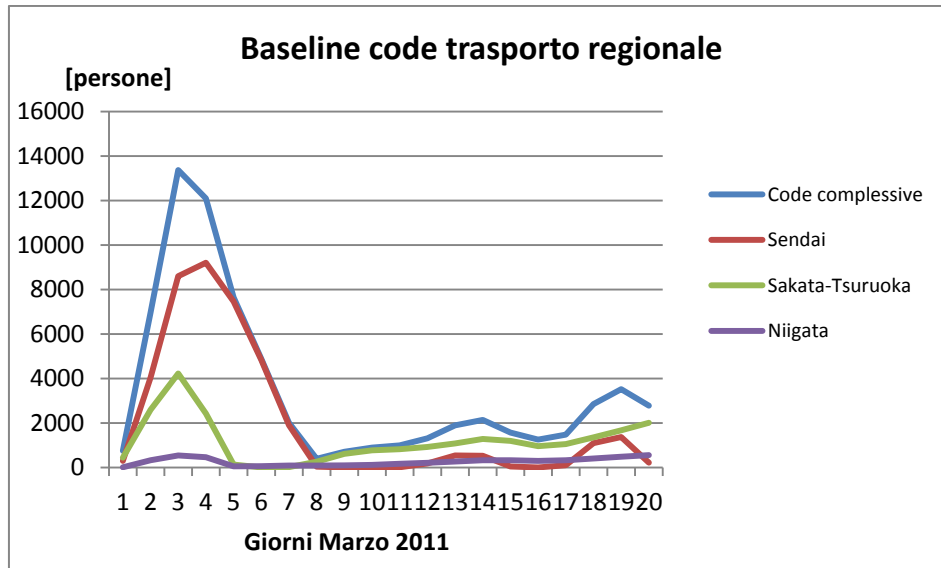


Figura 4.1 – Baseline code presso le stazioni di *Sendai*, *Sakata-Tsuruoka*, *Niigata*

Diversamente da quanto effettuato per le code presso il terminal, delle quali si è misurato il valore a fine giornata così da ottenere un dato coerente con le informazioni storiche in nostro possesso, i valori delle code riportati in Figura 4.1 sono stati calcolati come valore medio giornaliero attraverso la formula:

$$coda_k^i = \frac{coda_k^i(T) * T + coda_k^i(T + t) * t}{(T + t)} \quad (4.1)$$

dove il pedice $k = \{Sendai, Sakata - Tsuruoka, Niigata\}$ indica il nodo sul quale si calcola la coda, e i parametri t e T caratterizzano rispettivamente il passo temporale con il quale la coda viene calcolata e il tempo cumulato all'interno della giornata. L'apice i indica invece la run per la quale viene calcolata la coda e il valore presentato costituisce la media dei valori $coda_k^i$ su tutte le run effettuate:

$$coda_k = \sum_{i=1}^N \frac{coda_k^i}{N} \quad (4.2)$$

Si sottolinea che i valori di code ottenuti non sono da intendersi esclusivamente come indice del numero complessivo di utenti stazionanti in media nei nodi di generazione della domanda di trasporto terrestre, ma anche come valore

indicatore della porzione di passeggeri che, non essendo in grado quel giorno di accedere al servizio di trasporto, rimase nelle proprie case.

In Figura 4.2 è invece riportato l'andamento del numero medio complessivo di persone servite dai tre sistemi di trasporto che compongono il modello.

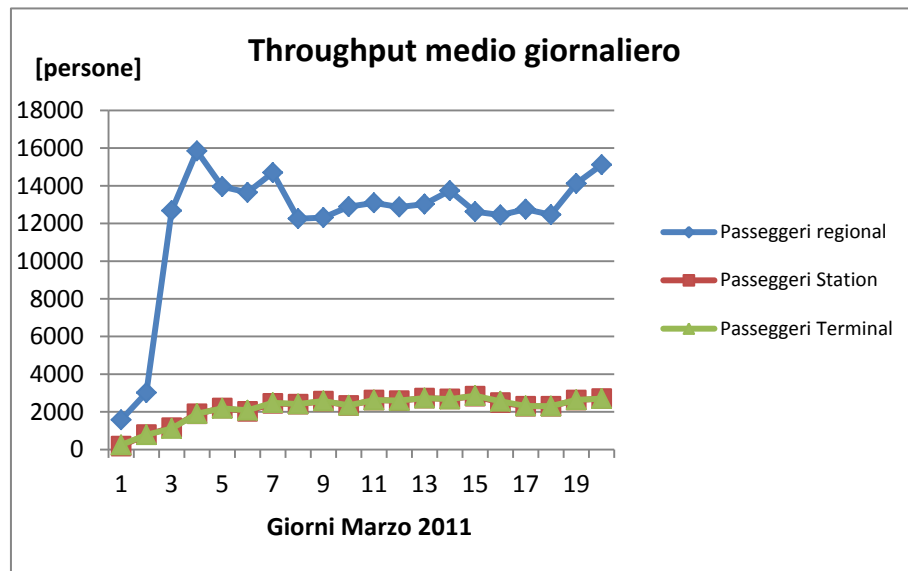


Figura 4.2 - Baseline dei flussi di passeggeri nel sistema

Si noti come l'output del sistema di trasporto terrestre regionale sia notevolmente superiore rispetto a quello del servizio di navetta e del terminal, in quanto, come esposto in 3.3.3, questi comprende anche gli utenti che non usufruiscono del servizio di trasporto aereo e fuoriescono dal sistema in corrispondenza della stazione di Yamagata. Il *throughput* giornaliero del servizio navetta e del terminal saranno invece per ovvi motivi coincidenti, a meno delle code (accumuli) formatesi all'interno del terminal.

Altra componente fondamentale della *baseline* sono i tempi medi di attesa degli utenti nei tre nodi fondamentali del sistema, che sono riportati in Figura 4.3, Figura 4.4 e Figura 4.5.

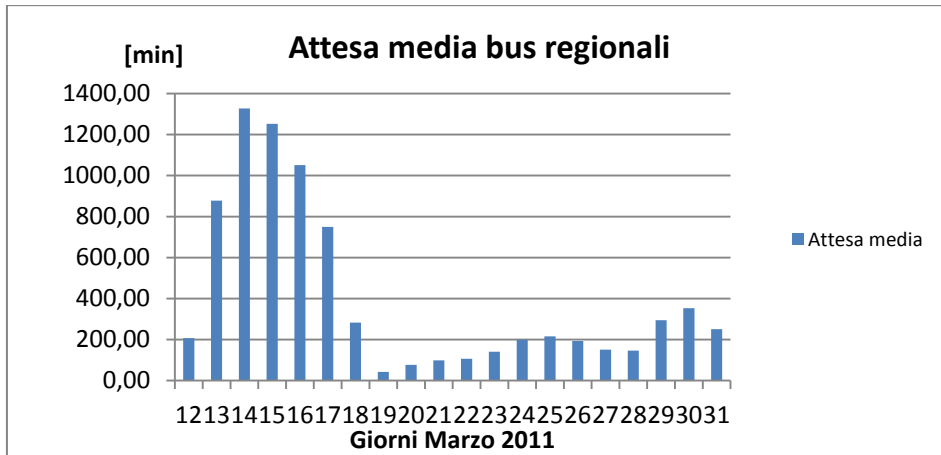


Figura 4.3 – Baseline tempi medi di attesa sistema bus regionali

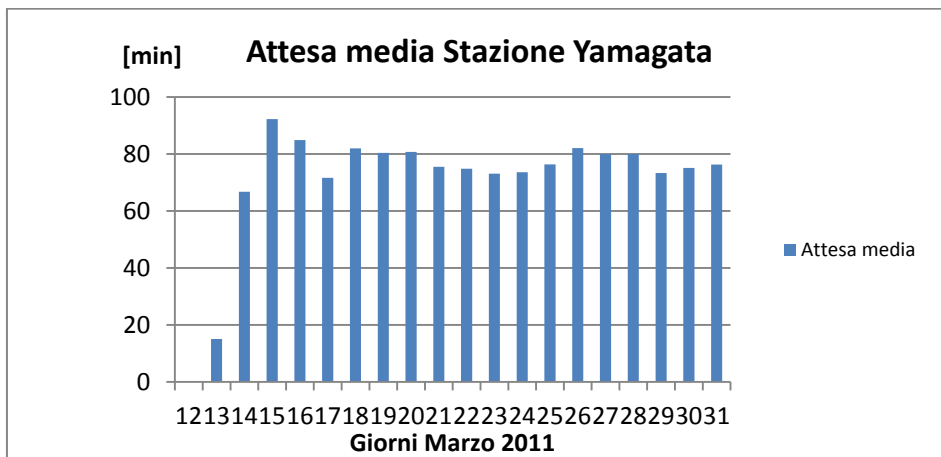


Figura 4.4 - Baseline tempi medi di attesa stazione di Yamagata

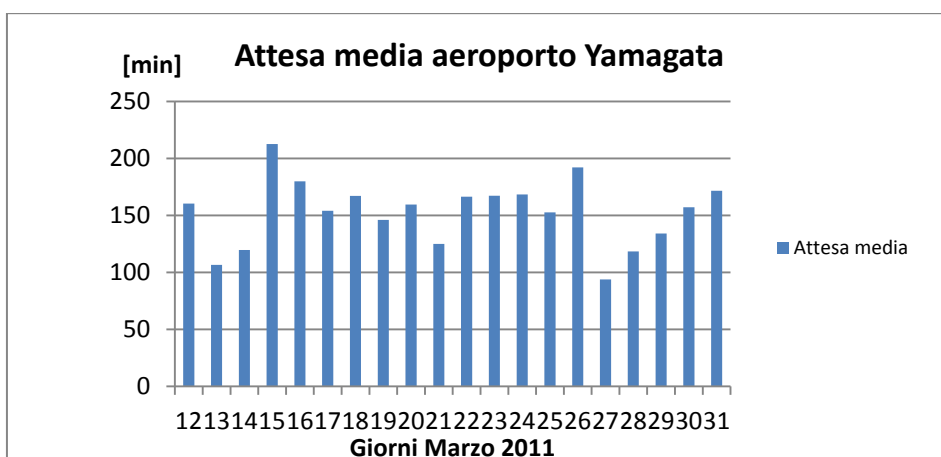


Figura 4.5 – Baseline tempi di attesa medi terminal di Yamagata

Le grandezze riportate completano la *baseline* del modello, ovvero descrivono in modo esauriente la situazione storica di riferimento del modello simulativo e costituirà pertanto il termine di confronto per valutare i risultati delle successive analisi di sensitività.

4.2 Definizione dei *Key Performance Indicator* del sistema

Nell'introduzione a questo capitolo si è accennato all'obiettivo principale delle analisi condotte: valutare l'impatto della disponibilità di risorse critiche e di diverse leve operative sulla performance di resilienza del sistema di trasporto.

Tale performance era stata definita nel paragrafo 1.2 come caratterizzata da due dimensioni fondamentali: la *mobility*, ovvero la capacità del sistema di movimentare il numero richiesto di utenti, e la *safety*, ovvero la capacità di limitare l'esposizione al rischio dei passeggeri movimentati. Per valutare le performance si è dunque reso necessario costruire indicatori che costituissero *proxy* di entrambi gli aspetti, mantenendo al contempo un elevato grado di sinteticità.

Per la *mobility* è stato abbastanza immediato scegliere come indice di performance il *throughput*, sia esso quello del sistema di trasporto regionale su ruota o del terminal di *Yamagata*. Per quanto riguarda la *safety* si sono invece individuati due indicatori: la vulnerabilità dei passeggeri durante l'attesa (*vulnerabilità di attesa*) e la vulnerabilità dei passeggeri durante il trasporto (*vulnerabilità di trasporto*).

Nella costruzione dell'indicatore di *vulnerabilità di attesa* si è partiti dal presupposto che, in uno scenario di emergenza e crisi, i diversi nodi del sistema presentano un differente grado di vulnerabilità per gli utenti, con questo intendendo la possibilità che i passeggeri vengano esposti a minacce dirette piuttosto che soffrano l'insorgere di difficoltà dovute alla gestione di elevate concentrazioni di individui. Nel nostro caso, dall'analisi del rapporto del YPG, la stazione di *Yamagata* è emersa essere il nodo per il quale la sosta prolungata di persone fosse maggiormente problematica. I nodi corrispondenti alle stazioni di partenza dei bus regionali e al terminal di *Yamagata* presentano infatti minori rischi per gli utenti; nel primo caso a motivo della possibilità per i cittadini, in caso di pericolo, di fare ritorno alle proprie case; nel secondo in quanto l'aeroporto costituisce un'area generalmente sicura e dotata di una certa autonomia nella gestione di un numero di persone anche elevato, come testimoniato dal fatto che le procedure della protezione civile di *Sendai*, citate in 2.3.2, prevedevano proprio l'aeroporto come punto di raccolta in caso di tsunami. L'indicatore, riferito all'intero sistema, è stato dunque definito come:

$$V_{attesa} = \sum_i F^i * T^i * v_a^i \tag{4.3}$$

con $i = \{Regional, Stazione, Terminal\}$, indice identificativo del nodo considerato, F^i throughput complessivo giornaliero sul nodo, T^i tempo di attesa medio giornaliero sul nodo e v_a^i coefficiente di vulnerabilità dei passeggeri in corrispondenza del nodo. A quest'ultimo, in riferimento allo scenario studiato e tenendo conto delle valutazioni di cui sopra, sono stati attribuiti i valori di Tabella 4.1:

Coefficiente di vulnerabilità attesa			
	<i>regional</i>	<i>station</i>	<i>terminal</i>
v_a^i	0,15	1	0,7

Tabella 4.1 - Valori coefficiente di vulnerabilità dell'attesa

L'indicatore V_{attesa} pesa dunque i tempi di attesa dei passeggeri processati dal sistema nella giornata rispetto alla vulnerabilità del nodo sul quale essi spendono tale tempo di attesa. In Figura 4.6 è riportata la baseline di riferimento dell'indicatore riferito all'intero sistema di trasporto, sulle cui modalità di calcolo valgono le considerazioni fatte in 4.1

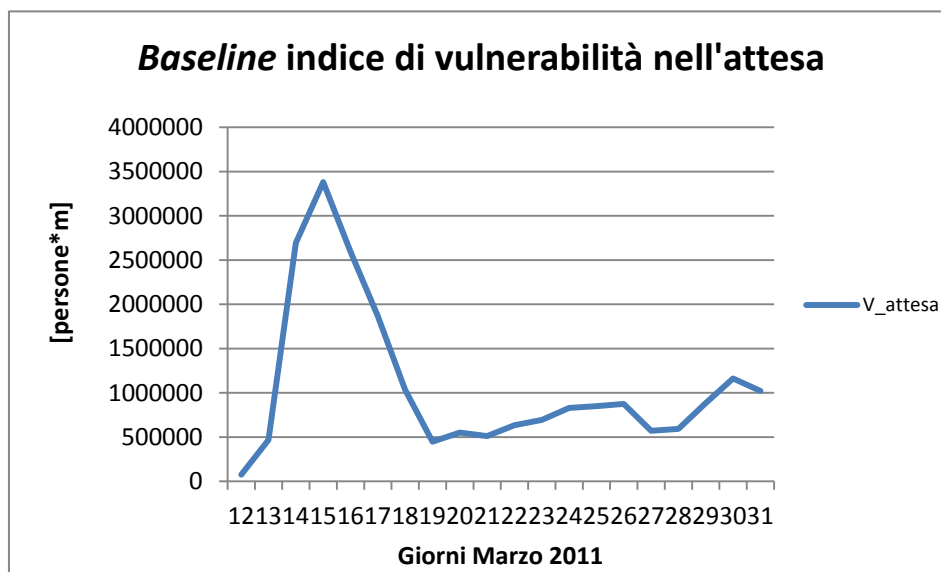


Figura 4.6 - Baseline coefficiente globale di vulnerabilità dell'attesa per l'intero sistema di trasporto

Con l'indicatore *vulnerabilità di trasporto* si è invece voluto quantificare il livello di rischio legato alla modalità di trasporto utilizzata dagli utenti. In una situazione caotica come quella dei giorni successivi ad una grande catastrofe, in

cui beni di primissima necessità quali carburante ed acqua potabile sono disponibili in quantità estremamente limitata e gli organi di protezione civile e le forze dell'ordine sono impegnati nella gestione delle emergenze più rilevanti, è certamente più sicuro che gli utenti utilizzino pochi canali di trasporto facilmente "controllabili" dalle autorità, piuttosto che disperdersi in un ampio spettro di mezzi di trasporto alternativi. D'altro canto l'eventuale impossibilità di rispondere alla domanda di mobilità attraverso una modalità unica e la difficoltà nel condizionare le scelte della popolazione, rendono inevitabile la compresenza di molteplici modalità di spostamento, cui conseguono esposizioni a rischio altamente variabili. È questa la dinamica che si è tentato di modellare creando nel nodo stazione una possibilità di scelta, da parte dell'entità passeggero, del mezzo di trasporto da utilizzare per coprire il tragitto tra la stazione ferroviaria e l'aeroporto di *Yamagata*, come già esposto in 3.3.3. L'indice *vulnerabilità di trasporto* è stato dunque calcolato secondo la formula:

$$V_{trasporto} = \sum_j F^j * v_t^j \quad (4.4)$$

con j , indice identificativo della tipologia di trasporto scelta dal passeggero, F^j numero di passeggeri trasportati dalla j -esima modalità di trasporto, v_t^j coefficiente di vulnerabilità della j -esima modalità di trasporto. Sulla base di quanto esposto in precedenza si sono previsti per v_t^j i valori presentati in

<i>Coefficiente vulnerabilità di trasporto</i>		
	Shuttle/Bus	Taxi/Auto a Noleggio
v_t^j	0,16	1

Tabella 4.2 – Valori coefficiente vulnerabilità di trasporto

Da notare come la scelta di mezzi di trasporti alternativi si ponga per il solo collegamento tra la stazione e l'aeroporto di *Yamagata*, stante l'ipotesi che sia possibile trascurare qualsiasi utilizzo di vetture proprie da parte dei passeggeri, a motivo delle limitazioni imposte dalle autorità giapponesi sull'utilizzo di carburante. La scelta dei valori presentati per i coefficienti v_t^j , è stata dettata da considerazioni riguardanti la probabilità che il veicolo scelto per il trasporto incorra in incidenti o guasti durante il tragitto. Partendo dall'assunto che qualsiasi veicolo, a prescindere dalle sue dimensioni, è soggetto ad una stessa probabilità di andare incontro a incidente durante il trasporto in un'area fortemente compromessa dall'evento disastroso, ed assegnato un valore unitario a $v_t^{Taxi/noleggio}$, si è calcolato $v_t^{Shuttle/Bus}$ come rapporto tra il numero di persone mediamente trasportate da mezzi di trasporto alternativo, ipotizzando una media di persone trasportate da tali mezzi di 2,5 persone, e il numero di

persone mediamente trasportato dai mezzi di trasporto convenzionali, calcolato come media pesata tra le persone trasportate dai bus da 9 posti e quelli da 28 posti (nei 20 giorni successivi all'evento). Il coefficiente $v_t^{Shuttle/Bus}$ rappresenterà quindi la quota parte di esposizione alla possibilità di incidente delle due tipologie di mezzi navetta gravante sul singolo passeggero nel caso questi scelga di utilizzare il trasporto pubblico piuttosto che un mezzo di trasporto alternativo. Si riporta in Figura 4.7 la *baseline* di riferimento per l'indicatore.

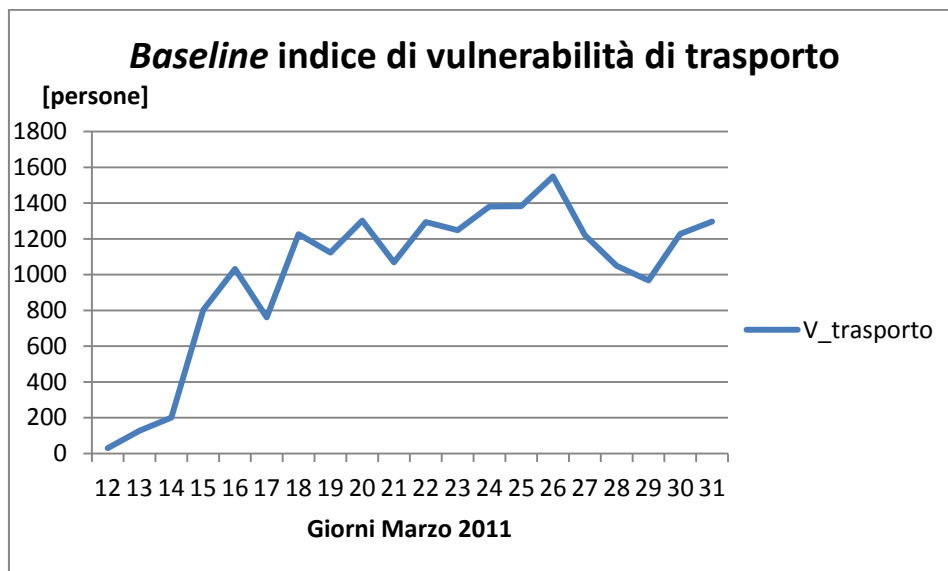


Figura 4.7 - Baseline coefficiente globale di vulnerabilità di trasporto

Gli indicatori presentati definiscono in questo modo una terna attraverso cui è possibile caratterizzare in modo sintetico le prestazioni del sistema dal punto di vista delle capacità di *mobility* e di *safety*. È in questo modo possibile costruire, mediando le grandezze definite sui 20 giorni considerati, un diagramma "plot" triangolare che fornisca una rappresentazione sintetica della performance del sistema e che consenta una visualizzazione sinottica dell'impatto della variazione di una determinata risorsa sulle suddette performance. Il diagramma di Figura 4.8 costituisce la *baseline* dello strumento appena descritto.

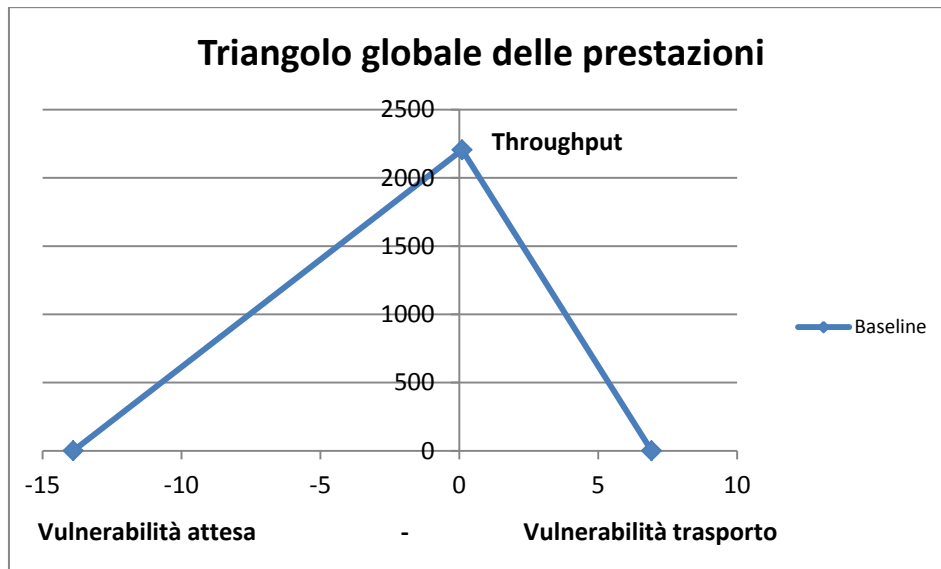


Figura 4.8 – Rappresentazione triangolare degli indici di prestazione del sistema

Nel diagramma, per motivi di leggibilità, si è scelto di visualizzare le informazioni usando una scala lineare sulle ordinate ed una scala logaritmica sulle ascisse. Nell’interpretazione del significato di questo tipo di diagrammi si è tenuto conto del fatto che essi riportano il valore della media dei tre indicatori sulle 20 giornate considerate. Per evitare dunque di non rilevare eventuali criticità circoscritte ad uno o pochi giorni, rese non riconoscibili dall’operazione di media, si è sempre valutato anche il loro andamento sui 20 giorni.

4.3 Analisi di sensitività sulle risorse

Si procede ora alla presentazione dei risultati delle campagne di simulazione effettuate. Si è già avuto modo di specificare come l’intento delle analisi sia quello di pervenire ad una mappatura delle risorse del sistema modellato in base al loro impatto sulle prestazioni, intese nel modo esposto in 4.2. Si tratta dunque di analisi di sensitività sulle risorse del sistema.

Con “*risorsa del sistema di trasporto*” si intende qualsiasi entità la cui disponibilità determina la continuità del servizio di mobilità e accoglienza dei passeggeri nei tre diversi nodi del sistema. L’analisi è stata condotta su tutte ed esclusivamente quelle risorse per le quali si è ritenuta plausibile una variazione significativa della produttività o della disponibilità a seguito di un mutamento dello scenario di crisi considerato. Le variazioni, in termini di dotazione (o capacità) o di mix di determinati set di risorse non sono state impostate secondo una percentuale fissa. Per ogni risorsa si è valutato piuttosto, in modo indipendente, l’intervallo di variazione da considerare in base a criteri di

verosimiglianza e ragionevolezza rispetto alle reali condizioni operative. Gli intervalli di variazione individuati sono stati poi applicati in modo omogeneo all'intero intervallo temporale di simulazione (20 giorni).

Poiché il modello realizzato è caratterizzato da una marcata monodirezionalità del flusso di passeggeri, eccezion fatta per gli utenti che costituiscono il traffico in ingresso dell'aeroporto di *Yamagata* ed escono dal sistema nella stazione di *Yamagata*, è generalmente vero che una modifica nella disponibilità delle risorse di uno dei tre macro-nodi, condiziona esclusivamente le prestazioni dei nodi a valle di esso.

I risultati delle analisi verranno presentati attraverso grafici che riportano il valore medio sulle run effettuate delle grandezze considerate. Per consentire la leggibilità dei grafici si è omesso di riportare le deviazioni standard relative a ciascuno di essi. Queste potranno essere consultate in Appendice A.

4.3.1 Trasporto regionale terrestre

La risorsa che condiziona in modo determinante il livello di servizio per il nodo di trasporto regionale è certamente il numero massimo di bus disponibili sulle diverse tratte. È importante sottolineare nuovamente come nel modello costruito la risorsa "bus regionale" condensi in realtà al suo interno due diverse risorse reali: l'automezzo e il conducente. Le motivazioni della scelta di non rappresentare in modo disgiunto tali risorse si sono espresse in 3.3.6.

Le simulazioni condotte mostrano come la principale prestazione condizionata da una variazione nel numero massimo di bus disponibili sia la vulnerabilità dei passeggeri all'attesa. Lo evidenzia il grafico di Figura 4.9, che riporta la performance globale corrispondente ad una diminuzione di 10 e 20 punti percentuali nel numero di bus disponibili. È altrettanto evidente come il *throughput* del sistema resti invece sostanzialmente invariato. In questo grafico, come in tutti i successivi, gli indici di performance sono stati normalizzati rispetto ai rispettivi valori di *baseline*.

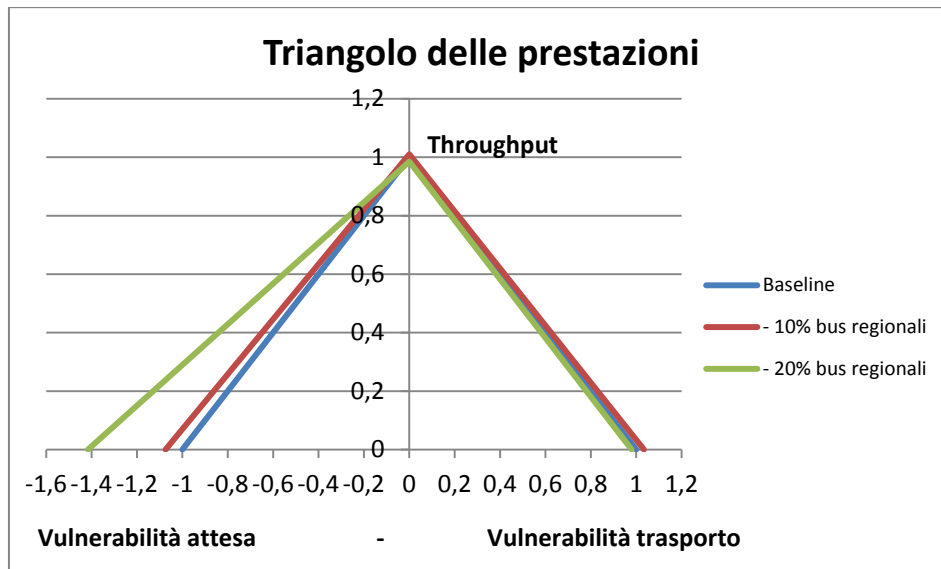


Figura 4.9 – Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus regionali disponibili

È possibile dettagliare maggiormente le conseguenze di una maggiore severità dei vincoli sul numero massimo disponibile di mezzi di trasporto regionale. In particolare si nota come nel caso in cui si disponga del 10% in meno di automezzi, ciò non comporti significative variazioni nelle code presso le stazioni di *Sendai*, *Sakata-Tsuruoka* e *Niigata* (Figura 4.10), ma induca invece un picco di coda rilevante presso il nodo terminal (Figura 4.11) il 19 e 20 Marzo. Tale fatto, di per sé non intuitivo, è una conseguenza della variabilità nei 20 giorni considerati del vincolo sul numero massimo di risorse di trasporto regionale disponibile. Come mostrato infatti da Tabella 3.1, il numero massimo di bus disponibili sulla tratta caratterizzata dai maggiori volumi, ovvero quella *Sendai-Yamagata*, è estremamente limitato nei primi giorni considerati, e tende a crescere nelle giornate successive. Se si induce quindi una diminuzione del numero massimo di risorse di trasporto regionale disponibili, si avrà che nelle prime giornate il trasporto terrestre non solo vedrà aumentare il numero di persone non servite, ma non riuscirà ad alimentare il trasporto aereo in modo “sufficiente” da indurre un picco di utenti non serviti in corrispondenza del picco che si riscontra nei dati storici. L’insorgere di tale criticità sarà piuttosto posticipato a quelle giornate in cui il numero massimo di bus disponibili cresce in misura tale da trasportare un numero sufficiente di persone, immettendo nel terminal di *Yamagata* anche quella quota di utenti che si erano precedentemente accumulati nelle stazioni di *Sendai*, *Sakata-Tsuruoka* e *Niigata*. L’effetto di “posticipazione della criticità” sarà tanto più marcato quanto maggiore sarà la riduzione imposta nel numero di risorse disponibili.

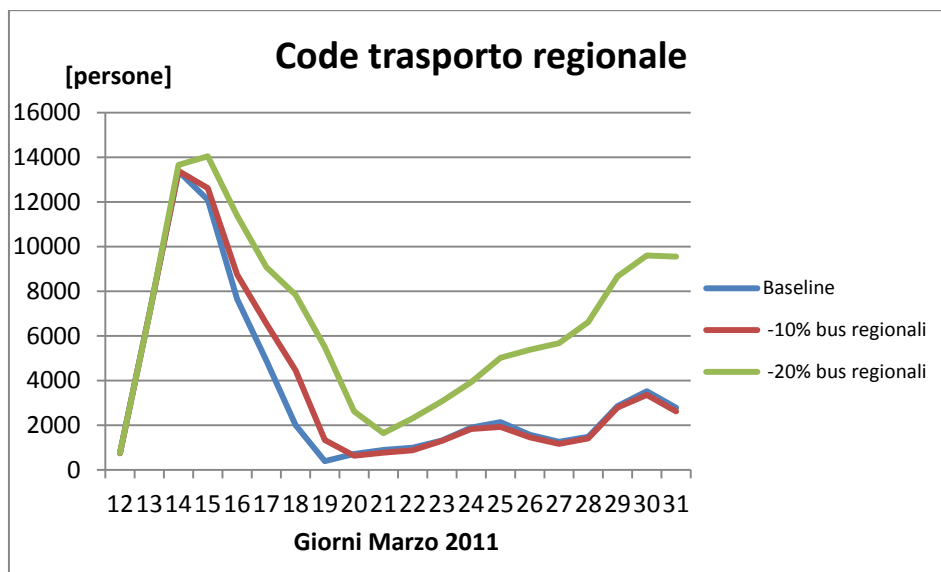


Figura 4.10 – Code complessive nodi di trasporto regionale a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus regionali disponibili

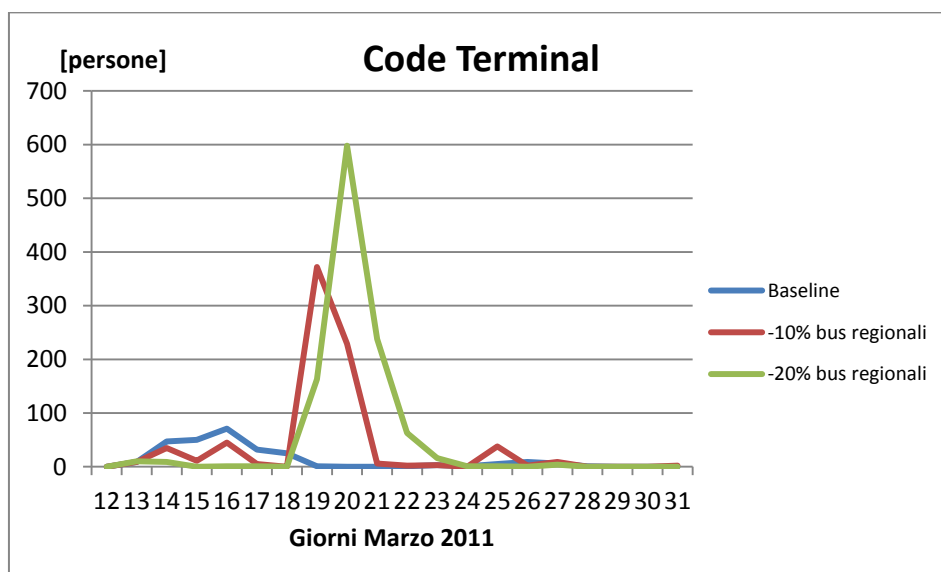


Figura 4.11 - Code complessive nodo terminal a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus regionali disponibili

L'effetto di creazione di un picco nel numero di passeggeri in attesa nel terminal si amplifica nel caso di una riduzione della disponibilità di risorse del 20% anche se il picco si presenta con un ritardo temporale di un giorno rispetto al caso precedente (Figura 4.11). Questi risultati sono particolarmente interessanti in quanto consentono di mettere in luce come l'insorgere di una criticità di entità relativamente modesta su uno dei nodi, possa avere ripercussioni severe su altre

porzioni del sistema. È questo un chiaro esempio dell'impatto delle interdipendenze tra diverse infrastrutture di trasporto sulle performance complessive del sistema. La propagazione della criticità sui nodi di generazione della domanda non si limita tra l'altro al terminal di *Yamagata*, ma coinvolge anche il nodo stazione, con un innalzamento dell'indicatore di vulnerabilità di trasporto limitato al giorno 19 Marzo, nel caso di una riduzione del 10% delle risorse, ed esteso anche al giorno 20 Marzo nel caso di riduzione del 20% di tali risorse.

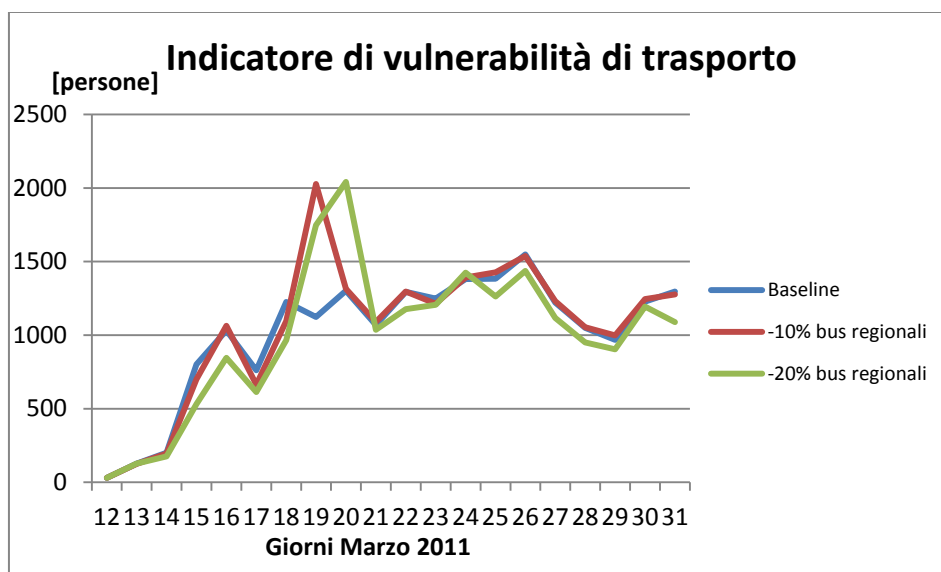


Figura 4.12 – Andamento indicatore vulnerabilità di trasporto a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus regionali disponibili

Notiamo inoltre (Figura 4.10) come una diminuzione del 20% nella disponibilità di bus regionali induca significativi aumenti nelle code delle stazioni di *Sendai*, *Sakata-Tsuruoka* e *Niigata* nei giorni dal 21 al 31 Marzo, senza però ripercussioni ulteriori sugli altri nodi del sistema.

L'impatto sulle performance corrispondente ad un aumento del 10% e 20% nella disponibilità delle risorse è riportato in Figura 4.13. Come era lecito aspettarsi, una maggiore disponibilità di risorse sulle tratte di trasporto regionale induce un miglioramento delle prestazioni complessive del sistema, in particolare a motivo della diminuzione dei valori delle code presso le stazioni di generazione della domanda (Figura 4.14) e grazie alla diminuzione dei relativi tempi di attesa in coda.

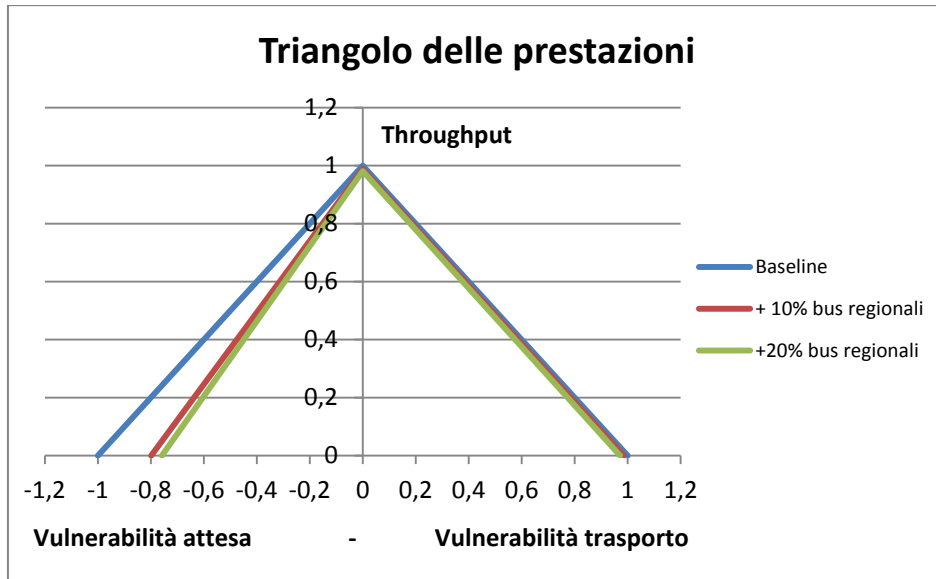


Figura 4.13 – Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di un aumento del numero massimo di bus regionali disponibili

Da notare come un aumento delle risorse del 10% influenzi positivamente le prestazioni in misura molto maggiore di quanto una diminuzione di identica entità le influenzi negativamente.

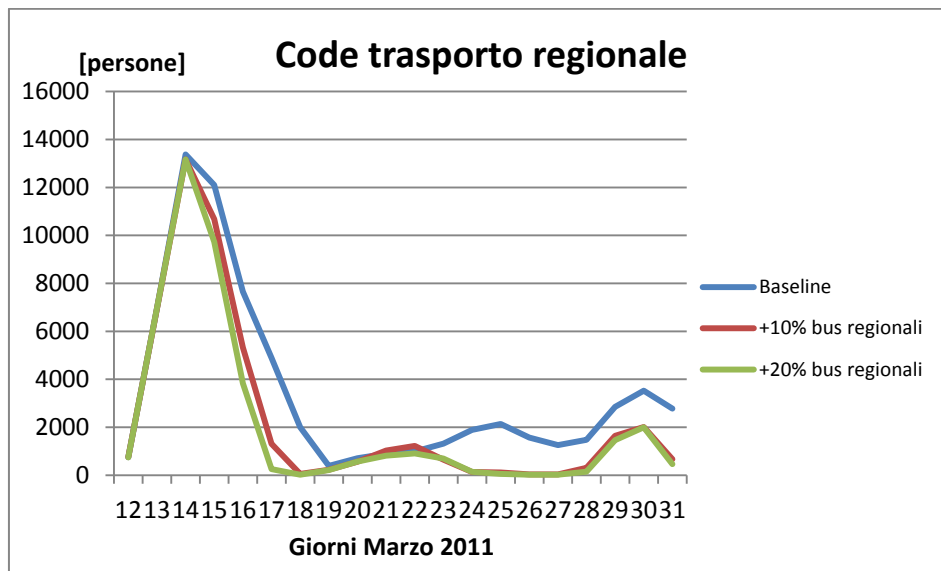


Figura 4.14 - Code complessive nodi di trasporto regionale a fronte di un aumento del numero massimo di bus regionali disponibili

È interessante però rilevare che l'incremento del flusso di utenti serviti generato da una maggiore potenzialità di trasporto sulle tratte di trasferimento regionale,

se non accompagnato da un'adeguata compensazione della potenzialità di trasporto aereo, induce un aggravio nel numero di passeggeri in coda presso il terminal, come mostrato da Figura 4.15, confermando come per un sistema di trasporto caratterizzato da un grado di interdipendenza tanto marcato non sia auspicabile una gestione che procede attraverso ottimizzazioni locali governate dalle singole organizzazioni responsabili della erogazione e dei diversi servizi di trasporto. Coordinamento e collaborazione tra attori sono dunque un ingrediente indispensabile per la resilienza anche in condizioni di relativa "abbondanza" di risorse.

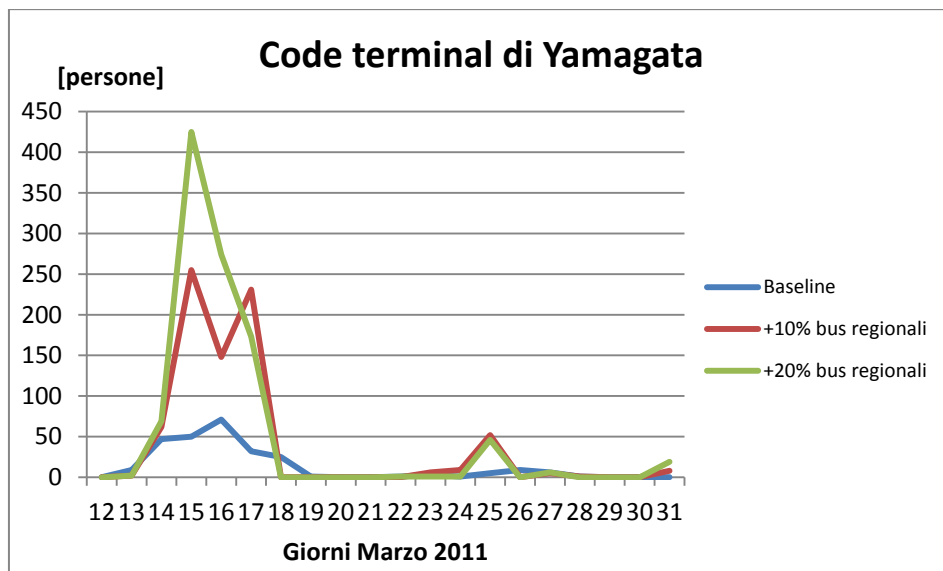


Figura 4.15 - Code complessive nodo terminal a fronte di un aumento del numero massimo di bus regionali disponibili

La seconda tipologia di analisi condotta ha riguardato la valutazione dell'impatto sulle performance dell'utilizzo di automezzi a più alta capacità. In particolare si è ipotizzato che i tradizionali bus a 52 posti utilizzati dalle compagnie di trasporto nipponico, siano sostituiti da veicoli a due piani da 78 sedute, mantenendo inalterato il numero di mezzi disponibili all'interno della giornata.

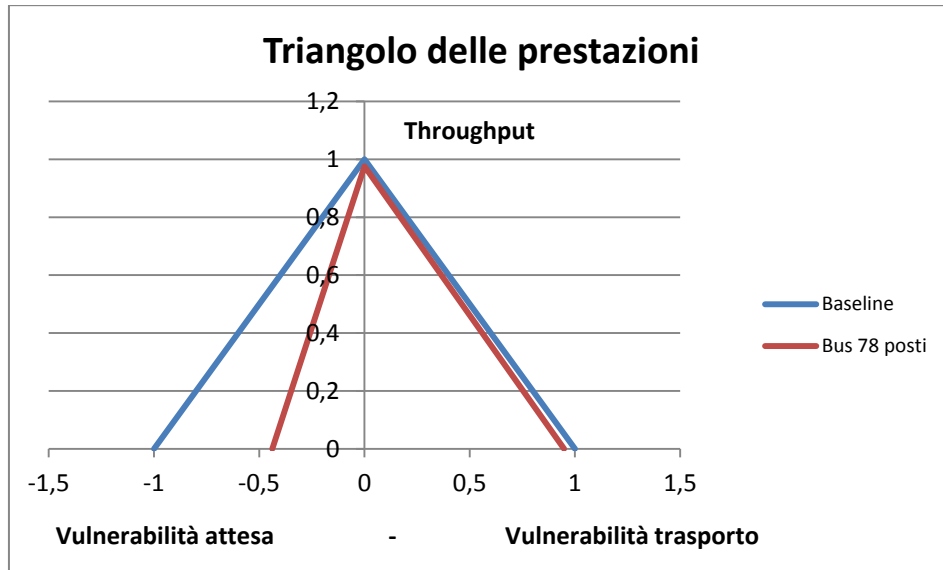


Figura 4.16 – Diagramma delle prestazioni complessive con utilizzo di bus regionali da 78 posti

Gli effetti (Figura 4.16) sulle performance sono simili a quelli riscontrati nel caso di un aumento del numero massimo di mezzi disponibili, con l'importante differenza che in questo caso si ha un abbattimento rilevante del picco massimo dell'indicatore di vulnerabilità dell'attesa (Figura 4.17), nonché del suo valore medio, grazie ad una riduzione generalizzata del numero di persone in coda e dei tempi di attesa.

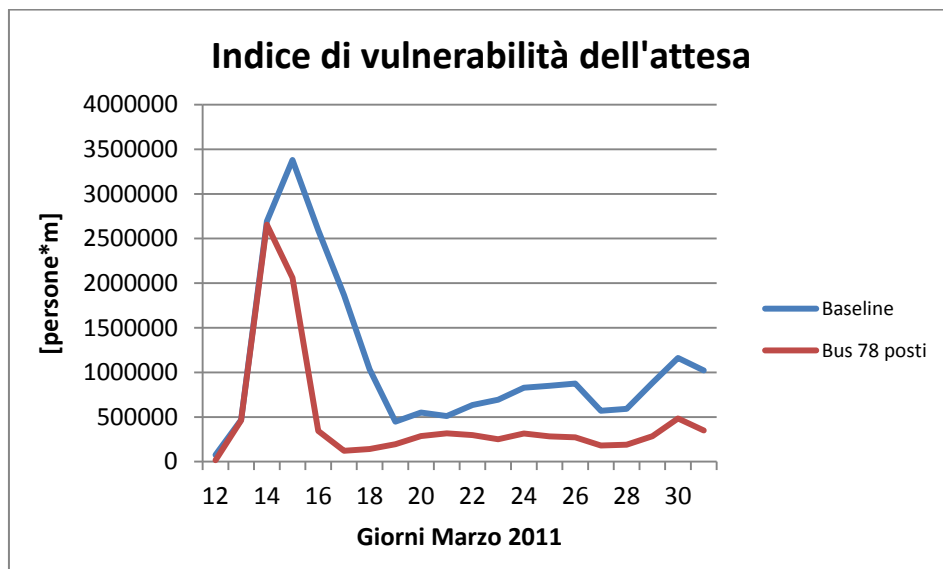


Figura 4.17 - Indice globale di vulnerabilità dell'attesa con utilizzo di bus regionali da 78 posti

Anche in questo caso però, l'asincronia introdotta tra le potenzialità dei nodi di trasporto a monte del sistema e l'aeroporto comporta l'aumento del picco di utenti in coda all'interno del terminal a fine giornata (Figura 4.18).

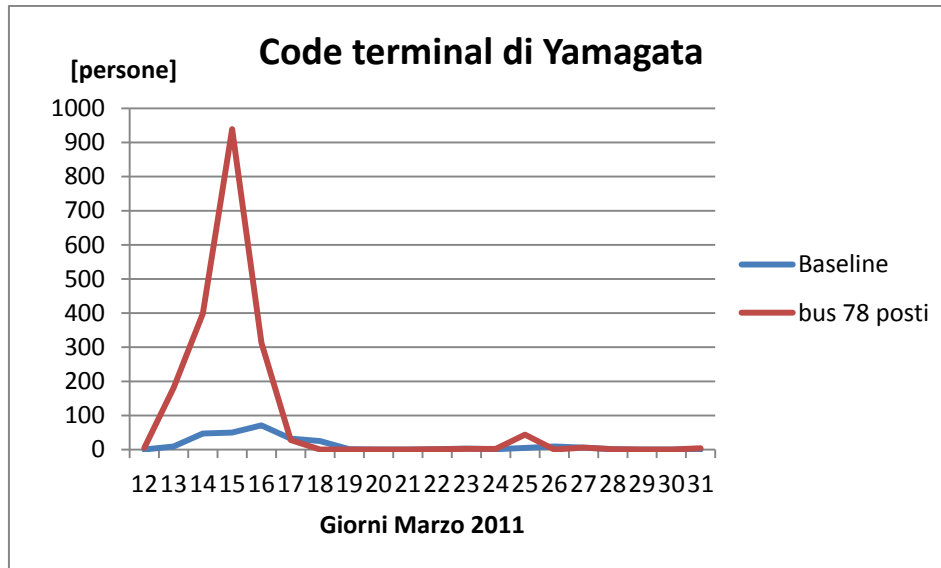


Figura 4.18 - Code complessive nodo terminal con utilizzo di bus regionali da 78 posti

In Figura 4.19, Figura 4.20 e Figura 4.21 si presentano sinteticamente i risultati delle analisi condotte rappresentando in modo sinottico le variazioni riscontrate nelle principali grandezze di interesse del sistema a fronte delle variazioni imposte alla dotazione di risorse di trasporto regionale. Per consentire la leggibilità dei grafici si è scelto di presentare separatamente il comportamento delle code presso il terminal, che presentano fluttuazioni percentuali molto maggiori rispetto alle altre grandezze.

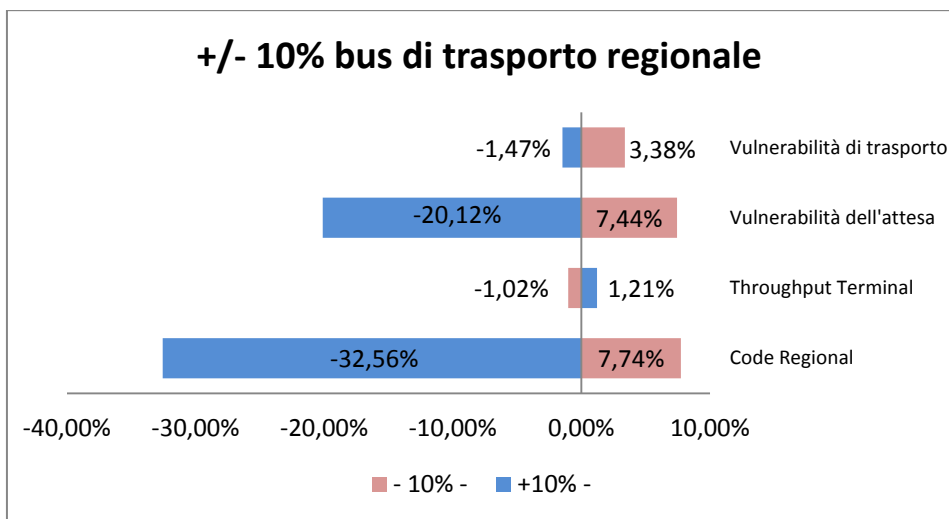


Figura 4.19 – Quadro sinottico della variazione di prestazioni con +/- 10% di disponibilità risorse di trasporto regionale terrestre

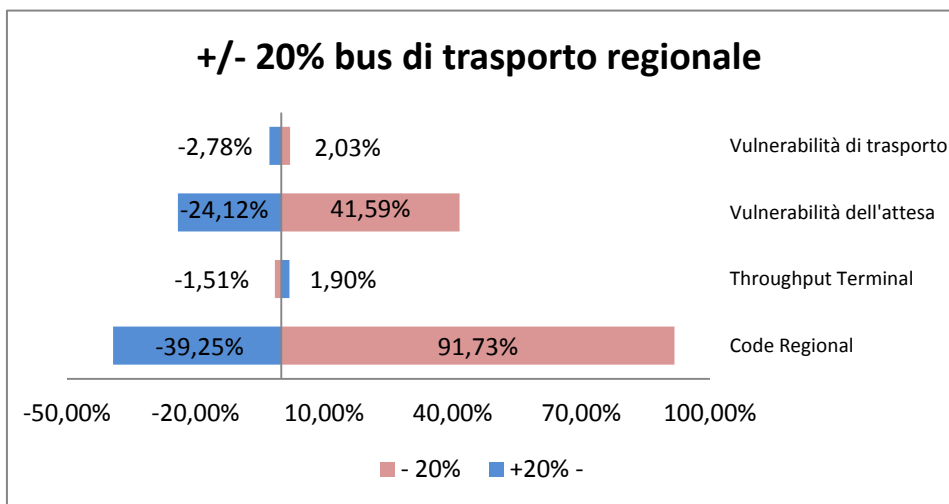


Figura 4.20 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con +/-20% di disponibilità risorse di trasporto regionale terrestre

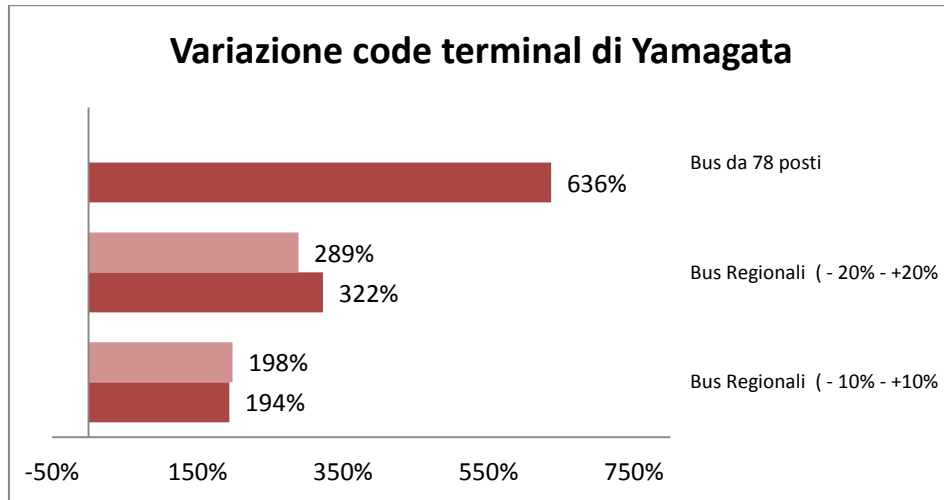


Figura 4.21 – Variazione code a fine giornata presso terminal di Yamagata con delta +/- 10%, +/- 20% sulle risorse di trasporto ed incremento della capacità dei bus

4.3.2 Collegamento stazione-aeroporto

Il nodo stazione ferroviaria di *Yamagata* è il principale nodo di partenza dei servizi di trasporto verso il terminal dell'aerostazione di *Yamagata* per tutti i passeggeri provenienti dalle tre località di *Sendai*, *Sakata-Tsuruoka* e *Niigata*. Le risorse presenti sul nodo sono i bus utilizzati per il servizio navetta. Questi appartengono a due categorie: bus di piccole dimensioni da 9 posti e bus da 28 posti. Lo scenario di riferimento prevede che siano disponibili 5 unità della prima tipologia e 6 della seconda, come descritto in 3.3.3.

La prima delle analisi condotte sul nodo stazione è stata quindi relativa ad una variazione nel numero massimo disponibile di tali mezzi. Si è ritenuto ragionevole considerare in prima analisi un delta di +/-1, +/-2 e +/-3 sul numero massimo di entrambe le tipologie di mezzo di trasporto. Si noti che tale variazione non necessariamente si ripercuote linearmente sul numero di viaggi giornalieri effettuati, i quali dipendono anche dai tempi di andata-ritorno dei mezzi disponibili. In Figura 4.22 e Figura 4.23 sono riportati i risultati delle simulazioni condotte.

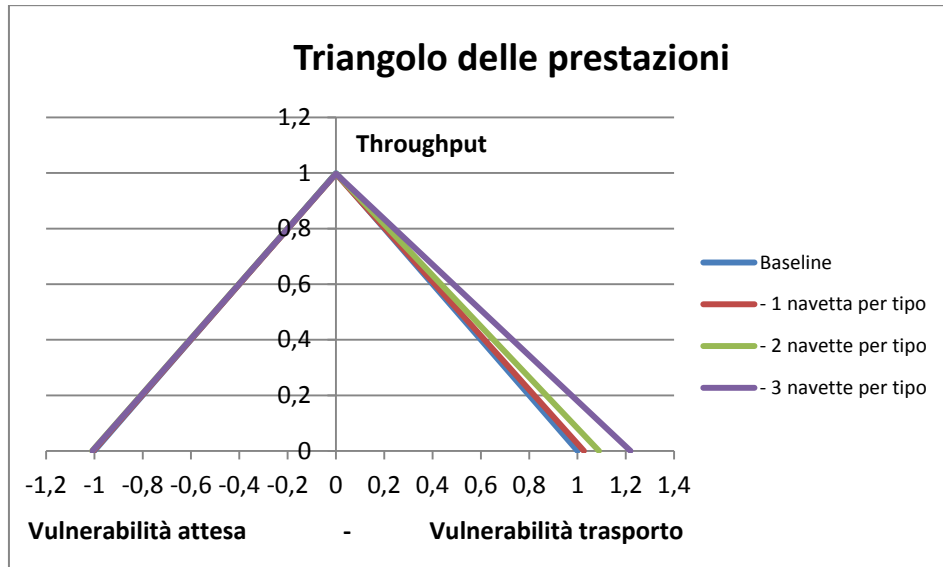


Figura 4.22 - Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus navetta disponibili

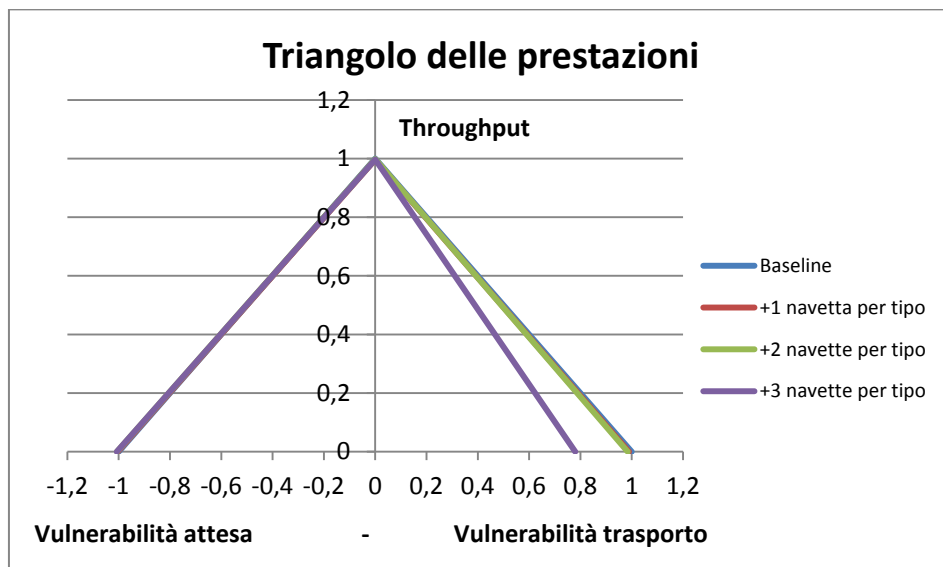


Figura 4.23 - Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di un aumento del numero massimo di bus navetta disponibili

Ciò che risulta immediatamente evidente è una scarsa sensibilità delle performance complessive rispetto ad una variazione nel livello massimo di disponibilità dei mezzo navetta, con l'eccezione dell'indice di vulnerabilità di trasporto, che ha un incremento rilevante nel caso si riduca di 6 unità (3 per ciascuna tipologia) il numero massimo di navette disponibili, ed una moderata diminuzione nel caso duale di un aggiunta di 3 unità(Figura 4.24).

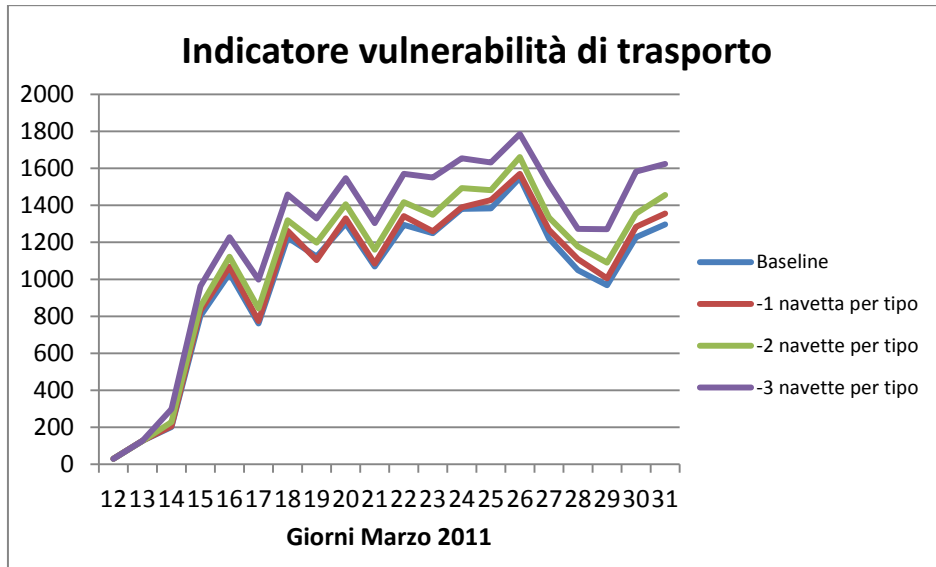


Figura 4.24 – Andamento indicatore vulnerabilità di trasporto a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus navetta disponibili

Le variazioni nell'indicatore vulnerabilità di trasporto sono da imputarsi al fatto che una minore disponibilità delle risorse adibite al servizio navetta comporta una maggiore probabilità che l'utente, al suo arrivo nel nodo stazione, trovi un elevato numero di persone in coda (Figura 4.25), tale da indurlo alla scelta di un mezzo di trasporto alternativo per raggiungere il terminal, coerentemente con il modello comportamentale descritto in 3.3.3.

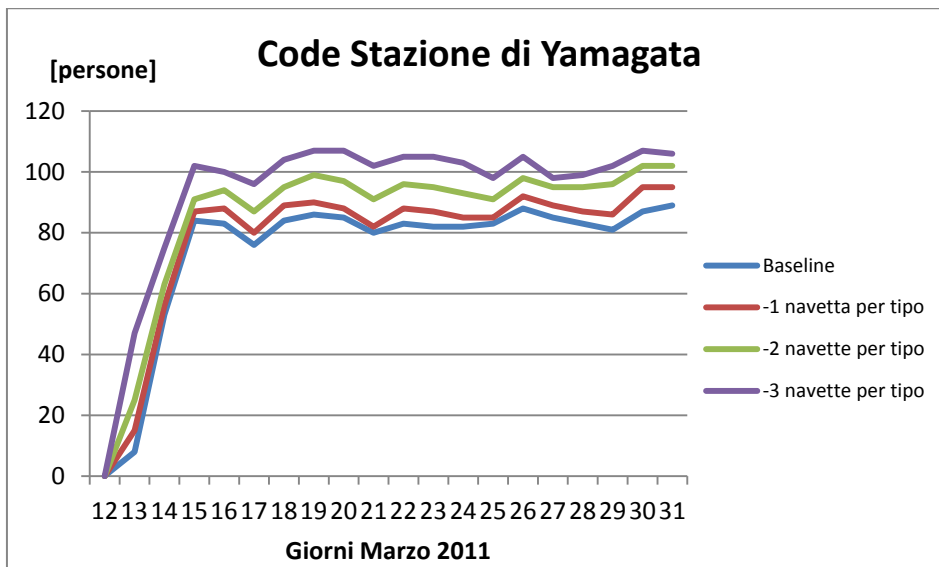


Figura 4.25 - Code complessive nodo stazione a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus navetta disponibili

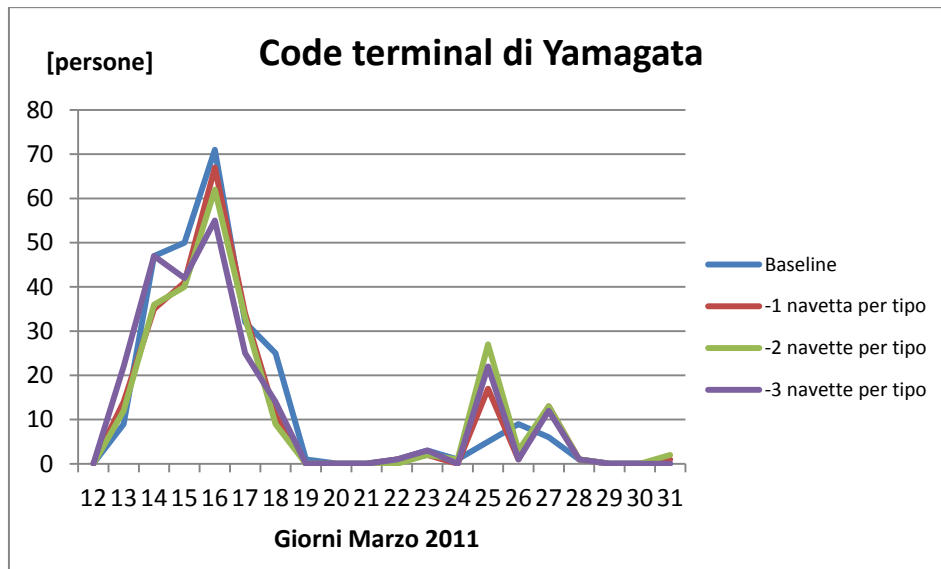


Figura 4.26 - Code complessive nodo terminal a fronte di una diminuzione del numero massimo di bus navetta disponibili

Da ultimo la diminuzione del numero massimo di navette disponibile induce lievi riduzioni sull'entità delle code a fine giornata all'interno del terminal (Figura 4.26).

Un aumento di 1,2 o 3 unità per tipologia di navetta comporta significative variazioni solo per quanto riguarda l'indicatore di vulnerabilità di trasporto. Gli altri indici di performance complessivi del sistema rimangono sostanzialmente invariati, sia in termini medi, come desumibile dal diagramma di Figura 4.23, sia a livello di singola giornata. Il dettaglio dell'andamento di tali KPI può essere consultato in Appendice A.

Si è voluto in ogni caso valutare se un incremento significativo della dotazione di navette comportasse una variazione rilevante delle prestazioni del sistema. Si sono quindi condotte simulazioni corrispondenti ad un incremento nel numero di shuttle e bus navetta pari a +5 e +10 unità per ciascuna tipologia. I risultati dimostrano che tale eventuale ulteriore disponibilità di risorse nel sistema non comporterebbe alcun beneficio ulteriore in termini di riduzione della vulnerabilità nel trasporto (Figura 4.30). Anche le variazioni riscontrate negli altri parametri di prestazione risultano modeste (Figura 4.27), dovute principalmente a lievi riduzioni delle code sul nodo terminal (Figura 4.29) e sul nodo stazione (Figura 4.28).

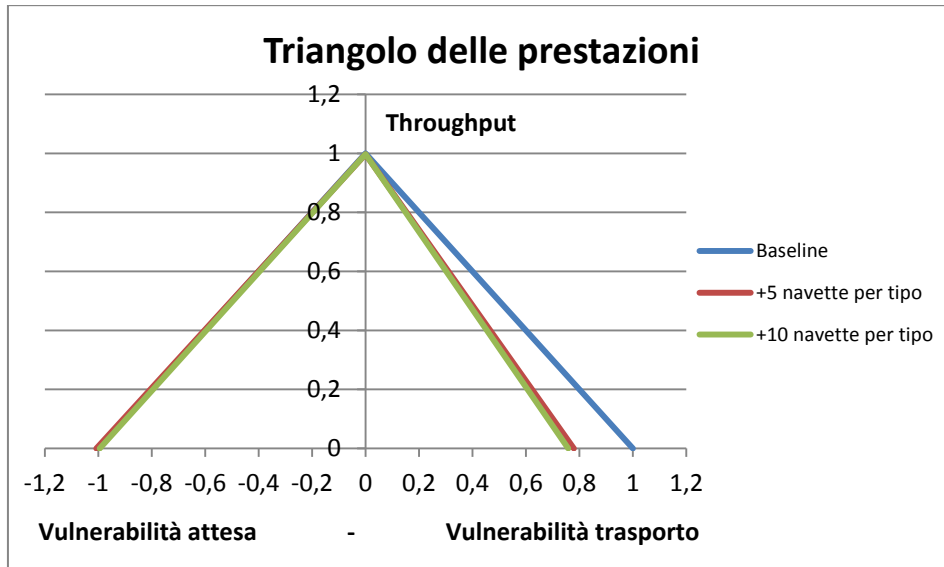


Figura 4.27 - Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di un aumento del numero massimo di bus regionali disponibili

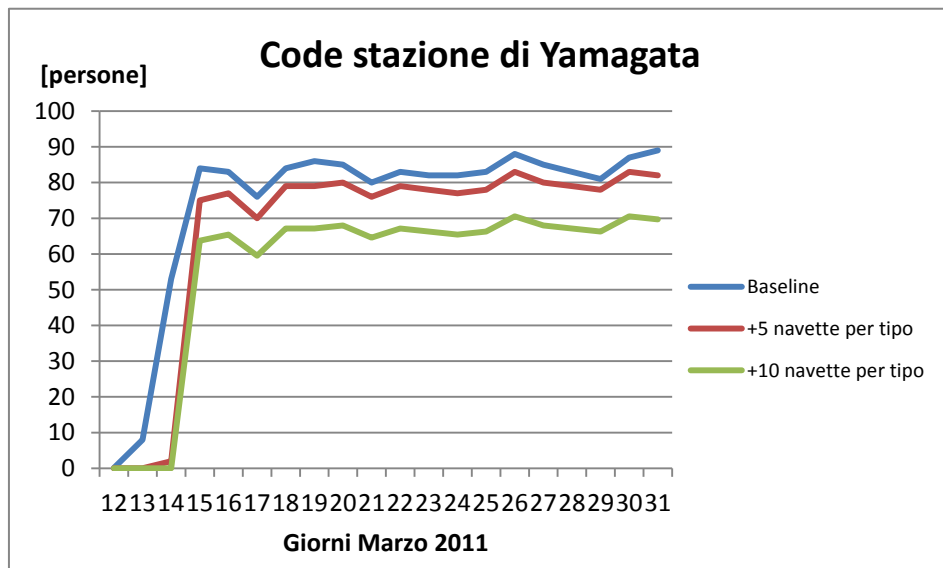


Figura 4.28 - Code complessive nodo stazione a fronte di un aumento del numero massimo di bus navetta disponibili

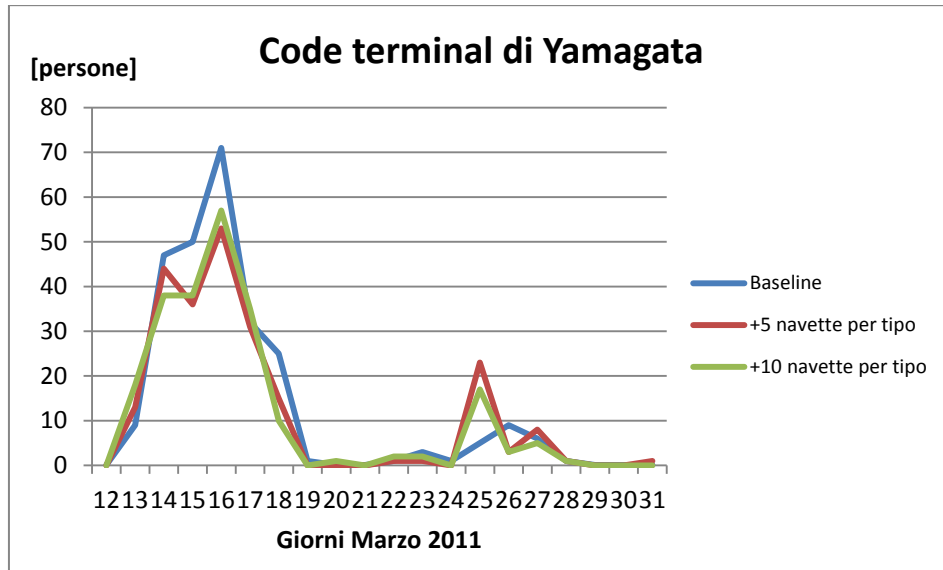


Figura 4.29 - Code complessive nodo terminal a fronte di un aumento del numero massimo di bus navetta disponibili

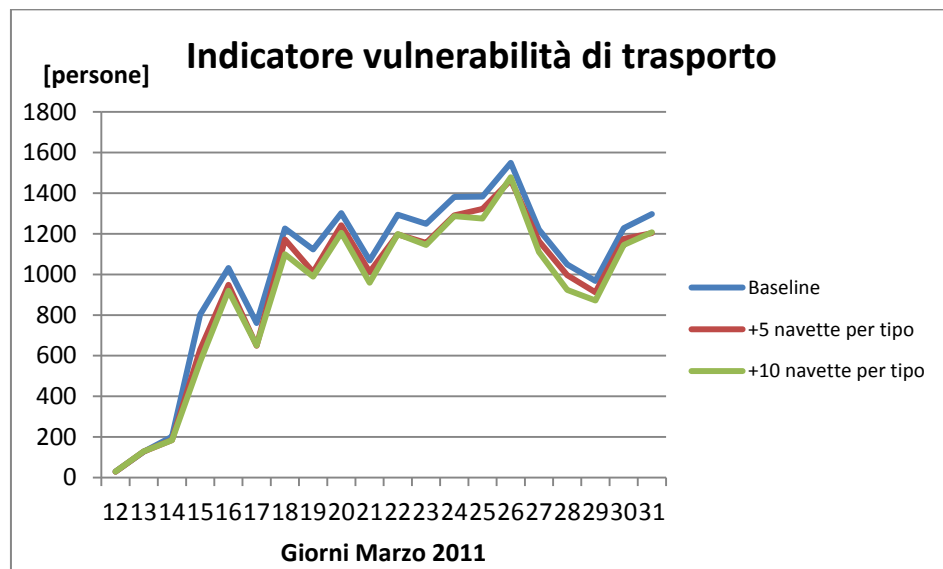


Figura 4.30 - Andamento indicatore vulnerabilità di trasporto a fronte di un aumento del numero massimo di bus navetta disponibili

Il tratto di strada compreso tra la stazione di *Yamagata* e l'aeroporto è l'unico a prevedere una possibile alternativa e scelta da parte dell'utenza del mezzo di trasporto. E' per questo il punto che determina maggiormente la variazione dell'indicatore di vulnerabilità di trasporto. Nel modello elaborato, come mostrato in 3.3.3, la scelta dei passeggeri di utilizzare mezzi di trasporto pubblico piuttosto che mezzi alternativi quali taxi e vetture a noleggio, dipende,

come più volte ripetuto, dalla dimensione della coda che l'utente riscontra all'arrivo alla stazione ferroviaria. In questo modo si è voluto rappresentare la dinamica secondo la quale un passeggero eviterà di scegliere un mezzo di trasporto pubblico se l'attesa per accedervi è troppo elevata. Per fare ciò si è impostata una soglia massima di coda tollerata dal passeggero, con valore di *baseline* fissato in 200 persone; oltre tale soglia l'utente sarà portato a scegliere un mezzo di trasporto alternativo, di cui si ipotizza la disponibilità illimitata (si è già discusso in 3.3.3 delle ragioni per le quali si ritengono queste approssimazioni accettabili). Dunque l'obiettivo della seconda analisi condotta sul nodo stazione ferroviaria è quello di valutare la sensitività del sistema ad una variazione della soglia di tollerabilità della coda da parte dei passeggeri. L'incremento di tale soglia di tolleranza può intendersi come conseguenza di una migliorata capacità da parte di chi gestisce il sistema di trasporto di condizionare le scelte degli utenti, attraverso ad esempio una diversa strategia informativa e di comunicazione. Si riportano di seguito i risultati dell'analisi (Figura 4.31).

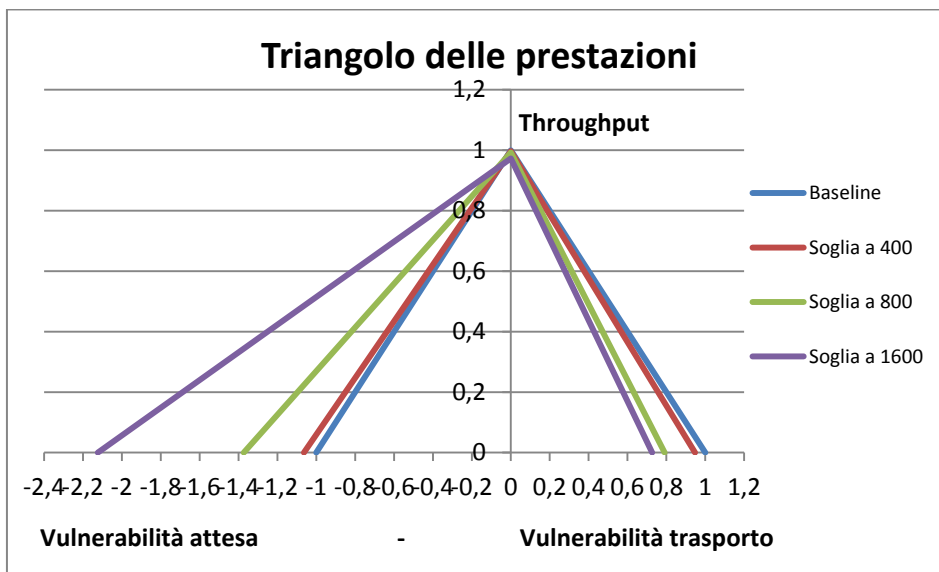


Figura 4.31 - Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di un aumento della soglia di tolleranza nella scelta del mezzo da parte del passeggero

Notiamo come vi sia un evidente trade-off tra la diminuzione della vulnerabilità di trasporto (Figura 4.32) dovuta al maggior numero di persone che utilizzano trasporti alternativi e l'aumento della vulnerabilità dell'attesa (Figura 4.33) causata dalle maggiori code sul nodo stazione e sul nodo terminal.

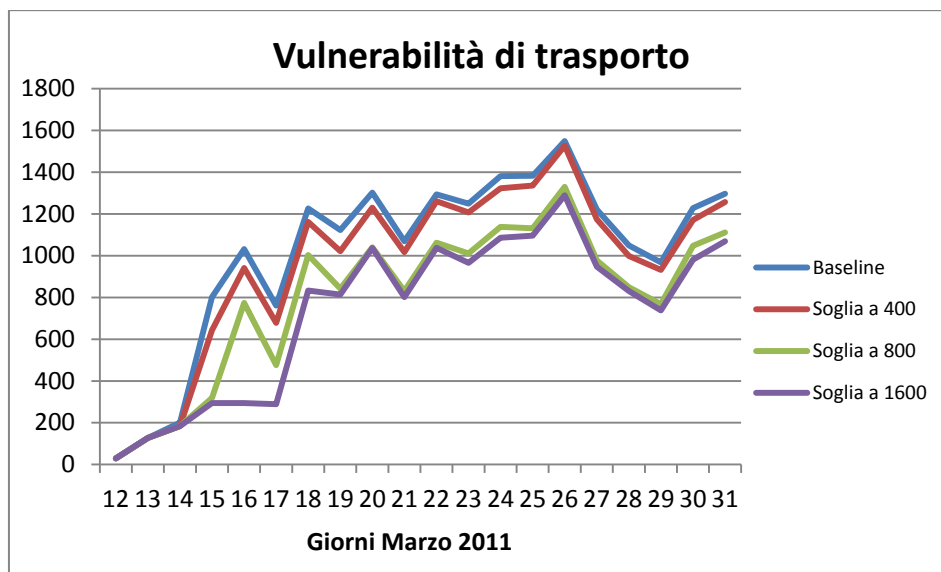


Figura 4.32 - Indice globale di vulnerabilità di trasporto a fronte di un aumento della soglia di tolleranza nella scelta del mezzo da parte del passeggero

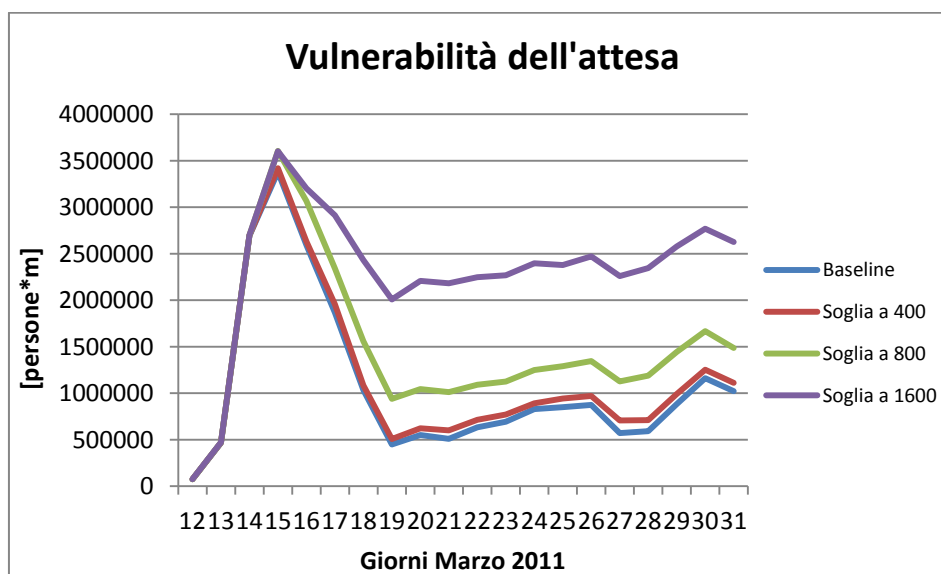


Figura 4.33 - Indice globale di vulnerabilità dell'attesa a fronte di un aumento della soglia di tolleranza nella scelta del mezzo da parte del passeggero

È altrettanto evidente come una soglia di tolleranza di 400 o 800 persone comporti un rapporto benefici/svantaggi ragionevole, con svantaggi che potrebbero essere facilmente eliminati se si accompagnasse l'innalzamento della soglia di tolleranza con un opportuno incremento delle risorse dei mezzi navetta. Innalzare invece la soglia in modo eccessivo, come nel caso in cui sia fissata a 1600, non reca un miglioramento dell'indicatore di vulnerabilità di trasporto che

giustificati i forti incrementi nelle code presso stazione (Figura 4.34) e terminal (Figura 4.35).

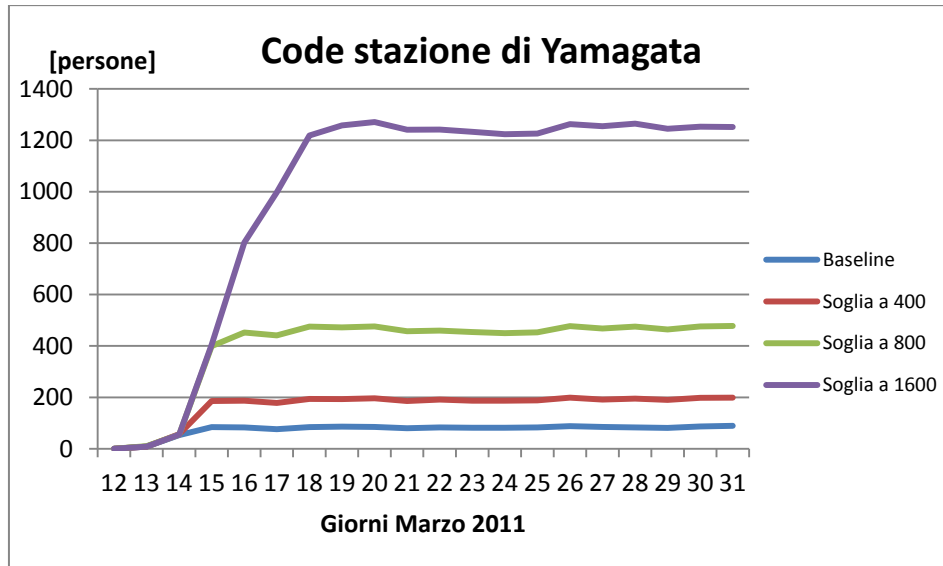


Figura 4.34 - Code complessive nodo stazione a fronte di un aumento della soglia di tolleranza nella scelta del mezzo da parte del passeggero

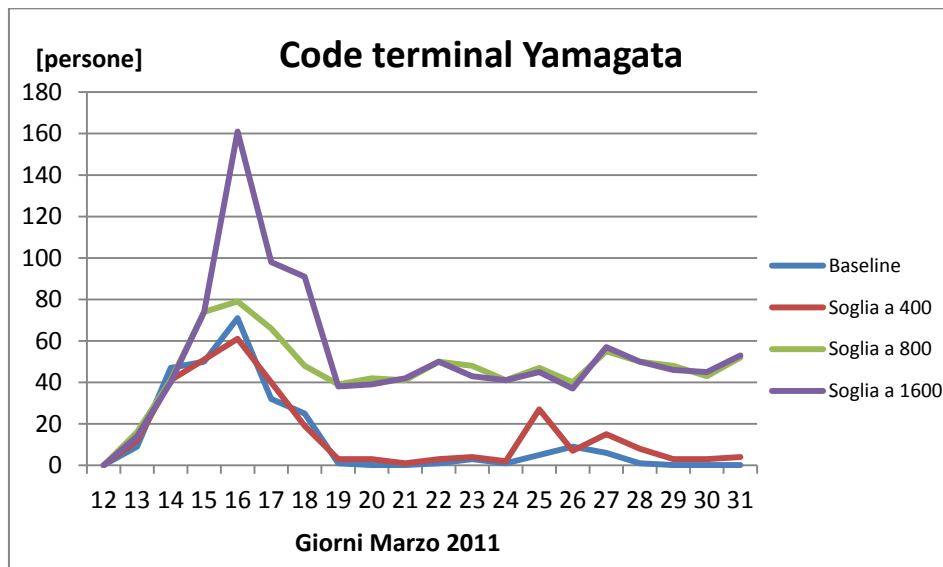


Figura 4.35 - Code complessive nodo terminal a fronte di un aumento della soglia di tolleranza nella scelta del mezzo da parte del passeggero

Per concludere la panoramica delle analisi di sensitività sul nodo stazione presentiamo i grafici riassuntivi di Figura 4.36, Figura 4.37, Figura 4.38, Figura

4.39 e Figura 4.40. In questo caso si è scelto di isolare il grafico delle variazioni delle code nel nodo station (Figura 4.41) per consentirne la leggibilità.

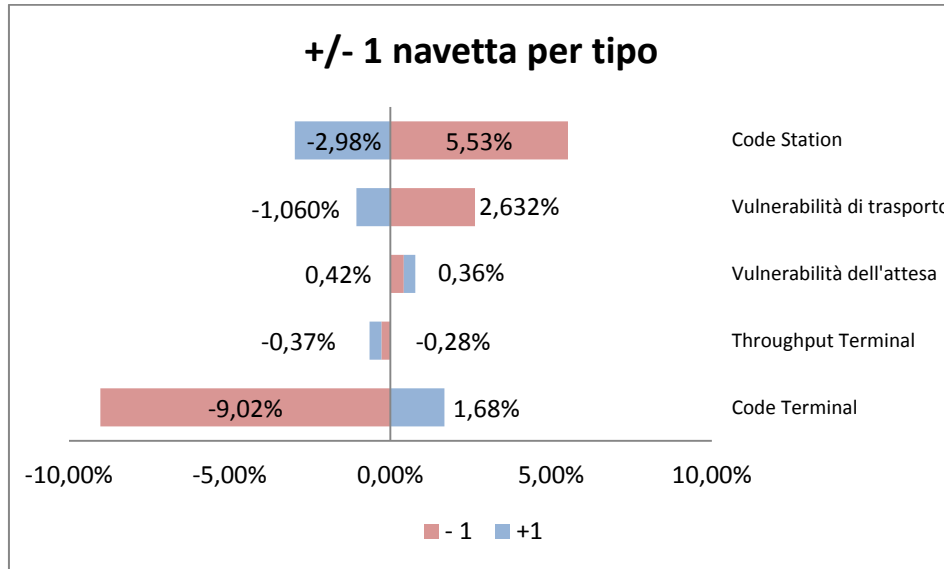


Figura 4.36 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con variazioni del numero massimo di ciascun tipo di navetta di +/- 1

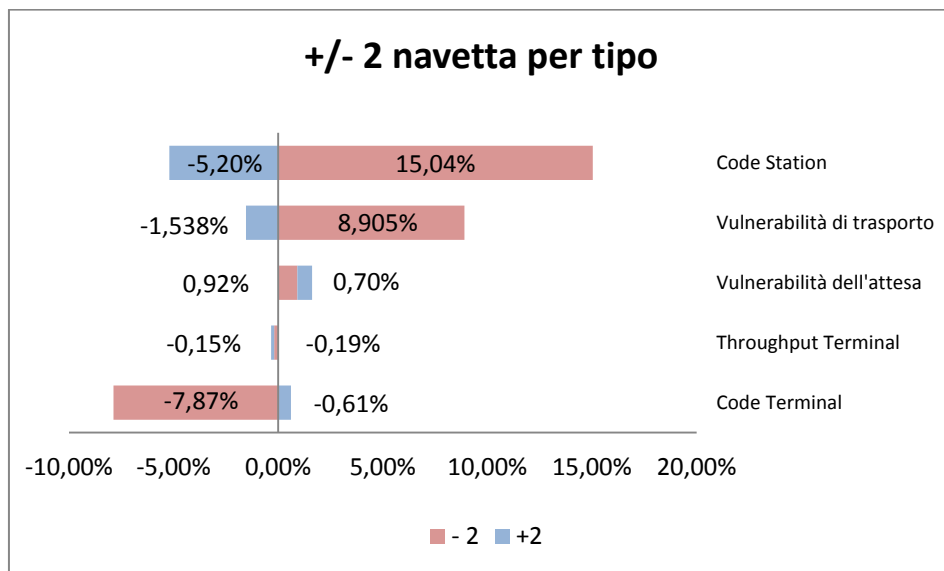


Figura 4.37 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con variazioni del numero massimo di ciascun tipo di navetta di +/- 2

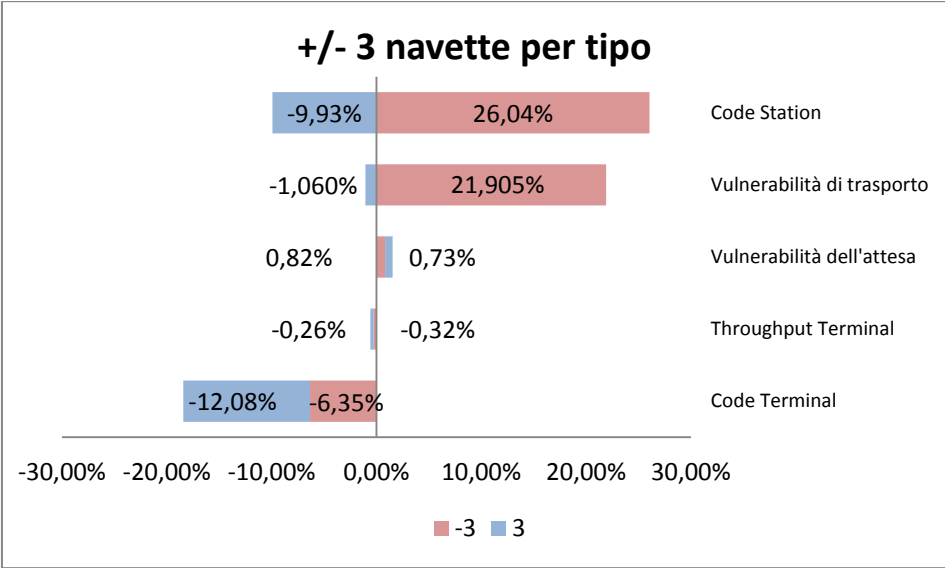


Figura 4.38 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con variazioni del numero massimo di ciascun tipo di navetta di +/- 3

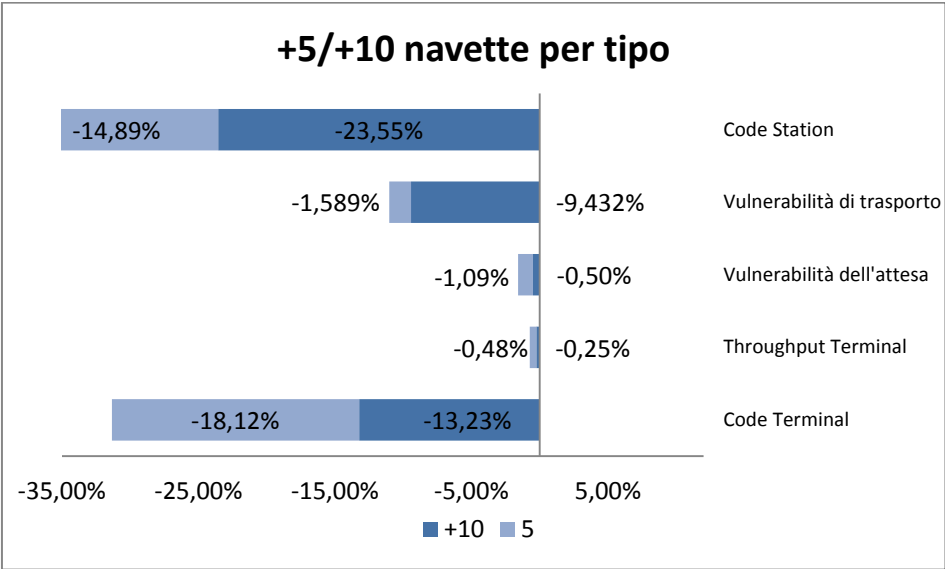


Figura 4.39 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con variazioni del numero massimo di ciascun tipo di navetta di +5 e +10

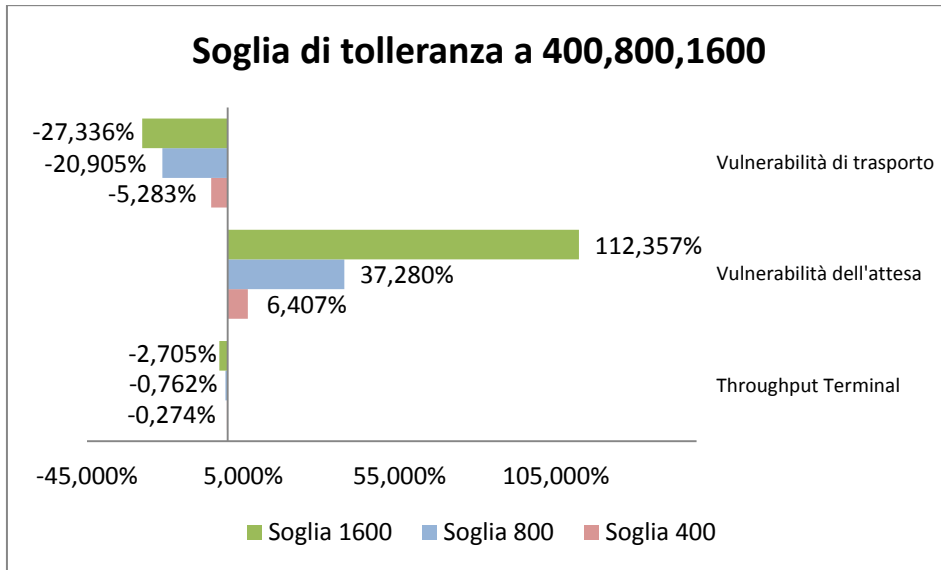


Figura 4.40 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con soglia di tolleranza della coda da parte dell'utente di 400, 800 e 1600 persone

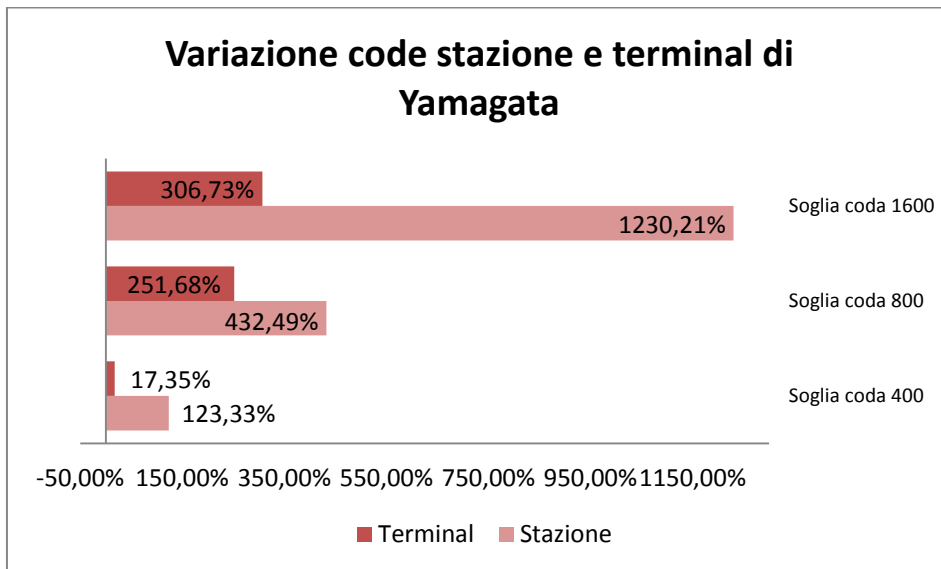


Figura 4.41 - Variazione code presso la stazione e il terminal di Yamagata con soglia di tolleranza della coda da parte dell'utente di 400, 800 e 1600 persone

4.3.3 Aeroporto e risorse di trasporto aereo

L'ultimo nodo del sistema di trasporto modellato, l'aeroporto di *Yamagata*, è senza dubbio quello caratterizzato dalla maggiore numerosità di risorse impiegate, siano esse funzionali allo svolgimento delle procedure di gestione dei passeggeri all'interno del terminal o si tratti piuttosto delle risorse destinate alle operazioni di scalo indispensabili per i velivoli, fino al numero di velivoli stessi.

La prima analisi condotta è stata relativa alle risorse utilizzate per le operazioni di check-in dei passeggeri. Queste consistono nel personale di terra delle compagnie aeree assegnato alla registrazione dei passeggeri sui rispettivi voli. La situazione di riferimento prevede che vi siano 10 persone adibite a questo compito e che ogni passeggero necessiti di una di esse per completare le operazioni di registrazione ed eventuale imbarco del proprio bagaglio in stiva. Nell'analisi si sono considerati riduzioni ed incrementi delle risorse appena descritte pari a 2, 3 e 5 unità FTE (Full Time Equivalent).

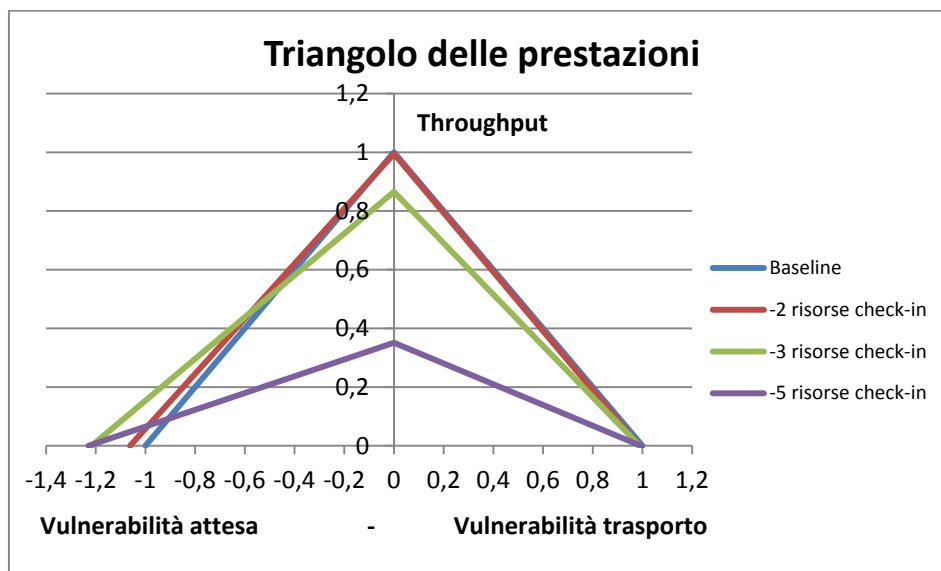


Figura 4.42 - Diagramma delle prestazioni complessive a fronte di una diminuzione delle risorse addette al check-in

La riduzione di personale disponibile induce due effetti evidenti: una drastica riduzione del *throughput* (Figura 4.44), nel caso in cui vi sia un decremento superiore alle 2 unità nelle attività di check-in, e un incremento dell'indicatore di vulnerabilità di attesa causato dal maggiore tempo di attesa degli utenti del terminal nelle giornate dal 27 al 31 Marzo, come si può verificare dal grafico di Figura 4.43.

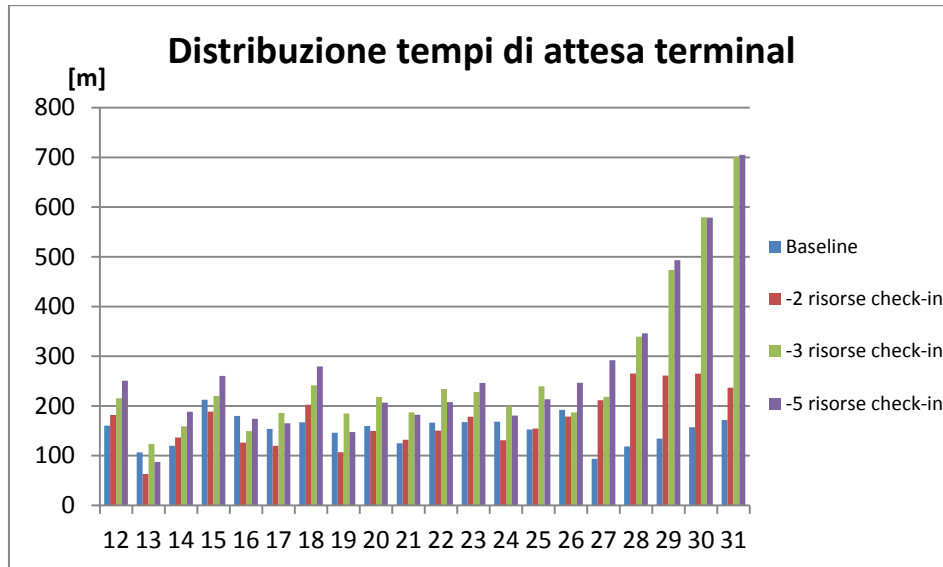


Figura 4.43 - Distribuzione nelle 20 giornate considerate del tempo di attesa medio dei passeggeri che usufruiscono del servizio di trasporto aereo a fronte di una diminuzione delle risorse addette al check-in

In Figura 4.45, dove sono riportate le code a fine giornata nel terminal, si nota un aumento significativo del numero di persone che pernottano presso l'aerostazione, in particolar modo nelle giornate dal 27 al 31 Marzo 2011. La risorsa risulta quindi estremamente critica per le performance dell'intero sistema e non solo del nodo terminal.

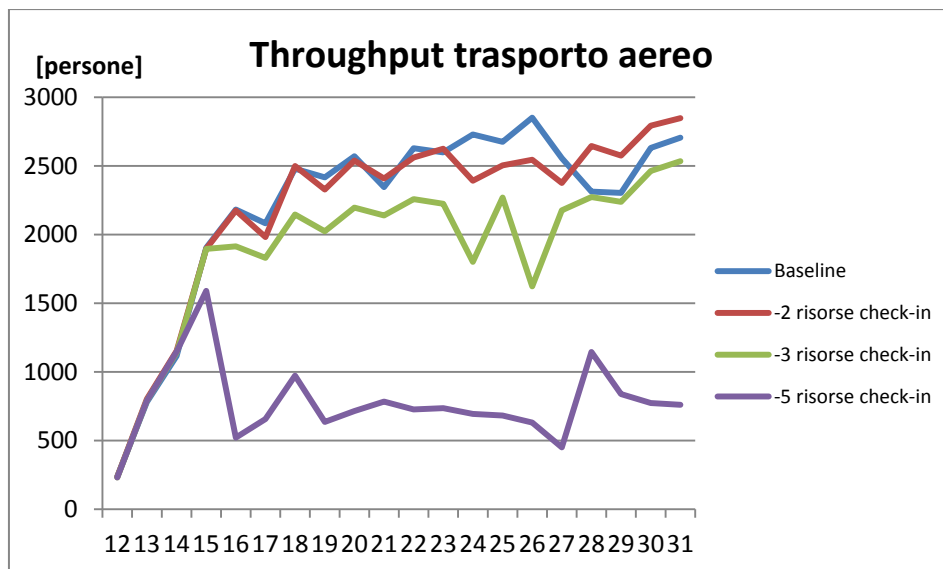


Figura 4.44 – Passeggeri partiti da terminal di Yamagata a fronte di una diminuzione delle risorse addette al check-in

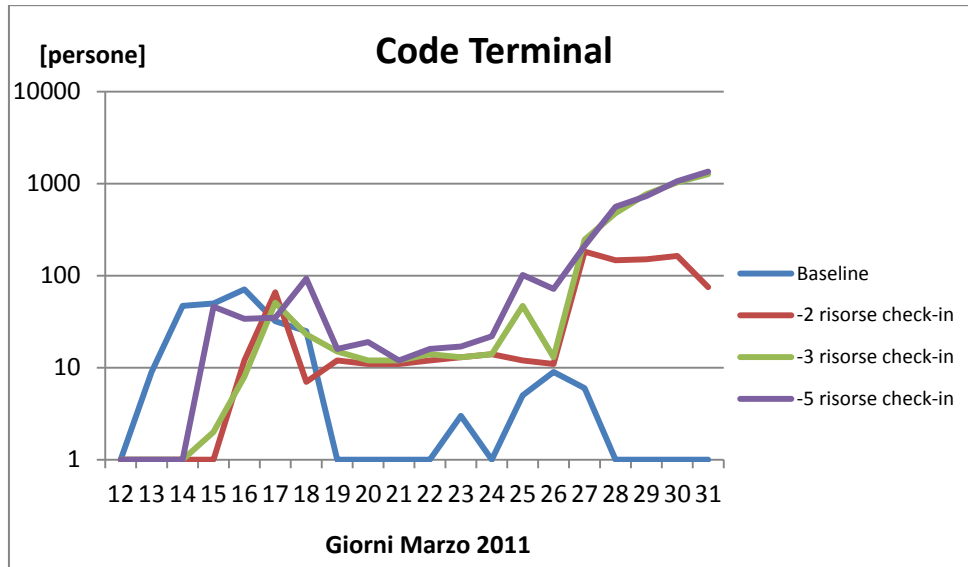


Figura 4.45 - Code complessive nodo terminal a fronte di una diminuzione delle risorse addette al check-in

Si riportano anche i risultati per quanto riguarda un incremento nelle risorse destinate al check-in di 2, 3 e 5 unità (FTE). È immediato rilevare come tali incrementi non condizionino in modo rilevante le prestazioni del sistema (Figura 4.46).

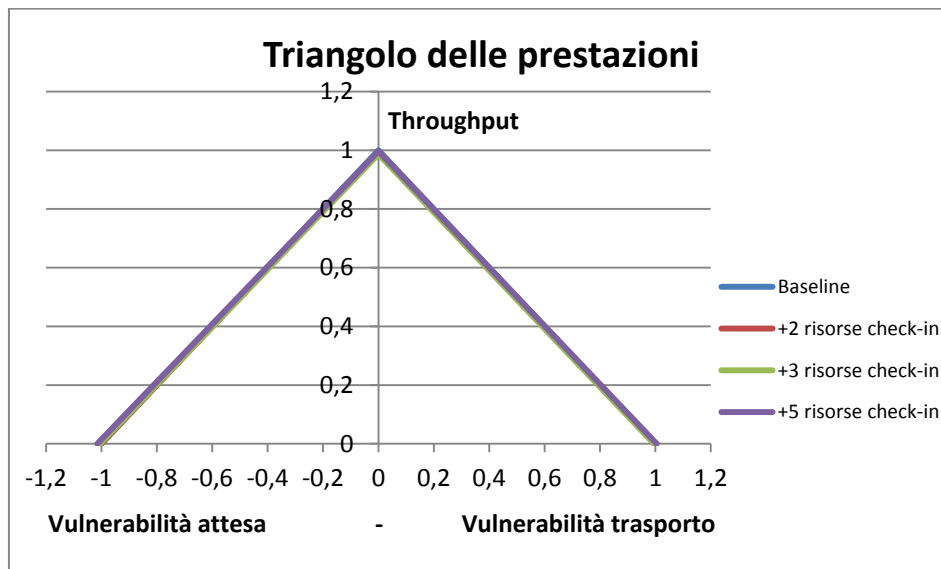


Figura 4.46 - Diagramma delle prestazioni globali a fronte di un aumento delle risorse per il check-in

Questa scarsa incidenza sulle prestazioni complessive è la stessa che caratterizza un aumento delle risorse addette alle operazioni di scalo per i velivoli, ovvero

l'autocisterna per il *refueling*, quella utilizzata per il *rewatering*, i mezzi di trasporto bagagli, il team addetto alla pulizia della cabina e l'automezzo utilizzato per il trasporto delle vivande. La situazione di riferimento (storica reale), descritta in 3.3.5, comporta una sola risorsa disponibile per ciascuna delle tipologie elencate (che in seguito denomineremo come “risorse Apron”), coerentemente con le informazioni fornite dal YAO¹⁴. È stato quindi possibile eseguire analisi di sensitività esclusivamente relative ad un incremento di tali risorse, in quanto un'eventuale riduzione di esse porterebbe all'impossibilità di processare i voli, con conseguente blocco totale del servizio di trasporto. Ad ogni modo, come accennato, una maggiore disponibilità di *risorse Apron* non comporta variazioni rilevanti delle prestazioni, come mostrato da Figura 4.47.

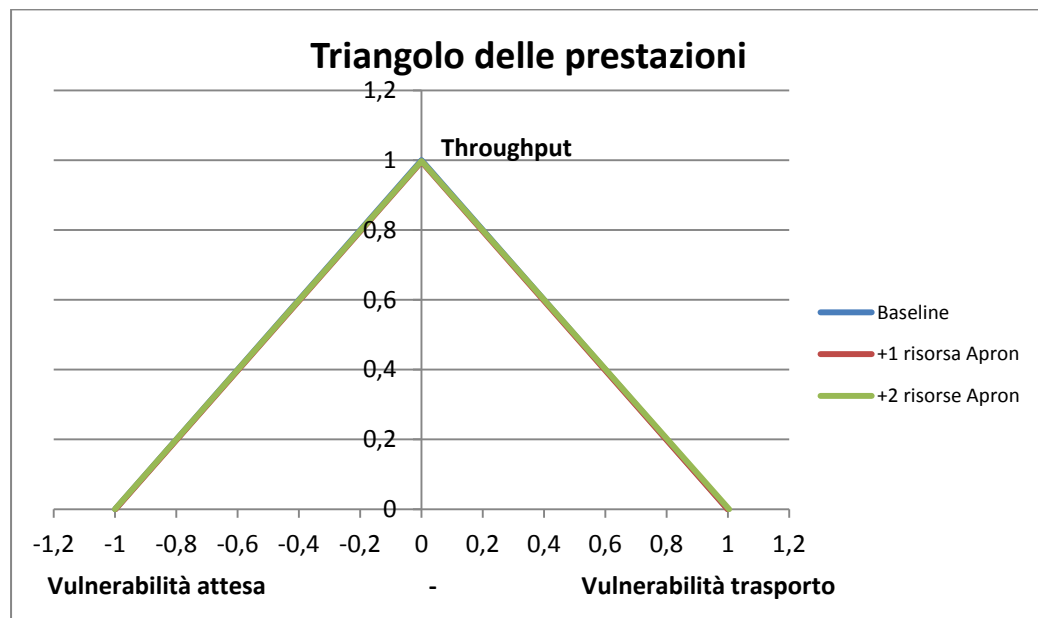


Figura 4.47 - Diagramma delle prestazioni globali a fronte di un aumento delle risorse addette al setting a terra e alla manutenzione ordinaria dei velivoli

L'ultima analisi di sensitività che si è condotta in riferimento al nodo aeroporto di *Yamagata* è stata una valutazione dell'impatto di una maggiore o minore dotazione di una delle tipologie di velivoli considerate nella definizione dello *scheduling* di riferimento, a partire dal mix effettivo descritto in 3.3.5. Si ritiene tale analisi particolarmente importante, in quanto risulta propedeutica ad una caratterizzazione e ottimizzazione, in termini di impatto sulle prestazioni, della

¹⁴ Informazioni fornite da prof. Nobuaki Minato a seguito di suoi colloqui con YAO e YPG nell'Ottobre 2011 presso Yamagata airport.

scelta di una tipologia di aeromobile piuttosto che un'altra in sede di definizione del mix di velivoli da utilizzare per soddisfare la domanda di trasporto aereo.

Lo studio dell'impatto di una maggiore o minore disponibilità di determinate tipologie di velivoli ha richiesto la ridefinizione dello *scheduling* dei voli rispetto alla situazione storica di riferimento. Dal momento che non erano disponibili informazioni accurate circa le procedure usate dalle compagnie aeree per definire la sequenza dei voli e la tipologia di velivoli utilizzati, si è reso necessario ipotizzare un algoritmo per la costruzione del piano giornaliero dei voli (diverso dal giorno precedente per adeguarsi ad una domanda fortemente variabile, per numerosità e destinazioni).

L'algoritmo utilizzato, di cui presentiamo uno schema grafico in Figura 4.48, garantisce il rispetto di tutti i vincoli fisici e logici nell'assegnazione dei velivoli e degli slot di terra ai voli per le diverse destinazioni. La volontà di studiare la sensitività del sistema rispetto ad una variazione nella disponibilità della singola tipologia di velivolo (e non nel numero di voli effettuati), ha indotto a progettare l'algoritmo in modo da tentare di mantenere il numero di voli nella giornata il più possibile identico alla situazione storica di riferimento, presentata in 3.5.

Per la definizione degli orari dei voli si è partiti quindi dall'assunto che, anche in una situazione di emergenza, si sia soggetti alle limitazione poste dagli "slot aerei" attivi, ovvero autorizzazioni rilasciate dall'autorità di controllo del traffico aereo giapponese a percorrere determinate rotte in determinati orari. Si è quindi ritenuto che gli "slot aerei" fossero da considerarsi fissati secondo quanto assegnato dall'autorità competente all'aeroporto di *Yamagata* a seguito del venir meno dell'aeroporto di *Sendai*¹⁵.

¹⁵ Le informazioni relative agli slot aerei assegnati all'aeroporto di *Yamagata* durante i giorni in del Marzo 2011 in cui l'aerostazione di *Sendai* rimase inagibile sono state tratte da ricerche effettuate da studenti giapponesi partecipanti al progetto di ricerca CMAC e possono essere consultate in [76].

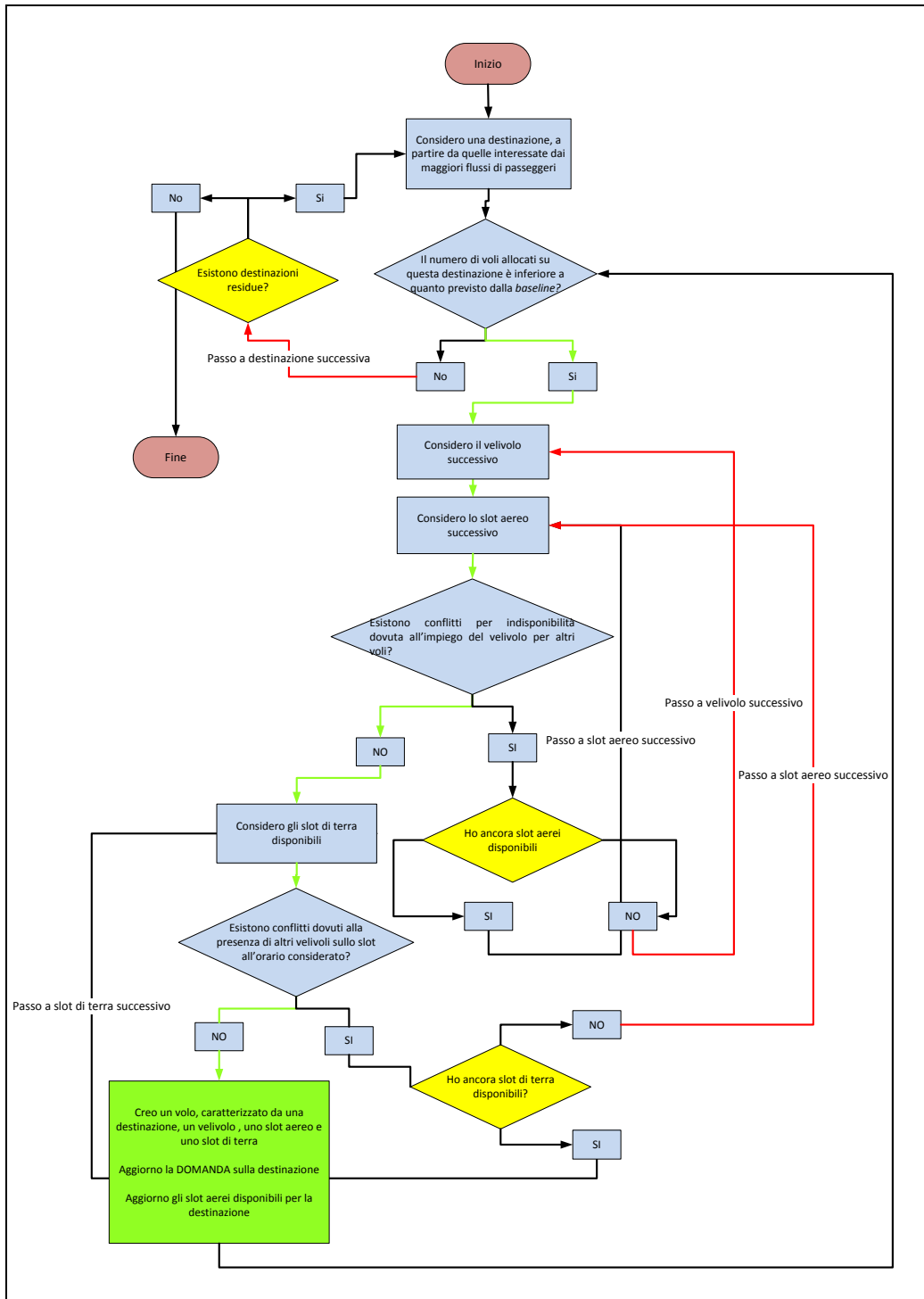


Figura 4.48 –Algoritmo utilizzato per la definizione dello *scheduling* nel caso di variazione nel numero di velivoli disponibili

<i>Slot aerei disponibili per aeroporto di Yamagata</i>				
Destinazione	Tokyo	Osaka	Sapporo	Nagoya
Orario di partenza	06:30	07:35	07:45	07:50
	08:00	07:45	11:45	10:10
	08:40	08:30	13:10	12:35
	08:55	09:15	16:40	20:40
	09:15	10:05	20:00	
	11:10	11:25		
	11:55	12:00		
	12:00	14:30		
	13:20	14:45		
	14:00	15:55		
	14:10	16:25		
	14:20	17:30		
	16:00	17:40		
	17:10	19:00		
	17:55	19:05		
	18:30	22:00		
	19:15			
	20:25			
	20:50			
	21:40			

Tabella 4.3 - Slot aerei trasferiti all'aeroporto di Yamagata a seguito della chiusura dell'aeroporto di Sendai

Si è riportato in Tabella 4.3, l'insieme degli slot aerei che costituiscono uno degli input dell'algoritmo. Ciascuno slot sarà identificato da una destinazione e da un orario di *clearance* per la partenza del volo. Da notare che, parallelamente al rispetto dei vincoli fisici, l'algoritmo si basa sul principio di assegnare velivoli di più grandi dimensioni alle destinazioni caratterizzate da una domanda in termini di passeggeri di maggiore entità. In generale l'algoritmo tenta in primo luogo di saturare l'uso degli aerei più grandi, soddisfacendo la domanda residua con i rimanenti velivoli.

Le analisi condotte hanno previsto che per ogni variazione nella disponibilità di un velivolo considerata, si ridefinisse il piano di volo per i 20 giorni della simulazione mediante l'applicazione off-line dell'algoritmo descritto. Nell'analisi si sono considerati 7 casi: la riduzione di una unità nel numero

disponibile di CRJ, E70, M90 e B767 rispettivamente, e l'incremento di una unità nel numero disponibile di E70, M90 oppure B767. Non si è considerato il caso di una maggiore disponibilità di CRJ poiché non ritenuto significativo ai fini dell'analisi coerentemente con l'ipotesi di una priorità data all'uso dei velivoli di dimensioni maggiori. Si riportano di seguito gli esiti delle sette analisi di sensitività.

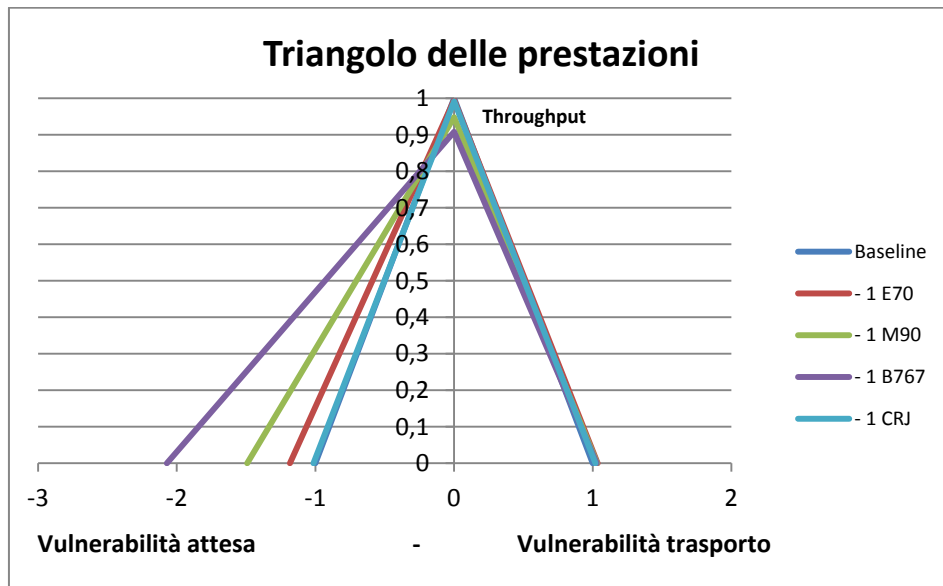


Tabella 4.4 - Diagramma delle prestazioni globali a fronte di una diminuzione nel numero massimo di E70,M90,B767 e CRJ disponibili

Si nota immediatamente il grande impatto sull'indicatore di vulnerabilità dell'attesa, che ha un brusco aumento a causa del drastico incremento nei tempi di attesa dei passeggeri che accedono al servizio di trasporto aereo (Figura 4.49).

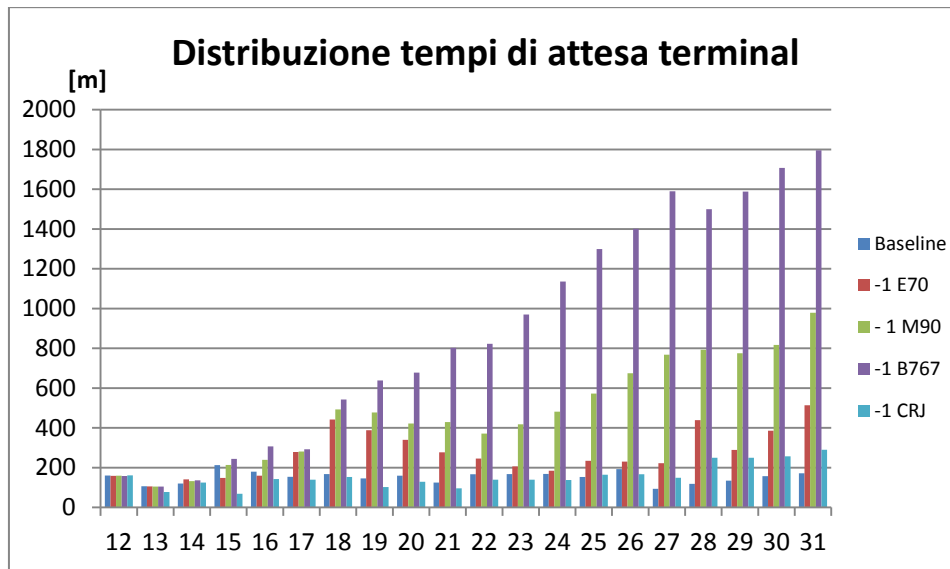


Figura 4.49 – Distribuzione sui 20 giornate considerate del tempo di attesa medio dei passeggeri che usufruiscono del servizio di trasporto aereo a fronte di una diminuzione nel numero massimo di E70 o M90 o B767 o CRJ disponibili

La diminuzione della potenzialità di trasporto aereo ha come ovvia conseguenza forti ripercussioni sul numero di passeggeri non serviti a fine giornata. Osservando il grafico delle code a fine giornata presso il terminal (Figura 4.50), si può notare come l'incremento sia tanto maggiore e anticipato quanto maggiore è la dimensione del velivolo non più disponibile.

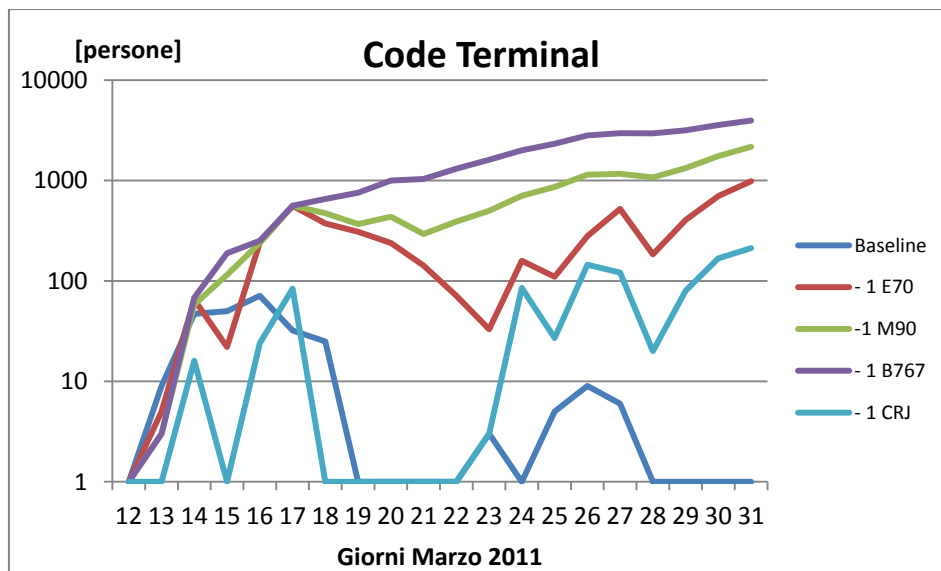


Figura 4.50 - Code complessive nodo terminal a fronte di una diminuzione unitaria nel numero massimo di E70 o M90 o B767 o CRJ disponibili

Un risultato meno prevedibile di quello appena illustrato è il comportamento del *throughput*. In Figura 4.51 si possono infatti osservare variazioni significative, ma con una degradazione della performance di misura molto minore rispetto a quanto accade per l'indice di vulnerabilità nell'attesa.

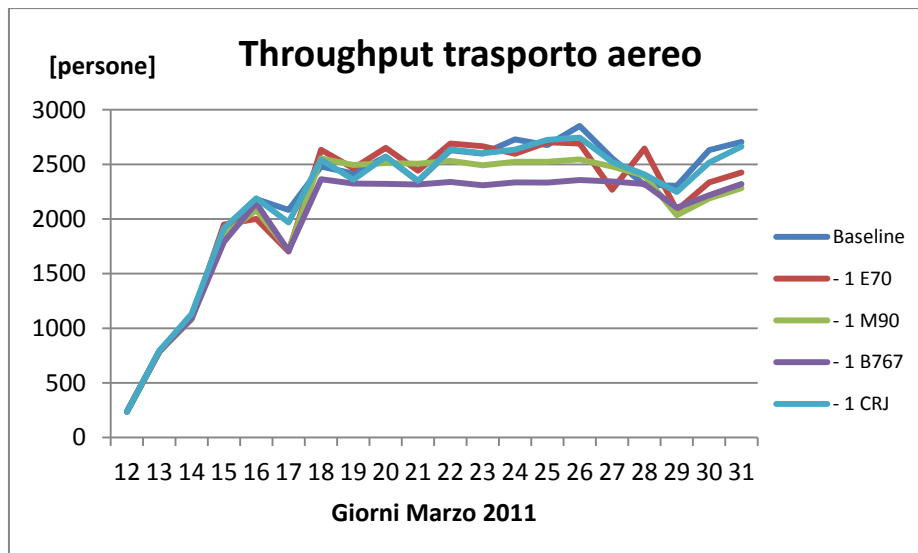


Figura 4.51 - Passeggeri partiti da terminal di Yamagata a fronte di una diminuzione unitaria nel numero massimo di E70 o M90 o B767 o CRJ disponibili

Risultati altrettanto interessanti sono quelli relativi ai casi duali rispetto a quelli appena esposti, ovvero relativi alla stesura dei piani di volo in caso di una maggior dotazione (1 unità) di velivoli E70, M90 o B767 alternativamente. Il principale risultato in questo caso è la progressiva diminuzione del numero di passeggeri non serviti a fine giornata (Figura 4.52) fino al sostanziale annullamento nel caso si disponga di un B767 aggiuntivo rispetto alla *baseline*.

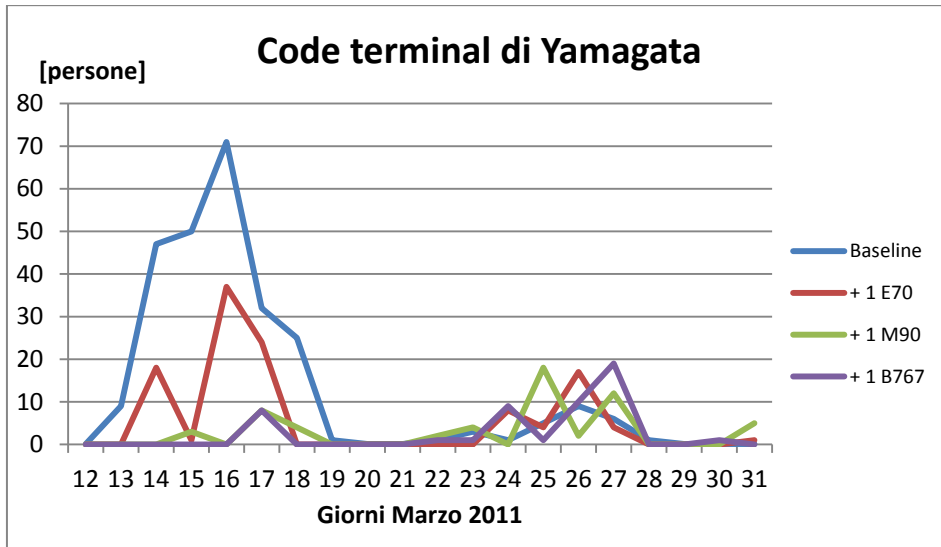


Figura 4.52 - Code complessive nodo terminal a fronte di un aumento unitario nel numero massimo di E70 o M90 o B767 disponibili

Concludiamo il paragrafo presentando i grafici riassuntivi dei risultati ottenuti per quanto riguarda le analisi relative alle risorse dell'aeroporto di *Yamagata* e le altre risorse di trasporto aereo.

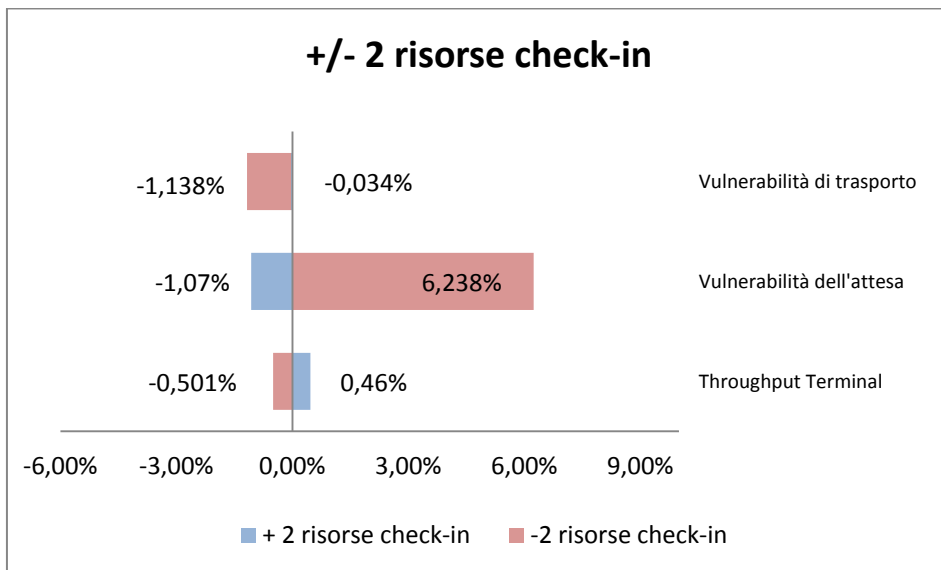


Figura 4.53 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con delta di +/- 1 sulle risorse addette al check-in dei passeggeri

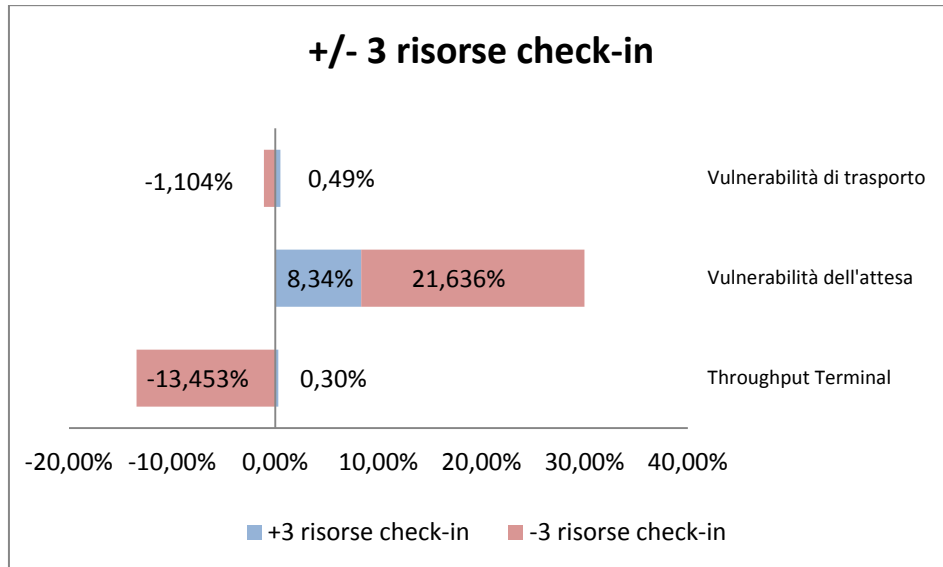


Figura 4.54 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con delta di +/- 3 sulle risorse addette al check-in dei passeggeri

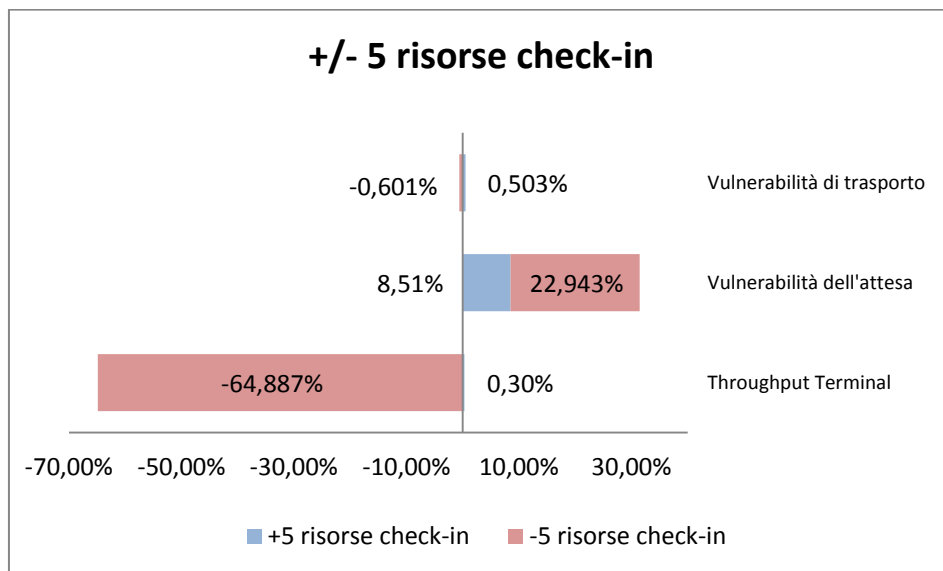


Figura 4.55 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con delta di +/- 5 sulle risorse addette al check-in dei passeggeri

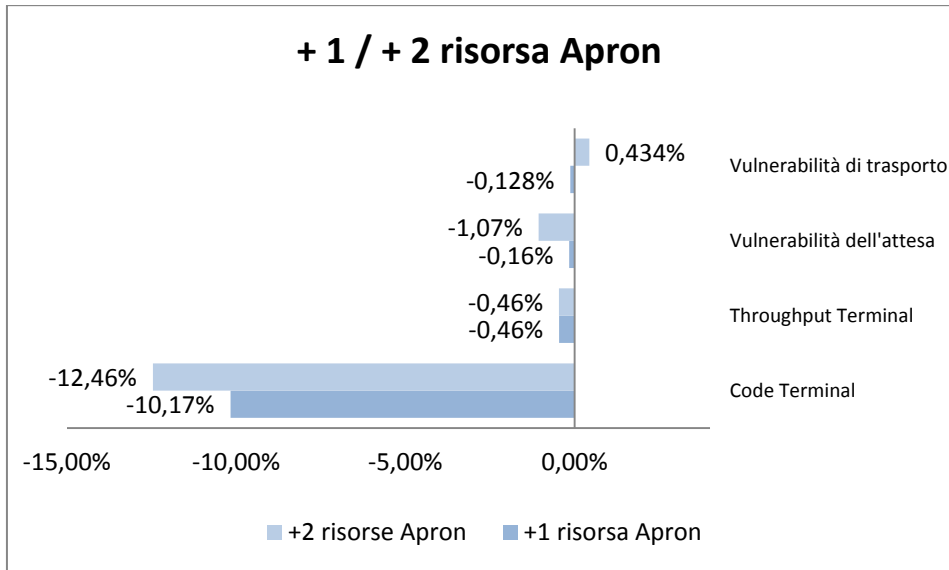


Figura 4.56 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni con incremento di 1 e 2 unità sulle risorse addetta al setting a terra dei velivoli

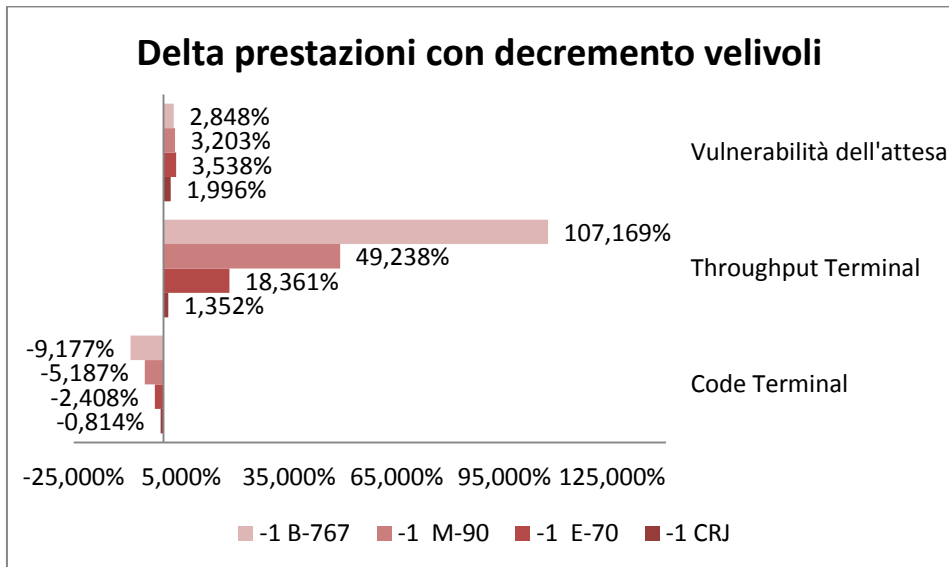


Figura 4.57 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni a fronte di un decremento unitario nel numero massimo di CRJ o E70 o M90 o B767 disponibili

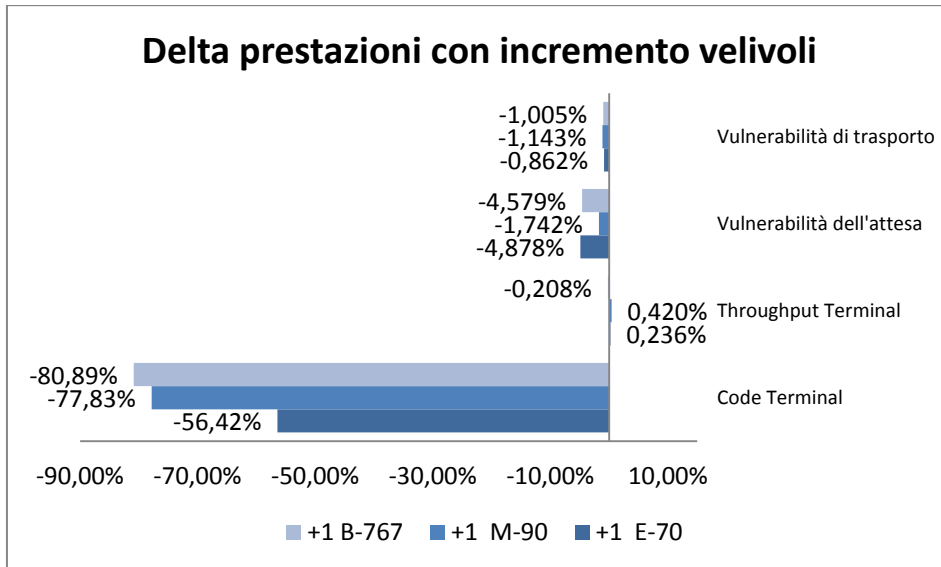
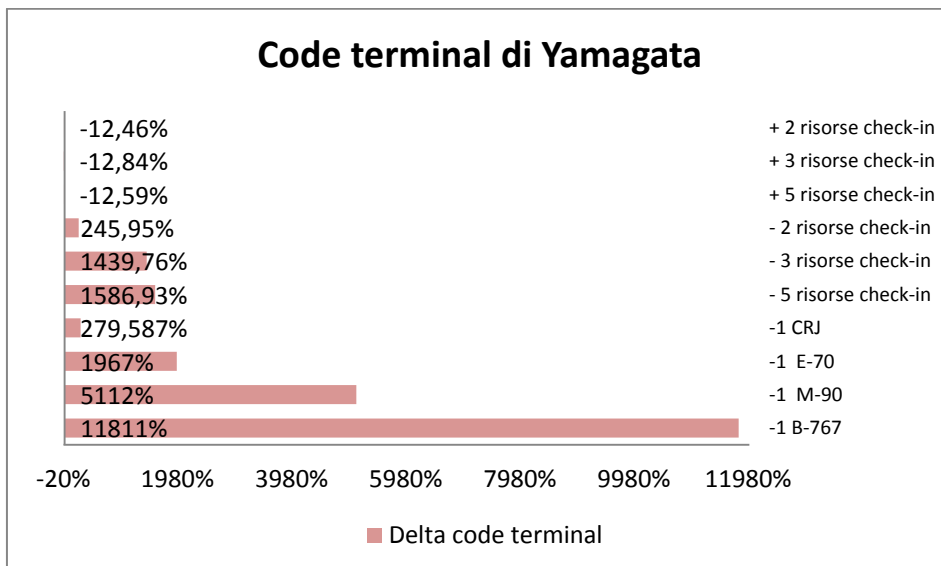


Figura 4.58 - Quadro sinottico della variazione di prestazioni a fronte di un incremento unitario nel numero massimo di E70 o M90 o B767 disponibili



4.4 Mappatura delle risorse del sistema

È ora possibile giungere ad una mappatura completa della criticità delle risorse del sistema secondo due accezioni fondamentali. Per prima cosa si utilizzeranno i risultati delle analisi esposte nei paragrafi precedenti per caratterizzare le risorse in base alla rilevanza del loro ruolo nel conseguimento dell'eccezionale prestazione in termini di resilienza ottenuta dal sistema di trasporto aereo del *Tohoku*. La seconda tipologia di mappatura ha invece lo scopo di caratterizzare le risorse in base all'entità dei benefici conseguibili in caso di incremento della loro dotazione.

4.4.1 Mappatura delle risorse chiave di resilienza

Le risorse chiave sono evidentemente quelle per le quali una minima riduzione di dotazione avrebbe comportato le maggiori degradazioni dei valori dei KPI del sistema rispetto alla *baseline*.

I risultati sono stati presentati tramite quadri sinottici costituiti da piani in cui l'asse delle ascisse è la variazione dell'indice di vulnerabilità dell'attesa, e quello delle ordinate è la variazione dell'indice di vulnerabilità di trasporto. Per ciascuna delle analisi presentate in 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3, è possibile definire una coppia di coordinate su tale piano data dalla variazione rispetto alla *baseline* della media sui 20 giorni considerati degli indici di vulnerabilità dell'attesa e di trasporto. Si rappresenta poi il punto individuato da tale coppia di coordinate con una forma circolare la cui area è proporzionale alla riduzione di *throughput* rispetto alla situazione storica di riferimento (le etichette in prossimità di ogni coordinata riportano il valore di variazione del *throughput* corrispondente al dato considerato).

Il grafico di (Figura 4.59), mostra come sia particolarmente critica la riduzione di una unità nella disponibilità di velivoli B-767 e M90, che comporta infatti un peggioramento di tutte gli indicatori di prestazione del sistema. Critica è anche la riduzione di 3 e 5 unità di personale addetto al check-in, per l'impatto negativo sul *throughput* del sistema di trasporto e sulla vulnerabilità dell'attesa. La riduzione dei mezzi per il trasferimento dalla stazione all'aeroporto di *Yamagata* ha grande influenza sulla vulnerabilità di trasporto, pur non influenzando significativamente il *throughput* complessivo.

In Figura 4.60 è riportata invece una differente versione del grafico, in cui l'indicazione della variazione indotta sul *throughput* è sostituita dalla variazione del numero di persone in coda a fine giornata presso il terminal aeroportuale di *Yamagata* (in questo caso si sono omesse risorse che implicano variazioni poco apprezzabili). Le risorse maggiormente critiche risultano essere anche questa volta la dotazione di velivoli di grande dimensione e le risorse addette al check-in, sebbene anche riduzioni nel numero massimo di mezzi per il trasporto regionale causino peggioramenti rilevanti del numero totale di passeggeri non serviti dal sistema di trasporto aereo.

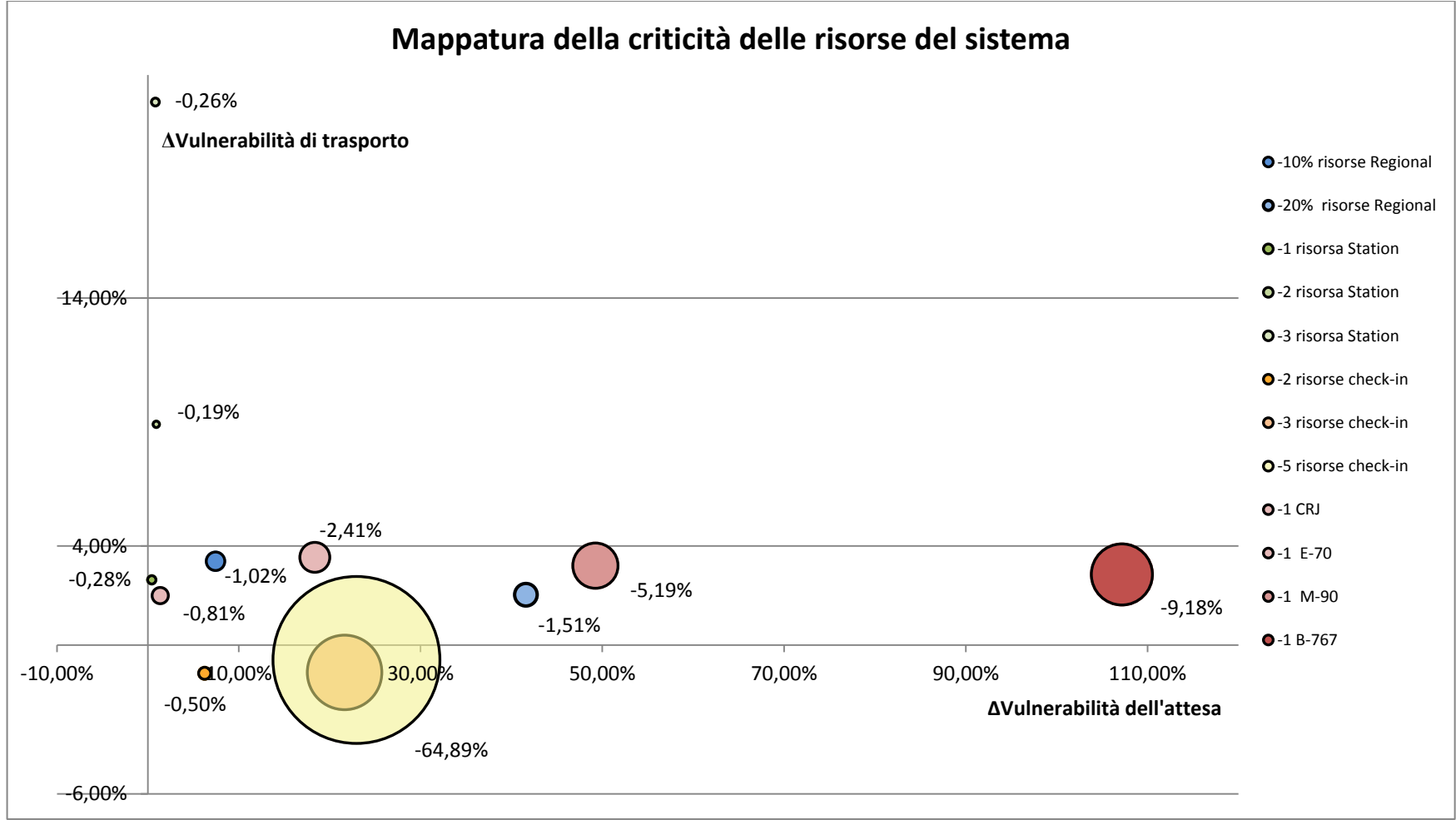


Figura 4.59 – Quadro sinottico della variazione indotta sui KPI da una diminuzione delle risorse del sistema

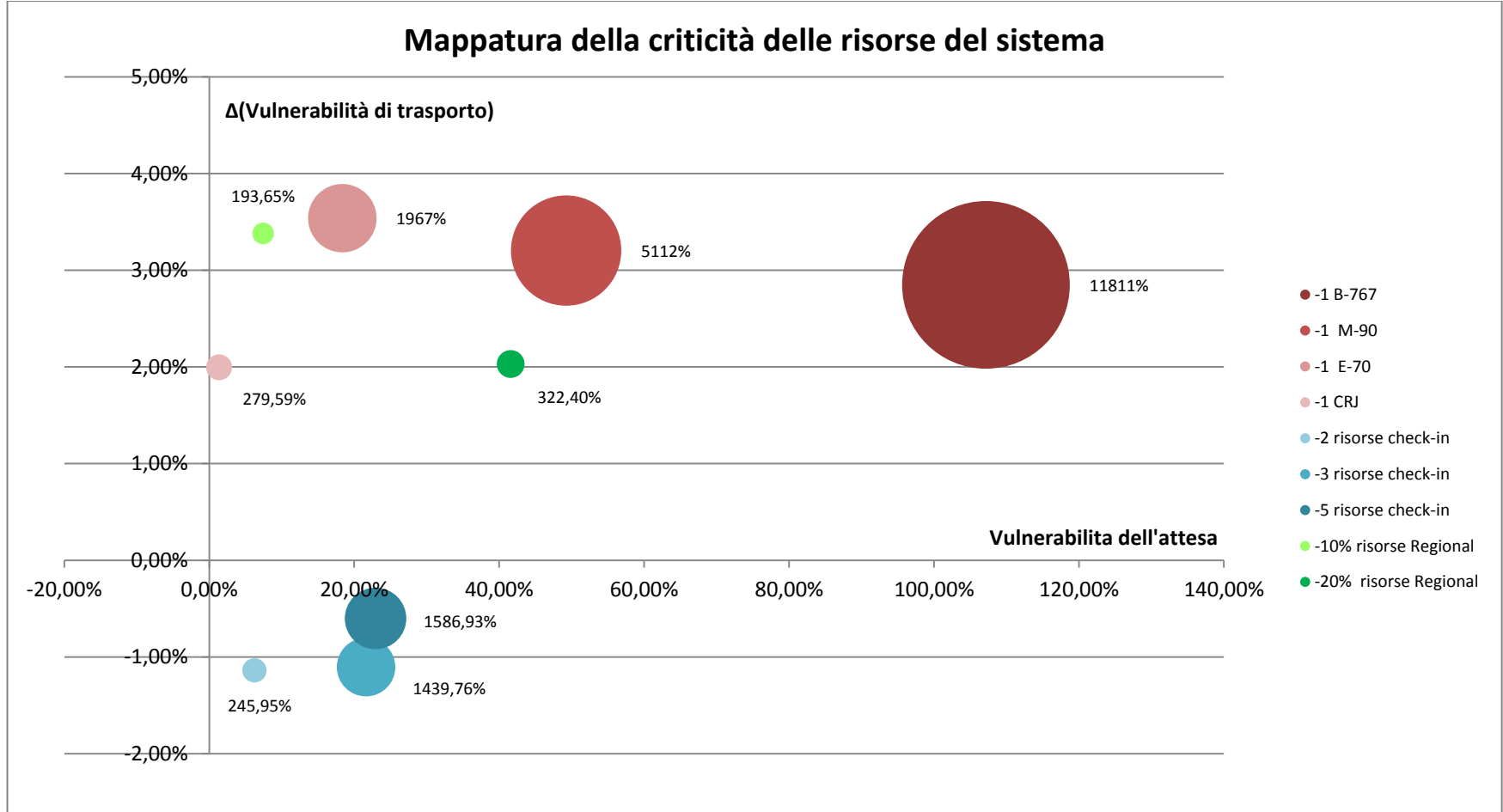


Figura 4.60 - Quadro sinottico della variazione indotta sui KPI da una diminuzione nella disponibilità delle risorse del sistema con indicazione delle variazioni delle code presso terminal di Yamagata

4.4.2 Mappatura delle risorse chiave per il miglioramento prestazionale del sistema

Tale mappatura, riportata in Figura 4.61, cambia la linea di analisi rispetto a quella appena esposta, e viene proposta come strumento propedeutico all'elaborazione di piani di risposta all'emergenza ottimizzati dal punto di vista della resilienza. Lo studio condotto parte dal presupposto che sia possibile incrementare la dotazione, così come adattare la natura o il mix di alcune risorse, e fornisce quindi indicazioni sui benefici attesi sull'intero spettro dei KPI di sistema in caso di maggior disponibilità di risorse. In questo modo si vuole fornire ai decisori e gestori del sistema di trasporto un quadro sintetico delle migliori leve per migliorare la capacità di risposta del sistema. Sottolineiamo come l'estrema flessibilità del modello simulativo implementato consente di adeguare l'analisi a qualsiasi tipo di scenario di crisi, attraverso l'opportuna modifica dei vincoli sulle risorse e dei coefficienti attraverso i quali vengono costruiti gli indicatori di performance. Il presente lavoro di tesi si è però limitato ad effettuare analisi relative allo scenario di riferimento del grande terremoto e tsunami del Marzo 2011.

Dai grafici di Figura 4.61 e Figura 4.62, in cui si è ridotto il valore massimo degli assi per consentire una corretta visualizzazione dei dati in prossimità dell'origine, si evince che:

- un incremento della dotazione di risorse di trasporto terrestre porta ad una netta riduzione dell'indicatore di vulnerabilità dell'attesa, senza comportare peggioramenti degli altri KPI;
- l'utilizzo di bus da 78 posti consentirebbe un ancor più drastica riduzione della vulnerabilità dell'attesa, sebbene porti con sé una lieve riduzione del *throughput* complessivo.

Si nota inoltre come la leva più efficace per ridurre la vulnerabilità di trasporto sia quella di agire sulla soglia di tolleranza di coda da parte degli utenti attraverso opportuni processi di informazione/ comunicazione e indirizzamento dell'utenza, sebbene ciò comporti un peggioramento dell'indicatore di vulnerabilità dell'attesa. È dunque opportuno valutare attentamente con quali azioni corredare un tentativo di dissuasione degli utenti all'utilizzo di mezzi di trasferimento alternativi al servizio di trasporto pubblico.

In Figura 4.62 è possibile visualizzare in modo più chiaro il dettaglio dei dati che si concentrano intorno all'origine nel diagramma di Figura 4.61. È importante rilevare come le numerose leve operative rappresentate in questo grafico potrebbero avere maggior peso se attuate in modo combinato e sinergico. Ad esempio sembra plausibile ipotizzare che nel caso in cui si voglia ridurre la vulnerabilità di trasporto agendo sulle soglie di tolleranza di

coda degli utenti, sia utile prevedere anche un incremento dei mezzi per il servizio navetta, così da limitare le conseguenze negative sulla vulnerabilità nell'attesa (sebbene dalle analisi riportate in Figura 4.62 sembra emergere un impatto limitato di tali risorse).

Infine in Figura 4.63 sono riproposti i risultati dell'analisi in termini di impatto sulle code all'interno del terminal aeroportuale. A tale riguardo, si nota l'estrema importanza di disporre di velivoli di grandi dimensioni se si vuole limitare il numero di utenti non serviti a fine giornata.

Anche disporre di maggiori risorse di personale per il check-in ha un effetto benefico sul contenimento delle code a fine giornata (pernottamenti in aeroporto), senza rilevanti ripercussioni negative sugli altri KPI. Si rileva inoltre che un incremento delle risorse disponibili per il trasporto regionale, ottenga un indubbio contenimento dei livelli di vulnerabilità nell'attesa e trasporto, ma induca al contempo serissime criticità sulle dimensioni delle code nel terminal, a causa del forte sbilanciamento di potenzialità introdotto nel sistema.

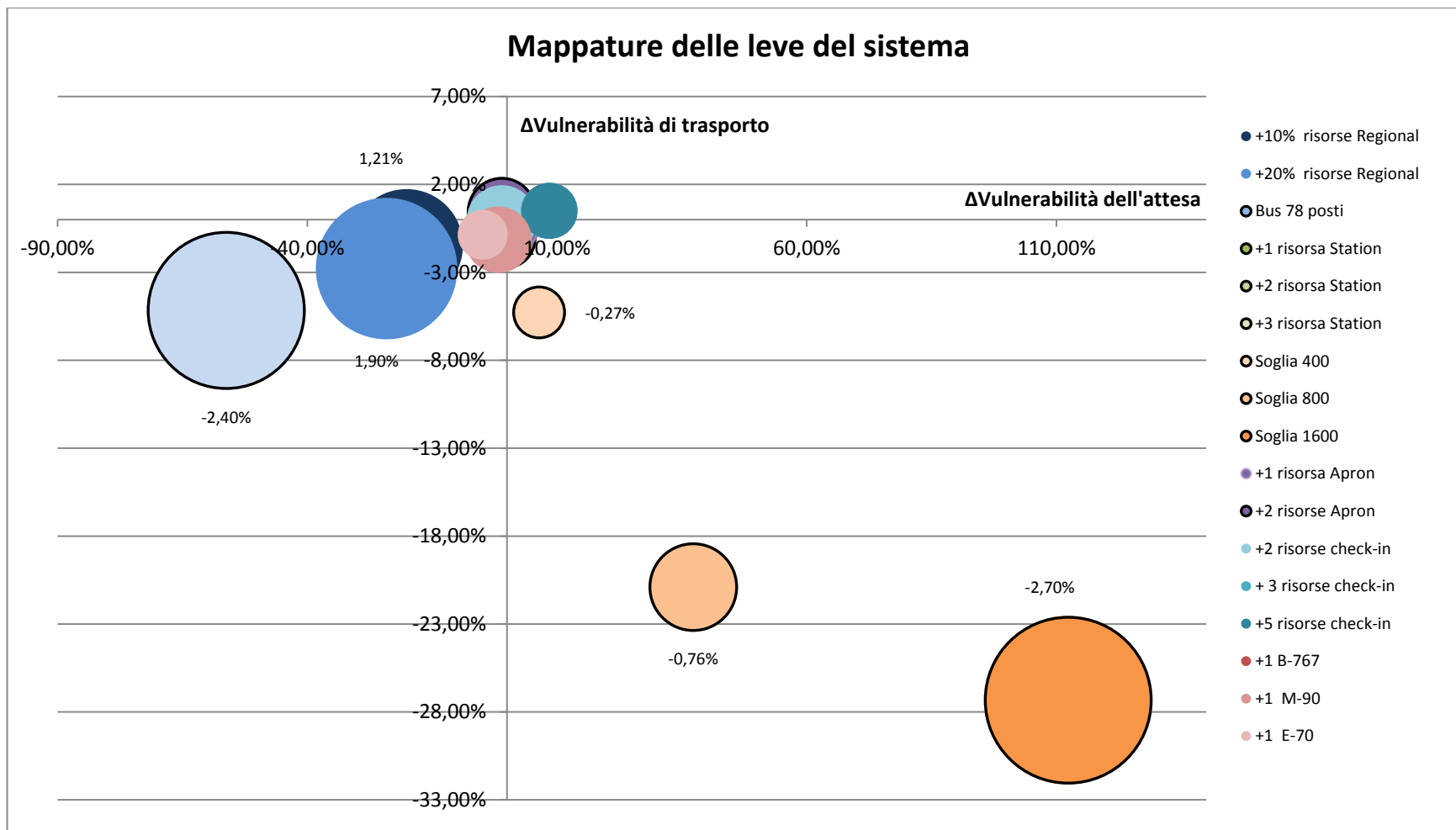


Figura 4.61 - Quadro sinottico della variazione indotta sui KPI da un aumento nella disponibilità delle risorse del sistema

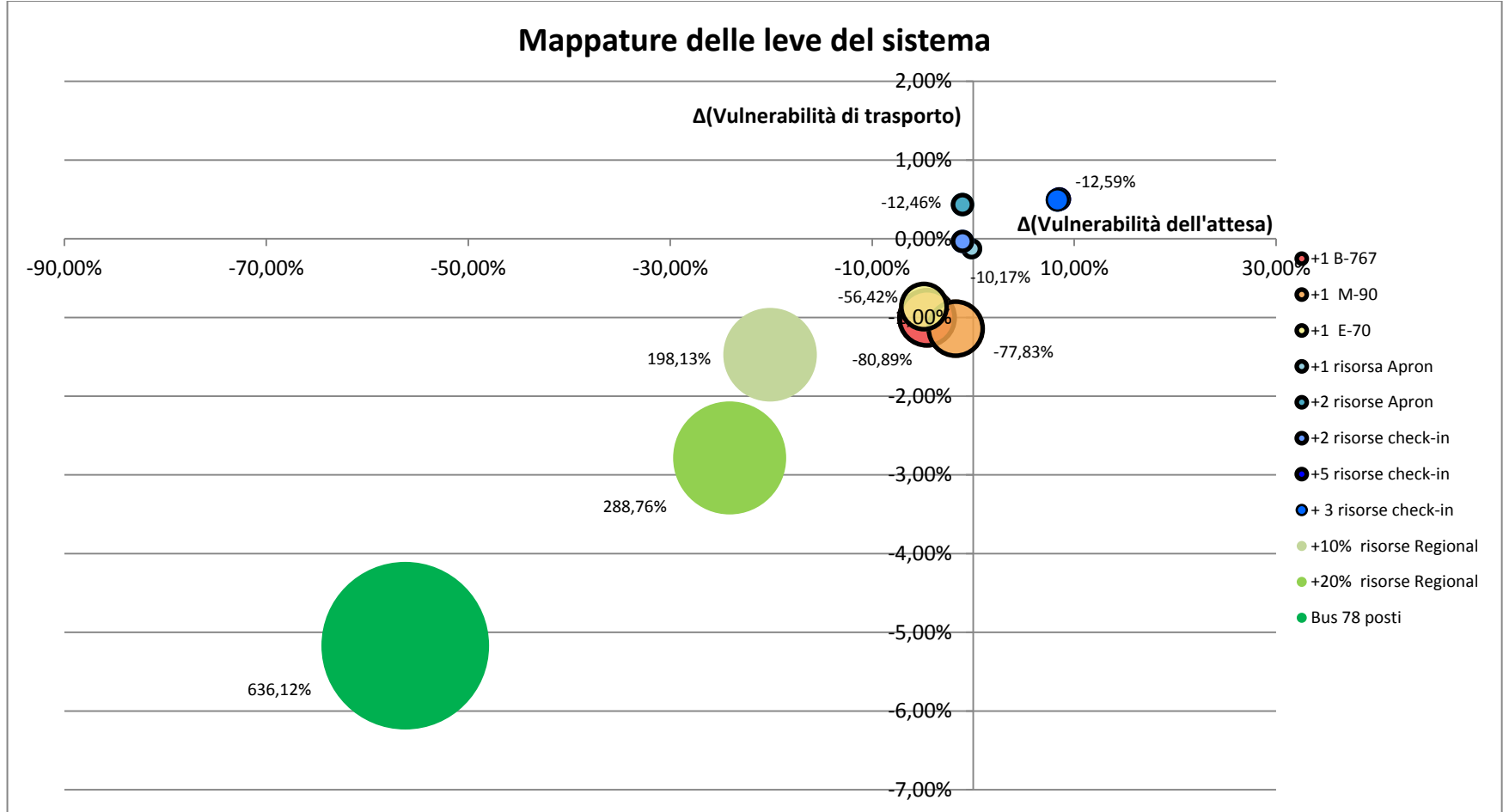


Figura 4.63 - Quadro sinottico della variazione indotta sui KPI da un aumento nella disponibilità delle risorse del sistema con indicazione delle variazioni delle code presso terminal di Yamagata

Capitolo 5

Conclusioni

Con “resilienza” di sistemi infrastrutturali, si intende la capacità di questi di riconfigurare la propria struttura e riorientare i propri processi interni al fine di preservare la propria funzione a fronte di significative perturbazioni del proprio stato. L’integrità e la funzionalità delle infrastrutture, specialmente di quelle che veicolano prodotti o servizi critici, è un elemento fondamentale per il benessere e la possibilità di progresso di qualsiasi società sviluppata. Negli ultimi anni il tema è stato oggetto di un interesse crescente da parte della comunità scientifica, a motivo di cataclismi naturali come lo tsunami del 2004 in Indonesia o l’uragano *Katrina* del 2005 negli USA, ed atti terroristici quali gli attentati alla metro di Londra del 2005 e quello alla stazione di *Atocha* di Madrid nel Marzo 2004.

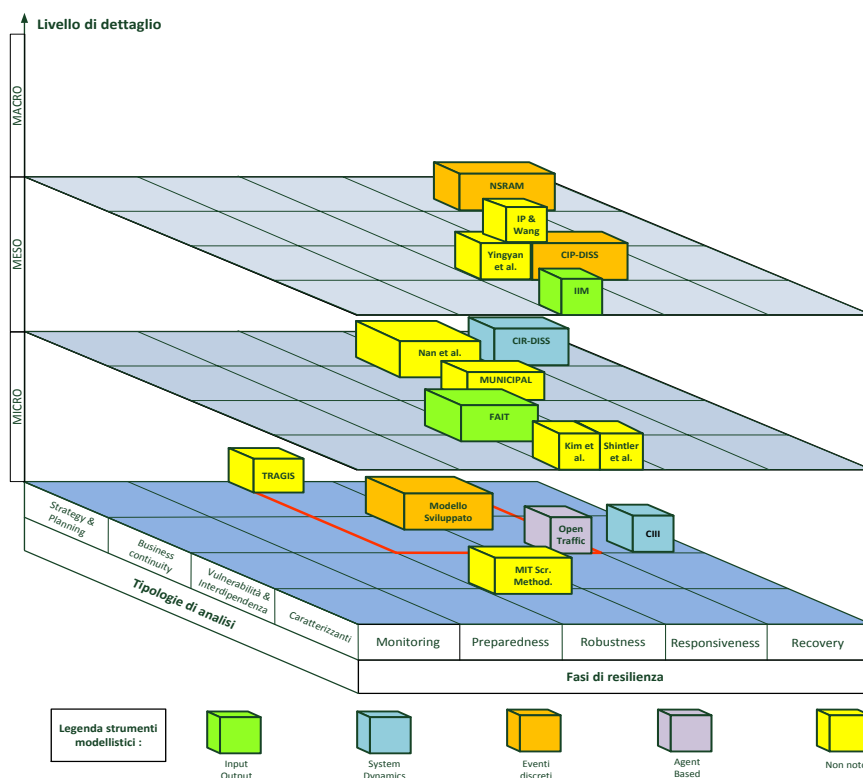


Figure 5.1 - Quadro sinottico dei modelli di tipo funzionale presenti in letteratura

Nell’ottica di ridurre l’impatto di eventi di questo genere sulla sicurezza ed il benessere della popolazione, risulta fondamentale capitalizzare esperienze e

lesson learned. È questo l'obiettivo che si è prefisso il presente lavoro di tesi, analizzando il comportamento delle infrastrutture di trasporto della regione *Tohoku* a seguito del grande terremoto e tsunami del Marzo 2011 in Giappone. A tale scopo è stato sviluppato un modello di simulazione che ha consentito di studiare le prestazioni del sistema nella fase di risposta all'emergenza, prima dell'avvio delle attività di *recovery*. L'approccio metodologico proposto ha caratteristiche di originalità rispetto allo stato dell'arte delle metodologie e metodi tipici di analisi della *business continuity* e di pianificazione strategica ed operativa della resilienza.

L'analisi dello stato dell'arte condotta ha evidenziato come i numerosi modelli sviluppati per analisi di resilienza di infrastrutture critiche (e di trasporto in particolare), non siano in grado di descrivere con sufficiente livello di dettaglio i processi operativi e gestionali messi in atto dagli enti gestori, anche nel caso in cui i modelli utilizzati adottino una rappresentazione del sistema di tipo funzionale.

Il modello di simulazione sviluppato nel presente lavoro è caratterizzato al contrario dalla piena visibilità di attività, operazioni e processi propri dei sistemi di trasporto, consentendo una valutazione approfondita del contributo di ciascuna risorsa alla resilienza del sistema, senza d'altro canto scendere ad un livello di dettaglio tanto elevato da compromettere l'intelligibilità del modello da parte di gestori e decisori con competenza ed esperienza legate a settori molto diversi tra loro. La caratterizzazione esaustiva dei processi rappresentati dal modello è stata resa possibile raccogliendo un'ingente mole di informazioni attraverso incontri con numerosi *stakeholders* coinvolti nella gestione del cataclisma del Marzo 2011 e mediante misurazioni sul campo di parametri prestazionali di specifiche operazioni aeroportuali.

Si è ritenuto che la simulazione ad eventi discreti *process-oriented* fosse lo strumento modellistico più adatto allo sviluppo di un simulatore con le caratteristiche elencate, in quanto in grado di descrivere con il desiderato grado di completezza tutti gli oggetti di interesse del sistema, siano essi *facilities*, utenti o risorse. Lo strumento consente inoltre piena flessibilità nell'implementazione di qualsivoglia logica di gestione delle risorse, le quali, in base alla loro tipologia e funzione, sono state modellate attraverso entità specifiche od opportuni elementi funzionali di servizio. Simulazioni *process-oriented* consentono inoltre di rappresentare la singola entità passeggero, valutandone lo stato in termini di posizione e grado di vulnerabilità per ogni istante trascorso nel sistema.

L'utilizzo della simulazione *process-oriented* per lo studio di una situazione di transitorio è uno degli aspetti originali del presente lavoro di tesi. Questo tipo di strumento, che offre i vantaggi elencati in precedenza, è infatti di solito

utilizzato in ambiti, come la gestione della produzione ed il Supply Chain Management, nei quali si valutano opportunità di ottimizzazione di processi stabili e per i quali sono generalmente disponibili ampie basi di dati storici. L'oggetto trattato nel presente lavoro di tesi presenta invece, per sua natura, caratteristiche opposte, configurandosi come un processo transitorio, instabile e irripetibile, per il quale non esiste alcun riferimento storico pregresso significativo, se non la singola osservazione corrispondente all'evento oggetto di studio, ovvero il cataclisma del Marzo 2011.

Altra caratteristica peculiare del modello è la sua natura modulare, che consente l'interfaccia sia con gli altri moduli del modello, sia con modelli da svilupparsi in futuro, eventualmente caratterizzati da linguaggi di modellazione diversi da quello dei sistemi ad eventi discreti. Questa caratteristica è strettamente connessa al ruolo che il presente lavoro di tesi ricopre all'interno del progetto CMAC, ovvero quello di riferimento e paradigma per la costruzione di uno strumento di analisi di più ampio respiro, contraddistinto dalla presenza di un *layer* che rappresenti i processi operativi e gestionali di tutte le ITr della regione - di cui il modello trattato costituisce il primo step di sviluppo - ed un *layer* che rappresenti i processi decisionali ed informativi che intercorrono tra tutti gli *stakeholder* presenti a vario titolo nel sistema, la cui elaborazione è affidata invece alla compagine giapponese del progetto CMAC. La modularità e la capacità di interfaccia immediata del modello sono state rese possibili grazie all'utilizzo di un software estremamente versatile, Anylogic©, che offre inoltre una modalità di rappresentazione del sistema capace di rendere immediatamente evidenti i legami logici interni del modello, caratteristica rilevante tanto in sede di sviluppo quanto di utilizzo dello strumento da parte di decisori e *policy makers*.

Il modello simulativo, che si presta ad un amplissimo spettro di differenti analisi, è stato dunque utilizzato in ottica diagnostica per capitalizzare aspetti di conoscenza circa la straordinaria performance di resilienza ottenuta dal sistema di trasporto aereo della regione del *Tohoku* a seguito dello tsunami. Nello specifico si sono condotte due differenti tipologie di analisi:

- una mappatura delle risorse in base al loro grado criticità nel conseguimento della performance di resilienza espressa dal sistema;
- una mappatura delle risorse che fosse propedeutica all'elaborazione di piani di risposta all'emergenza ottimizzati dal punto di vista della resilienza, fornendo ai gestori del sistema di trasporto un quadro sintetico delle migliori leve su cui agire per migliorare determinate performance.

Aver utilizzato uno strumento modellistico quale la simulazione processo centrica consente non solo di valutare la rilevanza delle risorse in termini qualitativi, ma offre precise indicazioni quantitative circa l'impatto della maggiore o minore disponibilità di ciascuna risorsa, evidenziando trade-off e

consegnando a decisori e policy-makers informazioni puntuali circa le conseguenze operative di determinate decisioni.

Al fine di valutare l'impatto di ciascuna risorsa sulle performance del sistema si sono utilizzati tre indicatori sintetici:

- il *throughput* del sistema di trasporto aereo,
- un indicatore di vulnerabilità dei passeggeri durante il trasporto,
- un indicatore di vulnerabilità dei passeggeri durante l'attesa.

Gli ultimi due indicatori sono stati definiti mediante l'introduzione di opportuni coefficienti di vulnerabilità durante il trasporto e di vulnerabilità durante l'attesa, che possono essere variati a seconda dello scenario di crisi considerato, conferendo in questo modo al modello ulteriore flessibilità di analisi.

Le campagne di simulazione condotte hanno consegnato un quadro in cui ciò che risulta maggiormente critico per la resilienza del sistema è la disponibilità di velivoli di grandi dimensioni, in quanto la loro diminuzione provoca un peggioramento trasversale tra tutti i KPI del sistema. Critico è anche il numero di risorse addette al check-in nel terminal aeroportuale di Yamagata, per il forte impatto negativo che una loro minore disponibilità comporta tanto sul *throughput* del sistema di trasporto quanto, in misura minore, sulla vulnerabilità durante l'attesa. Il numero di bus operanti sulle tratte di trasporto regionale terrestre ed il numero di mezzi disponibili per il servizio navetta hanno invece effetti circoscritti ad una performance singola, rispettivamente

La mappatura delle risorse chiave per l'ottimizzazione delle prestazioni del sistema, evidenzia invece che i maggiori margini di miglioramento delle performance risiedono nei nodi di trasporto regionale terrestre. Disporre di un maggior numero di bus regionali o disporre di bus regionali dalla maggiore capienza comporta infatti netti miglioramenti sugli indicatori di vulnerabilità durante il trasporto e di vulnerabilità durante l'attesa. In generale, la leva più efficace per ridurre la vulnerabilità di trasporto risulta essere agire sulla soglia di tolleranza di coda da parte degli utenti attraverso opportuni processi di informazione/ comunicazione e indirizzamento dell'utenza, sebbene ciò comporti un peggioramento dell'indicatore di vulnerabilità nell'attesa. È dunque opportuno valutare attentamente con quali azioni corredare un tentativo di dissuasione degli utenti all'utilizzo di mezzi di trasferimento alternativi al servizio di trasporto pubblico. Ad esempio, sembra plausibile ipotizzare che nel caso in cui si voglia ridurre la vulnerabilità di trasporto agendo sulle soglie di tolleranza di coda degli utenti, sia utile prevedere anche un incremento dei mezzi per il servizio navetta, così da limitare le conseguenze negative sulla vulnerabilità nell'attesa. Una maggiore disponibilità di aerei di grandi dimensioni e di risorse per il check-in comporta invece effetti benefici sulla drastica riduzione del numero di pernottamenti in aeroporto.

Se da una parte si ritiene che tali risultati forniscano elementi certamente non intellegibili da un'analisi "statica" del dato storico, d'altro canto si è persuasi che per la generalizzazione delle conclusioni raggiunte si rendano necessari ulteriori studi. Se infatti l'utilizzo di simulazioni ad eventi discreti *process-oriented* per lo studio di transitori per i quali non esistono serie storiche di confronto costituisce uno degli spunti originali del lavoro di tesi, tuttavia ciò comporta alcune criticità nel processo di calibrazione e validazione del modello. Tali criticità risiedono principalmente nella parzialità di completezza di alcuni dati indispensabili per l'estrapolazione dell'input e nella mancanza di metodologie consolidate per la validazione di simulazioni ad eventi discreti applicate a sistemi in stati di transitorio instabile. Si ritiene questo il principale limite del modello sviluppato, nonché uno degli spunti più rilevanti per sviluppi futuri, che potrebbero consistere in uno studio teso a definire nuove metodologie o ad adattarne di esistenti per la calibrazione e validazione di simulazioni di questo tipo.

Ulteriori sviluppi del modello trattato sono certamente connessi all'obiettivo primario del progetto di ricerca CMAC, ovvero la realizzazione di un modello del sistema di trasporto del Tohoku che comprenda tanto i processi operativi e gestionali quanto quelli informativi e decisionali. Questa operazione comporta per prima cosa la creazione in ambiente Anylogic© del secondo *layer* citato, per lo sviluppo del quale si ritiene il *System Dynamics* lo strumento modellistico maggiormente indicato. È inoltre necessario, sulla base delle strutture e dei moduli messi a disposizione dal modello oggetto del presente lavoro di tesi, un ampliamento del sistema di carattere orizzontale, che consenta la descrizione di tutti i nodi aeroportuali e di trasporto terrestre regionali. Possedere un modello di questo tipo aprirebbe la possibilità di numerosi nuovi livelli di analisi, quali ad esempio valutare le migliori strategie di allocazione delle risorse tra i diversi nodi di trasporto o di testare piani di volo ottimi dal punto di vista del sistema di trasporto aereo regionale nel suo complesso e non della singola struttura aeroportuale.

Le ulteriori e molteplici linee di sviluppo futuro possono essere ricondotte a due tipologie fondamentali: quelle riguardanti il miglioramento dell'approccio modellistico proposto e quelle relative al suo impiego per analisi di resilienza.

Con riferimento alla prima linea di sviluppo potrebbe essere rilevante, sfruttando la flessibilità modellistica di Anylogic©, fare in modo che le entità passeggeri non siano più caratterizzate dal comportamento esclusivamente passivo proprio delle simulazioni ad eventi discreti *process-oriented*, ma possiedano algoritmi rappresentativi di comportamenti e reazioni a determinati flussi di informazione. Si potrebbe fare ciò utilizzando un *layer* di simulazione ad agenti razionali che si interfacci con il sistema ad eventi discreti in determinati nodi. Uno sviluppo di

questo genere diventa particolarmente interessante nel momento in cui si comprendano nel sistema diverse alternative di trasporto tra un nodo e l'altro.

Uno sviluppo affascinante è poi quello di sperimentare l'utilizzo del simulatore per analisi in tempo reale, in modo da valutare piani di risposta alternativi a seguito di cataclismi in atto. Questo utilizzo del modello, che potrebbe essere di particolare interesse per una nazione come il Giappone ad altissimo rischio sismico, richiederebbe una rappresentazione del sistema in condizioni di normale operatività, la modellazione dettagliata di eventi distruttivi e delle loro conseguenze sul sistema, e la gestione di flussi informativi in grado di fornire informazioni aggiornate in tempo reale sullo stato delle infrastrutture interessate all'evento. Questo tipo di uso del modello è ovviamente subordinato al conseguimento di un sufficiente livello di confidenza circa la validità dei risultati della simulazione.

È inoltre di sicuro interesse la possibilità di associare alla visualizzazione del modello in termini logici una resa grafica di esso, che renda ancor più immediata la comprensione di dinamiche ed impatti di diverse strategie di gestione. Anche in questo caso la cosa è resa agevole dalle potenzialità del software utilizzato, che prevede la possibilità di una visualizzazione grafica del sistema attraverso l'integrazione nel modello di oggetti CAD 2 e 3D nonché di mappe geografiche e planimetrie di edifici.

Riferendosi alle linee di sviluppo che considerano l'utilizzo del modello, sarebbe opportuno corredare le analisi effettuate sulle risorse con analisi ulteriori che prevedano la considerazione di variazioni congiunte di determinate risorse, in modo da arricchire la mappatura realizzata con una maggiore comprensione di sinergie e *trade off*. Da ultimo, sarebbe appropriato ampliare le analisi condotte considerando l'impatto di diverse logiche di gestione e rilascio delle risorse all'interno del sistema. Si potrebbe cioè studiare quali siano gli algoritmi di definizione della schedulazione giornaliera delle corse dei mezzi di terra e dei voli che massimizzano la performance, integrandoli con opportuni modelli di previsione della domanda e controllo in feed-back del sistema.

Elenco degli acronimi

ANA	All Nippon Airways
CI ³	Critical Infrastructure Interdependencies Integrator
CIR-DSS	Critical Infrastructure Resilience Decision Support System
CMAC	Collaborative Management of airport at Catastrophe
DSER	Direct Static Economic Resilience
FAIT	Fast Analysis Infrastructure Tool
FEMA	Federal Emergency Management Agency
FTE	Full Time Equivalent
IC	Infrastruttura Critica
IIM	Inoperability Input-output Model
ITr	Infrastruttura di Trasporto
JAL	Japan AirLines
JSDF	Japan Self Defense Force
MSE	Mean Square Error
MSPE	Mean Square Percentage Error
NPV	Net Present Value
NSRAM	Network Security Risk Assessment Model
PERT	Program Evaluation & Review Technique
RPI	Rensselaer Polytechnic Institute
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition

TCAB	Tokyo Civil Aviation Bureau
TDER	Total Dynamic Economic Resilience
TEC	Technical Emergency Control
TRAGIS	Transportation Routing Analysis Geographic Information System
TSER	Total Static Economic Resilience
USFJ	U.S. Forces Japan
USPACOM	U.S. Pacific Command
YAO	Yamagata Airport Office
YPG	Yamagata Prefectural Government

Elenco dei simboli

p_j	Probabilità di provenienza dalla j-esima origine
q_j	Dato storico passeggeri da j-esima origine
t	Unità temporale fisica
$i_{t,n}^j$	Intervallo tra corse successive relativo a giorno t, n-esima compagnia, j-esima tratta)
$corse_t^j$	Corse bus in t-esimo giorno su j-esima tratta
$k_{t,n}^j$	Coefficiente di distribuzione passeggeri relativo a j-esima tratta, t-esimo giorno, n-esima compagnia
$bus_max_{t,n}$	Numero massimo bus disponibili nel t-esimo giorno per l'n-esima compagnia
μ_{PERT}	Media distribuzione beta con approssimazione PERT
σ^2_{PERT}	Varianza distribuzione beta con approssimazione PERT
a, m, b	Parametri distribuzione beta con approssimazione PERT
p_r	Probabilità di scelta della r-esima destinazione
q_r	Dato storico passeggeri su r-esima destinazione
$t_{departure}^v$	Ora assoluta di partenza v-esimo volo
λ	Parametro caratteristico distribuzione esponenziale
P	Dato storico numero medio passeggeri trasportati in un singolo viaggio
$c_{j,n}^t$	Dato storico su corse effettuate dall'n-esima compagnia, sulla j-esima tratta, nel t-esimo giorno
D_I^t	Valore di domanda di mobilità terrestre giornaliera di

	primo tentativo
$\lambda(t)$	Funzione approssimante andamento dei tassi di arrivo nei 20 giorni
λ_{max}	Valore asintotico funzione $\lambda(t)$
λ_0	Valore minimo funzione $\lambda(t)$
γ	Parametro temporale funzione $\lambda(t)$
λ^t_I	Tasso di arrivo di primo tentativo per t-esimo giorno
$g(t)$	Funzione di forma
$\vec{\gamma}_I$	Parametro temporale funzione $\lambda(t)$ di primo tentativo
λ_{0_I}	Valore minimo funzione $\lambda(t)$ di primo tentativo
γ^{def}	Parametro temporale funzione $\lambda(t)$ definitivo
λ_0^{def}	Valore minimo funzione $\lambda(t)$ definitivo
C_v^t	Coefficiente di variazione
σ_{camp}^t	Deviazione standard campionaria sulle run per il t-esimo giorno
μ_{camp}^t	Media campionaria sulle run per il t-esimo giorno
$MSE_{code\ terminal}^t$	MSE su code terminal per t-esimo giorno
$MSPE_{throughput}^t$	MSPE su code throughput per t-esimo giorno
μ^t	Dato storico di riferimento code terminal/ throughput per t-esimo giorno
x_i^t	Output simulazione code terminal/throughput su t-esimo giorno
N_{run}	Numero di run
$coda_k$	Coda media su k-esimo nodo nell'i-esima run

$codak$	Media sulle run delle code sul k-esimo nodo
V_{attesa}	Indicatore di vulnerabilità durante l'attesa
F^i	Throughput medio su i-esimo nodo del sistema
T^i	Tempo di attesa medio passeggeri su i-esimo nodo del sistema
v_a^i	Coefficiente di vulnerabilità durante l'attesa per i-esimo nodo del sistema
$V_{trasporto}$	Indicatore di vulnerabilità durante il trasporto
v_t^j	Coefficiente di vulnerabilità durante il trasporto per j-esimo nodo del sistema

Bibliografia

- [1] N. Nicholas Taleb, «Black Swans and the Domains of Statistics,» *The American Statistician*, vol. 61, n. 3, August 2007.
- [2] B. Obama, «National Preparedness Month proclamation speech,» 27 Agosto 2012. [Online]. Available: <https://www.federalregister.gov/articles/2012/09/06/2012-22149/national-preparedness-month-2012>. [Consultato il giorno 12 Gennaio 2012].
- [3] C. Holling, «Resilience and stability of ecological systems,» *Institute of Resource Ecology, University of British Columbia, Vancouver Canada*, 1973.
- [4] C. Holling, Engineering within ecological constraints, S. P, A cura di, Washington (DC): National Academy, 1996, pp. 31-44.
- [5] N. Garnezy, Schizophrenia: The first ten Dean Award Lectures, S. R. Dean, A cura di, New York, (NY): MSS Information Corp., 1973, pp. 163-204.
- [6] T. S. Ponis e E. Koronis, «Supply Chain Resilience: Definition Of Concept And Its Formative Elements,» *The Journal of Applied Business Research*, vol. 28, n. 5, pp. 921-929, September/October 2012.
- [7] A. Wildavsky, Searching for Safety, New Brunswick, NJ: Transaction Books, 1988.
- [8] L. Mallak, «Putting Organisational Resilience to Work,» *Industrial Management*, 1998.
- [9] K. Sutcliffe e T. Vogus, Organizing for Resilience, K. Cameron, J. Dutton e R. Quinn, A cura di, San Francisco: Berrett-Koehler, 2003, pp. 94-110.
- [10] C. A. Lengnick-Hall, T. E. Beck e L.-H. M.L., «Developing a capacity for organizational resilience through strategic human resource management,» *Human Resource Management Review*, n. 21, pp. 243-255, 2011.

- [11] S. Ponomarov e M. Holcomb, «Understanding the concept of supply chain resilience,» *International Journal of Logistics Management*, vol. 20, n. 1, pp. 124-143, 2009.
- [12] H. Sharifi e Z. Zhang, «A methodology for achieving agility in manufacturing organisations: an introduction,» *International Journal of Production Economics*, n. 62, pp. 7-22, 1999.
- [13] S. Ponis e A. Spanos, «ERP II systems to support dynamic, reconfigurable and agile Virtual Enterprises,» *International Journal of Applied Systemic Studies*, vol. 2, pp. 265-280, 2009.
- [14] M. Christopher e H. Peck, «Building the Resilient Supply Chain,» *International Journal of Logistics Management*, vol. 15, pp. 1-14.
- [15] J. Fiksel, «Designing Resilient, Sustainable Systems,» *Environmental Science & Technology*, vol. 37, n. 23, pp. 5330-5339, 2003.
- [16] P. Datta, M. Christopher e A. P., «Agent-based modelling of complex production/distribution systems to improve resilience,» *International Journal of Logistics: Research and Applications*, vol. 10, n. 3, p. 187–203, 2007.
- [17] M. Falasca, C. Zobel e D. Cook, *A Decision Support Framework to Assess Supply Chain Resilience, in the proceedings of the 5th International ISCRAM Conference*, Washington, DC, 2008, pp. 596-605.
- [18] *Council Directive 2008/114/EC of 8 December 2008 on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection*, Bruxelles, 2008.
- [19] E. A. Luijff e M. H. Klave, *Protecting a Nation's Critical: Infrastructure: The First Steps*, 2004.
- [20] P. W. Parfomak, «Vulnerability of Concentrated Critical Infrastructure: Background and Policy Options , CRS Report for US Congress,» Washington (DC), 2008.
- [21] PCCIP, «Critical foundations: Protecting America's infrastructures, Report 040-000-00699-1,» Washington, DC, USA, 1997.

-
- [22] W. L. McGill, B. M. Ayyub e M. Kaminskiy, «Risk Analysis for Critical Asset Protection,» *Risk Analysis*, vol. Vol. 27 , n. 5, 2007.
- [23] R. Tolley e B. Turton, *Transport Systems, Policy and Planning: A Geographical Approach*, Londra: LongmanScientific&Technical, 1995.
- [24] E. Cascetta, *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*, Norwell, MA: Springer, KluwerAcademic Publishers, 2001.
- [25] R. G. Little, *Toward More Robust Infrastructure: Observations on Improving the Resilience and Reliability of Critical Systems, Proceedings of the 36th Hawaii International Conference on System Sciences*, National Research Council, 2002.
- [26] D. Mileti, *Disaster by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*, Washington, DC: Joseph Henry Press, 1999.
- [27] A. Cox, F. Prager e R. Adam, «Transportation security and the role of resilience: A foundation for operationa lmetrics,» *Transport Policy*, n. 18, pp. 307-317, 2010.
- [28] G. Tamaro, *World Trade Center "Bathtub": From Genesis to Armageddon*, Washington, D.C.: National Academy Press, 2002, pp. 11-17.
- [29] W. Langewiesche, «American Ground: Unbuilding the World Trade Center,» *The Atlantic Monthly*, pp. 44-79, 2002.
- [30] D. Freckleton, D. Heaslip, W. Louisell e J. Collura, «Evaluation of Resiliency of Transportation Networks After Disasters,» *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2284, p. 109–116, 2012.
- [31] Y. Sheffi e J. B. Rice, «A supply chain view of the resilient enterprise,» *MIT Sloan management review*, vol. 47, n. 1, pp. 41-48, 2005.
- [32] P. M. Murray-Tuite, *Comparison of transportation network resilience under simulated system optimum and user equilibrium conditions*, Falls Church (VA): 2006 Winter Simulation Conference, 2006.
- [33] S. McManus, E. Seville, D. Brunson e J. Vargo, *Resilience management:*

- A frame-work for assessing and improving the resilience of organizations*, 2007.
- [34] A. Z. Rose, *Economic Resilience to Disasters*, Los Angeles (CA): Published Articles & Papers, 2009.
- [35] M. Hammer e S. Stanton, How process enterprises really work, *Harvard Bus Rev*, 1999, pp. 108-118.
- [36] E. K. Morlok e D. J. Chang, *Measuring capacity flexibility of a transportation system*, Philadelphia, PA, USA: Forthcoming in *Transportation Research-A*, 2004.
- [37] D. Godschalk, «Urban hazard mitigation: creating,» 2002. [Online]. Available: www.arch.columbia.edu/Studio/Spring2003/UP/Accra/links/GodshalkResilientCities.doc. [Consultato il giorno 20 Gennaio 2013].
- [38] P. Trucco, E. Cagno e M. De Ambroggi, «Dynamic functional modelling of vulnerability and interoperability,» *Reliability Engineering and System Safety*, pp. 51-63, 2012.
- [39] A. Reggiani, «Network resilience for transport security: some methodological considerations,» *Transport policy*, 2012.
- [40] A. Barabási e Z. L.Oltvai, «Networks biology: understanding the cell's functional organisation.,» *Nature Reviews Genetics*, vol. 5, n. 2, p. 101–113, 2004.
- [41] H. Kim, C. Kim e Y. Chun, «Network reliability and resiliency of rapid transit system: a case study of the Transit System in the Greater Metropolitan Area of Washington, DC.,» in *North Regional Science Conference (NARSC)*, Denver, 2010.
- [42] L. G. S. Schintler, R. Kulkarni e R. Stough, «Moving from protection to resiliency: a path to securing critical infrastructure.,» in *Critical Infrastructure*, Berlino, Springer-Verlag, 2007, p. 291–307.
- [43] Y. Y. e. a. Haimes, «Inoperability Input-Output Model for Interdependent Infrastructure, Sectors. I-II,» *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 11, n. 2, pp. 67-79 / 80-92, 2005.

- [44] R. Setola, «Availability of healthcare services in a network-based scenario,» *International Journal of Networking and Virtual Organisations*, vol. 4, n. 2, pp. 130-144, 2007.
- [45] I. Eusgeld, W. Kröger, G. Sansavini, M. Schläpfer e E. Zio, «The role of network theory and object-oriented modeling within a framework for the vulnerability analysis of critical infrastructures,» *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 94, n. 5, pp. 954-963, 2009.
- [46] S. M. Rinaldi, J. P. Peerenboom e T. K. Kelly, «Identifying, Understanding, and Analyzing Critical Infrastructure Interdependencies,» *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 21, n. 11-25, 2001.
- [47] W. Kroger, «Critical infrastructures at risk: A need for a new conceptual approach and extended analytical tools,» *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 93, pp. 1781-1787, 2008.
- [48] W. H. Ip e D. Wang, «Resilience and Friability of Transportation Networks: Evaluation, Analysis and Optimization,» *IEEE systems journal*, vol. 5, n. 2, pp. 189-198, 2011.
- [49] L. Yingyan e Z. Lihui, «Defending Transportation Networks Against Random and Targeted Attacks,» *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2234, p. 31-40, 2011.
- [50] P. Pederson, D. Dudenhoefter e S. Hartley, «Critical Infrastructure Interdependency Modeling: A Survey of U.S. and International Research, INL/EXT-06-11464,» Idaho National Laboratory, USA, 2006.
- [51] N. I. S. a. A. Center, «Fait Analysis Infrastructure Tool Fact Sheet,» [Online]. Available: http://www.sandia.gov/mission/homeland/factsheets/nisac/FAIT_factsheet.pdf.
- [52] B. Bush, L. Dauelsberg, R. LeClaire, D. Powell, S. (. DeLand e M. Samsa, *Critical Infrastructure Protection Decision Support System (CIP/DSS) Project Overview*, Los Alamos National Laboratory, 2005.
- [53] G. E. Apostolakis e D. M. Lemon, «A Screening Methodology for the Identification and Ranking of Infrastructure Vulnerabilities Due to Terrorism,» *Risk Analysis*, vol. 25, n. 2, 2005.

- [54] G. Jerry, F. Ronald, P. James e W. Ronald, *Analyzing water/wastewater infrastructure interdependencies*, Argonne, (IL), USA: Infrastructure Assurance Center.
- [55] J. McManus, G. Baker, S. Redwine e P. Riley, «Network Security Risk Assessment Modeling (NSRAM) Application to Municipal Electric Power Grid,» 2004.
- [56] E. E. I. Lee, W. A. Wallace e J. Mitchell, «Restoration of services in interdependent infrastructure systems: a network flows approach,» 2007. [Online]. Available: <http://eaton.math.rpi.edu/faculty/Mitchell/papers/restorationIIS.html>. [Consultato il giorno 29 1 2013].
- [57] T. Guus, M. Marc, S. Edgar, v. L. Hans, N. Arturo, P. Helmut e H. Serge, «Design of Open Source Framework for Traffic and Travel Simulation,» *ournal of the Transportation Research Board*, n. 2291, p. 44–52, 2012.
- [58] Z. Nan, Y. Shu-Ta, C. Gang-Len, M. Alvin e Z. Michael, «Simulation-Based Emergency Evacuation System for Ocean City, Maryland During Hurricanes,» *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1992, 2005.
- [59] F. Mark, K. Robb, C. Jim e R. David, «Benefits of Geographic Information Systems in Managing a Major Transportation Program: Evaluation and Lessons Learned,» *Journal of the Transportation Research Board*, n. 2291, p. 1–7, 2012.
- [60] S. V. Croope e S. McNeil, «Improving Resilience of Critical Infrastructure Systems Postdisaster: Recovery and Mitigation,» *Journal of the Transportation Research Board*, n. 2234, p. 3–13, 2011.
- [61] T. S. Panwhar, R. Pitt e D. M. Anderson, «Development of a GIS-Based Hazardous Materials Transportation Management System: a Demonstration project,» University Transportation Center for Alabama, Alabama, USA, 2000.
- [62] N. O. Attoh-Okine, A. T. Cooper e S. A. Mensah, «Formulation of Resilience Index of Urban Infrastructure Using Belief Functions,» *IEEE SYSTEMS JOURNAL*, vol. 3, n. 2, pp. 147-153, 2009.

-
- [63] E. Todini, «Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach,» *Urban Water*, n. 2, pp. 115-122, September 2000.
- [64] H. R. Maier, B. J. Lence, B. A. Tolson e R. O. Foschi, «First-order reliability method for estimating reliability, vulnerability, and resilience,» *Water Resources Research*, vol. 37, n. 3, pp. 779-790, 2001.
- [65] A. Rose, «Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins,» *Environmental Hazards*, vol. 7, n. 4, pp. 383-398, 2007.
- [66] D. Henry e J. E. Ramirez-Marquez, «Generic metrics and quantitative approaches for system resilience as a function of time,» *Reliability Engineering and System Safety*, n. 99, pp. 114-122, 2012.
- [67] M. Bruneau, S. E. Chang, R. T. Eguchi, G. C. Lee, T. D. O'Rourke, A. M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W. A. Wallace e D. von Winterfeldt, «A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities,» *Earthquake Spectra*, vol. 19, n. 4, p. 733-752, November 2003.
- [68] N. U. Serulle, K. Heaslip, B. Brady e C. J. William C. Louisell, «Resiliency of Transportation Network of Santo Domingo, Dominican Republic,» *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2234, p. 22-30, 2011.
- [69] WHO, «The great east Japan earthquake: a story of devastating natural disaster, a tale of human compassion,» World Health Organization, 2012.
- [70] N. Minato, «Collaborative management of regional air transport during natural disasters: Case of the 2011 East Japan earthquake and tsunami,» *Keio University, SDM faculty*, 2011.
- [71] M. Holt, R. J. Campbell e M. B. Nikitin, «Fukushima Nuclear Disaster. Response 7-5700,» U.S. Congressional Research Service, 2012.
- [72] Y. P. G. (YPG), «The record of East Japan great disaster,» 2011.
- [73] MLIT, «White Paper on Land, Infrastructure, Transport and Tourism - National Spatial Development to Protect People's Lives and Livelihood,»

- Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Tokyo, Japan, 2011.
- [74] T. Feldhoff, «Japan's regional airports: conflicting national, regional and local interests,» *Journal of Transport Geography*, n. 10, p. 165–175, 2002.
- [75] I. T. a. T. (. Ministry of Land, 2012. [Online]. Available: <http://www.mlit.go.jp/koku/flyjapan/>. [Consultato il giorno 9 Marzo 2013].
- [76] C. G. Cassandras e S. Lafertune, *Introduction to Discrete Event Systems*, New York (NY, USA): Springer Science, 2008.
- [77] A. company, «Anylogic: Multimethod Simulation Software,» XJtek, [Online]. Available: www.anylogic.com. [Consultato il giorno 23 03 2013].
- [78] J. S. Bureau, «Automobiles registered,» 31 Dicembre 2012. [Online]. Available: <http://stats-japan.com/t/kiji/10786>. [Consultato il giorno 25 03 2013].
- [79] Y. b. company, «Yamako Traffic,» [Online]. Available: <http://www.yamakobus.co.jp/>. [Consultato il giorno 25 03 2013].

Appendice A

Si riporta di seguito il dettaglio dell'output delle simulazioni per ciascuna delle analisi effettuate.

Baseline																		
Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	297	15,68	444	25,43	9	0,53	0	0,00	0	0,00	206,97	13,89	0	0,00	160,39	11,41	237	12,90
13-mar	4041	111,21	2596	76,81	323	9,24	8	0,25	9	0,25	878,00	9,83	15,0586	6,74	106,56	15,65	781	23,37
14-mar	8603	226,53	4229	112,19	542	14,16	53	1,40	47	1,11	1327,56	8,03	66,7385	10,15	119,75	18,33	1116	27,49
15-mar	9205	187,84	2430	43,15	464	8,01	84	1,47	50	1,03	1252,18	16,16	92,242	3,48	212,60	22,18	1904	36,31
16-mar	7467	180,30	134	2,96	53	1,28	83	1,81	71	1,78	1051,09	18,45	84,8886	2,91	179,93	20,34	2182	52,22
17-mar	4834	111,57	1	0,02	56	1,21	76	1,78	32	0,72	749,50	29,19	71,6277	3,24	154,02	27,13	2083	46,00
18-mar	1899	40,86	17	0,32	91	1,84	84	1,59	25	0,47	283,18	32,15	81,983	2,59	167,22	17,64	2479	50,61
19-mar	37	1,50	262	11,72	88	3,67	86	3,47	1	0,04	42,70	9,99	80,3864	5,08	146,09	25,73	2417	100,90
20-mar	1	0,02	613	14,54	94	2,27	85	1,95	0	0,00	76,83	12,09	80,7515	2,71	159,61	10,25	2571	57,36
21-mar	0	0,00	775	20,06	119	3,20	80	2,23	1	0,00	98,80	13,60	75,4984	2,69	125,05	11,62	2345	62,00
22-mar	8	0,19	821	18,51	164	3,94	83	1,82	1	0,02	106,48	16,94	74,8119	2,69	166,41	10,81	2629	62,53
23-mar	180	5,83	920	34,11	214	7,72	82	2,80	3	1,02	140,55	27,29	73,0906	2,85	167,29	17,39	2599	91,51
24-mar	542	20,29	1081	37,17	270	9,93	82	2,65	1	0,03	199,45	31,55	73,6097	2,88	168,36	22,02	2729	94,69
25-mar	530	16,13	1285	40,72	324	9,10	83	2,58	5	0,15	216,04	27,98	76,3615	3,22	152,68	16,01	2676	80,69
26-mar	44	1,25	1198	29,36	328	9,23	88	2,28	9	0,25	192,84	22,10	82,0603	3,19	192,12	20,01	2852	76,06
27-mar	1	0,03	957	22,42	296	7,05	85	1,95	6	0,15	150,88	24,72	79,988	2,87	93,77	8,83	2556	64,46
28-mar	102	2,40	1050	24,41	328	7,73	83	1,95	1	0,03	146,69	26,06	80,0299	3,39	118,48	11,96	2313	56,85
29-mar	1095	28,13	1353	31,87	405	9,91	81	2,15	0	0,00	294,28	36,59	73,3182	3,33	134,21	8,88	2304	56,47
30-mar	1369	32,26	1671	41,86	483	12,45	87	2,30	0	0,00	352,84	27,50	75,1061	2,51	157,21	10,14	2631	66,17
31-mar	218	6,31	2009	55,17	554	16,41	89	2,68	0	0,00	251,07	25,16	76,2952	4,26	171,63	11,74	2706	82,29

Trasporto regionale terrestre

-10% bus regionali																		
Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	291	18,86	438	23,83	9	0,42	0	0,00	0	0,01	204,02	12,54	0,00	0,00	157,14	9,37	236	12,10
13-mar	4041	171,06	2591	99,03	321	14,05	8	0,31	9	0,39	877,55	6,98	14,42	7,25	103,29	19,21	769	31,91
14-mar	8602	233,05	4221	108,64	565	14,81	51	1,40	35	0,95	1330,80	6,52	65,06	9,98	117,62	15,03	1117	29,67
15-mar	9439	222,83	2695	59,95	483	10,73	81	1,99	11	0,25	1311,09	14,79	90,24	3,87	173,96	21,21	1809	42,54
16-mar	8346	192,05	326	6,98	77	1,63	81	1,77	45	0,89	1123,53	18,26	83,59	2,55	154,79	16,00	2191	45,92
17-mar	6496	182,37	3	0,09	48	1,19	72	1,95	5	0,14	978,76	33,59	69,23	3,25	132,45	23,09	1959	53,50
18-mar	4364	105,36	34	0,78	60	1,24	82	2,03	0	0,00	620,24	36,73	80,79	2,45	135,21	10,47	2331	52,94
19-mar	1013	13,60	262	3,70	59	0,85	99	1,35	372	4,64	195,15	27,22	90,15	2,45	256,90	7,51	2977	39,89
20-mar	8	0,08	538	5,30	87	0,77	85	0,79	229	2,04	68,61	10,79	81,76	2,44	353,86	29,89	2712	25,56
21-mar	0	0,00	654	18,37	117	3,60	80	2,43	6	0,17	84,83	12,54	75,09	2,47	259,55	39,91	2591	76,86
22-mar	23	0,53	702	17,35	153	3,75	83	2,26	2	0,05	94,46	16,14	74,92	2,61	170,75	14,80	2629	66,98
23-mar	276	10,08	815	29,16	207	7,48	81	2,84	3	0,10	139,21	25,92	73,16	2,30	158,97	19,63	2557	94,81
24-mar	587	17,68	985	28,41	258	7,67	82	2,20	0	0,00	191,99	22,28	73,55	2,35	163,59	16,75	2732	77,17
25-mar	431	11,09	1186	30,14	308	8,79	85	2,49	38	1,04	192,58	29,96	77,52	2,98	164,43	17,01	2709	73,31
26-mar	23	0,78	1121	34,65	313	10,02	89	2,97	2	0,07	179,56	29,27	83,62	2,84	202,91	26,94	2863	94,44
27-mar	1	0,03	879	22,19	283	8,34	85	2,40	9	0,22	140,59	30,03	80,53	2,78	93,40	6,55	2559	68,79
28-mar	126	3,18	960	21,50	319	7,40	83	1,86	0	0,00	140,89	27,97	79,68	2,81	119,88	8,71	2325	54,40
29-mar	1121	28,35	1272	32,13	394	8,87	81	1,83	0	0,00	284,47	36,38	73,55	2,70	136,25	8,94	2331	54,73
30-mar	1299	39,00	1583	47,83	477	12,23	88	2,48	0	0,00	333,72	32,72	75,88	3,19	160,13	10,07	2652	73,52
31-mar	163	5,52	1897	63,55	557	17,59	88	2,94	2	0,06	235,53	32,82	76,45	4,63	169,18	12,53	2674	85,73

-20% bus regionali																		
Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata													
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
12-mar	308	17,69	437	23,02	9	0,39	0	0,04	0	0,04	212,49	11,42	0,01	0,08	161,90	9,65	238	10,9416
13-mar	4055	155,57	2582	88,88	303	11,46	7	0,27	10	0,36	869,28	14,01	12,48	6,92	103,25	17,28	779	27,9046
14-mar	8849	269,40	4260	118,63	550	16,74	39	1,04	9	0,24	1357,06	8,98	50,89	12,06	112,31	18,04	1090	31,816
15-mar	10345	325,35	3225	94,81	479	13,28	73	2,25	0	0,00	1458,31	19,44	81,23	4,91	107,46	20,33	1619	49,5795
16-mar	10012	332,87	1254	41,12	124	3,92	76	2,33	1	0,03	1359,03	26,48	79,27	3,27	97,66	11,81	1995	65,0917
17-mar	8953	304,40	53	2,07	71	2,89	72	2,88	1	0,03	1304,46	28,11	69,34	3,76	98,81	9,34	1853	69,6929
18-mar	7625	183,38	64	1,46	157	3,60	79	1,80	0	0,03	1076,43	29,11	78,77	3,57	113,34	10,45	2172	51,2635
19-mar	4985	45,77	271	2,72	243	2,42	94	0,83	163	1,71	750,99	33,03	86,36	2,54	228,80	9,37	2897	27,6776
20-mar	1601	19,73	660	7,62	357	4,26	100	1,10	598	6,63	300,53	31,64	92,95	3,53	323,18	17,59	2897	35,1743
21-mar	20	0,17	1135	10,63	490	4,44	81	0,69	238	2,21	160,45	11,87	76,73	3,28	461,22	31,56	2659	22,8765
22-mar	0	0,00	1672	25,12	641	8,70	81	1,18	63	0,90	224,64	14,81	74,11	3,11	284,85	44,97	2670	36,941
23-mar	1	0,03	2263	75,55	806	26,25	80	2,33	16	0,45	291,85	15,31	71,49	2,77	197,20	39,62	2604	79,2484
24-mar	41	0,96	2915	78,38	976	25,59	85	2,29	1	0,03	371,57	16,58	74,89	2,75	196,03	19,49	2804	69,4288
25-mar	251	7,69	3615	119,89	1155	38,56	82	2,67	1	0,03	475,43	26,52	75,11	2,17	160,26	17,43	2579	82,0847
26-mar	62	2,02	4044	138,89	1275	39,27	87	2,99	0	0,05	563,75	22,31	81,17	3,02	169,62	13,94	2720	86,8175
27-mar	1	0,03	4302	114,61	1372	34,43	83	2,12	4	0,11	622,65	17,36	78,89	3,07	85,04	7,96	2376	65,7308
28-mar	222	4,28	4876	104,31	1521	31,97	80	1,76	0	0,10	669,69	27,91	77,52	2,93	107,80	9,50	2194	45,7462
29-mar	1253	27,71	5680	127,31	1726	37,89	79	1,70	0	0,07	838,36	23,99	71,27	3,68	127,38	9,72	2241	51,464
30-mar	1182	29,70	6501	141,39	1920	47,22	87	2,15	0	0,00	832,24	30,89	74,88	2,63	152,84	9,37	2587	59,8567
31-mar	82	3,80	7342	315,27	2125	87,23	86	3,39	0	0,03	771,91	18,68	74,44	4,18	148,25	15,37	2471	106,106

+10% bus regionali

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata						Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
12-mar	306	18,11	440	31,33	9	0,61	0	0,00	0	0,01	211,62	13,18	0,00	0,03	159,91	10,43	237	14,24
13-mar	4012	191,33	2596	156,27	327	17,44	4	0,10	2	0,05	868,91	12,26	6,71	5,00	86,23	11,47	729	34,80
14-mar	8405	144,26	4222	72,91	544	9,20	55	0,27	62	0,30	1312,60	8,45	69,45	9,26	116,67	13,52	1114	19,31
15-mar	8188	1,24	2047	0,36	445	0,07	91	0,17	255	0,47	1122,27	17,73	97,54	2,95	282,84	25,17	1954	0,32
16-mar	5250	141,37	25	0,72	54	1,84	84	0,42	148	0,79	811,37	19,83	85,00	3,60	295,01	42,82	2264	63,77
17-mar	1262	23,09	0	0,00	46	0,91	82	3,40	231	10,39	225,37	22,18	75,92	2,95	227,11	27,57	2202	39,08
18-mar	11	0,30	5	0,18	38	1,20	75	2,39	0,1	0,00	5,98	3,15	76,11	2,61	204,94	37,16	2114	59,58
19-mar	0	0,00	207	4,68	21	0,41	79	1,91	0,1	0,00	24,89	6,65	75,48	2,86	113,15	9,28	2290	47,30
20-mar	29	0,77	507	15,07	24	0,68	84	4,12	0	0,01	61,89	8,85	79,37	2,90	154,72	10,55	2536	65,25
21-mar	440	14,05	567	24,15	24	0,78	77	1,95	0	0,00	117,05	19,66	73,64	2,49	105,30	12,20	2209	73,12
22-mar	862	23,44	335	11,64	30	0,99	78	3,89	0	0,00	133,05	17,00	74,82	3,01	117,34	13,15	2423	66,21
23-mar	510	17,70	101	3,37	39	1,53	81	1,37	6	0,12	71,11	24,54	74,99	2,65	143,18	16,36	2612	84,73
24-mar	33	0,68	64	1,23	39	0,99	87	2,06	9	0,19	14,28	10,90	76,18	2,86	202,87	14,14	2928	59,78
25-mar	1	0,01	77	0,68	36	0,41	86	1,17	52	0,64	11,75	5,13	76,42	2,19	194,71	15,40	2746	26,27
26-mar	0	0,00	11	0,33	24	0,91	87	2,43	0	0,00	4,62	2,51	80,18	3,49	194,11	30,40	2708	90,21
27-mar	0	0,00	8	0,24	29	0,76	84	2,75	5	0,16	4,00	1,08	78,99	2,13	82,89	6,54	2395	66,32
28-mar	96	1,86	166	3,80	48	1,29	82	1,91	1	0,02	25,66	9,70	78,98	2,81	113,29	7,69	2282	47,24
29-mar	1146	19,96	431	10,35	64	1,32	82	3,15	0	0,00	158,31	24,99	72,88	3,03	135,54	5,62	2301	43,00
30-mar	1498	40,91	446	14,76	68	2,31	90	2,85	0	0,00	207,47	18,60	77,18	3,42	165,43	10,36	2697	74,40
31-mar	269	6,95	336	7,41	68	1,46	94	2,92	8	0,26	70,91	16,21	80,43	4,62	185,35	10,37	2834	67,40

+20% bus regionali

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	298	15,86	436	29,19	9	0,61	0	0,00	0	0,00	206,55	10,65	0	0,00	162,71	11,86	235	12,37
13-mar	4043	196,12	2588	113,97	333	15,10	5	0,21	2	0,10	865,74	10,76	8,5325	5,59	90,69	16,01	742	33,86
14-mar	8354	175,47	4226	79,45	586	12,20	57	1,10	69	1,45	1311,43	6,60	71,152	8,34	119,31	12,63	1126	22,76
15-mar	7511	48,47	1765	34,50	455	8,92	94	1,66	425	8,90	1044,46	14,11	100,64	3,08	312,04	23,64	1954	0,00
16-mar	3767	24,01	15	0,11	52	0,33	83	0,54	274	1,78	614,62	26,13	84,715	3,15	396,93	37,72	2340	16,50
17-mar	216	7,60	0	0,71	39	1,38	76	2,53	173	6,11	51,58	11,34	72,055	3,79	303,09	35,68	2106	69,80
18-mar	2	0,08	2	0,07	21	0,89	74	2,87	3	1,31	3,24	1,86	75,504	2,73	170,46	48,55	2056	81,51
19-mar	0	0,98	200	4,92	15	0,37	80	2,19	0	0,32	22,70	9,79	76,112	2,95	113,30	11,54	2285	58,15
20-mar	12	1,65	546	11,05	15	0,28	84	1,64	0	0,15	62,66	11,69	79,443	3,13	152,97	9,99	2517	52,46
21-mar	308	13,63	496	21,82	16	0,66	78	3,19	0	0,01	95,14	23,01	74,561	2,84	118,02	15,88	2280	103,38
22-mar	802	25,48	89	3,17	17	0,64	79	2,98	1	0,04	96,24	24,09	73,909	2,26	123,44	20,24	2434	84,42
23-mar	675	32,76	2	0,10	17	0,94	80	4,26	1	0,05	76,53	23,83	74,511	3,19	120,79	17,44	2488	128,04
24-mar	117	2,82	5	0,11	18	0,44	85	2,04	1	0,02	15,57	18,41	75,76	2,77	185,95	18,12	2897	72,97
25-mar	5	0,76	28	0,31	20	0,23	86	1,01	46	0,47	5,41	4,88	76,461	2,69	188,92	10,12	2743	29,98
26-mar	1	0,28	7	0,20	15	0,45	86	2,63	0	0,00	2,83	1,86	78,619	2,94	188,37	26,08	2704	80,36
27-mar	0	1,56	1	0,03	20	0,55	83	2,49	6	0,16	2,26	0,55	77,983	2,74	81,85	6,96	2378	68,28
28-mar	39	0,85	91	1,96	21	0,40	82	1,74	0	0,00	11,18	5,49	78,274	2,57	114,10	8,36	2295	46,21
29-mar	986	23,08	453	9,31	22	0,45	79	1,53	0	0,52	139,71	23,15	71,49	2,47	125,23	8,34	2227	47,66
30-mar	1543	46,71	433	12,53	22	0,58	89	2,47	0	0,00	203,80	18,92	76,728	3,33	156,45	9,28	2636	74,64
31-mar	390	10,97	51	1,45	23	0,74	94	2,61	19	0,62	53,49	11,73	80,199	4,01	184,96	16,20	2827	86,93

Bus regionali 78 posti

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	40	2,41	426	22,59	9	0,41	1	0,05	5	0,28	50,00	2,14	0,2636	0,76	167,55	12,81	298	14,65
13-mar	3316	60,84	2363	51,97	302	5,74	36	0,69	181	4,01	708,68	13,00	50,437	12,70	191,19	18,77	854	17,41
14-mar	6541	26,25	2896	11,45	325	1,47	75	0,33	399	1,73	966,51	12,55	89,292	4,69	378,35	31,78	1286	5,33
15-mar	3850	7,93	232	10,21	65	2,69	99	0,18	939	2,00	523,93	13,12	105,52	3,81	554,50	30,33	1954	3,78
16-mar	149	0,78	2	0,01	9	0,04	79	0,38	313	1,57	37,97	8,42	81,717	4,65	699,83	60,01	2343	11,29
17-mar	1	0,05	0	0,00	38	1,72	60	3,26	28	1,49	4,32	0,91	60,153	4,57	299,85	74,14	1848	91,43
18-mar	0	0,01	1	0,04	23	0,86	75	2,75	0	0,00	3,53	0,77	76,728	3,00	79,89	19,50	1919	68,51
19-mar	14	0,33	7	0,17	21	0,48	82	1,89	0	0,00	4,74	3,06	77,52	2,61	118,84	10,61	2348	54,31
20-mar	411	22,74	7	0,41	24	1,25	84	4,60	0	0,01	47,41	22,88	80,222	4,58	131,49	23,97	2388	136,79
21-mar	871	28,19	7	0,20	24	0,76	72	2,27	0	0,00	98,81	12,76	73,098	3,92	56,84	11,29	1988	61,63
22-mar	336	17,08	8	0,44	24	1,33	81	4,21	1	0,06	43,92	26,67	77,153	2,88	123,07	25,34	2524	132,67
23-mar	5	0,09	8	0,14	25	0,44	84	1,49	2	0,04	3,98	1,64	74,364	3,04	170,14	9,43	2641	45,89
24-mar	0	0,30	8	0,16	25	0,53	89	1,73	2	0,04	3,57	0,56	77,907	3,07	202,54	10,81	2918	63,04
25-mar	0	0,00	7	0,09	26	0,36	88	1,24	44	0,55	3,41	0,53	77,264	3,07	187,06	12,67	2729	36,45
26-mar	0	0,00	3	0,09	21	0,64	88	2,39	0	0,00	3,17	0,64	81,397	2,75	184,08	23,87	2683	74,84
27-mar	0	0,00	4	0,11	26	0,76	85	2,46	6	0,17	3,34	0,65	80,212	3,08	86,32	8,14	2401	72,77
28-mar	2	0,05	6	0,15	27	0,74	84	2,15	1	0,02	1,93	3,07	80,228	2,97	115,50	9,67	2322	57,66
29-mar	568	21,33	5	0,21	28	1,23	82	3,61	0	0,00	50,93	18,10	74,622	2,76	134,25	9,95	2335	93,56
30-mar	1279	43,63	3	0,10	28	0,93	87	2,91	0	0,00	130,63	11,02	74,611	3,28	144,44	10,76	2524	81,91
31-mar	285	9,32	4	0,12	27	0,84	93	3,08	4	0,13	33,87	16,64	80,71	5,02	176,54	11,78	2747	86,26

Collegamento stazione aeroporto

-1 navetta per tipo																		
Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata						Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
12-mar	295	17,73	438	29,52	9	0,74	0	0,03	0	0,00	206,32	13,58	0	0,06	165,00	13,23	239	15,28
13-mar	4035	145,81	2600	87,92	325	12,39	15	0,60	14	0,56	875,93	8,68	27	11,10	104,00	17,30	775	28,99
14-mar	8558	191,34	4231	93,14	545	13,57	56	1,36	35	0,81	1327,35	7,86	73	8,49	116,00	17,21	1124	25,88
15-mar	9154	189,16	2435	47,52	473	10,23	87	1,61	41	0,85	1249,58	12,67	96	3,51	206,00	22,70	1902	38,34
16-mar	7399	146,53	140	2,85	56	1,07	88	1,71	67	1,26	1043,64	20,75	92	4,04	178,00	20,96	2186	44,04
17-mar	4751	103,32	1	0,02	56	1,46	80	2,07	34	0,85	738,54	26,59	77	1,96	157,00	29,26	2051	48,80
18-mar	1788	53,98	33	0,90	89	2,61	89	2,75	11	0,30	270,82	30,45	89	2,87	168,00	21,38	2479	70,67
19-mar	30	1,11	325	12,65	89	3,91	90	3,62	0	0,02	47,78	13,72	85	7,14	137,00	22,33	2380	95,72
20-mar	0	0,00	673	14,73	91	2,01	88	1,83	0	0,00	83,58	13,32	85	2,83	159,00	9,52	2575	52,46
21-mar	0	0,00	799	18,48	118	3,12	82	2,05	0	0,01	101,55	16,46	78	3,17	127,00	11,40	2348	58,83
22-mar	12	0,26	854	18,60	157	3,08	88	1,94	1	0,02	109,88	21,49	82	3,52	167,00	10,71	2645	53,94
23-mar	206	8,40	966	35,35	209	8,29	87	2,98	2	0,07	148,10	34,13	79	3,20	162,00	18,74	2582	98,21
24-mar	585	18,12	1118	31,07	260	7,65	85	2,78	0	0,00	206,88	30,11	78	3,37	160,00	19,46	2697	81,11
25-mar	554	12,26	1314	29,83	324	6,59	85	1,78	17	0,40	220,61	29,21	80	2,90	156,00	13,99	2685	58,72
26-mar	39	1,00	1221	34,37	333	9,68	92	2,59	1	0,03	195,31	26,32	88	3,35	189,00	20,15	2851	76,87
27-mar	1	0,02	974	23,48	303	7,88	89	2,31	13	0,33	154,07	31,17	86	2,48	94,00	6,19	2498	61,45
28-mar	99	2,82	1073	31,33	333	8,34	87	2,46	1	0,03	146,28	29,86	85	3,71	122,00	10,64	2345	64,48
29-mar	1077	23,15	1390	29,42	406	8,51	86	1,91	0	0,00	295,21	37,95	80	3,71	129,00	8,21	2302	50,34
30-mar	1347	37,73	1715	46,89	482	13,35	95	2,57	0	0,03	356,56	31,54	84	3,46	153,00	10,12	2632	70,00
31-mar	214	3,99	2052	44,71	559	12,13	95	2,10	1	0,02	254,15	25,00	86	4,13	167,00	7,99	2689	54,05

-2 navette per tipo

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	293	17,01	437	21,07	9	0,44	0	0,00	0	0,00	204,22	12,09	0,06	0,16	159,89	13,46	235	11,62
13-mar	4035	138,07	2593	82,56	326	11,51	25	0,84	12	0,38	876,46	11,16	45,83	12,91	94,89	10,93	769	24,73
14-mar	8560	190,05	4206	94,70	550	13,71	63	1,39	36	0,79	1327,46	8,89	84,44	5,78	108,31	16,66	1114	26,80
15-mar	9184	212,78	2405	55,31	476	12,65	91	2,33	40	1,01	1245,50	16,08	105,22	3,59	200,00	22,45	1890	45,66
16-mar	7444	193,25	129	3,23	57	1,46	94	2,20	62	1,65	1049,06	17,41	103,62	3,39	174,17	22,60	2185	53,26
17-mar	4813	123,44	1	0,02	57	1,28	87	2,32	33	0,74	745,33	27,35	87,81	3,87	148,27	35,87	2052	50,41
18-mar	1874	57,84	22	0,71	92	3,27	95	2,84	9	0,30	280,29	27,49	100,47	3,56	160,03	28,99	2476	80,02
19-mar	35	1,36	290	11,98	92	3,14	99	3,70	0	0,03	45,44	10,71	99,98	5,97	136,48	20,20	2404	90,83
20-mar	0	0,00	638	12,81	101	2,44	97	1,95	0	0,00	79,97	11,47	98,51	4,30	155,70	8,94	2592	57,27
21-mar	0	0,00	782	15,13	130	2,76	91	1,93	0	0,01	100,98	12,00	91,99	3,25	120,13	7,10	2349	49,29
22-mar	13	0,27	831	16,62	170	3,57	96	1,92	0	0,01	108,61	13,54	93,73	3,38	161,31	9,49	2649	56,49
23-mar	191	5,82	929	27,54	218	6,27	95	3,01	2	0,06	143,13	25,50	91,5	3,61	156,04	15,16	2596	80,00
24-mar	521	17,28	1094	38,71	273	8,58	93	3,32	1	0,04	197,54	23,67	89,94	4,91	161,68	20,81	2735	92,87
25-mar	530	18,07	1314	45,10	343	10,97	91	2,85	27	0,83	219,69	29,94	90,66	3,52	148,39	20,27	2660	85,65
26-mar	60	2,07	1257	41,60	351	11,23	98	3,15	3	0,10	203,28	26,12	98,5	3,84	188,51	22,71	2875	91,23
27-mar	1	0,02	1015	28,61	324	7,79	95	2,52	13	0,37	161,70	26,37	99,17	3,99	88,22	7,45	2481	65,73
28-mar	92	2,18	1101	28,65	359	9,05	95	2,35	1	0,03	155,46	25,90	99,36	3,72	115,66	9,15	2339	56,89
29-mar	1048	21,74	1402	33,11	441	9,92	96	2,19	0	0,00	298,12	37,41	94,55	4,01	126,05	6,45	2308	52,20
30-mar	1352	28,78	1730	36,83	517	9,97	102	2,32	0	0,06	357,39	30,47	98,03	2,73	146,26	7,41	2613	55,30
31-mar	226	6,21	2051	57,11	591	16,60	102	2,77	2	0,05	257,92	26,34	98,63	4,66	162,06	12,21	2702	80,99

-3 navette per tipo

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	295	22,02	436	27,80	9	0,57	0	0,00	0	0,00	206,74	14,08	0,96	1,21	159,47	10,66	235	13,89
13-mar	4043	143,67	2602	87,41	319	12,66	47	1,66	22	0,87	874,63	8,86	86,12	17,14	83,37	8,73	765	28,55
14-mar	8579	191,88	4228	112,30	535	14,61	75	1,99	47	1,15	1328,03	7,51	104,94	3,72	112,82	15,20	1126	27,95
15-mar	9170	175,46	2417	47,44	460	8,76	102	2,13	42	0,87	1248,49	17,20	130,26	3,12	201,40	22,11	1909	36,35
16-mar	7422	177,87	130	3,16	51	1,44	100	2,61	55	1,47	1048,65	23,37	124,89	4,23	167,34	21,10	2175	57,72
17-mar	4789	149,35	1	0,03	59	1,72	96	2,78	25	0,74	743,91	29,44	112,68	3,64	136,41	29,10	2050	58,28
18-mar	1851	36,78	23	0,40	97	1,82	104	1,84	14	0,26	278,76	29,94	124,04	3,44	154,53	19,00	2477	45,44
19-mar	35	1,25	312	12,32	98	3,53	107	4,13	0	0,00	48,10	12,78	121,15	2,96	133,21	23,67	2405	88,16
20-mar	1	0,02	645	15,13	105	2,39	107	2,34	0	0,02	81,82	12,77	123,1	3,37	149,14	10,86	2590	57,12
21-mar	0	0,01	781	19,09	125	2,72	102	2,34	0	0,00	100,09	13,96	117,38	3,74	112,43	10,29	2348	53,09
22-mar	5	0,11	826	17,00	167	3,63	105	2,24	1	0,02	107,38	14,36	119,39	2,68	153,10	9,27	2630	58,57
23-mar	169	5,55	923	30,23	210	6,89	105	4,04	3	0,11	139,84	24,15	118,51	4,08	154,58	16,92	2612	93,70
24-mar	566	16,50	1078	28,76	266	7,25	103	2,89	0	0,00	200,87	27,95	115,3	5,03	154,43	17,96	2725	73,43
25-mar	570	19,07	1288	45,73	332	9,74	98	3,38	22	0,74	220,97	29,20	114,11	4,40	139,28	18,48	2645	86,15
26-mar	52	1,55	1220	37,17	335	9,83	105	3,42	1	0,03	196,87	23,02	119,12	4,26	181,63	25,92	2863	86,28
27-mar	1	0,03	973	26,97	299	8,83	98	2,78	12	0,36	154,14	24,67	119,86	3,22	86,46	7,64	2485	70,73
28-mar	112	2,72	1055	25,04	330	7,66	99	2,45	1	0,03	147,40	24,22	114,31	2,78	109,24	9,48	2324	59,43
29-mar	1100	27,34	1383	36,09	399	10,66	102	2,74	0	0,01	296,13	38,48	117,22	3,88	122,84	9,25	2319	62,64
30-mar	1356	46,66	1687	58,49	471	18,07	107	3,93	0	0,01	351,11	33,62	120,69	3,24	144,42	15,39	2641	100,74
31-mar	215	6,30	2008	63,33	551	16,65	106	3,17	0	0,01	249,58	28,24	121,58	2,81	154,87	12,99	2671	80,15

+ 1 navetta per tipo

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	297	19,49	439	26,24	9	0,62	0	0,00	0	0,00	206,56	11,52	0	0,00	162,58	11,33	235	12,87
13-mar	4058	135,16	2602	91,84	322	12,20	4	0,15	12	0,42	876,59	10,49	6,53	5,83	111,96	17,97	775	27,52
14-mar	8625	209,49	4225	92,90	542	12,33	42	0,99	40	0,82	1329,26	6,31	52,42	11,97	131,69	19,36	1116	25,17
15-mar	9214	183,32	2415	49,79	466	8,79	84	1,83	47	0,93	1250,60	11,85	90,26	2,97	211,36	21,69	1908	38,31
16-mar	7476	158,86	129	3,10	53	1,13	82	1,92	68	1,51	1054,19	16,94	83,53	3,68	184,13	21,27	2174	48,99
17-mar	4833	95,96	1	0,02	57	1,26	75	1,55	46	0,97	749,67	25,49	71,09	3,56	160,50	30,18	2050	42,62
18-mar	1882	48,99	17	0,48	83	2,13	83	2,12	11	0,29	280,88	27,05	80,33	3,10	177,77	25,61	2501	64,85
19-mar	35	1,33	266	10,06	82	2,94	83	3,44	1	0,04	41,36	9,71	76,22	2,97	143,75	22,45	2397	92,56
20-mar	0	0,02	632	13,49	101	2,20	84	1,72	0	0,00	79,28	12,34	79,11	2,81	159,95	10,29	2563	53,54
21-mar	0	0,00	800	16,57	131	2,66	79	1,72	0	0,01	102,22	14,04	73,92	2,75	126,98	10,18	2357	50,03
22-mar	5	0,12	852	21,30	161	4,00	81	1,90	2	0,05	109,33	14,92	73,06	2,66	167,40	10,76	2628	61,28
23-mar	198	6,68	957	33,33	203	5,94	80	2,32	3	0,10	146,04	24,81	70,76	2,32	166,27	16,12	2579	81,81
24-mar	567	23,22	1119	39,87	261	10,35	79	2,78	1	0,04	204,90	27,67	70,63	2,73	162,85	23,95	2693	101,00
25-mar	544	14,64	1321	33,74	323	9,11	81	2,11	20	0,57	219,81	26,78	73,91	2,78	157,33	16,81	2675	74,52
26-mar	40	1,16	1265	39,12	326	9,87	86	2,68	3	0,08	199,96	21,79	79,61	3,62	191,19	27,70	2830	81,11
27-mar	1	0,03	1021	26,33	294	8,22	83	2,30	11	0,27	158,97	22,83	77,46	3,54	94,86	7,87	2513	66,14
28-mar	80	1,75	1098	23,31	319	6,38	83	1,74	1	0,02	150,14	21,69	78,97	3,44	121,71	8,76	2331	47,90
29-mar	1023	23,42	1398	29,81	397	8,07	80	1,79	0	0,03	291,02	29,08	71,32	3,54	135,14	9,93	2310	50,52
30-mar	1353	40,80	1721	52,57	473	13,60	84	2,52	0	0,00	351,23	25,41	72,09	2,43	155,67	10,59	2601	77,43
31-mar	248	5,93	2066	58,32	551	14,80	85	2,11	1	0,02	256,75	20,37	72,1	4,93	174,01	11,74	2710	71,03

+2 navette per tipo

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	297	17,01	434	20,70	9	0,47	0	0,00	0	0,00	206,14	12,41	0	0,00	158,39	11,02	233	11,69
13-mar	4041	114,87	2575	70,65	323	8,36	1	0,03	12	0,35	875,53	12,37	2,19	2,93	119,14	14,97	784	20,93
14-mar	8585	174,94	4211	96,99	550	11,06	29	0,57	40	0,85	1327,74	8,83	36,29	13,02	140,79	16,12	1112	24,21
15-mar	9177	191,21	2427	57,85	475	10,35	82	2,02	48	1,10	1251,08	15,97	86,07	3,49	212,12	27,43	1897	43,77
16-mar	7427	185,96	137	3,73	56	1,38	81	2,05	71	1,87	1049,46	19,00	81,78	3,22	188,34	25,01	2187	57,34
17-mar	4781	112,32	1	0,02	54	1,29	73	1,70	40	0,93	741,82	31,51	66,98	3,11	163,59	34,26	2051	49,27
18-mar	1855	50,31	21	0,54	82	1,93	82	2,00	10	0,25	275,97	37,97	78,31	4,09	175,61	23,50	2496	62,28
19-mar	38	1,55	298	11,52	82	3,44	82	3,01	0	0,01	45,36	13,19	74,91	3,25	148,45	24,24	2420	97,79
20-mar	1	0,03	664	16,77	86	2,27	83	2,28	0	0,00	81,47	11,02	77,93	2,37	160,24	12,36	2569	65,73
21-mar	1	0,83	806	23,39	120	3,35	78	2,13	0	0,02	102,27	12,25	72,75	2,52	127,23	11,64	2345	67,04
22-mar	9	0,18	845	16,24	166	3,08	81	1,76	1	0,02	109,62	13,79	71,89	2,64	169,72	10,43	2628	53,90
23-mar	181	6,51	957	29,87	216	7,49	80	2,74	2	0,07	144,50	25,45	69,89	3,04	172,74	17,10	2614	87,63
24-mar	527	19,89	1123	42,29	271	10,63	80	3,06	1	0,04	201,88	30,70	70,49	3,06	169,45	24,46	2733	104,27
25-mar	543	13,51	1347	33,06	328	9,45	80	2,14	22	0,61	223,53	29,51	73,12	2,59	157,62	15,23	2663	69,97
26-mar	53	1,55	1284	38,00	328	9,56	84	2,54	1	0,03	202,90	25,85	78,07	2,77	196,97	22,51	2870	90,47
27-mar	1	0,03	1053	30,81	300	9,31	82	2,73	9	0,27	163,41	29,65	76,24	3,47	94,96	7,01	2498	77,50
28-mar	98	2,21	1136	25,91	331	6,81	82	1,94	1	0,02	155,82	27,05	77,31	3,62	120,79	10,68	2320	50,50
29-mar	1082	24,48	1446	35,22	409	9,60	78	1,91	0	0,00	303,38	30,41	70,1	2,85	134,53	8,27	2294	53,02
30-mar	1350	36,89	1774	47,61	487	14,29	84	2,52	0	0,10	359,47	28,24	70,52	2,79	162,49	10,43	2641	76,05
31-mar	217	5,61	2105	55,94	554	13,82	83	2,07	2	0,05	260,60	27,24	69,49	4,30	173,78	12,21	2688	67,64

+3 navette per tipo

Giorno	Code [persone]						Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]					
	regional						station		terminal		regional				station		terminal	
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	297	13,89	447	20,53	9	0,43	0	0,00	0	0,00	205,31	11,39	0	0,00	159,09	8,10	236	13,94
13-mar	4203	113,18	2472	67,90	336	9,84	7	0,20	9	0,24	870,71	23,99	14,937	0,39	105,68	2,64	779	20,19
14-mar	8757	209,12	4422	100,79	550	11,72	47	1,04	47	0,93	1316,67	29,30	66,191	1,57	118,78	2,65	1113	23,29
15-mar	9636	205,43	2476	56,20	489	10,94	74	1,76	50	1,16	1242,16	27,28	91,495	1,93	210,88	5,00	1899	43,64
16-mar	7650	186,43	132	3,34	57	1,61	73	1,81	70	1,98	1042,58	29,56	84,201	2,26	178,46	5,10	2176	59,18
17-mar	4829	123,22	1	0,02	51	1,32	67	1,66	32	0,71	743,35	16,04	71,055	1,59	152,74	3,78	2077	52,47
18-mar	1874	51,72	21	0,57	85	2,24	74	1,89	25	0,65	280,83	6,49	81,303	2,04	165,83	4,19	2473	56,98
19-mar	38	1,52	301	13,05	84	3,56	76	2,80	1	0,04	42,35	1,68	79,711	3,18	144,92	5,32	2410	98,57
20-mar	1	0,02	637	15,74	83	2,27	75	1,82	0	0,00	76,19	1,93	80,097	1,97	158,30	4,16	2564	63,89
21-mar	1	0,03	798	22,53	115	3,35	70	1,97	1	0,03	98,00	2,60	74,879	1,99	124,01	3,34	2339	70,59
22-mar	9	0,18	879	17,11	159	2,98	73	1,41	1	0,02	105,63	2,00	74,206	1,54	165,01	3,57	2622	55,63
23-mar	179	5,69	938	33,10	227	7,94	72	2,29	3	0,11	139,43	4,47	72,484	2,57	165,94	5,69	2592	95,35
24-mar	532	19,62	1168	47,52	271	10,84	72	2,84	1	0,04	197,83	7,50	73,021	2,95	166,95	7,01	2722	113,03
25-mar	521	14,62	1360	38,70	312	8,67	73	1,99	5	0,12	214,27	5,98	75,72	2,01	151,42	3,59	2669	71,51
26-mar	51	1,73	1233	37,24	321	9,62	77	2,54	9	0,29	191,26	6,48	81,371	2,36	190,50	5,48	2844	92,46
27-mar	1	0,03	1000	28,09	300	8,72	75	2,25	6	0,16	149,67	4,39	79,332	2,59	92,99	2,96	2550	80,45
28-mar	93	2,10	1170	25,05	324	7,44	73	1,69	1	0,02	145,50	3,14	79,358	1,58	117,52	2,69	2307	53,28
29-mar	1093	25,54	1475	34,06	393	9,24	71	1,54	0	0,00	291,81	7,01	72,732	1,72	133,14	2,92	2298	49,89
30-mar	1391	42,04	1685	49,68	477	13,32	77	2,14	0	0,00	350,02	10,20	74,49	1,95	155,96	4,38	2624	70,12
31-mar	210	5,05	2042	50,26	548	13,24	78	1,89	0	0,00	249,06	6,23	75,677	2,08	170,21	4,63	2699	69,80

+5 navette per tipo

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	307	16,58	443	23,79	10	0,50	0	0,00	0	0,00	211,33	11,20	0	0,00	159,79	11,56	236	12,21
13-mar	4049	93,93	2594	62,55	319	8,67	0	0,00	13	0,33	879,26	9,83	0,06	0,20	120,52	18,18	786	19,46
14-mar	8593	252,15	4216	127,53	535	15,35	2	0,05	44	1,29	1326,21	7,35	1,97	2,85	170,44	22,44	1121	31,66
15-mar	9186	203,07	2411	52,84	458	10,82	75	1,70	36	0,91	1247,57	16,22	71,64	3,15	217,57	28,67	1897	44,85
16-mar	7448	211,23	128	3,28	51	1,21	77	2,17	53	1,49	1049,34	18,05	73,93	3,67	182,35	19,25	2180	57,19
17-mar	4824	108,82	1	0,02	59	1,55	70	1,79	31	0,67	745,44	28,88	61,36	2,75	153,73	25,90	2039	48,78
18-mar	1881	37,54	22	0,45	90	1,90	79	1,59	15	0,31	282,63	25,76	72,88	3,17	173,32	16,70	2486	49,12
19-mar	35	1,26	286	8,88	87	3,09	79	2,61	0	0,22	44,06	9,99	68,68	3,35	149,02	24,47	2402	82,06
20-mar	0	0,00	649	17,15	99	2,68	80	1,96	0	0,01	80,56	12,35	72,83	2,85	162,21	13,31	2570	63,54
21-mar	0	0,00	819	20,04	130	3,31	76	1,85	0	0,00	104,16	13,86	67,26	3,02	130,77	11,75	2362	61,35
22-mar	5	0,13	892	19,54	182	4,14	79	1,77	1	0,02	115,25	17,28	66,72	2,71	168,31	10,71	2613	59,80
23-mar	207	5,49	990	27,12	231	6,67	78	2,02	1	0,03	153,54	27,47	65,18	3,01	171,03	12,04	2592	70,95
24-mar	569	14,37	1154	30,96	291	7,93	77	1,94	0	0,00	211,21	28,79	65,79	2,96	164,74	19,50	2699	71,90
25-mar	496	13,76	1371	38,43	346	10,43	78	2,15	23	0,72	222,38	25,42	68,49	2,88	156,30	18,58	2666	77,43
26-mar	32	1,02	1297	42,45	346	10,73	83	2,91	3	0,10	205,78	25,47	73,33	3,33	197,27	27,81	2843	96,22
27-mar	1	0,03	1042	33,92	313	10,66	80	2,83	8	0,28	163,90	27,83	71,21	3,19	96,66	9,20	2508	90,20
28-mar	111	3,23	1131	31,43	350	9,95	79	2,42	1	0,03	157,44	25,70	72,12	3,13	122,75	11,62	2326	69,13
29-mar	1121	27,40	1475	34,65	434	10,81	78	2,01	0	0,00	311,41	27,92	65,88	3,19	138,82	9,10	2326	58,19
30-mar	1348	37,49	1797	51,58	512	13,65	83	2,58	0	0,01	363,34	30,73	67,54	2,33	160,88	10,62	2645	75,69
31-mar	191	5,95	2131	67,36	589	17,77	82	2,42	1	0,03	262,55	29,93	67,1	4,63	172,96	10,96	2671	78,46

+10 navette per tipo

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	304	16,45	437	21,70	9	0,56	0	0,00	0	0,10	210,00	9,93	0,00	0,00	159,67	10,48	237	14,52
13-mar	4048	102,68	2599	63,80	322	7,63	0	0,01	18	0,42	878,04	23,97	0,00	0,00	121,16	3,07	784	19,46
14-mar	8577	219,55	4225	111,83	539	15,52	0	0,31	38	1,16	1327,15	37,36	0,07	0,00	175,45	4,68	1128	29,82
15-mar	9159	224,15	2416	61,64	458	9,86	64	1,61	38	0,82	1247,29	31,97	65,65	1,70	218,61	4,74	1895	45,30
16-mar	7415	205,74	127	3,42	50	1,27	65	1,72	57	1,41	1048,23	26,97	70,86	1,98	185,47	4,47	2187	51,59
17-mar	4749	113,05	1	0,02	54	1,22	60	1,41	35	0,85	738,68	18,78	59,85	1,53	156,66	3,69	2047	50,09
18-mar	1787	35,52	23	0,49	87	1,79	67	1,21	10	0,20	268,69	5,60	68,22	1,47	176,11	3,72	2484	49,47
19-mar	28	0,94	301	10,23	83	3,01	67	2,51	0	0,00	44,09	1,60	66,48	2,37	145,44	5,49	2386	89,12
20-mar	0	0,00	641	15,46	87	2,28	68	1,73	1	0,02	79,44	2,12	69,38	1,58	164,21	3,66	2580	58,78
21-mar	0	0,00	783	21,32	109	3,09	65	1,82	0	0,00	99,14	2,53	64,69	1,58	129,79	3,54	2345	66,38
22-mar	6	0,14	820	19,32	143	2,99	67	1,38	2	0,05	103,12	2,22	65,81	1,36	170,49	3,81	2622	65,36
23-mar	167	4,40	934	25,29	195	5,22	66	1,90	2	0,05	138,83	4,09	63,36	1,78	169,31	4,69	2589	66,05
24-mar	514	13,05	1101	26,74	250	6,41	65	1,59	0	0,00	196,12	5,65	63,95	1,76	172,13	4,97	2735	70,46
25-mar	552	17,54	1313	40,35	316	9,70	66	2,04	17	0,47	220,48	6,89	66,11	1,92	157,36	4,45	2663	76,66
26-mar	58	2,08	1242	39,58	327	11,66	71	2,35	3	0,10	197,34	6,79	71,52	2,45	195,41	6,31	2871	92,85
27-mar	1	0,04	999	35,50	299	11,82	68	2,49	5	0,20	157,63	5,83	67,55	2,40	97,27	3,80	2498	96,97
28-mar	109	3,06	1077	33,80	329	10,52	67	1,86	1	0,03	150,93	4,25	66,19	1,94	121,84	3,95	2313	74,38
29-mar	1103	30,50	1390	32,36	407	9,45	66	1,71	0	0,02	297,95	7,86	61,62	1,45	139,47	3,29	2315	62,73
30-mar	1369	35,42	1713	46,19	480	13,67	71	1,86	0	0,00	354,93	10,90	64,68	1,98	163,43	4,88	2633	75,76
31-mar	204	5,52	2057	62,02	553	14,53	70	2,12	0	0,01	250,18	7,97	64,99	2,07	173,74	5,40	2688	71,64

Soglia di tolleranza = 400

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	303	17,66	440	25,16	9	0,55	0	0,01	0	0,00	209,40	13,19	0,00	0,00	156,68	10,86	234	12,83
13-mar	4033	114,00	2594	77,08	323	10,31	8	0,25	12	0,40	877,80	11,48	14,09	6,99	108,06	15,62	780	23,99
14-mar	8568	268,94	4203	129,95	544	16,58	57	1,69	41	1,11	1326,79	8,26	70,86	14,50	117,12	19,78	1120	32,89
15-mar	9153	193,07	2399	45,98	463	10,74	186	3,99	51	1,03	1243,75	16,96	177,44	5,44	142,71	21,69	1899	40,22
16-mar	7423	171,09	127	2,93	52	1,29	187	4,02	61	1,44	1048,57	17,05	181,26	5,90	119,72	21,21	2166	50,13
17-mar	4766	110,16	1	0,02	54	1,26	178	4,63	40	0,88	741,18	27,58	158,54	5,95	129,75	20,66	2042	49,79
18-mar	1808	43,09	17	0,36	86	1,95	194	4,53	19	0,39	271,09	24,66	179,26	6,75	119,78	14,41	2484	54,71
19-mar	28	0,95	272	8,79	85	2,85	193	6,78	3	0,10	41,64	10,45	173,24	6,71	93,34	18,96	2372	76,23
20-mar	0	0,00	625	16,82	95	2,36	196	4,75	3	0,08	77,95	11,26	175,92	5,35	109,38	10,24	2569	63,48
21-mar	0	0,00	787	23,09	134	3,82	186	4,67	1	0,03	101,26	12,04	167,72	5,40	83,11	8,29	2350	65,05
22-mar	12	0,27	828	21,63	171	4,27	191	4,82	3	0,08	108,79	13,31	165,47	4,56	121,61	10,13	2645	65,79
23-mar	190	6,07	945	27,18	213	6,51	187	5,56	4	0,13	144,29	31,47	160,04	4,96	122,25	13,11	2607	82,85
24-mar	557	16,13	1120	31,95	260	7,99	187	6,38	2	0,07	203,06	28,27	161,3	5,09	119,18	20,60	2716	85,89
25-mar	543	17,14	1336	45,63	323	12,03	188	6,67	27	0,94	222,11	23,06	167,89	6,48	114,39	18,37	2658	90,61
26-mar	55	1,69	1267	38,28	332	9,53	199	6,16	7	0,20	200,64	22,39	178,74	4,89	150,80	22,00	2884	90,97
27-mar	1	0,03	1031	26,62	299	7,16	191	4,86	15	0,40	161,49	22,43	173,14	5,83	75,54	8,62	2494	65,12
28-mar	102	2,13	1098	25,60	329	7,17	195	4,67	8	0,17	153,99	24,37	178,16	7,16	84,76	8,32	2317	51,95
29-mar	1088	22,14	1412	31,95	398	8,60	190	3,75	3	0,06	298,07	31,27	163,75	5,12	101,07	7,50	2328	51,05
30-mar	1390	41,77	1752	55,56	478	13,63	198	6,34	3	0,09	360,53	27,55	164,85	5,44	112,21	9,23	2613	77,59
31-mar	237	7,15	2073	59,58	565	15,50	199	5,64	4	0,12	258,54	22,04	164,25	9,50	125,23	9,98	2710	76,82

Soglia di tolleranza = 800

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	301	19,67	437	23,71	9	0,54	0	0,02	0	0,00	208,08	13,48	0,00	0,00	155,21	13,20	233	11,85
13-mar	4044	140,39	2599	97,22	321	11,18	10	0,38	16	0,54	877,36	10,10	16,89	8,28	108,96	18,93	776	27,13
14-mar	8580	226,96	4233	113,64	542	13,32	55	1,30	41	1,04	1327,54	6,67	69,00	15,51	119,84	16,42	1122	27,61
15-mar	9180	256,48	2428	64,55	462	12,53	399	9,73	74	2,07	1249,80	13,84	297,86	14,99	73,32	17,90	1627	44,00
16-mar	7436	191,70	135	3,42	52	1,29	452	12,60	79	2,03	1047,90	18,33	383,93	15,53	131,00	12,77	2231	57,63
17-mar	4795	145,21	1	0,03	57	1,72	441	11,55	66	1,93	744,13	24,94	338,07	7,95	153,18	21,10	1970	56,76
18-mar	1865	33,69	28	0,53	86	1,64	475	9,24	48	1,01	279,94	24,35	387,57	13,76	134,37	14,99	2550	50,18
19-mar	33	0,97	306	8,68	80	2,03	472	13,25	39	1,03	45,20	10,19	369,12	12,53	115,53	16,41	2380	65,39
20-mar	0	0,00	649	16,25	85	2,12	476	10,65	42	1,03	80,16	9,71	377,32	14,44	115,65	8,95	2565	60,58
21-mar	0	0,02	781	24,51	121	3,36	457	13,86	41	1,29	99,39	11,39	359,81	11,28	98,68	9,19	2372	70,31
22-mar	10	0,25	827	19,69	161	3,53	460	10,72	50	1,22	107,26	12,34	353,27	9,96	119,45	10,83	2648	62,05
23-mar	195	8,05	927	41,94	207	8,82	454	18,41	48	1,94	142,13	23,81	344,60	9,69	111,40	15,32	2591	111,65
24-mar	557	20,15	1093	41,99	273	9,60	450	15,37	41	1,41	202,21	22,23	340,98	11,29	110,72	14,56	2720	102,74
25-mar	531	20,98	1299	48,07	334	11,54	453	15,53	47	1,69	217,56	28,74	351,57	8,80	106,19	17,23	2626	95,55
26-mar	52	1,57	1225	33,99	341	9,41	477	14,01	40	1,03	197,44	23,32	373,26	10,99	142,68	10,81	2875	81,58
27-mar	1	0,03	983	26,08	303	9,63	468	14,24	55	1,50	155,98	25,30	366,60	8,32	106,38	6,89	2437	70,44
28-mar	126	3,68	1089	34,63	331	10,64	475	16,20	50	1,64	152,72	24,18	370,18	12,69	143,05	12,72	2372	75,13
29-mar	1174	42,84	1405	47,66	409	15,29	464	15,08	48	1,61	308,12	26,28	358,70	12,14	125,29	12,47	2346	83,60
30-mar	1387	36,48	1724	51,24	488	14,02	476	12,49	43	1,20	359,52	23,99	360,61	7,01	118,73	8,95	2633	76,34
31-mar	194	7,56	2047	85,36	569	22,94	478	17,99	52	2,06	252,80	22,76	363,25	20,23	121,62	10,26	2699	106,79

Soglia di tolleranza = 1600

Giorno	Code [persone]						Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]					
	regional						station		terminal		regional				station		terminal	
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	302	19,04	441	28,32	9	0,57	0	0,00	0	0,00	209,37	10,90	0,00	0,01	156,48	10,18	236	13,53
13-mar	4053	141,55	2603	82,70	320	12,17	8	0,26	14	0,47	878,48	27,88	14,89	0,47	111,65	3,52	783	25,75
14-mar	8579	225,43	4252	108,27	535	14,27	55	1,44	40	0,99	1327,81	33,71	69,07	1,64	120,26	2,90	1120	25,15
15-mar	9156	228,72	2458	73,55	465	13,58	405	10,85	74	2,07	1251,89	34,81	297,11	8,65	71,47	1,81	1603	44,27
16-mar	7406	234,90	139	4,68	53	1,72	802	25,44	161	4,67	1044,97	34,67	471,86	13,77	113,51	3,40	1817	59,42
17-mar	4764	140,08	1	0,03	58	1,80	998	33,15	98	3,09	738,39	24,46	693,17	23,92	133,24	3,92	1803	51,77
18-mar	1813	41,92	20	0,40	90	2,03	1219	28,08	91	1,82	271,57	5,98	887,44	18,03	109,67	2,52	2381	48,78
19-mar	28	0,78	289	7,61	81	2,20	1258	37,62	38	1,09	43,04	1,22	975,17	25,98	109,82	3,06	2346	68,13
20-mar	0	0,03	637	13,60	83	2,06	1271	31,78	39	0,93	78,73	2,00	1006,60	21,56	119,56	2,95	2563	63,67
21-mar	0	0,00	764	21,88	112	3,17	1241	39,99	42	1,13	96,99	2,68	972,47	27,39	105,22	2,98	2374	64,33
22-mar	11	0,27	812	17,62	150	3,70	1242	28,90	50	1,27	104,45	2,44	939,90	21,70	124,90	2,72	2637	57,83
23-mar	221	9,15	912	38,57	201	7,90	1233	54,76	43	2,03	143,84	5,72	919,63	36,22	124,47	5,08	2577	110,98
24-mar	578	21,38	1067	36,49	256	10,01	1224	47,41	41	1,43	200,02	6,86	910,08	33,01	126,41	4,81	2716	101,91
25-mar	525	17,88	1280	44,82	320	10,33	1226	43,20	45	1,50	214,20	7,37	913,95	34,04	127,67	4,88	2663	96,31
26-mar	45	1,27	1216	35,35	322	8,44	1263	38,77	37	0,97	194,12	5,10	975,01	29,90	150,05	4,64	2857	88,02
27-mar	1	0,03	981	27,65	287	8,79	1255	36,10	57	1,54	153,09	4,06	981,52	27,92	115,94	3,19	2439	75,58
28-mar	86	2,54	1062	35,24	309	9,71	1265	37,46	50	1,49	145,62	4,39	987,43	33,71	145,21	4,19	2357	71,53
29-mar	1046	36,11	1366	49,12	374	12,83	1245	47,68	46	1,65	289,38	11,26	932,68	31,50	152,96	5,47	2327	79,50
30-mar	1364	43,70	1685	49,69	454	12,27	1253	37,02	45	1,36	352,30	10,50	895,49	28,74	157,50	4,47	2607	77,41
31-mar	241	8,72	1999	71,52	535	22,83	1252	47,21	53	2,17	250,35	10,44	894,19	32,28	160,45	6,92	2710	98,14

Aeroporto e risorse di trasporto aereo

- 2 risorse check-in																		
Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata						Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
12-mar	305	17,21	440	23,46	9	0,51	0	0,00	1	0,04	209,57	11,53	0,00	0,00	181,85	11,36	236	11,26
13-mar	4050	217,31	2607	137,62	320	16,34	8	0,42	1	0,05	879,45	8,91	13,91	6,17	63,20	4,37	803	40,96
14-mar	8563	210,09	4248	102,73	538	13,05	45	1,02	1	0,02	1326,76	6,48	56,54	11,50	136,42	11,15	1153	28,98
15-mar	9147	209,99	2448	55,81	459	10,93	85	1,84	1	0,02	1249,41	14,48	91,63	3,78	188,70	7,66	1897	43,59
16-mar	7393	256,99	138	4,41	50	1,59	81	2,86	12	0,38	1044,70	15,79	82,21	5,20	126,33	8,94	2176	75,04
17-mar	4742	193,55	1	0,04	57	2,24	77	3,27	66	2,76	736,60	26,69	74,22	3,48	119,73	11,20	1982	76,75
18-mar	1808	58,33	23	0,71	90	2,79	86	2,56	7	0,20	271,76	29,90	81,69	2,66	202,57	8,39	2500	75,45
19-mar	32	1,47	295	14,12	80	3,71	87	4,61	12	0,59	44,37	8,80	80,11	4,29	106,95	22,03	2328	113,15
20-mar	0	0,00	645	16,50	81	2,17	86	2,54	11	0,29	78,78	11,67	80,84	2,90	149,81	19,49	2539	72,01
21-mar	0	0,00	795	20,14	109	3,12	82	2,12	11	0,30	100,00	12,88	75,80	2,74	132,09	14,62	2409	65,90
22-mar	3	0,08	852	24,73	154	4,23	85	2,21	12	0,32	107,66	15,03	75,56	2,57	150,48	15,85	2561	70,67
23-mar	156	5,90	958	35,58	204	7,84	85	2,96	13	0,44	141,87	24,93	73,93	2,57	178,39	13,06	2626	94,97
24-mar	528	26,68	1123	59,74	255	13,81	85	4,82	14	0,74	200,93	26,64	74,34	2,82	130,95	30,01	2392	132,83
25-mar	580	16,99	1321	42,10	312	9,05	85	2,41	12	0,37	225,18	22,02	77,43	3,14	154,58	9,77	2504	76,66
26-mar	51	1,45	1217	40,54	318	10,80	89	2,98	11	0,33	194,72	25,89	82,59	2,78	178,65	11,14	2545	80,13
27-mar	1	0,02	967	16,46	286	5,08	85	1,31	183	3,05	150,66	30,39	80,79	3,27	211,59	9,98	2376	38,94
28-mar	95	1,24	1063	13,54	319	4,49	83	0,98	147	1,85	146,31	27,58	78,76	2,35	265,26	23,61	2645	34,63
29-mar	1078	15,88	1386	20,95	397	5,65	82	1,10	151	2,01	294,32	28,12	73,60	2,83	260,96	30,46	2575	36,75
30-mar	1378	22,09	1717	23,97	477	6,84	88	1,37	164	2,70	358,03	25,55	75,45	3,19	264,94	33,17	2793	42,11
31-mar	230	5,69	2059	51,94	558	14,50	89	2,48	75	1,98	255,01	27,12	77,31	4,68	236,75	45,16	2848	74,99

-3 risorse check-in

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	299	15,03	446	21,31	9	0,47	0	0,00	1	0,05	207,64	12,95	0,00	0,00	215,54	10,64	232	9,84
13-mar	4060	226,16	2602	145,10	321	18,57	7	0,41	1	0,06	878,67	10,58	13,10	6,85	123,37	3,52	791	47,07
14-mar	8603	300,80	4225	131,28	535	16,94	43	1,33	1	0,03	1328,39	7,98	54,53	13,14	159,14	9,07	1141	39,30
15-mar	9175	275,35	2415	67,39	460	12,15	86	2,38	2	0,06	1249,28	15,43	92,11	3,15	220,14	9,58	1896	55,51
16-mar	7411	270,06	131	4,42	51	1,73	81	3,16	8	0,30	1048,57	18,59	83,13	5,00	149,53	7,98	1914	68,72
17-mar	4753	160,57	1	0,03	56	1,95	76	2,17	51	1,68	736,66	25,77	72,98	3,64	185,87	8,75	1830	57,94
18-mar	1829	54,27	17	0,55	79	2,62	86	2,53	23	0,73	272,59	26,64	82,00	2,93	241,34	13,23	2146	66,75
19-mar	31	1,08	277	9,98	76	2,49	86	2,77	15	0,47	41,59	9,42	79,93	3,80	184,83	13,40	2024	69,79
20-mar	0	0,00	602	11,96	88	2,03	88	1,90	12	0,24	75,02	9,67	81,79	3,08	217,83	9,01	2197	47,44
21-mar	0	0,00	748	18,21	119	3,12	82	1,86	12	0,29	95,59	14,06	75,76	2,35	186,99	9,96	2139	51,05
22-mar	13	0,31	816	17,61	160	3,64	86	2,07	14	0,32	105,76	15,67	76,35	2,27	234,00	11,78	2258	50,70
23-mar	213	6,96	934	28,46	214	6,51	84	2,42	13	0,42	145,67	22,83	73,89	2,32	228,07	13,04	2224	70,16
24-mar	543	27,83	1086	48,89	267	12,17	85	4,16	14	0,70	199,45	26,51	75,08	2,13	199,45	13,18	1802	83,97
25-mar	503	16,51	1291	37,59	329	10,46	86	2,71	47	1,31	214,60	29,19	77,95	3,23	239,60	16,61	2270	68,49
26-mar	44	2,46	1214	61,79	336	18,14	91	4,70	13	0,62	194,05	24,79	83,21	2,90	187,14	20,69	1623	83,28
27-mar	1	0,02	979	15,93	311	5,44	85	1,43	247	4,05	155,59	26,17	81,45	2,91	218,25	13,85	2177	36,60
28-mar	99	2,29	1074	24,38	339	8,88	84	2,13	478	11,87	149,24	24,54	80,03	2,85	339,22	29,53	2274	57,16
29-mar	1084	24,85	1395	32,44	418	9,48	82	2,00	770	19,49	299,52	32,07	73,78	2,98	473,66	40,35	2239	52,91
30-mar	1353	28,69	1709	38,41	494	11,53	88	2,04	1036	23,95	355,11	28,18	75,33	3,01	579,46	42,12	2463	52,33
31-mar	217	5,67	2043	51,25	569	15,99	90	2,47	1270	32,72	252,64	23,66	77,90	4,66	700,87	49,44	2535	66,31

-5 risorse check-in

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	294	11,92	442	20,12	9	0,37	0	0,00	1	0,05	205,52	10,11	0,00	0,00	250,96	11,64	232	12,12
13-mar	4054	256,71	2595	147,02	318	17,13	7	0,45	1	0,06	878,21	51,53	12,63	0,73	87,22	5,29	791	50,46
14-mar	8571	282,59	4234	152,93	534	17,90	43	1,62	1	0,04	1327,40	43,31	54,94	1,87	188,26	6,77	1148	35,77
15-mar	9167	299,89	2439	93,42	461	14,61	86	2,75	46	1,75	1249,27	47,76	92,45	3,02	260,41	9,42	1590	54,57
16-mar	7410	932,54	136	17,78	52	7,29	81	10,19	34	4,27	1045,91	139,61	82,78	9,84	174,34	24,53	522	64,80
17-mar	4744	384,91	1	0,09	57	5,13	77	7,16	35	3,39	736,74	59,78	73,94	6,10	165,23	13,19	657	59,80
18-mar	1804	130,94	24	1,79	84	5,85	87	6,49	93	6,63	271,21	18,27	83,31	5,32	279,54	20,46	973	63,01
19-mar	30	3,18	293	33,15	82	9,11	86	8,96	16	1,80	43,81	4,93	79,28	8,90	147,59	16,91	636	72,10
20-mar	0	0,00	642	42,04	94	6,19	88	5,75	19	1,15	79,73	5,69	81,80	5,79	206,74	13,55	715	45,59
21-mar	0	0,00	777	49,38	126	8,69	82	5,72	12	0,85	100,04	6,53	76,05	5,37	182,29	12,03	784	52,08
22-mar	5	0,35	817	57,60	168	10,68	85	5,44	16	1,10	106,16	7,14	76,21	5,23	207,66	13,09	727	54,75
23-mar	173	15,32	912	83,98	221	22,75	85	8,58	17	1,54	139,28	13,09	74,48	6,94	246,18	23,63	736	68,47
24-mar	527	59,36	1075	135,40	284	36,08	86	9,75	22	2,92	198,74	21,95	75,38	8,89	180,70	20,64	694	75,99
25-mar	540	55,23	1275	118,65	339	34,20	85	8,33	102	10,81	218,02	20,57	77,17	7,70	213,31	22,55	683	61,85
26-mar	54	6,83	1197	149,29	343	45,86	90	12,45	72	8,59	195,10	23,46	83,21	12,05	246,54	31,66	631	91,44
27-mar	1	0,08	955	79,28	316	23,64	86	6,87	211	18,56	154,08	13,39	82,20	7,08	292,00	24,10	451	38,79
28-mar	120	5,40	1042	54,46	343	15,55	83	4,46	562	29,29	148,90	6,91	78,97	3,98	346,14	15,79	1145	56,30
29-mar	1126	71,51	1349	87,03	425	27,31	81	4,90	733	49,32	296,70	19,87	72,69	4,21	493,07	33,15	839	52,75
30-mar	1368	100,66	1667	118,03	510	32,35	87	6,15	1064	64,89	352,46	25,89	74,96	5,40	578,73	40,90	773	47,09
31-mar	207	19,59	1987	182,49	595	54,65	90	7,19	1356	114,61	250,72	23,83	77,51	6,62	704,92	56,88	761	71,88

+2 risorse check-in

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	306	16,96	441	27,72	9	0,55	0	0,00	0	0,02	210,77	11,17	0,00	0,00	160,73	9,92	235	13,34
13-mar	4067	264,03	2587	151,59	317	19,47	9	0,62	14	0,83	878,36	52,83	15,53	0,97	108,90	6,96	782	54,60
14-mar	8579	299,18	4211	142,15	535	16,78	52	1,60	39	1,14	1326,96	41,87	65,96	2,16	121,66	4,01	1121	38,13
15-mar	9157	261,14	2420	70,13	457	13,60	84	2,35	47	1,43	1247,50	38,44	93,16	2,81	212,25	6,26	1902	59,70
16-mar	7397	231,31	132	3,83	50	1,46	83	2,26	70	2,13	1045,11	27,93	85,05	2,32	191,11	5,35	2182	64,80
17-mar	4749	136,64	1	0,03	58	1,71	75	2,32	23	0,73	737,77	20,44	71,34	2,05	157,94	4,69	2070	59,26
18-mar	1821	46,23	22	0,56	91	2,13	84	2,16	10	0,27	272,94	7,33	82,37	2,27	169,44	3,96	2467	61,00
19-mar	31	0,92	292	8,19	93	2,66	84	2,36	0	0,00	44,94	1,32	78,58	2,48	144,12	4,07	2375	68,06
20-mar	0	0,01	645	11,92	93	1,70	85	1,54	0	0,00	80,33	1,55	80,20	1,38	165,17	2,67	2569	50,01
21-mar	0	0,22	781	16,76	122	2,61	80	1,73	0	0,00	99,87	2,10	75,80	1,63	128,43	2,60	2339	55,30
22-mar	2	0,04	842	19,03	165	3,51	82	1,68	2	0,04	108,00	2,43	74,46	1,66	175,05	3,54	2621	49,39
23-mar	164	4,12	960	27,32	208	5,13	81	2,02	1	0,03	142,57	3,98	72,57	1,77	174,86	4,49	2591	66,01
24-mar	544	16,48	1142	30,68	256	7,74	82	2,28	0	0,02	205,20	5,71	73,12	2,12	175,70	4,52	2699	82,00
25-mar	552	13,40	1355	31,43	306	6,79	83	2,06	15	0,32	223,67	5,54	76,42	1,94	168,15	3,72	2672	67,23
26-mar	45	1,42	1276	44,55	310	9,29	89	2,68	1	0,03	198,83	6,29	83,20	2,78	205,04	6,08	2857	98,11
27-mar	1	0,02	1031	16,30	285	4,75	85	1,23	7	0,11	158,95	2,70	80,64	1,26	99,13	1,67	2474	36,39
28-mar	116	2,79	1119	24,64	314	7,88	83	1,88	0	0,01	153,36	3,97	80,00	1,85	122,12	3,22	2319	56,53
29-mar	1128	28,34	1430	32,23	391	8,55	81	1,68	0	0,00	303,15	6,87	73,09	1,68	136,74	3,36	2303	48,58
30-mar	1368	23,58	1747	28,52	470	7,75	88	1,57	0	0,01	360,34	6,15	76,03	1,23	165,82	3,05	2631	48,60
31-mar	200	5,39	2081	53,01	548	14,78	89	2,45	0	0,00	252,00	6,30	77,04	2,15	181,35	5,03	2695	67,14

+3 risorse check-in

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	294	21,66	447	25,84	9	0,57	0	0,00	0	0,00	188,46	11,17	0,00	0,00	204,03	13,88	213	14,00
13-mar	4162	306,43	2560	211,03	318	25,80	7	0,51	8	0,59	788,37	66,14	10,95	0,80	140,06	11,57	702	55,42
14-mar	8947	349,87	4069	149,55	549	20,42	45	1,75	45	1,65	1194,33	47,97	59,01	2,17	154,35	5,54	1007	38,09
15-mar	9138	341,51	2451	87,66	475	18,16	87	3,07	43	1,62	1123,02	41,54	83,31	3,03	273,78	9,79	1706	59,70
16-mar	7115	237,64	129	4,59	51	1,57	78	2,58	65	2,16	945,33	34,26	76,45	2,30	248,97	7,45	1961	67,20
17-mar	4634	139,05	1	0,03	58	1,87	79	2,50	28	0,93	666,55	19,18	64,70	1,91	214,45	7,02	1872	54,87
18-mar	1829	54,53	16	0,46	81	2,29	87	2,54	12	0,34	245,30	6,21	74,78	1,93	222,99	6,60	2234	63,56
19-mar	30	0,92	268	9,15	79	2,70	84	2,90	1	0,03	39,13	1,22	72,01	2,48	186,33	6,49	2148	69,56
20-mar	0	0,00	579	13,20	89	1,98	86	2,00	0	0,00	69,92	1,41	73,11	1,50	215,92	4,52	2311	46,06
21-mar	0	0,02	749	17,77	116	3,22	79	2,14	1	0,02	87,83	2,30	68,36	1,66	165,88	4,47	2106	53,31
22-mar	13	0,29	794	18,31	164	3,73	83	1,86	1	0,02	97,62	1,96	67,53	1,34	226,84	4,29	2356	47,12
23-mar	210	6,05	947	24,80	211	5,84	83	2,29	3	0,07	131,46	3,97	65,33	1,95	223,83	6,06	2332	65,55
24-mar	534	18,97	1129	39,61	274	9,15	86	3,16	1	0,03	185,54	6,73	67,25	2,15	225,66	8,02	2436	75,27
25-mar	513	15,28	1290	39,45	323	8,46	86	2,37	4	0,13	196,58	5,48	69,84	1,87	213,34	6,27	2396	60,84
26-mar	43	1,66	1256	49,10	335	13,20	92	3,25	8	0,32	177,10	6,75	75,41	2,61	271,83	10,78	2579	98,70
27-mar	1	0,02	951	14,15	319	4,83	82	1,30	5	0,09	139,93	2,03	71,72	1,09	88,96	1,47	2254	35,77
28-mar	98	2,71	1061	27,16	348	8,72	86	2,12	1	0,02	135,95	3,62	71,86	2,02	104,78	2,86	2076	61,67
29-mar	1093	25,50	1408	34,34	421	9,60	84	2,03	0	0,00	269,16	6,69	65,37	1,62	121,90	3,05	2069	45,67
30-mar	1358	30,26	1709	31,90	514	10,90	85	1,82	0	0,00	317,65	7,01	68,24	1,32	151,03	2,85	2383	50,35
31-mar	225	6,69	2010	58,44	568	15,88	89	2,56	0	0,00	227,45	6,88	68,91	2,07	162,13	4,70	2423	66,47

+5 risorse check-in

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	301	19,02	439	31,13	9	0,51	0	0,00	0	0,00	209,31	14,07	0,00	0,00	226,83	13,21	236	12,57
13-mar	4042	126,94	2597	74,09	320	9,96	7	0,19	11	0,31	876,45	24,95	12,16	0,38	155,62	4,94	780	23,05
14-mar	8571	208,64	4241	113,46	531	13,50	52	1,22	41	0,95	1326,59	32,78	65,52	1,46	171,31	4,27	1118	29,25
15-mar	9170	176,76	2446	46,87	452	8,75	84	1,47	47	0,84	1248,91	26,25	92,49	1,60	304,54	5,32	1895	39,90
16-mar	7424	179,55	136	3,27	48	1,05	83	2,09	72	1,69	1050,37	27,54	84,99	1,93	276,51	6,76	2181	50,66
17-mar	4768	102,77	1	0,02	55	1,21	76	1,84	27	0,59	740,94	17,44	71,83	1,46	238,09	4,91	2081	43,75
18-mar	1824	34,63	19	0,41	87	1,62	84	1,57	12	0,24	272,49	5,11	83,01	1,66	247,52	5,36	2485	49,40
19-mar	34	1,58	282	12,93	81	3,19	85	3,34	0	0,00	43,45	1,81	79,98	3,46	207,17	8,34	2386	94,35
20-mar	0	0,03	623	14,99	90	2,07	85	1,81	0	0,00	77,65	1,64	81,21	1,90	240,13	5,19	2570	60,69
21-mar	0	0,00	766	20,29	124	3,46	80	2,25	0	0,00	97,59	2,46	75,89	2,17	184,45	5,06	2341	63,36
22-mar	7	0,18	831	18,62	173	3,94	83	1,89	2	0,05	108,50	2,58	75,06	1,97	252,04	6,52	2621	63,47
23-mar	211	7,49	942	36,31	213	8,02	82	3,12	5	0,18	146,12	5,58	72,54	2,51	248,98	8,23	2590	97,10
24-mar	577	20,26	1111	37,27	269	10,16	82	3,14	0	0,00	206,16	7,76	74,67	2,49	250,62	9,36	2707	89,10
25-mar	534	17,47	1314	39,50	322	9,76	84	2,31	8	0,25	218,47	7,18	77,54	2,53	237,23	7,33	2663	76,82
26-mar	47	1,36	1234	33,97	328	9,13	89	2,28	1	0,03	196,89	5,38	83,70	2,10	302,20	8,51	2865	81,91
27-mar	1	0,03	991	23,40	299	7,61	84	2,07	1	0,03	155,36	4,22	79,77	1,91	98,94	2,56	2506	68,20
28-mar	116	3,03	1066	26,17	328	8,79	83	2,11	0	0,01	151,05	3,78	79,89	1,96	116,55	2,65	2309	57,98
29-mar	1131	29,75	1366	32,45	411	9,79	80	2,08	0	0,00	299,20	6,86	72,63	1,96	135,50	3,06	2299	52,91
30-mar	1352	31,73	1686	39,24	492	12,76	88	2,24	0	0,02	352,59	9,49	75,91	1,97	167,94	3,82	2650	69,35
31-mar	205	6,82	2028	62,59	572	17,08	89	2,47	1	0,03	252,64	7,30	76,48	2,32	179,96	6,02	2693	81,96

+1 risorsa apron

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	296	19,21	441	29,67	9	0,58	0	0,00	0	0,00	206,51	14,39	0,00	0,00	158,23	8,49	233	14,84
13-mar	4044	121,67	2605	70,72	319	10,05	8	0,25	10	0,33	877,74	24,28	14,53	0,43	110,34	3,43	780	25,64
14-mar	8580	202,83	4219	95,39	539	12,74	51	1,35	39	1,04	1327,39	35,68	65,33	1,46	118,82	3,11	1121	27,19
15-mar	9173	169,51	2410	47,62	467	9,21	84	1,70	44	0,78	1245,49	24,16	92,65	1,67	210,11	4,24	1902	34,64
16-mar	7437	163,05	129	3,38	55	1,38	83	1,93	64	1,57	1049,37	26,12	85,36	1,97	183,61	4,66	2182	57,34
17-mar	4789	114,93	1	0,02	56	1,19	75	1,57	37	0,81	742,02	16,66	71,78	1,49	156,82	3,33	2051	48,03
18-mar	1836	38,99	27	0,55	80	1,60	84	1,81	13	0,28	276,28	6,09	82,04	1,62	171,24	3,36	2474	55,07
19-mar	31	1,36	298	11,70	81	3,43	84	3,61	0	0,00	44,39	1,91	78,49	3,31	141,08	5,47	2380	110,09
20-mar	0	0,00	634	14,07	85	1,73	85	1,77	0	0,00	78,32	1,78	80,37	1,95	161,34	3,24	2577	62,81
21-mar	0	0,00	775	18,57	115	2,96	80	2,28	0	0,01	98,30	2,77	75,61	2,03	124,78	3,10	2347	57,10
22-mar	5	0,12	829	20,04	153	3,40	83	1,89	1	0,02	106,35	2,55	75,78	1,88	166,25	4,20	2608	66,03
23-mar	153	5,26	922	34,50	188	6,23	82	2,63	4	0,14	135,37	4,60	72,71	2,40	170,59	6,08	2605	91,06
24-mar	504	17,61	1083	37,47	247	9,33	82	3,04	0	0,00	192,99	6,60	73,41	2,63	175,20	6,35	2745	95,82
25-mar	576	17,00	1300	37,54	304	8,36	82	2,29	12	0,38	220,93	6,80	75,93	2,44	152,71	4,67	2646	76,01
26-mar	63	1,76	1229	30,35	302	8,49	87	2,54	2	0,06	194,61	5,26	81,67	2,39	189,00	5,06	2858	80,39
27-mar	1	0,03	1001	26,56	267	6,55	84	1,97	7	0,18	152,80	4,03	79,52	1,99	93,72	2,53	2495	64,97
28-mar	92	2,09	1097	28,30	298	7,04	83	2,02	1	0,02	148,41	3,35	79,36	2,01	119,88	3,14	2314	62,19
29-mar	1045	24,51	1419	37,69	373	9,28	81	2,00	0	0,00	291,69	7,27	72,78	1,80	135,42	3,30	2309	59,52
30-mar	1337	33,97	1746	48,09	449	12,22	88	2,33	0	0,02	351,53	8,81	75,48	2,02	154,62	3,65	2604	72,79
31-mar	227	7,15	2092	61,24	524	15,71	88	2,52	1	0,03	257,72	8,50	76,40	2,51	167,96	5,13	2676	76,86

+2 risorsa apron

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	305	17,18	439	25,18	10	0,48	0	0,00	0	0,00	210,63	9,20	0,00	0,01	162,06	11,90	236	12,52
13-mar	4055	106,72	2591	60,24	318	7,14	9	0,21	15	0,41	877,56	12,87	14,93	6,38	108,54	15,31	784	19,56
14-mar	8581	278,74	4230	125,35	536	16,40	52	1,53	39	1,16	1326,79	8,94	66,61	10,72	123,06	24,09	1122	33,65
15-mar	9151	225,41	2425	55,84	460	11,60	84	1,83	44	1,02	1250,71	18,16	92,25	3,22	206,98	26,17	1890	44,59
16-mar	7382	195,46	132	3,04	52	1,43	84	1,97	68	1,70	1045,25	14,34	85,67	3,48	186,01	20,91	2195	55,41
17-mar	4723	125,77	1	0,03	56	1,54	75	1,99	37	1,02	733,88	23,92	71,71	3,32	159,26	30,35	2047	60,30
18-mar	1786	40,75	21	0,49	91	1,87	84	1,78	6	0,12	267,88	24,16	82,47	2,75	169,83	19,42	2492	54,61
19-mar	26	0,72	293	8,64	88	2,28	83	2,45	0	0,10	43,66	10,00	78,52	3,52	134,63	16,16	2362	67,75
20-mar	0	0,00	634	15,02	97	2,06	85	1,85	0	0,01	80,03	10,80	81,34	2,70	157,65	10,83	2563	56,63
21-mar	0	0,00	762	17,20	123	2,97	80	1,75	0	0,00	97,36	11,10	75,32	2,85	129,65	10,66	2370	54,47
22-mar	9	0,16	817	15,17	167	3,13	82	1,58	0	0,06	106,33	14,65	74,21	2,35	169,38	9,54	2628	46,33
23-mar	163	5,96	936	30,78	208	7,20	82	2,53	0	0,00	139,05	24,25	72,54	2,59	168,95	15,36	2602	87,39
24-mar	525	14,85	1115	29,37	265	7,06	82	2,01	0	1,00	200,13	24,65	73,23	2,43	167,48	17,95	2712	71,50
25-mar	563	14,53	1327	37,41	319	8,04	83	2,19	14	0,37	223,96	31,08	76,98	2,83	151,84	15,43	2651	71,04
26-mar	54	1,70	1253	35,87	323	10,06	88	2,91	2	0,06	198,73	23,06	82,77	3,30	190,86	19,35	2862	88,47
27-mar	1	0,03	994	29,40	289	9,16	85	2,61	8	0,26	155,26	25,78	80,10	2,66	94,88	8,09	2498	78,42
28-mar	104	2,18	1075	21,30	324	6,58	83	1,69	0	0,00	149,27	23,60	79,27	2,65	119,22	10,08	2319	46,59
29-mar	1115	24,55	1378	34,00	403	10,31	82	1,82	0	0,00	299,63	27,65	74,10	3,40	134,62	7,82	2311	55,73
30-mar	1383	44,19	1706	58,84	484	16,08	88	2,67	0	0,00	355,31	28,17	75,86	2,91	159,16	10,77	2630	87,72
31-mar	219	6,50	2041	60,87	561	17,19	90	2,58	1	0,03	253,55	23,07	77,80	5,33	175,66	10,50	2717	82,10

-1 CRJ																		
Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	297	18,17	436	26,59	9	0,55	0	0,00	1	0,06	208,28	12,68	0,01	0,00	160,99	9,82	234	11,27
13-mar	4058	154,53	2597	106,92	319	12,33	8	0,33	1	0,04	877,83	9,65	14,83	5,99	77,27	15,52	793	30,26
14-mar	8601	147,41	4231	76,65	533	9,33	50	0,90	16	0,31	1327,63	7,50	65,94	10,57	124,65	12,19	1130	20,87
15-mar	9198	229,46	2435	68,20	452	12,01	85	2,05	1	0,03	1249,49	14,44	93,71	4,37	68,79	15,07	1915	48,85
16-mar	7461	196,39	135	3,61	50	1,26	83	2,28	24	0,67	1049,51	18,17	84,92	2,73	142,57	8,68	2190	60,49
17-mar	4791	101,94	1	0,02	56	1,13	76	1,48	84	1,85	738,22	24,00	72,09	3,37	139,03	26,58	1968	42,08
18-mar	1865	41,13	23	0,52	95	2,12	86	1,83	1	0,02	274,06	30,91	84,47	3,01	153,27	25,62	2542	55,67
19-mar	36	1,31	292	10,73	95	3,66	87	3,50	1	0,04	44,73	13,34	81,91	5,33	102,53	35,99	2359	90,89
20-mar	0	0,00	641	19,30	103	2,71	87	2,56	1	0,03	79,52	12,34	82,72	2,70	128,93	34,38	2570	70,78
21-mar	0	0,00	787	20,20	136	4,00	82	2,10	1	0,03	99,48	12,19	78,13	2,22	95,63	13,82	2349	63,65
22-mar	4	0,08	835	17,20	181	3,56	85	1,70	1	0,02	106,86	12,82	77,72	2,66	139,05	11,45	2637	54,88
23-mar	173	5,80	949	31,86	221	7,54	85	2,99	3	0,10	142,12	21,59	75,31	2,89	139,32	18,07	2601	85,45
24-mar	580	17,03	1124	37,33	287	8,87	84	2,52	85	2,48	200,67	22,54	75,80	2,54	137,92	24,77	2635	81,03
25-mar	578	12,22	1331	30,81	341	8,02	86	1,92	27	0,63	215,66	23,66	79,38	3,29	164,10	22,01	2725	58,35
26-mar	38	0,89	1243	32,73	345	8,24	90	2,49	145	3,97	193,78	20,77	85,52	2,82	166,39	27,05	2745	69,70
27-mar	1	0,02	1006	20,90	314	6,76	86	1,72	121	2,50	153,32	26,25	80,52	3,06	149,05	22,61	2522	50,44
28-mar	121	3,20	1091	25,10	347	7,85	83	1,95	20	0,55	148,82	26,88	82,12	2,53	249,81	19,56	2408	60,35
29-mar	1170	15,74	1411	18,99	428	5,90	83	1,00	80	1,10	294,73	34,99	79,84	2,61	249,64	23,92	2247	29,04
30-mar	1380	26,97	1728	31,49	515	9,04	89	1,47	168	3,16	358,52	31,06	80,43	3,15	256,92	19,65	2517	45,68
31-mar	191	3,90	2046	42,26	587	12,55	90	1,75	212	4,36	256,01	27,73	82,51	4,19	289,94	24,57	2663	53,93

-1 E70

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	297	18,36	438	22,80	9	0,58	0	0,00	1	0,06	206,88	14,55	0,00	0,00	158,55	9,04	236	13,04
13-mar	4044	124,99	2587	80,80	323	9,85	9	0,24	5	0,15	875,01	10,26	15,41	9,03	105,16	17,85	788	36,95
14-mar	8613	235,68	4238	115,86	536	12,96	40	0,96	65	1,54	1328,47	7,25	50,11	13,80	140,70	16,34	1085	18,48
15-mar	9227	166,06	2448	43,65	458	8,12	85	1,53	22	0,42	1253,23	15,24	89,86	3,69	147,82	26,56	1961	54,95
16-mar	7485	177,38	137	3,82	50	1,36	83	2,17	242	6,28	1056,02	15,94	86,46	3,33	159,32	12,64	2001	41,39
17-mar	4835	135,51	1	0,03	58	1,55	76	1,89	559	14,83	751,37	27,08	72,78	2,64	278,53	30,31	1712	47,79
18-mar	1917	35,01	19	0,38	96	1,71	86	1,73	374	7,08	287,25	29,41	84,39	2,77	441,51	16,83	2636	52,46
19-mar	37	1,65	294	11,34	95	4,19	90	3,51	309	13,73	47,04	9,61	85,09	4,65	387,61	33,71	2466	76,29
20-mar	0	0,00	624	14,48	102	2,12	88	1,84	239	5,08	79,23	9,34	84,72	2,62	339,81	29,68	2653	53,70
21-mar	0	0,00	762	19,30	123	3,06	83	2,09	142	3,60	98,12	13,49	79,88	3,29	277,15	37,97	2445	54,09
22-mar	5	0,12	812	19,11	158	3,77	86	1,87	71	1,67	104,59	18,38	79,55	3,12	245,47	35,36	2694	56,01
23-mar	134	4,17	928	30,93	199	7,39	85	2,87	33	1,19	134,58	27,20	77,66	3,00	205,80	33,95	2669	77,02
24-mar	516	18,21	1104	39,16	252	8,65	86	2,85	159	5,40	197,89	27,41	78,71	2,65	184,60	32,47	2600	76,21
25-mar	599	18,96	1311	40,48	301	8,50	86	2,55	110	3,41	223,53	22,96	82,05	2,99	234,24	27,66	2705	51,98
26-mar	55	1,58	1241	35,33	311	9,31	91	2,57	279	7,82	195,48	22,50	87,42	3,63	230,38	38,89	2693	56,08
27-mar	1	0,03	992	26,19	277	7,18	85	2,55	522	16,21	152,97	24,30	81,96	3,43	222,51	40,79	2271	40,55
28-mar	106	2,09	1062	22,63	314	6,84	85	1,75	184	3,88	148,58	25,27	84,08	2,51	438,31	49,73	2649	58,21
29-mar	1110	32,22	1369	33,71	385	10,65	87	2,36	405	11,72	295,41	32,25	84,89	3,47	288,84	28,60	2080	53,23
30-mar	1356	38,28	1693	50,04	463	14,08	91	2,44	700	19,01	347,48	26,07	85,54	4,00	385,62	27,81	2337	47,49
31-mar	207	6,38	2021	67,03	546	18,98	94	3,33	986	35,07	249,75	25,61	89,00	5,21	513,72	41,48	2429	47,15

-1 M90

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	297	17,60	435	25,36	9	0,58	0	0,00	1	0,07	206,15	10,79	0,03	0,00	159,37	11,16	237	12,67
13-mar	4057	215,46	2590	144,26	318	17,12	8	0,45	3	0,18	875,75	52,45	13,63	0,72	105,07	5,81	789	40,73
14-mar	8593	290,15	4227	137,86	540	18,93	43	1,29	58	1,97	1329,77	40,40	54,63	1,63	131,96	4,64	1083	35,50
15-mar	9195	275,28	2421	62,49	476	14,05	84	2,27	115	3,29	1250,30	32,10	89,50	2,45	213,51	6,13	1853	50,50
16-mar	7456	338,70	132	5,86	56	2,31	84	3,45	239	10,26	1052,30	48,07	86,38	3,85	238,97	9,53	2083	82,99
17-mar	4823	143,68	1	0,03	55	1,58	76	2,19	562	17,38	747,76	23,89	72,62	2,05	280,61	8,67	1713	51,49
18-mar	1885	37,42	24	0,43	81	1,65	87	1,91	473	9,14	282,62	6,16	85,22	1,75	492,69	8,87	2554	53,06
19-mar	37	1,45	302	11,18	75	3,34	89	3,45	368	15,36	45,07	1,79	84,93	3,69	477,54	19,33	2494	109,54
20-mar	0	0,00	662	19,36	85	2,28	88	2,40	435	11,24	80,64	2,22	84,88	2,14	421,47	11,77	2512	64,27
21-mar	0	0,00	804	16,49	119	2,73	84	1,76	293	6,06	102,19	2,09	80,35	1,62	429,40	9,09	2506	53,36
22-mar	8	0,16	837	17,41	152	2,95	86	1,76	390	8,77	107,42	2,08	79,71	1,80	371,36	7,60	2533	57,58
23-mar	187	7,91	947	38,67	200	8,15	85	3,68	499	22,23	142,58	6,10	77,76	2,99	417,41	15,91	2491	101,40
24-mar	541	20,37	1094	40,29	262	9,56	86	3,48	705	30,16	199,88	8,45	78,58	3,37	481,23	20,23	2524	96,71
25-mar	540	21,81	1293	49,90	324	14,15	86	3,62	861	35,99	218,40	9,59	82,13	3,66	572,22	21,76	2524	102,95
26-mar	52	2,08	1200	46,27	333	12,27	91	3,54	1145	42,68	194,36	7,10	87,48	3,70	674,89	24,32	2545	104,05
27-mar	1	0,02	938	19,98	305	5,52	85	1,81	1166	23,99	150,03	2,88	82,21	1,77	767,59	16,44	2480	50,42
28-mar	99	2,03	1022	20,29	333	6,48	85	1,58	1073	19,75	142,52	3,14	83,00	1,84	792,43	16,70	2396	48,50
29-mar	1091	23,52	1331	28,14	407	10,05	86	2,12	1330	30,58	292,21	6,67	84,56	2,10	775,45	16,63	2034	47,28
30-mar	1359	51,21	1651	63,39	493	18,76	92	3,36	1750	64,31	349,52	14,20	86,12	3,30	816,99	33,17	2188	87,20
31-mar	227	8,14	1973	70,22	579	19,66	94	3,43	2168	77,23	247,53	8,84	88,71	3,01	978,90	36,54	2282	83,62

-1 B767

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	297	20,04	439	27,34	9	0,46	0	0,00	1	0,06	207,66	14,34	0,00	0,00	158,07	8,43	236	12,91
13-mar	4056	160,50	2599	99,78	319	13,11	8	0,29	3	0,12	876,16	10,76	14,41	8,17	104,95	16,84	791	30,10
14-mar	8629	157,37	4211	88,45	539	11,35	44	0,86	68	1,42	1329,54	8,42	55,51	12,80	136,37	12,75	1089	21,38
15-mar	9235	45,00	2405	11,94	458	2,51	85	0,42	189	1,05	1250,16	14,85	91,10	4,42	243,94	22,64	1790	9,65
16-mar	7512	241,94	129	4,40	50	1,78	83	3,04	251	8,38	1055,27	14,65	85,94	3,14	306,70	38,82	2146	72,83
17-mar	4872	113,21	1	0,02	57	1,30	76	1,56	562	12,15	756,75	23,99	73,14	3,11	291,93	31,17	1708	37,27
18-mar	1932	9,66	21	0,11	95	0,48	86	0,39	655	3,10	288,58	26,87	84,44	2,85	542,56	21,13	2364	11,81
19-mar	40	0,20	283	1,58	94	0,52	91	0,46	755	4,40	45,88	10,23	86,67	5,42	638,02	49,54	2325	12,58
20-mar	0	0,00	635	3,22	103	0,55	88	0,45	1000	4,73	80,54	13,17	85,16	2,62	677,36	70,95	2322	12,02
21-mar	0	0,00	795	5,62	121	0,99	83	0,66	1035	8,70	100,43	13,33	79,84	2,49	802,09	82,83	2316	17,88
22-mar	3	0,02	863	6,12	159	1,00	86	0,54	1312	9,80	110,02	15,80	79,61	3,07	822,67	87,65	2339	16,00
23-mar	144	1,74	982	13,66	204	2,50	85	1,17	1609	19,70	142,15	25,82	77,13	2,72	969,63	80,56	2308	30,64
24-mar	499	3,07	1143	7,78	265	1,95	86	0,64	1998	13,72	201,43	30,25	78,90	3,00	1135,29	67,95	2334	15,93
25-mar	564	4,32	1357	9,26	320	2,10	86	0,66	2322	17,78	226,77	24,09	81,31	3,20	1298,83	92,51	2333	16,34
26-mar	51	0,33	1292	7,57	325	1,97	91	0,61	2809	16,67	204,53	21,58	86,88	3,15	1401,44	94,94	2357	15,34
27-mar	1	0,01	1061	6,10	293	1,86	84	0,55	2960	18,06	161,67	24,43	81,42	3,79	1589,63	89,81	2343	14,80
28-mar	98	0,57	1153	6,55	335	1,89	82	0,45	2952	17,99	157,74	21,92	81,09	2,96	1499,27	66,97	2320	13,59
29-mar	1095	44,35	1469	59,75	413	19,23	83	3,81	3157	140,87	307,70	29,02	79,05	3,51	1588,37	77,60	2103	91,20
30-mar	1356	26,79	1802	36,80	493	9,74	89	1,76	3567	74,54	360,99	25,20	81,16	3,30	1707,39	82,76	2217	47,71
31-mar	215	3,29	2132	33,42	572	8,76	90	1,50	3955	63,31	264,15	19,45	82,85	5,16	1795,99	58,81	2320	36,92

+1 E70																		
Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	302	17,90	438	28,04	9	0,63	0	0,00	0	0,00	209,11	12,83	0,00	0,00	157,34	10,34	236	13,79
13-mar	4051	126,72	2594	77,35	319	8,63	7	0,19	0	0,00	876,68	25,88	12,76	0,38	73,70	2,02	798	22,74
14-mar	8601	195,41	4219	94,52	533	12,37	46	1,11	18	0,47	1327,86	35,31	57,92	1,29	180,98	4,10	1135	27,16
15-mar	9180	164,67	2419	42,20	461	9,30	85	1,66	1	0,02	1249,87	23,43	91,63	1,87	65,16	1,16	1923	39,29
16-mar	7439	167,56	131	3,45	54	1,42	80	2,01	37	0,94	1049,35	23,86	81,99	1,98	118,44	2,82	2154	56,25
17-mar	4797	100,76	1	0,02	57	1,20	76	1,58	24	0,49	744,78	15,69	72,68	1,41	145,21	2,73	2234	48,53
18-mar	1853	35,09	24	0,44	92	2,00	86	1,85	0	0,00	278,68	5,65	81,68	1,56	110,56	2,07	2478	51,48
19-mar	33	1,32	299	11,70	90	3,64	87	3,45	0	0,01	45,44	2,07	79,58	3,19	88,72	4,12	2385	107,77
20-mar	0	0,00	651	13,96	90	1,88	87	1,85	0	0,02	80,45	1,95	81,07	1,72	106,18	2,56	2563	54,32
21-mar	0	0,00	797	19,96	114	3,28	82	2,17	0	0,00	100,89	2,43	75,74	1,89	81,03	2,11	2359	56,79
22-mar	9	0,20	842	18,43	156	3,43	85	2,09	0	0,00	108,05	2,75	75,56	1,76	115,73	2,51	2614	59,40
23-mar	201	7,54	950	32,22	209	7,47	84	3,06	0	0,10	145,26	4,72	74,13	2,66	113,56	4,38	2585	99,93
24-mar	517	17,79	1117	38,44	266	9,12	86	3,19	8	0,31	198,82	6,75	75,73	2,42	103,72	3,91	2716	89,76
25-mar	513	15,74	1317	41,55	324	10,10	86	2,54	4	0,11	218,58	6,49	78,22	2,55	107,24	3,06	2670	82,22
26-mar	51	1,49	1229	33,68	325	8,88	90	2,66	17	0,47	196,64	5,52	83,35	2,12	117,39	3,00	2817	70,43
27-mar	1	0,03	980	23,28	292	7,17	84	2,31	4	0,10	153,56	3,54	80,85	2,01	105,01	2,38	2583	58,40
28-mar	104	2,69	1048	23,87	324	7,75	83	1,98	0	0,00	145,79	3,89	79,40	1,78	117,16	3,09	2314	52,24
29-mar	1103	28,96	1370	32,38	404	9,08	81	2,12	0	0,01	299,05	7,38	73,15	1,76	133,83	2,99	2308	55,51
30-mar	1367	33,31	1685	42,41	483	12,04	87	2,21	0	0,00	353,60	8,55	75,16	1,97	158,57	4,35	2634	61,01
31-mar	217	6,65	1999	59,07	563	18,71	88	2,43	1	0,03	250,50	7,36	75,82	2,40	175,26	5,72	2707	85,17

+1 E70																		
Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	302	17,90	438	28,04	9	0,63	0	0,00	0	0,00	209,11	12,83	0,00	0,00	157,34	10,34	236	13,79
13-mar	4051	126,72	2594	77,35	319	8,63	7	0,19	0	0,00	876,68	25,88	12,76	0,38	73,70	2,02	798	22,74
14-mar	8601	195,41	4219	94,52	533	12,37	46	1,11	18	0,47	1327,86	35,31	57,92	1,29	180,98	4,10	1135	27,16
15-mar	9180	164,67	2419	42,20	461	9,30	85	1,66	1	0,02	1249,87	23,43	91,63	1,87	65,16	1,16	1923	39,29
16-mar	7439	167,56	131	3,45	54	1,42	80	2,01	37	0,94	1049,35	23,86	81,99	1,98	118,44	2,82	2154	56,25
17-mar	4797	100,76	1	0,02	57	1,20	76	1,58	24	0,49	744,78	15,69	72,68	1,41	145,21	2,73	2234	48,53
18-mar	1853	35,09	24	0,44	92	2,00	86	1,85	0	0,00	278,68	5,65	81,68	1,56	110,56	2,07	2478	51,48
19-mar	33	1,32	299	11,70	90	3,64	87	3,45	0	0,01	45,44	2,07	79,58	3,19	88,72	4,12	2385	107,77
20-mar	0	0,00	651	13,96	90	1,88	87	1,85	0	0,02	80,45	1,95	81,07	1,72	106,18	2,56	2563	54,32
21-mar	0	0,00	797	19,96	114	3,28	82	2,17	0	0,00	100,89	2,43	75,74	1,89	81,03	2,11	2359	56,79
22-mar	9	0,20	842	18,43	156	3,43	85	2,09	0	0,00	108,05	2,75	75,56	1,76	115,73	2,51	2614	59,40
23-mar	201	7,54	950	32,22	209	7,47	84	3,06	0	0,10	145,26	4,72	74,13	2,66	113,56	4,38	2585	99,93
24-mar	517	17,79	1117	38,44	266	9,12	86	3,19	8	0,31	198,82	6,75	75,73	2,42	103,72	3,91	2716	89,76
25-mar	513	15,74	1317	41,55	324	10,10	86	2,54	4	0,11	218,58	6,49	78,22	2,55	107,24	3,06	2670	82,22
26-mar	51	1,49	1229	33,68	325	8,88	90	2,66	17	0,47	196,64	5,52	83,35	2,12	117,39	3,00	2817	70,43
27-mar	1	0,03	980	23,28	292	7,17	84	2,31	4	0,10	153,56	3,54	80,85	2,01	105,01	2,38	2583	58,40
28-mar	104	2,69	1048	23,87	324	7,75	83	1,98	0	0,00	145,79	3,89	79,40	1,78	117,16	3,09	2314	52,24
29-mar	1103	28,96	1370	32,38	404	9,08	81	2,12	0	0,01	299,05	7,38	73,15	1,76	133,83	2,99	2308	55,51
30-mar	1367	33,31	1685	42,41	483	12,04	87	2,21	0	0,00	353,60	8,55	75,16	1,97	158,57	4,35	2634	61,01
31-mar	217	6,65	1999	59,07	563	18,71	88	2,43	1	0,03	250,50	7,36	75,82	2,40	175,26	5,72	2707	85,17

+1 M90																		
Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	299	21,97	441	30,13	9	0,50	0	0,00	0	0,00	207,89	14,79	0,00	0,00	157,82	12,30	235	13,58
13-mar	4046	206,02	2595	137,83	319	19,04	6	0,32	0	0,00	875,70	11,43	10,80	5,88	55,54	4,48	793	43,51
14-mar	8607	241,15	4228	120,15	535	15,20	48	1,44	0	0,01	1328,44	7,12	59,74	14,84	175,36	8,45	1159	35,61
15-mar	9201	242,34	2430	69,70	457	12,20	85	2,31	3	0,09	1249,70	14,33	91,81	3,99	172,43	10,71	1925	51,32
16-mar	7463	284,66	130	4,93	49	1,82	81	3,16	0	0,00	1052,58	20,56	82,74	3,40	113,24	12,57	2199	88,10
17-mar	4838	121,86	1	0,02	56	1,27	77	1,74	8	0,21	749,72	30,85	73,28	3,45	68,33	5,35	2130	51,39
18-mar	1907	42,67	18	0,35	89	1,78	86	1,95	4	0,08	284,12	33,38	82,02	3,43	181,20	11,04	2474	51,11
19-mar	38	1,66	285	13,00	85	3,34	87	3,65	0	0,00	44,79	10,40	80,33	4,00	140,76	19,72	2397	100,86
20-mar	0	0,00	632	17,60	95	2,52	87	2,29	0	0,01	79,11	11,45	80,84	2,64	163,30	9,21	2562	68,59
21-mar	0	0,01	782	17,80	118	2,63	82	1,78	0	0,00	99,65	12,49	75,87	2,70	133,43	11,06	2353	53,95
22-mar	5	0,10	830	15,25	155	2,90	86	1,59	2	0,04	106,04	14,92	76,35	2,15	173,12	8,50	2629	53,66
23-mar	169	7,32	943	36,56	195	7,30	85	3,46	4	0,17	139,62	28,77	74,16	2,94	174,17	15,72	2594	102,84
24-mar	529	20,69	1111	42,08	252	8,91	86	3,28	0	0,00	198,85	28,82	75,61	2,51	138,72	18,96	2718	98,89
25-mar	547	22,81	1324	55,01	315	11,77	85	3,32	18	0,70	219,83	28,65	77,43	3,54	156,68	16,74	2700	102,54
26-mar	55	2,00	1255	43,49	327	11,68	90	3,35	2	0,07	200,16	26,90	82,33	3,19	157,07	21,13	2866	98,82
27-mar	1	0,02	1012	18,34	298	5,23	86	1,77	12	0,25	158,62	28,71	81,62	2,26	81,60	9,03	2590	49,87
28-mar	110	2,15	1104	24,15	324	6,70	83	1,86	0	0,00	150,94	27,86	78,70	3,40	89,72	7,87	2325	48,94
29-mar	1116	23,21	1408	27,87	404	8,40	81	1,57	0	0,00	300,97	34,94	72,70	3,00	103,13	8,05	2311	46,49
30-mar	1388	42,49	1724	53,96	484	14,25	88	2,64	0	0,00	356,62	33,36	75,75	3,68	143,67	13,33	2637	81,88
31-mar	217	6,53	2059	59,68	564	14,90	90	2,83	5	0,14	252,90	26,16	77,62	6,16	158,68	11,59	2697	77,79

+1 B767

Giorno	Code [persone]										Tempo medio di attesa [min]						Throughput [persone]	
	regional						station		terminal		regional		station		terminal			
	Sendai		Sakata-Tsuruoka		Niigata		Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std
	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std	Media	Dev. Std												
12-mar	291	15,06	437	24,57	9	0,56	0	0,00	0	0,00	204,15	14,98	0,00	0,00	157,84	11,14	237	15,58
13-mar	4026	229,74	2600	140,21	317	19,17	7	0,41	0	0,00	876,24	44,85	12,66	0,65	56,46	2,87	777	44,25
14-mar	8602	279,03	4231	137,64	543	17,51	43	1,34	0	0,00	1326,37	41,87	54,24	1,58	123,08	4,19	1146	32,44
15-mar	9219	228,74	2448	60,94	461	12,65	84	2,42	0	0,00	1252,87	32,57	91,22	2,23	170,19	4,88	1909	53,47
16-mar	7447	311,76	139	5,95	51	2,17	80	3,09	0	0,00	1054,59	42,05	82,35	3,33	119,02	4,86	2214	91,01
17-mar	4779	126,05	1	0,02	55	1,54	77	1,99	8	0,21	743,08	19,43	73,70	1,99	90,49	2,41	2001	50,26
18-mar	1809	39,75	22	0,45	95	2,07	87	1,69	0	0,00	273,17	5,16	83,12	1,87	180,62	3,69	2473	47,08
19-mar	32	1,43	300	12,67	83	3,44	87	4,04	0	0,00	44,26	1,77	79,87	3,32	78,32	3,12	2372	106,11
20-mar	0	0,00	641	17,34	94	2,52	88	2,28	0	0,00	79,31	2,27	81,63	2,21	101,30	2,72	2569	66,40
21-mar	0	0,00	803	17,89	131	3,04	82	1,79	0	0,00	102,11	2,24	75,31	1,66	76,48	1,57	2368	56,65
22-mar	5	0,11	881	16,84	180	3,91	85	1,78	1	0,02	113,85	2,43	74,94	1,47	109,29	2,31	2602	58,23
23-mar	173	7,41	996	36,77	227	9,64	85	3,14	1	0,04	150,76	6,12	73,62	2,64	114,93	4,86	2599	92,76
24-mar	534	19,05	1150	39,64	272	9,32	86	2,97	9	0,33	205,67	7,08	75,91	2,80	83,79	2,95	2728	101,66
25-mar	561	20,39	1338	51,06	335	13,76	86	3,26	1	0,04	225,96	8,81	77,72	3,02	110,76	3,85	2711	106,94
26-mar	55	2,06	1246	43,73	339	12,12	91	3,38	10	0,36	200,68	6,82	83,72	2,80	84,60	3,09	2765	104,75
27-mar	1	0,02	1000	20,89	306	5,99	86	1,73	19	0,35	157,11	3,04	81,24	1,66	129,14	2,31	2554	54,61
28-mar	113	2,55	1093	21,35	331	7,07	83	1,82	0	0,00	149,79	3,06	78,79	1,62	120,43	2,68	2343	51,88
29-mar	1140	22,46	1419	29,81	402	8,17	81	1,59	0	0,00	303,85	6,34	71,82	1,38	136,08	2,93	2308	44,45
30-mar	1351	42,40	1745	55,91	482	14,81	87	2,44	1	0,03	357,81	11,11	75,05	2,18	141,42	4,36	2640	77,13
31-mar	190	5,55	2084	56,72	552	14,56	92	2,60	0	0,00	251,25	6,73	79,06	2,33	143,29	3,86	2701	75,77