



Ricerca di Sistema elettrico

# Modelli per la valutazione della resilienza del sistema elettrico soggetto a sollecitazioni multiple

S. Giovinazzi, M. Pompili, A. Geri, L. Calcara



## Metriche e modelli di resilienza multi-rischio per il sistema elettrico

Sonia Giovinazzi, Massimo Pompili, Alberto Geri, Luigi Calcara  
SAPIENZA - Università di Roma  
Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica - DIAEE

Dicembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA  
Piano Annuale di Realizzazione 2018

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: Obiettivo d: Sicurezza infrastrutture critiche e monitoraggio Smart District - Sotto-obiettivo d.1: 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 "Metriche e modelli di resilienza multi-rischio per il sistema elettrico"

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 OTTENUTI .....	8
2.1 CASO STUDIO: TERREMOTO DI AMATRICE (ITALIA CENTRALE) DEL 24/08/2016 ORE 3:36.....	8
2.1.1 <i>Entità dello scuotimento del suolo che ha interessato la rete elettrica di distribuzione.....</i>	8
2.1.2 <i>Danni sismo-indotti alla linea di bassa, media e alta tensione e ripristino del servizio .....</i>	11
2.2 AGGIORNAMENTO DELLA TASSONOMIA PROPOSTA PER IL SISTEMA ELETTRICO SOGGETTE A SISMA.....	14
2.3 CALIBRAZIONE DEI MODELLI CIPCAST PER LA PREVISIONE DEL DANNO ALLE CABINE PRIMARIE E SECONDARIE E AI CAVI AEREI .....	19
2.3.1 <i>Modelli per la previsione del danno sisma-indotto a cabine primarie e secondarie.....</i>	19
2.3.2 <i>Modelli per la previsione del danno sisma indotto a Linee aeree.....</i>	26
2.3.3 <i>Imparare dall'esperienza: esempi dalla Nuova Zelanda .....</i>	27
3 CONCLUSIONI.....	30
4 RIFERIMENTI .....	31
BIBLIOGRAFIA .....	31
RAPPORTI TECNICI - RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO .....	32
5 APPENDICE A.....	33
6 APPENDICE B.....	34
7 CURRICULUM SCIENTIFICO DEI PARTECIPANTI.....	35

## Indice delle figure

Figura 1. Zona colpita dal terremoto di Amatrice: a) mappa dello scuotimento del terremoto [2]; b) localizzazione degli impianti AT e MT interessati dall'evento sismico (estratte da [4]).	9
Figura 2. Stazione ANT (Rep=34.3km: a) componente Est-Ovest; b) componente Nord-Sud (da [3]).	9
Figura 3. Mappe di scuotimento accelerazione di picco PGA [%g] per il Terremoto di Amatrice (Italia Centrale) del 24/08/2016 da [2] e approssimata localizzazione di componenti della rete elettrica	10
Figura 4. Mappe di scuotimento in PSA03 (T=3s, smorzamento 5%) per il Terremoto di Amatrice (Italia Centrale) del 24/08/2016 da [2] e approssimata localizzazione di componenti della rete elettrica.	10
Figura 5. Danni alla sezione alta tensione, AT indotti dal terremoto di Amatrice (Italia Centrale) del 24/08/2016: a) caduta dei sezionatori AT; b),c) danni al fabbricato della cabina primaria, e quadro di media tensione intatto (fotografie estratte da [4]).	11
Figura 6. Scala di danno osservazionale secondo la scala macrosismica europea per edifici in muratura e cemento armato (Immagine adattata da [5]).	12
Figura 7. Danni alle linee MT e BT: a) sostegni sbandati e conduttori a terra; b) posti di trasformazione su palo PTP caduti dalle mensole; c) danni ai fabbricati delle cabine secondarie in muratura; d) linee aeree BT danneggiate dal collasso di edifici prospicienti (fotografie estratte da [4]).	12
Figura 8. Operazioni nelle prime ore successive all'evento: a) centro di telecontrollo dal quale sono state eseguite manovre in remoto; b) ispezioni degli impianti e del territorio circostante; c) distribuzione di gruppi elettrogeni per alimentare ponti radio e torri faro.	13
Figura 9. Operazioni nei primi giorni successivi all'evento: a) verifica strutturale delle cabine secondarie; b) delimitazioni di sicurezza nella cabina primaria; c) attivazione fornitura elettrica per le tendopoli.	14
Figura 10. Schema base di una rete di MT e BT	15
Figura 11. Diverse tipologie di cabine secondarie riconoscibili in una linea MT	16
Figura 12. Schemi linea MT: a) schema Dorsale di MT (dove CP sta per Cabina Primaria, PTP Posto di Trasformazione su Palo; IMS interruttore di manovra sezionatore	16
Figura 13. Curve di fragilità per sottostazioni elettriche, secondo HAZUS[8]: a) Probabilità di superamento (probabilità cumulata) dei diversi livelli di danno in funzione dello scuotimento del suolo in termini di PGA[g]; b) Distribuzione di Probabilità di Danno per PGA=0.7	21
Figura 14. Layout generici di macro-componenti per una sottostazione di trasformazione (a sinistra) e una sottostazione di sola distribuzione (a destra) [7][14]	22
Figura 15. Curve di vulnerabilità secondo il metodo macrosismico [11] per diversi valori dell'indice di vulnerabilità V	24
Figura 16. Correlazione tra Intensità e PGA: assunta dal metodo macrosismico (in rosso); assunta per ottenere l'intensità macrosismica strumentale (utilizzata nella mappa in Figura 1a).	25
Figura 17. Modelli assunti in CIPCast per la previsione del danno sisma-indotto alle linee aeree: in funzione di PSA03; b) in funzione di PGA[g] (da [15])	27
Figura 18. Sottostazione di Bromley: a) trasformatore di tensione corrente a 220 kV, caduta b) Controventatura Bromley installata nella parte anteriore e posteriore dei pannelli del quadro elettrico; c) pannelli del controsoffitto dislocati nell'edificio di controllo e relè, (Foto gentilmente fornite da Transpower).	28
Figura 19. Sottostazioni per la trasformazione da MT a BT gestite da Orion a Christchurch in Nuova Zelanda: a) esempio di sottostazione considerata edificio storico; b) schema del rinforzo sismico adottato per 150 sottostazioni [19]	29

## Sommario

Il progetto ha riguardato il completamento delle attività di definizione e sviluppo di modelli per la valutazione della resilienza dei sistemi di distribuzione e trasmissione elettrica soggetti a sollecitazioni multiple, avviate nel corso dei precedenti piani annuali di realizzazione, in particolare nei PAR2016 (Report RdS/PAR2016/023) e PAR2017 (Report RdS/PAR2017/061).

In questa trimestralità, si è posta particolare attenzione agli eventi sismici per verificare l'affidabilità degli approcci e dei modelli proposti per la valutazione del danno sisma-indotto su componenti critiche del sistema di distribuzione di media tensione, MT. Questo è stato possibile grazie alle informazioni raccolte attraverso interviste strutturate con il personale operativo di alcuni dei principali distributori elettrici italiani, anche con riferimento al caso studio della sequenza sismica dell'Italia Centrale 2016-2017.

Il lavoro ha portato a importanti risultati, quali, da un lato, l'identificazione di ulteriori componenti e caratteristiche peculiari delle reti elettriche italiane di media e bassa tensione vulnerabili all'azione sismica, che non erano state precedentemente considerate nella piattaforma CIPCast-ES, e dall'altro la calibrazione dei modelli, già implementabili all'interno della piattaforma CIPCast-ES, per la previsione del danno-sismo indotto per le componenti già identificate.

Le attività di questa trimestralità e delle precedenti annualità hanno evidenziato che la resilienza delle reti elettriche deve essere perseguita con costanza temporale (prima, durante e post situazioni di crisi) e mettendo in campo, in modo integrato e bilanciato, diverse azioni rivolte all'aumento di robustezza delle componenti delle reti, all'aumento della ridondanza del sistema, della disponibilità di risorse di back-up, di risorse umane e materiali per eseguire eventuali riparazioni necessarie, e all'abilità di saperle gestire e dispiegare nel modo più efficace possibile, tenendo conto di eventuali priorità. A tal fine si è iniziato in questa trimestralità a documentare "best-practices" e strategie vincenti messe a punto dopo reali situazioni di crisi, al fine di raccogliere "evidenze sperimentali" sulle quali costruire o calibrare modelli analitici per rendere ancora più performante la piattaforma CIPCast, relativamente alla possibilità di eseguire analisi "what-if" per la definizione di strategie di resilienza a 360 gradi.

Infine le attività di questa trimestralità e delle precedenti annualità hanno evidenziato come la resilienza del sistema elettrico sia un tema da affrontare in modo multi-disciplinare e multi-settoriale e come debba essere affrontato in stretta sinergia con il perseguimento della resilienza di altre Infrastrutture Critiche, interdipendenti quali ad esempio la rete di comunicazione, di telecomunicazione e la rete idrica. Al fine di accrescere ulteriormente la connessione e la cooperazione tra i soggetti interessati a promuovere la resilienza del sistema elettrico (quali ad esempio accademici, enti di ricerca, gestori delle reti, amministratori regionali e locali e ARERA) si è proposta in questa trimestralità la creazione di un *Working Group per la Resilienza del Sistema Elettrico*, nominato **ReSiEL**, e l'organizzazione di un Workshop sul tema della resilienza del sistema elettrico, aperto alla partecipazione e contributo di esperti e operatori internazionali, che vedrà come primi promotori l'ENEA e il Dipartimento DIAEE di Sapienza Università di Roma.

## 1 Introduzione

Il progetto ha riguardato il completamento delle attività di definizione e sviluppo di modelli per la valutazione della resilienza dei sistemi di distribuzione e trasmissione elettrica soggetti a sollecitazioni multiple avviate nel corso dei precedenti piani annuali di realizzazione, in particolare nel PAR2016 (Report RdS/PAR2016/023) e nel PAR2017 (Report RdS/PAR2017/061).

In questa trimestralità, si è posta particolare attenzione agli eventi sismici per verificare l'affidabilità degli approcci e dei modelli proposti per la valutazione del danno sisma-indotto su componenti critiche del sistema di distribuzione di media tensione, MT. Questo è stato possibile grazie alle informazioni raccolte attraverso interviste strutturate con il personale operativo di alcuni dei principali distributori elettrici italiani, anche con riferimento al caso studio della sequenza sismica dell'Italia Centrale 2016-2017.

Dall'elaborazione di tali informazioni sono state evinte alcune importanti considerazioni, tra le quali:

- (a) la necessità di espandere la tassonomia proposta all'interno di CIPCast (descritta nel Report RdS/PAR2016/023) per la classificazione del comportamento sismico delle componenti della rete quali, ad esempio sottostazioni, componenti delle linee interrate e delle linee aeree;
- (b) l'affidabilità dei modelli utilizzati all'interno di CIPCast (descritti nel Report RdS/PAR2016/023 e in [1]), per prevedere il danno sisma-indotto alle componenti della rete, già identificate nella tassonomia precedentemente proposta;
- (c) l'importanza di raccogliere, dopo ogni evento calamitoso e in modo standardizzato, quante più possibili informazioni e dati non solo su come i sistemi hanno risposto alle sollecitazioni da un punto di vista fisico e funzionale (un possibile formato schedografico per questo era stato proposto in Report RdS/PAR2016/023), ma anche sulle "best-practices" e strategie messe in campo per la gestione dell'emergenza e della ricostruzione.

In particolare, per quanto riguarda la tassonomia (a), si è notata la necessità di integrare quella già proposta nel Report RdS/PAR2016/023 con nuovi elementi peculiari delle reti di distribuzione dell'energia elettrica di MT e BT in Italia, quali ad esempio la presenza di posti di trasformazione su palo, PTP, utilizzati nelle reti rurali di MT e la presenza di sottostazioni ancora realizzate in muratura non rinforzata; entrambi questi elementi si sono dimostrati molto vulnerabili alle sollecitazioni sismiche, per il particolare caso studio analizzato. Si ritiene inoltre importante segnalare nella tassonomia, come fattore critico, l'integrazione del sistema elettrico di bassa tensione, BT, con il tessuto urbano dei centri storici e borghi italiani molto vulnerabili alle sollecitazioni sismiche.

Per quanto riguarda la previsione del danno indotto da sisma (b), le informazioni fornite dai distributori elettrici hanno mostrato che i modelli implementati all'interno della piattaforma CIPCast [1] forniscono risultati affidabili, con qualche minima sottostima in alcuni casi.

Infine relativamente alla necessità di documentare le "best-practices" e le strategie messe in campo per la gestione dell'emergenza e/o della ricostruzione e/o per la mitigazione del rischio pre-evento (c) si è resa evidente la necessità di documentarle adeguatamente in quanto esse costituiscono "l'evidenza sperimentale" sulla quale costruire e o calibrare modelli teorici per simulare, all'interno di CIPCast, strategie che consentano l'incrementare la resilienza prima, durante e post situazioni di crisi, con azioni che prevedano in modo integrato e bilanciato l'incremento della robustezza delle componenti critiche, la ridondanza della rete, la disponibilità di risorse di back-up, umane e materiali per eseguire eventuali riparazione e ripristino del servizio, e per aumentare la capacità di saperle gestire e dispiegare nel modo più efficace possibile, tenendo conto delle necessarie priorità.

L'analisi del caso studio presentata ha, inoltre, consentito di mettere in luce possibili utilizzi della piattaforma CIPCast per analisi di mitigazione del rischio, quali ad esempio analisi "what-if" che consentirebbe la valutazione, per quanto possibile, di benefici di interventi di mitigazione del rischio sismico sul patrimonio esistente quali il rinforzo delle sottostazioni in muratura e l'ancoraggio di componenti sensibili agli spostamenti. Esempi di tali interventi sono stati eseguiti in Nuova Zelanda come descritto in questo report.

Il report, infine, fornisce una panoramica sulle ulteriori iniziative già realizzate e in corso di realizzazione per la costituzione di un Working Group per la Resilienza del Sistema Elettrico, denominato **ReSiEL**, e per l'organizzazione di un Workshop, aperto alla partecipazione e contributo di esperti e operatori internazionali e che vedrà come primi promotori l'ENEA e il Dipartimento DIAEE di Sapienza Università' di Roma. Queste iniziative avranno l'obiettivo di accrescere ulteriormente la connessione e la cooperazione tra i soggetti interessati (accademici, enti di ricerca, gestori delle reti, amministratori regionali e locali e ARERA) a promuovere la resilienza del sistema elettrico.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati ottenuti

### 2.1 Caso Studio: Terremoto di Amatrice (Italia Centrale) del 24/08/2016 ore 3:36

#### 2.1.1 Entità dello scuotimento del suolo che ha interessato la rete elettrica di distribuzione

Il 24 agosto 2016 alle ore 03:36 (italiane) un terremoto di magnitudo momento ( $M_w$  6.1), riportato di seguito come “terremoto di Amatrice”, ha colpito una vasta porzione dell’Appennino centrale tra i comuni di Norcia e Amatrice. L’epicentro è stato localizzato in prossimità del comune di Accumoli (Figura 1a) al confine tra le regioni Marche, Lazio, Umbria e Abruzzo. Il terremoto di Amatrice ha colpito prevalentemente 15 comuni; Amatrice e Accumoli sono stati quelli maggiormente impattati da un punto di vista elettrico.

In Figura 1a è riportata l’entità dello scuotimento del suolo indotto dal terremoto di Amatrice, secondo le registrazioni effettuate dalla Rete accelerometrica italiana (RAN) dalla *Ran - Rete Accelerometrica Nazionale*, e dalla rete sismica italiana, gestita dall’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) che hanno messo a disposizione le registrazioni di circa 200 stazioni accelerometriche [3].

Le mappe di pericolosità fornite dall’INGV, sulla base delle registrazioni accelerometriche, hanno una spaziatura del grigliato pari a 30 secondi di grado (circa 1 km) e sono fornite in: percentuale di accelerazione di picco del suolo  $PGA$  [%g]; in picco di velocità del suolo  $PGV$  [cm/s]; in intensità macrosismica strumentale,  $MMI$  misurata secondo la scala *Mercalli Modificata*; e in  $PSA03$ ,  $PSA10$ ,  $PSA30$ , cioè’ accelerazione pseudo-spettrale  $PSA$  per tre valori di periodo proprio di oscillazione  $T$ , misurato in secondi [s], rispettivamente  $T=3s$ ,  $10s$  e  $30s$  (*smorzamento al 5% per tutti i valori di PSA*).

Dalla Figura 1a è possibile quindi evincere l’entità dello scuotimento che ha colpito l’Italia Centrale a seguito del terremoto di Amatrice in termini di  $PGA$  [%g],  $PGV$  [cm/s], e di intensità macrosismica strumentale,  $MMI$ . Per quanto riguarda la  $MMI$ , *Modified Mercalli Intensity*, Scala Mercalli Modificata è importante sottolineare che i valori forniti dall’INGV sono stati derivati a partire dai valori di accelerazione e velocità del suolo [2] e non da un vero e proprio rilievo macrosismico. In generale, le misurazioni secondo scale macrosismiche si dovrebbero effettuare osservando gli effetti che lo scuotimento induce sull’ambiente costruite, riportata da osservatori dopo rilievi sul campo nelle zone maggiormente colpite. È importante sottolineare come l’uso di “intensità strumentali” in luogo di “intensità osservate” potrebbe portare alla sottostima dei valori di intensità macrosismica, in zone caratterizzate da un costruito molto vulnerabile come quello dei borghi del Centro Italia (questo punto è approfondito nel Par. 1.3.1).

La Figura 1b mostra la localizzazione degli impianti di alta, AT, e media tensione, MT, e della cabina primaria interessati dall’evento sismico in provincia di Rieti [4].

Sovrapponendo le mappe di scuotimento del suolo [2] con una sommaria e approssimata localizzazione delle componenti della rete (gli autori non erano in possesso di informazioni relativamente alle componenti della rete, inclusa la loro localizzazione) è stato possibile evincere l’intervallo di valori dell’intensità macrosismica strumentale, e dell’accelerazione di picco  $PGA$ [%g] (Figura 3), nonché’ della accelerazione pseudo-spettrale  $PSA03$  (Figura 4), che hanno colpito la parte di rete analizzata. Questo è stato un passo necessario per la calibrazione dei modelli attualmente implementati all’interno di *CIPCast* per la previsione del danno sismo-indotto a componenti della rete elettrica, come spiegato nel Paragrafo 1.3.

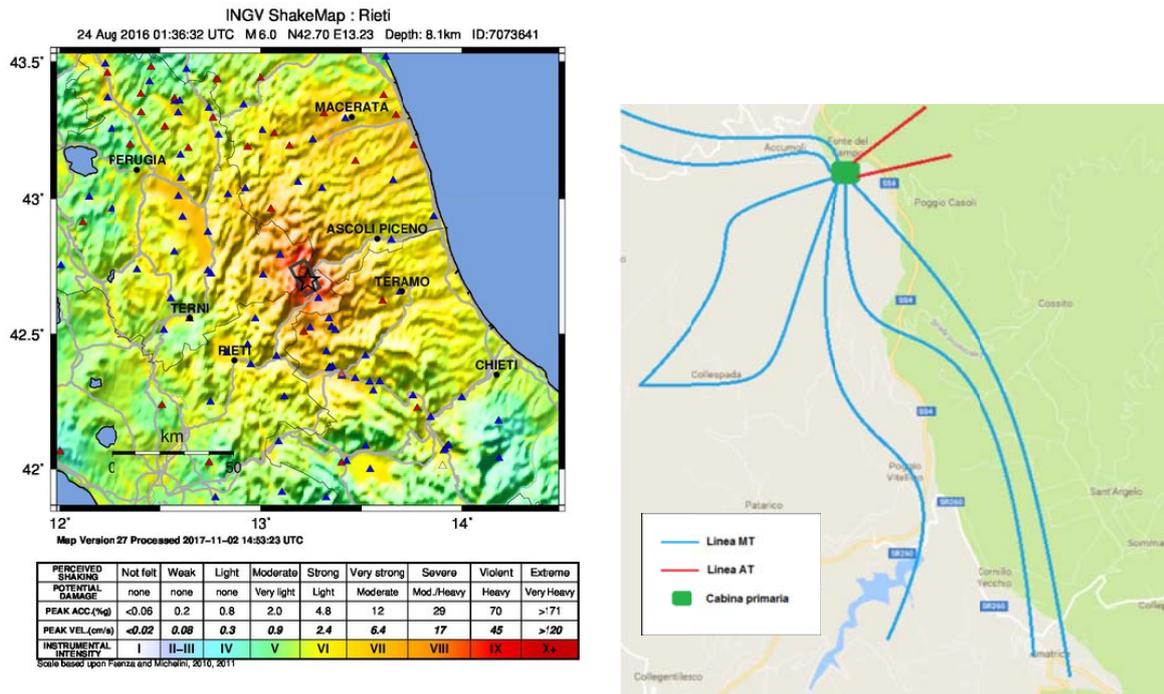


Figura 1. Zona colpita dal terremoto di Amatrice: a) mappa dello scuotimento del terremoto [2]; b) localizzazione degli impianti AT e MT interessati dall'evento sismico (estratte da[4]).

Per eseguire analisi più approfondite di quelle riportate in questo lavoro, potrebbe essere necessario conoscere la forma degli spettri di risposta elastici e inelastici dei movimenti del terreno registrati, o semplicemente le PSA risultanti per valori del periodo di vibrazione diversi da quelli riportati nelle mappe dell'INGV (cioè  $T=3s$ ,  $10s$  e  $30s$ ) sarebbe possibile fare riferimento all'Appendice 1 di [3], così come il database di "Engineering Strong-motion" ([esm.mi.ingv.it](http://esm.mi.ingv.it)); qui sono riportati, per tutti i record disponibili, la risposta elastica, l'accelerazione pseudo-spettrale (PSA), la velocità pseudo-spettrale (PSV) e lo spostamento spettrale (SD), per tre diversi valori di rapporto di smorzamento, ( $z$ ), cioè 2%, 5% e 10%. La Figura 2 rappresenta per esempio l'accelerazione pseudo-spettrale (PSA), per la stazione ANT, per due diverse direzioni East-Ovest (a) e Nord-Sud (b).

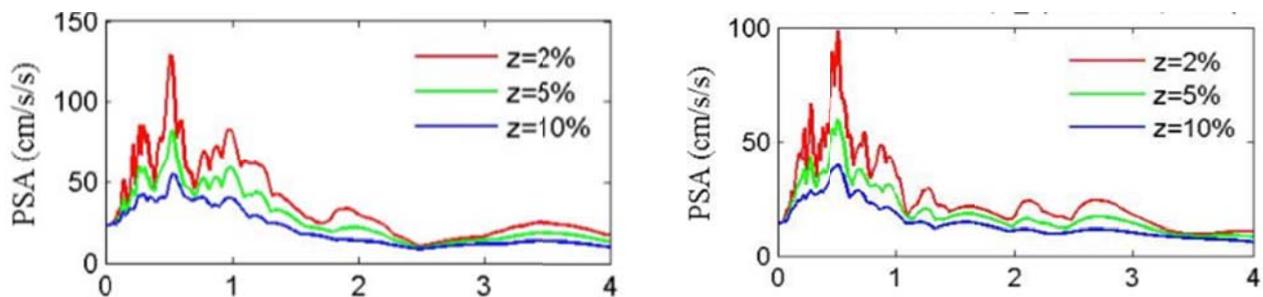


Figura 2. Stazione ANT (Rep=34.3km): a) componente Est-Ovest; b) componente Nord-Sud (da [3]).

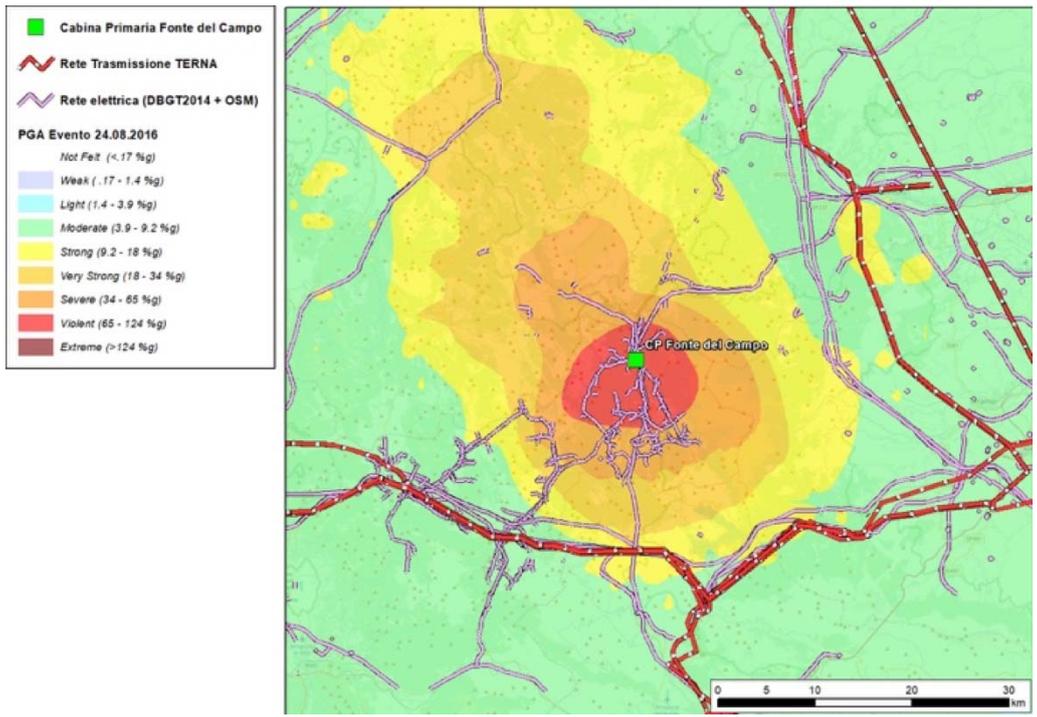


Figura 3. Mappe di scuotimento accelerazione di picco PGA [%g] per il Terremoto di Amatrice (Italia Centrale) del 24/08/2016 da [2] e approssimata localizzazione di componenti della rete elettrica

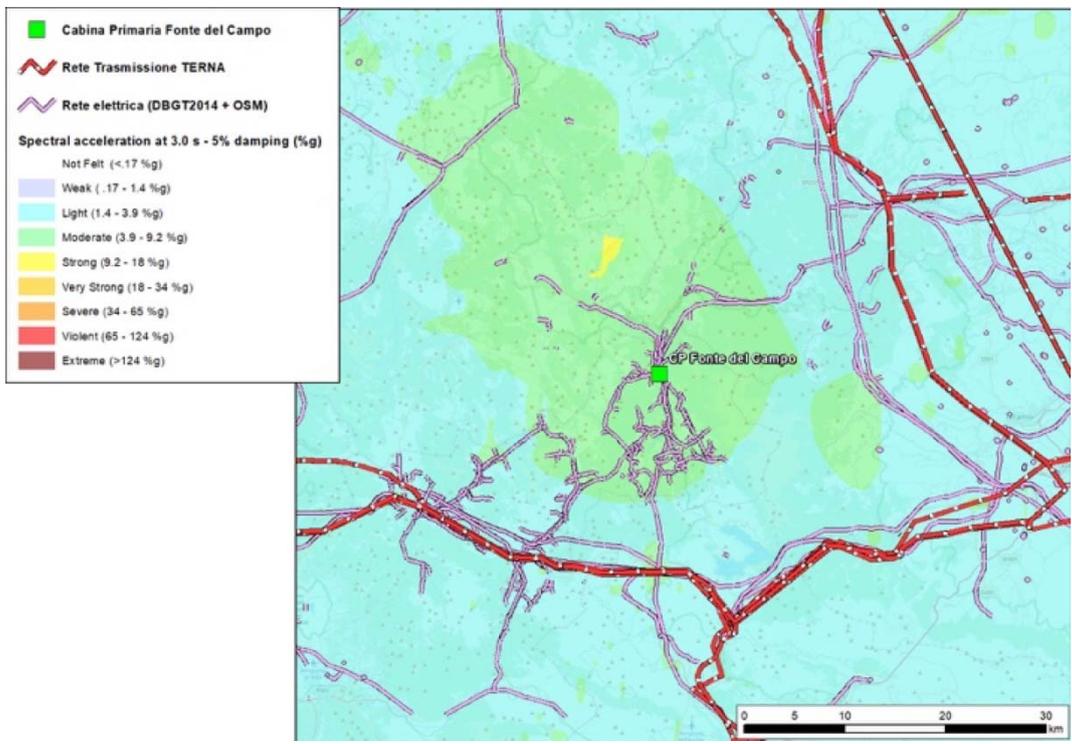


Figura 4. Mappe di scuotimento in PSA03 (T=3s, smorzamento 5%) per il Terremoto di Amatrice (Italia Centrale) del 24/08/2016 da [2] e approssimata localizzazione di componenti della rete elettrica.

### 2.1.2 Danni sismo-indotti alla linea di bassa, media e alta tensione e ripristino del servizio

I paragrafi sotto riassumono lo stato dei danni fisici indotti alle componenti delle reti di alta e media tensione, AT e MT a seguito del terremoto del 24 agosto 2016, noto come terremoto di Amatrice, e le disalimentazioni risultanti nelle ore immediatamente successive all'evento, nonché i passi che hanno consentito il ripristino del servizio; le informazioni sotto-riportate sono state evinte dagli autori a partire dagli atti della Giornata di studio "GdS, Resilienza delle reti elettriche" tenutasi presso Sapienza Università di Roma, il 13 Ottobre 2017 [4].

#### *Danni alla linea di alta tensione, AT*

La sezione alta tensione, AT, è risultata indisponibile, nelle prime ore dopo il sisma, a causa di gravi danni, in particolare a causa della caduta dei sezionatori AT (Figura 5a). Inoltre, l'edificio del fabbricato servizi della cabina primaria, realizzata in telai di CA (Cemento Armato) con tamponature in muratura, ha subito gravi danni (Figure 5b e 5c) descrivibili, secondo la scala di danno utilizzata dalla scala macrosismica EMS-98 [5] (Figura 6), tra il livello di danno "Grave"  $D_3$  e "Molto Grave"  $D_4$ .



**Figura 5. Danni alla sezione alta tensione, AT indotti dal terremoto di Amatrice (Italia Centrale) del 24/08/2016: a) caduta dei sezionatori AT; b),c) danni al fabbricato della cabina primaria, e quadro di media tensione intatto (fotografie estratte da [4]).**

Il quadro di media tensione, contenuto all'interno della cabina primaria non ha, invece, subito danno (Figure 5b e 5c). Nonostante le condizioni del fabbricato, è stato, quindi, possibile rialimentare il quadro di media tensione utilizzando una delle 5 linee ancora attive; la richiesta del servizio, a causa sfortunatamente della quasi completa distruzione dei centri abitati circostanti, era bassa, per tanto la tensione di rialimentazione è stata contenuta in 1 MW.

La rialimentazione è avvenuta a tratti ed è stata eseguita manualmente, non è stato possibile utilizzare il telecomando, a causa dei danni presenti. Ogni qualvolta erano riscontrati danni questi venivano riparati. Nella fase d'identificazione e riparazione dei danni è stata necessaria un'attenta gestione dei rischi esterni, le interruzioni causate dai danni alla rete stradale hanno arrecato dei ritardi alle operazioni di riparazione. La strada diretta che, da Rieti, conduceva alla cabina primaria risultava infatti interrotta a causa dello scivolamento dell'impalcato di un viadotto.

	Livelli di Danno				
	Leggero (D <sub>1</sub> )	Moderato (D <sub>2</sub> )	Grave (D <sub>3</sub> )	Molto Grave (D <sub>4</sub> )	Collasso (D <sub>5</sub> )
Muratura					
Cemento Armato					

Figura 6. Scala di danno osservazionale secondo la scala macrosismica europea per edifici in muratura e cemento armato (Immagine adattata da[5]).

*Danni alla linea di media, MT e bassa tensione, BT*

La linea di media tensione, MT, era caratterizzata da 7 linee (delle quali una con struttura a lobo, Figura 1a), per un totale di 189 km di rete prevalentemente aerea in conduttori nudi, e 124 cabine secondarie.

I danni sulla linea di media tensione hanno riguardato oltre 10 km di linee e sono stati identificati prevalentemente con:

- sostegni sbandati;
- conduttori a terra;
- posti di trasformazione su palo (PTP) di media/bassa tensione caduti dai pali;
- 7 cabine secondarie (tutte dislocate nella zona rossa) collassate, cioè con livello di danno D<sub>5</sub> (secondo la scala di danno osservazionale EMS-98 in Figura 6). Tutte le cabine collassate avevano caratteristiche costruttive simili, cioè erano cabine in muratura non armata, alte circa 7/8 metri per consentire l’ammarrò diretto delle linee aeree.

La linea di bassa tensione, BT, era caratterizzata da 345 km di linee. I danni sulla linea BT hanno riguardato oltre 5 km di linee aeree. I danni alle linee aeree di BT sono stati prevalentemente causati dall’integrazione della rete BT con il tessuto urbano molto vulnerabile alle-sollecitazione (Figura 7)



Figura 7. Danni alle linee MT e BT: a) sostegni sbandati e conduttori a terra; b) posti di trasformazione su palo PTP caduti dalle mensole; c) danni ai fabbricati delle cabine secondarie in muratura; d) linee aeree BT danneggiate dal collasso di edifici prospicienti (fotografie estratte da [4]).

*Prime ore successive all’evento: ripristino del servizio e supporto alla gestione dell’emergenza*

Nelle prime ore successive all'evento, a seguito dei danni fisici indotti alle diverse componenti delle linee di MT e BT, circa 6000 clienti risultavano disalimentati. Una delle linee di MT (Figura 1a) era caratterizzata da una struttura a lobo, per tanto i clienti alimentati da tale linea non sono stati rialimentabili fino a riparazioni concluse. Per rialimentare la sbarra di media tensione ancora funzionante, è stata utilizzata una delle sette linee di MT a disposizione, dopo verifiche e riparazioni. Questo ha consentito una graduale ripresa del servizio con manovre da centro di telecontrollo (Figura 8a), o manuali, preve ispezioni degli impianti e del territorio circostante (Figura 8b), per garantire la sicurezza delle persone.

L'esecuzione delle riparazioni sulla rete di MT e BT sono state talvolta provvisorie, finalizzate al rapido ripristino del servizio, con l'intenzionalità di intervenire in modo definitivo a emergenza conclusa.

Per garantire un rapido ripristino del servizio è stata attivata una Task Force di operai e tecnici (circa 86 risorse) e di imprese (circa 10 risorse). La coordinazione è stata garantita attraverso briefing serali, durante i quali si è sempre data grandissima rilevanza a come evitare e/o mitigare i molti rischi presenti nell'ambiente di lavoro dovuti alle condizioni particolarmente critiche del territorio (viabilità precaria, fabbricati lesionati, continue scosse di assestamento, ecc.).

Oltre al ripristino del servizio è stato necessario fornire supporto alla gestione dell'emergenza, in particolare: sono stati forniti gruppi elettrogeni per alimentare torri faro; sono state individuate e alimentate tramite gruppi elettrogeni le cabine compromesse che alimentavano i ponti radio, questo al fine di garantire la sicurezza delle comunicazioni. La comunicazione tra i distributori della rete elettrica coinvolti nella gestione dell'emergenza e la task force dispiegata sul territorio è stata possibile attraverso l'utilizzo anche di telefoni satellitari.

Alle ore 21:30 del 24/08/2016, circa 18 ore dopo l'evento sismico tutti i clienti, tranne 800 in zona rossa sono stati rialimentati.



**Figura 8. Operazioni nelle prime ore successive all'evento: a) centro di telecontrollo dal quale sono state eseguite manovre in remoto; b) ispezioni degli impianti e del territorio circostante; c) distribuzione di gruppi elettrogeni per alimentare ponti radio e torri faro.**

#### *Primi giorni successivi all'evento: verifiche, riparazioni e supporto alla risposta all'emergenza*

Nei primi giorni successivi all'evento, si è provveduto alla verifica strutturale delle cabine secondarie e a installare delimitazioni di sicurezza dell'area interna alla cabina primaria, la cui funzionalità era stata ripristinata, nonostante i danni al fabbricato (Figure 9a e 9b). Si è provveduto anche all'ispezione accurata di tutte le linee uscenti dalla cabina primaria, anche con l'ausilio di droni.

È proseguito in modo non-stop il monitoraggio dei segnali di anomalia della rete di MT e l'attivazione di immediata di ispezioni mirate. È stata definita una struttura funzionale gerarchica per intervenire sul campo, in modo mirato e rapido, per l'esecuzione di riparazioni e ricostruzioni.

Sono state prontamente gestite le segnalazioni di situazione a rischio segnalate dalla Protezione Civile.

Sono state attivate forniture straordinarie per l'alimentazione delle tendopoli e delle strutture di protezione Civile (Figura 9c).



Figura 9. Operazioni nei primi giorni successivi all’evento: a) verifica strutturale delle cabine secondarie; b) delimitazioni di sicurezza nella cabina primaria di Fonte del Campo; c) attivazione fornitura elettrica per le tendopoli.

## 2.2 Aggiornamento della tassonomia proposta per il sistema elettrico soggette a sisma

CIPCast, include uno specifico Data Model (cfr. ENEA, Report RdS/PAR2016/020, Figura 3) sulla base del quale ogni generica CI è stata definita secondo classi a loro volta suddivise in sottoclassi in base alla tipologia e alle funzioni dell’infrastruttura considerata. Come già riportato nel Report RdS/PAR2016/020 lo scopo di definire un, data model, o tassonomia per classificare le CI, rispetto a uno specifico tipo di pericolosità, è quello di raggruppare insieme elementi che potrebbero comportarsi in modo simile a seguito di una specifica sollecitazione, ad esempio quella sismica, e di identificare le caratteristiche costruttive, geometriche, etc. loro peculiari che potrebbero modificare più o meno sostanzialmente tale comportamento. Per la definizione della tassonomia specifica per le componenti delle reti elettriche vulnerabili a eventi sismici, di seguito definita come “tassonomia per il sistema elettrico soggette a sisma” è stato fatto riferimento a una tassonomia simile a quella proposta dal progetto SYNER-G [6][7] dopo la revisione delle tassonomie presenti in letteratura (Report RdS/PAR2016/020) che teneva in conto le componenti principali del sistema elettrico come evidenziato in Figura 10.

L’analisi del caso studio, presentata nella sottosezione 1.1.2 ha evidenziato la necessità di includere nella tassonomia per il sistema elettrico soggetto a sisma, già definita nel Report RdS/PAR2016/020, nuovi componenti del sistema elettrico vulnerabili all’azione sismica, e di procedere, quindi all’identificazione dei loro attributi rilevanti ai fini del comportamento sismico.

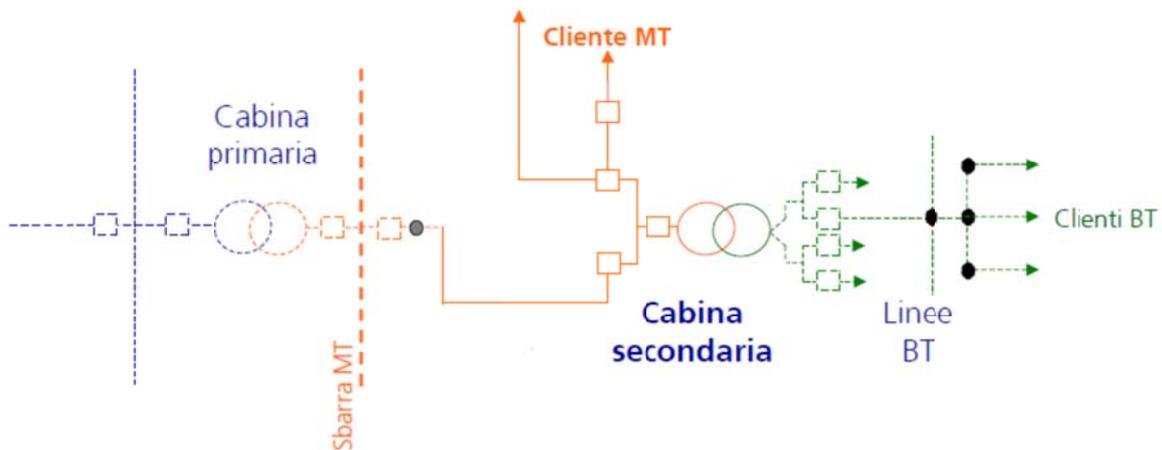
La Tabella 1 riporta, in italiano, la nuova tassonomia proposta per sistema elettrico, rivedendo alla luce degli insegnamenti desunti dall’analisi del caso studio, quella in precedenza proposta (riportata in inglese in Report RdS/PAR2016/020). Le proposte di aggiornamento, rispetto a quanto riportato nel Report RdS/PAR2016/023 sono riportate con il colore blu in Tabella 1. Per elementi puntuali, quali generatori e sottostazioni primarie e secondarie, si è proposto tenere in considerazione la tipologia e il materiale di costruzione (ad esempio telai in cemento armato con tamponature, edifici in muratura non rinforzata, cabine in acciaio, etc.) e le caratteristiche geometriche (ad esempio l’altezza), che possono essere alquanto variabili (si veda a titolo di esempio in Figura 12 la varietà tipologica delle cabine secondarie nella rete di MT).

Inoltre, la tassonomia nel RdS/PAR2016/020 riportava solo gli elementi principali comuni a una rete MT (Figura 10), ma trascurava sotto-elementi propri delle dorsali MT (messi in luce in Figura 11), quali ad esempio l’interruttore di manovra sezionatore (IMS), e i posti di trasformazione su palo (PTP). I posti di trasformazione su palo (PTP) sono impiegati nella distribuzione rurale o montana (e infatti sono presenti nel caso studio analizzato), e in utenze territorialmente isolate (quali cantieri, illuminazione di gallerie autostradali, elettropompe ecc.).

Le aggiunte proposte per la tassonomia e la motivazione per la quale si ritiene importante una loro caratterizzazione nell'ambito di un'analisi di vulnerabilità sismica sono brevemente descritte di seguito, per linee aeree e cabine.

**Tabella 1. Tassonomia proposta per il sistema elettrico soggette a sisma e metrica suggerita per il danno fisico sismo-indotto**

Componenti	Attributi rilevanti per valutare il danno fisico atteso	Tipo	Metrica del danno
Generatori	Edificio: tipologia e caratteristiche geometriche, livello di progettazione antisismica componenti interne: tipologia di ancoraggio	Nodo	Livello di Danno
Sottostazioni primarie e secondarie	Localione in Edificio Dedicato o Edificio Ospitante tipologia e caratteristiche geometriche dell'edificio, livello di progettazione antisismica componenti interne: tipologia di ancoraggio	Nodo	Livello di Danno
Linee Interrate	Cavo: Materiale del cavo e conduttore, caratteristiche geometriche (diametro e lunghezza cavo tra giunti) Giunti: caratteristiche costruttive	Linea	Frequenza di Danno
Linee Aeree Cavi e Conduttori	Cavo e conduttori: materiale e diametro Pali: materiale, altezza, tipologia fondazione struttura di sostegno: materiale, tipologia Isolatori: tipologia morsettatura	Linea	Frequenza di Danno
Linee Aeree Interruttore di Manovra Sezionatore (IMS)	Altezza di montaggio da terra, Massa dell'IMS Tipologia di ancoraggio, Tipologia di mensola	Nodo su Linea Aerea	Livello di Danno
Linee Aeree Posti di Trasformazione su Palo (PTP)	Altezza di montaggio da terra, Peso del trasformatore Tipologia di ancoraggio, Tipologia di mensola	Nodo su Linea Aerea	Livello di Danno



**Figura 10. Schema base di una rete di MT e BT**

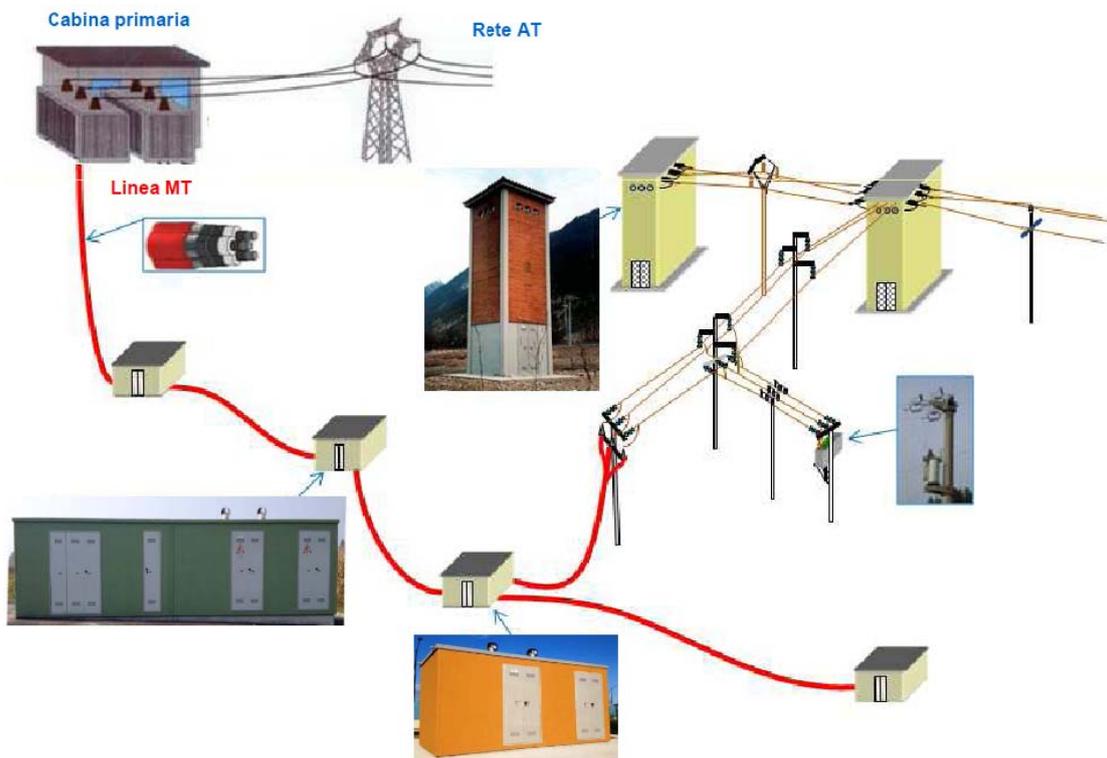


Figura 11. Diverse tipologie di cabine secondarie riconoscibili in una linea MT

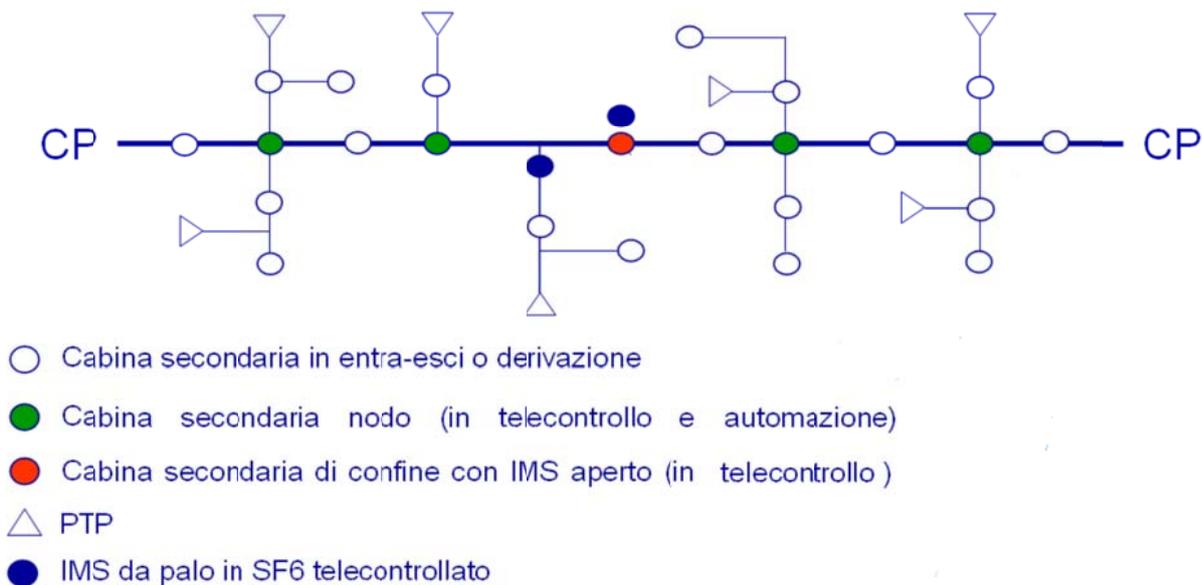


Figura 12. Schemi linea MT: a) schema Dorsale di MT (dove CP sta per Cabina Primaria, PTP Posto di Trasformazione su Palo; IMS interruttore di manovra sezionatore)

Linee aeree

Conduttori nudi

Materiale	Sezione [mm <sup>2</sup> ]	Portata al limite termico [A]
Rame	25 (7x2,14)	140
	35 (7x2,52)	190
	70 (19x2,14)	280
Al-acc	150 (26x2,50+7x1,95)	350

Cavi unificati



Cavo con isolamento in gomma etilenpropilenica

Formazione [n° x mm <sup>2</sup> ]	Portata [A]
3x35+1x50	140
3x50+1x50	170
3x95+1x50	255
3x150+1x50	340

**Conduttori nudi:** quattro soluzioni, in termini di materiale (rame o Al-acc) e diametro (25, 35, 70 e 150 [mm<sup>2</sup>]) usate rispettivamente e prevalentemente per

- Derivazione: Rame 25 [mm<sup>2</sup>], Rame 35[mm<sup>2</sup>]
- Dorsali: Rame 70 [mm<sup>2</sup>], Al-acc 150[mm<sup>2</sup>].

**Cavi cordati su fune portante (o cavi unificati):** quattro soluzioni, in termini di diametro (35, 50, 95 e 150 [mm<sup>2</sup>]) usati rispettivamente e prevalentemente per

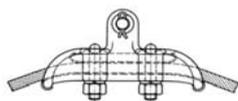
- Derivazioni: 3\*35[mm<sup>2</sup>]
- dorsali non rialimentabili: 3\*50[mm<sup>2</sup>]
- dorsali alimentabili a bassa densità di carico: 3\*95[mm<sup>2</sup>]
- dorsali alimentabili a alta densità di carico: 3\*150[mm<sup>2</sup>]

Isolatori

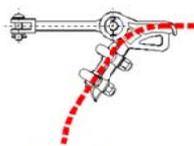
- rigidi



- sospesi



Morsa di sospensione



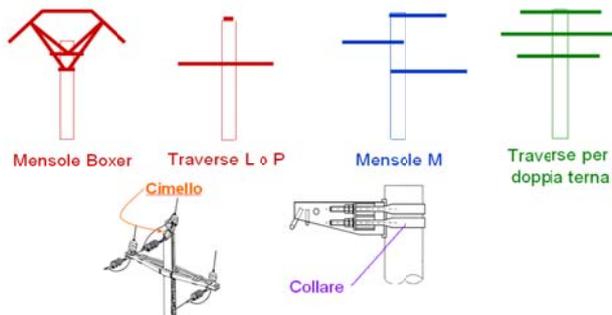
Morsa di amarro

**Isolatori-materiale:** vetro, ceramica o composito;

**Tipologia isolatori e Pali** – si distinguono isolatori rigidi portanti o portanti per amarro e isolatori sospesi. Gli **isolatori rigidi** sono montati sia su sostegni di cemento che su tralicci metallici. Gli Armamenti per Amarro in Sospensione semplici o doppi, appaiono del tutto simili a quelli su isolatori rigidi per amarro; presentano i conduttori sospesi al di sotto degli isolatori, a loro volta sorretti da una propria mensola. Esistono anche isolatori doppi per sospensione cioè con due isolatori affiancati che reggono il conduttore.

**Morse di sospensione e di amarro** Le morse di sospensione hanno la funzione di sostenere il conduttore, trasmettendo all'equipaggio il carico risultante trasmesso dalle due campate del conduttore. Le morse di amarro hanno la funzione di trattenere il conduttore in tiro, trasmettendo lo sforzo all'equipaggio di amarro e di accompagnare opportunamente il "collo morto" che va a collegarsi con l'amarro della campata adiacente, all'entrata in cabina, al terminale del cavo, al sezionatore ecc. Le morse di amarro devono accoppiare la sicurezza della ritenuta con la massima leggerezza, per evitare danneggiamenti del conduttore, anche in caso di vibrazioni.

Pali e Strutture di sostegno:

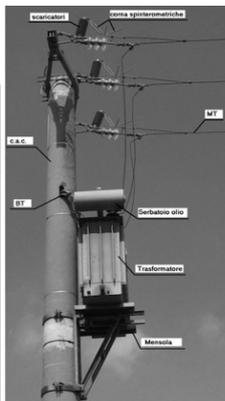


**Pali materiale:** cemento armato centrifugato (c.a.c), lamiera saldata a sezione ottagonale, lamiera saldata a sezione poligonale in tronchi innestabili, tralicci (per casi particolari).

**Pali -caratteristiche geometriche:** altezza H= [m]  
 H=12 [m] conduttori Cu 25 [mm<sup>2</sup>] e 35[mm<sup>2</sup>]  
 H=14 [m] conduttori Cu 70 [mm<sup>2</sup>] e Al-acc 150[mm<sup>2</sup>]

**Sostegno-tipologie:** permettono di collegare gli isolatori al palo mantenendo le distanze di rispetto previste dalle norme e si dividono in: *mensola* (boxer o di tipo M); *traverse* di tipo L (per armamento sospeso) e P (per armamento rigido); *cimello*, (usato per collegare il conduttore centrale in testa al sostegno) e il *collare* (usato per fissare la traversa al palo).

**I posti di trasformazione su palo (PTP)**

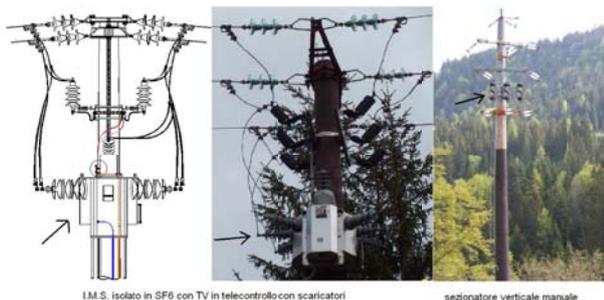


*Pali-materiale:* prima legno o calcestruzzo armato, con soluzione bi-palo, ove possibile, per maggiore stabilità, o traliccio di profilati di acciaio nel caso di grande peso del trasformatore; oggi pali in legno sono stati sostituiti da materiali più performanti calcestruzzo armato centrifugato, c.a.c. pali tubolari rastremati in acciaio, o tralicci di profilati di acciaio, che hanno consentito di abbandonare la soluzione bi-palo.

*Trasformatore-peso:* da verificare in base all'installazione specifica; grandi pesi sono associati a installazioni maggiori di 100 kVA

*Sostegno e ancoraggio:* il trasformatore è ancorato a una mensola con elementi di fissaggio, quali staffette e piastre, che garantiscono l'immobilizzazione del trasformatore, in condizioni statiche. I sostegni utilizzati per i PTP possono essere divisi in *non-autoportanti* o *autoportanti* la loro stabilità, sotto l'effetto dei carichi agenti sulla linea, tiene o meno conto, rispettivamente, dell'effetto stabilizzante esercitato dai conduttori e eventuali corde di guardia.

**Interruttore di manovra sezionatore (IMS)**



IMS. isolato in SF6 con TV in telecontrollo con scaricatori

sezionatore verticale manuale

*Uso:* sezionamento delle dorsali (corrente nominale In=400 A) permettono di interrompere l'alimentazione su di un tratto di linea

Sostegni Capolinea (Figura 20) rappresentano il termine di una linea aerea e consentono il passaggio

in cavo

*Pali-materiale:* analogo a quanto detto sopra

*Comando:* manuale dalla base del palo o da remoto con il telecontrollo.

*Isolamento:* in esafloruro di zolfo (SF6), include trasformatore di tensione (TV) di forma emisferica e batterie per alimentare il telecontrollo.

**Cabine elettriche**

Una cabina elettrica comprende le terminazioni delle linee di trasmissione o distribuzione, apparecchiature e quadri elettrici, a volte, trasformatori. La cabina elettrica comprende in genere anche tutti i dispositivi necessari al controllo ed alla protezione. A seconda della funzione svolta, può essere definita come cabina di trasformazione, conversione, trasmissione o distribuzione. La cabina elettrica di trasformazione MT/BT, è costituita dall'insieme dei dispositivi dedicati alla trasformazione della tensione fornita dalla rete di distribuzione in MT, in valori di tensione adatti per l'alimentazione delle linee in bassa BT.

Ai fini della valutazione di vulnerabilità sismica è importante capire se le cabine siano collocate in un edificio appositamente realizzato (esempi in Figura 11) o se siano state realizzate all'interno di un edificio esistente:

- le *cabine realizzate in appositi locali:* sono, generalmente le cabine pubbliche di pertinenza della società di distribuzione dell'energia elettrica e alimentano le utenze private in corrente alternata monofase o trifase (valori tipici della tensione per i due tipi di alimentazione possono essere 230 V e 400 V). Si dividono a loro volta in *cabine di tipo urbano o rurale*, costituite da un solo trasformatore di potenza ridotta. Le *cabine urbane* sono generalmente costruite in *muratura* mentre quelle *rurali* sono spesso installate *all'esterno direttamente sul traliccio della MT.*

- *cabine realizzati in edifici già esistenti e con diversa destinazione d'uso*: sono sia pubbliche che private, quest'ultime si possono spesso considerare come cabine di tipo terminale, cioè cabine in cui la linea in MT si ferma nel punto di installazione della cabina stessa. Le cabine di tipo terminale sono di proprietà dell'Utente e possono alimentare sia utenze civili (scuole, ospedali, ecc.), sia utenze di tipo industriale con fornitura dalla rete pubblica in MT. L'Utente deve mettere a disposizione della società distributrice un apposito locale, accessibile al personale della società, in cui saranno installate le apparecchiature di competenza della società di distribuzione. Queste cabine sono nella maggioranza dei casi ubicate nei locali stessi dello stabilimento da esse alimentato e sono costituite fundamentalmente da tre locali distinti, di cui i primi due sono a disposizione dell'ente Distributore: il locale del distributore; il locale misura; e il locale Utente.

Al fine della valutazione delle prestazioni sismiche, è importante distinguere se l'edificio della cabina è stata appositamente realizzato o se è un locale parte di un più grande edificio, già esistente. Nel primo caso poche informazioni saranno sufficienti a caratterizzare il comportamento sismico della cabina, quali ad esempio il materiale (muratura, cemento armato, acciaio), la tipologia costruttiva (che potrebbe essere diversa per uno stesso materiale, ad esempio muratura armata e non), e l'altezza.

Nel secondo caso potrebbe essere necessario raccogliere maggiori informazioni, quali per esempio la regolarità o meno dell'edificio in pianta e in altezza, sia per quanto riguarda la forma geometrica che per la distribuzione delle masse, se l'edificio è isolato o fa parte di un aggregato edilizio più complesso (ad esempio edifici aggregati tipici dei centri storici).

### 2.3 Calibrazione dei modelli CIPCast per la previsione del danno alle cabine primarie e secondarie e ai cavi aerei

Di seguito vengono illustrate alcune importanti valutazioni relative alla bontà dei modelli implementati all'interno di CIPCast per la previsione dei danni a cabine primarie e secondarie e a elementi cavi e conduttori di linee aeree (Par.1.3.1 e Par 1.3.2 rispettivamente) rispetto alle evidenze raccolte dall'analisi del caso studio analizzato (Par. 1.1.2).

#### 2.3.1 Modelli per la previsione del danno sisma-indotto a cabine primarie e secondarie

Nel Report RdS/PAR2016/020 si era evidenziato come i modelli per valutare la fragilità (danno fisico) al sisma proposti da HAZUS-MH [8] e da SYNER-G [9], per le cabine primarie e secondarie, sopravvalutavano largamente rispetto a quanto osservato dopo la sequenza del terremoto di Canterbury nel periodo 2010-2011 [9]; si era quindi paventata la necessità di calibrarli, rispetto a evidenze raccolte in Italia e in Europa, prima della loro implementazione all'interno di CIPCast-ES.

Le evidenze raccolte sul danneggiamento della cabina primaria e delle cabine secondarie nel caso studio analizzato sono state utilizzate in questo lavoro per valutare:

- La "bontà" del modello implementato in HAZUS [8] per la stima del danno alle cabine primarie e secondarie in termini del danno risultante per gli edifici ospitanti, i sezionatori e gli interruttori interni;
- La "bontà" e la necessità o meno di fare riferimento a un modello più complesso come quello implementato in Syner-G, [9] che tiene conto del danneggiamento di microcomponenti contenuti all'interno dei quadri di media e bassa tensione;
- La "bontà" del *modello macrosismico* [12] utilizzato in CIPCast per la valutazione del danno a sisma-indotto a sottostazioni elettriche [11], nonché per la valutazione del danno indotto a edifici ordinari [13].

È importante sottolineare come ulteriori calibrazioni più rigorose di quelle presentate in questo report potranno essere eseguite, previa la disponibilità degli operatori di rete di fornire dati numerici sui danneggiamenti nonché la localizzazione geografica (GIS files) delle componenti della rete stessa e la localizzazione geografica dei danneggiamenti e disservizi osservati a seguito degli eventi sismici dell'Italia Centrale.

**HAZUS-MH**

HAZUS-MH [8] è un software per la valutazione del rischio per edifici e infrastrutture critiche sviluppato negli Stati Uniti. HAZUS-MH [8], utilizza curve di fragilità definite secondo l'Equazione 1, per la valutazione del rischio sismico di edifici e infrastrutture critiche e per descrivere il danno definisce quattro stati di danno,  $d_i$  cioè: minore,  $d_1$ ; moderato,  $d_2$ ; esteso  $d_3$ ; e completo  $d_4$ . Le curve di fragilità, proposte da HAZUS-MH per le sottostazioni sono state definite sulla base di dati empirici e del giudizio di esperti e sono state sviluppate utilizzando la logica booleana e la combinazione probabilistica delle funzioni di danno definite per i singoli componenti della sottostazione, ovvero sezionatori (o interruttori di sconnessione), interruttori automatici di circuito, trasformatori di corrente, trasformatori, e edifici. Le definizioni degli stati di danno HAZUS per le sottostazioni sono riportate nella Tabella 2.

**Tabella 2. Definizione dei livelli di danno per cabine elettriche secondo HAZUS [8]**

Stato di Danno		Definizione
Minore	$d_1$	Guasto del 5% dei sezionatori o guasto del 5% degli interruttori di circuito o edificio in stato di danno minore, $d_1$
Moderato	$d_2$	Guasto del 40% degli interruttori di sconnessione o guasto del 40% degli interruttori di circuito o guasto del 40% dei trasformatori di corrente o edificio in uno stato di danno moderato, $d_2$
Esteso	$d_3$	Guasto del 70% degli interruttori di sconnessione, guasto del 70% degli interruttori di circuito, guasto del 70% dei trasformatori di corrente o guasto del 70% dei trasformatori o dell'edificio in uno stato di danno esteso, $d_3$
Completo	$d_4$	Guasto del sezionatori, tutti gli interruttori di circuito, tutti trasformatori o tutti i trasformatori di corrente o edificio in stato di danno complete, $d_4$

Per un dato livello di intensità dello scuotimento al suolo (misurato per esempio in intensità macrosismica o PGA), le curve di fragilità forniscono la probabilità che una struttura o un componente della struttura si trovi in, o superiori, un determinato stato di danno  $D_i$ . Se si assume una forma lognormale cumulativa per le funzioni di fragilità, esse possono essere espresse condizionalmente sotto forma dell'equazione (1):

$$P[D \geq D_i] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{D_i}} \ln \left( \frac{IM}{IM_{D_i}} \right) \right] \tag{1}$$

dove  $P$  è la probabilità di superamento di un determinato stato di danno,  $D_i$ ;  $IM$  è l'intensità del movimento al suolo;  $\Phi$  è la funzione di distribuzione cumulativa normale standard;  $\beta_{D_i}$ , è la deviazione standard del logaritmo naturale (dispersione) dell'intensità del movimento del suolo per un determinato stato di danno  $D_i$  e  $IM_{D_i}$  è il valore mediano dell'intensità del movimento al suolo a cui il soggetto raggiunge lo stato di danno.

La Figura 13a riporta la rappresentazione delle curve di fragilità HAZUS (descritte dall'Eq. 1) per i diversi livelli di danno considerati dall'approccio (Tabella 2) e in funzione dello scuotimento del suolo descritto in termini di PGA[g]. Da tali curve si è estratta la distribuzione di probabilità di danno per lo specifico valore di PGA=0.7g, (risentito nell'area maggiormente colpita dal terremoto di Amatrice, secondo le mappe di scuotimento fornite dall'INGV, Figura 1a), rappresentata in Figura 13b; risulta come in tale area per le cabine elettriche HAZUS avrebbe stimato una probabilità di subire un danno completo  $d_4$ , pari a circa 45% e di subire un danno esteso pari a circa 55%. Tale metodo avrebbe quindi leggermente sottostimato la realtà dei fatti osservata dopo il terremoto di Amatrice, a seguito del quale tutte le cabine secondarie localizzate nella così-detta zona rossa, così come la cabina primaria hanno subito un danno completo ( $d_4$  secondo la scala di danno HAZUS, in Tabella 2;  $D_5$  secondo la scala di danno EMS-98 in Figura 6).

La motivazione di tale sottostima, è molto probabilmente da ricercarsi nel fatto che il metodo HAZUS non considera la muratura non-armata, notoriamente molto vulnerabile alle sollecitazioni sismiche specialmente se le pareti portanti non sono adeguatamente connesse, come un possibile materiale per la costruzione di cabine elettriche; per

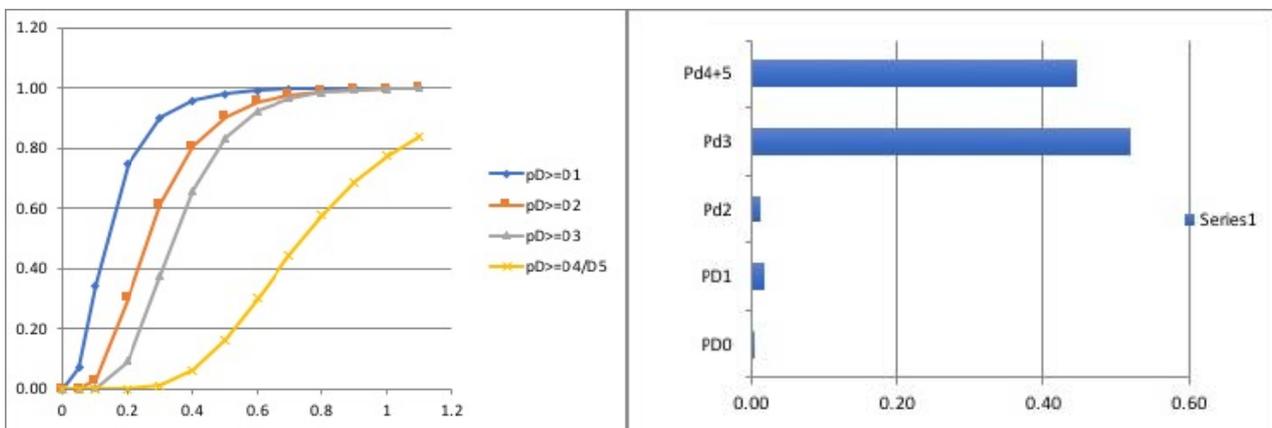


Figura 13. Curve di fragilità per sottostazioni elettriche, secondo HAZUS[8]: a) Probabilità di superamento (probabilità cumulata) dei diversi livelli di danno in funzione dello scuotimento del suolo in termini di PGA[g]; b) Distribuzione di Probabilità di Danno per PGA=0.7

### SYNER-G

Il progetto europeo SYNER-G ha analizzato le sottostazioni a livello di sotto sistemi, identificati nel modello come macro-componenti e sotto-componenti [6]. A differenza di HAZUS-MH, SYNER-G non ha definito una funzione di fragilità per l'intera sottostazione. Le funzioni di fragilità sono state fornite da [7] a partire da quelle già proposte da [14] a livello di singoli sotto-componenti; per ciascuna di esse è quindi possibile calcolare la probabilità di danneggiamento in funzione dell'intensità dello scuotimento del suolo. Il solo stato di danno considerato per le sotto-componenti (e quindi anche per macro-componenti e per sottostazioni) è però il danno completo o collasso,  $D_5$  [7][14] in quanto risulterebbe difficoltoso distinguere livelli di danno intermedio.

Un elenco delle sotto-componenti che costituiscono ciascuna macro-componente è fornito nella Tabella 3. In Figura 14, vengono mostrati layout generici di macro-componenti di sottostazioni di trasformazione e di sola distribuzione basate sul lavoro di [14] e [7].

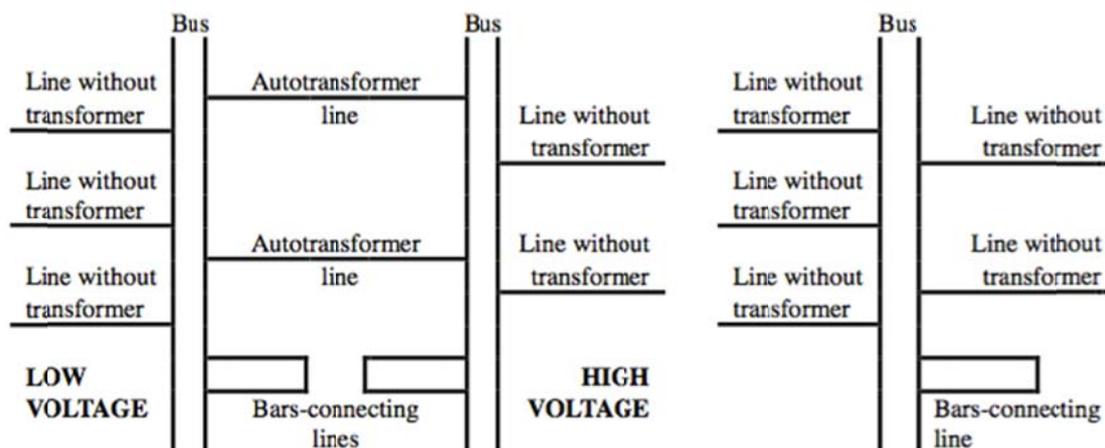
Utilizzando le funzioni di fragilità dei sotto-componenti e identificando e combinando tutte le potenziali modalità di guasto per sotto-componenti e quindi per macro-componenti (Tabella 3) attraverso una *Fault Tree Analysis (FTA)* o albero dei guasti, eseguita in due fasi successive, è possibile determinare la probabilità di avere un danno all'intera sottostazione. Nella prima fase della FTA si determinano le probabilità di danno

ai macro-componenti in base alle probabilità di danno per le sotto-componente e nella *seconda fase della FTA* si determina la probabilità di danno alla sottostazione, in base dalle probabilità di danno calcolata per le macro-componenti.

**Tabella 3. Componenti costitutivi delle macro-componenti all’interno delle sottostazioni [7][14]**

Macro-componenti*	Sotto-componenti
Linea senza trasformatore	Trasformatore di tensione, supporto bobina, interruttore sezionatore verticale, trasformatore di corrente, interruttore automatico, sezionatore orizzontale
Linea autotrasformatore	2 x interruttore sezionatore orizzontale, 2 x interruttore automatico, 2 x trasformatore di corrente, 2 x scaricatore, autotrasformatore, scatola
Linea di collegamento barre	2 x interruttore sezionatore verticale, interruttore automatico, trasformatore di corrente, scatola
Barre	2 x trasformatore di tensione, 2 x barra di supporto

\* I macro-componenti sono insiemi di sotto-componenti organizzati in serie; se un sotto-componente fallisce, l'intera macro-componente fallisce.



**Figura 14. Layout generici di macro-componenti per una sottostazione di trasformazione (a sinistra) e una sottostazione di sola distribuzione (a destra) [7][14]**

**Tabella 4. Modalità di danneggiamento sotto-componenti singoli o macro-componenti aggregati [6].**

Modalità di danneggiamento Sotto-componenti	Modalità di danneggiamento Macro-componenti
1. Guasto di tutti gli autotrasformatori.	1. Guasto di tutte le linee in ingresso senza trasformatore
2. Guasto di tutti gli scaricatori.	2. Guasto di tutte le linee dell'autotrasformatore
3. Guasto di almeno un interruttore automatico.	3. Guasto di tutte le linee in uscita senza trasformatore
4. Guasto di almeno 1 interruttore di sezionamento O*	4. Guasto di almeno un supporto per barre
5. Guasto di almeno 1 interruttore di scollegamento V**	5. Fallimento di almeno un cavo di collegamento alla rete
6. Mancato supporto di almeno una barra.	6. Mancata fornitura del servizio elettrico
7. Guasto di almeno un trasformatore di tensione.	
8. Guasto di almeno un trasformatore di corrente.	
9. Guasto di almeno una bobina.	
10. Guasto dell'alimentazione elettrica.	

\*O=Orizzontale; \*\*V=verticale

La realtà dei fatti osservata nel caso studio analizzato, dove il principale motivo di danno e messa fuori servizio per le cabine primarie e secondarie è stato identificato con il danno all'edificio ospitante, e dove non sono stati osservati (per quanto a conoscenza degli autori) di particolari danni a sotto-componenti e macro-componenti e di effetti a cascata (con il danno a macro-componenti indotto dal danno a sotto-componenti), porterebbe a concludere che l'elevato livello di analisi proposto dal modello SYNER-G potrebbe non essere giustificato, al meno per quanto concerne analisi a scala territoriale come quelle eseguibili con CIPCast-ES.

### **Modello macrosismico per valutare la vulnerabilità sismica di cabine primarie e secondarie: Implementazione e calibrazione**

Per la valutazione della vulnerabilità sismica delle cabine primarie e secondarie CIPCast-ES implementa un metodo denominato metodo macrosismico [11] che utilizza un indice di vulnerabilità  $V$  e un indice di duttilità  $Q$  per caratterizzare la vulnerabilità di un singolo edificio o di un gruppo di edifici, tenendo della tipologia dell'edificio, e delle sue caratteristiche costruttive e geometriche.

Nello specifico di cabine della rete di distribuzione elettrica, CIPCast-ES consente la valutazione della vulnerabilità sismica, a livello di singolo edificio, in funzione delle seguenti informazioni: materiale e tipologia costruttiva dell'edificio (per esempio muratura armata, muratura non rinforzata, cemento armato, RC etc.); periodo di costruzione; numero di piani; stato di manutenzione. Per ciascun edificio,  $V$ , viene computato implementando la procedura descritta in [11]. La Tabella 5 mostra l'indice di vulnerabilità di base  $V^*$  e i modificatori di vulnerabilità  $\Delta V$  (cioè incremento o decremento a  $V^*$ ) assegnati a ciascun edificio tenendo conto, rispettivamente, di: (i) materiale da costruzione e periodo di costruzione; (ii) stato di manutenzione, numero di piani, possibile aggregazione con edifici adiacenti, presenza di piano debole (indicato in Tabella 5 come pilotis) per gli edifici RC. Per una specifica implementazione fatta per È stato fatto riferimento alle informazioni incluse nel database RB per calcolare il Valori  $\Delta V$  assumendo:

- per le condizioni di manutenzione – buona, cattiva;
- per il numero di piani: edifici bassi (1 -2 piani); edifici medi (3-5 piani); edifici alti > 5 piani;
- stato di aggregazione e presenza di pilotis.

**Tabella 5. Valori dell'indice  $V^*$  attribuiti per periodo e materiale costruttivo e valori dei modificatori  $\Delta V$**

Muratura	$V^*$	$\Delta V_m$							
		Manutenzione		Altezza edificio			Edificio Aggregato		Presenza
		buona	cattiva	Bassa	media	alta	no	si	Pilotis
< 1919	0.79	0	0.08	-0.08	0	0.08	-0.04	0.04	-
1919-1945	0.73	0	0.06	-0.08	0	0.08	-0.04	0.04	-
1945-1971	0.69	0	0.04	-0.08	0	0.08	-0.04	0.04	-
>1971	0.65	0	0.04	-0.08	0	0.08	-0.04	0.04	-

Cemento Armato	$V^*$	$\Delta V_m$							
		Manutenzione		Altezza edificio			Edificio Aggregato		Presenza
		buona	cattiva	Bassa	media	alta	no	si	Pilotis
< 1971	0.59	0	0.04	-0.03	0	0.03	0	0.04	0.12
1971-1981	0.55	0	0.04	-0.03	0	0.03	0	0.04	0.12
>1981	0.42	0	0.04	-0.03	0	0.03	0	0	0.06

Per edifici per i quali non si sono resi disponibili informazioni sul: periodo e/o materiale di costruzione e/o stato di conservazione, per ragioni di sicurezza ci si è posti nella condizione peggiore, assumendo il valore più alto di  $V^*$ .

Secondo il metodo macrosismico la correlazione tra l'input sismico e il danno fisico atteso è espressa in termini di una curva di vulnerabilità, descritta da una funzione analitica chiusa:

$$\mu_D = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6.25V - 13.1}{Q} \right) \right] \tag{2}$$

dove:

- V è il valore dell'indice di vulnerabilità calcolato come  $V = V^* + \Delta V_m + \Delta V_S$ ;
- Q è l'indice di duttilità assunto pari a  $Q = 2,3$  [11]
- I è il rischio sismico descritto come parametro continuo, secondo la scala EMS-98 [5]
- $\mu_D$  è il danno medio atteso per il singolo edificio o gruppo di edifici; Descritto secondo la scala di danno definita dalla scala macrosismica europea, EMS-98 [5] che comprende 5 livelli di danno più l'assenza di danno, definiti come in Figura 6.

La Figura 15 riporta le curve di vulnerabilità secondo il metodo macrosismico, ipotizzando una cabina in miratura costruita nell'intervallo di età 1945-1971, si può assumere secondo la Tabella 5, un indice di vulnerabilità  $V=0.69$ , al quale possono poi essere applicati dei modificatori di vulnerabilità sempre secondo la Tabella 5. Ad esempio se la cabina è in cattivo stato di manutenzione applichiamo un  $\Delta V_m=0.04$ , con un risultante  $V=0.69$ ; se invece la cabina è invece in buona manutenzione ed è bassa, ad esempio una cabina monopiano applichiamo  $\Delta V_m=- 0.08$ , con risultante  $V=0.73$ . Dalla Figura 15 si vede

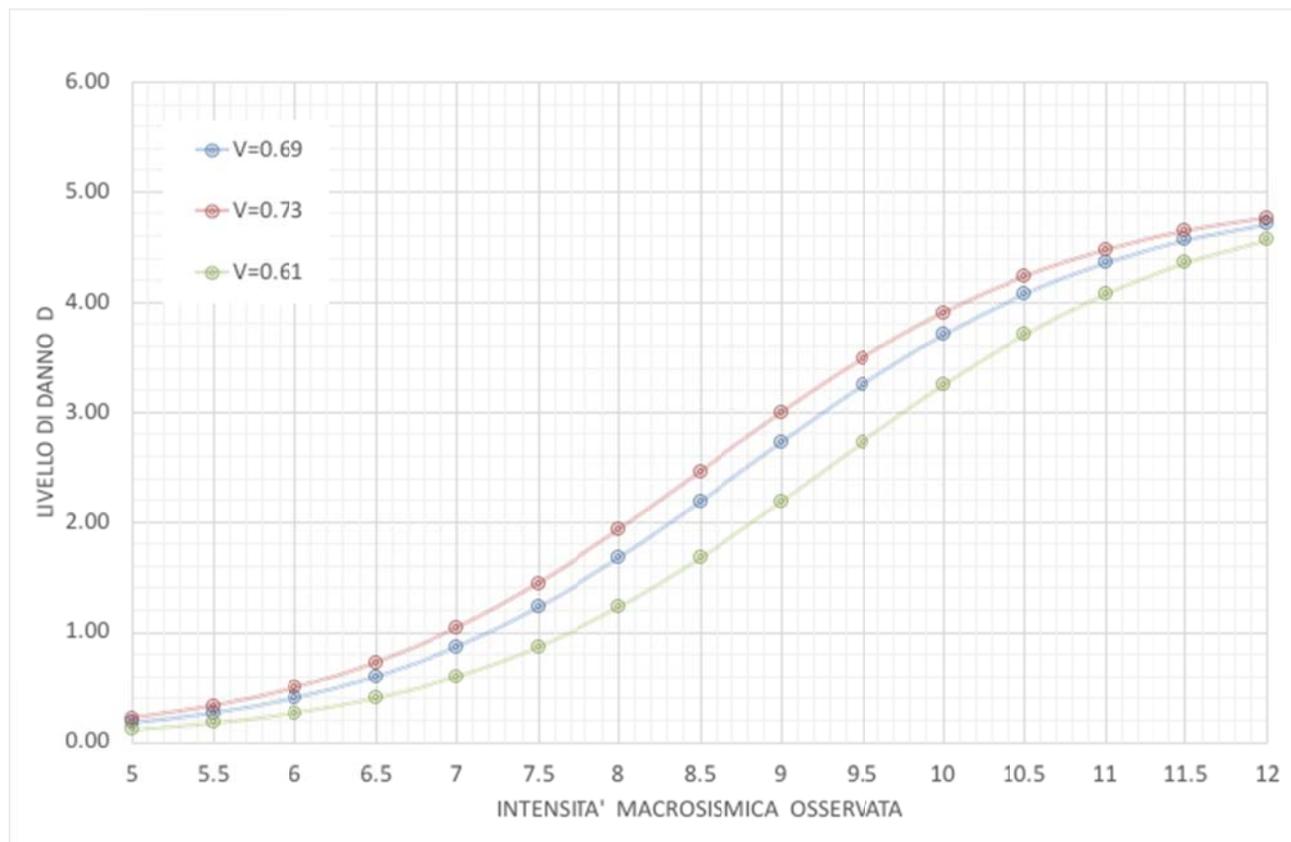
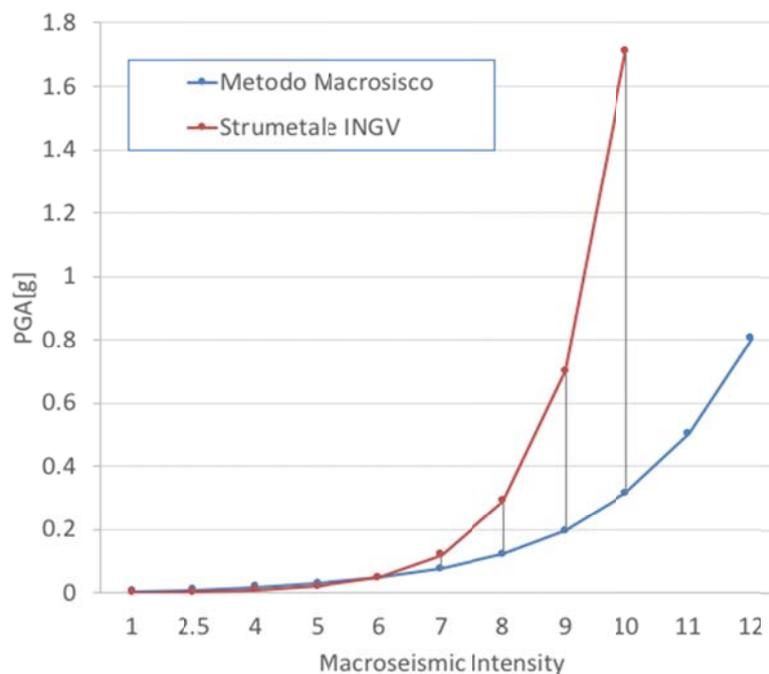


Figura 15. Curve di vulnerabilità secondo il metodo macrosismico [7] per diversi valori dell'indice di vulnerabilità V

Si vede che per l'intensità strumentale IX, stimata per l'area del caso studio dalle mappe fornite dall'INGV, riportata in Figura 1a, il danno atteso per le cabine sarebbe tra il  $D_2$  e il  $D_3$ , quindi più basso di quello osservato.

Il problema qui è l'utilizzo della scala macrosismica strumentale che come già precedentemente detto sottostima di gran lunga il danno del costruito tipico nei centri storici e rurali italiani.

Il metodo macrosismico [11] d'altra parte è stato ottenuto facendo riferimento a intensità macrosismiche osservate. Le correlazioni tra PGA e i due tipi di intensità è ben diversa, poiché l'intensità osservata intrinsecamente tiene conto della vulnerabilità sismica della specifica tipologia di costruito sotto osservazione. La Figura 17 riporta questo confronto e mette in luce quanto la differenza tra le due aumenti con l'aumentare dei gradi di intensità.



**Figura 16. Correlazione tra Intensità e PGA: assunta dal metodo macrosismico (in rosso); assunta per ottenere l'intensità macrosismica strumentale (utilizzata nella mappa in Figura 1a).**

Per l'accelerazione  $PGA=0.7g$  osservata nell'area maggiormente colpita dal terremoto di Amatrice, la correlazione  $I$ -PGA tra intensità osservata e PGA registrata, avrebbe portato a considerare una intensità macrosismica tra i gradi IX e XII, che ben riflettono il grado di distruzione osservato ad Amatrice ed Accumoli per esempio.

Per tali gradi di intensità, si vede come il metodo macrosismico avrebbe correttamente stimato il danno osservato alle cabine primarie e secondarie (Figura 16), tra il livello  $D_4$  e  $D_5$ .

### 2.3.2 Modelli per la previsione del danno sisma indotto a Linee aeree

Si propone di definire la frequenza di danneggiamento delle linee aeree in frequenza di danneggiamento delle linee aeree,  $DF_{LA}$  secondo l'Equazione (3):

$$DF_{LA} = \frac{N_{LA}}{\frac{UL}{TL}} \quad (3)$$

dove  $N_{LA}$  è il numero di guasti osservati nelle linee aeree per unità di lunghezza della linea aerea,  $UL$ , che viene assunta in questo lavoro unitaria,  $UL = 1$  km,  $TL$  la lunghezza totale del circuito di rete analizzato.

Si assume che questa metrica possa essere analoga al *Repair Rate RR* (definito come la possibilità di avere una riparazione per chilometro di lunghezza del circuito di rete elettrica analizzata) notoriamente utilizzato dalla letteratura internazionale, in quanto, in mancanza di danni di danno le correlazioni per la previsione del danneggiamento sono state ottenute processando dati relative alle attività di riparazione, molto spesso eseguite in numero maggiore rispetto a quelle strettamente necessarie per riparare danni sismo-indotti.

Assumere che  $DF_{LA}$  sia analoga a *RR* ci mette pertanto in favore di sicurezza.

Come già detto nel per le linee aeree CIPCast-ES implementa la funzione *RR* che riproponiamo in questo lavoro in termini di  $DF_{LA}$

$$DF_{LA} = k_1 k_2 k_3 [1.388 \cdot PSA(3) - 0.0415] \text{ per } PSA(3) \geq 0.03g \quad (4)$$

dove

- $PSA3$  è l'ordinata dello spettro di accelerazione a  $T=3s$ , e al 5% di smorzamento;
- $k_1$  e  $k_2$  riflettono rispettivamente il tipo di costruzione delle linee primarie e secondarie  
 $k_1 = k_2 = 1$  per linee aeree primarie e secondarie;  
 $k_1 = 1, k_2 = 08$  nel caso di linee aeree primarie e linee secondarie interrato;
- $k_3$  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	$y \leq 1945$ ;
$k_3 = 1,0$	per	$1946 < y < 1990$ ;
$k_3 = 0,80$	per	$y \geq 1991$ .

In Figura 18a viene riportata l'Eq. 4 nel caso di  $k_1 = k_2 = k_2 = 1$ , cioè per linee aeree primarie e secondarie costruite tra gli anni 1946 e 1990. In [15] viene proposta un'ulteriori correlazioni per la stima del danno alle linee aeree, in termini di  $PGA(g)$ , riportata in Eq. 5 e in Figura 18b.

$$DF_{LA} = 0.324 \cdot PGA + 0.018 \quad (5)$$

In [15] si ritiene che l'uso della correlazione in  $PGA$  (Eq. 5, Figura 18b) per prevedere il danno ai sistemi di distribuzione aerea sia meno accurato (si veda in Figura 18b come i dati dai quali è stata ricavata siano molto "scattered"). L'uso dell'equazione (Eq. 4, Figura 18a) in funzione delle accelerazioni spettrali  $PSA03$  (a  $T=3$  secondi e 5% di smorzamento) è quindi raccomandato in quanto riflette il periodo di vibrazione dei cavi; è ragionevole, tuttavia, osservare come questa correlazione sembra essere stata ricavata da un numero inferiore di dati rispetto a quelli disponibili per calibrare l'equazione in  $PGA$  [ndr]. In [15] si osserva, inoltre, che nel caso sia necessario prevedere il danno in "tempo reale" (pochi minuti dopo il terremoto, non appena le registrazioni accelerometriche vengono elaborate), e le informazioni sulle accelerazioni spettrali di lungo periodo, in particolare relativamente alla  $PSA3$ , non sono ancora disponibili, è ragionevole fare riferimento all'equazione proposta in termini di  $PGA$ .

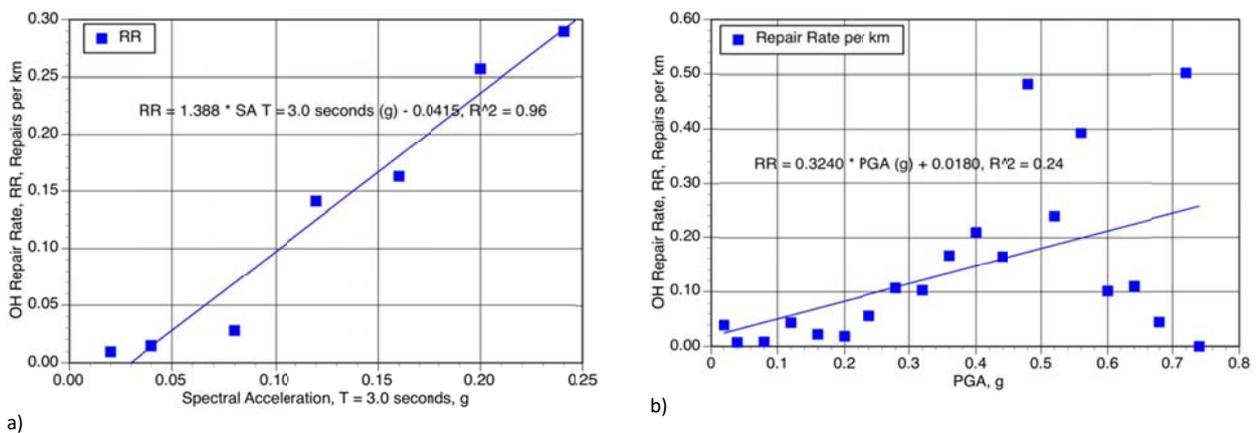


Figura 17. Modelli assunti in CIPCast per la previsione del danno sisma-indotto alle linee aeree: in funzione di PSA03; b) in funzione di PGA[g] (da [15])

Nell'area di studio analizzato si vede come il valore della PSA03 sia stato registrato nell'intervallo di PSA03 = 0.04g e PSA03 = 0.09g. Secondo l'Eq. 4 (rappresentata in Figura 18a) questo corrisponde a una  $DF_{LA} = RR$  tra 0.025 a 0.09.

Per il nostro caso studio l'unica informazione in nostro possesso e' la linea di bassa tensione, BT, era caratterizzata da 345 km di linee e che i danni hanno riguardato oltre 5 km di linee aeree. Non viene specificato il numero di danni per i km di linee danneggiati. Utilizzando l'Eq. 3, nota TL=345 km, è possibile ricavare  $DF_{LA}$ , ipotizzando diversi numeri di guasti nei cinque km di rete danneggiata.

I risultati in termini di  $DF_{LA}$ , sono riportati in Tab. 6 e mostrano un buon accordo con l'intervallo di valori stimato per  $DF_{LA} = RR$  utilizzando l'Eq. 4[15]

Tabella 6. Valori di  $DF_{LA}$  risultanti per il caso studio analizzato per diverse ipotesi di numero di guasti per i km di linee aeree danneggiate

$NF_{LA}$	1 guasto/km	2 guasto/km	3 guasto/km	4 guasto/km	5 guasto/km	10guasti/km
$DF_{LA}$	0.01	0.03	0.04	0.06	0.07	0.14

### 2.3.3 Imparare dall'esperienza: esempi dalla Nuova Zelanda

In Nuova Zelanda *Transpower New Zealand* possiede e gestisce la rete di trasmissione di elettricità ad alta tensione, AT, mentre le reti di distribuzione a media MT e bassa BT tensione sono gestite da *Orion*. Alcuni delle componenti più importanti per la rete di trasmissione dell'Isola del Sud si trovano nell'area di Christchurch, inclusi 10 punti di uscita della rete di trasmissione verso le reti di distribuzione gestite da *Orion*.

La sequenza sismica di Canterbury, che ha colpito l'isola del sud della Nuova Zelanda tra il 2010 e 2011, con gli eventi principali del 4 settembre 2010, e del 22 febbraio 2011 hanno messo in discussione la capacità di recupero della rete di trasmissione nella regione di Canterbury e nell'Isola del Nord settentrionale, ma l'impatto di entrambi i terremoti sulla stabilità elettrica e sul funzionamento della rete nazionale e dell'offerta regionale è stato trascurabile. In particolare, dopo il terremoto del 22 febbraio, la fornitura del servizio elettrico nella rete nazionale non è stato influenzato, mentre il servizio elettrico per gli alimentatori nella città di Christchurch e nelle sottostazioni regionali non è stato disponibile per un massimo di 4,5 ore mentre venivano eseguiti controlli di sicurezza e piccole riparazioni. Dopo i controlli di sicurezza, l'alimentazione ai punti di uscita della rete è stata ripristinata a piena capacità, con affidabilità  $n-1$ , tranne che presso la sottostazione di Bromley (Figura 18) dove è stata ripristinata la fornitura con un livello di affidabilità  $n$  [16][17].

I fattori che hanno contribuito a questo buon risultato sono stati individuati tra gli altri nel:

- *Buon ancoraggio di componenti potenzialmente sensibili a spostamento e ribaltamento – prima e post-evento*

L'implementazione delle lezioni apprese a seguito del terremoto di Edgecumbe del 1987, sulla necessità di ancorare sismicamente attrezzature pesanti installate nelle sottostazioni (ad esempio banchi di trasformatori) e il successivo programma di adeguamento sismico delle strutture, ha contribuito a ridurre al minimo il danno sismico alla rete di trasmissione



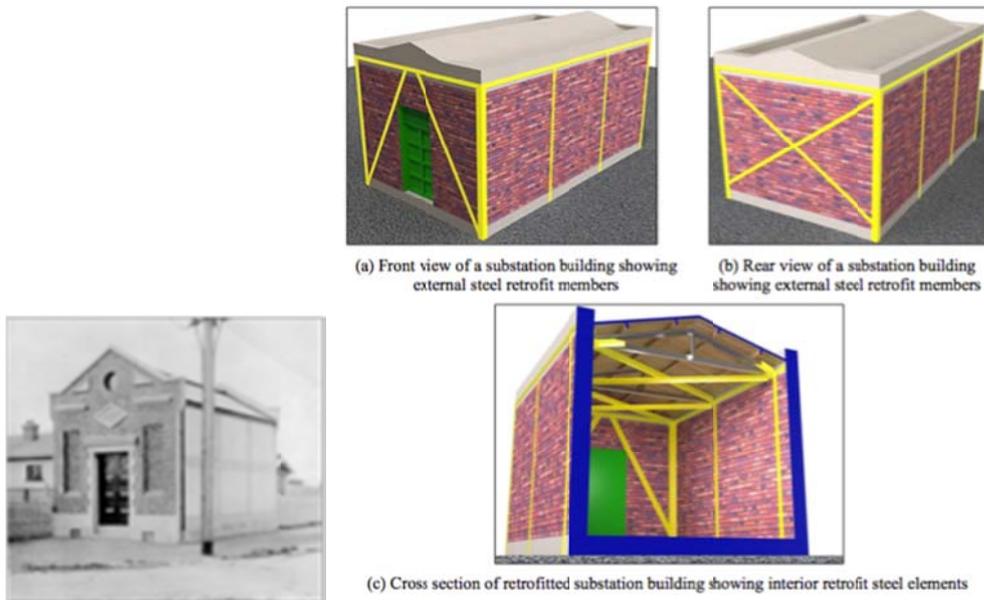
**Figura 18. Sottostazione di Bromley: a) trasformatore di tensione corrente a 220 kV, caduta b) Controventatura Bromley installata nella parte anteriore e posteriore dei pannelli del quadro elettrico; c) pannelli del controsoffitto dislocati nell'edificio di controllo e relè, (Foto gentilmente fornite da Transpower).**

Come parte delle lezioni apprese in seguito al terremoto del 22 febbraio 2011, di Christchurch, Transpower, continuerà a ridurre la vulnerabilità sismica delle proprie attività rimuovendo o rafforzando edifici esistenti, e le componenti della rete non conformi all'attuale politica sismica di Transpower [16]; per esempio tutti gli strumenti con isolatori tenuti da "morsetti a dita" saranno sostituiti poiché questo tipo di ancoraggio, come era già noto, e come ulteriormente dimostrato a seguito dell'evento sismico del 22 febbraio 2011 (Figura 18) mostra scarse prestazioni durante terremoti [17].

- *Adeguamento sismico degli edifici e di altri componenti della rete secondo la normativa più avanzata ribaltamento – prima e post-evento*

Prima della sequenza sismica di Canterbury del 2010/2011, 115 sottostazioni per la trasformazione da MT a BT realizzati in muratura di mattoni non armata e di proprietà di *Orion* nella più ampia regione di Christchurch sono stati adeguati sismicamente. Gli edifici delle sottostazioni, costruiti tra il 1920 e il 1960 erano tipicamente strutture rettangolari, indipendenti, realizzate con un pavimento di cemento e un diaframma del tetto rigido o flessibile; 110 delle sottostazioni erano in laterizio, cioè in muratura di mattoni non armata. Gli edifici delle sottostazioni erano considerati importanti testimonianze per la storia architettonica e sociale di Christchurch e alcuni di loro erano riconosciuti come edifici storici per la loro età, aspetto piacevole e significato sociale (Figura 19a).

I lavori di adeguamento sismico agli edifici delle sottostazioni sono iniziati nel 1996 e sono proseguiti sistematicamente per quindici anni. Le pareti sono state rinforzate nel piano e fuori dal piano con telai in acciaio interni o esterni costituiti da elementi in acciaio verticali e diagonali. Delle angolature verticali in acciaio sono state collocati presso gli angoli degli edifici e piastre verticali di acciaio sono state disposte ad intervalli lungo le pareti degli edifici, con elementi diagonali di acciaio generalmente montati all'ingresso e sulle pareti posteriori (Figura 19b). I cordoli del tetto sono stati collegati alle pareti con cravatte di acciaio ancorate. I tetti sono stati rinforzati installando controventi in acciaio sul diaframma del tetto, fissando le staffe in acciaio agli arcarecci o montando piastre di acciaio sui fasci perimetrali al livello della grondaia (Figura 19b).



**Figura 19. Sottostazioni per la trasformazione da MT a BT gestite da Orion a Christchurch in Nuova Zelanda: a) esempio di sottostazione considerata edificio storico; b) schema del rinforzo sismico adottato per 150 sottostazioni [19]**

La quasi totalità delle sottostazioni che sono state rinforzate sismicamente è sopravvissuta ai terremoti di Canterbury con danni minori e solo quattro degli edifici della sottostazione sono stati danneggiati, per cause co-sismiche, quali la caduta di rocce e la liquefazione e/o deformazione permanente del terreno. Grazie al fatto che la quasi totalità delle sottostazioni non ha subito danneggiamenti è stato possibile ripristinare l'energia al 90% dei clienti il giorno dopo il terremoto del 4 settembre 2010 e a tutti i clienti in dieci giorni dopo l'evento del 22 febbraio 2011.

Per rafforzare gli edifici delle sottostazioni, sono stati spesi in quindici anni 6 milioni NZ\$ con un costo stimato di 21.000 NZ\$ (12.000 euro circa) per ciascun edificio. È stato valutato che Orion ha risparmiato circa NZ \$ 60 milioni in costi diretti di riparazione e sostituzione in seguito ai terremoti di Canterbury (Orion New Zealand Limited, 2012), e i benefici per la comunità associati al fatto che l'energia elettrica è stato interrotta solo brevemente in seguito a eventi, che hanno causato grandissima devastazione al costruito e alla maggior parte delle altre infrastrutture critiche, è stato chiaramente inestimabile [19].

Seguendo l'esempio di Orion ora Transpower prevede un significativo lavoro di rafforzamento per portare l'edificio di controllo fino a standard sismico, con un costo previsto di 2,3 milioni NZ\$ [18]. Il rafforzamento proposto è coerente con i requisiti dalla legge prevista per ridurre il rischio sismico degli edifici esistenti in Nuova Zelanda.

### 3 Conclusioni

Nel panorama delle molteplici possibili strategie per aumentare la resilienza del sistema elettrico, questo lavoro si è concentrato sull'analisi dell'incremento della robustezza delle componenti del sistema elettrico alle sollecitazioni sismiche.

CIPCast-ES allo stato attuale consente già di eseguire analisi *“what-if”* per stabilire il beneficio che eventuali opere di adeguamento sismico eseguite su componenti principali quali cabine primarie e secondarie, cavi e conduttori aerei, potrebbe portare. Il presente lavoro ha consentito notevoli passi avanti in questo senso, mettendo in luce, da un lato, la necessità di ampliare la tassonomia con la quale le componenti della rete elettrica venivano classificate ai fini di caratterizzarne il comportamento sismico, dall'altro la buona rispondenza dei modelli di previsione del danno implementati all'interno di CIPCast-ES rispetto alle evidenze di danno e perdita di funzionalità della rete osservate dopo la sequenza sismica che ha colpito l'Italia Centrale nel 2016-2017.

I dati a disposizione per le calibrazioni sono stati fino ad ora qualitativi; si intende continuare a lavorare per migliorare ulteriormente i modelli già adottati e per definire modelli di previsione per le nuove componenti identificate, nell'ambito di questo lavoro, come meritevoli di una caratterizzazione specifica del comportamento sismico. Questo potrà essere fatto attraverso la definizione di modelli di vulnerabilità o fragilità ibridi (meccanici-analitici-osservazionali) e/o attraverso sperimentazione su tavola vibrante dell'ENEA, e/o facendo riferimento a quanto previsto dalla recente norma CENELC EN 50341-1:2012 (che è bene ricordarlo si applica solo alle nuove realizzazioni e non all'asset esistente) per gli aspetti peculiari delle linee elettriche ed in particolare per la risposta dinamica del sistema linea agli spostamenti sismici impressi alla base dei sostegni, dalla CEI EN 50341-1:2013 e dall'annesso nazionale italiano CEI 11-4 per l'analisi dei carichi e per le verifiche di resistenza dei sostegni delle linee elettriche aeree esterne [[20]

Naturalmente si continuerà a lavorare con gli altri gruppi facenti parti del progetto PAR e nell'ambito del Working Group ReSiEL per sviluppare la capacità di CIPCast di simulare strategie integrate di resilienza che riguardino non solo aspetti di robustezza delle componenti, ma anche di ridondanza dei sistemi, di disponibilità di risorse di back-up, umane e materiale così come dell'abilità e prontezza nella loro gestione.

## 4 Riferimenti

### Bibliografia

- [1]. Giovinazzi S., Di Pietro A., Mei M., Pollino M., and Rosato V.. *Protection of critical infrastructure in the event of earthquakes: CIPCast-ES*. L'Ingegneria sismica in Italia - ANIDIS 2017 - XVII Convegno, 2017.
- [2]. Gruppo di Lavoro INGV sul Terremoto di Amatrice, *Primo Rapporto Di Sintesi Sul Terremoto Di Amatrice M<sub>l</sub> 6.0 Del 24 Agosto 2016 (Italia Centrale)*, 29 Agosto 2016
- [3]. ReLUIS-INGV Workgroup (2016), Preliminary study of Rieti earthquake ground motion records V4, available at <http://www.reluis.it>.
- [4]. Di Filippo, G. (2017). E-distribuzione. Comportamento del sistema elettrico della provincia di Rieti in occasione del sisma del 24-08-2016. Giornata di Studio: Resilienza delle Reti Elettriche.
- [5]. Grünthal G, ed (1998). European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). Luxembourg: Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. (Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie n. 15).
- [6]. Pinto, P.E., Cavalieri, F., Franchin, P., Vanzi, I. & Pitilakis, K. 2011a. *SYNER-G Deliverable D3.3: Fragility Functions for Electric Power System Elements*. Aristotle University of Thessaloniki, Greece.
- [7]. Pinto, P.E., Cavalieri, F., Franchin, P. & Vanzi, I. 2011b. *SYNER-G Deliverable D5.2: Systemic Vulnerability and Loss for Electric Power Systems*. Aristotle University of Thessaloniki, Greece.
- [8]. NIBS National Institute for Building Science. 2004. HAZUS-MR4 Technical Manual. FEMA, Washington D.C., USA. (2004).
- [9]. 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).
- [10]. Kongar, I., Rossetto, T., and Giovinazzi, S.. *The Effectiveness of Existing Methodologies for Predicting Electrical Substation Damage Due to Earthquakes in New Zealand*. Second International Conference on Vulnerability and Risk Analysis and Management (ICVRAM) and the Sixth International Symposium on Uncertainty, Modeling, and Analysis (ISUMA), ASCE Library.
- [11]. Lagomarsino S, Giovinazzi S (2006) Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *B Earthq Eng* 4:415-443.
- [12]. Giovinazzi S., Di Pietro A., Mei M., Pollino M., and Rosato V.. *Protection of critical infrastructure in the event of earthquakes: CIPCast-ES*. L'Ingegneria sismica in Italia - ANIDIS 2017 - XVII Convegno, 2017.
- [13]. 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).
- [14]. Vanzi, I. 1996. Seismic reliability of electric power networks: methodology and application. *Structural Safety*, 18(4), 311-327.
- [15]. Eidinger J, 2017. Fragility Of Electric Power Distribution Systems. 16th World Conference on Earthquake Engineering, 16WCEE 2017 Santiago Chile, January 9th to 13th 2017 Paper N° 0167.
- [16]. Transpower New Zealand Ltd, Seismic Policy, TP.GG 61.02, Issue 2, April 2009.
- [17]. McGhie, C. and Tundo-Bornarel, C. (2011). 4 September 2010 and 22 February 2011 Christchurch earthquakes from a transmission infrastructure perspective: asset structural performance and lessons learned. EEA Conference and Exhibition 2011, 23- 24 June 2011, Auckland.

- [18]. Upper South Island Reliability Major Capex Proposal Stage 1 © Transpower New Zealand Limited 2 2012. All rights reserved.
- [19]. Abeling, S.R., Misnon, A.N., Dizhur D. & Ingham, J.M. (2017). Exemplar seismic retrofits of Christchurch URM buildings. 2017 NZSEE Conference
- [20]. Bruno Antonio Cauzillo - giV+ dirigente ENEL e Presidente del Comitato 11/7 del CEI Carlo Urbano - Professore, Politecnico di Milano 28/03/2018 4551 <https://www.ingenio-web.it/19467-il-metodo-di-calcolo-agli-stati-limite-applicato-ai-sostegni-delle-linee-elettriche-aeree-esterne>

## *Rapporti Tecnici - Ricerca di Sistema Elettrico*

### **PAR2016**

- Università di Roma "La Sapienza", DIAEE – Report RdS/PAR2016/023 – “Modelli per l’analisi della fragilità fisica e funzionale della rete elettrica soggetta a eventi critici”, A. Geri, S. Giovinazzi, M. Pompili.

### **PAR2017**

- ENEA, DTE-SEN-APIC – Report RdS/PAR2017/061 – “La piattaforma DSS di tipo GIS-based per l’analisi del rischio e della sicurezza delle infrastrutture critiche dello Smart District”, M. Pollino, E. Caiaffa, G. D’Agostino, A. De Nicola, A. Di Pietro, G. Fattoruso, L. La Porta, V. Rosato, A. Tofani, G. Vicoli e M.L. Villani.
- Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica e Energetica (DIAEE) – Report RdS/PAR2017/064 – “Metriche e modelli di resilienza multi-rischio per il sistema elettrico”, S. Giovinazzi, M. Pompili, A. Geri, L. Calcara.

### **PAR2018**

- ENEA, DTE-SEN-APIC - Report RdS/PAR2018/030 - "Realizzazione del DSS per la sicurezza delle Infrastrutture Critiche (CI) del Distretto", M. Pollino, G. D'Agostino, A. De Nicola, A. Di Pietro, G. Fattoruso, L. La Porta, V. Rosato, A. Tofani, Maria Luisa Villani.
- Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica e Energetica (DIAEE) - Report RdS/PAR2018/033 - "Modelli per la valutazione della resilienza del sistema elettrico soggetto a sollecitazioni multiple", S. Giovinazzi, M. Pompili, A. Geri, L. Calcara.

## 5 Appendice A

### Proposta di lettera per promuovere la costituzione del gruppo di lavoro *ReSiEL*

**Oggetto:** Costituzione del *Gruppo di Studio per la Resilienza Sistema Elettrico ReSiEL*

Nell'ambito delle attività scientifiche del *DIAEE, Dipartimento di Ingegneria aeronautica, elettrica ed energetica, Sapienza Università' di Roma*, in collaborazione con il *Laboratory for the Analysis and Protection of Critical Infrastructures (APIC)* di *ENEA*, e del *Centro EISAC.it (European Infrastructure Simulation and Analysis Centre)* costituito da un Accordo di Programma tra *ENEA* e *INGV*, sono state avviate attività e progetti multilaterali per avanzare metodi e conoscenze che promuovano la resilienza del sistema elettrico (sia a livello di trasmissione che di distribuzione) cioè la capacità dello stesso di mantenere la funzionalità del servizio erogato, essenziale per la sicurezza, il benessere economico e sociale delle comunità, anche in situazioni di crisi (indotte, per esempio, da fenomeni naturali estremi, da errori umani, attacchi cyber e terroristici, ecc.).

A tal fine si sta avviando presso il *DIAEE* la costituzione di un *Gruppo di Studio per la Resilienza Sistema Elettrico ReSiEL* con i principali obiettivi di:

- promuovere connessioni e cooperazione tra accademici, enti di ricerca, gestori delle reti, amministrazioni regionali e locali, ARERA, e altri parti interessate che lavorano per promuovere la resilienza delle infrastrutture critiche, in modo da unire e sinergizzare gli sforzi;
- migliorare il livello di consapevolezza sui possibili rischi per il sistema elettrico, nel breve e lungo termine, e sulla necessità di definire strategie di resilienza da un punto di vista multi-disciplinare e olistico;
- promuovere la condivisione delle conoscenze e degli strumenti (buone pratiche, policies, DSS) ad oggi disponibili, a livello nazionale e internazionale, e identificare gap di conoscenza per promuovere progetti di ricerca congiunti, nuovi percorsi didattici, tesi di laurea e dottorato, internship, ecc.

A tal fine, vi saremo grati se vorrete favorire la partecipazione al *Gruppo di Studio per la Resilienza Sistema Elettrico* di almeno due qualificati Esperti di ENTE XY in grado di dare un contributo alla costituzione del suddetto Gruppo di Studio e alla ricerca tecnico-scientifica e alle altre finalità che esso si propone.

Il primo incontro dei membri che vorranno aderire al *ReSiEL* avverrà in occasione di workshop organizzato in collaborazione tra Sapienza e ENEA.

## 6 Appendice B

### BOZZA del PROGRAMMA proposto per il Workshop

#### La Resilienza del sistema elettrico: verso concetti e metodi condivisi

Il workshop ha lo scopo di

- Promuove la costituzione di un Gruppo di Studio per la Resilienza del Sistema Elettrico **ReSiEL**
- Presentare le attività del progetto PAR MISE-ENEA su resilienza del sistema elettrico
- definire un “white paper” sulla resilienza del sistema elettrico.

#### Introduzione

Saluti “istituzionali “

Relazione ad Invito Internazionale – Resilienza delle Infrastrutture Critiche

#### Sessione 1 – Resilienza a cosa? Resilienza come e quando?

- La resilienza deve intendersi multi-hazard e multi-disciplinare?
- Quando è meglio investire in resilienza? Prima, durante o dopo una crisi? con prospettiva di basso, medio o a lungo termine?
- Ridondanza, Robustezza, disponibilità di risorse, rapidità e efficienza della loro gestione sono solo alcuni mezzi attraverso il quale poter agire sulla resilienza. Come scegliere il giusto mix?

#### Sessione 2 – Resilienza: verso metriche condivise

EISAC.it, ARERA, RSE (GSE), vari operatori della rete di trasmissione e distribuzione utilizzano metriche diverse; in questo stato di cose non è possibile la condivisione e il paragone di valutazioni di resilienza e non è favorito lo scambio di conoscenza

È possibile arrivare a metriche condivise? Quale potrebbe essere il modo migliore per perseguire questo obiettivo?

#### Sessione 3 – Resilienza: aspetti legislativi, etica e percezione

Quale è il livello di resilienza che è legalmente necessario assicurare o che sarebbe etico assicurare o che il consumatore si aspetta che gli venga assicurato.

Diverse prospettive a confronto, i.e.

- Resilienza o “business continuity” secondo i “service level agreement”, SLA;
- Etica della resilienza e immagine societaria (quanto la resilienza o la mancanza della stessa possono influenzare l’immagine della società);
- Aspettative dei consumatori e accettazione dell’interruzione o riduzione del servizio in circostanze eccezionali (consapevolezza su cosa potrebbe succedere, quali potrebbero essere le conseguenze, cosa è fattibile e in quanto tempo, cosa non è fattibile).

## 7 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. Alberto Geri, Prof.ssa Sonia Giovinazzi, Fonte Luigi Calcara**

**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".

**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. È 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 Genova e ha conseguito il Dottorato presso le Facoltà di Ingegneria dell'Università di Firenze e della Technical University of Braunschweig 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 Zealanda dopo il terremoto.

**Luigi Calcara** nasce a Castelvetro nel 1990. Consegue la Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrotecnica nel 2015 presso l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza". Parte della Tesi Magistrale è stata supportata da e-distribuzione attraverso uno stage di oltre 6 mesi.

È attualmente studente di dottorato presso la Facoltà di Ingegneria Civile e Industriale dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza". I suoi principali interessi scientifici riguardano la resilienza dei sistemi elettrici in media ed alta tensione e gli isolamenti liquidi.

Dal 2017 è Presidente dell'AEIT giovani sezione di Roma, Chair dell'IEEE Sapienza Student Branch Chapter e Segretario del CIGRE D1 Italian Representative. Nel 2016 ha ricevuto il premio CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) per la migliore Tesi di Laurea Magistrale nel campo del "Sistemi avanzati di monitoraggio per la riduzione del tasso di guasto dei cavi interrati di media tensione". Dal 2016 è membro dell'IEC e CEI TC10 "Fluids for Electrotechnical Application".

Dal 2015 è iscritto all'Albo degli Ingegneri della Provincia di Roma. Dal 2014 è membro dell'IEEE Industry Applications Society e dell'IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society.

È autore di diversi articoli scientifici pubblicati su riviste nazionali e internazionali e presentati a convegni.