Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Fragilità e resilienza del sistema elettrico soggetto a fenomeni naturali

S. Giovinazzi, M. Pompili, A. Geri, R. Lamedica

Report RdS/PAR2016/023

FRAGILITÀ E RESILIENZA DEL SISTEMA ELETTRICO SOGGETTO A FENOMENI NATURALI

Sonia Giovinazzi, Massimo Pompili, Alberto Geri, Regina Lamedica (Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2016
Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici
Progetto: Sviluppo di un modello integrato di Smart District urbano
Obiettivo: Sicurezza infrastrutture critiche e monitoraggio Smart District - DSS protezione e sicurezza delle infrastrutture critiche
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Modelli per l'analisi della fragilità fisica e funzionale della rete elettrica soggetta a eventi critici"
Responsabile scientifico ENEA: Maurizio Pollino
Responsabili scientifici: Massimo Pompili e Alberto Geri

Indice

SOMMARIO 5

1 INTRODUZIONE 6

2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI 8

2.1 RICERCA DI LETTERATURA SU DSS PER LA RETE ELETTRICA 8
2.2 MODELLO PROPOSTO PER IL DSS PER LA STIMA DI SCENARI SISMICI DETERMINISTICI DI DANNO E IMPATTO SULLA RETE ELETTRICA 10
2.3 VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ SISMICA 12
2.3.1 Descrizione dello scuotimento del suolo 13
2.3.2 Intensità macrosismica, I 14
2.3.3 Accelerazione PGA e velocità PGV di picco al suolo e ordinate dello spettro di risposta in accelerazione Sa(T) e velocità S_v(T) 14
2.3.4 Spostamento di picco al suolo PGD e ordinate dello spettro di risposta in spostamento Sd (T) 17
2.3.5 Rappresentazione di amplificazioni dello scuotimento dovute a particolari condizioni di suolo 17
2.3.6 Stima delle deformazioni permanenti e del livello di liquefazione 18
2.3.7 Rappresentazione delle incertezze 18
2.4 DEFINIZIONE DI UNA TASSONOMIA PER LA RACCOLTA E LA CLASSIFICAZIONE DEI DATI 19
2.4.1 Identificazione dei componenti del sistema elettrico vulnerabili all'azione sismica, e degli attributi rilevanti ai fini del comportamento sismico. 19
2.4.2 Inventario e classificazione delle componenti del sistema elettrico secondo la tassonomia identificata 22
2.5 PROPOSTA DI UNA PROCEDURA STANDARDIZZATA PER LA RACCOLTA DI INFORMAZIONI NECESSARIE PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLE FRAGILITÀ SISMICA DEL SISTEMA ELETTRICO 23
2.5.1 Metriche e Descrittori del danno Fisico 23
2.5.2 Segnalazione di impatti funzionali 24
2.5.3 Segnalazione di problematiche legate all'interdipendenza 25
2.5.4 Segnalazione di attributi di resilienza 25
2.5.5 Esemplificazione di implementazione della procedura standardizzata proposta per la raccolta di informazioni 26
2.6 VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA E DEL DANNO ATTESO 28
2.6.1 Curve di fragilità per impianti di generazione e sottostazioni (Nodi) 28
2.6.2 Relazioni analitiche per il calcolo del numero di riparazioni a Km attese per linee (aeree o interrate) 29
2.7 CASO STUDIO 33
2.7.1 Database 33
2.7.2 Simulazione della pericolosità 33
2.7.3 Valutazione del danno fisico 34
2.8 INTERAZIONI CON IL "TAVOLO DI LAVORO RESILIENZA" 37

3 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI 38

4 RIFERIMENTI 39

BIBLIOGRAFIA 39
RAPPORTI TECNICI - RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO 42

5 CURRICULUM SCIENTIFICO DEI PARTECIPANTI 43

Sommario

Ad oggi in Italia, così come nel resto del mondo, non esiste una procedura standardizzata per la raccolta e la documentazione dei danni fisici e funzionali indotti da fenomeni naturali sulle infrastrutture del Sistema Elettrico di distribuzione e trasmissione. A fronte di un'attenta revisione della letteratura nazionale e internazionale, e di quanto proposto dal Tavolo di Lavoro "Resilienza" organizzato dall'Autorità per l'energia elettrica il gas e il sistema idrico, l'obiettivo delle attività svolte nell'ambito del presente Accordo si Collaborazione si propongono lo studio e lo sviluppo di modelli per l'acquisizione di dati e per l'analisi della fragilità fisica e funzionale del Sistema Elettrico di Distribuzione, soggetto a fenomeni naturali quali eventi sismici, allagamenti, e eventi metereologici estremi.

Il presente Report, pertanto, si focalizza sullo studio e sulla definizione di modelli per l'analisi della fragilità fisica e funzionale della rete elettrica (linee aeree, cavi interati e sottostazioni) soggetta a eventi critici. I modelli proposti sono stati formulati in modo da rendere possibile la loro integrazione funzionale all'interno del Sistema di Supporto alle Decisioni (DSS) implementato nell'ambito del sotto-obiettivo d.1 del progetto D6 "*Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano*". Grazie a tale integrazione è possibile, a oggi, eseguire con il suddetto DSS, analisi deterministiche di scenario, a supporto degli operatori della rete elettrica per la pianificazione e la gestione dell'emergenza sismica.

1 Introduzione

I sistemi infrastrutturali, garantiscono la circolazione di persone, beni, servizi e informazioni da cui dipendono la salute, la sicurezza, il comfort e l'attività economica. Le reti per la fornitura dell'energia elettrica, dell'acqua potabile e delle acque reflue, le reti di telecomunicazione, la rete stradale e ferroviaria o le strutture critiche come ospedali, porti e aeroporti sono cruciali per il funzionamento di routine della società e svolgono un ruolo fondamentale nelle operazioni di emergenza, di risposta e ricostruzione dopo calamità naturali.

Purtroppo i sistemi infrastrutturali mostrano una elevata fragilità a calamità naturali, quali, tra gli altri, terremoti, eventi metereologici estremi, inondazioni. Nonostante tale fragilità e la gravità delle conseguenze, dirette e indirette, che in caso di eventi estremi, la perdita dei servizi forniti dalle suddette reti potrebbe avere sulle comunità colpite, l'analisi del loro comportamento fisico e funzionale e la messa a punto di strategie ottimali di rimessa in servizio e/o riparazione/ricostruzione appare sottorappresentata nella letteratura nazionale e internazionale così come nelle pratiche degli addetti ai lavori. Ciò è in parte dovuto al fatto che, dopo un evento calamitoso naturale, l'attenzione viene focalizzata tipicamente sugli edifici, che rappresentano la maggiore quota parte dell'ambiente costruito e sembrano, pertanto, rappresentare un rischio maggiore per la sicurezza immediata delle comunità colpite, se danneggiati.
La mancanza di letteratura specifica sulla fragilità dei sistemi infrastrutturali a fenomeni calamità è anche in parte dovuta alla scarsità, o alla totale mancanza, di dati esaurienti sul danno fisico indotto dagli eventi calamitosi sulle infrastrutture stesse e sulla perdita di funzionalità conseguente al danno fisico. La disponibilità di tali dati, consentirebbe la definizione di modelli empirici e/o la calibrazione di modelli analitici per la previsione degli impatti fisici e funzionali attesi su sistemi infrastrutturali se soggetti a un evento calamitoso, similmente a quanto già fatto per gli edifici. La disponibilità di tali modelli, consentendo la previsione del comportamento dei sistemi a possibili eventi futuri, permetterebbe di definire strategie di mitigazione del rischio e strategie per la rapida rimessa in servizio, riparazione e ricostruzione.
Il lavoro descritto nel presente Report rientra nell'Accordo di Collaborazione (AdC) stipulato nell'ambito del progetto D6 ("Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano"), per ciò che riguarda le attività delineate nel sotto-obiettivo d.1 ("DSS protezione e sicurezza delle infrastrutture critiche"). Le attività svolte trattano in particolar modo gli effetti di eventi sismici sulle reti elettriche di distribuzione; mentre altri fenomeni naturali, quali sovratemperature estive, esondazioni, in grado di provocare danni e disservizi sullo stesso sistema sono allo studio e saranno a breve oggetto di un nuovo rapporto.

Il lavoro svolto in collaborazione nel sotto-obiettivo d.1 ha mirato a colmare la lacuna di modelli di previsione per sistemi infrastrutturali soggetti a eventi calamitosi, in particolare relativamente al comportamento delle reti elettriche soggette a eventi sismici.
Vengono proposti in particolare modelli definiti su base empirica, per la caratterizzazione della fragilità fisica di sottostazioni, cavi interrati e linee aeree e viene effettuata la loro integrazione all'interno della piattaforma CIPCast-ES, messa a punto da ENEA, (cfr. ENEA, Report RdS/PAR2016/020).
Per la definizione di tali modelli si è fatto riferimento ai dati, alle informazioni e evidenze che si sono rese disponibili a seguito della sequenza sismica che si è verificata negli anni 2010-2011 nella regione di Canterbury in Nuova Zelanda e che ha compreso, tra gli altri, i terremoti di Darfield del 4 settembre 2010 (Mw= 7.1) e di Christchurch del 22 febbraio 2011 (Mw=6.2). Grazie alla preziosa collaborazione delle compagnie che gestiscono la trasmissione e la distribuzione dell'energia elettrica (Transpower e Orion rispettivamente) nelle zone colpite, sono state raccolte informazioni di fondamentale importanza sia relativamente alle caratteristiche dei sistemi di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica, sia relativamente al livello di impatto fisico e funzionale indotto dal terremoto sui sistemi stessi. È stata inoltre possibile una accurata comprensione delle caratteristiche sismiche dell'evento grazie alla disponibilità di un gran numero di registrazioni dello scuotimento del terreno e di dati relativi alla deformazione del terreno. Quello del terremoto di Christchurch rappresenta il primo evento nel quale sia stato possibile avere a

disposizione e, quindi, processare un'ampia mole di dati dettagliati e georiferiti della rete elettrica e dei danni subiti in conseguenza del sisma. Per i motivi sopracitati, questo caso studio è largamente riconosciuto come un caso studio di riferimento a livello internazionale e pertanto è stato analizzato in questo studio.

Un ulteriore notevole risultato raggiunto nell'ambito di questo accordo di collaborazione è stato la sinergia e la collaborazione stabilita con il *Tavolo di Lavoro Resilienza,* dell*'Autorità per l'energia elettrica il gas e il sistema idrico"* istituito con la determinazione Dic. 6/2016 e con la finalità di sviluppare il tema della resilienza delle reti elettriche e di approfondire la regolazione incentivante per la riduzione dei minuti persi per forza maggiore. Nel Tavolo si sottolinea l'opportunità di predisporre linee guida per meglio affrontare il complesso tema della resilienza, intesa non solo come la capacità di resistere a sollecitazioni che hanno superato i limiti di tenuta del sistema stesso, ma anche come la capacità di ripristinare rapidamente ed efficacemente lo stato di funzionamento.

Le attività sviluppate nell'ambito della collaborazione e la Piattaforma DSS messo a punto nel sotto-obiettivo d.1 (cfr. ENEA, Report RdS/PAR2015/016 e Report RdS/PAR2016/020), per ora solo relativamente al fenomeno sismico, potranno essere strumentali alle valutazioni della resilienza del sistema elettrico, dei piani di lavoro da parte degli operatori nonché alla successiva regolazione incentivante introdotte dall'Autorità, come spiegato di seguito. A tal fine, e come già ribadito sopra, verranno messi a punto e implementati all'interno di CIPCast-ES, modelli per predire, il comportamento del sistema elettrico a eventi metereologici particolarmente severi, sia estivi che invernali.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Ricerca di letteratura su DSS per la rete elettrica

Il sistema elettrico può essere molto fragile ai terremoti, se le componenti che lo costituiscono sono esse stesse fragili allo scuotimento sismico o alle deformazioni del terreno indotte dal terremoto. Solo per citare alcuni esempi, a seguito del terremoto di Northridge (USA) del 1994, tutti i circa 1,5 milioni di utenti serviti dal *LADWP Dipartimento per L'Acqua e l'Energia Elettrica* (Los Angeles del Dipartimento of Water and Power) persero la fornitura del servizio elettrico, molti per una settimana o più [1]. Il sisma causò il danneggiamento di numerose stazioni e sottostazioni di distribuzione e di trasmissione, anche di importanza critica; ad esempio vicino all'epicentro, il terremoto causò ingenti danni a una stazione per la trasformazione la corrente continua in corrente alternata ad uso domestico.

In Nuova Zelanda, Il terremoto che colpì la città di Christchurch il 22 febbraio del 2011, causò circa 629 milioni di minuti di interruzione del servizio elettrico per gli utenti serviti [2] provocando, inoltre, gravi conseguenze sulla funzionalità delle reti dipendenti dalla fornitura dell'energia elettrica; in particolare fu colpito il servizio fornito dalle reti di telecomunicazione e dalla rete per la gestione delle acque reflue. L'impatto del terremoto sulla funzionalità della rete elettrica avrebbe potuto essere molto peggiore. La maggior parte delle interruzioni di corrente furono causate dal danneggiamento dei cavi interrati dovuto alla liquefazione e alla deformazione del terreno indotte dal terremoto. Fortunatamente le componenti fuori terra, quali le linee aeree e le sottostazioni, ebbero invece un buon comportamento mostrando danni limitati, grazie a un programma di mitigazione del rischio sismico messo in atto alcuni anni prima del terremoto [3].

A seguito del terremoto di Christchurch, i gestori delle reti espressero la necessità di poter eseguire analisi di scenario [4] al fine di:

1) confrontare strategie per la gestione dell'emergenza e, per la riparazione e/o ricostruzione delle componenti danneggiate durante la fase di risposta;
2) poter effettuare valutazioni in prospettiva multi-rischio per scegliere tecniche e strategie di costruzione in grado di garantire un comportamento resiliente in caso di futuri eventi calamitosi di natura sismica o di altra natura (ad esempio allagamenti o eventi metereologici estremi);
3) costruire e sostenere *"business-cases"* per investire in resilienza.

La disponibilità di un *Decision Support System* (DSS) realizzato ad hoc per sistemi di rete elettrica avrebbe consentito ai gestori delle stesse di testare l'efficacia di strategie alternative di mitigazione e di supportare casi aziendali per investire nel miglioramento della resilienza della rete, come auspicato dagli stessi.

Un DSS è un sistema software di supporto alle decisioni, che permette di aumentare l'efficacia dell'analisi in quanto fornisce supporto a tutti coloro che devono prendere decisioni strategiche di fronte a problemi che non possono essere risolti con i modelli della ricerca operativa. La funzione principale di un DSS è quella di estrarre da una rilevante quantità di dati, in poco tempo e in modo versatile, le informazioni utili ai processi decisionali.

Un DSS contiene solitamente strumenti di "business Intelligence" e di tecnologie dei "sistemi esperti", si avvale di un ambiente interattivo, ed è strutturato in modo da favorire la facilità d'uso alla portata di tutti gli utenti. Quando i processi decisionali sono legati a entità o eventi che si verificano sul territorio un DSS si avvale, solitamente, anche di un sistema GIS *"Geographic Information System"*, un sistema informativo geografico che permette di analizzare, rappresentare, interrogare entità o eventi che si verificano sul territorio, permettendo, tra le altre cose, di creare mappe, integrare informazioni, visualizzare scenari anche tridimensionalmente.

La letteratura internazionale descrive diversi studi volti a definire le basi teoretiche per la creazione di piattaforme informatiche per l'analisi del rischio atteso alle reti elettriche a seguito di fenomeni naturali e,

per la creazione di DSS volti a informare e supportare la valutazione, gestione e mitigazione del rischio sismico per le reti elettriche.

Vengono citati sotto alcuni di questi studi a titolo di esempio, fermo restando che una revisione esaustiva della letteratura è fuori dallo scopo di questo documento.

Negli Stati Uniti *l'American Lifeline Alliance, ALA*, ha definito delle linee guida e commentari [5] che descrivono un processo multilivello per la valutazione delle prestazioni dell'energia elettrica attese nel caso in cui il sistema sia soggetto a calamità naturali o ad eventi calamitosi indotti dall'uomo.

Sempre negli Stati Uniti, la *Federal Emergency Management Agency FEMA* ha messo a punto una piattaforma informatica nota come *HAZUS-MH* [6], per stimare i rischi derivanti da pericoli naturali per i differenti elementi dell'ambiente costruito, incluso il sistema di fornitura dell'energia elettrica. Per il particolare caso del sistema elettrico soggetto a eventi sismici *HAZUS-MH* definisce:

- curve di fragilità per diversi componenti delle reti di energia elettrica (cioè sottostazioni, impianti di generazione e circuiti di distribuzione); le curve di fragilità consentono di valutare la probabilità di raggiungere o superare quattro livelli di danno, a crescente entità, dato il livello di scuotimento del suolo atteso;
- una metodologia semplificata per la valutazione delle prestazioni funzionali del sistema danneggiato, in termini di probabilità stimata per possibili interruzioni di corrente;
- curve di ripristino della funzionalità, definite su base esperta, per impianti di generazione, sottostazioni elettriche e reti di distribuzione [7]. Un tentativo di migliorare la modellizzazione dei processi di ripristino post-terremoto definiti da *HAZUS-MH* è stato fatto dal (NIBS [6], che ha proposto modelli di simulazione di eventi discreti per stimare curve di ripristino quantitative che tenessero esplicitamente conto delle variabili decisionali dell'azienda (ad esempio, equipaggi di riparazione e materiale disponibile, ecc.).

In Europa, il progetto SYNER-G[2], finanziato dalla Comunità Europea, ha sviluppato una metodologia integrata e uno strumento software, denominato OOFIMS[3] *"Object-Oriented Framework for Infrastructure Modeling and Simulation"* [9]-[10] per la valutazione della vulnerabilità sismica sistemica e del rischio per sistemi complessi, comprese le reti di energia elettrica. SYNER-G ha confrontato e selezionato i modelli per la valutazione della vulnerabilità sismica dei componenti delle reti elettriche [11] e ha implementato lo strumento OOFIMS su un caso studio reale, ovvero la valutazione probabilistica delle prestazioni funzionali (in termini di flussi, perdita di connettività e perdita di potenza) della rete di trasmissione medio-alta in Sicilia [12] quando soggetta a terremoti.

Pur ribadendo il grande valore degli studi sopracitati, si nota come nessuno di essi abbia raggiunto il risultato di creare un DSS di facile utilizzo e/o comunque pronto per essere utilizzato, in modo operativo, dai gestori delle reti, dalle autorità locali e governative e dai dipartimenti di protezione civile.

Per raggiungere tale obbiettivo questo studio propone una personalizzazione ad hoc della Piattaforma DSS, denominata CIPCast (cfr. ENEA, Report RdS/PAR2015/016) con l'obbiettivo olistico, di consentire operativamente la previsione e la gestione del rischio per infrastrutture critiche (CI) per diversi tipi di rischi naturali, inclusi i terremoti.

[2] http://www.vce.at/SYNER-G/

[3] https://sites.google.com/a/uniroma1.it/oofims/

2.2 Modello proposto per il DSS per la stima di scenari sismici deterministici di danno e impatto sulla rete elettrica

I passi che si ritengono necessari per stimare i danni fisici e gli impatti funzionali indotti da terremoto su una rete elettrica, cosi come i tempi di ripristino includono [13]:

1. **Valutazione della pericolosità**: generazione di mappe di scuotimento del terreno e di deformazione del terreno e selezione dei parametri più appropriati per descriverli in relazione alla componente del sistema elettrico che si vuole analizzare;
2. **Classificazione dei componenti dell'infrastruttura**: inventario e classificazione dei componenti dell'infrastruttura secondo una tassonomia definita, in modo da raggruppare gli elementi che si prevede si possano comportare in modo simile, sostenendo danni simili quando sottoposti a un evento sismico;
3. **Classificazione dei danni fisici e dell'impatto funzionale**: selezione di scale appropriate per la classificazione del danno fisico indotto dal terremoto a ciascun componente (ad es. per componenti fuori terra: danni strutturali e non strutturali all'edificio che ospita il componente e danni all'apparecchiatura) e l'operabilità residua del componente, che non è necessariamente correlata con il livello e l'entità del danno fisico; utile anche l'utilizzo di metriche qualitative e/o quantitative per la notazione di eventuali effetti di interdipendenza e di fattori che potenzialmente potrebbero contribuire a una prestazione fisica e funzionale più o meno resiliente.
4. **Valutazione del danno**: identificazione di un'appropriata relazione pericolosità-danno da utilizzare per assegnare un livello di danno (secondo la metrica definita nel punto 3) per ciascun componente identificato e classificato (secondo la tassonomia definita al punto 2) in funzione della pericolosità stimata (valutata secondo il punto 1);
5. **Valutazione delle prestazioni del sistema**: stima della prestazione residua dell'intera infrastruttura tenendo conto dei danni stimati a livello di componenti, attraverso analisi di connettività; eventuale valutazione degli effetti di interdipendenza con altri sistemi;
6. **Valutazione del ripristino del servizio**: stima della tempistica necessaria per la riparazione e il ripristino del servizio sia a livello di singoli componenti che a livello dell'intero sistema, sulla base di dati empirici e/o del giudizio di esperti e/o modellazione delle risorse disponibili.

La Figura 1 mostra i principali blocchi funzionali (Bi) di CIPCast [14]-[15] e le ulteriori componenti, quali ad esempio il Database e l'Interfaccia Grafica Utente (GUI).

Il blocco CIPCast B1 riceve dati esterni da diverse fonti esterni (ad es. Dati sismici) per stabilire le condizioni di pericolosità. Il blocco CIPCast B2 stima e monitora l'entità delle manifestazioni per eventi prevedibili, quali ad esempio fenomeni metereologici. Il blocco CIPCast B3 elabora uno "Scenario di danno", correlando la forza delle manifestazioni di rischio attese con la vulnerabilità dei diversi componenti delle Infrastrutture Critiche (CI) nelle aree interessate, al fine di stimare la probabilità che la manifestazione possa effettivamente danneggiare (e, in caso positivo, fino a che punto) gli elementi dell'infrastruttura critica. B4 converte i danni attesi per gli elementi del CI in interruzioni del servizio. B5 è dedicato a informare e a supportare la risposta, consentendo test e analisi *"what-if"* e confrontando diverse strategie per ripristinare il servizio dando priorità alle riparazioni che potrebbero fornire i migliori risultati in termini di ripristino del servizio al maggior numero di utenti e/o a utenze di importanza strategica o con situazioni di vulnerabilità sociale e distribuendo in modo ottimale risorse fisiche e umane.

Dal punto di vista simulativo, tramite opportuni moduli elaborativi ed interfacce grafiche baste su applicazioni GIS, la piattaforma DSS è in grado di generare scenari sintetici (ad esempio, per i terremoti) e valutare le perturbazioni indotte da tali scenari sulle CI. Queste funzionalità sono svolte da un modulo apposito di simulazione di terremoti denominato **CIPCast-ES** (*Earthquake Simulator*, cfr. ENEA, Report RdS/PAR2015/016), il quale consente di elaborare e produrre scenari di danno e impatto per terremoti, dati in input al sistema (essi possono essere definiti arbitrariamente dagli utenti finali o riferiti ad eventi passati

realmente accaduti). Nel caso della simulazione, dal punto di vista del flusso operativo, si prende in considerazione direttamente il Blocco B3 di Figura 1, inserendo in input i dati e i parametri relativi ad un terremoto simulato (ad esempio, un evento realmente accaduto in una certa area). Pertanto, il Workflow specifico della modalità simulativa del DSS è quello riportato in Figura 2.

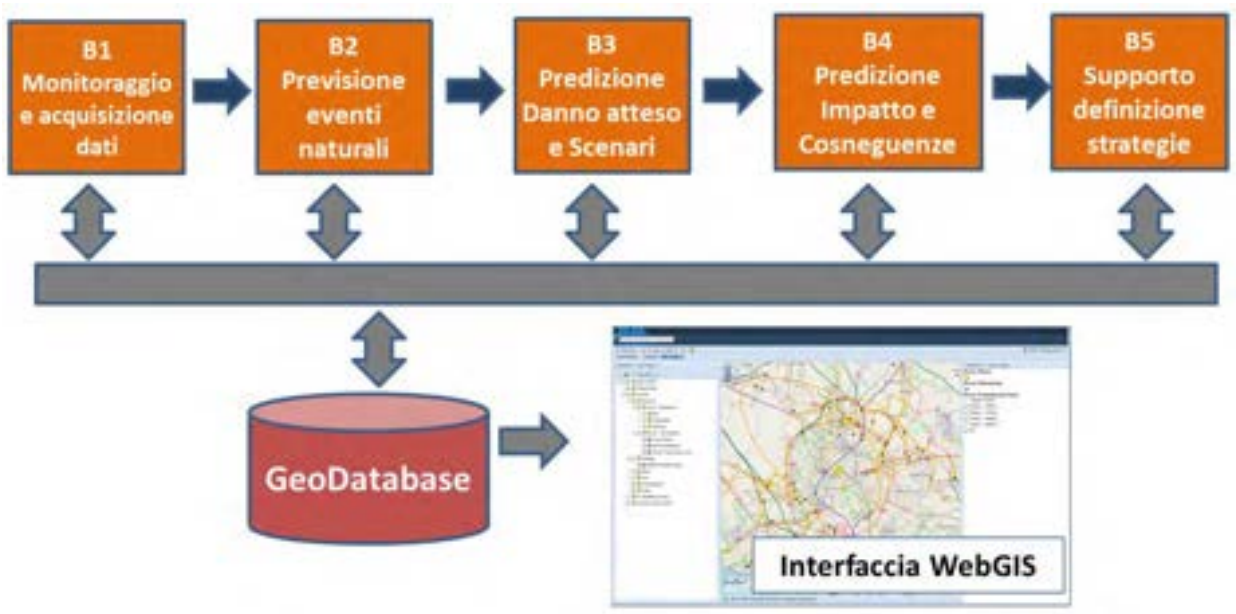

Figura 1. Schema della Piattaforma DSS CIPCast: blocchi funzionali principali (Bi), database e interfaccia grafica utente (WebGIS).

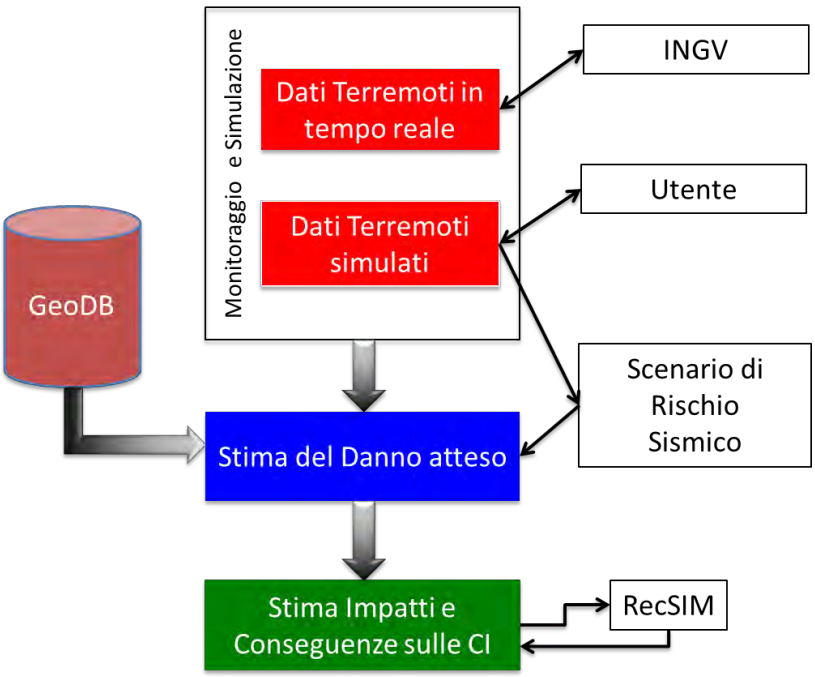

Figura 2. Workflow del DSS CIPCast-ES (Earthquake Simulator) in modalità simulativa (terremoti)

Grazie al modulo CIPCast-ES è possibile, pertanto, eseguire mediante la Piattaforma DSS, analisi deterministiche di scenario, per supportare gli operatori della rete elettrica nella definizione di piani di

contingenza e nell'attività di pianificazione/gestione dell'emergenza sismica. Il valore aggiunto dello strumento sopra descritto riguarda la possibilità di effettuare (in ambiente *user-friendly*) varie e differenti simulazioni, al fine di stimare i danneggiamenti sui singoli componenti della CI elettrica, nonché l'impatto dei servizi forniti da tali sistemi e supportare studi per l'incremento della resilienza.

La Tabella 1 riassume i suddetti passi per la stima del rischio indotto dal terremoto su infrastrutture critiche e come essi siano stati correlati e integrati all'interno dei blocchi funzionali di CIPCast Bi (i=1-5). Si noti come i passi 5 e 6 in Tabella 1, essendo già stati incorporati nei blocchi funzionali di CIPCast (rispettivamente il B4 e il B5) non sono stati oggetto di studio nell'ambito del lavoro descritto nel presente report.

Tabella 1. Blocchi funzionali CIPCast e passi per consentire la valutazione all'interno di CIP-Cast-ES del rischio indotto dal terremoto alle reti di energia elettrica

Blocchi funzionali CIPCast	Passi specifici implementati per la stima del rischio sismico di un sistema di distribuzione energia elettrica
B1	1. Valutazione della pericolosità sismica
B3	2. Classificazione dei componenti dell'infrastruttura
	3. Classificazione dei danni fisici e degli impatti funzionali
	4. Valutazione del danno fisico e dell'impatto funzionale al livello del singolo componente
B4	5. Valutazione della funzionalità residua a livello di sistema *
B5	6. Valutazione del tempo di ripristino del servizio *

**Già implementate all'interno di CIPCast*

2.3 Valutazione della Pericolosità sismica

Per valutare le prestazioni di un sistema infrastrutturale dopo un terremoto, è necessario conoscere simultaneamente lo stato del danno e la funzionalità residua di ogni componente. A tal fine è necessario stimare, in primo luogo, lo scuotimento del suolo e le deformazioni del terreno, transitorie e permanenti, in corrispondenza di ciascun componente del sistema.

CIPCast-ES, come delineato nel precedente Paragrafo, è il modulo di CIPCast realizzato ad-hoc per consentire la valutazione deterministica di scenari di rischio sismico per il costruito ordinario, sia per eventi reali che per eventi definiti dall'utente [16]. Nel primo caso, e per quanto riguarda il territorio italiano, CIPCast-ES riceve, entro 1 minuto dal verificarsi del terremoto, dall' Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV, in Italia (http://cnt.rm.ingv.it/) i seguenti dati:

- le coordinate dell'epicentro del terremoto [Latitudine; Longitudine];
- la profondità dell'ipocentro, h [km];
- la magnitudo momento M_W, misurata secondo la Scala Richter.

Similmente, CIPCast-ES consente ad oggi di simulare un terremoto definito dall'utente, nell'area di interesse, previa definizione degli stessi parametri di input definiti sopra [16].

Una volta acquisite tali informazioni CIPCAST-ES consente la definizione delle mappe di scuotimento del terreno, tenendo conto:

- dell'attenuazione del moto del terreno con l'aumentare della distanza dall'epicentro, grazie all'uso di "*Ground Motion Prediction Equation*" (GMPE);

- l'eventuale amplificazione del moto del terreno dovuta a fenomeni di amplificazione locale possibilmente indotta da particolari condizioni di suolo e/o morfologiche. Ad oggi CIPCast-ES consente solo di valutare eventuali amplificazioni dovute a particolari condizioni di suolo, se disponibile una mappa caratterizzante l'area analizzata in termini classi di suolo (secondo la classificazione della normativa italiana [17] e/o Eurocodice8 [18] o fattore di amplificazione (AF), come spiegato di seguito.

Nell'ambito delle attività svolte nell'AdC per il PAR2016 è stata migliorata la capacità di CIPCast-ES di valutare e rappresentare scenari deterministici di pericolosità sismica, con particolare riferimento alla:

- valutazione dello scuotimento del terreno in termini di: accelerazione di picco al suolo, *PGA* rispetto a roccia; velocità di picco al suolo, *PGV* rispetto a roccia; Intensità macrosismica *I*; accelerazione spettrali *Sa(T);* spostamenti spettrali *Sd(T);*
- rappresentazione dell'amplificazione dovuta a particolari condizioni del terreno.

Nell'ambito delle attività previste per la prossima annualità (PAR2017) saranno, tra le altre cose, incluse ulteriori funzionalità in CIPCast-ES per consentire la valutazione del:

- livello liquefazione (LL) atteso e le deformazioni permanenti del terreno (PG_{Def});
- valutazione e rappresentazione delle incertezze legate alla stima dello scuotimento sismico e delle deformazioni permanenti.

2.3.1 Descrizione dello scuotimento del suolo

Note le coordinate dell'epicentro [Latitudine e Longitudine], la profondità dell'ipocentro h [km] l'entità della magnitudo M dell'evento, è possibile dunque generare con CIPCast-ES una mappa di scuotimento utilizzando una serie di leggi di attenuazione, meglio conosciute nella letteratura scientifica come *Ground Motion Prediction Equation* (GMPE), che consentono di tenere conto di come lo scuotimento si attenua al crescere della distanza della sorgente sismica dall'epicentro. Le GMPE Sono di natura empirica e sono basate su analisi statistiche dei parametri di scuotimento registrati in occasione di terremoti in diverse aree del mondo per una varietà di regimi tettonici.

Nella prima fase di sviluppo, sono state prese in considerazione solo due GMPE, una in termini di intensità macrosismica *I* [21] e una in termini di *PGA* [19].

La valutazione del comportamento sismico delle diverse componenti del sistema di distribuzione dell'energia elettrica richiede però la misura e la rappresentazione dello scuotimento sismico secondo ulteriori metriche. Mentre, per le sottostazioni, costituite generalmente da strutture basse e piuttosto rigide, può essere utilizzata con buona approssimazione la PGA, il comportamento sismico delle linee aeree deve essere valutato rispetto alle accelerazioni spettrali Sa(T), in quanto, per le caratteristiche di altezza, snellezza, flessibilità, e ridotta massa delle stesse, il loro periodo naturale di oscillazione T(s) è piuttosto elevato; le prestazioni delle componenti interrate come i cavi, devono essere, invece, stimate rispetto alla velocità di picco del terreno (PGV), o agli spostamenti spettrali Sd(T), essendo i cavi interrati più sensibili all'entità degli spostamenti subiti piuttosto che alle accelerazioni.

Per i suddetti motivi, al fine di questo studio, è stato necessario implementare ulteriori GMPE all'interno di CIPCast-ES: pertanto, la piattaforma DSS oggi dispone di tutte le GMPE presentate nei seguenti sotto-paragrafi.

2.3.2 Intensità macrosismica, I

Dopo una attenta revisione della letteratura [20], sono state incluse in CIPCast-ES le Eq. (1), (2) e (3) derivate rispettivamente da [21], [22] e [23].
In particolare la [21], Eq. (1), è stata sviluppata su una base di dati in area Mediterranea, con intensità registrate fino al grado ≥ VIII. Essa utilizza la distanza R[Km] epicentrale per eventi con M_W<5.5, altrimenti considera la distanza minima dalla proiezione in superficie della faglia.

$$I_{MMI} = 1.0157 + 1.2566\, M_w - 0{,}6547 \ln\sqrt{R^2+4} \quad (1)$$

$$I_{MCS} = 5.862 + 2.460\, M_w - 0.0086\left(\sqrt{R^2+3.91^2} - 3.91\right) - 1.037\left(\ln\sqrt{R^2+3.91^2} - \ln 3.91\right) \quad (2)$$

$$I_{MMI} = 2.085 + 1.428 - 1.402 \ln\sqrt{R^2+h^2+(2.042\, e^{(M_w-5)} - 0.209)^2} + S \quad (3)$$

dove

- M_w è la Magnitudo Momento del terremoto[4],
- *R[km]* è la distanza epicentrale, Nell'Eq. (1), *R[km]* è la distanza epicentrale solo per M_w<5.5, altrimenti deve essere calcolata come la più breve distanza tra il sito e la proiezione in superficie della faglia che ha originato l'evento.
- *h[km]* è la profondità dell'ipocentro (assunta di default pari a 3.91 km nell'Eq. 2).
- *S* nell' Eq. (3) è un fattore topografico del sito.

L'Eq. (3) è considerata valida per una distanza ipocentrale (calcolata come $R^2 + h^2$) inferiore o uguale a 50 km, altrimenti si consiglia di fare riferimento a [23].
È importante notare che le Eq. (1) e (3) fanno riferimento a una intensità macrosismica I_{MMI}, misurata secondo la scala Mercalli Modificata MMI, mentre l'Eq. 2 fa riferimento a una intensità macrosismica I_{MCS} misurata secondo la scala macrosismica Mercalli-Cancani-Sieberg, MCS.

Mentre per la scala macrosismica MMI è possibile considerare una corrispondenza diretta con la scala macrosismica europea, EMS-98 [24], universalmente riconosciuta in Europa come la scala di intensità macrosismica standard e implementata nel metodo macrosismico di vulnerabilità (come descritto in dettaglio nel seguito), non è possibile stabilire una chiara corrispondenza tra la scala MCS e l'EMS-98 [25]. Si può notare tuttavia che i gradi di intensità assegnati secondo la scala MCS tendono ad essere più alti di quelli assegnati usando altre scale [26].

2.3.3 Accelerazione PGA e velocità PGV di picco al suolo e ordinate dello spettro di risposta in accelerazione Sa(T) e velocità S_v(T)

Le GMPE comunemente utilizzate per valutazioni di pericolosità sismica in Europa, e principalmente in Italia, sono quelle di Ambraseys [27], Ambraseys et al. [28] e Sabetta e Pugliese [30][31], e più recentemente Ambraseys et al. [29].
Le relazioni di Ambraseys et al. (1996) e Sabetta e Pugliese (1996) sono state utilizzate nello studio di pericolosità sismica effettuato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia per la redazione della mappa di pericolosità sismica nazionale [32]. Per questo motivo in questo studio si fa riferimento alle GMPE di Ambraseys et al. [28] e Sabetta e Pugliese [31] che, per brevità verranno denominate rispettivamente AMB96 e SP96.

[4] Magnitudo momento (Mw) derivata dal parametro sismologico momento sismico che equivale al prodotto tra area di faglia, dislocazione e la resistenza delle rocce. Il momento sismico e la magnitudo momento rappresentano quindi la migliore stima della reale grandezza del terremoto.

Si nota come, la relazione AMB96 sia stata calibrata rispetto ad una base di dati più ampia e possa essere applicate in un intervallo di dati maggiore, rispetto alla relazione SP96 sviluppate in ambito nazionale.

- *Ambraseys, et al. (1996)*

La relazione AMB96 utilizza una base di dati provenienti principalmente dall'Europa Meridionale e dal Medio Oriente, composta da 422 registrazioni relative a 157 terremoti di magnitudo M compresa tra 4.0 e 7.9 (con magnitudo predominanti inferiori a 6) e profondità focale inferiore o uguale a 30 km. Per gli eventi più forti compresi nella base di dati, spesso associabili a fagliazione superficiale, la distanza sorgente-sito è definita come la minore distanza tra il sito e la proiezione in superficie del piano di faglia. I suoli vengono differenziati con 2 coefficienti di sito, il primo relativo a suoli rigidi, il secondo a suoli soffici. La classificazione dei suoli è basata sul valore del parametro V_{S30}[5].

La relazione di attenuazione di AMB96 è descritta dalla seguente espressione:

$$\log(Y) = C_1 + C_2 * M_s + C_4 * log_{10}\sqrt{R^2 + h_0^2} + C_A S_A + C_s S_s + P\sigma \qquad (4)$$

dove:

- y è l'accelerazione orizzontale di picco del suolo PGA[g] oppure l'ordinata dello spettro di risposta in accelerazione orizzontale Sa(T) al variare del periodo proprio T[s] della struttura analizzata; L'accelerazione massima al suolo PGA coincide con l'ordinata dello spettro di risposta in accelerazione per periodo nullo Sa(T=0);
- M_s magnitudo superficiale, derivata sulle onde superficiali;
- *R[km]* è la distanza sorgente-sito intesa come distanza della proiezione in superficie del piano di faglia dal sito;
- S_A ed S_S sono indicatori delle caratteristiche del profilo del terreno nel sito, sulla base di classi di valori

della velocità media di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m dalla superficie (V_{S30}), così definiti:

$S_A = 0$, $S_S = 0$ per roccia o materiale molto rigido ($V_{S30} > 750$ m/s)
$S_A = 1$, $S_S = 0$ per profilo di terreno rigido ($V_{S30} = 360–750$ m/s)
$S_A = 0$, $S_S = 1$ per profilo di terreno soffice ($V_{S30} = 180–360$ m/s)
$S_A = 1$, $S_S = 1$ per profilo di terreno molto deformabile ($V_{S30} < 180$ m/s)

- σ = deviazione standard del termine log(y); P = costante che assume valore = 0 per valori log(y) pari al 50° percentile e 1 per valori pari all'84° percentile.
- I valori dei coefficienti empirici h_0, C_1, C_2, C_4, C_A e C_S, (coefficienti dipendenti dal periodo considerato per l'oscillatore semplice equivalente alla struttura analizzata) sono forniti da AMB96 al variare di T[s]. In Tabella 2 a titolo di esempio vengono forniti i valori dei coefficienti per il periodo proprio di vibrazione T[s]=2.

Tabella 2. AMB96: coefficienti empirici h0, C1, C2, C4, CA e CS e deviazione standard del termine log(y) per periodo dell'oscillatore semplice T=0s e T=2s

T	C_1	C_2	h_0	C_4	C_A	C_S	σ
0.00	-1.48	0.266	2.5	-0.922	0.117	0.124	0.25
2.00	-3.79	0.503	3.2	-0.728	0.101	0.182	0.32

[5] V_{S30}: velocità media pesata di propagazione delle onde trasversali o di taglio nei primi 30 m di profondità. Viene calcolata con la relazione ∑== i N iiS Vh V1,30 30 dove hi e Vi sono rispettivamente gli spessori e le velocità di propagazione delle onde di taglio associate agli strati i-esimi in cui è stato suddiviso il deposito.

- *Sabetta e Pugliese (1996)*

La banca dati utilizzata è la stessa predisposta dagli autori in precedente studio degli stessi autori (Sabetta e Pugliese, 1987) e consiste in 190 componenti orizzontali e 95 componenti verticali. Ai segnali di partenza di registrazioni relative a 17 terremoti italiani (registrazioni accelerometriche dell'ENEL e dell'ENEA) sono stati applicati i seguenti criteri di selezione:

- inclusione di soli terremoti aventi magnitudo locale M_L[6] superiore a 4.5 registrati almeno da due stazioni;
- inclusione di soli terremoti i cui epicentri sono stati determinati con una incertezza inferiore ai 5 km;
- inclusione di soli terremoti le cui magnitudo sono state determinate con un'incertezza inferiore a 0.3 unità,
- inclusione di registrazioni provenienti da stazioni in campo libero.

L'applicazione dei suddetti criteri ha portato alla selezione di 95 registrazioni. La relazione di attenuazione di SP96 adotta come magnitudo di riferimento la magnitudo M_S per terremoti con M_S>5.5, e M_L per terremoti più deboli (M_L<5.5), a differenza della relazione AMB96, che contempla unicamente la magnitudo M_S. L'espressione analitica della relazione di attenuazione di SP96 è la seguente:

$$\log_{10}(Y) = a + b\,M_s + \; clog_{10}\sqrt{R^2 + h_2} + e_1 S_1 + e_2 S_2 \pm \sigma \qquad (5)$$

dove y[g] è l'accelerazione orizzontale di picco del suolo PGA oppure l'ordinata dello spettro di risposta in accelerazione orizzontale per un assegnato periodo proprio T[s] dell'oscillatore semplice, equivalente alla struttura analizzata;

- M_s magnitudo superficiale, derivata sulle onde superficiali;
- *R[km]* è la distanza sorgente-sito intesa come distanza della proiezione in superficie del piano di faglia dal sito;
- σ è la deviazione standard del logaritmo di Y.
- S1 ed S2 = indicatori delle caratteristiche del profilo del terreno, ai quali vengono attribuiti i seguenti valori:

  $S_1 = 1$ e $S_2 = 0$ per terreni alluvionali (400<Vs<800 m/s) sottili (H≤20m) dove con H si indica lo spessore dello strato di suolo alluvionale

  $S_1 = 0$ e $S_2 = 1$ per terreni alluvionali (400<Vs<800 m/s) profondi (H>20m).

  $S_1 = 0$ e $S_2 = 0$ per terreni rigidi (Vs>800 m/s).

- I valori dei coefficienti empirici a, b, c, e_1, e_2, h, (coefficienti dipendenti dal periodo considerato per l'oscillatore semplice equivalente alla struttura analizzata) sono forniti da SP96 al variare di T[s]. In Tabella 3, a titolo di esempio, vengono forniti i valori dei coefficienti per il calcolo della PGA e della PGV e per il calcolo dell'ordinate dello spettro di risposta in velocità per il periodo proprio di vibrazione T[s]=4.

Tabella 3. SP96: Coefficienti di regressione per il calcolo di PGA, PGV, Sv(T) (da utilizzare nel range di Magnituto 4.6≤M≤6.8 e distanza epicentrale R≤100)

	T[s]	A	b	c	e_1	e_2	h	σ
PGA [g]	0	-1.845	0.363	-1	0.195	0.0	5.0	0.190
PGV [cm/s]	0	-0.828	0.489	-1	0.116	0.116	3.9	0.249
$S_V(T)^*$ [cm/s]	4	-2.409	0.684	-1	0.0	0.111	2.7	0.303

*smorzamento al 5%

[6] La Magnitudo Richter, detta anche Magnitudo Locale (M_L), si esprime attraverso il logaritmo decimale del rapporto fra l'ampiezza registrata da un particolare strumento, il pendolo torsionale Wood-Anderson, e una ampiezza di riferimento.

2.3.4 Spostamento di picco al suolo PGD e ordinate dello spettro di risposta in spostamento Sd (T)

La GMPE messa a punto da Cauzzi e Faccioli [33] e riferita di seguito come CF08 predice il valore massimo di spostamento e i valori spettrali di spostamento fino al periodo di 20 s, considerando la dipendenza dalle condizioni di suolo. Utilizza una base dati mondiale di eventi crostali con $5.0 < M_W < 7.2$ e distanza focale tra 6 e 150 km.
L'espressione analitica della GMPE di CF08 è la seguente:

$$\log_{10}(Y) = a_1 + a_2 M_W + a_3 log_{10} R + a_B S_B + a_C S_C + a_D S_D + \varepsilon \qquad (6)$$

dove

- T (s) è il periodo di vibrazione dell'oscillatore semplice
- a_i (i = 1-3, A, B, D) sono coefficienti numerici funzione del periodo di oscillazione e dello smorzamento determinati attraverso regressioni.
- ε denota un termine di errore casuale, assunto come normalmente distribuito con media zero e SD σlog DRS.
- S_B, S_C, S_D sono variabili che rappresentano le principali categorie di terreno contemplate nelle attuali norme europee [18], con i seguenti valori:
- $S_B = S_C = S_D = 0$ per terreni di tipo A (simile a roccia), con $V_{S30} \geq 800$ m/s;
- $S_B = 1$ e $S_C = S_D = 0$ per terreni di tipo B (rigido), con 360 m/s ≤ V_{S30}<800 m/s;
- $S_B = S_D = 0$, $S_C = 1$ per terreni di tipo C, con 180 m/s≤V_{S30} <360 m/s e
- $S_B = S_C = 0$, $S_D = 1$ per terreni di tipo D (molto soffice), con V_{S30} <180 m/s.
- In Tabella 4, a titolo di esempio, vengono forniti i valori dei coefficienti per il calcolo della Sd(T) e della PGV e per il calcolo dell'ordinate dello spettro di spostamento per il periodo proprio di vibrazione T=20s.

Tabella 4. CF08: Coefficienti di regressione per il calcolo di Sd(T) per T=20s

$T[s]$	a_1	a_2	a_3	a_B	a_C	a_D	σ_T
20.000	-4.886	1.037	-0.941	0.039	0.077	0.112	0.237

2.3.5 Rappresentazione di amplificazioni dello scuotimento dovute a particolari condizioni di suolo

Unitamente alla stima dello scuotimento del terreno su roccia, è opportuno tenere conto delle eventuali amplificazioni indotte da particolari condizioni del suolo. CIPCast-ES consente di farlo, in modo semplificato, nel caso vengano utilizzate le Eq. dalla (4) alla (6) e vengano fornite informazioni relative alle caratteristiche del sito utili per consentire di riconoscere le tipologie di terreno distinte dalle GMPE secondo le attuali norme europee [18]. La Tabella 5 riporta le categorie di sottosuolo seconda la normativa italiana NTC08 [17] che ripropone la classificazione raccomandata dalla normativa europea [18].
Nel caso in cui venga utilizzata una GMPE in termini di Intensità Macrosismica CIPCast-ES consente di tenere conto, sempre in modo semplificato, delle eventuali amplificazioni per condizioni particolari del suolo, nel caso in cui venga fornita una mappa del fattore di amplificazione (AF) cioè del rapporto tra l'accelerazione spettrale *Sa* del movimento del suolo alla superficie del terreno e al substrato roccioso. In tal caso i valori di intensità valutati alla base rocciosa secondo le Eq. 1-3, vengono aumentate localmente di un delta di intensità valutato in funzione della AF misurata.

$$\Delta I = \frac{\ln(AF)}{\ln(1.6)} \qquad (7)$$

Se si dispone della classificazione del suolo in termini delle classi di suolo secondo NTC08 (Tabella 5) è possibile ugualmente calcolare i ΔI, anche nell'impossibilità di avere misure AF.

Tabella 5. Categorie di sottosuolo secondo la NTC08 (fonte: Tabella 3.2.II)

Categoria	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di Vs,30 superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs,30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero NSPT,30 > 50 nei terreni a grana grossa e cu,30 > 250 kPa nei terreni a grana fina).
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs,30 compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero 15 < NSPT,30 < 50 nei terreni a grana grossa e 70 < cu,30 < 250 kPa nei terreni a grana fina).
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs,30 inferiori a 180 m/s (ovvero NSPT,30 < 15 nei terreni a grana grossa e cu,30 < 70 kPa nei terreni a grana fina).
E	Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con Vs > 800 m/s)

2.3.6 Stima delle deformazioni permanenti e del livello di liquefazione

Nella prossima annualità (PAR2017) si lavorerà, tra le altre cose, per includere in CIPCast-ES la possibilità di stimare le deformazioni permanenti del terreno PG_{Def}, che si sono rivelate una delle cause principali del danneggiamento sia per i componenti del sistema elettrico fuori terra che per quelli interrati [2]. Si prevede di includere in CIP-Cast-ES la possibilità di stimare PG_{Def} [34] dovute a: a) liquefazione, e spostamenti laterali del terreno che saranno stimati in termini del Livello di Liquefazione (LL); b) lo spostamento per rottura di faglie superficiali stimato mediante correlazioni semi-empiriche in funzione della magnitudo del terremoto; c) frane indotte dallo scuotimento sismico [35].

2.3.7 Rappresentazione delle incertezze

Le GMPE sono derivate empiricamente: oltre alla parte deterministica, che consente di calcolare il valore medio dello scuotimento del terreno, le GMPE includono variabili che consentono di rappresentare la variabilità che si verifica all'interno di un singolo evento (intra-evento) e tra eventi separati (inter-evento) [36]. Per l'analisi di sistemi spazialmente distribuiti, il requisito di valutare lo scuotimento che avviene in modo simultaneo in più siti diversi e distanti richiede che lo scuotimento del terreno, previsto tramite GMPE, sia spazialmente correlato. La variabilità incorporata nei GMPE è stata ignorata in questa prima, che propone e sviluppa un approccio per la valutazione di scenari deterministici.

La possibilità di valutare anche scenari probabilistici e quindi la possibilità di tenere in conto la variabilità delle GMPE e di valutare scuotimenti sismici spazialmente correlati verrà inclusa nelle attività della prossima annualità. Al fine di preservare l'efficienza computazionale CIPCast-ES, gli approcci diretti per ottenere campi di scuotimento del suolo correlati, disponibili in letteratura [37], saranno preferiti ai complessi metodi geostatistici ampiamente discussi e sviluppati in letteratura.

2.4 Definizione di una tassonomia per la raccolta e la classificazione dei dati

2.4.1 Identificazione dei componenti del sistema elettrico vulnerabili all'azione sismica, e degli attributi rilevanti ai fini del comportamento sismico.

Lo scopo di definire una tassonomia per classificare le CI è quello di raggruppare insieme elementi che potrebbero comportarsi in modo simile a seguito di un terremoto.

Gli edifici, essendo strutture discrete, possono essere raggruppate in base a determinate caratteristiche strutturali, come ad esempio il materiale costruttivo, la loro geometria in pianta e in elevazione, l'anno di costruzione, etc. I sistemi infrastrutturali sono costituiti da componenti diversi le cui differenze dipendono sia dalla loro specifica funzione che dalle loro caratteristiche costruttive.

Per questo motivo, la classificazione di CI richiede due passi; in primo luogo l'identificazione di tutti i diversi componenti presenti nel sistema, e in secondo luogo, l'identificazione delle diverse possibili tipologie e caratteristiche costruttive di quel componente. In merito al primo punto, visto che per i componenti di CI non è solo il danno ai singoli componenti ad essere importante, ma anche il modo in cui l'intero sistema potrebbe comportarsi di conseguenza, è necessario identificare e classificare tutti i componenti costitutivi la cui condizione di danno potrebbe influire sulla fornitura del servizio.

Al fine di fornire alcuni esempi di tassonomie specificatamente messe a punto per la classificazione e la valutazione della vulnerabilità di CI, e in particolare per l'energia elettrica, si citano:

- la guida messa a punto dal TCLEE (*Technical Council of Lifeline Engineering*), organo tecnico dell'ASCE, *American Society of Civil Engineering* [1], ora ridefinito come *Infrastructure Resilience Division* (IRD);
- la tassonomia definita nell'ambito della piattaforma HAZUS-MH [6];
- la tassonomia definita nell'ambito del progetto SYNER-G [38][39].

La guida TCLEE e la tassonomia HAZUS-MH sono specificatamente definite per infrastrutture statunitensi, mentre la tassonomia definita nell'ambito del progetto SYNER-G è specificatamente formulata per descrivere infrastrutture europee. Oltre a SYNER-G e HAZUS-MH, il progetto a scala mondiale "Global Earthquake Model (GEM)" si è anche occupato di definire una tassonomia per i sistemi infrastrutturali, come descritto da Pomonis e So [40].

Le tassonomie presenti in letteratura e revisionate nell'ambito delle presenti attività e di una precedente iniziativa [42] sono risultate sostanzialmente simili, per quanto riguarda le reti elettriche (Electric Power Network, EPN); la tassonomia SYNER-G include tutti gli elementi descritti da HAZUS-MH con alcune aggiunte, e quindi è potenzialmente più approfondita, inoltre nonostante sia stata specificatamente definita pensando ai sistemi europei, ha dimostrato di descrivere adeguatamente anche le infrastrutture critiche a livello internazionale (e.g. [42]). In CIPCast-ES è stata assunta una la tassonomia simile a quella proposta nell'ambito del progetto SYNER-G. Pertanto, per meglio gestire i dati e supportare le specifiche applicazioni previste nel DSS CIPCast, è stato costruito un apposito Data Model (cfr. ENEA, Report RdS/PAR2016/020, Figura 3) sulla base del quale ogni generica CI è stata definita secondo classi specifiche, a loro volta suddivise in sottoclassi, via via più dettagliate e modellate come un grafo (ogni sottoclasse può contenere altre sottoclassi specifiche, in base alla tipologia e alle funzioni dell'infrastruttura considerata). Nel dettaglio, allo stato attuale e con particolare riguardo per gli aspetti simulativi, il sistema EPN di distribuzione, viene modellato come grafo e dunque la classe Distribution delle classi *EPNLine* (a sua volta divisa in linee aere ed interrate i.e., *OverheadLine* e BuriedLine) e *EPNNode* (a sua volta divisa in *Substations*, Cabine Primarie e Cabine Secondarie i.e., *PrimarySub* e *SecondarySub*). A sua volta, una *SecondarySub* può essere telecontrollata (RTSecondarySub) attraverso la rete di telecomunicazione mobile. Come si può notare, una *SecondarySub* presenta un attributo chiamato "outage" che rappresenta i minuti di blackout che possono verificarsi in seguito a fenomeni di guasto.

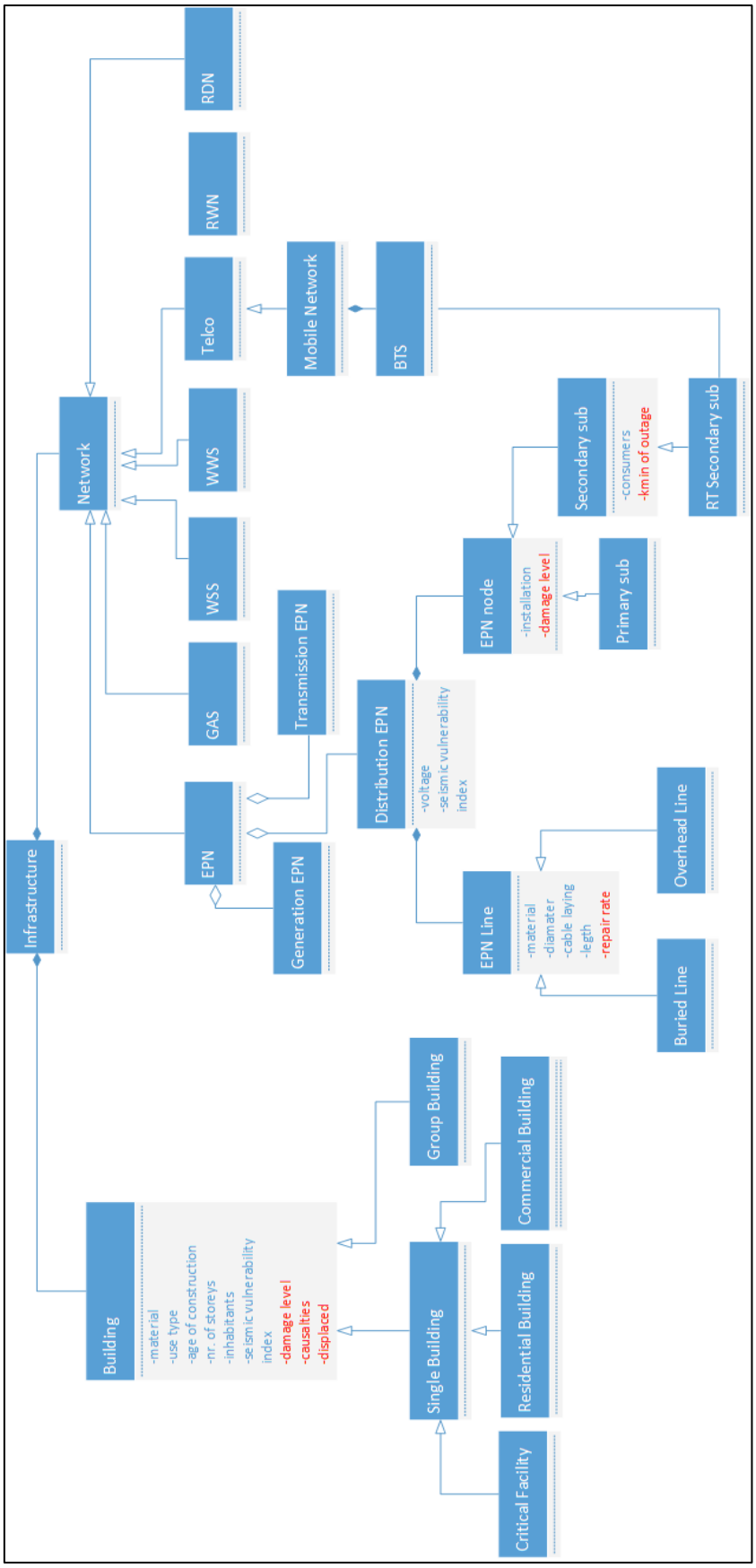

Figura 3. Data Model della Piattaforma DSS (caso applicativo per CIPCast-ES, cfr. ENEA, Report RdS/PAR2016/020)

Tabella 6. Componenti di una EPN

Sistema	Componente
EPN - Electric Power Network	EPN01 – Rete di Trasmissione
	EPN02 – Impianti di generazione (centrali elettriche)
	EPN03 – Stazioni e Sottostazioni (Stazioni Primarie e Secondarie)
	EPN04 – Rete di Trasmissione
	EPN05 to EPN23 –Componenti delle Stazioni e Sottostazioni (not listed here)
	EPN24 – Linee di Trasmissione o Distribuzione

In generale (Tabella 6), vengono considerati i seguenti diversi componenti per le EPN: impianti di generazione (centrali elettriche), stazioni primarie e secondarie e relative sotto-componenti, linee di distribuzione e di trasmissione[7].

Ognuno di questi componenti ha una funzione diversa. Gli impianti di generazione (o centrali elettriche) sono responsabili per la produzione di energia elettrica; le linee di trasmissione trasportano l'elettricità da una posizione all'altra; le sottostazioni, consentono la trasformazione della potenza di carico dell'energia fino al consumatore.

Per ciascuno dei componenti e sotto-componenti sopra citati esistono diverse tipologie, relative ad attributi strutturali o operativi. Le linee di trasmissione, ad esempio, possono essere diversificate in base alla loro posizione (linee aeree o cavi sotterranei), al loro materiale isolante, alle loro dimensioni o caratteristiche costruttive.

Le sottostazioni possono essere diversificate in base alla capacità di carico o alla tensione. Le sottostazioni hanno sotto-componenti diversi, quali ad esempio: trasformatori di potenza AAT/AT; alta AT/MT e MT/BT oltre ai relativi apparati di manovra e di misura.

Ad esempio le linee aeree (linee installata all'aperto, al di sopra del suolo e costituite dai conduttori nudi con i relativi isolatori, dai sostegni ed accessori) posso essere diversificate in base al sostegno che è l'elemento base di congiunzione nella palificazione e alla tipologia della palificazione. Il sostegno è l'elemento che sostiene i conduttori, ed è costituito da più elementi strutturali, di cui uno deputato al collegamento con le fondazioni. La struttura del sostegno ospita le mensole, cui sono ancorati gli armamenti, cioè l'insieme di elementi di morsetteria (che possono essere di sospensione o di amarro) che consente di ancorare meccanicamente i conduttori al sostegno pur mantenendoli elettricamente isolati da esso. In cima vi sono i cimini, atti a sorreggere le funi di guardia. Per quanto riguarda la palificazione, nelle linee a 380 kV, la palificazione è usualmente realizzata con sostegni tradizionali a traliccio del tipo a "delta rovescio" nel caso di linee a semplice terna, e con sostegni del tipo "tronco piramidali" nel caso di linee in doppia terna; i sostegni sono realizzati con angolari di acciaio zincati a caldo e bullonati; in casi particolari sono utilizzati sostegni di tipo tubolare. Nelle linee a 220 kV, la palificazione è usualmente realizzata con sostegni tradizionali a traliccio del tipo "troncopiramidale"; i sostegni sono, anche in questo caso, realizzati con angolari di acciaio zincati a caldo e bullonati. Nelle linee a 132-150 kV, la palificazione è usualmente realizzata con sostegni tradizionali a traliccio del tipo "tronco piramidale"; i sostegni sono in questo caso realizzati con angolari di acciaio zincati a caldo e bullonati; in casi particolari sono utilizzati sostegni di tipo tubolare [41].

La Tabella 7 mostra la tassonomia messa a punto e adottata nell'ambito delle presenti attività, inclusi componenti chiave e gli attributi dei componenti. Gli attributi del componente sono i descrittori che

[7] Per quanto riguarda la funzione di trasmissione dell'energia elettrica in Italia viene svolta da Terna attraverso un sistema complesso ed articolato, composto da numerosi elementi i più importanti dei quali sono: i trasformatori di AAT (altissima tensione) che ricevono e trasformano l'energia dalle centrali elettriche nazionali (o dai punti di confine per l'energia importata); le linee elettriche di AAT e di AT (alta tensione) che trasportano l'energia; e, infine, le stazioni di trasformazione che trasformano da AT a media e bassa tensione e cedono l'energia alle società di distribuzione che a loro volta, tramite le società di vendita, portano l'elettricità nelle case e nelle fabbriche. In totale Terna dispone di 431 stazioni di trasformazione e smistamento.

potrebbero essere utilizzati per raggruppare componenti in tipologie distinte. Nel caso delle sottostazioni primarie e secondarie (*PrimarySub* e *SecondarySub*), vengono anche considerati, in modo semplificato, i componenti alloggiati all'interno dell'edificio. In questo caso l'attributo "livello di progettazione sismico" valuta se, o meno, l'edificio è progettato secondo criteri anti-sismici o se il componente è ancorato. A volte i componenti sono costituiti da una disposizione sistemica di sotto-componenti più piccoli. In questo caso, l'attributo "livello di progettazione sismico", se o meno queste sotto-componenti siano ancorate.

Tabella 7. Tassonomia adottata per i componenti dell'EPN e relative metriche e descrittori del danno

Componenti		**Attributi**	**Tipo**	**Metrica del danno**
Generation plants		Capacity, seismic design level	Node	Damage level
Substations: PrimarySub & SecondarySub		Voltage, seismic design level	Node	Damage level
Lines	BuriedLine	Insulation Material, Cable material, Size	Edge	Repair Rate
	OverheadLines	Material	Edge	Repair rate

2.4.2 Inventario e classificazione delle componenti del sistema elettrico secondo la tassonomia identificata

Un inventario è un'enumerazione dei componenti e delle strutture in ciascuna delle componenti considerate dalla tassonomia presunta.

L'inventario e la classificazione dei sistemi infrastrutturali secondo la tassonomia identificata sopra richiede l'identificazione:

1. delle diverse componenti incluse nel sistema, identificate come vulnerabili all'azione sismica;
2. delle caratteristiche tipologiche dei diversi componenti, che potrebbero influenzare il comportamento della componente se soggetta a all'azione sismica;
3. della posizione geografica di ciascun componente (a tal fine la disponibilità di mappe GIS dell'intera rete è fondamentale).

La preparazione di un inventario per le infrastrutture può essere difficile poiché gli attributi non possono essere identificati attraverso una semplice ispezione visiva e in molti casi i componenti non sono visibili (ad esempio nel caso delle linee interrate). L'inventario dovrebbe quindi essere preparato raccogliendo i dati dalle fonti disponibili. Nel caso delle CI, tuttavia, di solito l'unica fonte è l'operatore o il gestore del sistema. Per questioni di sicurezza e per proteggere gli interessi commerciali, questo tipo di informazioni non è solitamente messo a disposizione del pubblico dominio. Per accedere a un elevato livello di dettaglio delle informazioni, è quindi necessario lavorare in stretta collaborazione con i proprietari o gestori l'infrastruttura. Nell'ambito delle presenti attività progettuali, questo è stato possibile, grazie alla partnership e alla cooperazione tra ENEA e Areti Spa, società del gruppo ACEA, il principale operatore di distribuzione elettrica nella Regione Lazio (Italia).

2.5 *Proposta di una procedura standardizzata per la raccolta di informazioni necessarie per la caratterizzazione delle fragilità sismica del sistema elettrico*

Un grave mancanza nello studio delle infrastrutture danneggiate seguito di un terremoto, o di una diversa calamità naturale è l'assenza di una procedura standardizzata per la raccolta e la classificazione di informazioni e dati relativi ai danni e agli impatti indotti.
Il *Technical Council of Lifeline Earthquake Engineering, TCLEE, dell'American Society of Civil Engineering*, ASCE ha documentato per anni, con missioni di ricognizione sul campo, i danni e i meccanismi di collasso fisico o funzionali sostenuti da CI, incluse EPN, a seguito di importanti terremoti in tutto il mondo [43]-[44]. I rapporti del TCLEE, pur essendo molto dettagliati e di grande valore non supportano il livello di approfondimento richiesto per consentire una presentazione succinta delle statistiche dei danni, che è fondamentale per il confronto obiettivo e relativo delle prestazioni di diversi componenti, dalle diverse caratteristiche costruttive e geometriche, soggetti a diversi tipi di terremoti.

Un passo critico e pertanto sicuramente auspicabile per migliorare la valutazione post-terremoto dei sistemi infrastrutturali sarebbe, quindi, l'adozione di un quadro di riferimento standardizzato, riconosciuto all'unanimità, che comprenda sia una tassonomia per l'identificazione e la caratterizzazione delle diverse componenti che la una scala di danno fisico e impatto funzionale.

L'idea avanzata da questo documento sarebbe quella di proporre il quadro di riferimento sotto descritto, o successivi miglioramenti dello stesso, per la valutazione della vulnerabilità e della performance del sistema elettrico, rispettivamente pre- e post-evento. Si propone, inoltre, al fine di una valutazione olistica ed efficace della performance post-terremoto per i sistemi infrastrutturali, la documentazione, valutazione, e l'analisi delle prestazioni "non fisiche" includendo: impatti funzionali; problemi di interdipendenza; attributi di resilienza.

2.5.1 Metriche e Descrittori del danno Fisico

Similmente a quanto fatto per la definizione della tassonomia, si è proceduto a una revisione della letteratura per la definizione delle metriche o descrittori qualitativi del danno fisico per i CI. Si è fatto in particolar modo riferimento a quelli sviluppati e utilizzati all'interno di piattaforme per la valutazione del rischio sismico, già menzionate in precedenza, tra i quali HAZUS [6], SYNER-G [38][39] e il Global Earthquake Model, GEM [40]. Tutte le tre fonti descrivono il danno diversamente per componenti nodali e componenti lineari (Tabella 7).
Per le strutture nodali, entrambe le piattaforme HAZUS e SYNER-G utilizzano un approccio simile per la classificazione della scala dei danni, facendo riferimento a una scala discreta di cinque livelli di danno crescente, più l'assenza di danno. Per la maggior parte dei componenti, la scala di danni è la stessa per entrambe le piattaforme, in parte perché la piattaforma SYNER-G adotta molte delle funzioni di fragilità HAZUS. La differenza più notevole tra le due è che SYNER-G, per sottostazioni primarie e secondarie, misura anche il possibile livello di danno subito a livello dei sotto-componenti interni. Tuttavia nella ricognizione sismica potrebbe non essere sempre possibile entrare nelle sottostazioni per registrare danni a questo livello di dettaglio. Le linee guida di GEM [40] propongono per i gli elementi nodali, una scala a sei livelli che presenta, in confronto a quella adottata da HAZUS-MH [6], un ulteriore livello di danno, cioè "danno molto pesante o collasso parziale".

In questo lavoro viene proposto di utilizzare le scale di danno HAZUS per la descrizione del danno subito dai nodi, in quanto al momento, gli studi di vulnerabilità sono dominati dall'uso delle funzioni di fragilità HAZUS. In questo modo l'auspicabile raccolta e classificazione di dati danno secondo questa scala consentirà la calibrazione e il miglioramento delle funzioni di fragilità in uso ad oggi.

Mentre il danno ai nodi dell'infrastruttura è solitamente classificato qualitativamente, il danno per le componenti lineari può essere valutato quantitativamente in termini del così detto "*tasso di riparazione*",

in inglese "*Repair-Rate*", definito di seguito come *RR*. Il tasso di riparazione, *RR*, è un calcolo deterministico del numero di danni che un cavo potrebbe sperimentare per unità di lunghezza, assunto di solito come il chilometro [km].

Come detto sopra, per i componenti lineari (ad esempio linee aeree e cavi interrati), sia HAZUS che SYNER-G utilizzano il tasso di riparazione RR (riparazioni per chilometro) per misurare il danno. Le scale di danno esplicitamente per I cavi interrati e le line aeree per la trasmissione di energia elettrica e le linee di distribuzione non sono definite per HAZUS o SYNER-G. Tuttavia, essendo elementi lineari, in questo studio viene utilizzato RR per misurare il danno, come proposto da HAZUS e SYNER-G per le condotte interrate, per altri sistemi infrastrutturali, come gas, acqua potabile etc.

Proprio grazie ai dati raccolti a seguito della sequenza sismica di Canterbury, presa come riferimento a livello internazionale e per questo studio, è stato possibile definire, per la prima volta, correlazioni RR per la misura del tasso di danno atteso sia per linee aeree che interrate per reti di distribuzione elettrica.

GEM propone, per la misura del danno fisico su elementi lineari, oltre a RR anche la misura della lunghezza totale della linee colpiti da danni da terremoto, separando nel caso di condotte interrate rotture e perdite (per cavi interrate si potrebbe auspicare la differenziazione tra rotture e deformazioni). Questa nuova misura, cioè la lunghezza totale di elemento lineare danneggiato, che indicheremo con LD, ha il vantaggio di essere semplice e probabilmente più intuitiva da interpretare: è più semplice comprendere la scala del danno quando viene presentata come la quantità (o percentuale) di elemento lineare danneggiata piuttosto che il tasso di danno per unità di lunghezza. Tuttavia questa misura è anche meno informativa. Ad esempio, se un numero limitato di elementi lineari presentano un solo, ma lunga tratto danneggiato che necessita riparazione, questo si tradurrà in un valore elevato di LD, lunghezza di elemento lineare danneggiata. Viceversa, se molte lunghezze brevi della pipeline necessitano ciascuna di riparazioni multiple, questo si tradurrà in un valore inferiore di LD per la lunghezza della pipeline interessata, anche se l'attività di ripristino necessaria potrebbe essere maggiore. Di conseguenza, questa misurazione del danno non è necessariamente indicativa dell'impatto effettivo. Quindi sarebbe auspicabile utilizzare entrambe le scale di danno per comprendere e rappresentare meglio l'entità del danno.
Per mancanza dei dati necessari per calcolare LD, l'esempio riportato sotto utilizza solo RR per descrivere il danno su elementi lineari.

Un aspetto utile di entrambe le scale di danno HAZUS e GEM è la separazione delle rotture (causata principalmente dalla deformazione permanente del terreno) e delle perdite o deformazione (causate principalmente dallo scuotimento del terreno). Si tratta di informazioni che dovrebbero, se possibile, essere registrate in considerazione dei loro diversi impatti di funzionalità: una rottura, e quindi interruzione totale di funzionalità, di un elemento lineare, ridurrebbe la connettività e causerebbe la perdita del servizio, mentre una perdita o deformazione potrebbe solo causare una riduzione della capacità di servizio mantenendo la connettività del sistema. Questa differenziazione, non è incluso nell'esempio riportato in questo documento, poiché, come già detto, i dati necessari a tale differenziazione non erano disponibili.

2.5.2 Segnalazione di impatti funzionali

Gli impatti funzionali descrivono le conseguenze dell'impatto indotto dal terremoto, o altre calamità naturali, sulla fornitura di servizi ai clienti per un'infrastruttura e quindi misurano le prestazioni dell'intero sistema piuttosto che le prestazioni dei singoli componenti. Esistono tre paradigmi per misurare le prestazioni del sistema: connettività, funzionalità e ripristino. Le misure di connettività descrivono il livello di connessione dei clienti al sistema subito dopo un evento calamitoso o una crisi. Le misure di funzionalità sono potenzialmente più complete, in quanto descrivono non solo il livello di connessione, ma anche la qualità del servizio di cui i clienti possono usufruire. Il ripristino misura il tempo necessario perché i servizi tornino ai normali livelli pre-terremoto. L'esempio riportato in questo documento descrive solo gli impatti

funzionali su ciascun sistema qualitativamente, mentre sono in corso ulteriori analisi per presentare i dati sotto forma di misurazioni dell'impatto standardizzate. HAZUS non definisce in modo specifico le metriche di connettività o di servizio per i sistemi dell'infrastruttura, ma include curve di ripristino per i singoli componenti. La piattaforma SYNER-G [39] include alcune metriche di connettività e di manutenzione.

2.5.3 Segnalazione di problematiche legate all'interdipendenza

I sistemi infrastrutturali non operano in modo isolato. Numerose interdipendenze tra le diverse infrastrutture, creano un "sistema di sistemi" in cui le prestazioni di una infrastruttura sono correlate alle prestazioni di un'altra. Rinaldi et al. [45] hanno riassunto quattro tipi principali di interdipendenze per sistemi infrastrutturali: fisica, geografica, informatica e logica. L'interdipendenza fisica si riferisce ai collegamenti operativi tra due sistemi in cui lo stato di un sistema dipende dall'uscita di un altro (ad esempio, il sistema di alimentazione dell'acqua richiede energia elettrica per azionare le pompe). L'interdipendenza geografica si riferisce a una relazione fisica effettiva tra due sistemi come un oleodotto che attraversa un ponte. L'interdipendenza informatica si riferisce a sistemi collegati da collegamenti informativi e l'interdipendenza logica si riferisce a tutte le altre relazioni non classificate dagli altri tre tipi.
Un esempio di interdipendenza logica è l'impatto che i danni alle autostrade e alle telecomunicazioni possono avere sulla capacità di altre infrastrutture di implementare lavori di riparazione e ripristino, limitando il movimento del personale e le comunicazioni con loro. Mentre per altri tipi di interdipendenza esiste la relazione tra i sistemi di elementi di questi sistemi, in questo esempio esiste l'interdipendenza tra un elemento fisico (attrezzatura stradale o di telecomunicazione) e un elemento umano / organizzativo (personale tecnico). Dato la grande importanza di poter dispiegare e muovere risorse per la riparazione e il ripristino di sistemi infrastrutturali dopo una evento calamitoso, questo tipo di interdipendenza risulta di particolare importanza per gli studi sul rischio da catastrofi e meriterebbe, pertanto di essere descritto e studiato separatamente, piuttosto che sotto l'ombrello di interdipendenze "logiche". Questo argomento è stato affrontato da Duen as-Osorio e Kwasinski [46] nel loro studio sul terremoto di Maule, in Cile nel 2010, riferendosi a questa come un'interdipendenza 'logistica'. In questo documento, l'interdipendenza è considerata solo qualitativamente.

2.5.4 Segnalazione di attributi di resilienza

Bruneau et al. [47] definiscono quattro proprietà chiave per le infrastrutture resilienti: robustezza, ridondanza, disponibilità di risorse/adattabilità e rapidità. Queste, possono essere definiti rispettivamente come:

- robustezza (*robustness*), capacità del sistema di resistere allo stress senza perdita di funzione;
- ridondanza (*redundancy),* sostituibilità di diversi elementi all'interno del sistema;
- disponibilità di risorse e adattabilità (*resourcefulness),* capacità di un sistema di adattarsi al fine di prevenire o ridurre l'interruzione del sistema
- rapidità (*rapidity),* capacità di rispondere e mitigare le interruzioni in modo tempestivo.

Bruneau et al. [47] hanno sviluppato una serie di criteri di resilienza, sintetizzati nella Tabella 8, in relazione a quattro diverse misure di performance, vale a dire: tecnica (*Technical*); organizzativo o*rganisational*); sociale (*social*), economica. Le proprietà di resilienza dovrebbero essere investigate come parte della ricognizione sismica utilizzando uno strumento di indagine appositamente progettato. Un valido esempio di uno strumento che consente la raccolta di dati e informazioni utili per giudicare il livello di resilienza di un sistema complesso, quale un sistema infrastrutturale, è lo strumento schedografico messo a punto da Mitrani-Reiser et al. [48] per la valutazione post-terremoto della resilienza dei sistemi ospedalieri.

Tabella 8. Criteri di rendimento (Bruneau et al., 2003)

	Performance criteria			
Performance measures	**Robustness**	**Redundancy**	**Resourcefulness**	**Rapidity**
Technical	Damage avoidance and continued service provision	Backup/duplicate systems, equipment and supplies	Diagnostics and damage detection technologies and methodologies	Optimising time to return to pre-event functional levels
Organisational	Continued ability to carry out designated functions	Backup resources to sustain operations (e.g. alternative sites)	Plans and resources to cope with damage and disruption (e.g. mutual aid, emergency plans, decision support systems)	Minimise time needed to restore services and perform key responses tasks
Social	Avoidance of casualties and disruption in the community	Alternative means of providing for community needs	Plans and resources to meet community needs	Optimising time to return to pre-event functional levels

2.5.5 Esemplificazione di implementazione della procedura standardizzata proposta per la raccolta di informazioni

Nella Tabella 9 e nella Tabella 10 è schematizzato quanto sopra proposto e descritto per la definizione di una procedura standardizzata relativa alla raccolta e catalogazione di dati relativi a impatti fisici funzionali, interdipendenza e fattori di resilienza viene esemplificato in relazione al caso studio di Christchurch. In particolare, viene introdotto un formato tabellare per la segnalazione del livello di impatto fisico subito da ciascun componente a seguito del terremoto sostenuto.

Come già detto, la tassonomia SYNER-G è stata utilizzata in questo studio per classificare i diversi componenti identificati all'interno di ciascuno dei sistemi infrastrutturali. Gli acronimi SYNER-G (come specificato nella Tabella 6), vengono utilizzati per raggruppare e categorizzare i componenti. Per ogni gruppo, i dettagli sul numero di componenti o km di cavi, sono specificati insieme ad alcuni ulteriori attributi (ad esempio materiale, geometria, dettagli costruttivi) quando disponibili. I valori che rappresentano lo spostamento/deformazione transitoria e/o permanente del terreno sono stati attribuiti grazie ad analisi GIS (ove possibile) per determinare il valore specifico nel punto di interesse. Nei casi in cui più componenti abbiano subito uno stesso livello di danno, questo viene riportato, per brevità, come intervallo piuttosto che danno individuale per ciascun componente. In alcuni casi, ad esempio dove le posizioni dei danni non sono segnalate, o dove c'è un numero molto grande di elementi con lo stesso livello di danno sparsi in tutta il territorio analizzato, non è stato possibile attribuire il valore specifico del movimento al suolo e quindi il pieno l'intervallo osservato è presentato. I casi in cui viene presentata l'intera gamma anziché i valori specifici sono indicati nelle tabelle.

Per tutti i componenti dell'infrastruttura, per la descrizione del danno, è stato fatto riferimento al Manuale tecnico HAZUS [6] che fornisce definizioni per ogni livello di danno e per ogni componente. In questo studio, il livello di gravità del danno è stato, quindi, assegnato confrontando la documentazione disponibile sul danno osservato con le definizioni fornite dal NIBS (2004). In alcuni casi, laddove i rapporti sui danni osservati non sono fornivano dati quantitativi, gli autori hanno utilizzato il loro giudizio sulla base delle descrizioni qualitative dei danni per assegnare il livello di danno.

Tabella 9. Christchurch EPN: componenti principali ed attributi (Source: [49])

Taxonomy	Components (Level 1)	Attributes (Level 2)
Substations (EPN03)	5 x Transmission GXP (Transpower) 19 x 66kV-11kV district/zone substations (Orion) 21 x 33kV-11kV district/zone substations (Orion) 10 x 11kV district/zone substations (Orion) 271 x 11kV network substations (Orion)	
Transmission and distribution lines (EPN24)	59km 66kV overhead lines	
	2,117km 400V overhead lines	
	64km 66kV buried cable	7km XLPE insulation 59km oil-filled
	27km 33kV buried cable	4km oil-filled 5km PILCA insulation 19km XLPE insulation
	2,157km 11kV buried cable	601km XLPE insulation 1,524km PILCA insulation (remainder unknown)
	2,470km 400V buried cable	1,353km XLPE insulation 427km PVC insulation (remainder unknown)

Tabella 10. Christchurch EPN: impatto funzionale per l'evento calamitoso del 22 Febbraio 2011

	22nd Feb. 2011 Earthquake		Physical Impact		
Taxonomy	**PGA**	**LD**	**Damage State**	**Damage Rate****	**Description/ Notes**
Transmission GXPs (EPN03)	0.63g 0.22-0.38g	2 0-1	D3* D1*	20 % 80%	
District/zone Substations (EPN03)	0.52g 0.11-1.41g	3 0-2	D5* D1*	4% 96%	Two failures in close proximity to one another
Orion Substations (EPN03) (network subs)	0.50-0.73g 0,11-1,41g***	0 0-3	D5* D1*	<1% 99%	One failure due to rockfall and another close to location of highest PGA
Distribution lines (EPN24) – 66kV buried cables	0.11-1.41g ***	0 -3	Faults	0.187/km	
Distribution lines (EPN24) – 11kV buried cables	0.11-1.41g ***	1-3	Faults	0.216/km	XLPE insulation
	0.11-1.41g ***	1-3	Faults	0.640/km	PILCA insulation
	0.11-1.41g ***	0	Faults	None	XLPE insulation
	0.11-1.41g ***	0	Faults	0.073/km	PILCA insulation

2.6 Valutazione della vulnerabilità sismica e del danno atteso

2.6.1 Curve di fragilità per impianti di generazione e sottostazioni (Nodi)

Per quanto riguarda la valutazione del danno alle componenti dell'EPN identificati come nodi, ad esempio le Cabine Primarie e Secondarie, CIPCast-ES può implementare le funzioni di fragilità proposte da HAZUS-MH 2.1 o quelle proposte da SYNER-G.
I danni ai nodi dell'infrastruttura possono essere descritti sia in termini di danni fisici che di guasti operativi. Nel caso in cui i componenti siano alloggiati all'interno di edifici, potrebbe essere necessario valutare separatamente lo stato operativo dell'attrezzatura e il danno fisico all'edificio. Per i componenti dell'infrastruttura ospitati negli edifici, è possibile che la struttura venga danneggiata in modo significativo, tuttavia il componente è completamente operativo poiché nessuna delle apparecchiature è danneggiata. Al contrario, è possibile che la struttura ospitante non sia stata danneggiata, ma il componente dell'EPN abbia perso la sua funzionalità perché l'apparecchiatura ospitata è stata danneggiata. La metodologia HAZUS-MH considera sia gli impianti di generazione che le sottostazioni (Tabella 3) come nodi della rete di energia elettrica classificandoli rispettivamente in termini di potenza e tensione e distinguendo, inoltre, se i loro componenti sono ancorati o meno (cioè progettati con attacchi o chiusure sismiche speciali) o non ancorati (ovvero progettati secondo le normali esigenze). Quattro stati di danno sono definiti per le centrali di generazione e le sottostazioni, ad esempio danni leggeri/lievi (*Minor*), danni moderati (*Moderate*), danni estesi (*Exstensive*) e danni completi (*Complete*) (Tabella 11).

Tabella 11. Definizioni di livelli dei danno per le sottostazioni (modificate dopo NIBS [6])

	Livelli di Danno			
	Slight/Minor *	**Moderate**	**Extensive**	**Complete**
	D1	D2	D3	D4-D5
Interruttori per la sconnessione	5%*	40%	70%	100%
Interruttori	5%	40%	70%	100%
Trasformatori di Corrente	-	40%	70%	100%
Trasformatori	-	-	70%	1000%
*Edifici***	D1-D2	D3	D4	D5

**'* "Guasto del 5% dei sezionatori o guasto del 5% degli interruttori automatici o dell'edificio in stato D1-D2 danneggiato"; ** EMS-98 (Gruntal 1998) livelli di danno.*

In questa applicazione, la scala di danno proposta per le sotto-stazioni di costruzione degli edifici è la scala di danno di 5 livelli definita dalla scala macrosismica europea, EMS-98 [24] già utilizzata da CIPCast-ES.

Per valutare i danni indotti dai terremoti negli impianti di generazione e nelle sottostazioni della EPN, vengono utilizzate delle curve di fragilità.
Per un dato livello di intensità del movimento al suolo, le funzioni di fragilità determinano la probabilità che una struttura o un componente si trovi in un certo stato di danno D_{si} o lo superi. Le funzioni di fragilità sono spesso descritte da una funzione di distribuzione probabilistica lognormale come in Eq. (8), sebbene si noti che questa distribuzione potrebbe non essere sempre la migliore:

$$P_f\left(D_s \geq D_{s_i} \middle| IM\right) = \Phi\left[\frac{1}{\beta} \cdot \ln\left(\frac{IM}{IM_{mi}}\right)\right] \qquad (8)$$

dove P_f (•) indica la probabilità di raggiungere o superare un certo stato di danno, D_{si}, per un dato livello di intensità sismica IM (descritta in termini dalla metrica più appropriata tra quelle presentate nel Paragrafo 3.1 es. PGA, PGV, PGD, ecc.), Φ è la funzione di probabilità cumulativa standard, IM_{mi} è il valore di soglia medio della misura dell'intensità del terremoto IM necessaria per provocare lo stato di danno D_{si} e β è la deviazione standard totale.

Secondo l'Eq. (8), le curve di fragilità possono quindi essere tracciate fornendo i valori dei due parametri, IM_{mi} e β, in funzione di IM. Cavalieri et al. [11],[12],[50] hanno fornito una panoramica esauriente sulle principali ricerche relative a funzioni di fragilità per i componenti del sistema di energia elettrica EPN insieme ai parametri IM_{mi} e β che definiscono ciascuno di essi.
La Tabella 12 fornisce, ad esempio, i parametri IM_{mi} e β per le sottostazioni, come definito da HAZUS-MH, facendo riferimento a dati empirici/giudizi esperti e utilizzando la logica booleana e la combinazione probabilistica congiunta di funzioni di danno relative alle prestazioni dei sotto-componenti che costituiscono il nodo analizzato.

A differenza di HAZUS, la metodologia proposta nell'ambito del progetto SYNER-G [11] fornisce funzioni di fragilità per i singoli sotto-componenti identificando tutte le potenziali modalità di guasto per l'intera sottostazione; è possibile determinare la probabilità di "guasto" della sottostazione utilizzando l'analisi dell'albero dei guasti (cioè *Fault Tree Analysis*, FTA), dove "guasto" si riferisce alla capacità della sottostazione di distribuire potenza piuttosto che a uno stato di danno fisico. Le funzioni di fragilità SYNER-G sono state adattate dal lavoro di Vanzi [51], in particolare con riferimento alle sottosezioni italiane.

Tabella 12. Parametri della funzione Fragilità per macro-componenti di un stazioni primarie e secondarie

Livello di Danno	Bassa Tensione				Media Tensione				Alta Tensione			
	U		A		U		A		U		A	
	*IM**	*β*	*IM*	*β*	*IM*	*β*	*IM*	*β*	*IM*	*β*	*IM*	*β*
Slight/Minor	0.13	0.65	0.15	0.70	0.10	0.60	0.15	0.60	0.09	0.50	0.11	0.50
Moderate	0.26	0.50	0.29	0.55	0.20	0.50	0.25	0.50	0.13	0.40	0.15	0.45
Extensive	0.34	0.40	0.45	0.45	0.30	0.40	0.35	0.40	0.17	0.35	0.20	0.35
Complete	0.74	0.40	0.9	0.45	0.50	0.40	0.70	0.40	0.38	0.35	0.47	0.40

**IM è IMmi come definite nell'Eq. 8, espressa in PGA[g]*
*** Bassa (34.5 kV - 150 kV), Media (150 kV - 350 kV), Alta (350 kV - above)*

Vale la pena dire che Kongar et al. [52] ha verificato l'affidabilità delle funzioni di fragilità proposte da HAZUS-MH 2.1 e SYNER-G, per quanto riguarda le sottostazioni, confrontando il danno previsto per la sottostazione con quelli osservati dopo la sequenza del terremoto di Canterbury nel periodo 2010-2011. È risultato che entrambi gli approcci sopravvalutavano il danno e la perdita di funzionalità, rispetto a quanto osservato dopo la sequenza terremoto di Canterbury 2010-2011. L'adozione e l'attuazione dell'uno o dell'altro approccio all'interno di CIPCast-ES dovranno quindi essere attentamente calibrate, sulle evidenze raccolte in Italia e in Europa, come discusso brevemente nelle conclusioni.

2.6.2 Relazioni analitiche per il calcolo del numero di riparazioni a Km attese per linee (aeree o interrate)

Mentre il danno ai nodi dell'infrastruttura è solitamente classificato qualitativamente, in termini di livelli di danno, il danno per le componenti lineari può essere valutato quantitativamente in termini del così detto "tasso di riparazione", in inglese "Repair Rate", RR.
Il tasso di riparazione, RR, è un calcolo deterministico del numero di danni che un cavo potrebbe sperimentare per unità di lunghezza, assunto di solito come il chilometro [km].

Correlazioni empiriche sono disponibili in letteratura per le condutture delle reti di gas, acqua potabile e acque reflue, ma non sono altrettanto disponibili per le linee aeree ed i cavi interrati della EPN, a causa della mancanza di dati sui quali calibrare tali correlazioni, ottenute solitamente come regressione statistica di danni osservati.
La sequenza sismica di Christchurch, tuttavia, riveste una notevole importanza nel panorama interazionale della ricerca in questo settore, proprio grazie al fatto di avere messo a disposizione (anche della comunità scientifica) una preziosa serie di dati sulle infrastrutture coinvolte dal sisma e sul danno da esse subito,

consentendo quindi la definizione di opportune correlazioni anche per le linee (aeree e interrate), come di seguito descritto.

La relazione tra RR e il parametro descrittivo dello scuotimento sismico segue, solitamente una legge esponenziale o una relazione lineare, sebbene esistano funzioni più complesse. La maggior parte delle relazioni analitiche per stimare RR sono state derivate empiricamente. Le Eq. (9) e (10) mostrano, rispettivamente, una forma tipica di una funzione RR esponenziale e lineare:

$$RR = a \cdot IM^b \quad (9)$$

$$lnRR = c \cdot ln\mathrm{IM} + \mathrm{d} \quad (10)$$

dove

- RR è il tasso di riparazione,
- IM è la metrica con la quale si sta descrivendo lo scuotimento sismico del terremoto (vedi Par 1.3)
- e a, b, c, d sono coefficienti determinati usando una tecnica di regressione [34].

Per tenere conto delle diverse proprietà del materiale o delle condizioni del terreno, relazioni analitiche per la determinazione di RR possono includere fattori moltiplicatori aggiuntivi, che variano in base all'attributo, oppure possono essere proposte un insieme di funzioni per condizioni diverse.

Linee aeree

Per le linee aeree si è deciso di implementare all'interno di CIPCast-ES la funzione RR proposta da Eidinger e Tang [53]:

$$\mathrm{RR} = \mathrm{k}_1\mathrm{k}_2\mathrm{k}_3[1.388S_{a(T=3)} - 0.0415] \quad (11)$$

dove

- $S_{a(T=3)}$ è l'ordinata dello spettro di accelerazione a T = 3s, cioè Sa (T = 3s) e al 5% di smorzamento;
- k_1 e k_2 riflettono rispettivamente il tipo di costruzione delle linee primarie e secondarie;
- k_3 è un fattore che tiene conto degli effetti dell'età, i valori da attribuire a k_3 in funzione dell'anno di costruzione indicato con y sono
- k_3 = 1,25 per y≤1945;
- k_3 = 1,0 per 1946 <y <1990;
- k_3 = 0,80 per y≥1991.

Cavi interrati

Sono state implementate diverse funzioni analitiche all'interno di CIPCast-ES per valutare i danni ai cavi interrati causati in termini di RR, a seconda della presenza o meno di eventuali deformazioni permanenti del suolo indotte dal sisma.
In assenza di una deformazione permanente del terreno (supponendo che il danneggiamento dei cavi interrati sia indotto solo da scuotimento del terreno), la funzione RR di riferimento è l'Eq. 12 adattata da Eidinger e Tang [53]:

$$RR = k \cdot 17.4 \cdot 10^{-4} \cdot PGV \quad (12)$$

dove:

- PGV[cm/s] velocità di picco al suolo inteso come roccia;
- *k* è un coefficiente che riflette il tipo di alloggiamento del cavo sotterraneo: k=0.3 per condotto non riempito, k=1 per condotto pieno.

Vale la pena notare che l'Eq. (2) è stata adattato da quello di Eidinger e Tang [53] per il suo uso con PGV in [cm/s] piuttosto che PGV [pollici/s], come originariamente concepita.

In presenza di una deformazione permanente del terreno CIPCast-ES consente ad oggi di utilizzare per i cavi interrati le correlazioni RR proposte da Kongar et al. [42] derivate elaborando e analizzando i danni osservati su cavi interrati a seguito della sequenza sismica Canterbury del 2010-2011. L'analisi ha mostrato come la fragilità dei cavi interrati sia influenzata più dalla deformazione (transitoria e permanente) del terreno che dalla accelerazione.
Kongar et al. [42] hanno distinto quattro diverse livelli di deformazioni permanenti indotte dal terremoto (Tabella 4) vale a dire: solo liquefazione, L; Liquefazione e spostamenti verticali indotti, LS; Liquefazione con spostamenti laterali, LLS.

Insieme al livello di deformazioni transitoria e/o permanente, il materiale isolante del cavo è stato identificato come un fattore critico che influenza la fragilità del cavo. A Christchurch sono stati utilizzati tre materiali per l'isolamento di cavi da 11 kV, in particolare: *insulated lead covered armoured (PILCA*), "piombo isolato e ripoperto"; *cross-linked polyethylene* (XLPE), polietilene reticolato; e cavi PILCA rinforzati con polietilene ad alta densità (PILCA HDPE); più alcuni altri materiali sconosciuti (Altro). Dopo la sequenza di terremoti di Canterbury, i tassi di riparazione nei cavi PILCA sono risultati notevolmente superiori a quelli osservati nei cavi XLPE [42]. L'analisi degli stessi dati non ha mostrato invece alcuna correlazione tra l'età del cavo e tassi di riparazione e ugualmente, non ha mostrato una differenza significativa nelle percentuali di riparazione per diversi materiali di conduzione (i materiali di conduzione utilizzati in Christchurch includevano il rame e l'alluminio).

La Tabella 13 raggruppa le funzioni di frequenza di riparazione [42] che sono state integrate all'interno di CIPCast-ES: le funzioni si riferiscono ai cavi PILCA[8]; vengono forniti nella stessa i coefficienti per modificare le funzioni PILCA di "base" nel caso i cavi analizzati siano di materiali diversi. Pertanto, per stimare il tasso di riparazione per tipologie diverse da PILCA, è possibile calcolare prima il tasso di riparazione per i cavi PILCA e quindi moltiplicare per il coefficiente corrispondente al materiale del cavo analizzato, come in Tabella 13.

Tabella 13. Funzioni RR per cavi PILCA, per diverse livelli di deformazioni permanenti indotte dal terremoto e coefficienti per tipi diversi tipi materiali di isolamento

Deformazioni Permanenti Osservate	Equazioni RR	Coefficienti per materiale, k			
		PILCA	XLPE	PILCA HDPE	Altro
A – Nessuna Deformazione Permanente	$RR=k(0.92PGD_G)^{1.896}$	0	0.06	0.38	1.31
B – Solo liquefazione	$RR=k(4.317PGD_G-0.324)$	0	0.26	0.82	1.07
C – Liquefazione e spostamenti verticali	$RR=k(1.23PGD_V)$	0	0.31	0.67	1.48
D – Liquefazione e spostamenti laterali	$RR=k(7.951PGD_G+0.18)$ $RR=k(4.665PGD_H+1.035)$	0	0.14	1.75	0.00

* Relazione poco affidabile in quanto la maggior parte dei dati analizzati presentava condizioni di deformazione permanete

dove PGD_G[m] è la media geometrica delle componenti orizzontali PGD_O e verticali PGD_V dei picchi di deformazione transitorie e permanenti del suolo; k è il fattore che tiene conto dell'influenza del tipo di materiale sul comportamento sismico [42].

[8] Paper insulated, lead sheathed

a)

b)

2.7 Caso studio

Di seguito, viene presentata un'implementazione di CIPCast-ES incentrata sulla simulazione di un possibile evento sismico nell'Italia centrale che potrebbe interessare l'area abitata di Roma e la rete di distribuzione dell'energia elettrica. Questa implementazione ha avuto il duplice obiettivo di testare l'approccio elaborativo definito (descritto nei precedenti Paragrafi) e le funzionalità del modulo simulativo CIPCast-ES dal punto di vista implementativo del codice di calcolo e dell'applicativo software.
Questa implementazione ha utilizzato solo alcuni dei blocchi funzionali CIPCast-ES ed è stata limitata alla valutazione degli impatti fisici indotti dal terremoto sui componenti della rete.

2.7.1 Database

Areti Spa, il principale operatore di distribuzione elettrica nella Regione Lazio, ha fornito le mappe GIS e i dati per la rete di distribuzione dell'energia elettrica di Roma, grazie alla partnership e alla cooperazione sviluppate con ENEA nell'ambito delle presenti attività e di precedenti esperienze progettuali.
I dati disponibili per la rete di distribuzione dell'energia elettrica includono la posizione geografica e le caratteristiche di:

- Cabine Primarie e Secondarie di media tensione (15 kV);
- linee di distribuzione, il 96% delle quali sono linee aeree e il 4% sono linee interrate.

Gli attributi forniti relativamente ai suddetti dati includono, tra le altre, informazioni su: posizione, tipo di installazione, caratteristiche geometriche. Ad esempio per le linee interrate sono stati forniti dati e informazioni su materiale di costruzione, diametro del cavo, posa, lunghezza, etc..

2.7.2 Simulazione della pericolosità

Per questo caso studio è stato selezionato un evento storico, ovvero il terremoto del 13 gennaio 1915 (magnitudo M = 7,1) avvenuto nella zona della Marsica, nella regione Abruzzo. Il terremoto ha causato una intensità macrosismica massima *I* pari a I=XI, misurata secondo la scala Mercalli (ovvero I_{MCS} = 11) nell'area dell'epicentro situata nel comune di Avezzano. Secondo i dati storici disponibili (INGV, CPTI15 Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2015[9]) lo scuotimento è stato risentito anche a Roma con una intensità macrosismica pari a I=VI-VII. Nel complesso, l'evento ha colpito migliaia di persone in tutto il centro e sud Italia, causando circa 30.000 vittime dirette, gravi danni alle strutture ed enormi conseguenze economiche.
La mappa di intensità macrosismica e lo scuotimento del terreno per questo terremoto sono stati simulati all'interno di CIPCast-ES utilizzando i seguenti dati di input, estratti dal Database CPTI15:

- Coordinate dell'epicentro (latitudine e longitudine): 42.014N; 13.530E
- Magnitudine: Mw = 7.1
- Profondità ipocentrale = 3.91 Km

Sono stati utilizzati le seguenti GMPE, per le diverse metriche utilizzate per rappresentare lo scuotimento sismico (introdotte nel Paragrafo 1.3):

- I, Faccioli e Cauzzi (2006);
- PGA e S (T), Ambraseys, et al. (1996);
- PGV, Sabetta e Pugliese (1996)
- Sd (T), Cauzzi e Faccioli (2008).

L'amplificazione del suolo locale non è stata considerata in questa implementazione.

[9] https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/eq/19150113_0652_000

2.7.3 Valutazione del danno fisico

Per gli edifici, il danno è stato stimato in tutte le sezioni censuarie del Comune di Roma, implementando un modello di vulnerabilità macrosismico-meccanico cross-calibrato [54].
La vulnerabilità sismica è stata valutata a livello di sezione censuaria, tenendo conto della tipologia degli edifici e delle loro caratteristiche costruttive e geometriche, secondo i dati resi disponibili dall'ISTAT. La Figura 4 presenta lo scenario di danno ottenuto a livello di sezioni censuarie in termini di livelli di danno stimato secondo la scala di danno EMS-98. Il danno stimato varia da D_0, nessun danno (aree verde scuro in Figura 4) fino a D_3, danno da sostanziale a grave (aree arancione in Figura 4).
Ulteriori dettagli su come CIPCast-ES stima i danni agli edifici possono essere trovati in [16].

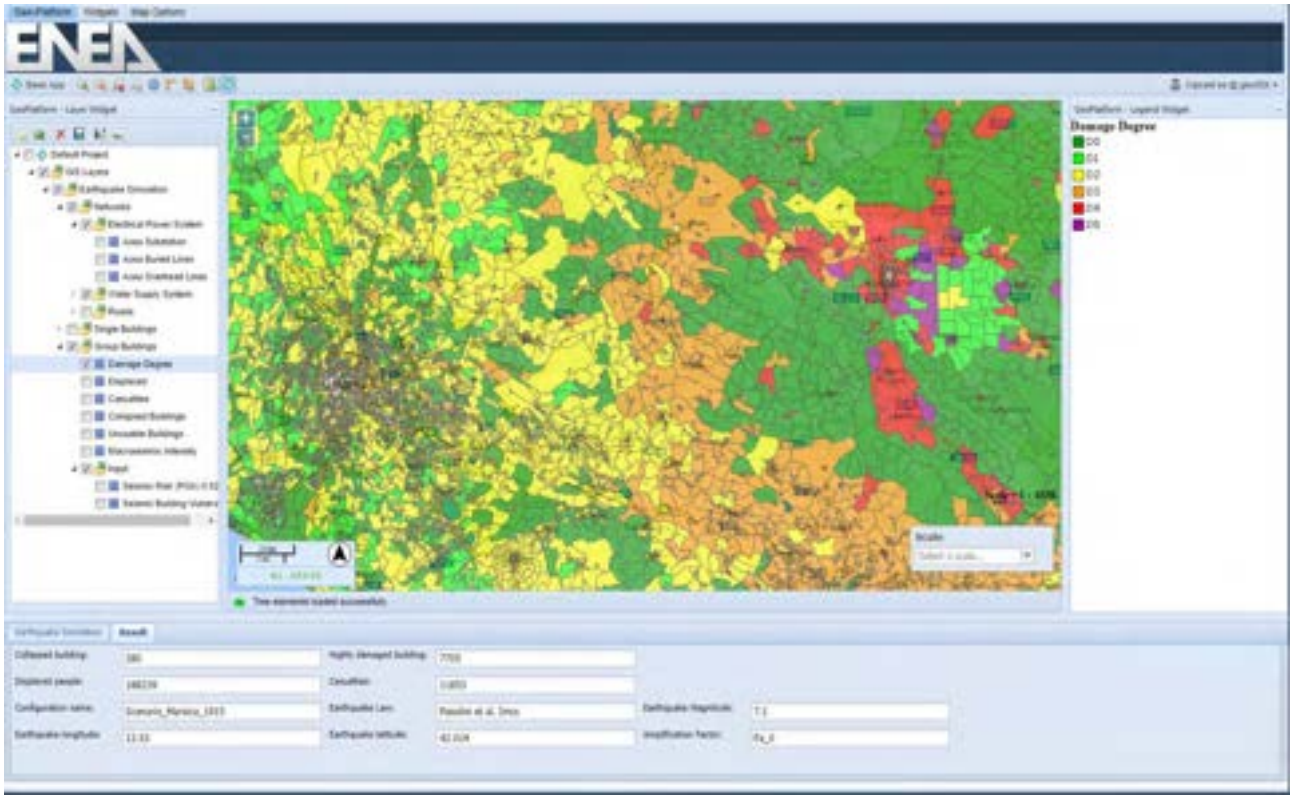

Figura 4. Esempio di scenario di danneggiamento atteso per l'edificato, su base di sezione censuaria ISTAT. Scenario simulato: Terremoto della Marsica, 1915 (M=7.1)

Per quanto riguarda la stima del danno all'EPN di distribuzione, sia le linee aeree che quelle interrate, le linee sono state discretizzate in segmenti di 100 metri, e uno specifico valore RR è stato valutato per ciascun segmento, utilizzando diverse funzioni RR, come riportato di seguito.

Per le linee aeree si e fatto riferimento all'Eq. (11). In particolare per questa specifica implementazione, dove le linee aree usati vengono utilizzate sia come linee primarie che come linee secondarie, i valori dei coefficienti k_1 e k_2 sono stati assunti come segue $k_1=k_2=1$. Per quanto riguarda k_3, è stato assunto $k_3=0.8$, essendo l'età di costruzione delle linee aeree analizzate superiore al 1990.
Inoltre è necessario sottolineare come, in questa implementazione, il Sa(T) nell'Eq. (11) sia stata calcolata come T=2s in luogo di T = 3s, visto che AMB96 copre periodi propri di oscillazione fino al massimo a T=2s. Per questo motivo le RR risultanti potrebbero essere leggermente sovrastimate.

Per la linea interrata, poiché una valutazione dei rischi secondari geotecnici indotti da terremoto era fuori dallo scopo di questo documento, e forse non di particolare rilevanza per lo scenario selezionato, per

questa implementazione è stato fatto riferimento all'Eq. (12), assumendo il coefficiente k_1=1 (cioè condotto pieno) a favore di sicurezza.

La Figura 5 e la Figura 6 mostrano la mappa RR ottenuta per linee aeree e interrate, rispettivamente. I valori di RR risultanti e riportati nelle mappe non sono quelli definitivi: saranno forniti in una pubblicazione in preparazione dagli stessi Autori del paper [13] dopo la revisione e l'approvazione di ACEA Areti SpA.

La Figura 5 e la Figura 6 riportano in blu le linee aeree e i cavi sotterranei dove il tasso di riparazione usuale (in normali condizioni di operazione) RR non viene modificato dagli effetti indotti dal terremoto; in arancione o rosso vengono indicate le linee aeree o i cavi per i quali si potrebbero osservare un aumento della RR "normale" a causa degli effetti indotti dal terremoto. Il numero complessivo delle riparazioni stimate risulta essere superiore a 100 per le linee aeree e al di sotto delle 10 per le linee interrate.
Questi numeri non devono far pensare che gli impatti indotti dai terremoti sulle linee EPN siano trascurabili. Vale la pena ricordare infatti che: l'area analizzata non è l'area epicentrale per lo scenario selezionato; i rischi indotti dai rischi geotecnici indotti dal terremoto quali la liquefazione e gli spostamenti laterali sono stati trascurati in questa implementazione, i loro effetti avrebbero aumentato le stime RR; i danni/guasti nei cavi sotterranei sono difficili da localizzare e riparare, quindi anche un piccolo numero di essi potrebbe produrre effetti significativi sulla funzionalità del servizio.

Inoltre, vale la pena notare che in questa prima implementazione, le caratteristiche costruttive, così come la tipologia del materiale per le linee e i cavi sono state considerati dello stesso tipo per tutto il campione analizzato (vale a dire che è stato assunto lo stesso periodo di costruzione per tutte le linee aeree, lo stesso tipo di materiale e tipologia di scavo e alloggiamento in condotti per cavi interrati). Pertanto, il calcolo del RR è influenzato dai soli valori del movimento del suolo piuttosto che da qualsiasi caratteristica peculiare delle linee aeree e dei cavi interrati che potrebbero, invece, causare una diversa prestazione sismica.

Figura 5. Esempio di scenario di danneggiamento atteso per le linee aeree, espresso in termini di Repair Rate, RR) della rete di distribuzione elettrica Areti SpA. Scenario simulato: Terremoto della Marsica, 1915 (M=7.1)

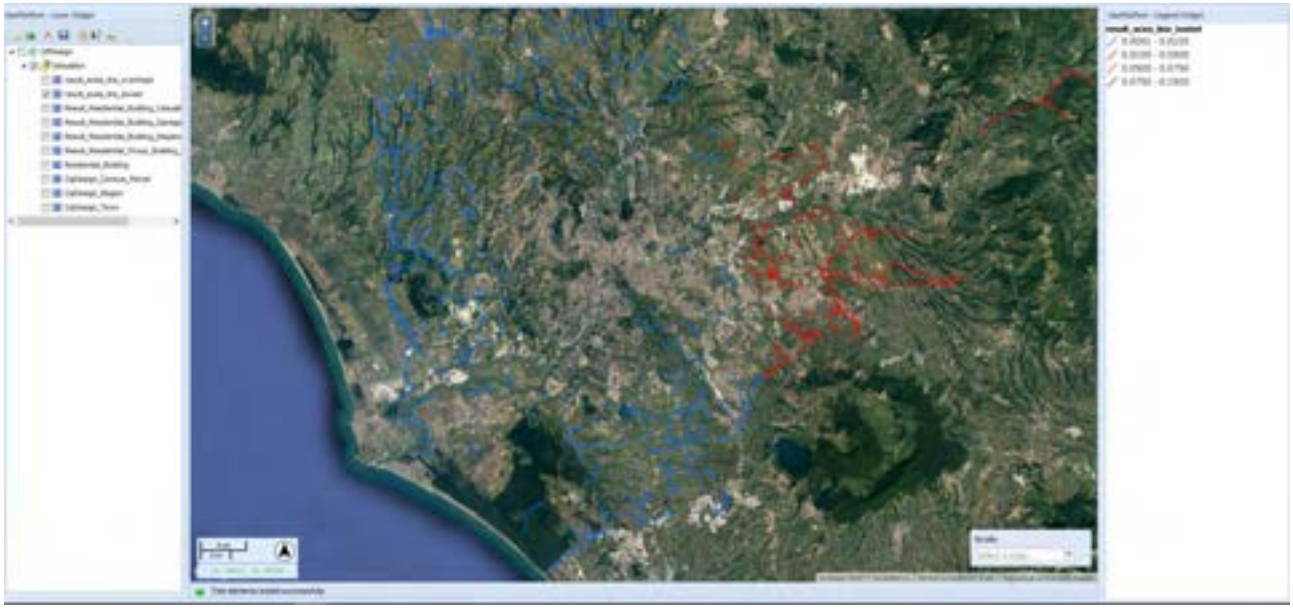

Figura 6. Esempio di scenario di danneggiamento atteso per le linee interrate, espresso in termini di Repair Rate, RR) della rete di distribuzione elettrica Areti SpA. Scenario simulato: Terremoto della Marsica, 1915 (M=7.1)

2.8 Interazioni con il "Tavolo di Lavoro Resilienza"

A luglio il gruppo ENEA-Sapienza coinvolto in questo AdC ha incontrato i membri del Tavolo di Lavoro Resilienza (TLR) dell'Autorità con la finalità di stabilire sinergie e collaborazione tra i due gruppi, i.e., nell'ambito dei progetti e attività volte alla valutazione e miglioramento della resilienza dei sistemi infrastrutturali. Il meeting è stato molto interessante e utile per entrambe le parti.
E' stato discusso di come la piattaforma CIPCast che ENEA stia definendo, in collaborazione con Sapienza Università di Roma e in particolare con il Dipartimento DIAEE per quanto concerne la rete elettrica, potrebbe potenzialmente diventare uno strumento fruibile dai gestori di rete per analisi riguardanti l'incremento della resilienza del sistema elettrico.

La piattaforma CIPCast potrebbe infatti:

- includere le basi dati, disponibili ad oggi, che portato alle valutazioni dei TR (Tempo di Ritorno) per diversi eventi critici;
- consentire di valutare, in modo "standardizzato" gli impatti attesi su indici di rischio e di resilienza per diverse strategie di intervento, in un contesto *multi-hazard*;
- supportare la valutazione di costi-benefici per diverse strategie di intervento;
- supportare il computo dei benefici in modo più articolato, consentendo di valutare ad esempio gli impatti su diverse categorie di utenze (e.g. residenziali, commerciali, servizi strategici, etc.).

Per rendere possibile quanto è stato pianificato, sarà estremamente utile mantenere il contatto e proseguire la collaborazione tra i due gruppi. In particolare, nel breve termine, è stata pianificata la partecipazione del gruppo ENEA/DIAEE alla prossima riunione del Tavolo di Lavoro Resilienza dell'Autorità (che si svolgerà ad Ottobre 2017) e l'Organizzazione di un Workshop presso Sapienza dal titolo "Giornata di Studio sulla Resilienza delle Reti Elettriche" (che si svolgerà il 13 Ottobre 2017).

Le occasioni del Tavolo di Lavoro Resilienza e del Workshop sulla Resilienza delle Reti Elettriche saranno una importante occasione da sfruttare per facilitare il contatto con i gestori in merito alla raccolta di dati e evidenze.

3 Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro svolto nell'ambito del presente Accordo di Collaborazione ha mirato a colmare la lacuna di modelli di previsione per sistemi infrastrutturali soggetti a eventi calamitosi, relativamente al comportamento delle reti elettriche soggette a eventi sismici, con particolare riferimento alla rete di distribuzione.

I principali risultati ottenuti sono stati:

1. Proposta di un approccio per la raccolta e catalogazione di dati per eseguire analisi di vulnerabilità e rischio (danno fisico e impatto funzionale) sismico per EPN, inclusi una tassonomia per la l'identificazione e classificazione delle componenti vulnerabili e dei loro attributi e metriche per la misura qualitativa e quantitativa di impatti fisici e funzionali e di fattori determinati per l'analisi della fragilità e/o resilienza (quali ad esempio fenomeni di interdipendenza e attributi di resilienza);

2. Proposta di modelli definiti su base empirica, per la caratterizzazione della fragilità fisica di sottostazioni, cavi interrati e linee aeree;

3. Integrazione delle funzioni e delle metriche proposte all'interno del Sistema di Supporto alle Decisioni CIPCast (in particolare nel modulo simulativo CIPCast-ES) implementato nell'ambito dell'obiettivo d.1 del progetto D.6 "*Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano*".

Grazie a tale integrazione è possibile, a oggi, eseguire con il suddetto DSS, analisi deterministiche di scenario, a supporto degli operatori della rete elettrica per la pianificazione e la gestione dell'emergenza sismica.

Uno specifico caso di studio messo a punto nell'area metropolitana di Roma, con particolare attenzione alla rete di distribuzione elettrica di ACEA Arei SpA, è stato utilizzato per testare le funzionalità e le capacità elaborative di CIPCast-ES a supporto dell'analisi "*what-if*" e dei processi decisionali dei gestori di rete e delle autorità locali, per la gestione delle emergenze post-evento e per la pianificazione pre-catastrofe.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, gli Autori proseguiranno la presente ricerca allo scopo di testare l'affidabilità degli approcci e dei modelli proposti su casi reali in Europa, inclusa la recente sequenza di terremoti nell'Italia centrale 2016-2017[10], in cui i dati relativi al danno fisico e agli impatti potrebbero eventualmente essere resi disponibili grazie alla cooperazione di gestori come Areti, Terna o e-Distribuzione.

Inoltre, la rispondenza del sistema elettrico ad altri fenomeni naturali quali, eventi metereologici estremi (sovratemperature estive, picchi di freddo, esondazioni in grado di provocare danni e disservizi sullo stesso sistema elettrico) sono in corso di studio da parte dagli stessi Autori del presente Report, che collaboreranno nella prossima annualità (PAR2017) per rendere possibile l'implementazione di modelli esistenti o in corso di definizione (e.g. [55],[56],[57],[58],[59] e [60]) all'interno di CIPCast. L'obiettivo sarà quello di consentire la simulazione e la valutazione di impatti fisici e funzionali sulla EPN e quindi degli impatti indotti sulla popolazione a causa degli ulteriori sopracitati fenomeni naturali.

[10] http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/1001-evento-sismico-tra-le-province-di-rieti-e-ascoli-p-m-6-0-24-agosto.html

4 Riferimenti

Bibliografia

[1]. Schiff, A.J. (1997). Northridge Earthquake: Lifeline Performance and Post- Earthquake Response.

[2]. Kwasinski, A., Eidinger, J., Tang, A., Tudo-Bornarel, C. (2014): Performance of Electric Power Systems in the 2010–2011 Christchurch, New Zealand, Earthquake Sequence. Earthq. Spectra. 30, 205–230 (2014).

[3]. Giovinazzi, S., Wilson, T., Davis, C., Bristow, D., Gallagher, M., Schofield, A., Villemure, M., Eidinger, J., Tang, A.: Lifelines Performance and management following the 22 February 2011 Christchurch Earthquake, New Zealand: Highlights of Resilience. Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng. 44, 402–417 (2011).

[4]. Giovinazzi, S., Wilson, T.M.: Recovery of Lifelines following the 22nd February 2011 Christchurch Earthquake: successes and issues. In: NZSEE Conference. NZSEE , Christchurch, NZ (2012).

[5]. A.L.A. (2005)- American Lifelines Alliance: Guideline for assessing the performance of Electric Power System in Natural Hazard and Human Threat Events. (2005).

[6]. NIBS (2004). HAZUS MR4 Technical Manual. National institute of Buildilng Sciences, Washington, DC (2004).

[7]. Rojahn, C. (1985). Earthquake damage evaluation data for California. ATC, Redwood City Calif. (1985).

[8]. Cagnan, Z., Davidson, R.: (2004). Post-Earthquake Restoration Modeling of Electric Power Systems. In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (2004).

[9]. Franchin, P., (2014). A computational framework for systemic seismic risk analysis of civil infrastructural systems. In: Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. pp. 23– 56. Springer Netherlands (2014).

[10]. OOFIMSS - Object-Oriented Framework for Infrastructure Modelling and Simulation, https://sites.google.com/a/uniroma1.it/OOFIMSs/.

[11]. Cavalieri, F., Franchin, P., Buriticá Cortés, J.A.M., Tesfamariam, S.: Models for Seismic Vulnerability Analysis of Power Networks: Comparative Assessment. Comput. Civ. Infrastruct. Eng. 29, n/a-n/a (2014a).

[12]. Cavalieri, F., Franchin, P., Pinto, P.E.: Application to Selected Transportation and Electric Networks in Italy. Presented at the (2014b).

[13]. Giovinazzi S., Pollino, M., Kongar I., Rossetto T., Caiaffa, E., Di Pietro, A., La Porta L., Rosato V., Tofani A., (2017). Towards a decision support tool for assessing, managing and mitigating seismic risk of electric power networks. In: Computational Science and Its Applications - ICCSA 2017. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing (2017).

[14]. Rosato, V., Di Pietro, A., La Porta, L., Pollino, M., Tofani, A., Marti, J.R., Romani, C.: A Decision Support System for Emergency Management of Critical Infrastructures Subjected to Natural Hazards. In: Critical Information Infrastructures Security: 9th International Conference, CRITIS 2014, Limassol, Cyprus, October 13-15, 2014. pp. 362–367. Springer, Cham (2016).

[15]. Di Pietro, A., Lavalle, L., La Porta, L., Pollino, M., Tofani, A., Rosato, V.: Design of DSS for Supporting Preparedness to and Management of Anomalous Situations in Complex Scenarios. In: Setola, R., Rosato, V., Kyriakides, E., and Rome, E. (eds.) Managing the Complexity of Critical Infrastructures: A Modelling and Simulation Approach. pp. 195– 232. Springer International Publishing, Cham (2016).

[16]. Matassoni, L., Fiaschi, A., Giovinazzi, S., Pollino, M., La Porta, L., Rosato, V.: A geospatial decision support tool for seismic risk management: Florence (Italy) case study. In: Computational Science and Its Applications - ICCSA 2017. Lecture Notes in Computer Science. Springer International Publishing (2017).

[17]. NTC2008. Decreto Ministeriale 14/01/2008, 2008. Norme Tecniche per le Costruzioni, G.U. 14 Febbraio 2008. NZSEE 2017. The Seismic Assessment of Exist

[18]. CEN/TC 250/SC 8 (2004) Eurocode 8: Earthquake resistance design of structures
[19]. Bindi, D., Luzi, L., Pacor, F., Sabetta, F., Massa, M.: Towards a new reference ground motion prediction equation for Italy: update of the Sabetta–Pugliese (1996). Bull. Earthq. Eng. 7, 591–608 (2009).
[20]. MakS,ClementsRA,SchorlemmerD(2015)Validatingintensitypredictionequationsfor Italy by observations. B Seismol Soc Am 105:2942-2954.
[21]. Faccioli E, Cauzzi C (2006) Macroseismic intensities for seismic scenarios estimated from nstrumentally based correlations. In: Proc. of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (paper n. 569); [cited 2016 Apr 26]. Availa-ble at http://www.researchgate.net/publication/256737077_Macroseismic_intensities_for_seismic_scenarios_estimated_from_instrumentally_based_correlations.
[22]. Pasolini C, Albarello D, Gasperini P, D'Amico V, Lolli B (2008) The attenuation of seismic intensity in Italy, part II: Modeling and validation. Bull Seismol Soc Am 98:692-708.
[23]. Allen T.I., Wald D.J., Worden C.B. (2012) Intensity attenuation for active crustal regions. J Seismol 16:409–433.
[24]. Grünthal G, ed (1998). European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Luxembourg: Cen- tre Européen de Géodynamique et de Séismologie. (Cahiers du Centre Européen de Géo- dynamique et de Séismologie n. 15).
[25]. Spence R (1999) Intensity, damage and loss in Earthquakes in Seismic Damage to Masonry Buildings. In: Bernardini A (ed) Seismic Damage to Masonry Buildings. Rotterdam: Balkema; p. 27-40.
[26]. Musson RMW, Cecić I (2012) Intensity and intensity scale. In: Bormann P, editor. New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2). Potsdam: IASPEI, GFZ Ger- man Research Centre for Geosciences (chapter n. 12); [cited 2016 Apr 22]. doi:10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch12. Available at: http://nmsop.gfz-potsdam.de.
[27]. Ambraseys N.N. (1995). "The prediction of earthquake peak ground acceleration in Europe", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24(4), pp. 467-490.
[28]. Ambraseys N.N., Simpson K.A. and Bommer J.J. (1996). "The prediction of horizontal response spectra in Europe", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 25, pp. 371-400.
[29]. AmbraseysN.N.,DouglasJ.,SarmaS.K.andSmitP.M.(2005)."Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration", Bulletin of Earthquake Engineering, vol. 3, pp. 1-53.
[30]. Sabetta, F. and Pugliese A. (1987). "Attenuation of peak horizontal acceleration and velocity from Italian strong-motion records", Bulletin of the Seismological Society of America, 77(5), pp. 1491-1513.
[31]. Sabetta F. and Pugliese A. (1996). "Estimation of response spectra and simulation of non-stationary earthquake ground motions", Bulletin of the Seismological Society of America, 86(2), pp. 337-352.
[32]. GDL MPS (2004). "Redazione della Mappa di Pericolosità Sismica prevista dall'Ordinanza PCM del 20 marzo 2003, n. 3274, All. 1" – Rapporto Conclusivo. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Rapporto disponibile presso il sito Internet: http://zonesismiche.mi.ingv.it/.
[33]. Cauzzi, C., Faccioli, E., 2008. Broadband (0.05 a 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. J Seismol. 3, DOI 10.1007/s10950-008-9098-y.
[34]. Kramer, S.L.: Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall (1996).
[35]. Borfecchia, F., De Canio, G., De Cecco, L., Giocoli, A., Grauso, S., La Porta, L., Martini, S., Pollino, M., Roselli, I., Zini, A.: Mapping the earthquake-induced landslide hazard around the main oil pipeline network of the Agri Valley (Basilicata, southern Italy) by means of two GIS-based modelling approaches. Nat. Hazards. 81, 759–777 (2016).
[36]. Douglas, J.: Ground Motion Prediction Equations 1964-2010. , Berkeley, CA (2011).

[37]. Weatherill, G., Esposito, S., Iervolino, I., Franchin, P., Cavalieri, F.: Framework for seismic hazard analysis of spatially distributed systems. In: Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. pp. 57–88. Springer Netherlands (2014).
[38]. Pitilakis K, Crowley H, Kaynia A (eds), (2014a). SYNER-G: Typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk, vol 27, Geotechnical, geological and earthquake engineering. Springer, Netherlands
[39]. Pitilakis K, Franchin P, Khazai B, Wenzel H (eds), (2014b). SYNER-G: Systemic seismic vulnerability and risk assessment of complex urban, utility, lifeline systems and critical facilities, vol 31, Geotechnical, geological and earthquake engineering. Springer, Netherlands.
[40]. Pomonis A, So E (2011) Guidelines for the collection of consequence data, global earthquake consequences database global component project. http://www.nexus.globalquakemodel.org/gemecd/. Accessed 24 Sept 2014
[41]. Terna (2017). Viaggia con Terna nel mondo della trasmissione elettrica. Pagina web informativa di Terna, visitata Dicembre 2017 https://trasmissione-energia.terna.it/?language=it-IT
[42]. Kongar, I., Giovinazzi, S., Rossetto, T. (2017). Seismic performance of buried electrical cables: evidence-based repair rates and fragility functions. Bull. Earthq. Eng. 1–31 (2017).
[43]. Tang A, Cooper TR (2009) L'Aquila Earthquake, Abruzzo. Italy May 06, 2009 Mw = 6.3: lifeline performance. Report available at http://www.reluis.it/doc/pdf/Aquila/Lifelines_TCLEE.pdf
[44]. Eidinger J, Tang AK (2012) Christchurch, New Zealand Earthquake Sequence of MW 7.1, September 04, 2010, MW 6.3, February 22, 2011, MW 6.0, June 13, 2011: Lifeline performance, technical council of lifeline earthquake engineering. American Society of Civil Engineers, Reston, VA
[45]. Rinaldi SM, Peerenboom JP, Kelly TK (2001) Identifying, understanding and analysing critical infras-tructure interdependencies. IEEE Control Syst Mag 21(6):11–25
[46]. Duen˜as-Osorio L, Kwasinski A (2012) Quantification of lifeline system interdependencies after the 27 February 2010 MW 8.8 offshore Maule, Chile, earthquake. Earthq Spectra 28(S1):581–603
[47]. Bruneau M, Chang SE, Eguchi GR, Lee GC, O'Rourke TD, Reinhorn AM, Shinozuka M, Tierney K, Wallace WA, von Winterfeldt D (2003) A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. Earthq Spectra 19(4):733–752
[48]. Mitrani-Reiser J, Mahoney M, Holmes WT, de la Llera JC, Bissell R, Kirsch T (2012) A functional loss assessment of a hospital system in the B´ıo-B´ıo province. Earthq Spectra 28(S1):473–502
[49]. Orion (2009) Asset management plan, Orion, Christchurch, New Zealand
[50]. Cavalieri, F., Franchin, P., Pinto, P.E. (2014c). Fragility Functions of Electric Power Stations. In: Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering. pp. 157–185. Springer Netherland (2014).
[51]. Vanzi, I.: Seismic reliability of electric power networks: methodology and application. Struct. Saf. 18, 311–327 (1996).
[52]. Kongar I, Rossetto T, Giovinazzi S (2014) The effectiveness of existing methodologies for predicting electrical substation damage due to earthquakes in New Zealand. In: Proceedings 2nd International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management, 13–16 July 2014, Liverpool, UK
[53]. Eidinger, J., Tang, A., 2016. Resiliency of Power Grids after Earthquakes Applied Technology Council. Available for download at https://www.atcouncil.org/. Retrieved July 2017.
[54]. Lagomarsino S, Giovinazzi S (2006) Macroseismic and mechanical models for the vulner- ability and damage assessment of current buildings. B Earthq Eng 4:415-443.
[55]. L. Calcara, S. Sangiovanni, M. Pompili, "MV Underground Cables: Effects of Soil Thermal Resistivity on Anomalous Working Temperatures", International Annual Conference AEIT, Cagliari (Italy), 2017
[56]. L. Calcara, B.A. Cauzillo, M. Pompili, "Soil Thermal Gradient due the Ambient Temperature and its Correlation with Failure of MV Underground Cables", First SEERC Power Conference, Portoroz, Slovenia, 2016

[57]. L. Calcara, B.A. Cauzillo, M. Pompili, "Sicurezza e Resilienza dei Sistemi Elettrici", Special Issue, Magazine AEIT 2016
[58]. L. Calcara, M. Pompili, B. Cauzillo, "Ampacity of MV Underground Cables: the Influence of Thermal Soil Resistivity", 2015 International Youth Conference on Energy, May 2015 – Pisa (Italy).
[59]. G. Fioriti, A. Sturchio, M. Pompili, L. Calcara, "Thermal Behavior of Distribution MV Underground Cables", Annual Meeting AEIT 2015 – Napoli (Italy).
[60]. A. Sturchio, G. Fioriti, M. Pompili, B. Cauzillo, "Failure rates reduction in SmartGrid MV underground distribution cables: Influence of temperature", 2014 AEIT Annual Conference From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer, AEIT 2014.
[61]. Gruppo di lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna. http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/

Rapporti Tecnici - Ricerca di Sistema Elettrico

- ENEA, DTE-SEN-APIC – Report RdS/PAR2015/016 – "La piattaforma per la sicurezza delle infrastrutture critiche", M. Pollino, L. La Porta, A. Di Pietro, A. Tofani, E. Caiaffa, V. Rosato, Settembre 2016
- ENEA, DTE-SEN-APIC – Report RdS/PAR2016/020 – "Realizzazione del DSS per la sicurezza delle infrastrutture critiche (CI) del distretto", M. Pollino, L. La Porta, A. Di Pietro, A. Tofani, E. Caiaffa, e V. Rosato, Settembre 2017

5 Curriculum scientifico dei partecipanti

SAPIENZA - Università di Roma

Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica

Via Eudossiana, 18 – 00184 ROMA (Italy)

Prof. Massimo Pompili, Prof.ssa Regina Lamedica, Prof. Alberto Geri e Prof.ssa Sonia Giovinazzi

Massimo Pompili (1956) si è laureato e ha conseguito il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica presso l'Università degli Studi di Roma nel 1981 e nel 1987 rispettivamente.
Dal 1988 è in servizio presso la stessa Università dapprima come ricercatore e poi come professore tenendo i Corsi di "Componenti e Tecnologie Elettriche" e "Tecnica delle Alte Tensioni" per il Corso di Laurea in Ingegneria Elettrotecnica e quello di "Impianti Elettrici" per il Corso di Laurea in Ingegneria Edile e Architettura.
Dal 1990 è Presidente del CEI CT10 (Fluidi isolanti per applicazioni elettrotecniche) e dal 1998 è stato nominato Secretary dall'IEC per lo stesso Comitato Tecnico.
Dal 2007 è Associate Editor della Rivista IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation. Egli inoltre ha curato circa 10 Special Issues di tale rivista nel settore delle tecnologie elettriche. È inoltre revisore di molteplici riviste americane tra cui "IEEE - Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation" e "IEEE – Transaction on Power Delivery".
Nel 2007 è stato prescelto per tenere la "Hans Tropper Memorial Lecture" all'IEEE – ICDL, che si è tenuta nel Luglio 2008 presso l'Università di Poitiers in Francia.
Nel 2007 ha ricevuto dal CEI il PREMIO GIORGI per "l'attività svolta in ambito tecnico ed al ruolo esercitato per la crescita, lo sviluppo e la promozione dell'attività normativa nel mondo".
Dal 2012 è anche il rappresentante italiano della CIGRE SC-D1(Materials and Emerging Test Techniques).
Il Prof. Pompili è ed è stato Responsabile di numerosi progetti di ricerca della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma o finanziati da importanti Società del settore elettrico.
È autore di oltre 100 contributi pubblicati su riviste o presentati a convegni nazionali e internazionali.
Dal 1996 è Membro del Comitato Scientifico dell'ICDL (IEEE – International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids) che nel Giugno 2019 si terrà presso l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza".

Regina Lamedica (1952), ha conseguito la laurea, con lode, in Ingegneria Elettrica presso l'Università di Bologna nel 1976. E' Ricercatore Confermato nel 1980 presso la Sapienza, Università di Roma, Professore Associato di Tecnica delle alte tensioni nel 1987 presso l'Università degli studi di L'Aquila; è Professore Ordinario di Sistemi elettrici per l'energia presso la Sapienza, Università di Roma dal 2000. Dal 1990 insegna presso la Facoltà di Ingegneria della Sapienza-Università di Roma "Sistemi elettrici per i trasporti" (rinominato, nel 2002, "Sistemi elettrici per la mobilità") diretto agli studenti del Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrotecnica.
Dal 2005 al 2011 è stata Presidente del Consiglio d'Area di Ingegneria Elettrica, organo di coordinamento dei corsi di studi in Ingegneria Elettrica; dal 2006 al 2011 è stata Presidente del "Co.S.I.E." (Conferenza permanente per il coordinamento nazionale dei corsi di laurea in Ingegneria Elettrica); dal 2007 coordina i rapporti della Facoltà di Ingegneria (oggi, Ingegneria Civile e Industriale) con le Aziende nell'ambito del progetto FiGi, Facoltà di Ingegneria & Grandi Imprese; dal 2005 al 2009 è stata delegata del Rettore a rappresentare l'Ateneo nel "N.I.T.E.L." Consorzio Interuniversitario per i Trasporti e la Logistica.
Ha svolto numerose attività professionali. Dal 2005 al 2011 è stata membro esperto del "Consiglio superiore dei lavori pubblici" del Ministero dei Lavori Pubblici; dal 2005 al 2007 è stata consulente del Dipartimento VII - Politiche della mobilità, U.O. Sistemi di mobilità del Comune di Roma per il potenziamento del sistema elettrico di alimentazione della linea A della metropolitana romana; dal 2007 al 2008 è stata consulente di "Intermetro" per l'analisi delle correnti di cortocircuito nel sistema di

alimentazione della metropolitana di Roma nella tratta Battistini - Cinecittà ai fini della progettazione dell'impianto di terra; dal 2008 al 2009 è stata consulente di "Met.Ro. S.p.A." per il potenziamento del sistema elettrico di alimentazione della linea metropolitana Roma – Ostia Lido.

Alberto Geri nasce a Terni il 4 agosto 1961. Nel 1987, si laurea in Ingegneria Elettrica presso l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" con il massimo dei voti e dignità di stampa, e nel 1990 consegue l'abilitazione alla professione di ingegnere. Nel 1989 inizia l'attività accademica come ricercatore, dal 2000 al 2015 è stato professore associato di Elettrotecnica presso la "Sapienza" Università di Roma e dal 2015 è professore associato di Sistemi elettrici per l'energia presso lo stesso Ateneo. Dal 1993 svolge la sua attività didattica, dapprima in qualità di professore incaricato e poi di professore di ruolo, impartendo l'insegnamento di Elettrotecnica come compito didattico per i Corsi di Laurea di Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Civile, Edile, Energetica, Gestionale, della Logistica e dei Trasporti e Meccanica. Ha inoltre pubblicato due testi didattici. Durante la sua attività scientifica, iniziata il 1982, si è occupato, mediante approcci di tipo circuitale, dello studio di: dispositivi elettromagnetici non-lineari (i.e., MDH e TFIH), impianti di terra e sistemi di protezione contro le scariche atmosferiche, backflashover nelle linee di AT. Attualmente si sta occupando di: algoritmi evolutivi implementati su architetture parallele per la soluzione di problemi di sintesi e/o di ottimizzazione multi-obiettivo, reattori MFC per la produzione di energia elettrica e la bioremediation, reti di distribuzione, sistemi di storage, smart e micro grids. E' stato responsabile scientifico di molteplici progetti e contratti di ricerca stipulati sia con soggetti pubblici che privati. Queste attività sono descritte in più di centosessanta pubblicazioni presentate a conferenze o pubblicati su riviste internazionali. Molteplici sono gli incarichi ricoperti che hanno riguardato prevalentemente attività di consulenza riguardanti il mercato elettrico e la sicurezza elettrica (dal 2015 fa parte *Servizio di Prevenzione e Protezione* della Camera dei Deputati).

Sonia Giovinazzi (1974) si è laureata presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Genoa e ha conseguito il Dottorato presso le Facoltà di Ingegneria dell'Università di Firenze e della Technical University of Braunshweig in Germania (Dottorato congiunto internazionale) in "*Gestione dei rischi naturali e antropici nell'ambiente costruito*".
Dal 2007 al 2016 ha prestato servizio presso il "Department of Natural and Resources Engineering" dell'Università' di Canterbury, Canterbury University UC, in Nuova Zelanda.
Dal 2016 e attualmente Sonia è Professore aggregato presso la Facoltà di Architettura della Sapienza Università' di Roma, Senior Research Fellow presso il "Geospatial Reserach Institute", dell'Università' di Canterbury, e Ricercatore aggregato presso INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Sonia ha collaborato a numerosi progetti internazionali e multi-agenzia con lo scopo di costruire o far progredire sistemi di supporto decisionale, DSS e piattaforme per la riduzione degli impatti e rischi indotti da fenomeni naturali e antropici. Tra gli altri Sonia ha contribuito a: Global Earthquake Model, GEM; piattaforma RiskScape in Nuova Zelanda; progetti SYNER-G e Risk-UE finanziati dall'UE; consorzio ERGO Muti-hazard Assessment, Response and Planning, piattaforma open source, di cui Sonia è anche co-fondatrice). Ha gestito in Nuova Zealand il progetto "Resilienza delle Infrastrutture Critiche" dopo la sequenza sismica che ha colpito la regione di Canterbury in Nuova Zealanda nel 2010-2011 ed è stata consulente sugli stessi temi per numerose agenzie governative, tra le quali Canterbury Earthquake Recovery Authority, dipartimento istituito dal Governo della Nuova Zelanda dopo il terremoto.