

POLITECNICO DI TORINO



Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Impatto delle Ondate di Calore sulla Resilienza delle Reti di Distribuzione: Analisi Termica dei Cavi Interrati in Media Tensione

Relatori

Prof. Gianfranco CHICCO

Prof. Andrea MAZZA

Per. Ind. Giovanni PECA

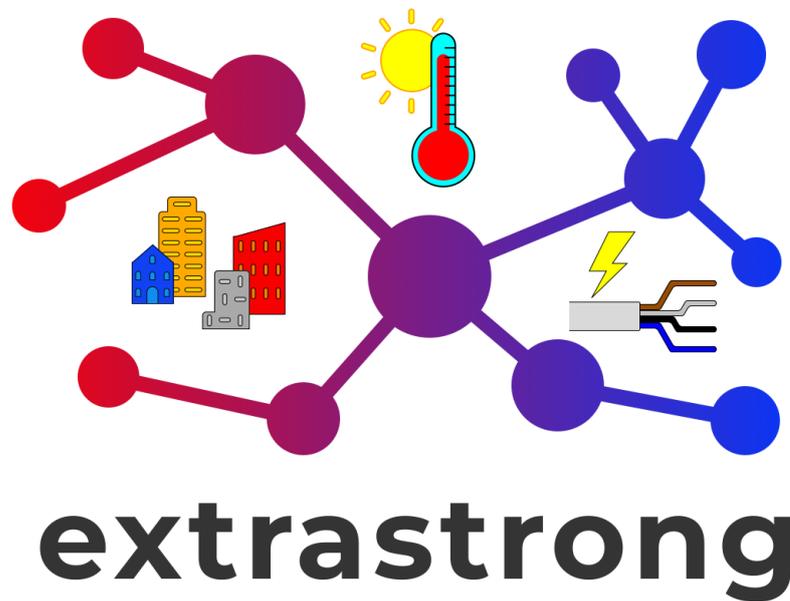
Prof. Luigi CALCARA

Candidata

Ivana D'AMORE

Marzo 2025

Questa tesi è stata svolta nell'ambito del progetto «Resilience Evaluation by *Experimental and Theoretical Approaches in Electrical Distribution Systems with Underground Cables - EXTRASTRONG*» – finanziato dall'Unione Europea – Next Generation EU nell'ambito del programma PRIN 2022 (D.D. 104 - 02/02/2022 Ministero dell'Università e della Ricerca).



Sommario

L'aumento delle temperature globali e la crescente frequenza delle ondate di calore pongono sfide significative alla resilienza delle reti elettriche in media tensione. Questo studio analizza l'impatto di tali eventi estremi sulle linee elettriche in cavo interrato, componenti essenziali delle reti di distribuzione, particolarmente sensibili alle variazioni termiche. Secondo la legge di Arrhenius, l'elevata temperatura accelera il degrado dell'isolamento dei cavi, riducendone la vita utile. Durante i mesi estivi, la diminuzione delle precipitazioni incrementa la resistività termica del terreno, ostacolando la dissipazione del calore generato nei cavi. In parallelo, il maggior carico elettrico, dovuto all'uso intensivo dei condizionatori, amplifica le perdite per effetto Joule. A questi fenomeni si aggiunge la possibile presenza di correnti negli schermi dei cavi, che, soprattutto in condizioni di guasto, amplificano il surriscaldamento delle linee, aggravando il deterioramento dell'isolamento.

La combinazione di questi eventi porta ad un aumento significativo dei guasti nei cavi interrati durante i mesi estivi, con particolare incidenza nei giunti, punti critici della rete. A supporto di quanto esposto, durante lo sviluppo di questa tesi, sono state seguite diverse campagne di misura condotte dall'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) e da IRETI, il gestore della rete di distribuzione di Torino. Le campagne si sono focalizzate sulla rilevazione delle correnti negli schermi dei cavi, sulla misurazione delle resistenze, sia di contatto delle giunzioni che di isolamento, e sulle temperature dei cavi e dell'ambiente circostante.

In particolare, questo studio si propone di analizzare il comportamento termico dei cavi interrati durante i mesi più caldi, valutando se essi raggiungano temperature critiche, in relazione alla domanda elettrica e alle condizioni ambientali. A tale scopo, vengono analizzati i dati di temperatura dei cavi, forniti dall'INRiM, e i dati di corrente di carico messi a disposizione da IRETI. Oltre all'analisi delle temperature effettivamente misurate, lo studio applica il modello termico tratto dalla norma IEC 60287, comunemente impiegato per il dimensionamento delle linee elettriche, al fine di stimare la temperatura dei cavi in funzione delle condizioni operative e ambientali. Il confronto tra le temperature reali e quelle stimate permette di valutare l'accuratezza del modello e di comprendere meglio il comportamento termico delle linee interrate in scenari di stress termico crescente.

Ringraziamenti

*Alle colonne portanti della mia vita:
mio padre, mia madre e mia sorella.*

Al mio angelo custode, nonno Enzo.

A Paolo, da sempre fonte di motivazione.

*A tutti coloro che mi hanno accompagnato
in questo lungo percorso, fino ad oggi:
familiari, amici, colleghi e docenti.*

A me stessa,

alla mia determinazione,

alla mia passione per un settore,

spesso considerato poco femminile,

che mi ha stimolata, messa alla prova

e condotta fino a questo traguardo.

Grazie.

*“Le donne che hanno cambiato il mondo
non hanno mai avuto bisogno di mostrare nulla,
se non la loro intelligenza.”*

Rita Levi Montalcini

Indice

Elenco delle tabelle	X
Elenco delle figure	XI
Introduzione	1
1 Cambiamenti climatici e Resilienza dei Sistemi Elettrici	3
1.1 Gli Impatti della Crisi Climatica sul Sistema Elettrico	3
1.2 Resilienza della Rete Elettrica: Definizione e metriche	5
1.3 Il fenomeno delle Ondate di Calore	8
1.3.1 Generalità ed implicazioni delle ondate di calore sul sistema elettrico	8
1.3.2 Valutazione delle ondate di calore nei sistemi elettrici	9
1.3.3 Conseguenze delle ondate di calore sulle infrastrutture elettriche	11
2 Rete di Distribuzione MT	13
2.1 Struttura delle Reti MT	13
2.2 Stato del neutro delle Reti MT	15
2.2.1 Neutro isolato	15
2.2.2 Neutro compensato	16
2.3 IRETI e la rete di distribuzione di Torino	18
3 Linee elettriche in cavo MT	21
3.1 Struttura dei cavi MT e i loro accessori	21
3.2 Schermi metallici dei cavi MT	24
3.2.1 Messa a terra degli schermi dei cavi MT	26
3.2.2 Correnti negli schermi e il loro impatto sui cavi	29
3.3 Invecchiamento termico dei cavi	30
3.4 Criticità dei giunti	32

4	Dimensionamento dei cavi interrati MT	35
4.1	Modello termico di un cavo unipolare MT	36
4.1.1	Portata di corrente al limite termico	43
4.1.2	Influenza delle condizioni ambientali sulla portata	45
4.2	Modello termico di una terna di cavi unipolari interrati ad "Elica visibile" in tubo	49
4.3	Modello termico di un giunto tripolare interrato	55
5	Misure sul campo e analisi dei dati	59
5.1	Misura di corrente negli schermi dei cavi	59
5.1.1	Metodo di misura	60
5.1.2	Eventi significativi registrati	63
5.2	Misura delle resistenze di contatto e di isolamento dei giunti	66
5.2.1	Metodo di misura delle resistenze	66
5.2.2	Caratteristiche e risultati della misura	69
5.3	Misura di temperatura dei cavi interrati	78
5.3.1	Caratteristiche della misura	79
5.3.2	Andamenti di temperatura registrati	81
5.3.3	Considerazioni sulle temperature registrate	91
6	Applicazione del modello termico alle linee interrate di Torino	93
6.1	Implementazione del modello termico in Matlab	94
6.1.1	Caratteristiche Linea Morgari	95
6.1.2	Caratteristiche Linea IEN	97
6.2	Risultati ottenuti	98
6.2.1	Caso Linea Morgari	98
6.2.2	Caso Linea IEN	102
6.3	Considerazioni finali sui risultati ottenuti	105
7	Conclusioni	107
	Bibliografia	109

Elenco delle tabelle

2.1	Elenco Cabine Primarie rete Torino [30]	19
4.1	Fattori correttivi K_1 per temperature ambiente diverse da 20°C . .	47
4.2	Fattori correttivi K_4 per resistività del terreno diverse da 1,5 K·m/W per un conduttore di sezione pari a 95 mm ²	47
5.1	Specifiche tecniche linee IEN e Morgari	80
5.2	Specifiche tecniche linee IEN e Morgari	81

Elenco delle figure

1.1	Numero di disastri naturali registrati nel periodo 1900-2022, secondo l'Emergency Events Database (EM-DAT) [2].	4
1.2	Trapezoide di resilienza multi-fase [14]	7
2.1	Schema rete MT debolmente magliata con esercizio radiale	14
2.2	Sistema con neutro isolato	16
2.3	Sistema con neutro compensato	17
2.4	Logo IRETI [30]	18
2.5	Localizzazione Cabine Primarie rete Torino [30]	20
3.1	Struttura cavo unipolare MT	22
3.2	Giunto termo-restringente	23
3.3	Giunto auto-restringente	23
3.4	Terminale termo-restringente per esterno	24
3.5	Configurazioni del campo elettrico: cavo schermato e non schermato. [34]	25
3.6	Collegamento Solid-bonding [31]	27
3.7	Collegamento Single-point bonding [31]	28
3.8	Curve di vita termica per PVC (curve A e C) ed EPR (curve B e D) [31].	31
3.9	Andamento generale del campo geometrico elettrico all'interno del materiale isolante di un giunto per cavo MT 18/30 kV in presenza di un vacuolo ($d_{vacuolo}$) tra il conduttore ($r_{conduttore}$) e la parte esterna del materiale dielettrico ($r_{dielettrico}$) [39]	33
3.10	Guasto nel giunto del cavo interrato MT: tipico collegamento danneggiato tra la schermatura del cavo e lo schermo di giunzione [41].	34
4.1	Schema cavo unipolare	36
4.2	Generica superficie esterna di raggio r	38
4.3	Applicazione del principio delle immagini su un cavo unipolare	41

4.4	Applicazione del principio delle immagini su terna di cavi unipolare	43
4.5	Resistività del terreno ρ_E in funzione delle stagioni, senza influenza delle precipitazioni (profondità di interramento $< 1,5$ m) [44]. . . .	45
4.6	Variazioni delle temperature massime raggiunte da un cavo MT interrato in funzione della resistività termica del terreno [46].	47
4.7	Variazioni delle temperature massime raggiunte da un cavo MT interrato in funzione della temperatura ambiente [46].	48
4.8	Temperature tipiche dei cavi MT interrati in funzione delle temperature ambiente nei diversi periodi dell'anno [47].	48
4.9	Struttura singolo cavo unipolare	50
4.10	Principio delle Immagini applicato ad una Terna di Cavi "ad Elica visibile" in Tubo	52
4.11	Giunto tripolare in carta impregnata	56
4.12	Schema giunto tripolare	56
5.1	Registratore digitale SEFRAM DAS 1600	61
5.2	Misura delle correnti negli schermi dei cavi MT tramite pinze amperometriche	61
5.3	Schema di misura completo delle correnti negli schermi dei cavi MT presso cabina secondaria	62
5.4	Corrente nello schermo del conduttore di fase della linea PRIMULE	63
5.5	Corrente di guasto rilevata sullo schermo del conduttore di fase della linea VERNA	64
5.6	Corrente di guasto rilevata sullo schermo del conduttore di fase della linea VERNA	65
5.7	Micro-ohmmetro: misuratore di resistenza	67
5.8	Tester di resistenza di isolamento	68
5.9	Giunto guasto appartenente alla linea Desana da Stura	69
5.10	Misura della giunzione dello schermo del giunto sano appartenente alla linea Desana da Stura	70
5.11	Misura della giunzione del conduttore del giunto sano appartenente alla linea Desana da Stura	71
5.12	Misura della giunzione del conduttore del giunto sano appartenente alla linea Desana da Stura	71
5.13	Misura della resistenza dell'isolamento del giunto sano appartenente alla linea Desana da Stura	72
5.14	Giunto guasto appartenente alla linea Padova da Stura	73
5.15	Estremità del giunto: Schermo a fili di rame senza e con nastro in alluminio conduttore	74
5.16	Misura della giunzione dello schermo del giunto sano appartenente alla linea Padova da Stura	74

5.17	Misura della resistenza dell'isolamento del giunto appartenente alla linea Padova da Stura	75
5.18	Giunto trifase guasto appartenente alla linea 7074	76
5.19	Misura della giunzione dello schermo del giunto sano appartenente alla linea 7074	77
5.20	Misura della resistenza dell'isolamento del giunto sano appartenente alla linea 7074	78
5.21	Giunti della Linea IEN	80
5.22	Andamento Temperature e Corrente nel tempo della Linea Morgari (24 luglio - 2 agosto 2024)	82
5.23	Analisi dati Linea Morgari (24 luglio - 2 agosto 2024)	83
5.24	Zoom Andamento Temperatura e Corrente Linea Morgari (24 luglio - 2 agosto 2024)	83
5.25	Zoom Incremento di corrente Linea Morgari (24 luglio - 2 agosto 2024)	84
5.26	Andamento di Corrente e Temperatura nel tempo Linea IEN (24 luglio - 2 agosto 2024)	85
5.27	Analisi dati Linea IEN (24 luglio - 2 agosto 2024)	86
5.28	Andamento di Corrente e Temperatura Linea Morgari nel tempo (11 agosto - 17 agosto 2024)	87
5.29	Analisi dati Linea Morgari (11 agosto - 17 agosto 2024)	88
5.30	Andamento di Corrente e Temperatura nel tempo Linea IEN (11 agosto - 17 agosto 2024)	89
5.31	Analisi dati Linea IEN (11 agosto - 17 agosto 2024)	90
6.1	Applicazione Mod. Termico Linea Morgari (24 luglio - 2 agosto 2024)	99
6.2	Applicazione Mod. Termico Linea Morgari (11 agosto-17 agosto 2024)	99
6.3	Zoom Applicazione Mod. Termico Linea Morgari (11 agosto - 17 agosto 2024)	101
6.4	Applicazione Mod. Termico Linea IEN (24 luglio - 2 agosto 2024)	103
6.5	Applicazione Mod. Termico Linea IEN (11 agosto - 17 agosto 2024)	103
7.1	Collegamento Single point bonding degli schermi dei cavi MT	108

Introduzione

Negli ultimi decenni, i *cambiamenti climatici* hanno determinato un aumento significativo della frequenza e dell'intensità degli eventi catastrofici, con ripercussioni profonde su numerosi settori, tra cui il sistema elettrico. Fenomeni estremi, come terremoti, alluvioni, uragani, noti come *Eventi "HILP"* (High Impact Low Probability), rappresentano una minaccia crescente per le infrastrutture elettriche, causando interruzioni di servizio su larga scala e privando numerose persone dell'accesso all'energia elettrica. Tali interruzioni non solo generano perdite economiche considerevoli per distributori e utenti, ma possono anche avere impatti negativi sulla salute e sulla sicurezza pubblica. Uno degli eventi estremi in crescita negli ultimi anni sono le *ondate di calore*, considerate una delle minacce più gravi per il sistema elettrico. L'innalzamento delle temperature ambientali esercita una pressione significativa sulle infrastrutture elettriche, con particolare impatto sulle *linee in cavo interrato*, che risultano tra le più vulnerabili. L'aumento delle temperature del suolo può infatti incrementare il numero di guasti, compromettendo la continuità del servizio elettrico e aggravando le problematiche legate alla gestione della rete.

Questo elaborato si propone di analizzare il fenomeno delle ondate di calore e il loro impatto sulle linee in cavo interrate della rete di distribuzione in media tensione. In particolare, nel *Capitolo 1* viene introdotto il concetto emergente di resilienza dei sistemi elettrici, nato in risposta all'intensificarsi dei cambiamenti climatici. Viene approfondito il fenomeno delle ondate di calore e i loro effetti sul sistema elettrico, con una panoramica sulle metodologie di valutazione e sugli impatti sulle infrastrutture elettriche. Il *Capitolo 2* si concentra sulle reti di distribuzione in media tensione, con particolare attenzione alla rete di Torino, oggetto di studio di questa tesi. Nel *Capitolo 3* vengono analizzate le linee elettriche in cavo, descrivendone la struttura e approfondendo il tema degli schermi dei cavi in media tensione e delle diverse modalità di messa a terra, aspetto cruciale per la prevenzione dei guasti. Un'attenzione particolare è riservata anche all'invecchiamento dei cavi e ai loro giunti, considerati il punto più vulnerabile della rete. Il *Capitolo 4* affronta il tema del dimensionamento dei cavi elettrici MT esaminando il loro modello termico e l'influenza delle temperature elevate sulle loro condizioni operative. Nel *Capitolo 5*

sono presentate le campagne di misura effettuate dai due enti coinvolti nel progetto di ricerca: *IRETI*, società del gruppo Iren, e *INRiM*, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica. In questo capitolo sono presentati i dati di corrente, temperatura e resistenza (di contatto e di isolamento) dei giunti, raccolti durante le attività di misura e monitoraggio, insieme alle relative analisi e considerazioni, con l'obiettivo di valutare le condizioni operative delle infrastrutture elettriche in diverse situazioni operative e ambientali. Nel *Capitolo 6*, sulla base dei dati disponibili, viene applicato il modello termico, comunemente impiegato per il dimensionamento delle reti elettriche, alle linee interrate in media tensione della rete di Torino. L'obiettivo è stimare la temperatura dei cavi in relazione alle effettive condizioni operative e ambientali. Successivamente, le temperature calcolate vengono confrontate con quelle misurate, per valutarne l'accuratezza e individuare eventuali discrepanze. Inoltre, vengono analizzati i risultati delle simulazioni, mettendo in evidenza i limiti del modello e suggerendo possibili strategie di miglioramento. Infine, il *Capitolo 7* conclude il lavoro con le conclusioni finali e le prospettive future, focalizzandosi su strategie per migliorare la resilienza delle reti elettriche contro gli effetti delle ondate di calore e le soluzioni per mitigarne l'impatto.

Capitolo 1

Cambiamenti climatici e Resilienza dei Sistemi Elettrici

1.1 Gli Impatti della Crisi Climatica sul Sistema Elettrico

Le reti di distribuzione sono state storicamente progettate, costruite e gestite per risultare affidabili di fronte alle minacce più comuni e prevedibili [1]. L'affidabilità è strettamente legata alla qualità del servizio e rappresenta la capacità della rete di distribuzione di affrontare eventuali contingenze che si verificano in condizioni di funzionamento normali, assicurando continuità elettrica senza interruzioni significative. Gli standard di progettazione della rete, infatti, si concentrano su rischi conosciuti, come guasti tecnici, errori operativi, variazioni di carico, trascurando gli eventi rari e di elevata intensità. Tuttavia, negli ultimi anni, l'intensificarsi dei cambiamenti climatici ha portato a un aumento di eventi meteorologici estremi, capaci di compromettere la continuità del servizio elettrico. Eventi come uragani, tempeste, ondate di calore, inondazioni, possono influenzare in modo significativo lo stato operativo dei sistemi elettrici, danneggiandone l'infrastruttura e causando interruzioni molto spesso prolungate. Secondo l'Emergency Events Database (EM-DAT), fino al 1938 si registravano meno di 10 eventi all'anno, ma dopo gli anni 70 la percentuale è cresciuta fino a diverse centinaia all'anno [2], come mostrato nella

Figura 1.1. Nel 2023 sono stati registrati un totale di 399 disastri legati ai pericoli naturali [3].

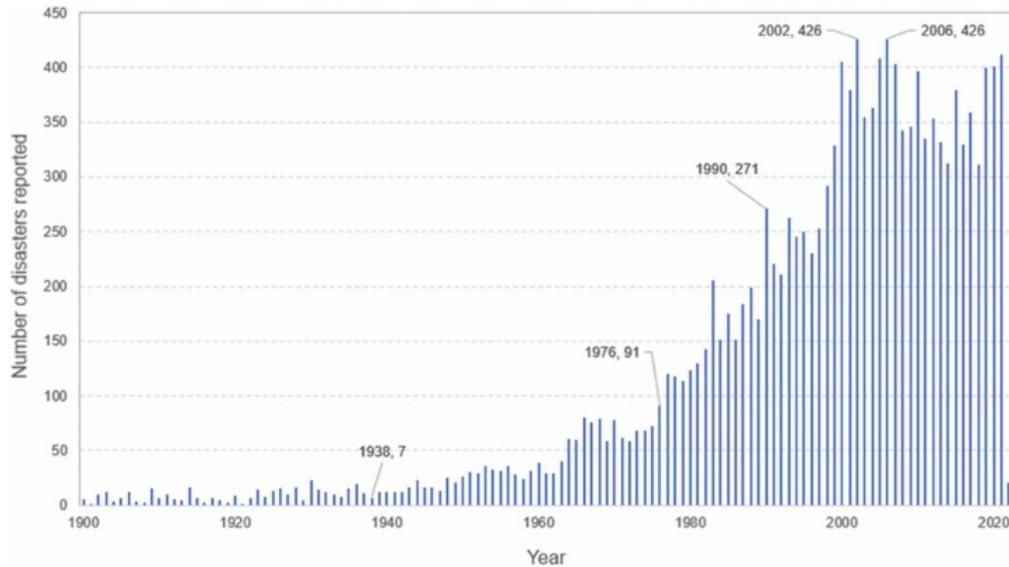


Figura 1.1: Numero di disastri naturali registrati nel periodo 1900-2022, secondo l'Emergency Events Database (EM-DAT) [2].

L'aumento, sia in frequenza che in gravità, di tali eventi comporta un incremento significativo della durata e del numero delle interruzioni di corrente, che in casi estremi possono provocare il collasso dei sistemi elettrici, con gravi ripercussioni economiche e sociali. Ad esempio,

- Nel 2012, negli Stati Uniti, l'uragano Sandy ha lasciato senza energia elettrica circa 8,5 milioni di famiglie e aziende e, in alcuni casi, il ripristino dell'energia ha richiesto un paio di settimane [4].
- Nell'ottobre 2018, la tempesta Vaia, in Trentino e Veneto, ha scatenato venti fino a 200 km/h, abbattendo alberi e danneggiando centinaia di chilometri di linee elettriche [5].
- Più recentemente, l'alluvione in Emilia-Romagna (2023) ha sommerso infrastrutture essenziali, tra cui sottostazioni elettriche, lasciando migliaia di famiglie al buio [6].

I fenomeni meteorologici come quelli citati finora, non rientrano tradizionalmente nell'ambito dell'affidabilità della rete elettrica, in quanto essa si basa sull'idea di garantire un funzionamento stabile e continuo della rete in condizioni relativamente normali e non in caso di eventi estremi. Dunque, tenendo conto dei limiti di

questo approccio, per affrontare le nuove sfide legate alla crisi climatica, è emersa la necessità di introdurre un nuovo concetto, complementare all'affidabilità: la *Resilienza*. Il concetto di resilienza è pensato per gestire *eventi HILP* (High Impact, Low Probability), ovvero eventi rari ma potenzialmente catastrofici, a differenza dell'affidabilità che si occupa degli *eventi LIHP* (Low Impact, High Probability), di basso impatto ma altamente probabili. Gli eventi HILP si riferiscono tipicamente a fenomeni meteorologici estremi, ma non si limitano soltanto ad essi. Esistono infatti, tre categorie di eventi ad alto impatto e a bassa probabilità, che possono compromettere la resilienza della rete elettrica [1]:

1. **Eventi malevoli:** comprendono tutti i tipi di minacce che hanno origine da attacchi intenzionali al sistema di alimentazione eseguiti da un avversario o da un gruppo di avversari (terroristi, vandali, cyber attacker).
2. **Pericoli naturali:** sono gli eventi meteorologici estremi, come uragani, terremoti, trombe d'aria e inondazioni.
3. **Incidenti:** i quali costituiscono eventi che accadono involontariamente, a causa di errori o decisioni sbagliate.

Diventa essenziale riuscire a prevedere il comportamento della rete in risposta a questi fenomeni al fine di ridurre la gravità degli impatti, proteggendo le infrastrutture critiche e limitando le perdite economiche. Il passaggio concettuale, da un sistema esclusivamente affidabile a uno resiliente, rappresenta un'evoluzione necessaria, capace di rispondere ai rischi sempre più complessi che i cambiamenti climatici impongono al settore energetico.

1.2 Resilienza della Rete Elettrica: Definizione e metriche

Il concetto di Resilienza, soprattutto in riferimento alla rete elettrica, ha assunto maggiore rilevanza soltanto negli ultimi anni. In passato, infatti, il sistema era ancora giovane e il tema del cambiamento climatico non era ancora al centro dell'attenzione globale. Tuttavia, la resilienza è un concetto sfaccettato che può essere interpretato e definito in diversi modi dalle organizzazioni di tutto il mondo, in base alle loro pratiche ed esperienze con eventi estremi [1]. Per questi motivi, la definizione stessa di resilienza rimane ancora oggi oggetto di discussione e, attualmente, non esiste una formulazione universalmente condivisa. Una delle prime definizioni di resilienza è stata introdotta nel 1973 da C.S. Holling [7], che ha definito la resilienza dei sistemi ecologici come una misura della "persistenza dei sistemi e della loro capacità di assorbire cambiamenti e disturbi e mantenere

ancora le stesse relazioni tra popolazioni o variabili di stato”. Nel tempo, numerosi altri enti hanno lavorato per sviluppare una loro definizione di resilienza.

- Il *Joint Research Centre* (JRC), definisce la resilienza “la capacità di prepararsi e adattarsi alle mutevoli condizioni e di resistere e riprendersi rapidamente dalle interruzioni. La resilienza include la capacità di resistere e riprendersi da attacchi deliberati, minacce o incidenti naturali” [8].
- L’istituto *National Infrastructure Advisory Council* (NIAC) ha definito la resilienza delle infrastrutture: “la capacità di ridurre l’entità e/o la durata degli eventi perturbatori. L’efficacia di un’infrastruttura o di un’impresa resiliente dipende dalla sua capacità di anticipare, assorbire, adattarsi e/o riprendersi rapidamente da un evento potenzialmente perturbatore” [9].
- Secondo il *CIGRE Working Group*, per i sistemi di distribuzione elettrica, “la resilienza può essere ampiamente definita rispetto alla capacità del sistema di resistere a eventi rari ed estremi (tempeste di neve, uragani, terremoti, attacchi terroristici) e di riprendersi rapidamente al suo stato di resilienza pre-evento” [1].
- *TERNA* definisce resilienza, “la capacità del sistema e dei suoi componenti di assorbire e resistere a sollecitazioni che hanno superato i limiti di tenuta del sistema stesso e di riportarsi nello stato di funzionamento normale in modo rapido ed efficiente” [10].
- Un’altra definizione data da *CIGRE* afferma che: “La resilienza del sistema di alimentazione è la capacità di limitare l’estensione, la gravità e la durata del degrado del sistema a seguito di un evento estremo” [11].

Seppur differenti, le interpretazioni precedenti condividono caratteristiche comuni che possono essere standardizzate per costituire la base di una definizione condivisa. Questi elementi si possono riassumere nella capacità del sistema di:

1. **Anticipare e sostenere** eventi dirompenti.
2. **Adattarsi e recuperare** rapidamente ed efficacemente dopo tali eventi.

Sulla base delle definizioni esistenti e di alcune analisi condotte, in [12] viene proposta una definizione universale di resilienza dei sistemi di alimentazione, come: “la capacità ricorrente di un sistema di alimentazione di anticipare, sopravvivere, sostenere, riprendersi e adattarsi a eventi ad alto impatto e bassa frequenza”.

Definire in modo univoco la resilienza dei sistemi elettrici è fondamentale perché consente di uniformare le **metriche di valutazione** della stessa, rendendo possibile

una misurazione accurata e orientando con maggiore efficacia le strategie e gli investimenti volti a potenziarla. Tuttavia, sviluppare una metrica di resilienza universale è una sfida complessa, poiché dipende dalle caratteristiche specifiche degli studi svolti, che variano principalmente in base agli obiettivi predefiniti [13]. Uno strumento ampiamente utilizzato in letteratura è il modello del “**trapezoide di resilienza**”, mostrato in Figura 1.2, che supera le limitazioni del precedente a triangolo. Una versione di questo modello è presentata in [14], nel quale vengono proposte metriche e indicatori, dipendenti dal tempo, che permettono di quantificare la resilienza operativa e infrastrutturale di un sistema elettrico e misurarne la capacità di risposta e recupero a seguito di un evento HILP.

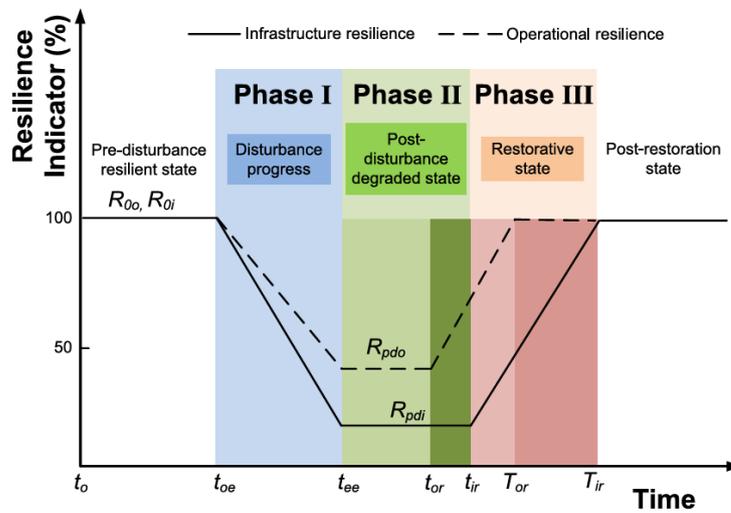


Figura 1.2: Trapezoide di resilienza multi-fase [14]

Il trapezoide di resilienza, infatti, rappresenta graficamente la risposta di un sistema di fronte ad un evento dirompente, ed è in grado di fornire una visione completa del comportamento dell’infrastruttura durante tutti gli stadi dell’evento. Nel trapezoide di resilienza si possono evidenziare tre fasi principali:

- **Fase I: Progresso del disturbo**, tra il momento dell’evento e la fine dell’evento, in cui il sistema perde gradualmente gran parte del suo livello di resilienza.
- **Fase II: Stato di degradazione post-disturbo**, dopo la fine dell’evento e prima dell’inizio del ripristino, in cui il sistema permane in uno stato di degrado prima che vengano intraprese azioni di ripristino.

- **Fase III: Stato di ripristino**, operativo e infrastrutturale, in cui vengono attuate azioni di ripristino per recuperare la resilienza e riportarla al livello pre-evento.

Grazie a questa rappresentazione, è possibile ottenere una valutazione del livello di resilienza, evidenziando non solo l'impatto immediato dell'evento, ma anche la capacità del sistema di adattarsi e recuperare nel tempo.

1.3 Il fenomeno delle Ondate di Calore

Le **Ondate di Calore** costituiscono uno degli eventi HILP che il sistema elettrico mira a fronteggiare con maggiore resilienza. Il presente elaborato pone l'attenzione su questo fenomeno e analizza la risposta della rete elettrica di fronte agli eventi di questa natura.

1.3.1 Generalità ed implicazioni delle ondate di calore sul sistema elettrico

Le **ondate di calore** sono fenomeni meteorologici estremi che si verificano durante i mesi estivi e sono caratterizzati da periodi prolungati di temperature elevate, spesso accompagnati da assenza di precipitazioni [15]. Si tratta di eventi che, a causa del cambiamento climatico, stanno diventando sempre più frequenti, intensi e diffusi. Negli ultimi decenni, la frequenza delle estati calde e secche in Europa è aumentata notevolmente ed è destinata a moltiplicarsi [16, 17]. Tra gli eventi più devastanti, si ricorda quello del 2003, che causò più di 70.000 vittime, oltre che importanti danni economici. Numerosi studi, infatti, mettono in evidenza una stretta correlazione tra temperature estreme e mortalità, identificando le ondate di calore come uno dei fenomeni naturali più letali [3, 18]. Oltre che sulla salute umana, eventi di questa natura provocano gravi ripercussioni sull'economia, sull'agricoltura e sull'ambiente. Nel contesto del **sistema elettrico**, le ondate di calore hanno un impatto negativo su tutti e tre i principali livelli: **generazione, rete e carico** [19]. In particolare, gli effetti che provocano sono:

1. **Riduzione dell'efficienza delle centrali elettriche:** Le temperature elevate possono ridurre l'efficienza delle centrali termoelettriche, idroelettriche e persino fotovoltaiche, aggravando ulteriormente le difficoltà di approvvigionamento energetico.
2. **Aumento della domanda elettrica:** Durante le ondate di calore, la domanda di energia elettrica cresce notevolmente a causa dell'uso intensivo

di climatizzatori e sistemi di raffreddamento. Questo sovraccarico aumenta il rischio di stress per le infrastrutture elettriche, innescando situazioni di vulnerabilità.

- 3. Stress termico sulle infrastrutture elettriche:** Le elevate temperature aggravano le condizioni operative delle infrastrutture in diversi modi. Accelerano il processo di invecchiamento dei materiali isolanti, causano dilatazioni termiche delle linee elettriche, riducono la capacità di dissipare il calore accumulato, inoltre aumentano il rischio di incendi boschivi, i quali possono danneggiare ulteriormente le linee.

Le ondate di calore, dunque, mettono sotto pressione l'intero sistema elettrico, creando un circolo vizioso di criticità. La produzione delle centrali elettriche si riduce in concomitanza all'aumento della domanda di energia. A sua volta, l'aumento di carico amplifica lo stress termico sulle linee elettriche, dovuto all'aumento delle perdite per effetto Joule. Queste perdite si sommano al già sfavorevole innalzamento della temperatura dei cavi, causato direttamente dall'ondata di calore, aggravando ulteriormente la situazione.

La combinazione di questi eventi comporta un incremento significativo del numero di guasti [20], rendendo ancora più urgente la necessità di studiare, monitorare e prevedere le condizioni di caldo estremo. In risposta a questa situazione, l'**Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente** (ARERA) ha sollecitato i gestori dei sistemi di distribuzione a pianificare e implementare interventi mirati a potenziare la resilienza delle reti elettriche di fronte alle ondate di calore, offrendo al contempo incentivi a supporto di queste iniziative [15, 21]. E' opportuno che i miglioramenti previsti includano strategie appropriate durante tutte le fasi dell'evento, vale a dire: *prima dell'evento*, per prevenire o mitigare gli impatti; *durante l'evento*, per garantire una gestione efficace delle emergenze; e *dopo l'evento*, per ripristinare rapidamente il servizio e analizzare le criticità emerse.

1.3.2 Valutazione delle ondate di calore nei sistemi elettrici

Le ondate di calore, aumentando il rischio di guasti in rete, rappresentano una sfida emergente per i Gestori dei Sistemi di Distribuzione (DSO), i quali, in caso di interruzioni della fornitura elettrica non adeguatamente giustificate, sono soggetti al pagamento di penali stabilite dall'Autorità di Regolazione (ARERA) [22]. Tuttavia, in conformità alle recenti evoluzioni normative, ARERA ha stabilito che le interruzioni causate dalle ondate di calore possono essere riconosciute come eventi di forza maggiore [23]. Di conseguenza, queste non comportano penalità economiche per i distributori, a condizione che le cause siano opportunamente documentate come eventi eccezionali e non imputabili al normale esercizio del

sistema. Per determinare se un guasto possa essere effettivamente attribuito a una causa di forza maggiore, è essenziale disporre di una chiara definizione di **ondata di calore**. In genere, quest'ultima, è definita come un lungo periodo caratterizzato da temperature eccezionalmente elevate. Tuttavia, per classificare un evento come un'ondata di calore, è essenziale considerare diversi fattori: l'entità dell'aumento delle temperature, la durata dei giorni consecutivi di caldo estremo, il periodo dell'anno in cui si manifesta e la quantità di pioggia registrata. In [23], vengono discusse e proposte diverse definizioni di *ondata di calore*. Una di queste, in accordo con il Radarmeteo, descrive un'ondata di calore come un evento che soddisfa simultaneamente i seguenti criteri:

- La media delle temperature massime degli ultimi 7 giorni supera i 28 °C;
- La media delle temperature minime degli ultimi 7 giorni supera i 20 °C;
- Le precipitazioni totali degli ultimi 3 giorni sono inferiori a 5 mm.

Il rapido aumento del numero di ondate di calore nel tempo ha reso indispensabile trasformare le descrizioni qualitative del fenomeno in specifici indici capaci di quantificarlo e misurarlo con precisione. Uno di questi è proposto in [24], chiamato **Excess Heat Factor (EHF)** il quale è stato utilizzato per descrivere la presenza di ondate di calore in Grecia. L'indice *EHF* è dato dal prodotto di due fattori principali: EHI_{accl} , che valuta l'impatto delle ondate di calore sulla salute umana analizzando la capacità di adattamento della popolazione e EHI_{sig} , che valuta l'eccezionalità statistica dell'evento. Per l' i -esimo giorno, l'Excess Heat Factor è definito come segue:

$$EHF_i = EHI_{sig,i} \times \max[1, EHI_{accl,i}] \quad (1.1)$$

dove:

$$EHI_{accl,i} = \left[\frac{T_i + T_{i-1} + T_{i-2}}{3} \right] - \left[\frac{T_{i-3} + \dots + T_{i-32}}{30} \right] \quad (1.2)$$

$$EHI_{sig,i} = \left[\frac{T_i + T_{i-1} + T_{i-2}}{3} \right] - T_{95} \quad (1.3)$$

Tale indice quindi, oltre a indicare quando si verifica un'ondata di calore, aiuta a capire quanto sia intensa e se possa avere effetti sulla salute.

1.3.3 Conseguenze delle ondate di calore sulle infrastrutture elettriche

Le infrastrutture elettriche costituiscono l'elemento maggiormente esposto alle ondate di calore. In particolare, le linee in cavo, soprattutto se interrato, risultano tra i componenti più vulnerabili del sistema elettrico. Le **linee aeree**, nonostante siano direttamente esposte all'ambiente esterno, beneficiano del raffreddamento naturale offerto dall'aria circostante, che facilita la dissipazione del calore e ne attenua gli effetti termici. Al contrario, le **linee in cavo interrate**, seppur protette dall'esposizione diretta dei raggi solari e dagli eventi atmosferici, si trovano in una posizione svantaggiosa per la dissipazione termica. Questa condizione, unita al fatto che i materiali isolanti che le compongono invecchiano più rapidamente con le alte temperature, rende le linee elettriche in cavo particolarmente suscettibili ai guasti. A livello globale, numerosi studi hanno ormai dimostrato una chiara correlazione tra le ondate di calore e il crescente numero di guasti nei cavi interrati, in particolare, in corrispondenza dei **giunti**, considerati il punto debole del sistema [23]. L'aumento dei guasti è principalmente attribuibile al surriscaldamento dei cavi, generato dai seguenti fattori [25]:

1. **Perdite Joule:** Durante le giornate più calde, le perdite Joule aumentano significativamente a causa della maggiore domanda di energia elettrica per il raffreddamento degli edifici, determinando un incremento del calore prodotto dal cavo.
2. **Temperatura ambiente:** L'aumento della temperatura ambiente provoca un aumento delle temperature operative dei cavi. In accordo con la *Legge di Arrhenius*, (riportata nel paragrafo 3.3) l'aumento della temperatura accelera i processi di degradazione dei materiali isolanti, favorendo il loro invecchiamento e compromettendo la loro integrità nel tempo.
3. **Resistività del terreno:** L'aumento della temperatura ambiente, associato alla diminuzione delle precipitazioni, provoca una riduzione dell'umidità del suolo, comportando un incremento della resistività. Questo fenomeno ostacola la corretta dissipazione del calore generato dai cavi interrati verso l'ambiente esterno.

Durante il periodo estivo, quindi, le temperature effettive dei cavi interrati in media tensione (MT) possono superare i limiti massimi consentiti. In Italia, la portata di corrente per i cavi MT è regolata dalla **Norma CEI-UNEL 35027 (2009)** [26], la quale fornisce il valore di corrente nella condizione standard di cavi posati a una profondità nominale di 0,8 m, con una temperatura ambiente di 20 °C e in terreni con resistività termica di 1,5 K · m/W; dopo di che, fornisce dei fattori correttivi per tenere conto di condizioni di funzionamento differenti. Durante le

ondate di calore, valori di riferimento come la temperatura ambiente e la resistività del terreno possono essere di gran lunga superiori, causando una riduzione della portata in corrente del cavo. Questo fenomeno, se non gestito opportunamente, può aumentare notevolmente il rischio di guasti.

Sulla base dell'esperienza, la maggior parte dei guasti nei cavi interrati si verifica in corrispondenza dei giunti, con particolare riferimento alla giunzione degli schermi, che, secondo la testimonianza del personale "giuntista" delle imprese di posa cavi, è la componente che maggiormente tende a guastarsi. Nel corso di questo lavoro, verranno approfondite queste tematiche, al fine di analizzare le cause alla base di tali guasti e sviluppare soluzioni al fine di ridurli, specialmente durante le ondate di calore, quando le condizioni termiche sfavorevoli mettono a dura prova l'intero sistema elettrico.

Capitolo 2

Rete di Distribuzione MT

In questo capitolo vengono analizzate le principali caratteristiche delle reti di distribuzione MT, con riferimento al testo [27] come fonte principale. Successivamente, avvalendosi del materiale didattico riportato in [28, 29], viene affrontato il tema dello stato del neutro utilizzato nelle reti MT, elemento fondamentale per la gestione e la sicurezza degli impianti elettrici. Infine, si descrivono le caratteristiche della rete MT di Torino, tratte da [30], che rappresenta il caso di studio su cui si basano le analisi di questa tesi.

2.1 Struttura delle Reti MT

Le **reti di distribuzione MT** costituiscono il nucleo centrale del sistema elettrico, svolgendo il ruolo fondamentale di connessione tra la rete di trasmissione in alta tensione (AT) e la rete in bassa tensione (BT), che alimenta direttamente le utenze finali. L'energia elettrica viene prodotta in media tensione, generalmente intorno ai 10 kV e successivamente può essere impiegata direttamente per l'alimentazione di stabilimenti industriali, o inviata a stazioni elettriche MT/AT per essere trasmessa su lunghe distanze e successivamente distribuita.

La **rete MT** è costituita dalle *cabine primarie AT/MT* che la alimentano e dalle *linee elettriche MT*, che a loro volta forniscono energia elettrica alle cabine MT/BT e ai clienti in MT. I *valori di tensione* per le reti MT raccomandati dalle Norme CEI sono 10, 15, 20 e 30 kV, a cui sarebbe necessario attenersi al fine di favorire un processo di unificazione. Tuttavia, attualmente esistono alcune variazioni rispetto a questi valori standard, come ad esempio a Torino, dove si utilizza principalmente un valore di tensione pari a 22 kV, adottato in passato per specifiche esigenze locali. Le **linee di distribuzione MT** collegano le cabine primarie con le secondarie,

e possono essere **in cavo interrate** o **aeree**, a seconda della conformazione del territorio e delle necessità di tutela del paesaggio. In genere, le linee aeree sono utilizzate in zone rurali, mentre le linee interrate sono preferite in ambienti urbani, dove la visibilità delle linee aeree potrebbe compromettere l'estetica del paesaggio e dove lo spazio disponibile è limitato. La rete di distribuzione MT può assumere diverse **strutture**, ognuna con specifiche caratteristiche e vantaggi, a seconda delle necessità dell'area servita. Le strutture più comunemente utilizzate sono:

- **Struttura radiale:** È la configurazione più semplice in quanto è costituita da un singolo punto di alimentazione da cui si dipartono le linee principali con le rispettive derivazioni. Sebbene sia economica e facile da implementare, presenta dei limiti in caso di guasti: se una parte della rete viene danneggiata, l'intera zona collegata a quella linea perde l'alimentazione. Tale struttura è spesso utilizzata nelle aree rurali o a bassa densità abitativa.
- **Struttura magliata:** È più complessa e viene adottata per alimentare grossi carichi concentrati, per i quali è fondamentale assicurare il servizio elettrico. In questa struttura, le linee di distribuzione formano un circuito chiuso che consente di reindirizzare l'energia in caso di guasto su una parte della rete. Questo aumenta l'affidabilità del servizio e riduce i tempi di interruzione, garantendo continuità anche in caso di guasti.

Nella maggior parte dei casi, la rete di distribuzione MT adotta una struttura che combina le due configurazioni precedenti, ovvero è **debolmente magliata** ma, in condizioni normali di esercizio, viene **gestita in modo radiale** (Figura 2.1).

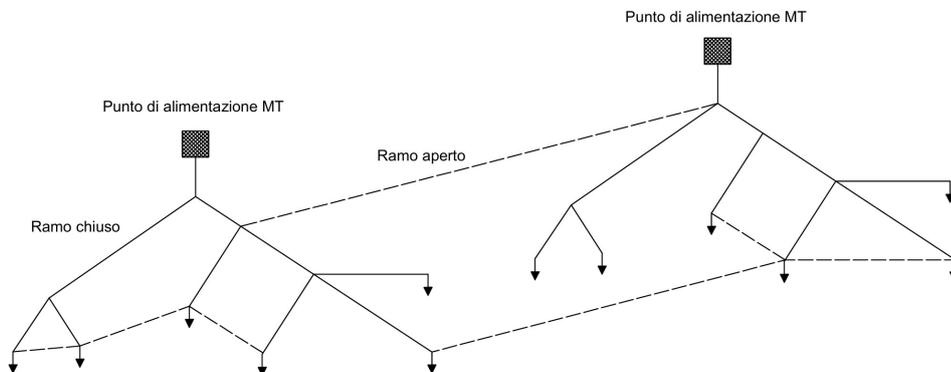


Figura 2.1: Schema rete MT debolmente magliata con esercizio radiale

In questa tipologia di struttura, alcuni rami ridondanti rimangono normalmente aperti e vengono chiusi soltanto all'occorrenza. Tale approccio consente, in caso di disservizi o guasti, di rialimentare le utenze tramite impianti contigui e interconnessi, assicurando così una maggiore affidabilità e continuità del servizio.

2.2 Stato del neutro delle Reti MT

Lo **stato del neutro** indica il modo in cui il conduttore di neutro di un sistema elettrico è collegato a terra. Nei sistemi MT, dove il neutro non è distribuito, ci si riferisce al collegamento del **centro stella** del secondario del trasformatore che alimenta la rete, noto anche come **punto di neutro**.

Questo concetto è fondamentale nella distribuzione dell'energia elettrica, in quanto influisce sul comportamento della rete in termini di continuità del servizio, entità della corrente di guasto, dispositivi di protezione contro i guasti e stress sui componenti. Le configurazioni di neutro variano in funzione del livello di tensione della rete. **In Italia**, per le reti MT, le soluzioni impiegate sono:

1. **Neutro isolato**, in cui il centro stella non viene connesso a terra.
2. **Neutro compensato**, in cui il centro stella è connesso a terra tramite *bobina di Petersen* con induttanza fissa o variabile, resistore in parallelo e un ulteriore resistore in serie.

In passato, il neutro isolato era l'unica soluzione impiegata, ma negli ultimi due decenni le condizioni operative del punto di neutro sono cambiate, passando gradualmente all'utilizzo del neutro compensato. Questa evoluzione ha migliorato la gestione delle correnti di guasto e l'affidabilità del sistema.

2.2.1 Neutro isolato

Il **neutro isolato** è una configurazione utilizzata in alcuni paesi europei, caratterizzata dall'aver il punto di neutro della rete non connesso direttamente a terra, ma isolato da essa, come mostrato in Figura 2.2. Questa soluzione è stata tradizionalmente adottata per la sua semplicità operativa.

In una rete a neutro isolato, in caso di **guasto monofase a terra**, si ha che:

- La **corrente di guasto** si richiude attraverso le *capacità parassite* verso terra delle linee e pertanto il suo valore dipende dall'entità di queste capacità. Queste ultime, a loro volta, dipendono dall'estensione della rete e dalla tipologie delle linee (in cavo o aeree). Le linee in cavo, essendo caratterizzate da capacità maggiori rispetto alle linee aeree, determinano correnti di guasto più elevate.
- Nelle **fasi sane** si verificano **sovratensioni** significative. In particolare, le tensioni delle fasi sane possono aumentare fino a raggiungere e superare il valore della tensione concatenata (se il guasto è franco), equivalente ad un incremento del 73% rispetto alla tensione nominale di fase.

Oltre alle sovratensioni a seguito di un guasto monofase, nei sistemi a neutro isolato possono verificarsi **sovratensioni transitorie** significative, dovute a:

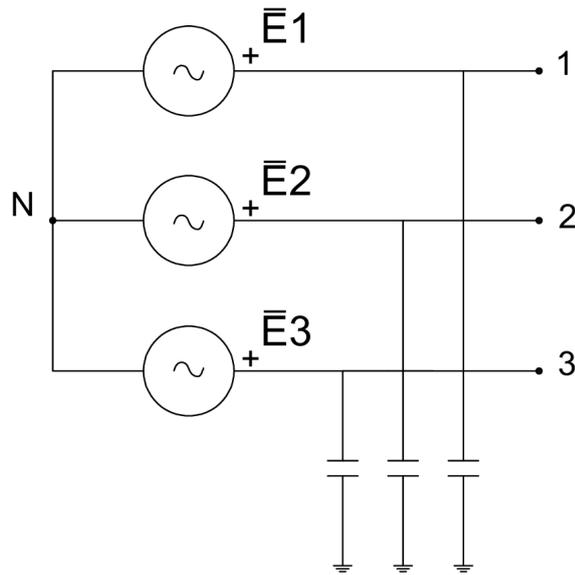


Figura 2.2: Sistema con neutro isolato

- **Origine atmosferica o interna (manovre):** fulmini o operazioni di commutazione.
- **Archi intermittenti a terra:** La presenza di archi intermittenti (sequenza di spegnimenti e riadescamenti dell'arco) può generare sovratensioni nelle fasi sane, che possono superare la tensione concatenata e risultare particolarmente dannose per i componenti della rete.

Negli ultimi anni, l'aumento delle linee in cavo e l'espansione della rete hanno portato a un incremento delle capacità parassite, causando un significativo aumento delle correnti di guasto nelle reti MT. Inoltre, le sovratensioni transitorie generate in questa configurazione rappresentano un rischio per l'affidabilità del sistema.

Per affrontare questi problemi e mitigare sia le correnti di guasto che le sovratensioni, in Italia si è quasi completamente abbandonata la soluzione di neutro isolato (che viene mantenuta per le linee con correnti di guasto monofase relativamente basse), adottando progressivamente la configurazione di **neutro compensato**, ormai prevalente nella stragrande maggioranza delle reti.

2.2.2 Neutro compensato

In un sistema con **neutro compensato** il punto di neutro della rete viene collegato a terra attraverso la **bobina di Petersen** con reattanza induttiva X_L , come

mostrato in Figura 2.3. Tale bobina non è fissa ma viene regolata (in modo continuo o discreto) in funzione della capacità complessiva della rete, in modo che la reattanza induttiva della bobina compensi la reattanza capacitiva delle linee. Lo **scopo principale** di questa bobina, infatti, è quello di ridurre la corrente di guasto monofase. In condizioni ideali, dette di "risonanza", l'induttanza della bobina può essere accordata in modo tale che la corrente di guasto si annulli completamente. Tuttavia, la condizione di risonanza non è desiderabile; si preferisce sotto-compensare del 5% in modo da avere una corrente residua ohmico-capacitiva; ciò, per favorire l'intervento delle protezioni di guasto a terra ed evitare il disservizio del trasformatore AT/MT per squilibrio di tensione.

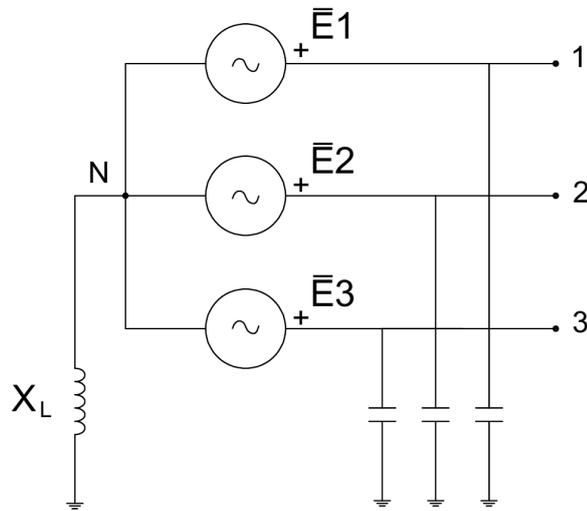


Figura 2.3: Sistema con neutro compensato

Nel sistema di neutro compensato, oltre all'induttanza X_L , vengono inserite ulteriori componenti per migliorare l'efficacia del sistema. In particolare, si aggiunge una resistenza R_p in parallelo all'induttanza, per evitare una completa compensazione della corrente capacitiva, mantenendo così una componente resistiva rilevabile dai dispositivi di protezione. Inoltre, viene introdotta una resistenza in serie R_s , con funzione dinamica, per gestire in modo più efficace le condizioni transitorie. L'insieme di questi elementi costituisce un'impedenza, che prende il nome di **impedenza di compensazione**.

L'utilizzo del neutro compensato offre **vantaggi** significativi sia in termini di correnti di guasto sia in termini di sovratensioni. In particolare, la connessione del punto di neutro tramite tale impedenza permette di:

- **Favorire l'auto-estinzione dei guasti a terra:** La drastica riduzione della corrente di guasto aumenta significativamente la probabilità che l'arco si

spenga spontaneamente, evitando l'intervento degli interruttori di linea.

- **Ridurre i costi degli impianti di terra:** Con correnti di guasto più basse, gli impianti di terra delle cabine MT/BT possono essere progettati con criteri meno onerosi.
- **Attenuare le sovratensioni transitorie:** Le sovratensioni di origine atmosferica e di manovra risultano attenuate rispetto al caso di neutro isolato.
- **Risolvere le criticità legate agli archi intermittenti a terra:** Nel caso di neutro compensato, non sussiste il rischio di generare sovratensioni dannose in presenza di fenomeni di arco intermittente a terra.

Sebbene il neutro compensato offra vantaggi significativi, non elimina del tutto alcune problematiche. In particolare, così come nel caso di neutro isolato, durante il **guasto a terra**, le fasi sane sono soggette a **sovratensioni**, con una variazione della loro tensione da quella di fase a quella concatenata, e anche oltre.

L'incremento delle tensioni sulle fasi sane aumenta notevolmente il rischio di un **secondo guasto a terra**, che può verificarsi a causa del cedimento dell'isolamento, in un punto differente rispetto al primo. Nelle linee in cavo, il secondo guasto tende a manifestarsi nei punti più vulnerabili della rete: *i giunti*. Questa condizione, nota come **doppio guasto a terra**, rappresenta una situazione altamente sfavorevole per la rete, poiché può compromettere gravemente la continuità del servizio.

2.3 IRETI e la rete di distribuzione di Torino

La rete di distribuzione MT della città di Torino è gestita da **IRETI**, una società del **Gruppo IREN**, che opera come *Distribution System Operator (DSO)*, svolgendo attività fondamentali per il funzionamento della rete elettrica, il cui logo è mostrato in Figura 2.4. IRETI si occupa infatti della manutenzione ordinaria e straordinaria, della sorveglianza, del telecontrollo e delle operazioni di pronto intervento, garantendo così la continuità del servizio di distribuzione elettrica.



Figura 2.4: Logo IRETI [30]

La rete di distribuzione MT di Torino è alimentata dalla **rete di trasmissione nazionale** (RTN) di Terna, attraverso *10 Cabine Primarie* (CP) AT/MT, con una tensione primaria di 132 kV o 230 kV.

Queste cabine sono dotate di impianti di trasformazione che riducono la tensione da AT a MT, consentendo così l'alimentazione della rete di distribuzione MT che a sua volta alimenta le 3.351 cabine secondarie MT/BT. Nella Tabella 2.1 è riportato l'elenco delle CP e i corrispondenti valori di potenza installata, mentre nella Figura 2.5 è possibile individuare la posizione delle CP nella città di Torino.

Tabella 2.1: Elenco Cabine Primarie rete Torino [30]

CABINA PRIMARIA	TENSIONE [kV]	N° TRAFI AT/MT	POTENZA INSTALLATA [MVA]
Lucento	132	2	126
Sud Ovest	132	4	264
Monterosa	132	4	249
Martinetto	220	3	226
Levanna	220	2	118
Sud	220	3	189
Ovest	220	2	118
Stura	220	3	181*
Centro	220	2	126
Arbarello	220	2	126

La rete MT è prevalentemente costituita da **linee in cavo interrato**, avente lo schermo metallico collegato sia in cabina primaria che secondaria. Ha un'estensione di **2080 km**, il che testimonia la complessità e la densità della rete che serve una popolazione di oltre 870.000 abitanti.

Il livello di **tensione di esercizio** della rete MT è 22 kV, dovuto all'evoluzione storica della rete.

La rete di distribuzione di Torino adotta un sistema a **neutro compensato**, mediante l'utilizzo della bobina di Petersen, che consente di ridurre l'entità della corrente di guasto monofase a terra e offre ulteriori vantaggi, già descritti nel paragrafo precedente.

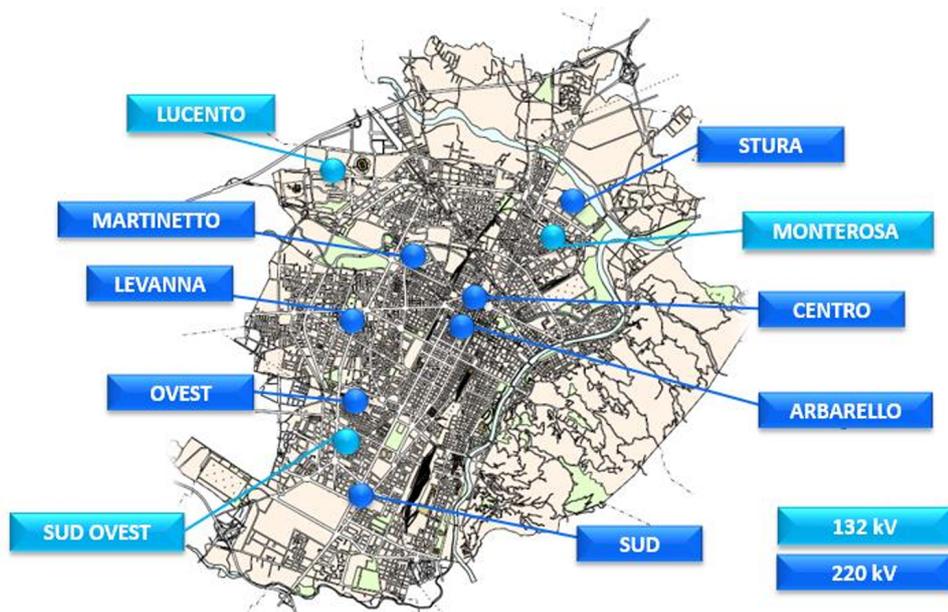


Figura 2.5: Localizzazione Cabine Primarie rete Torino [30]

Capitolo 3

Linee elettriche in cavo MT

Le linee elettriche sono fondamentali per il trasporto dell'energia nelle reti di trasmissione e distribuzione, e si suddividono in *linee aeree*, con conduttori nudi, e *linee in cavo*, che possono essere aeree o interrate. Le linee aeree sono principalmente utilizzate per la trasmissione su lunghe distanze, mentre quelle in cavo interrate sono preferite per la distribuzione. In questo capitolo si approfondisce il tema delle **linee elettriche in cavo interrate MT**, un argomento di rilevante importanza sia per il loro ampio impiego che per la loro particolare vulnerabilità alle ondate di calore. Nella prima parte viene esaminata la generica struttura dei cavi MT. Successivamente, viene approfondito il tema degli schermi dei cavi, poiché la scelta del tipo di connessione a terra degli schermi è fondamentale per la prevenzione dei guasti durante le ondate di calore. In seguito, il capitolo analizza il fenomeno dell'invecchiamento termico dei cavi, un fattore determinante per la loro durata e prestazioni. Infine, vengono evidenziate le criticità legate ai giunti, che rappresentano il punto debole delle reti MT. Per lo sviluppo di questo capitolo, il riferimento principale è il testo [31]. Inoltre, per approfondire il tema degli schermi dei cavi, sono stati consultati l'articolo [32] e la guida *IEEE* [33], i quali forniscono un'analisi dettagliata delle soluzioni disponibili.

3.1 Struttura dei cavi MT e i loro accessori

Un **cavo elettrico** è definito come l'insieme dei conduttori, degli isolanti, delle guaine e delle armature di protezione o di schermatura. I cavi di potenza destinati al trasporto dell'energia elettrica sono distinti in base ai livelli di tensione. I cavi MT, in particolare, sono contraddistinti dai valori di U_o/U compresi tra 0,6/1 kV e 18/30 kV, dove:

- U_o rappresenta la tensione nominale di isolamento, a frequenza industriale, in kV efficaci, tra un conduttore isolato qualsiasi e la terra.
- U rappresenta la tensione nominale di isolamento, a frequenza industriale, in kV efficaci, tra due conduttori isolati qualsiasi del cavo.

Nella Figura 3.1 è illustrata la tipica struttura di un **cavo unipolare MT**, in cui è possibile individuare gli elementi che lo costituiscono:

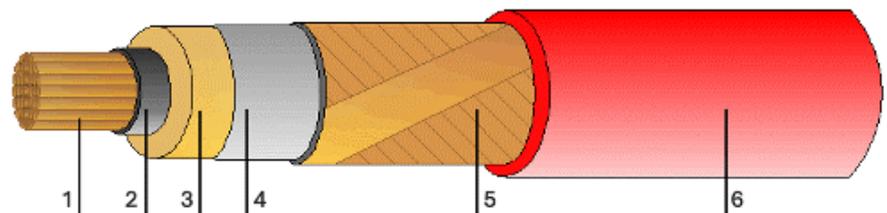


Figura 3.1: Struttura cavo unipolare MT

1. **Conduttore:** costituito da una o più corde, generalmente di rame o alluminio, destinate alla conduzione della corrente elettrica.
2. **Schermo semi-conduttivo interno:** un sottile strato di materiale semi-conduttivo applicato sulla superficie interna dell'isolante, che aderisce perfettamente ad esso. La sua funzione è quella di uniformare le irregolarità superficiali dei conduttori, garantendo un contatto equipotenziale tra conduttore e isolante al fine di evitare concentrazioni di campo elettrico all'interfaccia.
3. **Isolante:** un rivestimento di materiale dielettrico che avvolge il conduttore, progettato per resistere ai gradienti di tensione e alle sovratensioni elettriche nel corso della vita utile del cavo.
4. **Schermo semi-conduttivo esterno:** un sottile strato di materiale semi-conduttivo applicato sulla superficie esterna dell'isolante, con lo scopo di garantire l'equipotenzialità del contatto tra l'isolante, dove il campo elettrico non è nullo, e lo schermo metallico, dove il campo elettrico è nullo, evitando così concentrazioni di campo elettrico all'interfaccia.
5. **Schermo metallico:** rivestimento metallico collegato a terra, necessario per confinare il campo elettrico all'interno del cavo e anche con la funzione di drenare verso terra le correnti capacitive, le correnti di corto circuito omopolare e le correnti indotte da cavi vicini.
6. **Guaina esterna:** strato protettivo più esterno del cavo, realizzato in materiale termoplastico estruso. La sua funzione principale è quella di impedire l'ingresso di umidità e proteggere il cavo contro gli agenti esterni.

L'utilizzo di linee elettriche in cavo richiede l'impiego di **accessori** indispensabili per la messa in opera e il corretto funzionamento delle linee. Per motivi legati al trasporto e al montaggio, i cavi elettrici di uso comune vengono forniti in pezzature (generalmente di 300–1000 metri rispettivamente per le linee in media e alta tensione) avvolti su bobine. Gli accessori in grado di garantire la continuità elettrica sia tra le varie pezzature di cavo, sia tra il cavo e altre apparecchiature esterne sono rispettivamente i **giunti** e i **terminali**. In particolare:

- Il **giunto** è definito come l'accessorio che consente di collegare due tratti di cavo tra loro, ripristinandone l'isolamento, la continuità elettrica degli eventuali schermi o guaine metalliche e la protezione dagli agenti esterni. Esso può essere un manufatto prefabbricato o realizzato in sito. Le tecnologie di giunto più utilizzate oggi sono:
 - **Giunto termo-restringente**, mostrato in Figura 3.2, costituito da un tubo di materiale plastico che, una volta applicato al cavo e riscaldato, si restringe adattandosi saldamente al conduttore. In questo modo, ripristina l'isolamento e la protezione del cavo.



Figura 3.2: Giunto termo-restringente

- **Giunto auto-restringente**, mostrato in Figura 3.3, il quale si adatta automaticamente alla dimensione del cavo senza la necessità di riscaldamento, rendendo l'installazione più semplice e veloce. Tuttavia, offre una protezione leggermente meno resistente in ambienti estremi rispetto al giunto termo-restringente.



Figura 3.3: Giunto auto-restringente

- Il **terminale** è l'accessorio che costituisce il punto di arrivo o di partenza di una linea in cavo, nonché l'elemento di connessione tra le linee in cavo

e un altro elemento di un sistema elettrico (linea aerea, sistema di sbarre, trasformatore). Questo accessorio racchiude l'estremità del cavo e provvede al passaggio dei conduttori dall'isolante del cavo ad un altro mezzo (aria o altro mezzo isolante). Inoltre, a seconda del sito di installazione, i terminali possono assumere configurazioni differenti. Un esempio di terminale è illustrato in Figura 3.4.



Figura 3.4: Terminale termo-restringente per esterno

Entrambi gli accessori devono soddisfare i seguenti requisiti fondamentali:

- Garantire l'isolamento tra le parti in tensione e la terra.
- Assicurare la capacità di trasporto di corrente del cavo.
- Offrire un'affidabilità e una durata operativa almeno equivalenti a quelle del cavo.

3.2 Schermi metallici dei cavi MT

Lo **schermo metallico** è uno degli strati fondamentali del cavo MT. Può essere realizzato mediante fili di rame o con nastri di alluminio e viene sempre collegato a terra, in almeno una delle due estremità del cavo. La sua funzione principale è *confinare il campo elettrico* all'interno del cavo, garantendo una distribuzione radiale simmetrica della tensione all'interno del dielettrico. Nell'articolo [34] vengono analizzate in dettaglio tutte le funzionalità dello schermo e le ragioni tecniche che ne giustificano l'impiego. Per sottolineare l'importanza della schermatura, l'articolo presenta uno studio comparativo delle linee di campo elettrico in un cavo schermato e in un cavo non schermato posizionato su un piano. Come illustrato nella Figura 3.5, si osserva che:

- In un cavo unipolare **schermato**, il campo elettrico è uniforme e rimane confinato all'interno dell'isolante. Le superfici equipotenziali sono concentriche al cavo.
- In un cavo unipolare **non schermato**, le linee di campo si estendono al di fuori del cavo; il campo elettrico non è confinato all'interno dell'isolante e risulta non

uniforme lungo la superficie dell'isolante. Le superfici equipotenziali risultano sempre concentriche ma sono decentrate rispetto al cavo.

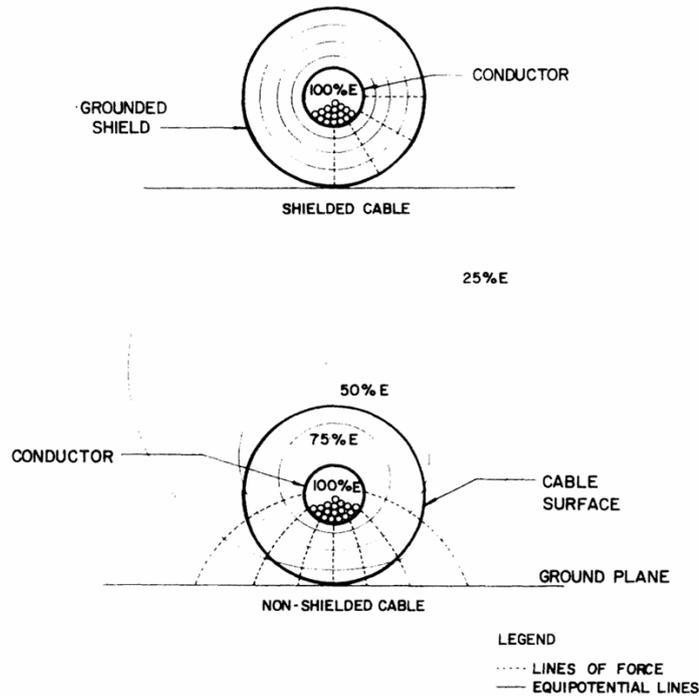


Figura 3.5: Configurazioni del campo elettrico: cavo schermato e non schermato. [34]

L'assenza di una distribuzione uniforme della tensione provoca sulla superficie del cavo stress elettrici, dovuti sia a componenti longitudinali sia tangenziali della tensione. Inoltre, in un cavo non schermato, la tensione che si genera tra i diversi punti della superficie del cavo e il piano a potenziale zero può raggiungere valori elevati, superando la rigidità dielettrica dell'aria circostante. Questo fenomeno può causare lo sviluppo dell'effetto corona. Di conseguenza, possono formarsi crepe e tracce sulla superficie del rivestimento o dell'isolante, compromettendone l'integrità nel tempo, e inoltre possono manifestarsi valori di tensione pericolosi in superficie. Per queste ragioni, lo schermo viene installato nei cavi con tensione superiore a 2 kV, eliminando i punti di forte sollecitazione localizzati sulla superficie interna ed esterna del cavo e garantendo la protezione contro i contatti indiretti.

3.2.1 Messa a terra degli schermi dei cavi MT

I rivestimenti metallici dei cavi, inclusi gli schermi, offrono una protezione adeguata contro i contatti diretti, a condizione che vengano rispettate le specifiche condizioni indicate nella **norma CEI 11-17** [35]. Una di queste condizioni prevede che tutti i rivestimenti metallici dei cavi debbano essere messi a terra almeno alle estremità di ciascun collegamento. In particolare:

- *Per collegamenti di grande lunghezza*, è raccomandata la messa a terra del rivestimento metallico, non solo alle estremità, ma anche in corrispondenza dei giunti, a intervalli non superiori a 5 km.
- *Per collegamenti più brevi*, generalmente inferiori a 1 km, è consentito collegare a terra il rivestimento metallico in un solo punto, a condizione che vengano adottate le seguenti precauzioni:
 - Nelle terminazioni e nelle interruzioni dei rivestimenti metallici, se accessibili, devono essere applicate protezioni adeguate per prevenire tensioni di contatto superiori ai limiti consentiti dalla norma CEI 11-1 [36].
 - La guaina protettiva non metallica del cavo deve essere progettata per resistere alla massima tensione di terra totale dell'impianto di messa a terra a cui è collegato il rivestimento metallico.

Sulla base di ciò, i principali tipi di collegamento a terra degli schermi metallici, utilizzati nelle reti MT, sono:

1. **Solid-bonding**: prevede il collegamento dello schermo del cavo a terra su entrambe le estremità, ossia sia presso la cabina primaria che quella secondaria.
2. **Single-point bonding**: consiste nel collegare lo schermo del cavo a terra esclusivamente a un'estremità, che può trovarsi presso la cabina secondaria, la cabina primaria o in un punto intermedio del cavo.

In entrambi i casi, dal punto di vista elettrico, in un circuito trifase realizzato con tre cavi unipolari, gli schermi costituiscono un circuito trifase accoppiato al circuito trifase dei conduttori principali.

Collegamento Solid-bonding

Nella configurazione *Solid-bonding*, gli schermi dei cavi sono messi a terra ad entrambe le estremità, come illustrato nello schema in Figura 3.6. Tuttavia, è possibile prevedere la messa a terra anche in punti intermedi, conformemente a quanto indicato nella norma CEI 11-17 [35]. Questo tipo di collegamento è la

soluzione più comunemente utilizzata nelle reti di distribuzione, grazie ai suoi numerosi vantaggi: è semplice da implementare, non richiede accessori particolari per la connessione a terra, ed è sicuro, poiché non si generano tensioni pericolose negli schermi.

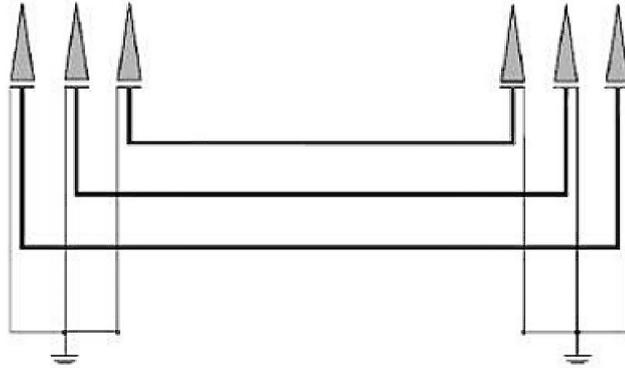


Figura 3.6: Collegamento Solid-bonding [31]

Tuttavia, il principale **svantaggio** di questa soluzione risiede nella circolazione di corrente attraverso lo schermo. Quando lo schermo del cavo è messo a terra a entrambe le estremità, si forma un circuito chiuso che consente il passaggio di correnti. Nello specifico, lo schermo del cavo può essere attraversato da:

- **Correnti indotte:** i conduttori principali, attraversati dalla corrente alternata di fase, generano un flusso magnetico variabile che, a sua volta, induce una forza elettromotrice (f.e.m.) nel circuito degli schermi, provocando la circolazione di correnti indotte. Più i cavi sono distanziati tra loro, maggiori sono le correnti indotte negli schermi.
- **Correnti di guasto:** durante la condizione di guasto a terra, lo schermo dei cavi funge da percorso di ritorno per la corrente di guasto. Di conseguenza, nel dimensionamento dello schermo metallico, le correnti di guasto giocano un ruolo importante.
- **Correnti capacitive:** si generano all'interno del dielettrico del cavo a causa della tensione elettrica alternata applicata. Queste correnti vengono drenate a terra tramite lo schermo del cavo.

La circolazione di queste correnti genera **perdite Joule** che contribuiscono all'aumento della temperatura di esercizio del cavo, limitando la quantità di corrente trasportabile. Per i cavi di distribuzione, una possibile strategia per ridurre le perdite di schermatura è l'aumento dell'impedenza dello schermo, ad esempio

diminuendo il contenuto metallico. Tuttavia, questa soluzione può compromettere la capacità dello schermo di condurre le correnti di guasto a terra durante il tempo necessario all'eliminazione del guasto. Di conseguenza, la riduzione delle perdite resistive nello schermo viene ottenuta principalmente attraverso specifiche configurazioni di messa a terra, note come tecniche di collegamento speciali. Una di queste consiste nel disconnettere gli schermi da terra in corrispondenza di un'estremità del cavo. Questa configurazione è nota come *Single-point bonding*.

Collegamento Single-point bonding

La configurazione di collegamento **Single-point bonding** è una delle soluzioni utilizzate nelle reti MT per risolvere il problema della circolazione di correnti negli schermi. In questa modalità, lo schermo metallico del cavo è messo a terra soltanto in corrispondenza di un'estremità, mentre l'altra estremità è isolata da terra. In questo modo, lo schermo del cavo non forma un anello chiuso con il terreno, evitando così il passaggio di correnti, sia indotte che di guasto, ed eliminando le perdite per effetto Joule. Tuttavia, uno **svantaggio** di questa configurazione è che, pur non essendoci circolazione di corrente, viene comunque indotta una *forza elettromotrice* nello schermo, a causa dell'induzione magnetica che si verifica tra il conduttore di fase e lo schermo.

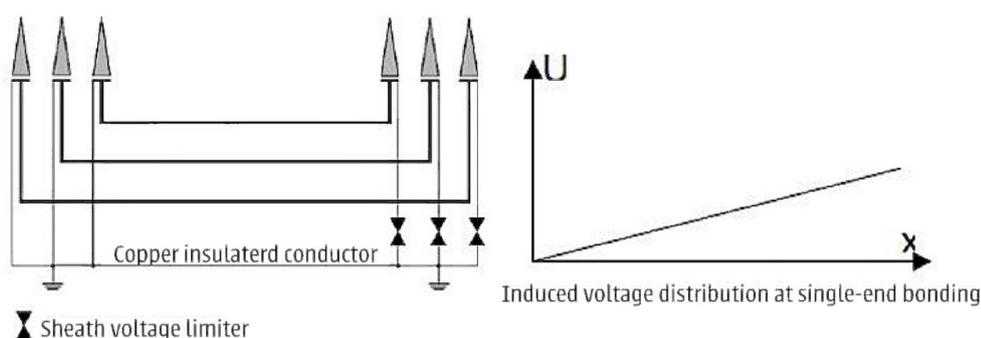


Figura 3.7: Collegamento Single-point bonding [31]

In Figura 3.7 è rappresentato lo schema di collegamento Single-point bonding e il corrispondente profilo di tensione che si sviluppa lungo lo schermo del cavo. La **tensione indotta** nello schermo è zero in corrispondenza dell'estremità connessa a terra, aumenta progressivamente con la distanza dal punto di messa a terra e raggiunge un massimo nel punto più lontano dall'estremità di messa a terra. Tale tensione è proporzionale alla lunghezza della linea e può raggiungere valori elevati, talvolta superiori alla capacità di tenuta della guaina isolante esterna del cavo. Per questo motivo, come suggerito dalla norma CEI 11-17 [35], questo schema di

collegamento è consigliato solo per correnti non superiori a 500 A e per distanze limitate, di norma non superiori a 1 km.

Per mitigare l'effetto delle sovratensioni e proteggere il cavo, le estremità isolate da terra vengono collegate a **scaricatori di tensione** (SVL: Sheath Voltage Limiters) connessi a stella, con il centro stella messo a terra. Gli scaricatori di tensione permettono di scaricare eventuali sovratensioni verso terra ma, durante il normale funzionamento, agiscono come circuiti aperti, impedendo la circolazione di corrente. Un ulteriore svantaggio di questa configurazione è l'utilizzo necessario di un **conduttore di terra**, posato parallelamente e vicino al circuito di cavi, che garantisce l'equipotenzialità del terreno alle due estremità. Esistono alcune varianti di questa configurazione. Ad esempio, per ridurre la tensione all'estremità isolata, si può ottenere un risultato migliore collegando lo schermo a terra in un punto intermedio del cavo, anziché ad un'estremità.

3.2.2 Correnti negli schermi e il loro impatto sui cavi

Come già accennato in precedenza, quando lo schermo dei cavi è collegato a terra ad entrambe le estremità (Solid-bonding), come avviene nelle reti di Torino, si instaurano all'interno dello schermo correnti elettriche, in quanto crea un circuito chiuso con il terreno. Queste correnti possono essere di due tipi principali: **correnti parassite**, indotte per effetto dell'induzione magnetica, e **correnti di guasto**.

Le correnti di guasto, tra le due tipologie, sono generalmente quelle di intensità maggiore. In caso di *guasto monofase a terra*, la configurazione a neutro compensato limita tali correnti, che risultano solitamente comparabili alla corrente di carico. Tuttavia, se le sovratensioni sulle fasi sane, provocate dal primo guasto, causano un *secondo guasto a terra*, la corrente di guasto aumenta sensibilmente, introducendo nello schermo una corrente ancora più intensa. Questo fenomeno contribuisce al riscaldamento del cavo, aumentando il rischio di danni termici.

L'altra tipologia di corrente che interessa lo schermo è quella parassita, che si manifesta durante il normale funzionamento del sistema e non è legata a situazioni di guasto. Queste correnti si generano a causa della circolazione della corrente di fase nel conduttore principale: essendo alternata, essa produce un campo magnetico variabile che induce una forza elettromotrice alternata nello schermo. Poiché quest'ultimo è collegato a terra, si crea un circuito chiuso attraverso cui scorre una corrente indotta. L'intensità della corrente parassita dipende direttamente dalla corrente di carico del conduttore: maggiore è il carico, più elevata sarà la corrente indotta nello schermo. Durante i **mesi estivi**, il carico tende ad aumentare a causa dell'uso intensivo dei **condizionatori**, che non solo incrementano la domanda elettrica complessiva, ma introducono anche un significativo **contenuto armonico** [37]. I condizionatori moderni, infatti, utilizzano inverter per regolare la velocità del compressore e ottimizzare i consumi, generando però componenti

armoniche che influenzano la corrente nei conduttori e, di conseguenza, anche quella negli schermi. L'aumento del contenuto armonico nella corrente di fase comporta un incremento della corrente indotta nello schermo. Questo fenomeno si spiega considerando che una corrente di fase ricca di armoniche può essere scomposta, attraverso un'analisi di Fourier, in una serie di componenti a frequenze diverse. Ciascuna di queste componenti induce una corrente nello schermo, contribuendo ad aumentare l'ampiezza totale della corrente indotta. Tuttavia, all'aumentare della frequenza delle armoniche, la crescita della corrente indotta tende a stabilizzarsi, poiché l'ampiezza delle componenti di ordine superiore si riduce progressivamente. Quindi, durante l'estate, a causa dell'elevata presenza di carichi non lineari come i condizionatori, la corrente permanente che scorre negli schermi dei cavi aumenta significativamente, principalmente per via dell'incremento del contenuto armonico nelle correnti di fase.

Sia le correnti parassite che quelle di guasto, generando perdite Joule, costituiscono una **fonte di degradazione termica** per i cavi e le loro giunzioni. Il riscaldamento continuo, aggravato dalle condizioni operative critiche tipiche del periodo estivo e dalla possibile presenza di difetti nelle connessioni tra le schermature dei cavi e dei giunti, aumenta il rischio di guasti nelle linee interrate, in particolare in corrispondenza dei giunti. Quindi, sebbene le correnti negli schermi non siano la causa diretta dei guasti, esse ne favoriscono il verificarsi.

3.3 Invecchiamento termico dei cavi

L'**invecchiamento** di un cavo elettrico si riferisce ai cambiamenti *irreversibili* delle proprietà funzionali del materiale isolante, il quale, a seguito di processi interni, subisce un deterioramento graduale durante la sua vita operativa. Questo processo porta al cedimento del sistema quando le proprietà dell'isolamento degradano a tal punto da impedire il corretto funzionamento del cavo. Una delle cause principali dell'invecchiamento è legata agli **stress termici** a cui sono sottoposti i cavi durante il loro utilizzo. Secondo la **legge di Arrhenius** (1889), l'aumento della temperatura accelera tutte le reazioni chimiche, inclusi i processi di degradazione dei materiali isolanti. Essa è espressa dalla seguente formula:

$$t = A \cdot e^{\frac{k}{T}} \quad (3.1)$$

dove:

- t è la vita termica del materiale isolante [unità temporali]
- A e k sono delle costanti
- T è la temperatura assoluta [K]

Dalla formula (3.1) si evince che all'aumentare della temperatura, la vita termica dell'isolante diminuisce. Il principale fattore che provoca il riscaldamento dei cavi è il passaggio delle correnti elettriche al loro interno, le quali generano calore per l'effetto Joule. Affinché i cavi abbiano una vita utile sufficientemente lunga, in funzione del tipo di materiale isolante, vengono stabiliti dei limiti di **temperatura di esercizio** che non devono essere superati. La temperatura di esercizio è quindi il principale parametro di riferimento per il dimensionamento termico di una linea elettrica interrata. Se si traccia l'equazione (3.1) su un diagramma logaritmico, avente in ascissa $\log_{10} t$ e in ordinata la temperatura assoluta T , si ottiene la "curva di vita" del materiale isolante. Quindi, applicando il logaritmo, si ottiene:

$$\log_{10} t = \log_{10} A \cdot + \frac{k}{T} \log_{10} e \quad (3.2)$$

Nella Figura 3.8 sono riportate le curve di vita dei materiali isolanti comunemente utilizzati nei cavi, il **PVC** e la gomma **EPR**.

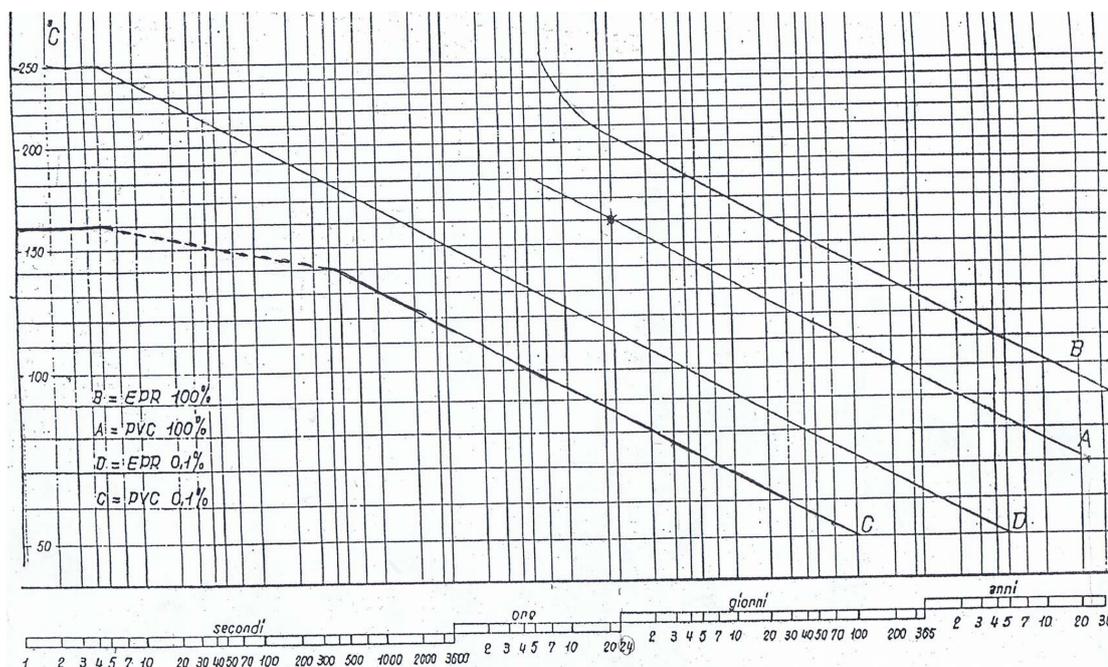


Figura 3.8: Curve di vita termica per PVC (curve A e C) ed EPR (curve B e D) [31].

Osservando le curve A e B, si rileva che, per garantire una vita utile di 30 e 20 anni rispettivamente, le temperature massime di esercizio sono pari a 90°C per l'EPR e 70°C per il PVC. Un altro materiale isolante comunemente utilizzato nei cavi MT è l'XLPE, che ha una temperatura massima di esercizio di 90°C. Di conseguenza,

un cavo viene dimensionato in base al materiale isolante, in modo che la corrente che lo attraversa non superi la temperatura massima consentita.

Tuttavia, nei mesi più caldi dell'anno, l'aumento della temperatura ambiente e l'elevata resistività termica del terreno, che ostacola la dissipazione del calore, possono portare al superamento di tali soglie. A ciò si aggiunge il contributo delle correnti negli schermi, che intensificano l'innalzamento termico, accelerando il processo di degradazione del cavo e aumentando il rischio di guasti prematuri.

L'invecchiamento termico dei cavi, strettamente legato all'aumento della temperatura, spiega il maggior numero di guasti nei cavi interrati MT registrati durante il periodo estivo.

3.4 Criticità dei giunti

L'esperienza sul campo e diversi studi hanno dimostrato che, durante le ondate di calore, la maggior parte dei guasti nei cavi interrati MT si verifica in corrispondenza dei **giunti**, i quali rappresentano i punti più vulnerabili del sistema [25, 38]. Sebbene siano progettati con tecnologie sempre più avanzate, i giunti presentano difetti e irregolarità introdotte durante le fasi di costruzione e installazione, spesso eseguite in condizioni operative difficili.

La principale **criticità** dei giunti risiede infatti nella **complessità dell'installazione**, che, se non effettuata in modo adeguato, può comportare:

- ingresso di umidità o impurità all'interno degli strati che compongono il giunto;
- elevate resistenze di contatto tra i conduttori, o tra la giunzione delle schermature;
- formazione di vacuoli d'aria nelle interfacce tra materiali diversi, o all'interno dell'isolamento.

All'interno del giunto, i difetti presenti possono favorire l'insorgenza di **fenomeni di scarica parziale**, che contribuiscono ulteriormente al deterioramento del materiale dielettrico, aggravando la situazione. L'innesco di queste scariche è attribuibile al fatto che, sebbene in un giunto ideale il campo elettrico sia di natura radiale e di intensità pari a pochi kV/mm, esso subisce un notevole incremento in prossimità dei difetti o dei vacuoli presenti nell'isolamento [39], come illustrato nella Figura 3.9. Di conseguenza, in corrispondenza di questi vacuoli, il campo elettrico può raggiungere valori superiori alla rigidità dielettrica del gas contenuto in essi, provocando così l'insorgere della scarica.

Queste scariche parziali, oltre a rappresentare una fonte di degradazione per il materiale isolante, generano una certa quantità di calore, che contribuisce all'incremento della temperatura locale del giunto. Il verificarsi di questo meccanismo di

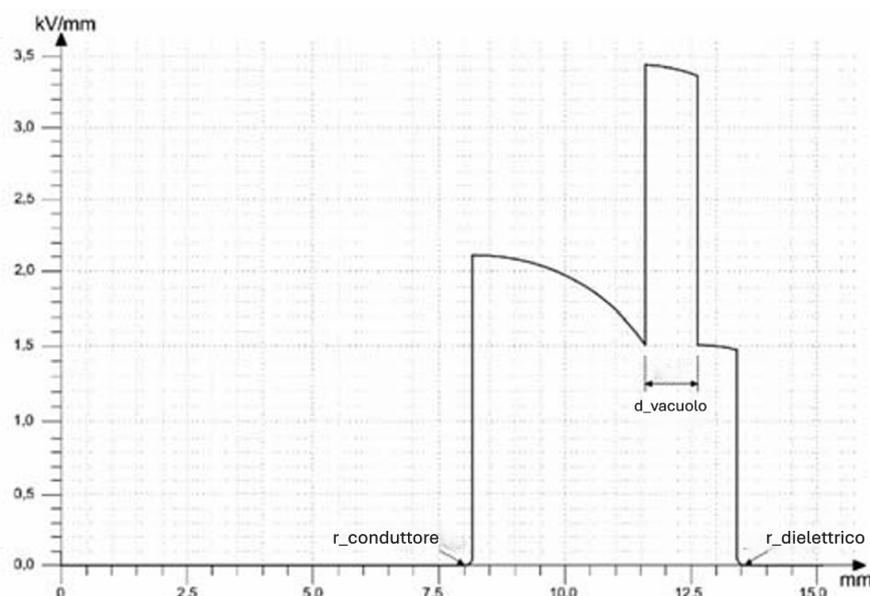


Figura 3.9: Andamento generale del campo geometrico elettrico all'interno del materiale isolante di un giunto per cavo MT 18/30 kV in presenza di un vacuolo ($d_{vacuolo}$) tra il conduttore ($r_{conduttore}$) e la parte esterna del materiale dielettrico ($r_{dielettrico}$) [39]

scarica diventa più probabile con l'aumento della temperatura poiché comporta una riduzione delle tensioni di innesco. L'incremento delle scariche parziali provoca l'espansione dei vuacoli all'interno dell'isolante, favorendo la formazione di **alberamenti elettrici**¹, che portano alla rottura dell'isolamento e al conseguente guasto del giunto del cavo interrato MT. L'esperienza sul campo ha evidenziato che molti guasti nei giunti si verificano in corrispondenza della giunzione tra gli schermi, spesso visibilmente danneggiata (Figura 3.10). L'analisi di diversi giunti rimossi dalla rete mostra, infatti, che il difetto più evidente si manifesta spesso nella zona di sovrapposizione delle schermature metalliche tra il giunto e il cavo [41], presumibilmente a causa di giunzioni non saldate, che determinano un'elevata resistenza di contatto nella giunzione dello schermo.

Tale resistenza, se attraversata da corrente, favorisce la formazione di punti caldi, che accelerano la degradazione del materiale isolante, portando infine alla rottura definitiva del giunto.

¹L'**alberatura elettrica** (electrical treeing) è un fenomeno di degrado dell'isolamento polimerico ad alta tensione in cui si formano strutture ramificate simili a alberi che crescono attraverso il materiale isolante [40].



Figura 3.10: Guasto nel giunto del cavo interrato MT: tipico collegamento danneggiato tra la schermatura del cavo e lo schermo di giunzione [41].

Tuttavia, i guasti nel giunto non dipendono direttamente dallo stress termico. È più ragionevole ritenere che aumenti di temperatura elevati e prolungati possano innescare localmente scariche parziali in difetti già esistenti, dove un campo elettrico rafforzato è sufficiente a ionizzare vacuoli, facilitando così la rottura finale.

In conclusione, le temperature estive più elevate non sono la causa diretta dei guasti, ma aumentano significativamente la probabilità che, in presenza di difetti o cavità nei giunti dei cavi MT, si verifichi un'attività di scarica parziale che porta alla rottura definitiva [23].

Capitolo 4

Dimensionamento dei cavi interrati MT

La progettazione di un cavo per il trasporto di energia elettrica consiste nell'individuare la **sezione** ottimale del conduttore, in modo da garantire il passaggio della **corrente nominale** I_n senza superare la **temperatura massima di esercizio** θ_{max} consentita dall'isolamento. Durante il funzionamento, infatti, il cavo genera perdite di energia dovute alla conversione di energia elettrica in calore. Quest'ultimo, per essere dissipato, deve attraversare i vari strati di materiali presenti tra il conduttore e l'ambiente esterno. Pertanto, la **temperatura del cavo** θ_c dipende non solo dal calore generato al suo interno, ma anche dalla conducibilità termica dei materiali utilizzati e dalle caratteristiche dell'ambiente circostante. Il **processo progettuale** prevede di definire una configurazione del cavo e, successivamente, di verificare se le dimensioni scelte sono adeguate dal punto di vista termico, tenendo conto delle condizioni di posa. In Italia, la norma che regola la portata dei cavi interrati è la **CEI-UNEL 35027** intitolata "*Cavi elettrici con tensione nominale da 1 kV a 30 kV - Portate di corrente in regime stazionario - Posa in aria ed interrata*" [26]. Questa norma, a sua volta, si basa sulla serie di **Norme IEC 60287** [42], articolata in otto fascicoli, che affronta in dettaglio il tema delle portate dei cavi elettrici in regime permanente. In particolare, la norma IEC 60287 fornisce metodi analitici per determinare la **corrente nominale ammissibile** dei cavi MT, tenendo conto dell'aumento di temperatura consentito, della resistenza del conduttore, delle perdite e delle resistività termiche di tutti gli elementi presenti tra il conduttore e l'ambiente esterno. Tali metodi si basano sul **modello termico** del cavo e sfruttano l'*analogia termica-elettrica* per analizzare la trasmissione del calore dei cavi verso l'esterno, in diverse condizioni operative e di posa.

In questo capitolo viene presentato il modello termico dei cavi MT, con l'obiettivo di determinare la portata termica massima del cavo e di evidenziare l'influenza delle condizioni ambientali sulla corrente nominale. Per lo sviluppo del capitolo si fa riferimento al libro di testo [31], alla norma IEC 60287 [42] e al materiale didattico [43]. Infine, il modello termico generale viene applicato ai casi specifici di una terna di cavi MT unipolari interrati a "Elica visibile" in tubo e di un giunto tripolare interrato, al fine di stimare la temperatura raggiunta dal cavo e dal giunto in funzione della corrente che li attraversa e delle condizioni ambientali.

4.1 Modello termico di un cavo unipolare MT

Il **modello termico** di un cavo elettrico può essere descritto attraverso un'analogia con i circuiti elettrici. Nel caso di un **cavo unipolare interrato**, seguendo le indicazioni della parte 2-1 della norma IEC 60287 [42] e facendo riferimento a [43], è possibile calcolare le **resistenze termiche** che intercorrono tra il conduttore e l'aria circostante.

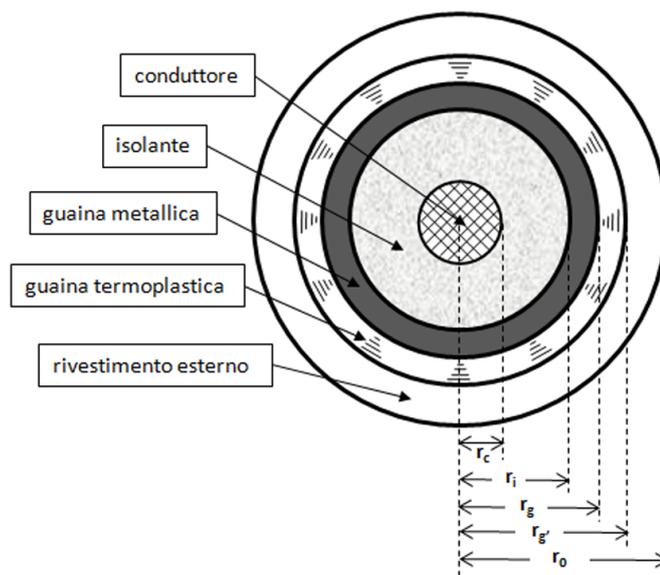


Figura 4.1: Schema cavo unipolare

Per garantire una trattazione più generica, si considera la presenza di un ulteriore rivestimento esterno. Di conseguenza, un cavo unipolare (Figura 4.1) è generalmente composto dai seguenti elementi:

- un conduttore centrale di raggio r_c

- un manicotto isolante di raggio esterno r_i
- una guaina metallica di raggio esterno r_g
- una guaina termoplastica di raggio esterno r_g'
- un rivestimento di raggio esterno r_0

Gli strati semiconduttori che solitamente avvolgono il conduttore e l'isolante sono inclusi nello spessore r_i-r_c . Tuttavia, questi strati, così come lo schermo metallico, possono essere trascurati nell'analisi della trasmissione del calore del cavo, sia per la loro elevata conducibilità termica, sia per il loro spessore ridotto.

Pertanto, le **resistenze termiche interne** significative di un cavo sono:

- R_{T1} resistenza termica dello strato isolante
- R_{T2} resistenza termica della guaina termoplastica
- R_{T3} resistenza termica del rivestimento esterno

Per determinare R_{T1} , R_{T2} e R_{T3} , si utilizza la **legge di Fourier**, la quale regola la trasmissione del calore nei solidi, in regime stazionario. Nell'analisi dei cavi, questa legge viene applicata considerando un emettitore cilindrico di lunghezza infinita.

Riferendosi all'unità di lunghezza del cavo, la potenza termica w trasmessa verso l'esterno può essere descritta dalla legge di Fourier attraverso la seguente espressione:

$$w = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot k \cdot \frac{d\theta}{dr} \quad (4.1)$$

dove k è la conducibilità termica del materiale (inverso della resistività termica ρ) misurata in $\frac{W}{K \cdot m}$.

Considerando una generica superficie cilindrica esterna all'emettitore di raggio r (Figura 4.2), ne deriva la seguente equazione differenziale:

$$d\theta = -\frac{w}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot \frac{dr}{r} \quad (4.2)$$

Integrando, si ottiene la temperatura θ in corrispondenza del generico raggio r :

$$\theta = -\frac{w}{2 \cdot \pi \cdot k} \cdot \ln(r) + \text{costante} \quad (4.3)$$

La costante arbitraria viene determinata imponendo le condizioni iniziali. Successivamente, partendo dallo strato più esterno, si procede al calcolo delle resistenze termiche interne del cavo.

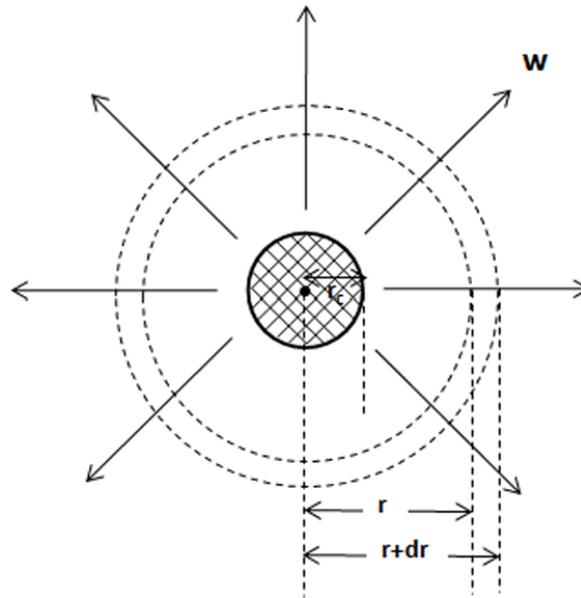


Figura 4.2: Generica superficie esterna di raggio r

- **Calcolo della resistenza termica interna R_{T3}**

Si considera il rivestimento esterno, attraversato dalla potenza termica w''' e caratterizzato da una conducibilità termica k_e .

Imponendo le condizioni iniziali $r = r_0$ e $\theta = \theta_0$, si ricava la costante arbitraria:

$$\text{costante} = \theta_0 + \frac{w'''}{2 \cdot \pi \cdot k_e} \cdot \ln(r_0) \quad (4.4)$$

Di conseguenza, la **temperatura interna del rivestimento esterno** e quindi esterna della guaina termoplastica θ'_g risulta:

$$\theta'_g = \frac{w'''}{2 \cdot \pi \cdot k_e} \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r'_g}\right) + \theta_0 \quad (4.5)$$

Dalla "legge di Ohm termica" $\Delta\theta = R_T \cdot w$, il fattore che moltiplica la potenza termica rappresenta la **resistenza termica del terzo strato di cavo**:

$$R_{T3} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot k_e} \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r'_g}\right) = \frac{\rho_e}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r_0}{r'_g}\right) \quad (4.6)$$

• **Calcolo della resistenza termica interna R_{T2}**

Si considera lo strato composto dalla guaina termoplastica il quale viene attraversato dalla potenza termica w'' ed è caratterizzato dalla conducibilità termica k_g .

In modo analogo al caso precedente, si ricava la **temperatura interna della guaina termoplastica**, nonché quella esterna del manicotto isolante (avendo trascurato lo schermo metallico avente conducibilità infinita):

$$\theta_i = \frac{w''}{2 \cdot \pi \cdot k_g} \cdot \ln \left(\frac{r'_g}{r_g} \right) + \theta'_g \quad (4.7)$$

La **resistenza termica del secondo strato** risulta:

$$R_{T2} = \frac{\rho_g}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r'_g}{r_g} \right) \quad (4.8)$$

• **Calcolo della resistenza termica interna R_{T1}**

Considerando la trasmissione della potenza termica w' attraverso lo strato isolante, caratterizzato dalla conducibilità termica k_i , si ottiene la temperatura interna dell'isolamento, la quale coincide con la **temperatura che assume il conduttore**:

$$\theta_c = \frac{w'}{2 \cdot \pi \cdot k_i} \cdot \ln \left(\frac{r_i}{r_c} \right) + \theta_i \quad (4.9)$$

La **resistenza termica del primo strato**, ovvero quella del manicotto isolante, risulta:

$$R_{T1} = \frac{\rho_i}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_i}{r_c} \right) \quad (4.10)$$

Le potenze termiche w' , w'' e w''' non sono uguali tra loro, poiché in ogni strato è necessario tenere conto di eventuali fattori di perdita aggiuntivi.

Nel calcolo della **potenza termica trasmessa dallo strato isolante** w' , oltre a considerare le perdite Joule prodotte dal cavo $w_j = R \cdot I^2$ (dove R è la resistenza per unità di lunghezza del conduttore), bisogna tenere conto delle perdite nel dielettrico w_d , le quali si calcolano come:

$$w_d = \omega \cdot c \cdot V^2 \cdot \tan \delta \quad (4.11)$$

dove:

- ω è la pulsazione della corrente [rad/s]

- c è la capacità per unità di lunghezza del cavo [F/m]
- V è la tensione di fase di esercizio [V]
- $\tan \delta$ la tangente dell'angolo di perdita del dielettrico

Ammettendo che il calore corrispondente alle perdite nel dielettrico attraversi solo per metà l'intero spessore isolante, si ha che:

$$w' = R \cdot I^2 + \frac{w_d}{2} \quad (4.12)$$

La **potenza che attraversa la guaina termoplastica** w'' invece comprende, non solo le perdite nel dielettrico per intero, ma anche le perdite Joule nello schermo metallico. Come si è visto nel capitolo precedente, quando lo schermo è collegato a entrambe le estremità, nella configurazione "Solid bonding", esso subisce delle perdite a causa delle correnti parassite generate per induzione magnetica. Mentre, nei sistemi "Single point bonding" le perdite Joule nello schermo sono assenti. Dunque, per tenere conto dell'eventuale presenza di corrente negli schermi, le perdite Joule del conduttore vengono aumentate di un coefficiente λ_1 rendendo la potenza w'' pari a:

$$w'' = R \cdot I^2 \cdot (1 + \lambda_1) + w_d \quad (4.13)$$

Nella valutazione della **potenza termica trasmessa dal terzo strato del cavo** w''' , bisogna tenere conto di eventuali altre perdite che si hanno nel rivestimento esterno, dovute per esempio alla presenza di un'armatura metallica.

Pertanto, si introduce un ulteriore coefficiente di maggiorazione λ_2 , ottenendo:

$$w''' = R \cdot I^2 \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + w_d \quad (4.14)$$

Finora è stato analizzato il fenomeno della trasmissione del calore attraverso gli strati che costituiscono il cavo. A questo punto, considerando che il cavo è interrato nel terreno, è necessario determinare la **resistenza termica esterna** R_{T4} tra il cavo e l'ambiente circostante. Tale resistenza deve essere calcolata utilizzando procedure appropriate, in base alle specifiche condizioni.

La parte 2-1 della norma IEC 60287 [42] determina la resistenza termica esterna R_{T4} in diverse condizioni di posa del cavo (in aria, interrato direttamente, all'interno di tubi), sia singolarmente che in gruppo.

- **Calcolo della resistenza termica esterna R_{T4} di un cavo unipolare interrato**

Facendo riferimento al materiale [43], la resistenza termica esterna R_{T4} si determina sfruttando il fondamentale *principio delle immagini*. In questo approccio, si considera il cavo reale, posato nel terreno a una profondità H , e si introduce un cavo "immagine" fittizio, disposto in modo speculare rispetto al terreno, come mostrato in Figura 4.3.

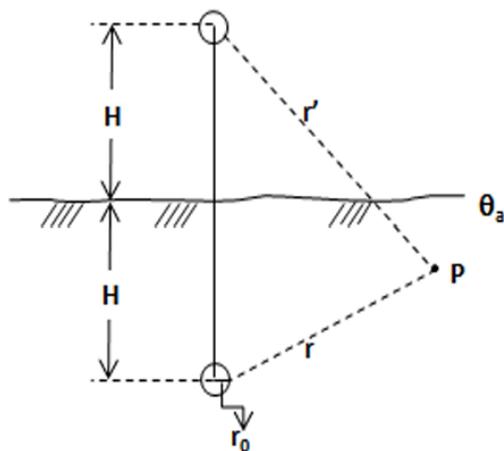


Figura 4.3: Applicazione del principio delle immagini su un cavo unipolare

Per calcolare la **temperatura in un generico punto P** nel terreno, con conducibilità termica k_s e superficie di separazione dall'aria a temperatura θ_a , si applica il *principio di sovrapposizione degli effetti* del campo termico cilindrico. Questo campo è generato dalla potenza w''' emessa dal cavo reale e da quella emessa dal cavo immagine, che invece emette una potenza pari a $-w'''$:

$$\theta_P = -\frac{w'''}{2 \cdot \pi \cdot k_s} \cdot \ln(r) + \frac{w'''}{2 \cdot \pi \cdot k_s} \cdot \ln(r') + \text{costante} \quad (4.15)$$

Imponendo la condizione $\theta = \theta_a$ per $r = r'$, si ottiene la costante arbitraria:

$$\text{costante} = \theta_a \quad (4.16)$$

NOTA: La temperatura θ_a è la temperatura che assume la superficie del terreno al di sopra del cavo e si suppone costante. Tale temperatura, pur essendo influenzata dalla presenza dell'aria, non deve essere confusa con la temperatura media dell'aria stessa. Generalmente, essa risulta inferiore alla temperatura

stagionale media, ma in determinate circostanze può essere significativamente più alta a causa dell'irraggiamento solare. Ad esempio, le superfici asfaltate possono raggiungere valori di $50 \div 60 \text{ }^\circ\text{C}$, mentre le superfici di terra, a seconda della stagione, si attestano su valori massimi compresi tra $20 \div 35 \text{ }^\circ\text{C}$. Sostituendo la costante arbitraria ricavata, si ottiene che la **temperatura in un generico punto P** è pari a:

$$\theta_P = \frac{w'''}{2 \cdot \pi \cdot k_s} \cdot \ln \left(\frac{r'}{r} \right) + \theta_a \quad (4.17)$$

Attraverso questa espressione, si calcola la temperatura sulla superficie del cavo imponendo $r = r_0$ e $r' = 2H$. Si ottiene dunque:

$$\theta_0 = \frac{w'''}{2 \cdot \pi \cdot k_s} \cdot \ln \left(\frac{2H}{r_0} \right) + \theta_a = \frac{w''' \cdot \rho_s}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2H}{r_0} \right) + \theta_a = w''' \cdot R_{T4} + \theta_a \quad (4.18)$$

Quindi, la **resistenza termica esterna** T_4 nel caso particolare di **un cavo unipolare interrato** è:

$$R_{T4} = \frac{\rho_s}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2H}{r_0} \right) \quad (4.19)$$

Il caso del cavo unipolare interrato è applicabile quando la distanza tra i cavi di una terna trifase è significativa. Tuttavia, nelle reti di distribuzione MT con cavi interrati, è comune trovare una terna di cavi posizionati molto vicini tra loro. Pertanto, seguendo lo stesso approccio utilizzato per il singolo cavo unipolare, di seguito si calcola la resistenza termica esterna anche per il caso di una terna di cavi unipolari interrati.

- **Calcolo della resistenza termica esterna R_{T4} di una terna di cavi unipolari interrati**

Si sfrutta anche in questo caso il *principio delle immagini* per cui si considerano tre cavi reali nella disposizione piano (flat formation) interrati e i tre rispettivi cavi immagine, come mostrato in Figura 4.4.

La temperatura in un generico punto P del terreno risulta:

$$\theta_P = \frac{w'''}{2 \cdot \pi \cdot k_s} \cdot \ln \left(\frac{r'_1 \cdot r'_2 \cdot r'_3}{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3} \right) + \theta_a \quad (4.20)$$

Riferendosi al cavo 2, si ricava la temperatura sulla superficie di questo cavo imponendo $r_1 = r_3 = D$, $r'_1 = r'_3 = \sqrt{D^2 + H^2}$, si ha:

$$\theta_{02} = \frac{w'''}{2 \cdot \pi \cdot k_s} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot H \cdot (D^2 + H^2)}{r_0 \cdot D^2} \right) + \theta_a = w''' \cdot R_{T4} + \theta_a \quad (4.21)$$

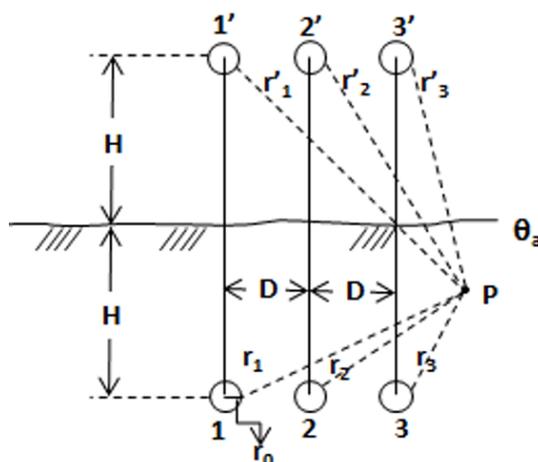


Figura 4.4: Applicazione del principio delle immagini su terna di cavi unipolare

Quindi, la **resistenza termica esterna** R_{T4} nel caso particolare della **terna di cavi unipolari interrati** è:

$$R_{T4} = \frac{\rho_s}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot H \cdot (D^2 + (2H)^2)}{r_0 \cdot D^2} \right) \quad (4.22)$$

Si osserva che, nel caso della terna di cavi unipolari interrati, la resistenza termica esterna differisce rispetto al caso del singolo cavo, a causa del differente argomento del logaritmo, in particolare più elevato. Questo evidenzia l'effetto del mutuo riscaldamento provocato dai cavi adiacenti. Inoltre, è facile verificare che i cavi laterali raggiungono temperature inferiori.

In modo analogo a quanto già esaminato, sarebbe possibile studiare la configurazione a trifoglio (trefoil formation), così come il caso di più terne disposte in parallelo, eventualmente costituite da cavi unipolari con diverse potenze termiche dissipate.

4.1.1 Portata di corrente al limite termico

La **portata di corrente** di un cavo è data dalla corrente che provoca il raggiungimento del **limite termico** consentito dal tipo di isolamento.

Dopo aver determinato le quattro resistenze termiche, definito l'intera potenza che si dissipa all'interno del cavo per i diversi fenomeni di perdita e calcolato le temperature sulla superficie di ogni strato, si procede con il calcolo del **salto termico complessivo** ovvero la differenza di temperatura tra il conduttore e l'ambiente esterno. Tale differenza può essere espressa come la somma delle differenze di temperatura tra i vari strati di materiale attraversati dal flusso termico.

Pertanto, conoscendo i seguenti valori di temperatura calcolati in precedenza:

Temperatura del conduttore $\theta_c = w' \cdot R_{T1} + \theta_i$

Temperatura esterna dell'isolante $\theta_i = w'' \cdot R_{T2} + \theta'_g$

Temperatura esterna della guaina termoplastica $\theta'_g = w''' \cdot R_{T3} + \theta_0$

Temperatura esterna del cavo $\theta_0 = w'''' \cdot R_{T4} + \theta_a$

Per ricavare il **salto termico** $\Delta\theta$ tra il cavo e l'ambiente esterno, si sostituiscono progressivamente le temperature e successivamente le potenze termiche w' , w'' e w''' , ottenendo:

$$\Delta\theta = \theta_c - \theta_a = w' \cdot R_{T1} + w'' \cdot R_{T2} + w''' \cdot (R_{T3} + R_{T4}) = \quad (4.23)$$

$$(R \cdot I^2 + \frac{w_d}{2}) \cdot R_{T1} + [R \cdot I^2 \cdot (1 + \lambda_1) + w_d] \cdot R_{T2} \quad (4.24)$$

$$+[R \cdot I^2 \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + w_d] \cdot (R_{T3} + R_{T4}) \quad (4.25)$$

A questo punto, è immediato il calcolo della **corrente** I corrispondente al salto termico $\Delta\theta$:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - w_d \cdot (\frac{1}{2} \cdot R_{T1} + R_{T2} + R_{T3} + R_{T4})}{R \cdot [R_{T1} + (1 + \lambda_1) \cdot R_{T2} + (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (R_{T3} + R_{T4})]}} \quad (4.26)$$

Dall'espressione di corrente ricavata, si evince che la temperatura dell'ambiente θ_a sulla superficie del terreno, in corrispondenza dell'interfaccia con l'aria, costituisce un secondo parametro fondamentale per il calcolo della portata. Considerando la massima temperatura che può raggiungere il cavo θ_{max} , si definisce un salto termico totale che non deve essere superato:

$$\Delta\theta_{tot} = \theta_{max} - \theta_a \quad (4.27)$$

Ponendo $\theta_c = \theta_{max}$ nell'espressione della corrente, si ricava la **portata di corrente al limite termico**.

In conclusione, la portata di corrente I dipende, non solo dalle caratteristiche del conduttore (sezione, materiale e formazione) ma anche da una serie di fattori che intervengono nel calcolo termico, quali:

- caratteristiche dell'isolamento e degli altri rivestimenti del cavo;
- modalità di posa;
- caratteristiche termiche dell'ambiente in cui il cavo è immerso (temperatura ambiente θ_a e resistività termica ρ_s del terreno);
- modalità di messa a terra degli schermi metallici.

4.1.2 Influenza delle condizioni ambientali sulla portata

Nel calcolo della portata di corrente, come si evince dalla formula (4.26), intervengono due parametri legati alle condizioni ambientali: la **temperatura ambiente** θ_a e la **resistività termica del terreno** ρ_s . Questi parametri non sono costanti, ma subiscono variazioni significative in base alle condizioni meteorologiche e alla stagione dell'anno. In particolare, la resistività termica del terreno è influenzata da diversi fattori come la porosità, l'umidità, la concentrazione di sali disciolti e le variazioni climatiche [44]. Il ciclo stagionale della resistività si rappresenta in modo approssimato tramite una curva sinusoidale, come mostrato in Figura 4.5.

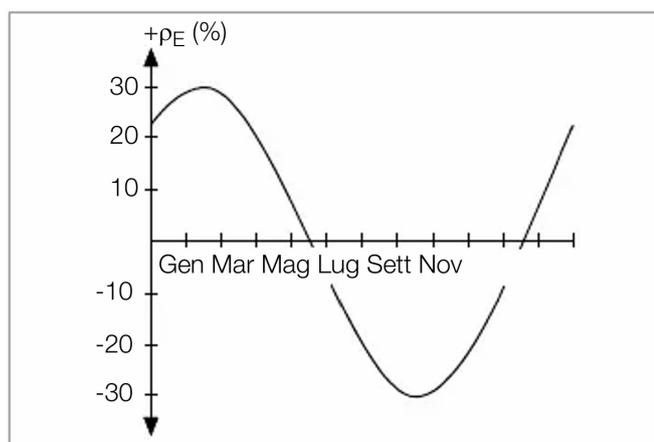


Figura 4.5: Resistività del terreno ρ_E in funzione delle stagioni, senza influenza delle precipitazioni (profondità di interramento $< 1,5$ m) [44].

In particolare, il contenuto di umidità e il contenuto di sali influenzano la resistività termica del terreno nel seguente modo:

- *contenuto di umidità:* maggiore è l'umidità del terreno, e quindi il contenuto d'acqua al suo interno, minore è la sua resistività termica. Secondo la norma IEC 60287 [42], i valori tipici di resistività termica sono: molto umido ($0,7 \text{ K} \cdot \text{m}/\text{W}$), umido ($1 \text{ K} \cdot \text{m}/\text{W}$), secco ($2 \text{ K} \cdot \text{m}/\text{W}$), molto secco ($3 \text{ K} \cdot \text{m}/\text{W}$).
- *contenuto di sali:* la presenza di sali disciolti nel terreno può variare lungo il percorso del cavo, influenzando significativamente la resistività termica. Maggiore è il contenuto di sali, minore è la resistività del suolo. La concentrazione di sali può dipendere dalla tipologia di suolo, dalla sua composizione chimica e dalle condizioni ambientali.

La temperatura ambiente θ_a , che rappresenta la temperatura sulla superficie del terreno al di sopra del cavo, varia principalmente in funzione dei seguenti fattori:

- *stagione dell'anno*: in estate la temperatura ambiente è tipicamente più alta rispetto all'inverno.
- *tipo di superficie*: la temperatura varia significativamente a seconda del materiale che copre il terreno. Superfici come l'asfalto tendono ad assorbire e trattenere più calore, comportando temperature più elevate, mentre il terreno al naturale dissipa meglio il calore, mantenendo temperature più stabili e fresche.

Queste variabilità rendono complesso il calcolo della portata e richiedono una valutazione accurata per garantire un corretto dimensionamento dei cavi.

La norma **CEI-UNEL 35027** [26] definisce le portate di corrente unificate per i cavi MT con isolamento in gomma etilene-propilene (EPR, tipo G7) e in PVC (tipo R2), comunemente utilizzati nella rete di distribuzione. Per i cavi interrati, essa fornisce la **corrente di riferimento** I_0 nella **condizione standard** di: temperatura ambiente 20°C, profondità di posa 0,8 m, resistività termica del terreno 1,5 K · m/W, connessione degli schermi metallici in cortocircuito e a terra ad entrambe le estremità (Solid bonding). Per tenere conto delle possibili condizioni di funzionamento diverse da quelle standard, la norma fornisce dei **coefficienti correttivi** moltiplicativi applicati come segue:

$$I_n = I_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \quad (4.28)$$

Dove:

- I_n = portata di corrente nelle condizioni in esame
- I_0 = portata di corrente nelle condizioni standard
- K_1 = fattore correttivo per temperature ambiente diverse da 20°C
- K_2 = fattore correttivo per gruppi di più circuiti installati sullo stesso piano
- K_3 = fattore correttivo per profondità di interramento diverse da 0,8 m
- K_4 = fattore correttivo per resistività termica del terreno diversa da 1,5 K · m/W

I fattori correttivi più significativi sono K_1 e K_4 , riportati nelle Tabelle 4.1 e 4.2, relativi rispettivamente alla temperatura ambiente e alla resistività del terreno, in quanto influenzano maggiormente la portata in corrente del cavo. L'analisi di questi fattori conferma che la portata di corrente del cavo diminuisce con l'aumento della resistività del terreno e della temperatura ambiente. Come evidenziato in [45], incrementi della temperatura ambiente fino a 35 °C o della resistività termica del terreno fino a 2,5 K · m/W possono ridurre la portata dei cavi fino al 40%.

Tabella 4.1: Fattori correttivi K_1 per temperature ambiente diverse da 20°C

Temperatura ambiente [°C]	Fattore correttivo K_1
15	1,05
25	0,94
30	0,88
35	0,82

Tabella 4.2: Fattori correttivi K_4 per resistività del terreno diverse da 1,5 K·m/W per un conduttore di sezione pari a 95 mm²

Resistività termica ρ_s [K·m/W]	Fattore correttivo K_4
1,0	1,18
2,0	0,89
2,5	0,80

In [46], è stata condotta un'indagine sperimentale per analizzare l'effetto della resistività termica e della temperatura ambiente sulla temperatura raggiunta dal cavo interrato. In particolare, si osserva che, a parità di corrente trasmessa, la temperatura di esercizio dei cavi aumenta all'aumentare dei due parametri ambientali, come dimostrano le Figure 4.6 e 4.7. Il cavo considerato nell'analisi e a cui fanno riferimento i grafici è un cavo MT interrato avente le seguenti caratteristiche: 240 mm² Al, sistema trifase posato alla profondità di 1,2 m, temperatura ambiente 20 °C e resistività termica del suolo di 1,5 K·m/W.

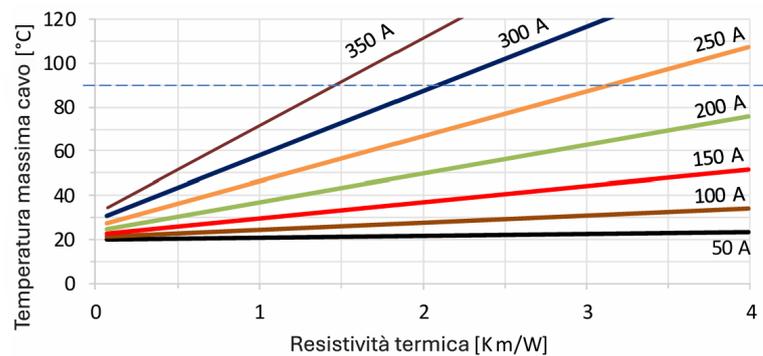


Figura 4.6: Variazioni delle temperature massime raggiunte da un cavo MT interrato in funzione della resistività termica del terreno [46].

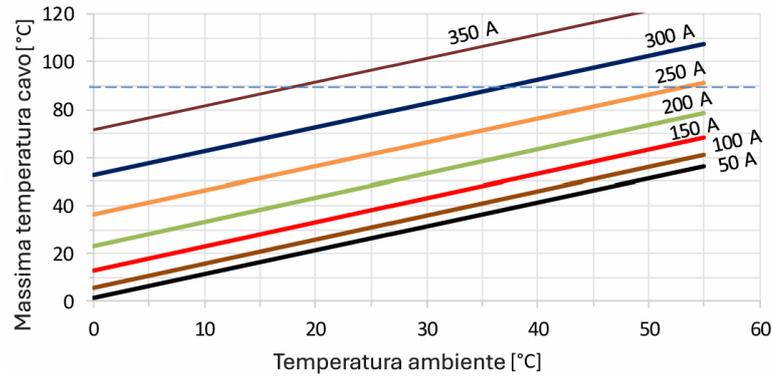


Figura 4.7: Variazioni delle temperature massime raggiunte da un cavo MT interrato in funzione della temperatura ambiente [46].

Per comprendere con maggiore precisione quali sono le temperature effettive raggiunte dai cavi interrati MT durante il periodo estivo, nell'articolo [47] sono state eseguite misurazioni sperimentali. Questi studi, condotti su un cavo specifico, hanno dimostrato che, nei mesi estivi, la temperatura del cavo risulta significativamente più alta rispetto ai mesi invernali, superando di circa 15-20 °C i valori previsti, nonostante si consideri una corrente media trasmessa di 70 A in entrambe le stagioni. Di conseguenza, si deduce che, a parità di carico, l'aumento di temperatura del cavo durante i mesi estivi è influenzato in modo significativo dall'aumento della temperatura ambiente.

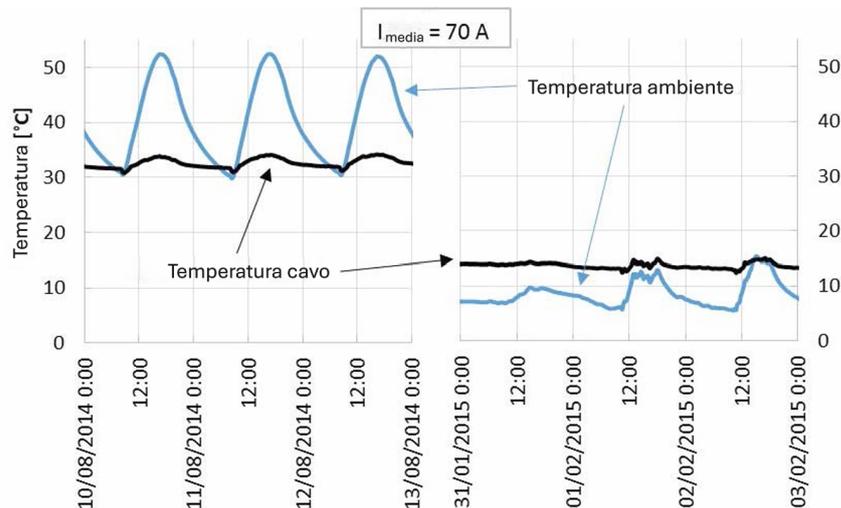


Figura 4.8: Temperature tipiche dei cavi MT interrati in funzione delle temperature ambiente nei diversi periodi dell'anno [47].

Inoltre, in Figura 4.8 si osserva che, nonostante la temperatura ambientale subisca variazioni significative nel corso della giornata, la temperatura del cavo rimane pressoché costante. In altre parole, le fluttuazioni della temperatura ambiente non si traducono in variazioni immediate nella temperatura del cavo. Questo comportamento è attribuibile all'elevata capacità termica delle linee in cavo, che conferisce loro un'**inerzia termica** significativa. Di conseguenza, il rilascio di calore richiede tempi prolungati, con transitori termici caratterizzati da costanti di tempo elevate.

Da quanto esposto emerge che, nonostante l'ampia disponibilità di dati progettuali e normativi, esistono fattori ambientali che variano durante il funzionamento del cavo e che possono essere ulteriormente influenzati da elementi come la radiazione solare e l'essiccazione del suolo causata dal calore emesso dal cavo stesso. Queste variazioni, spesso soggette a sfasamenti temporali, rendono difficile una modellazione accurata. Tali fenomeni sono stati frequentemente causa di guasti nei cavi e costituiscono un tema di studio sia per i progettisti che per gli operatori del settore.

Per prevenire tali guasti, è fondamentale limitare la temperatura operativa massima dell'isolamento, monitorando la corrente trasmessa dai cavi, tramite appositi relè [45]. A tal proposito, una soluzione ampiamente adottata, presentata in [31], è data dal *Dynamic Rating System (DRS)*, un sistema di monitoraggio e supervisione progettato per garantire un funzionamento efficace e affidabile del sistema. Il DRS si basa sull'analisi delle misurazioni di corrente nei conduttori e del profilo di temperatura lungo il sistema. Grazie a modelli numerici ben calibrati, riesce a ricostruire il campo termico e tenere sotto controllo la temperatura dell'isolante, offrendo agli operatori le informazioni necessarie per gestire il sistema in sicurezza. Il modello termico descritto nel paragrafo 4.1, tratto dalla norma IEC 60287, costituisce una valida base per sviluppare un metodo di calcolo in grado di stimare la temperatura dei cavi in funzione delle condizioni ambientali e operative. Nei paragrafi successivi tale modello viene applicato al caso di una terna interrata in tubo e al caso di un giunto, con l'obiettivo di stimare la temperatura dei cavi e del giunto.

4.2 Modello termico di una terna di cavi unipolari interrati ad "Elica visibile" in tubo

Una configurazione frequentemente riscontrata nelle reti MT è quella di una terna di cavi interrati disposti a "Elica visibile", posati direttamente nel terreno o all'interno di un tubo. Questo paragrafo considera il caso in cui la terna di cavi è installata in tubo. Per analizzare la trasmissione del calore dalla terna verso l'ambiente esterno, si sviluppa il modello termico della linea, facendo riferimento a quanto descritto nel

paragrafo 4.1. Considerando la struttura tipica dei cavi MT illustrata nel paragrafo 3.1, ciascun cavo unipolare costituente la terna è composto dai seguenti strati:

1. Conduttore
2. Strato semi-conduttivo interno
3. Isolamento
4. Strato semi-conduttivo esterno
5. Schermo metallico
6. Guaina esterna

Nella Figura 4.9 è mostrata la struttura del singolo cavo unipolare che compone la terna. Gli strati semi-conduttivi interno ed esterno sono inclusi nello spessore r_c-r_i .

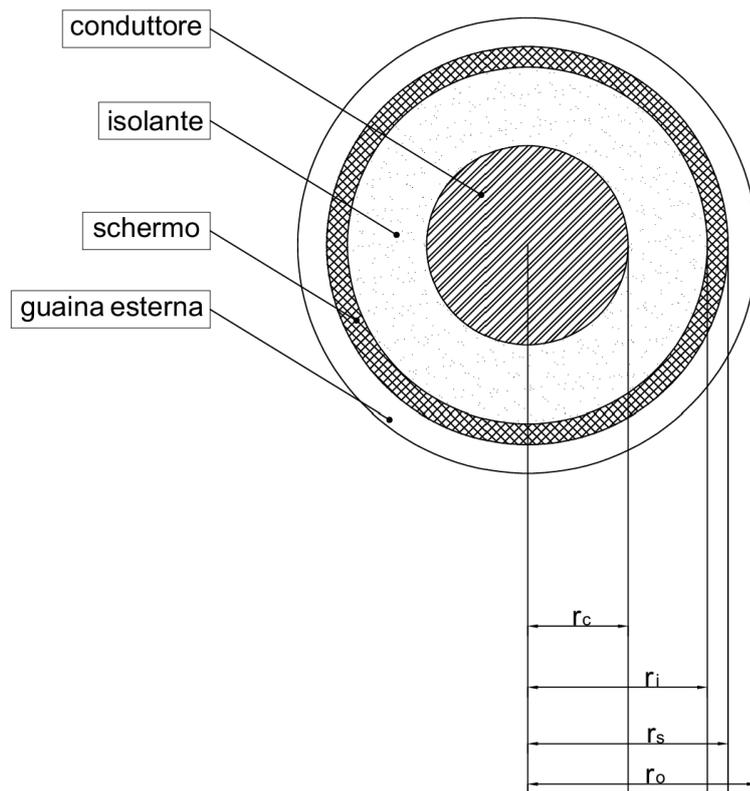


Figura 4.9: Struttura singolo cavo unipolare

Questa struttura permette di andare ad individuare gli strati principali costituenti il cavo, al fine di ricavare le corrispondenti resistenze termiche interne attraverso la formula generale:

$$R_T = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_{ext}}{r_{int}} \right) \quad (4.29)$$

dove:

- ρ è la resistività termica del materiale dello strato considerato [K · m / W]
- r_{ext}, r_{int} sono rispettivamente il raggio esterno ed interno dello strato considerato

Per semplificare l'analisi, si ignorano i salti termici nel conduttore, data la sua alta conducibilità termica, così come nello schermo metallico e negli strati semiconduttivi, sia per la loro buona conducibilità termica che per il ridotto spessore. Di conseguenza, le principali resistenze termiche in un cavo unipolare sono:

- Resistenza termica dello strato isolante R_{T1}
- Resistenza termica della guaina termoplastica esterna R_{T2}

Le relative espressioni sono:

$$R_{T1} = \frac{\rho_i}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_i}{r_c} \right) \quad (4.30)$$

$$R_{T2} = \frac{\rho_g}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_o}{r_s} \right) \quad (4.31)$$

dove ρ_i e ρ_g sono rispettivamente le resistenze termiche del materiale isolante e della guaina termoplastica [K · m / W].

Finora si è analizzato il fenomeno della trasmissione del calore attraverso gli strati che compongono il cavo. A questo punto, applicando il principio di sovrapposizione degli effetti, come mostrato in Figura 4.10, si determina la resistenza termica esterna di una terna di cavi interrata ad "Elica visibile" in tubo.

In questo sistema, la **resistenza termica esterna** risulta costituita da tre addendi:

$$R_{T3} = R'_{T3} + R''_{T3} + R'''_{T3} \quad (4.32)$$

dove:

- R'_{T3} è la resistenza termica tra la superficie del cavo di raggio r_o e la superficie interna del tubo di raggio r_{pint} ;

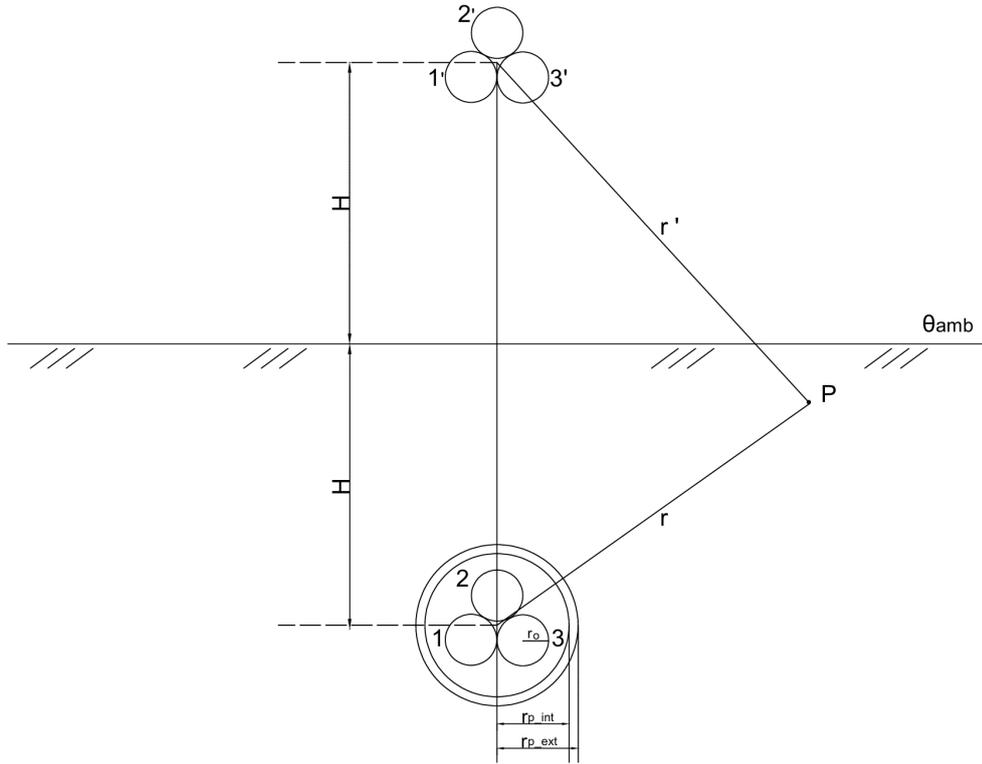


Figura 4.10: Principio delle Immagini applicato ad una Terna di Cavi "ad Elica visibile" in Tubo

- R''_{T3} è la resistenza termica del tubo, tra la superficie interna di raggio $r_{p.int}$ e la superficie esterna di raggio $r_{p.ext}$;
- R'''_{T3} è l'effettiva resistenza termica esterna, legata al terreno.

La **resistenza termica R'_{T3}** dipende dal materiale interposto tra i cavi e il tubo, avente resistività ρ_m . Per calcolare la R'_{T3} , è necessario considerare la presenza degli altri cavi. A tale scopo, si introduce un *raggio equivalente*, che tiene conto della superficie di contatto complessiva tra i cavi e il materiale di riempimento. Nel caso di tre cavi, questo raggio risulta essere circa $2/3$ del raggio teorico. Di conseguenza, la resistenza termica R'_{T3} è data da:

$$R'_{T3} = \frac{3\rho_m}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_{p.int}}{2r_o} \right) \quad (4.33)$$

La **resistenza termica R''_{T3}** rappresenta la resistenza termica dello spessore del tubo costituito da un materiale avente resistività termica ρ_p . Tenendo conto che il

tubo sarà attraversato dal triplo della potenza dissipata in un cavo, la resistenza termica R''_{T3} risulta:

$$R''_{T3} = \frac{3\rho_p}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_{p_{ext}}}{r_{p_{int}}} \right) \quad (4.34)$$

La **resistenza termica R'''_{T3}** rappresenta la vera e propria resistenza termica esterna del tubo. Per determinarla, si applica il fondamentale *principio delle immagini*, basandosi sui risultati ottenuti nel paragrafo 4.1, e in particolare sull'espressione derivata per il singolo cavo unipolare interrato (4.19). In questo caso, si considera un equivalente cavo unipolare reale e uno fittizio, il quale dissipa una potenza tripla rispetto al singolo cavo reale e ha le stesse dimensioni del tubo. Pertanto, la resistenza termica esterna R'''_{T3} , nel caso di una terna di cavi unipolari interrati disposti ad "Elica visibile" in tubo, risulta:

$$R'''_{T3} = \frac{3\rho_s}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot H}{r_{p_{ext}}} \right) \quad (4.35)$$

Una volta calcolate le resistenze termiche interne ed esterne, sia della terna di cavi in tubo che del giunto, entrambi interrati, è possibile determinare i salti termici di ciascuno strato utilizzando la legge di Ohm termica:

$$\Delta\theta = w \cdot R_T \quad (4.36)$$

dove:

- $\Delta\theta$ è il salto termico dello strato considerato
- w è la potenza termica trasmessa dallo strato considerato [W]
- R_T è la resistenza termica dello strato considerato [K · m / W]

Per una terna di cavi all'interno del tubo, i salti termici rilevanti per l'analisi della trasmissione del calore sono:

- $\Delta\theta_i = \theta_c - \theta_i = w' \cdot R_{T1}$ = salto termico nello strato isolante.
- $\Delta\theta_g = \theta_s - \theta_g = w'' \cdot R_{T2}$ = salto termico nello strato della guaina esterna.

dove:

- θ_s temperatura dello schermo coincide sia con la temperatura esterna dell'isolamento θ_i , sia con la temperatura interna della guaina
- θ_g , temperatura esterna della guaina, non è altro che la temperatura sulla superficie del cavo θ_o

- $\Delta\theta_a = \theta_o - \theta_{p_{int}} = w'' \cdot R'_{T3} =$ salto termico tra la superficie esterna del cavo e quella interna del tubo.
- $\Delta\theta_p = \theta_{p_{int}} - \theta_{p_{ext}} = w'' \cdot R''_{T3} =$ salto termico nello spessore del tubo.
- $\Delta\theta_t = \theta_{p_{ext}} - \theta_{amb} = w'' \cdot R'''_{T3} =$ salto termico nel terreno.

Come visto nel paragrafo 4.1, le potenze trasmesse dagli strati w' e w'' sono:

$$w' = R_c \cdot I^2 + \frac{w_d}{2} \quad (4.37)$$

$$w'' = R_c \cdot I^2 \cdot (1 + \lambda_1) + w_d \quad (4.38)$$

Nella potenza w'' , il coefficiente λ_1 tiene conto delle perdite di calore generate dalle correnti che scorrono attraverso lo schermo metallico del cavo.

Considerando una configurazione degli schermi dei cavi "Solid bonding" ovvero collegati a terra ad entrambe le estremità, e adottando una configurazione dei cavi a "trifoglio", la norma IEC 60287 fornisce l'espressione per determinare λ_1 , che risulta essere pari a:

$$\lambda_1 = \frac{R_s}{R_c} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X_s}\right)^2} \quad (4.39)$$

dove:

- R_s è la resistenza per unità di lunghezza dello schermo metallico del cavo che opera alla massima temperatura [Ω/m]
- X_s è la reattanza per unità di lunghezza dello schermo metallico del cavo ed è pari a : $2 \cdot \omega \cdot 10^{-7} \ln \frac{2s}{d}$
 - ω è la pulsazione [rad/s]
 - s è la distanza tra gli assi dei conduttori [mm]
 - d è la distanza media dello schermo [mm] ed è pari a : $\sqrt{d_M \cdot d_m}$ dove d_M e d_m sono i diametri esterno ed interno dello schermo.

A questo punto, per calcolare la temperatura del cavo, è necessario prima determinare il salto termico complessivo, sommando i salti termici associati ai singoli strati. In questo modo si ottiene:

$$\Delta\theta = \theta_c - \theta_a = w' \cdot R_{T1} + w'' \cdot R_{T2} + w'' \cdot R'_{T3} + w'' \cdot R''_{T3} + w'' \cdot R'''_{T3} = \quad (4.40)$$

$$\left(R_c \cdot I^2 + \frac{w_d}{2}\right) \cdot R_{T1} + [R_c \cdot I^2 \cdot (1 + \lambda_1) + w_d] \cdot (R_{T2} + R_{T3}) \quad (4.41)$$

La **temperatura del conduttore** θ_c risulta pertanto:

$$\theta_c = (R_c \cdot I^2 + \frac{w_d}{2}) \cdot R_{T1} + [R_c \cdot I^2 \cdot (1 + \lambda_1) + w_d] \cdot (R_{T2} + R_{T3}) + \theta_a \quad (4.42)$$

Mentre, la **temperatura sulla superficie del cavo** θ_o è pari a:

$$\theta_o = [R_c \cdot I^2 \cdot (1 + \lambda_1) + w_d] \cdot R_{T3} + \theta_a \quad (4.43)$$

Dalle due espressioni (4.42) e (4.43) si deduce che la temperatura raggiunta dal conduttore, e di conseguenza dal cavo, dipende non solo dalle caratteristiche fisse del cavo (come dimensione, materiale e disposizione), ma anche da fattori variabili. In particolare, le temperature θ_c e θ_o sono influenzate dalla corrente che attraversa il cavo e dalle condizioni ambientali, quali la temperatura ambiente e la resistività del terreno, parametri che possono variare in base alla stazione e al clima.

4.3 Modello termico di un giunto tripolare interrato

In questo paragrafo si applica il modello termico al caso di un giunto, con l'obiettivo di stimare la temperatura che esso raggiunge in funzione delle condizioni operative e ambientali. Per analizzare la trasmissione del calore dal conduttore all'interno verso l'esterno, è fondamentale definire la struttura del giunto e i vari strati che lo compongono. Nell'analisi, si considera un giunto tripolare in carta impregnata, la cui sezione è mostrata in Figura 4.11, costituito dai seguenti elementi:

- tre cavi unipolari, ciascuno costituito da un conduttore, in rame, isolato in gomma;
- un distanziatore posto tra i cavi
- uno strato di nastro di canapa avvolto impregnato con miscela;
- lo schermo metallico complessivo del giunto;
- la guaina esterna.

La struttura del giunto appena descritta viene schematizzata, ai fini dello studio della trasmissione del calore, nel modo illustrato in Figura 4.12. In questa rappresentazione, sono evidenziati i diversi strati che lo compongono, permettendo un'analisi del comportamento termico del sistema.



Figura 4.11: Giunto tripolare in carta impregnata

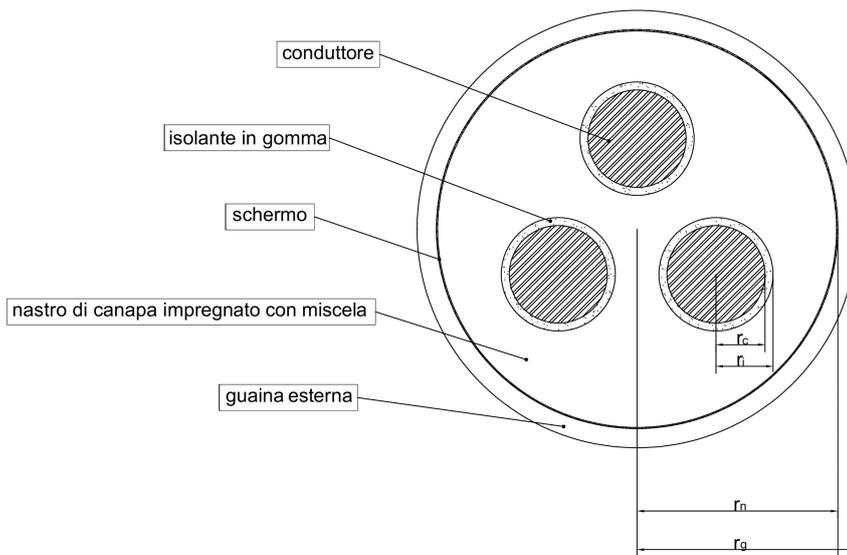


Figura 4.12: Schema giunto tripolare

Applicando la formula generale (4.29), si calcola la resistenza termica interna dei singoli cavi unipolari R_{T1} , dovuta allo strato di materiale isolante in gomma:

$$R_{T1} = \frac{\rho_i}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_i}{r_c} \right) \quad (4.44)$$

Successivamente, è necessario calcolare la resistenza termica interna del giunto, attribuita allo strato di nastro di canapa avvolto e impregnato con miscela R_{T2} . Per il calcolo, si adotta lo stesso criterio utilizzato nel caso precedente della terna di cavi all'interno di un tubo. In particolare, si considera un raggio equivalente pari a 2/3 del raggio teorico di ciascun cavo e si assume che il materiale di riempimento sia costituito dal nastro di canapa, di resistività termica ρ_n . Di conseguenza, la resistenza interna del giunto R_{T2} risulta:

$$R_{T2} = \frac{3\rho_n}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_n}{2r_i} \right) \quad (4.45)$$

La terza resistenza termica interna del giunto è quella dovuta alla guaina esterna R_{T3} , di resistività pari a ρ_g , la quale risulta:

$$R_{T3} = \frac{3\rho_g}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{r_g}{r_n} \right) \quad (4.46)$$

Infine, si procede al calcolo della resistenza termica esterna del giunto R_{T4} , che è correlata al terreno con resistività ρ_s :

$$R_{T4} = \frac{3\rho_s}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot H}{r_g} \right) \quad (4.47)$$

Una volta calcolate le resistenze termiche interne ed esterne, è possibile determinare i salti termici di ciascuno strato utilizzando la legge di Ohm termica (4.36). Per lo studio della trasmissione del calore nel giunto tripolare, i salti termici significativi da considerare sono:

- $\Delta\theta_i = \theta_c - \theta_i = w' \cdot R_{T1}$ = salto termico nello strato isolante.
- $\Delta\theta_n = \theta_i - \theta_n = w'' \cdot R_{T2}$ = salto termico nello strato costituito dal nastro di canapa avvolto impregnato con miscela.
- $\Delta\theta_g = \theta_n - \theta_g = w''' \cdot R_{T3}$ = salto termico della guaina esterna.
- $\Delta\theta_t = \theta_g - \theta_{amb} = w'''' \cdot R_{T4}$ = salto termico nel terreno.

In questo caso le potenze trasmesse dagli strati sono: w' , w'' e w''' , le quali risultano essere:

$$w' = R_c \cdot I^2 + \frac{w_d}{2} \quad (4.48)$$

$$w'' = R_c \cdot I^2 + w_d \quad (4.49)$$

$$w''' = R_c \cdot I^2 \cdot (1 + \lambda_1) + w_d \quad (4.50)$$

Nel giunto tripolare, non viene realizzata la continuità dello schermo per ciascun cavo unipolare; piuttosto, la continuità di ogni cavo viene ripristinata tramite un unico schermo complessivo che avvolge l'intero giunto. Pertanto, la potenza termica dovuta alle correnti circolanti nello schermo, di cui si tiene conto attraverso il coefficiente λ_1 , interessa soltanto lo strato della guaina esterna del giunto.

A questo punto, per ogni conduttore all'interno del giunto, è possibile calcolarne la **temperatura** θ_c :

$$\theta_c = w' \cdot R_{T1} + w'' \cdot R_{T2} + w''' \cdot (R_{T3} + R_{T4}) + \theta_a \quad (4.51)$$

La **temperatura sulla superficie del giunto** θ_g è pari a:

$$\theta_g = w''' \cdot R_{T4} + \theta_a \quad (4.52)$$

Anche per il caso del giunto, si osserva che la temperatura raggiunta dal giunto dipende non solo dalle sue dimensioni e dai materiali di cui è composto, ma soprattutto dalla corrente che lo attraversa e dalle condizioni ambientali.

Capitolo 5

Misure sul campo e analisi dei dati

La rete di distribuzione oggetto di studio di questa tesi è la rete MT della città di Torino. L'attenzione è focalizzata sull'impatto che le ondate di calore hanno su questa rete, con l'obiettivo di individuare strategie e soluzioni volte a migliorarne la resilienza. Il tema è di grande attualità e rilevanza, considerando l'aumento della frequenza e dell'intensità di tali eventi estremi a causa del cambiamento climatico. Per affrontare questa sfida, diverse istituzioni ed enti di ricerca stanno collaborando allo sviluppo del progetto, offrendo il loro contributo. Tra queste, IRETI ha avviato una campagna di misura nella città di Torino, volta a rilevare le correnti che scorrono negli schermi dei cavi, aspetto che influisce sullo stato della rete. Parallelamente, l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) ha condotto misurazioni delle resistenze di contatto e di isolamento dei giunti, considerati i punti più critici e soggetti a guasti. In particolare, l'attenzione è stata rivolta alla giunzione degli schermi, che si dimostra spesso la componente maggiormente danneggiata in caso di guasto. Inoltre, l'INRiM ha effettuato misure di temperatura su linee MT interrate, con l'obiettivo di analizzare l'effetto delle elevate temperature sulle prestazioni delle infrastrutture elettriche. In questo capitolo vengono presentati e analizzati i dati raccolti dalle campagne di misura.

5.1 Misura di corrente negli schermi dei cavi

La società *IRETI*, con l'obiettivo di individuare strategie efficaci per migliorare la resilienza della rete di distribuzione MT alle ondate di calore, sta conducendo

diverse campagne di misura finalizzate a raccogliere dati utili per l'ottimizzazione del sistema elettrico. Tra queste, una delle campagne di monitoraggio è in corso nella città di Torino, la quale si concentra sul rilevamento delle **correnti negli schermi** dei cavi MT. L'analisi di tali correnti è fondamentale per valutarne l'entità e comprendere il loro impatto sulle linee interrate, con particolare attenzione ai giunti. Si ritiene, infatti, che in condizioni di cattivo confezionamento dei giunti, le correnti parassite possano generare fenomeni di surriscaldamento localizzato, con il rischio di comprometterne l'integrità e generare un guasto.

Allo stesso tempo, la campagna di misura ha anche l'obiettivo di valutare l'efficacia della modalità di messa a terra degli schermi attualmente adottata nella rete MT di Torino "Solid-bonding", confrontandola con l'alternativa "Single-point bonding", impiegata nelle reti MT di altri distributori. Lo studio è finalizzato ad individuare la soluzione che permette di ridurre il numero dei guasti. Ai fini di questo lavoro di tesi, la campagna di misura riveste un ruolo fondamentale per confermare la presenza effettiva di queste correnti negli schermi dei cavi e per quantificarne l'entità. L'analisi dei dati raccolti permette di comprendere meglio l'impatto di tali correnti sulle linee interrate, con particolare attenzione alle possibili implicazioni sul surriscaldamento.

5.1.1 Metodo di misura

La campagna di misura condotta a Torino, prevede il monitoraggio delle **correnti negli schermi dei cavi** MT, i quali risultano collegati alla maglia di terra sia in cabina primaria sia in cabina secondaria. Le misurazioni vengono effettuate in corrispondenza delle **cabine secondarie**, dove si ipotizza che parte delle correnti di squilibrio della rete in bassa tensione possa circolare negli schermi dei cavi MT. L'entità di queste correnti di squilibrio dipende dal partitore di corrente costituito dalle diverse vie di ritorno disponibili, attraverso le quali la corrente può richiudersi sul centro stella del trasformatore MT/BT. Le cabine secondarie dove si svolgono le misure sono del tipo "*monoblocco in SF6*", poiché questo consente un accesso più agevole agli schermi dei cavi, e operano in *assetto di normale esercizio*. Il **punto fisico** di misurazione è la treccia di messa a terra dello schermo del cavo, nella tratta compresa tra terminale e collettore di terra. Il **metodo di misura** si basa su due livelli di rilevamento delle correnti omopolari:

- Misura continua delle correnti di schermo: viene effettuata tramite delle pinze amperometriche, con lo scopo di rivelare eventuali correnti permanenti nel tempo, non legate ad eventi di guasto ma al carico ordinario.
- Registrazione puntuale di corrente: nel caso in cui si misurino correnti significative negli schermi, dovute a eventi di guasto, viene realizzata la registrazione dell'evento.

Per la registrazione puntuale delle forme d'onda di corrente viene utilizzato il **registratore digitale** SEFRAM DAS 1600, mostrato in Figura 5.1.



Figura 5.1: Registratore digitale SEFRAM DAS 1600

Ad esso vengono collegate tre *pinze amperometriche*, ciascuna dedicata alla misurazione delle correnti negli schermi dei tre conduttori di fase della rete MT, come mostrato in Figura 5.2.

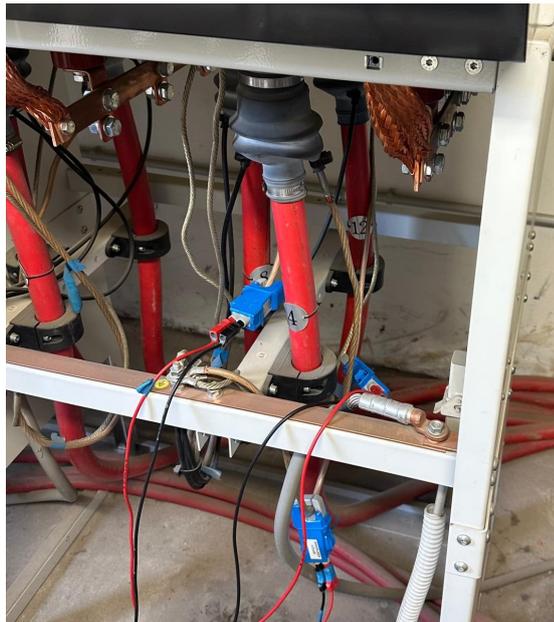


Figura 5.2: Misura delle correnti negli schermi dei cavi MT tramite pinze amperometriche

Successivamente, viene impostato un valore di trigger che, una volta superato, avvia la registrazione. Il dispositivo registra i dati relativi al periodo precedente l'evento, durante l'evento stesso e nella fase successiva, garantendo così una visione

completa del fenomeno. In Figura 5.3 è mostrato lo schema di misura completo delle correnti negli schermi dei cavi, all'interno di una cabina secondaria.

La misura prevede il monitoraggio continuo delle correnti negli schermi dei cavi, con l'obiettivo di rilevare eventuali eventi di guasto. Per questo motivo, il registratore è stato posizionato in diverse cabine secondarie e lasciato in funzione per più giorni, al fine di aumentare le probabilità di registrare un evento significativo.



Figura 5.3: Schema di misura completo delle correnti negli schermi dei cavi MT presso cabina secondaria

5.1.2 Eventi significativi registrati

Durante l'estate del 2024, la campagna di misura ha consentito di registrare molteplici eventi, di diversa natura, sulle linee MT della città di Torino. Le registrazioni confermano quanto descritto nel paragrafo 3.2.1, ossia che gli schermi dei cavi delle linee MT, essendo connessi a terra sia presso le cabine primarie che secondarie, sono attraversati da correnti sia durante il normale funzionamento della rete, sia in presenza di eventi di guasto.

Di seguito sono riportate le registrazioni più significative, che meritano un approfondimento per comprendere l'entità delle correnti e gli effetti che esercitano sulle linee in cavo MT.

Registrazione 1: Corrente permanente nello schermo

Nella registrazione mostrata in Figura 5.4 viene rilevata una *corrente permanente* sullo schermo del conduttore di fase della linea PRIMULE proveniente dalla cabina primaria Lucento.

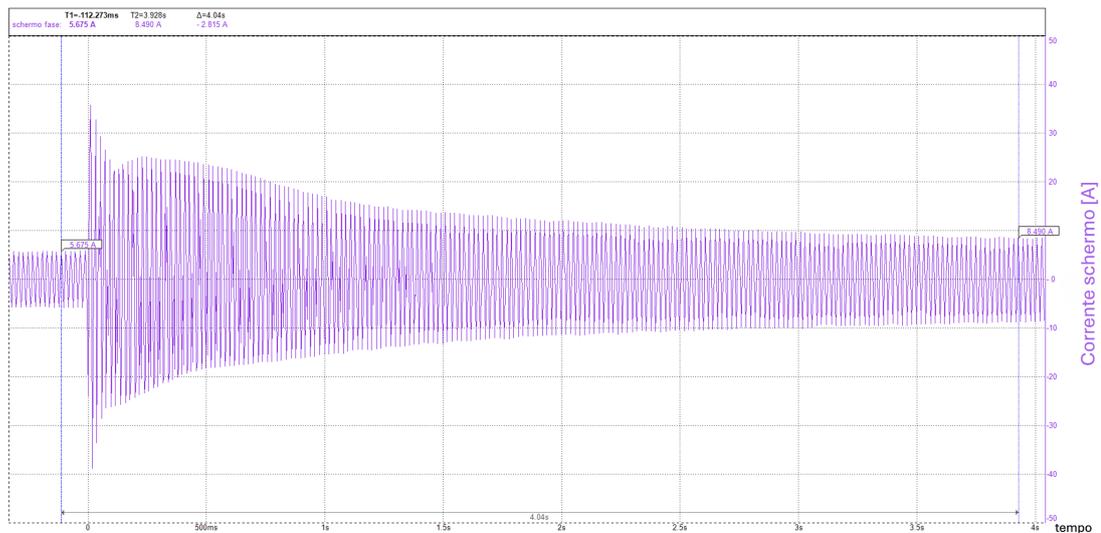


Figura 5.4: Corrente nello schermo del conduttore di fase della linea PRIMULE

Generalmente, da quanto emerso da altre registrazioni, le correnti permanenti negli schermi si attestano su valori intorno a 1-2 A, risultando quindi poco rilevanti. In questo caso, invece, la corrente permanente presenta un'entità significativamente maggiore, con un conseguente impatto più marcato sui cavi e sui giunti.

Registrazione 2: Corrente nello schermo per guasto monofase a terra

Nella registrazione mostrata in Figura 5.5 viene rilevata una *corrente di guasto* sullo schermo del conduttore di fase della linea VERNA, proveniente dalla cabina primaria Stura, dovuta al verificarsi di un *guasto monofase a terra* in un'altra linea uscente dalla stessa semisbarra MT. Il guasto monofase è riconosciuto chiaramente grazie alla presenza dei due eventi di richiusura rapida e lenta, in questo caso entrambi falliti.

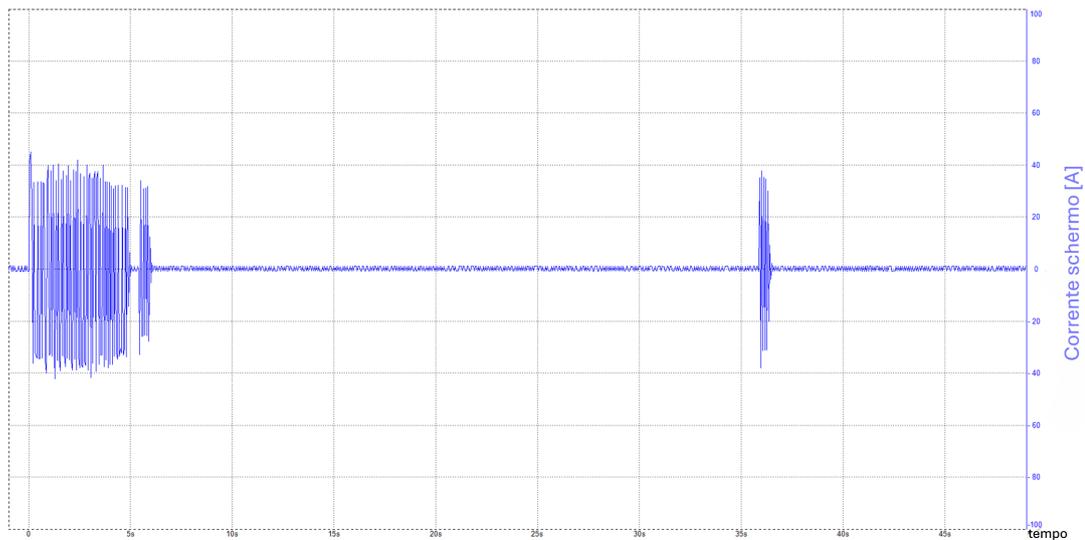


Figura 5.5: Corrente di guasto rilevata sullo schermo del conduttore di fase della linea VERNA

Questa registrazione dimostra che, in caso di guasto, la bobina di Petersen utilizza gli schermi dei cavi per inviare la corrente induttiva verso il punto di guasto. L'entità della corrente negli schermi dipende dal partitore di corrente formato da tutti gli schermi di tutte le linee che escono dalla semisbarra MT. In altre parole, la corrente di guasto si ripartisce tra gli schermi delle linee in funzione dell'impedenza degli schermi stessi.

Registrazione 3: Corrente nello schermo per guasto intermittente

Nella registrazione mostrata in Figura 5.6 viene rilevata una corrente di guasto sullo schermo del conduttore di fase della linea VERNA, proveniente dalla cabina primaria Stura, dovuta al verificarsi di un *guasto intermittente*.

Rispetto alle due registrazioni precedenti, in questo caso le correnti rilevate negli schermi presentano caratteristiche completamente diverse. Si tratta infatti di

sovracorrenti impulsive, con valori molto elevati, che superano i 100 A per brevi intervalli di tempo, e che si ripetono con una frequenza di circa 5-10 secondi. Tali correnti sono generate da un guasto intermittente, ovvero un guasto che si auto-ripristina.

Nel 90% dei casi, guasti di questo tipo avvengono in aria all'interno degli scomparti MT, tra i terminali dell'interruttore presente al loro interno. Sovracorrenti impulsive di questo tipo, scorrendo negli schermi dei cavi, compromettono lo stato di salute dei cavi, ma soprattutto dei giunti, in quanto favoriscono la formazione di punti caldi che, nel tempo, possono causarne la rottura.

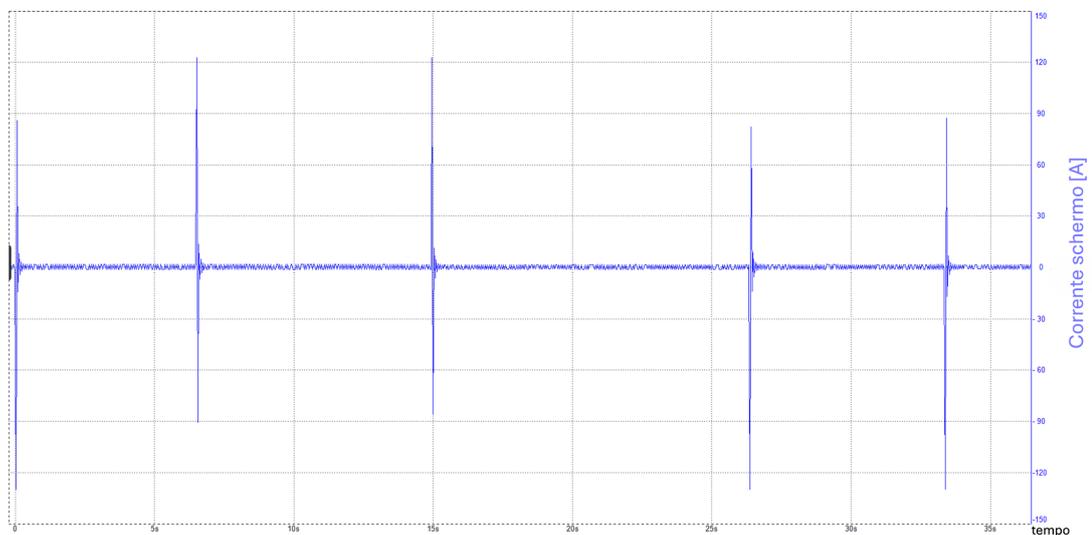


Figura 5.6: Corrente di guasto rilevata sullo schermo del conduttore di fase della linea VERNA

Sulla base di quanto emerge dalle registrazioni, tutte e tre le tipologie di corrente rilevate (permanenti, di guasto monofase a terra e di guasto intermittente), mostrano un'entità considerevole, tale da influenzare significativamente il comportamento termico dei cavi. È risaputo che l'impatto risulta particolarmente critico sui giunti, dove la resistenza di contatto della giunzione degli schermi può generare la formazione di punti caldi che possono accelerare il degrado dei materiali isolanti, aumentando il rischio di surriscaldamenti e dunque di guasto. Le correnti che scorrono attraverso gli schermi dei cavi, come quelle registrate durante le campagne di misura, potrebbero rappresentare una delle principali cause di tali guasti.

5.2 Misura delle resistenze di contatto e di isolamento dei giunti

L'*INRiM* è attivamente impegnato in numerosi progetti di ricerca sia a livello nazionale che internazionale. Nell'ambito di questa tesi, incentrata sulla resilienza della rete di distribuzione alle ondate di calore, l'*INRiM* collabora con IRETI e il Politecnico di Torino, contribuendo all'analisi dello stato di salute dei giunti dei cavi e al monitoraggio delle condizioni operative delle linee elettriche MT.

Uno dei compiti principali dell'*INRiM* in questo progetto è eseguire misurazioni di resistenza di contatto e di isolamento dei giunti, i quali risultano particolarmente soggetti a guasti, come evidenziato in precedenza.

Nei giunti, per garantire la continuità dello schermo, gli schermi del cavo e del giunto vengono sovrapposti e mantenuti in posizione da una molla elastica, progettata per assicurare un contatto efficace. Tuttavia, questo sistema presenta alcune criticità. Nel tempo, infatti, sono state osservate bruciature proprio in corrispondenza della giunzione degli schermi, segno che la resistenza di contatto offerta dalla molletta elastica è eccessiva. Di conseguenza, quando la giunzione dello schermo è attraversata da corrente, come avviene nelle linee elettriche di Torino, questa resistenza può provocare la formazione di punti caldi e, dunque, il surriscaldamento del giunto. Oltre alle problematiche legate al sistema di giunzione degli schermi, il giunto stesso presenta intrinseche criticità, poiché la sua realizzazione non è sempre ottimale. Il processo di giunzione, infatti, può risultare complesso, soprattutto in condizioni di lavoro sfavorevoli, come interventi notturni o in situazioni meteorologiche avverse. Per questi motivi, è fondamentale misurare la resistenza di contatto, in particolare quella della giunzione degli schermi, al fine di individuare una delle possibili cause dei frequenti guasti in queste connessioni. Inoltre, si misura la resistenza dell'isolamento del giunto per valutarne lo stato di integrità e funzionamento.

5.2.1 Metodo di misura delle resistenze

Le misurazioni delle resistenze di contatto e di isolamento sono state effettuate su giunti trifase forniti da IRETI, precedentemente recuperati e conservati a seguito di eventi di guasto. Di seguito vengono riportati i metodi di misura e i dettagli delle due misurazioni eseguite.

Misura della resistenza di contatto

La resistenza di contatto delle giunzioni viene misurata utilizzando un *micro-ohmmetro*, uno strumento specifico per la rilevazione di resistenze molto basse, tipicamente nell'ordine dei micro-ohm o milli-ohm, mostrato in Figura 5.7.



Figura 5.7: Micro-ohmmetro: misuratore di resistenza

Il metodo di misura impiegato è "**a quattro fili**", il quale consente di ottenere misurazioni accurate eliminando l'influenza delle resistenze parassite dei cavi di connessione dello strumento. Nello specifico, questo metodo prevede l'utilizzo di due cavi, collegati ai terminali del componente di cui si vuole misurare la resistenza, per iniettare una corrente continua (DC), mentre gli altri due cavi misurano la caduta di tensione generata dal passaggio della corrente.

La misurazione si basa sulla *legge di Ohm*:

$$R = \frac{V}{I} \quad (5.1)$$

dove:

- I è la corrente continua iniettata dallo strumento nel componente [A]
- V è la caduta di tensione misurata sul componente [V]

Conoscendo la corrente iniettata e misurando la caduta di tensione, attraverso la legge di Ohm, è possibile calcolare la resistenza in corrente continua del componente. Questa tecnica consente di ottenere valori precisi e affidabili, fondamentali per l'analisi della qualità dei giunti e l'individuazione di eventuali anomalie.

Misura della resistenza di isolamento

La misurazione della resistenza dell'isolamento viene effettuata utilizzando un *Tester di resistenza di isolamento*, mostrato in Figura 5.8. Questo strumento serve per verificare l'integrità dell'isolamento elettrico dei cavi, o di altre apparecchiature elettriche.



Figura 5.8: Tester di resistenza di isolamento

Il metodo di misura prevede l'applicazione di una tensione continua elevata, attraverso due puntali, tra il conduttore e lo schermo del cavo. Lo strumento misura la corrente di dispersione che fluisce attraverso l'isolamento e, successivamente, calcola la resistenza dell'isolamento utilizzando la legge di Ohm. In genere, questa resistenza è dell'ordine dei mega-ohm ($M\Omega$).

Valori elevati di resistenza di isolamento indicano che l'isolamento è in buone condizioni. Al contrario, un valore basso di resistenza di isolamento suggerisce un degrado del materiale isolante.

5.2.2 Caratteristiche e risultati della misura

I giunti oggetto della misurazione della resistenza di contatto e della resistenza di isolamento appartengono a linee MT della rete di Torino, sulle quali si è precedentemente verificato un guasto in almeno uno dei tre giunti che compongono la terna. La misura si concentra principalmente sulla resistenza di contatto della giunzione degli schermi e sulla resistenza dell'isolamento, al fine di valutarne le condizioni e individuare possibili cause di malfunzionamento.

Di seguito vengono presentate le caratteristiche dei giunti analizzati e i risultati delle misurazioni effettuate per ciascuna linea esaminata: Desana, Padova e 7074.

Misure su giunto linea: Desana da Stura

Uno dei giunti analizzati nelle misurazioni appartiene alla linea MT Desana, alimentata dalla cabina primaria Stura.

La terna di cavi che compone la linea è del tipo 3x(1x185) Al, con conduttori in alluminio, isolamento in XLPE (polietilene reticolato) e schermo in tubo di alluminio. Il giunto è di tipo trifase, costituito da tre giunti unipolari di tipo *thermo-restringente*.

La linea ha subito un guasto in una delle tre fasi, precisamente in corrispondenza del giunto, come illustrato in Figura 5.9.



Figura 5.9: Giunto guasto appartenente alla linea Desana da Stura

Su uno dei giunti delle fasi integre, viene effettuata la misurazione della resistenza di contatto della giunzione dello schermo e del conduttore. Inoltre, viene verificata l'integrità dell'isolamento del giunto attraverso la misurazione della resistenza di isolamento.

- **Misura resistenza di contatto della giunzione dello schermo:**

La misurazione viene eseguita mediante il micro-ohmmetro precedentemente descritto, utilizzando quattro cavi: due di maggiore sezione per l'iniezione della corrente e due dedicati alla rilevazione della caduta di tensione.

Entrambe le coppie di cavi vengono posti alle estremità dello schermo del

giunto, come mostrato in Figura 5.10. La lunghezza dello schermo oggetto della misurazione è di 80 cm.



Figura 5.10: Misura della giunzione dello schermo del giunto sano appartenente alla linea Desana da Stura

Durante il test, viene iniettata nello schermo una corrente continua (DC) di **100 A**, permettendo così di rilevare la resistenza di contatto della giunzione, la quale risulta pari a:

$$R_{c,schermo} = 2,63 \text{ m}\Omega \quad (5.2)$$

- **Misura resistenza di contatto della giunzione del conduttore:**
Analogamente, nello stesso giunto, viene misurata la resistenza di contatto della giunzione del conduttore, come illustrato nelle Figure 5.11 e 5.12. La lunghezza del conduttore oggetto della misurazione è di 87 cm. Anche in questo caso, viene iniettata una corrente di **100 A**, e si rileva una resistenza di contatto del conduttore pari a:

$$R_{c,conduttore} = 141 \text{ }\mu\Omega \quad (5.3)$$



Figura 5.11: Misura della giunzione del conduttore del giunto sano appartenente alla linea Desana da Stura



Figura 5.12: Misura della giunzione del conduttore del giunto sano appartenente alla linea Desana da Stura

Questa misurazione è fondamentale per confrontare il valore della resistenza di contatto della giunzione del conduttore con quello dello schermo. Chiaramente, la resistenza di contatto del conduttore risulta significativamente inferiore rispetto a quella dello schermo. Questo comportamento è prevedibile,

poiché il conduttore è progettato per assicurare un'efficiente conduzione elettrica, caratterizzata da una bassa resistenza al fine di minimizzare le perdite per effetto Joule.

- **Misura resistenza di isolamento del giunto:**

Sul giunto in esame viene effettuata anche la misurazione della resistenza di isolamento. Questa operazione viene eseguita utilizzando lo strumento precedentemente descritto, il *Tester di resistenza di isolamento*, il quale applica una tensione continua tra lo schermo e il conduttore, come illustrato in Figura 5.13. Questa misura è fondamentale per valutare l'integrità dell'isolamento e identificare eventuali degradi che potrebbero compromettere il funzionamento del giunto.



Figura 5.13: Misura della resistenza dell'isolamento del giunto sano appartenente alla linea Desana da Stura

La misurazione viene effettuata considerando tre livelli di tensione: **1 kV**, **2,5 kV** e **5 kV**. Per ciascun livello, si ottengono rispettivamente i seguenti valori di resistenza di isolamento:

$$R_{\text{isolamento}} = 4,4 \text{ G}\Omega \quad (5.4)$$

$$R_{\text{isolamento}} = 3,5 \text{ G}\Omega \quad (5.5)$$

$$R_{\text{isolamento}} = 3 \text{ G}\Omega \quad (5.6)$$

Dai valori elevati della resistenza di isolamento si può dedurre che l'isolamento è in ottime condizioni. Questo indica che non ci sono particolari segni di degrado o danneggiamento, suggerendo una buona integrità del sistema isolante.

Misure su giunto linea: Padova da Stura

Un altro giunto oggetto delle misurazioni appartiene alla linea MT Padova, alimentata dalla cabina primaria Stura.

La linea è composta da una terna di cavi del tipo 3x(1x185) Al, con conduttori in alluminio. Il giunto in esame è di tipo trifase, costituito da tre giunti unipolari, ed è di tipo *termo-restringente*. La particolarità di questo giunto è che collega due cavi di diversa tipologia, motivo per cui viene definito **giunto misto**. Le caratteristiche dei due cavi uniti dal giunto sono:

- Cavo 1: isolamento in XLPE e schermo in fili di rame
- Cavo 2: isolamento in carta impregnata con miscela non migrante e schermo in tubo di alluminio

Anche questa linea ha subito un guasto in una delle tre fasi, precisamente in corrispondenza del giunto, mostrato in Figura 5.14.

In questo caso, le misurazioni effettuate e riportate di seguito riguardano la resistenza di contatto della giunzione dello schermo, sia del giunto sano che del giunto interessato dal guasto. Questa misura consente il confronto tra le due resistenze al fine di valutare il grado della connessione a seguito del guasto.



Figura 5.14: Giunto guasto appartenente alla linea Padova da Stura

▷ **Misura resistenza di contatto della giunzione dello schermo:**

La misurazione della resistenza di contatto della giunzione dello schermo viene eseguita con un micro-ohmmetro su un giunto integro e uno guasto, entrambi dotati di uno schermo di 78 cm di lunghezza.

Inoltre, per garantire un collegamento affidabile delle pinze di misura alle due estremità dello schermo, nel tratto di cavo con schermo in fili di rame viene applicato un nastro in alluminio conduttivo, come mostrato nella Figura 5.15. Questo accorgimento consente di migliorare la presa delle pinze e assicurare una misurazione più precisa.



Figura 5.15: Estremità del giunto: Schermo a fili di rame senza e con nastro in alluminio conduttore

La Figura 5.16 mostra lo schema completo della misura, in cui, iniettando una corrente continua di **100 A**, e misurando la caduta di tensione, si ottiene la resistenza di contatto della giunzione.



Figura 5.16: Misura della giunzione dello schermo del giunto sano appartenente alla linea Padova da Stura

Di seguito si riportano i risultati della misurazione:

- La resistenza di contatto della giunzione dello schermo del **giunto sano** risulta:

$$R_{c_{schermo,sano}} = 2,78 \text{ m}\Omega \quad (5.7)$$

- La resistenza di contatto della giunzione dello schermo del **giunto guasto** risulta:

$$R_{c_{schermo,guasto}} = 5,8 \text{ m}\Omega \quad (5.8)$$

Il confronto tra le resistenze di contatto della giunzione dello schermo, misurate sui giunti integro e guasto, evidenzia una differenza significativa: la resistenza di contatto del giunto guasto risulta superiore a quella del giunto integro. Questo dato evidenzia chiaramente che il guasto ha compromesso l'integrità dello schermo del giunto, determinando un aumento della resistenza.

▷ **Misura resistenza di isolamento del giunto:**

La misura della resistenza di isolamento viene effettuata sia sul giunto sano che guasto. La misura viene svolta applicando tensione continua (DC) tra il conduttore e lo schermo, come mostrato in Figura 5.17.



Figura 5.17: Misura della resistenza dell'isolamento del giunto appartenente alla linea Padova da Stura

Di seguito si riportano i risultati della misurazione:

- Le resistenze di isolamento del **giunto sano**, applicando i livelli di tensione **1 kV**, **2,5 kV** e **5 kV**, risultano rispettivamente:

$$R_{c,isolamento} = 312 \text{ M}\Omega \quad (5.9)$$

$$R_{c,isolamento} = 247 \text{ M}\Omega \quad (5.10)$$

$$R_{c,isolamento} = 197 \text{ M}\Omega \quad (5.11)$$

- La resistenza di isolamento del **giunto guasto** misurata soltanto con un livello di tensione pari **1 kV**, risulta:

$$R_{c,isolamento} = 36,7 \text{ k}\Omega \quad (5.12)$$

Dal confronto tra le resistenze di isolamento misurate nei giunti sano e guasto, emerge una significativa differenza: la resistenza di isolamento del giunto guasto risulta notevolmente inferiore rispetto a quella del giunto sano. Questo dato indica chiaramente che, a seguito del guasto, l'integrità dell'isolamento è stata compromessa, evidenziando il degrado del materiale isolante.

Misure su giunto linea: 7074

L'ultimo giunto oggetto delle misure delle resistenze di contatto e di isolamento è il giunto trifase appartenente alla linea 7074.



Figura 5.18: Giunto trifase guasto appartenente alla linea 7074

La terna di cavi che compone la linea è del tipo 3x(1x185) Al, con conduttori in alluminio, isolamento in XLPE (polietilene reticolato) e schermo in fili di rame con nastro di rame in contro-spirale. Il giunto in esame è di tipo *auto-restringente*.

La linea ha riportato un guasto in una delle tre fasi, precisamente in corrispondenza di un giunto (Figura 5.18). Osservando attentamente la terna dei giunti, si nota che, oltre al giunto centrale chiaramente danneggiato, anche il giunto superiore risulta danneggiato, sebbene con danni meno evidenti. È probabile che il guasto verificatosi sul giunto centrale sia stato di un'intensità tale da influenzare anche il giunto adiacente.

▷ **Misura resistenza di contatto della giunzione dello schermo del giunto sano:**

Per la misura della resistenza di contatto della giunzione degli schermi, si procede all'iniezione di una corrente di **100 A** nello schermo del giunto sano, seguendo una procedura analoga a quella adottata per i giunti precedentemente esaminati. Utilizzando un micro-ohmmetro, si misura la resistenza di contatto della giunzione dello schermo, la quale risulta:

$$R_{c,schermo} = 1,3 \text{ m}\Omega \quad (5.13)$$

Il giunto oggetto delle misure ha una lunghezza di 64 cm. Lo schema di misura completo è mostrato in Figura 5.19.



Figura 5.19: Misura della giunzione dello schermo del giunto sano appartenente alla linea 7074

A seguito di questa misurazione, si osserva che, tra le tre resistenze di contatto delle giunzioni degli schermi rilevate, quella in esame presenta il valore più basso. Questo risultato indica che il giunto in esame è stato realizzato con una qualità superiore rispetto agli altri. Una resistenza di contatto inferiore comporta, infatti, minori perdite di Joule, traducendosi in un riscaldamento ridotto del punto di giunzione. Di conseguenza, un giunto con una resistenza di contatto più bassa garantisce anche una maggiore durata e affidabilità del collegamento, riducendo significativamente il rischio di guasti dovuti al surriscaldamento.

▷ **Misura resistenza di isolamento del giunto:**

La misura della resistenza di isolamento viene effettuata anch'essa sul giunto sano, attraverso il *Tester di resistenza di isolamento*. Vengono applicate tre livelli di tensioni continue (DC) di valore **1 kV**, **2,5 kV** e **5 kV**, tra lo schermo del giunto e il conduttore, come mostrato in Figura 5.20.



Figura 5.20: Misura della resistenza dell'isolamento del giunto sano appartenente alla linea 7074

I valori di resistenza di isolamento ottenuti per ciascun livello di tensione sono rispettivamente:

$$R_{isolamento} = 300 \text{ G}\Omega \quad (5.14)$$

$$R_{isolamento} = 272 \text{ G}\Omega \quad (5.15)$$

$$R_{isolamento} = 132 \text{ G}\Omega \quad (5.16)$$

Il giunto auto-restringente della linea 7074, anche per quanto riguarda la resistenza di isolamento, si distingue per le sue prestazioni superiori, in quanto mostra valori di resistenza di isolamento significativamente più elevati rispetto ai giunti di tipo termo-restringente.

5.3 Misura di temperatura dei cavi interrati

L'INRiM, oltre ad effettuare misure di resistenza di contatto e di isolamento, in questo progetto di ricerca svolge il ruolo fondamentale di monitorare e raccogliere dati di temperatura di linee elettriche interrate MT di Torino.

Questo lavoro ha l'obiettivo di comprendere come le condizioni ambientali influenzino il comportamento termico dei cavi e il loro corretto funzionamento nel tempo. La misurazione, infatti, non riguarda soltanto la temperatura dei cavi, ma considera anche quella dell'ambiente circostante, poiché variabili come la temperatura ambiente, la temperatura del terreno, l'umidità e altri fattori climatici possono influenzare in modo significativo le prestazioni e la durata delle linee elettriche interrate.

5.3.1 Caratteristiche della misura

Le linee elettriche oggetto delle misurazioni della temperatura sono due, denominate IEN e Morgari. Entrambe sono **linee elettriche interrato in cavo MT**, appartenenti alla rete di distribuzione MT di Torino, collocate a una profondità di circa 70-90 cm nel terreno. La linea Morgari è installata all'interno di un tubo protettivo, mentre la linea IEN è direttamente interrata nel suolo.

Le due linee sono posizionate ad una distanza di almeno 50 cm l'una dall'altra, per evitare reciproche influenze termiche. Tuttavia, data la loro relativa vicinanza, si può presumere che entrambe siano soggette alle stesse condizioni ambientali.

Le misurazioni della temperatura sono state effettuate durante l'intero anno 2024, ma, ai fini di questo studio, sono stati presi in considerazione solo due periodi estivi, caratterizzati da elevate temperature. In particolare, i periodi analizzati sono i seguenti:

1. dal 24 luglio 2024 al 2 agosto 2024;
2. dal 11 agosto 2024 al 17 agosto 2024.

La misura è realizzata attraverso un sistema di acquisizione dati che si compone di diverse *termocoppie*, progettate per rilevare e registrare le seguenti temperature:

- **TC1 Temperatura interna del quadro 1:** misura della temperatura all'interno del quadro di acquisizione.
- **TC2 Temperatura del terreno:** misura della temperatura del terreno in un punto nel mezzo tra le linee e la superficie del suolo.
- **TC3 Temperatura giunto L2 della linea IEN:** misura della temperatura sulla superficie del giunto L2 della linea IEN.
- **TC4 Temperatura giunto L3 della linea IEN:** misura della temperatura sulla superficie del giunto L3 della linea IEN.
- **TC5 Temperatura della linea Morgari bassa:** misura della temperatura sulla superficie del cavo della linea Morgari, a monte del sistema "entra-esci".
- **TC6 Temperatura della linea Morgari alta:** misura della temperatura sulla superficie del cavo della linea Morgari, a valle del sistema "entra-esci".
- **TC8 Temperatura dell'asfalto:** misura la temperatura sulla superficie al di sopra del cavo, nonché dell'asfalto.

Dall'elenco delle temperature registrate emerge una differenza nelle modalità di misurazione tra le due linee. Per la linea Morgari, le rilevazioni sono state effettuate

sulla superficie del cavo, poiché i giunti non erano facilmente accessibili. Mentre, per la linea IEN, è stato possibile acquisire le temperature in corrispondenza di due giunti, identificati come L2 e L3, di tipo in carta impregnata, riportati nella Figura 5.21.



Figura 5.21: Giunti della Linea IEN

Le temperature vengono misurate in modo continuo, con una frequenza di campionamento elevata. Tuttavia, per semplificare la gestione e l'analisi dei dati, sono state calcolate medie delle temperature su *intervalli di 10 minuti*. Questi valori medi sono stati poi confrontati con le **correnti di fase** delle linee elettriche IEN e Morgari, i cui dati, forniti da IRETI, sono anch'essi stati mediati su intervalli di 10 minuti. Questo confronto permette di integrare le misurazioni delle temperature con i valori di carico, fornendo così un quadro più completo e approfondito delle condizioni operative delle linee durante i periodi di monitoraggio.

Nelle Tabelle 5.1 e 5.2, sono riportate le specifiche tecniche principali delle linee elettriche oggetto delle misurazioni della temperatura, IEN e Morgari, informazioni fondamentali per l'analisi termica che verrà condotta successivamente.

Tabella 5.1: Specifiche tecniche linee IEN e Morgari

Nome	Tensione	Tipo di posa	Tipologia cavo	Sigla cavo
IEN	22 kV	interrato	3x(1x150) Al 12/20 kV	ARC1HLRX
Morgari	22 kV	tubo interrato	3x(1x185) Al 18/30 kV	ARE4H1RX

Tabella 5.2: Specifiche tecniche linee IEN e Morgari

Nome	Sezione [mm ²]	Liv. Tens. Isolam.	Conduttore	Anno di posa
IEN	3x150	12/20 kV	Al	1991
Morgari	3x185	18/30 kV	Al	2018

5.3.2 Andamenti di temperatura registrati

Sulla base dei dati di temperatura forniti dall'INRiM e dei dati di corrente messi a disposizione da IRETI, entrambi mediati su intervalli di 10 minuti, è stata condotta un'analisi dettagliata mediante l'utilizzo di Matlab.

In particolare, sono stati rappresentati graficamente gli andamenti delle temperature e l'andamento della corrente nel tempo, relativi ai due periodi di interesse, delle linee IEN e Morgari. L'elaborazione dei dati ha reso possibile l'analisi delle correlazioni tra gli andamenti termici e le variazioni della corrente, consentendo una valutazione dettagliata dell'influenza delle condizioni ambientali e dei carichi elettrici sulla rete di distribuzione. Ciò ha permesso quindi di ottenere informazioni utili per una comprensione più approfondita del fenomeno studiato.

Linea Morgari: Periodo 24 luglio 2024 - 2 agosto 2024

In questa sezione vengono riportati i grafici relativi ai dati acquisiti per la linea Morgari, dal 24 luglio al 02 agosto del 2024. Nella Figura 5.22 è riportato il grafico che mostra l'intero set di dati disponibili. In particolare, vengono visualizzati gli andamenti delle seguenti variabili: la temperatura del quadro, la temperatura del terreno, la temperatura della linea Morgari in due punti (uno a monte e uno a valle, rispetto a un sistema "entra-esci"), la temperatura dell'asfalto e l'andamento nel tempo della corrente di carico della stessa linea. Questa prima rappresentazione consente di avere una panoramica generale dell'andamento delle grandezze monitorate nel periodo di interesse.

Per condurre un'analisi più approfondita dei dati, in Figura 5.23 vengono rappresentati graficamente i parametri più rilevanti: la temperatura del terreno, la temperatura sulla superficie del cavo della linea Morgari Bassa, la temperatura dell'asfalto e la corrente di carico. In questo grafico sono evidenziati i valori massimi, minimi e medi di alcuni dei parametri rappresentati. Per quanto riguarda la temperatura del cavo della linea Morgari, tra i due punti di misurazione, è stato preso in considerazione il caso più sfavorevole, ovvero la temperatura della linea Morgari Bassa, la quale risulta maggiore.

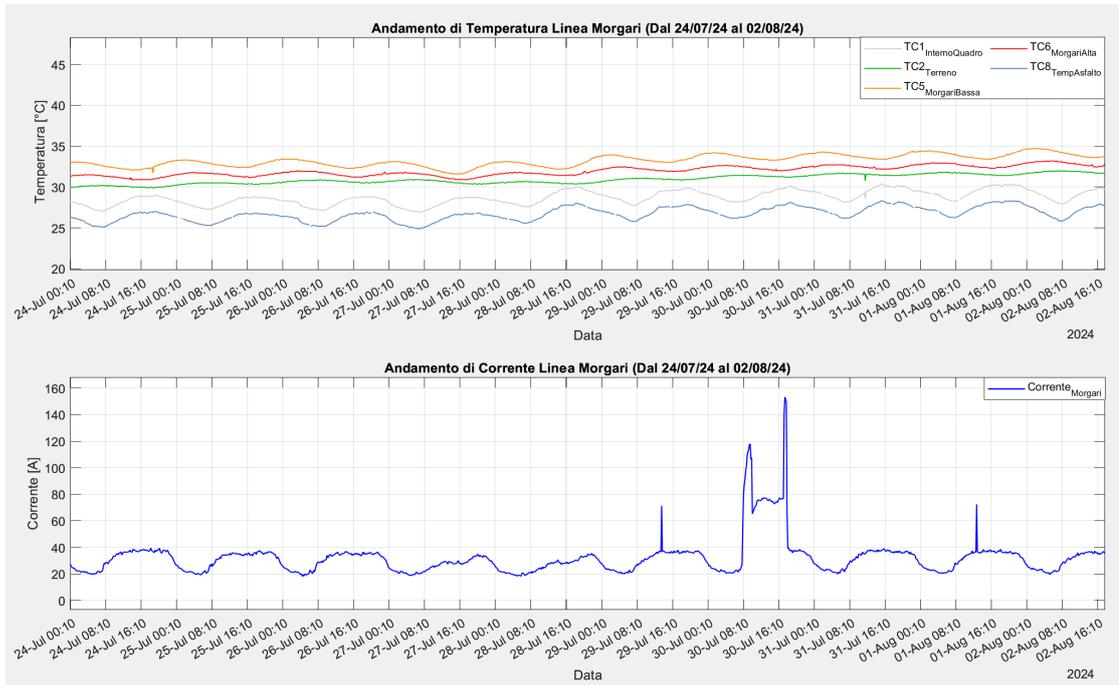


Figura 5.22: Andamento Temperature e Corrente nel tempo della Linea Morgari (24 luglio - 2 agosto 2024)

Sulla base di questi dati, è possibile analizzare le correlazioni tra le diverse grandezze, da cui emergono le seguenti considerazioni:

1. La **temperatura dell'asfalto** e la **corrente di carico** mostrano un andamento oscillatorio tipico giornaliero, pressoché in fase tra loro, con valori più elevati durante il giorno e più bassi nelle ore notturne. Analizzando l'andamento della corrente, si osserva un significativo incremento il 30 luglio, caratterizzato da due picchi marcati, probabilmente dovuto a un cambiamento dell'assetto della rete. Picchi simili si riscontrano anche nelle giornate del 29 luglio e del 1° agosto.
2. La **temperatura del cavo** della linea Morgari Bassa, rappresentata in arancione, mostra un andamento oscillatorio simile a quello della temperatura dell'asfalto. Osservando l'andamento, si possono trarre le seguenti considerazioni:
 - La temperatura del cavo raggiunge il suo valore di picco con un certo ritardo rispetto a quello dell'asfalto e della corrente. In particolare lo raggiunge durante la notte, quando le temperature sono più basse, contrariamente a quanto si potrebbe intuire.

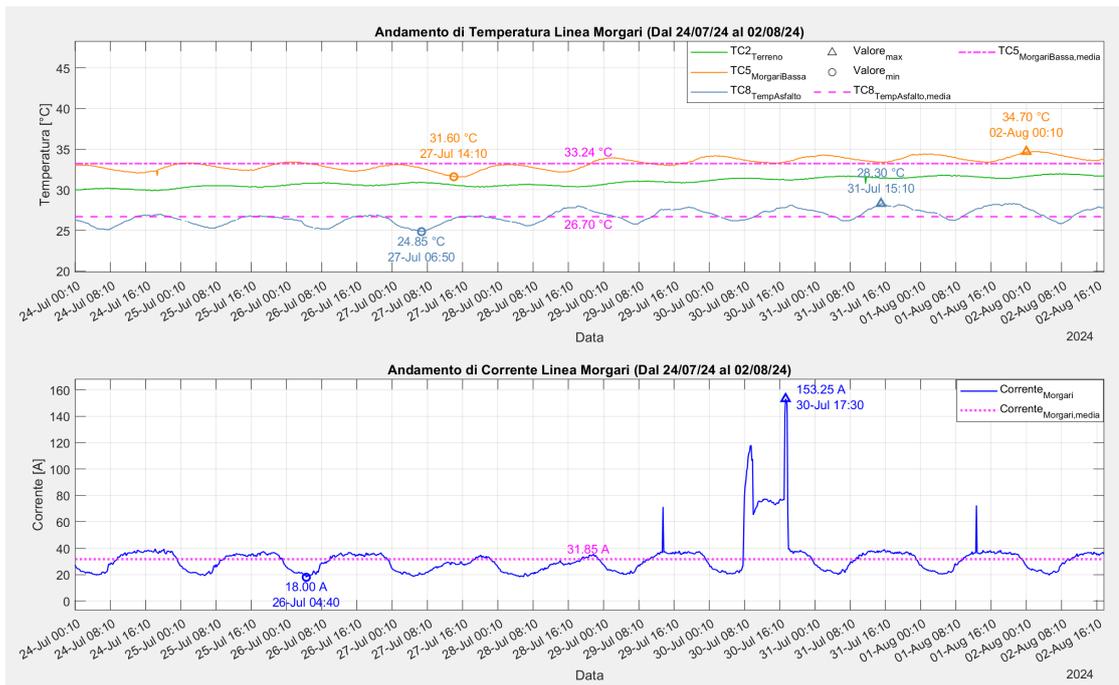


Figura 5.23: Analisi dati Linea Morgari (24 luglio - 2 agosto 2024)

Questo ritardo è attribuibile alla capacità termica del cavo e alla sua inerzia termica, che ne rallentano il processo di riscaldamento. Aspetto visibile nella Figura 5.24.

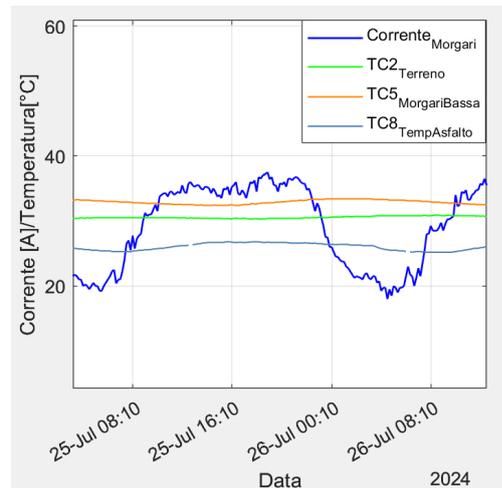


Figura 5.24: Zoom Andamento Temperatura e Corrente Linea Morgari (24 luglio - 2 agosto 2024)

- Allo stesso modo, anche il minimo della temperatura del cavo presenta un ritardo rispetto al minimo della temperatura dell'asfalto e della corrente. Questo fenomeno è dovuto al fatto che il cavo per dissipare il calore accumulato durante il giorno dovuto sia alle elevate correnti di carico sia alle alte temperature del suolo, impiega diverse ore a causa della sua inerzia termica. Essa, infatti, rallenta il processo di raffreddamento del cavo facendo sì che la sua temperatura resti elevata anche dopo il calo delle condizioni ambientali.
- Come si osserva nella Figura 5.23 infatti, la temperatura del cavo raggiunge il suo massimo intorno mezzanotte, mentre il minimo si verifica intorno alle 14, durante le ore diurne. Il minimo di temperatura del cavo, oltre a verificarsi di giorno, si verifica anche in concomitanza con un abbassamento della corrente di carico rispetto ai valori tipici di quell'ora. Questo comportamento suggerisce che la temperatura del cavo non dipende esclusivamente dalla temperatura ambientale e dall'inerzia termica, ma è anche influenzata dall'andamento della corrente di carico, come è naturale che sia.
- Un esempio significativo dell'importanza dell'inerzia termica dei cavi si osserva in corrispondenza dell'anomalo incremento di carico nella giornata del 30 luglio (Figura 5.25). Nonostante la corrente raggiunga valori molto elevati, la temperatura del cavo rimane praticamente invariata. Questo comportamento indica che la risposta termica del cavo non è immediata, ma dipende dalla sua inerzia termica.

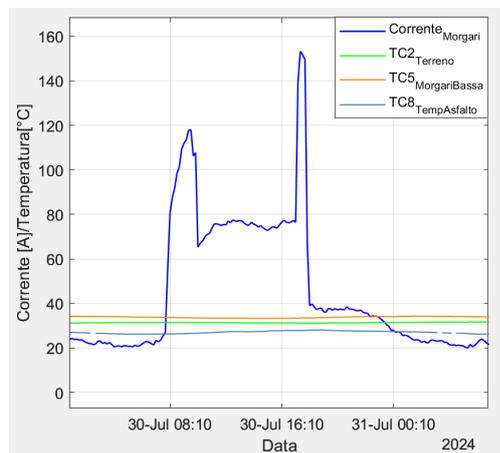


Figura 5.25: Zoom Incremento di corrente Linea Morgari (24 luglio - 2 agosto 2024)

3. La **temperatura dell'asfalto** rilevata durante questo periodo raggiunge il valore massimo intorno alle 15, mentre, il minimo di temperatura dell'asfalto si ha pressoché intorno alle 7 del mattino. Il minimo e il massimo e si verificano con un ritardo, seppur piccolo, rispetto al minimo e al massimo della corrente. Ciò evidenzia che anche il suolo ha una certa inerzia termica, di conseguenza, per dissipare e smaltire tutto il calore assorbito durante la giornata, impiega l'intera notte.
4. La **temperatura del terreno** ha un andamento pressoché costante.

Linea IEN: Periodo 24 luglio 2024 - 2 agosto 2024

In questa sezione vengono presentati i grafici che illustrano i dati acquisiti per la linea IEN nel periodo compreso tra il 24 luglio e il 2 agosto 2024.

Analogamente a quanto visto in precedenza, nella Figura 5.26 sono presentati gli andamenti di tutti i dati acquisiti, sia quelli relativi alla temperatura che alla corrente di carico della linea.

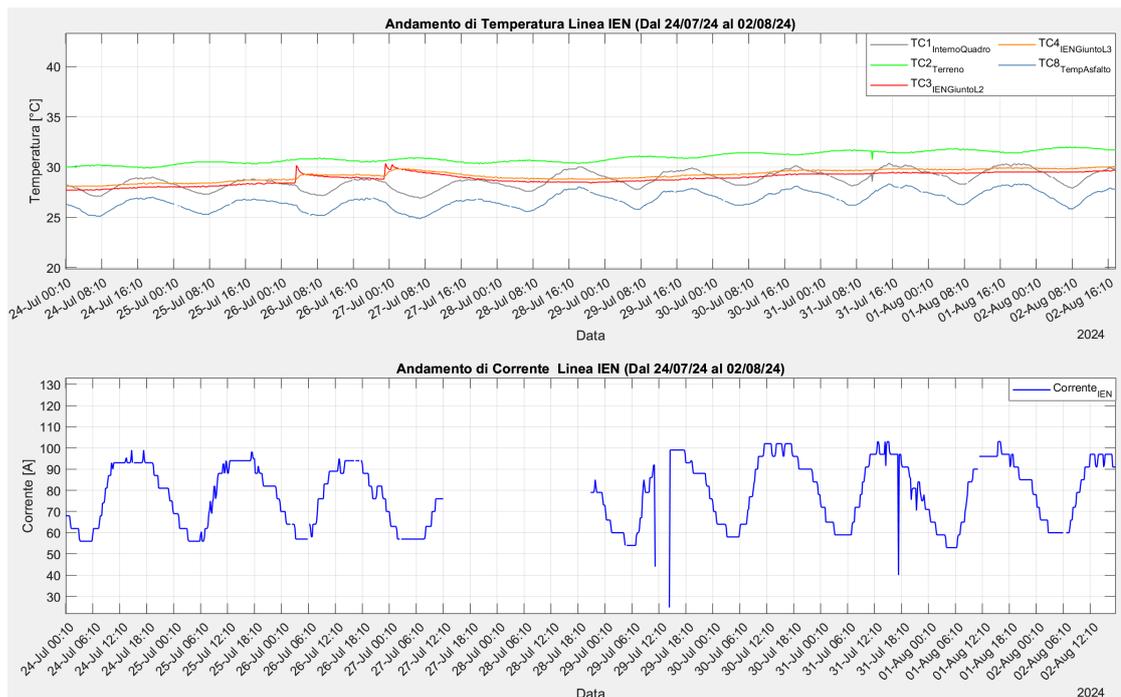


Figura 5.26: Andamento di Corrente e Temperatura nel tempo Linea IEN (24 luglio - 2 agosto 2024)

In Figura 5.27 sono rappresentati gli andamenti della temperatura del terreno, della temperatura del giunto L3 (che presenta valori più elevati rispetto al giunto

L2), della temperatura dell'asfalto e della corrente. Inoltre, sono evidenziati i valori massimi, minimi e medi di ciascuna delle grandezze, al fine di fornire una panoramica completa delle variazioni osservate durante il periodo di analisi.

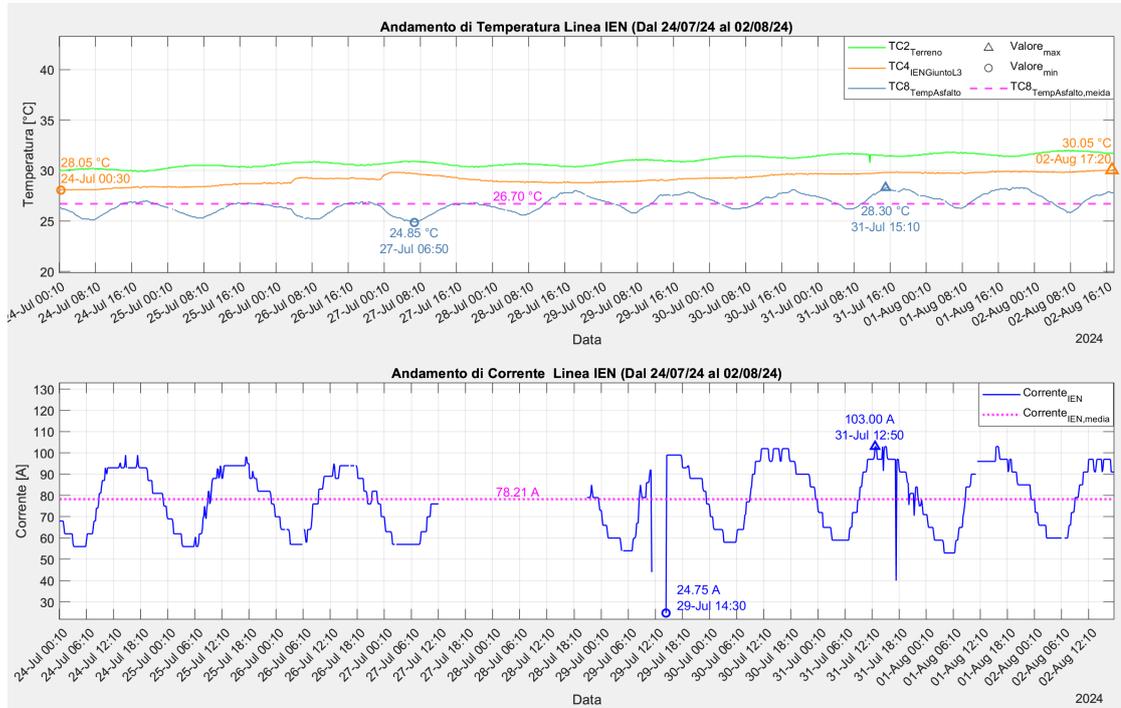


Figura 5.27: Analisi dati Linea IEN (24 luglio - 2 agosto 2024)

Le considerazioni che si possono trarre dall'osservazione dei grafici sono le seguenti:

1. La **corrente di carico** e la **temperatura dell'asfalto** seguono un andamento oscillatorio tipico delle variazioni giornaliere, con valori più elevati durante il giorno e più bassi nelle ore notturne. Inoltre, si osserva che rispetto al caso precedente, la linea IEN presenta un livello di carico significativamente più elevato.
2. La **temperatura del giunto L3** mostra un andamento crescente, correlato sia all'aumento della temperatura dell'asfalto che all'incremento parallelo della corrente di carico. Questo conferma l'influenza reciproca di queste due grandezze sulla temperatura raggiunta dal giunto, evidenziando come entrambe contribuiscano al suo riscaldamento.
Si osserva, inoltre, che, pur essendo il giunto L3 sottoposto alle stesse condizioni ambientali della linea Morgari e attraversato da una corrente maggiore, la sua temperatura risulta inferiore. Questo potrebbe essere attribuito a differenze

nella conducibilità termica degli strati che compongono il giunto e il cavo, che influenzano il comportamento termico della linea in modo diverso. Inoltre, lo spessore maggiore del giunto potrebbe contribuire a una minore temperatura sulla superficie del giunto stesso rispetto a quella registrata sulla superficie del cavo della linea Morgari.

3. La **temperatura del terreno** ha un andamento crescente, anche se di poco, coerentemente all'aumento delle altre grandezze.

Linea Morgari: Periodo 11 agosto 2024 - 17 agosto 2024

In questa sezione vengono presentati i grafici relativi ai dati acquisiti di temperatura e corrente per la linea Morgari, nel periodo compreso tra l'11 e il 17 agosto 2024. Come nei casi precedenti, in Figura 5.28, sono mostrati gli andamenti di tutti i dati disponibili.

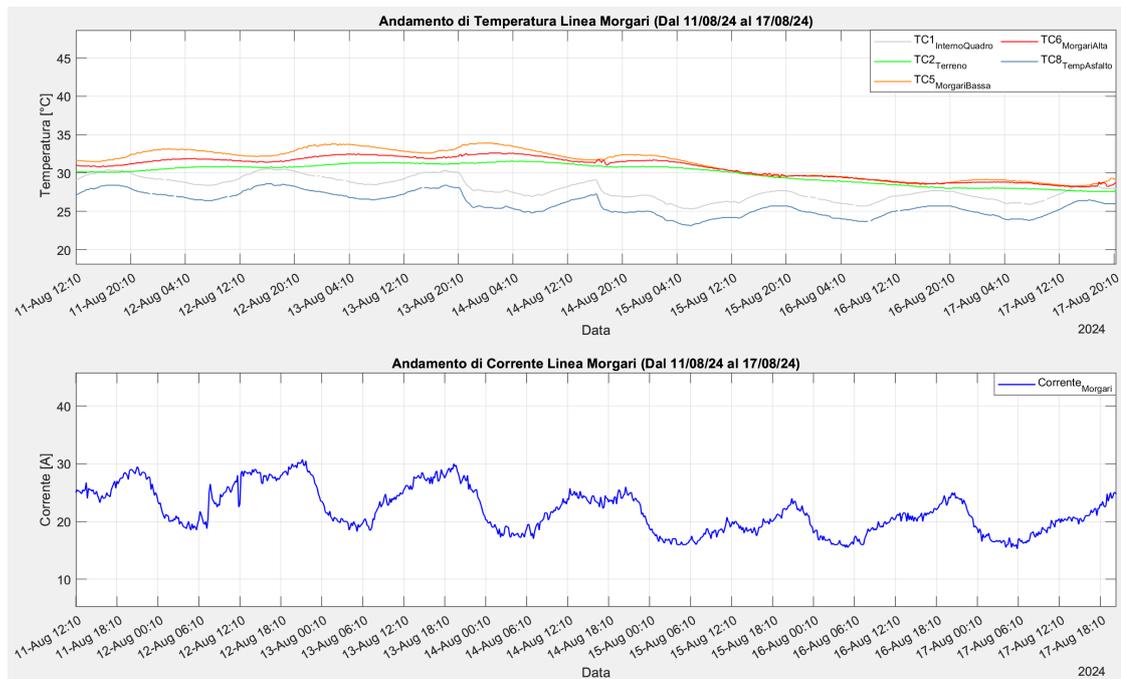


Figura 5.28: Andamento di Corrente e Temperatura Linea Morgari nel tempo (11 agosto - 17 agosto 2024)

Successivamente, per permettere un'analisi più approfondita, viene selezionata una porzione specifica dei dati (Figura 5.29), da cui viene realizzato un grafico che include soltanto la temperatura del terreno, la temperatura sulla superficie del cavo della linea Morgari Bassa (la quale, come nel caso precedente, presenta valori

più elevati rispetto alla Morgari Alta), la temperatura dell'asfalto e la corrente di carico. Inoltre, sono evidenziati i punti di maggior interesse per facilitare l'analisi, valori massimi, minimi e medi delle grandezze principali.

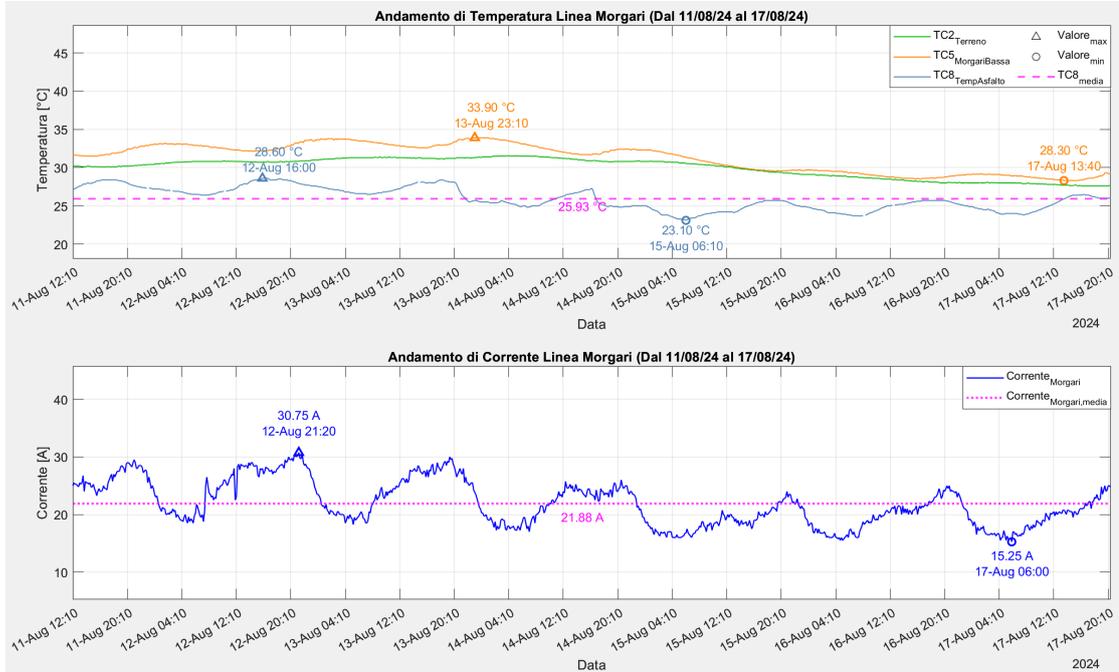


Figura 5.29: Analisi dati Linea Morgari (11 agosto - 17 agosto 2024)

Dall'osservazione dei grafici riportati in Figura 5.28 e 5.29 , si possono trarre le seguenti considerazioni:

1. La **corrente di carico** e la **temperatura dell'asfalto**, anche in questo caso, seguono un andamento oscillatorio tipico delle variazioni giornaliere, con valori più elevati durante il giorno e più bassi nelle ore notturne. Tuttavia, a differenza del periodo precedente, si osserva una diminuzione della temperatura dell'asfalto, a partire dal 15 agosto. Questo calo è attribuibile alla riduzione delle temperature ambientali che ha interessato la città di Torino in quel periodo. Inoltre, oltre alla temperatura dell'asfalto, diminuisce anche la corrente di carico della linea Morgari, indicando che la maggiore domanda di energia prima del 15 agosto era principalmente legata all'uso intensivo dei condizionatori. Con l'arrivo di temperature più basse, infatti, si riduce l'uso dei sistemi di raffreddamento e, di conseguenza, il carico sulla rete diminuisce.
2. La **temperatura del cavo** della linea Morgari Bassa mostra un andamento oscillatorio durante l'arco della giornata, con valori più elevati di sera, quando

sia la corrente che la temperatura del suolo sono generalmente più basse. Tuttavia, con il progressivo abbassamento della temperatura dell'asfalto e della corrente di carico, la temperatura del giunto subisce anch'esso una diminuzione. Questo comportamento conferma il fatto che la temperatura del giunto è influenzata sia dalle condizioni ambientali, sia dalla variazione della corrente di carico.

3. La **temperatura del terreno** mostra un andamento decrescente, in linea con il comportamento delle altre grandezze, come la corrente di carico, la temperatura dell'asfalto e quella del cavo.

Linea IEN: Periodo 11 agosto 2024 - 17 agosto 2024

In questa sezione vengono mostrati i grafici relativi ai dati di temperatura e corrente registrati per la linea IEN nel periodo compreso tra l'11 e il 17 agosto 2024. Come nei casi precedenti, si parte dalla rappresentazione dell'insieme completo dei dati raccolti (Figura 5.30).

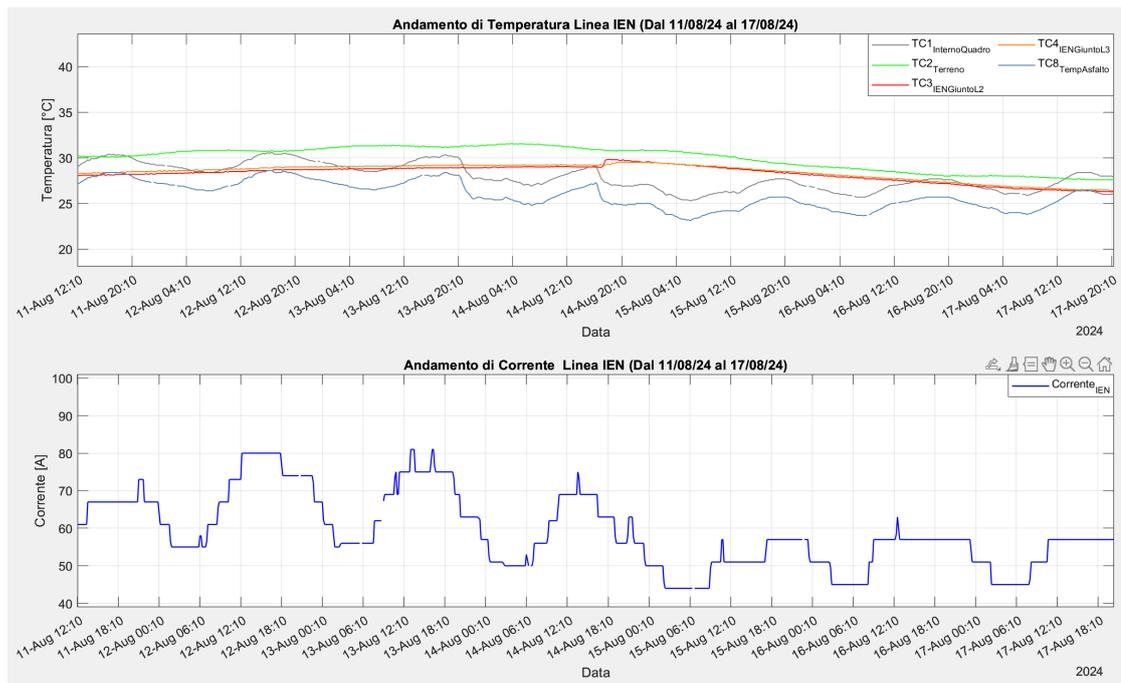


Figura 5.30: Andamento di Corrente e Temperatura nel tempo Linea IEN (11 agosto - 17 agosto 2024)

Successivamente, per un'analisi più approfondita, si considera una porzione specifica dei dati (Figura 5.31), da cui viene elaborato un grafico contenente la temperatura

del terreno, la temperatura sulla superficie del giunto L3 della linea IEN (che, come riscontrato anche nel precedente intervallo di osservazione, mostra valori più elevati rispetto al giunto L2), la temperatura dell'asfalto e la corrente di carico. Inoltre, sono stati messi in evidenza i punti di maggiore rilevanza per agevolare l'interpretazione dei risultati.

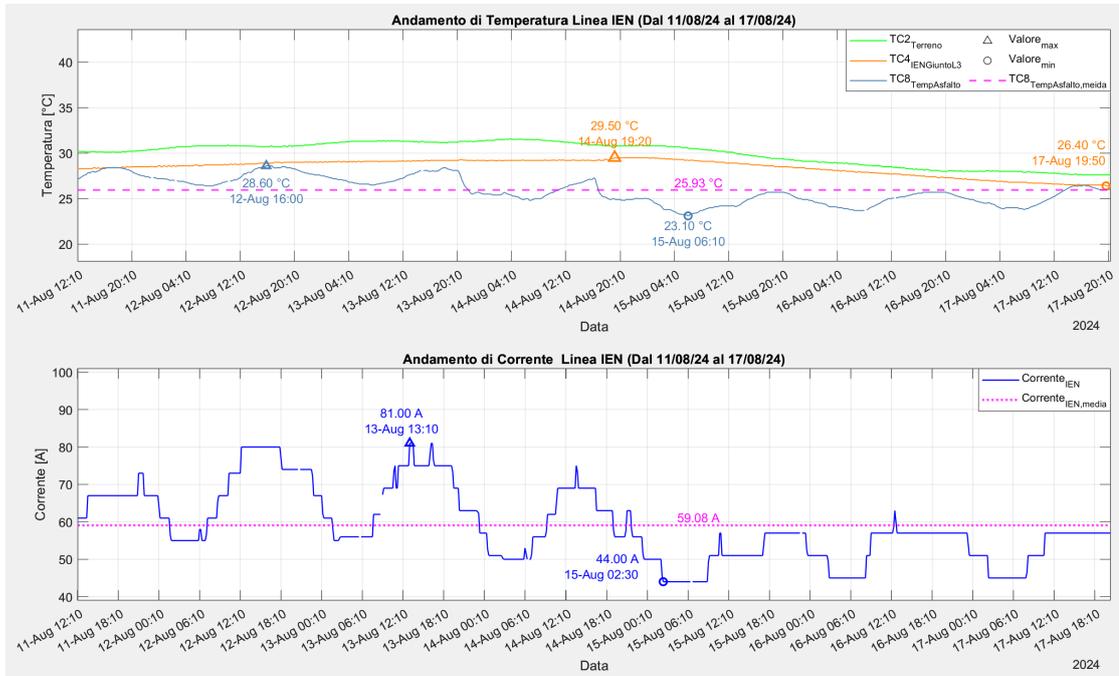


Figura 5.31: Analisi dati Linea IEN (11 agosto - 17 agosto 2024)

Dall'osservazione del grafico riportato in Figura 5.31, si possono trarre le seguenti considerazioni:

1. La **corrente di carico** e la **temperatura dell'asfalto** mostrano, anche in questo caso, un andamento oscillatorio caratteristico delle variazioni giornaliere, con valori più elevati nelle ore diurne e più bassi durante la notte. Per la linea IEN, si osserva una progressiva riduzione della corrente di carico in concomitanza con l'abbassamento della temperatura dell'asfalto. Questo comportamento riconferma che durante i mesi estivi, una parte significativa della domanda energetica è legata all'utilizzo dei sistemi di condizionamento. Anche in questo caso, confrontando le correnti di carico registrate nello stesso periodo, la linea IEN risulta essere più sollecitata rispetto alla linea Morgari.
2. La **temperatura del giunto L3** durante il periodo di osservazione, subisce inizialmente un progressivo incremento, dovuto probabilmente all'accumulo di calore dovuto a giorni consecutivi caratterizzati da temperature elevate.

Successivamente, si osserva una graduale diminuzione della temperatura del giunti. Questo calo è riconducibile alla riduzione sia della temperatura dell'asfalto, sia della corrente di carico e, più in generale, delle condizioni termiche del terreno circostante, che influenzano direttamente la trasmissione del calore accumulato dal giunto.

3. La **temperatura del terreno** mostra un andamento decrescente, in linea con il comportamento delle altre grandezze.

5.3.3 Considerazioni sulle temperature registrate

L'analisi dell'andamento delle temperature registrate sulle linee IEN e Morgari, in relazione alle correnti che le attraversano nei due periodi di interesse, ha permesso di evidenziare alcune osservazioni significative. In particolare, sono emerse correlazioni tra le variazioni termiche e quelle di corrente, consentendo una migliore comprensione del comportamento termico delle due linee. Da questa analisi le considerazioni finali che emergono sono:

- La temperatura del cavo e del giunto non dipende soltanto dalla corrente di fase che li attraversa, ma soprattutto dalle condizioni ambientali. Questo significa che, in condizioni di caldo intenso, anche con una corrente di carico moderata, il cavo può raggiungere temperature piuttosto elevate.
- L'inerzia termica del cavo e del giunto è un fattore cruciale nel determinare la loro reazione alle variazioni di temperatura e corrente. Poiché i materiali che compongono il cavo e il giunto (tipicamente metalli e materiali isolanti) possiedono una certa capacità di immagazzinare calore, essi non rispondono istantaneamente ai cambiamenti di carico o alle fluttuazioni della temperatura ambiente. Questo significa che la temperatura effettiva del cavo e del giunto tende a variare gradualmente, con un ritardo rispetto ai cambiamenti delle condizioni circostanti. In pratica, ciò significa che variazioni di carico e di temperatura non si traducano in variazioni immediate di temperatura del cavo o del giunto.
- Un'ulteriore considerazione riguarda il fatto che, nonostante entrambe le linee siano sottoposte alle medesime condizioni ambientali e la corrente nella linea IEN risulti superiore in entrambi i periodi di interesse, la temperatura rilevata sul giunto della linea IEN è inferiore rispetto a quella del cavo della linea Morgari. Questo fenomeno potrebbe essere attribuito a diversi fattori, tra cui lo spessore maggiore del giunto rispetto al cavo e la differente composizione degli strati e dei materiali che costituiscono il giunto e il cavo, i quali influenzano il loro comportamento termico, determinando una diversa capacità di conduzione e dispersione del calore.

- L'analisi evidenzia inoltre, come una parte consistente della domanda di energia durante i mesi estivi sia dovuta al condizionamento dell'aria. Durante il periodo estivo, l'aumento delle temperature ambientali porta a un maggiore uso di sistemi di aria condizionata, che a loro volta incrementano il carico sulle linee elettriche. Quando le temperature ambientali scendono, la domanda di energia per il raffreddamento diminuisce. Tale riduzione del carico contribuisce a una minore sollecitazione delle linee elettriche e dei giunti, abbassando così la temperatura di esercizio e, di conseguenza, riducendo i rischi di surriscaldamento.

Capitolo 6

Applicazione del modello termico alle linee interrate di Torino

L'obiettivo di questo capitolo è applicare il modello termico, tratto dalla norma IEC 60287 e dal materiale didattico [43], alle linee in cavo interrate MT di Torino, denominate Morgari e IEN, per le quali sono state effettuate le misure di temperatura. La norma IEC 60287 fornisce le linee guida per il calcolo della portata di corrente di un cavo in base alle sue caratteristiche fisiche, alle condizioni di posa e alle condizioni ambientali, con l'obiettivo di prevenire il surriscaldamento e garantire un funzionamento sicuro. Essa viene comunemente utilizzata dai progettisti per il dimensionamento delle linee elettriche interrate, consentendo di determinare la portata massima dei cavi in funzione delle loro specifiche costruttive e dell'ambiente in cui sono installati. Tuttavia, in questo lavoro di tesi, l'approccio seguito è diverso e prevede l'utilizzo della norma non per calcolare la portata massima del cavo, ma per stimare la temperatura che il cavo raggiunge durante il funzionamento. Questa stima viene effettuata sulla base dei seguenti dati disponibili:

1. La temperatura sulla superficie al di sopra del cavo, ovvero in corrispondenza dell'interfaccia con l'aria ambiente
2. La corrente che scorre all'interno del cavo

La temperatura stimata mediante il modello termico viene poi confrontata con i dati di temperatura effettivamente rilevati sulle linee IEN e Morgari, consentendo di valutare eventuali discrepanze tra il modello teorico e le condizioni reali di esercizio.

6.1 Implementazione del modello termico in Matlab

Disponendo dei dati di corrente della linea e della temperatura dell'asfalto, registrati ogni 10 minuti nei due periodi di interesse, è possibile applicare i modelli termici alle due linee, IEN e Morgari, tenendo conto che:

- La **linea Morgari** è composta da una terna di cavi unipolari disposti in configurazione a "Elica visibile" e posizionati all'interno di un tubo interrato, privo di materiale di riempimento. Di conseguenza, per determinare la temperatura sulla superficie di uno dei tre cavi, si applica il modello termico descritto nel paragrafo 4.2, assumendo l'aria come materiale riempitivo.
- La **linea IEN** è anche essa composta da una terna di cavi unipolari con configurazione ad "Elica visibile", ma a differenza della linea Morgari, essa è direttamente interrata. Inoltre, la misura della temperatura per la linea IEN è stata effettuata in corrispondenza del giunto, di tipo tripolare in carta impregnata. Di conseguenza, per calcolare la temperatura sulla superficie del giunto, si utilizza il modello termico precedentemente definito nel paragrafo 4.3.

Applicando i rispettivi modelli termici alle due linee nei due periodi di osservazione, è possibile stimare l'andamento della temperatura del cavo e del giunto, individuando complessivamente **quattro casi di studio**:

1. Applicazione del modello termico alla linea Morgari nel periodo dal 24 luglio al 2 agosto 2024
2. Applicazione del modello termico alla linea Morgari nel periodo dall'11 agosto al 17 agosto 2024
3. Applicazione del modello termico alla linea IEN nel periodo dal 24 luglio al 2 agosto 2024
4. Applicazione del modello termico alla linea IEN nel periodo dall'11 agosto al 17 agosto 2024

L'**obiettivo** dell'analisi è duplice:

- ▶ Confrontare la temperatura stimata del conduttore con quella della superficie esterna del cavo e del giunto, al fine di verificare se la temperatura interna dell'isolamento raggiunge valori critici;
- ▶ Valutare l'accuratezza del modello confrontando la temperatura teorica sulla superficie del cavo e del giunto con le temperature reali misurate sul campo.

Per condurre questa analisi, si utilizza Matlab, uno strumento efficace per implementare i metodi di calcolo descritti in precedenza. Attraverso Matlab, si elaborano i dati, si applicano le equazioni termiche necessarie e si generano grafici che mostrano l'andamento della temperatura e della corrente nel tempo. Questi grafici permettono di visualizzare chiaramente le variazioni termiche del cavo e di effettuare le opportune considerazioni sul comportamento termico della linea.

I **dati di ingresso** necessari per effettuare l'analisi sono:

- Corrente di fase della linea
- Temperatura ambiente sulla superficie al di sopra del cavo (che nel caso in esame corrisponde alla temperatura dell'asfalto)
- Caratteristiche delle linee: tensione di esercizio, sezione, tipologia di cavo, dimensioni e resistività termiche degli strati che compongono il cavo, resistenza e capacità per unità di lunghezza
- Caratteristiche del giunto: tipologia di giunto, dimensioni e resistività termiche degli strati che compongono il giunto
- Condizioni di posa: profondità di interramento, configurazione della disposizione e distanza tra i conduttori
- Proprietà del terreno: resistività termica del suolo

I dati di corrente e temperatura dell'asfalto sono stati ottenuti dalle misure sperimentali condotte dall'INRiM. Le caratteristiche della linea sono state ricavate grazie alle informazioni fornite da IRETI sulla tipologia di cavo e di giunto impiegati, mentre dalle schede tecniche dei cavi è stato possibile estrarre tutti i parametri necessari per l'analisi. Anche le condizioni di posa sono state fornite da IRETI, permettendo una descrizione accurata della configurazione effettiva delle linee. Per quanto riguarda le resistività termiche dei materiali che compongono il cavo e il giunto, sono stati adottati i valori consigliati dalla norma IEC 60287. Lo stesso criterio è stato seguito per la resistività termica del terreno, utilizzando i valori di riferimento suggeriti dalla normativa.

Di seguito vengono riportati i dati di ingresso impiegati per le due linee analizzate, che hanno permesso di condurre l'analisi in modo accurato.

6.1.1 Caratteristiche Linea Morgari

La linea Morgari è una linea interrata MT, caratterizzata, nella tratta in esame, dalle seguenti specifiche:

- ▶ Tensione di esercizio: 22 kV

- ▶ Sigla cavo: ARE4H1RX
- ▶ Tipologia cavo: 3x(1x185) Al 18/30 kV
- ▶ Tipologia di posa: in tubo interrato
- ▶ Sezione conduttore: 3x185 mm²
- ▶ Resistenza massima in CA del conduttore a 90°C: 0,213 Ω/km
- ▶ Corrente capacitiva nominale a U_o : 1,22 A/km
- ▶ Tipo di schermo: Fili di rame rosso e contro-spirale
- ▶ Resistenza massima in CC dello schermo a 20°C: 3,0 Ω/km
- ▶ Diametro conduttore: 15,9 mm
- ▶ Spessore isolante: 8,0 mm
- ▶ Spessore guaina esterna: 2,2 mm
- ▶ Diametro esterno cavo: 45,8 mm
- ▶ Tangente angolo di perdita per mescole XLPE: 0,004 (dalle norme)
- ▶ Resistività termica dell'isolamento in XLPE (mescola di polietilene reticolato): 3,5 K· m/W (dalle norme)
- ▶ Resistività termica della guaina termoplastica in PVC: 5,0 K· m/W (dalle norme)
- ▶ Profondità di interramento: 0,9 m
- ▶ Resistività del terreno: 3,0 K· m/W (dalle norme, considerando un terreno molto secco e in assenza di precipitazioni)
- ▶ Diametro esterno tubo: 160 mm
- ▶ Diametro interno tubo: 138 mm
- ▶ Resistività del tubo: 5,0 K· m/W (dalle norme)
- ▶ Resistività dell'aria: 40,0 K· m/W

A partire da queste informazioni, applicando le espressioni viste nel paragrafo 4.2, si calcolano le resistenze interne R_{T1} , R_{T2} , le resistenze termiche esterne R_{T3} , R''_{T3} e R'''_{T3} . Successivamente si calcolano le potenze trasmesse w' e w'' , e infine si stimano le temperature del conduttore θ_c e della superficie del cavo θ_o . I risultati sono riportati nel paragrafo 6.2.1.

6.1.2 Caratteristiche Linea IEN

La linea IEN è una linea interrata MT, caratterizzata, nella tratta in esame, dalle seguenti specifiche:

- ▶ Tensione di esercizio: 22 kV
- ▶ Sigla cavo: ARC1HLRX
- ▶ Tipologia cavo: 3x(1x150) Al 12/20 kV
- ▶ Tipologia di posa: interrato
- ▶ Sezione conduttore: 3x150 mm²
- ▶ Resistenza massima in CA del conduttore a 75°C: 0,253 Ω/km
- ▶ Corrente capacitiva nominale a U_o : 4,4 A/km
- ▶ Tipo di schermo: schermo a nastri di rame
- ▶ Resistenza massima in CC dello schermo a 20°C: 3 Ω/km
- ▶ Diametro conduttore: 14,5 mm
- ▶ Diametro isolante: 25,7 mm
- ▶ Diametro della schermatura: 28,5 mm
- ▶ Diametro esterno: 34 mm
- ▶ Tangente angolo di perdita: 0,004 (dalle norme)
- ▶ Resistività termica dell'isolamento Carta impregnata con miscela migrante : 5,5 K· m/W (dalle norme)
- ▶ Resistività termica della guaina termoplastica in PVC: 6,0 K· m/W (dalle norme)
- ▶ Profondità di interramento: 0,9 m
- ▶ Resistività del terreno: 3 K· m/W (dalle norme, considerando un terreno molto secco e in assenza di precipitazioni)

Oltre alle informazioni relative al cavo, per poter effettuare un'analisi termica adeguata, è fondamentale disporre anche di dettagli specifici sui giunti, poiché le misure di temperatura sulla linea IEN sono state eseguite proprio in corrispondenza di questi. Per questo motivo, è stato necessario esaminare un giunto tripolare,

procedendo con una sua sezione per studiare la struttura interna e le sue caratteristiche.

In questo modo, è stato possibile identificare gli strati che compongono il giunto e determinarne le relative dimensioni. Le informazioni ottenute riguardanti la struttura del giunto sono le seguenti:

- ▶ Spessore isolante in gomma del singolo cavo unipolare: 2 mm
- ▶ Diametro isolante in nastro di canapa impregnato con miscela: 95 mm
- ▶ Diametro esterno giunto: 101 mm
- ▶ Resistività termica nastro di canapa impregnato con miscela: $6,0 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ (dalle norme)
- ▶ Resistività termica isolante in gomma: $5,0 \text{ K} \cdot \text{m/W}$ (dalle norme)

A partire da queste informazioni, applicando le espressioni viste nel paragrafo 4.3, si calcolano le resistenze interne del giunto R_{T1} , R_{T2} , R_{T3} e la resistenza termica esterna R_{T4} . Successivamente si calcolano le potenze trasmesse da ciascuno strato del giunto w' e w'' , w''' e infine si stimano le temperature del conduttore θ_c e della superficie del giunto θ_g . I risultati sono riportati nel paragrafo 6.2.2.

6.2 Risultati ottenuti

In questo paragrafo, vengono illustrati i risultati ottenuti per ciascuna delle due linee nei due periodi di osservazione, con un'analisi delle considerazioni emerse dall'applicazione del modello termico.

6.2.1 Caso Linea Morgari

Per la linea Morgari, le Figure 6.1 e 6.2 presentano graficamente i risultati ottenuti dall'applicazione del modello termico, sviluppato con Matlab, per i due periodi di interesse, evidenziando i valori massimi e minimi delle grandezze.

I grafici mostrano i principali dati di ingresso utilizzati nel modello: la temperatura dell'asfalto e la corrente della linea. Inoltre, includono i risultati derivanti dall'analisi termica, ossia la temperatura del conduttore (che corrisponde alla temperatura interna dell'isolamento) e la temperatura sulla superficie del cavo. Per consentire un confronto tra la temperatura calcolata del cavo e quella misurata, viene anche riportata la temperatura TC5 della linea Morgari Bassa, che rappresenta la temperatura rilevata sulla superficie esterna del cavo.

6 Applicazione del modello termico alle linee interrrate di Torino

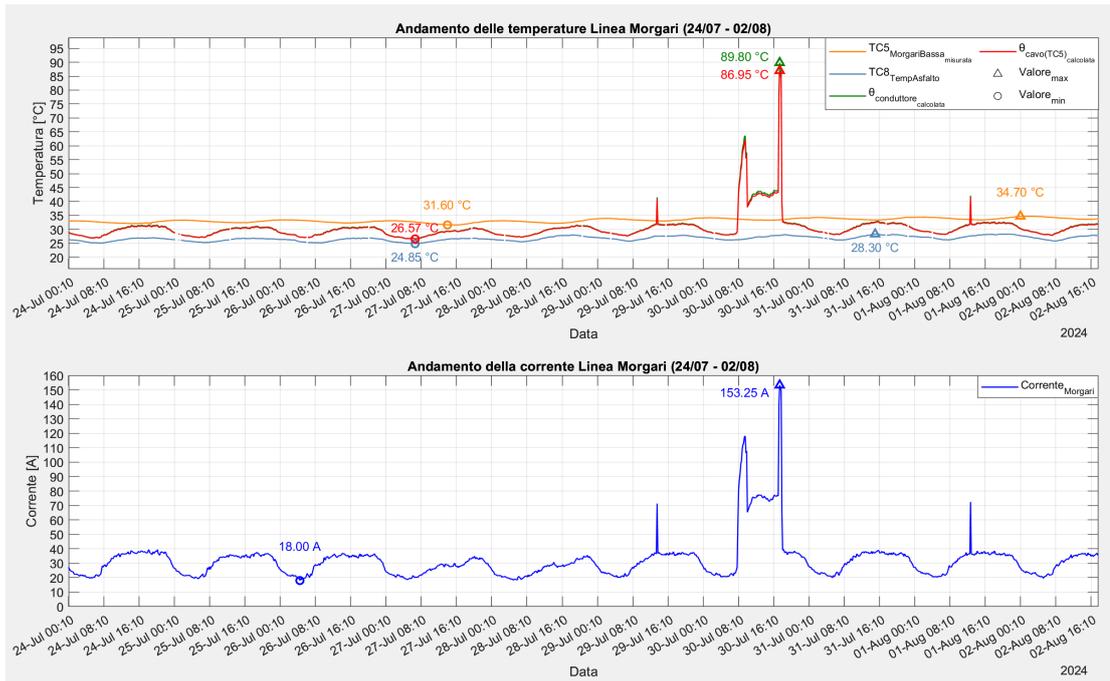


Figura 6.1: Applicazione Mod. Termico Linea Morgari (24 luglio - 2 agosto 2024)

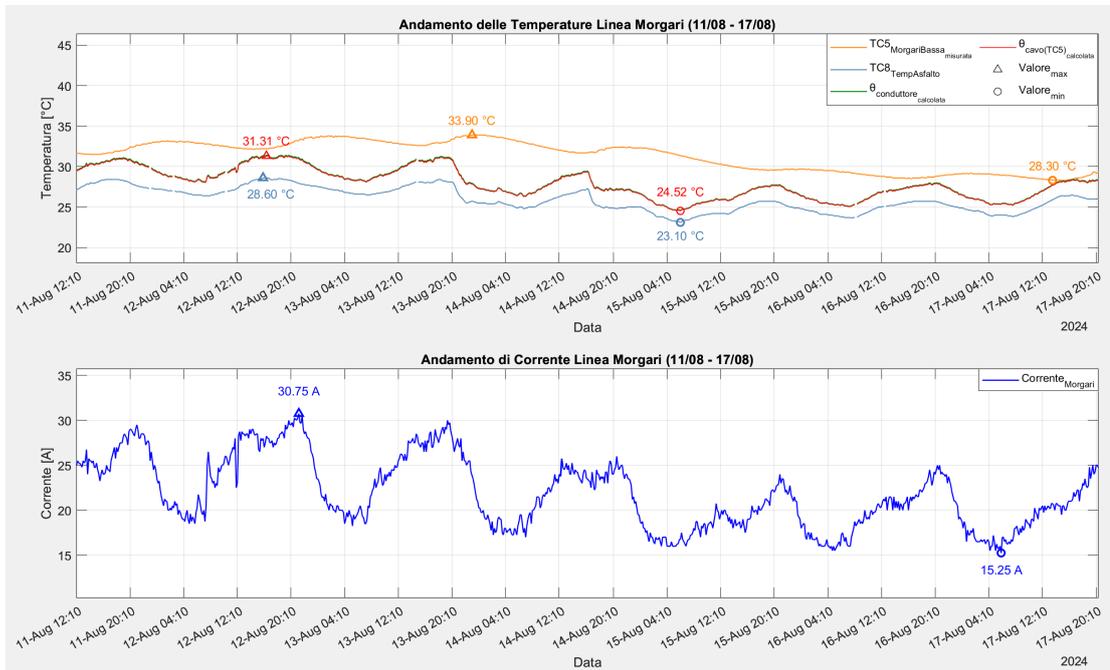


Figura 6.2: Applicazione Mod. Termico Linea Morgari (11 agosto-17 agosto 2024)

Dall'analisi dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del modello termico sulla linea Morgari, per entrambi i periodi di osservazione, si possono trarre le seguenti considerazioni:

1. Confrontando la temperatura misurata del cavo con quella calcolata, si osserva una discrepanza. Questa differenza è probabilmente attribuibile ai limiti del modello termico definito dalla norma IEC 60287. In particolare, il principale limite di questo modello risiede nel fatto che esso fornisce una stima della temperatura del cavo in regime stazionario, senza tenere conto della dinamica termica e dell'influenza delle capacità termiche.
Di conseguenza, il modello non è in grado di rappresentare con precisione le variazioni transitorie di temperatura che si verificano nel sistema reale.
2. Dall'analisi degli andamenti mostrati in Figura 6.1, emerge che, per il primo periodo di osservazione (24 luglio-2 agosto), la temperatura calcolata della linea Morgari risulta prevalentemente inferiore rispetto a quella misurata. Questo scostamento probabilmente è dovuto al fatto che il modello utilizzato non tiene conto della memoria termica del sistema, ignorando, ad ogni passo di calcolo, la condizione iniziale di temperatura dei cavi. Di conseguenza, il modello non considera l'effetto dell'accumulo progressivo di calore nei cavi nel tempo, portando a una sottostima della temperatura effettiva rispetto ai valori misurati.
3. Tuttavia, osservando gli andamenti mostrati nella Figura 6.1, si nota che in alcuni momenti la temperatura calcolata risulta superiore a quella misurata. Questo accade in corrispondenza di brevi intervalli in cui viene applicata una corrente elevata. Tale fenomeno è evidenziato in Figura 6.3.
Questa discrepanza è dovuta al fatto che il modello, non considerando la capacità termica del cavo, fornisce una stima della temperatura basata esclusivamente sul regime stazionario in funzione della corrente in quell'istante. In altre parole, il modello fornisce la temperatura di regime del cavo per un determinato valore di corrente, senza considerare l'inerzia termica che, nella realtà, ne rallenta il riscaldamento; di conseguenza, la temperatura misurata risulta inferiore a quella calcolata, poiché il riscaldamento del cavo non avviene istantaneamente.
Quindi, come già evidenziato in precedenti analisi, le variazioni di corrente non comportano un immediato cambiamento della temperatura del cavo. Questo conferma che l'assenza della componente dinamica nel modello introduce un margine di errore nella stima della temperatura effettiva del cavo.

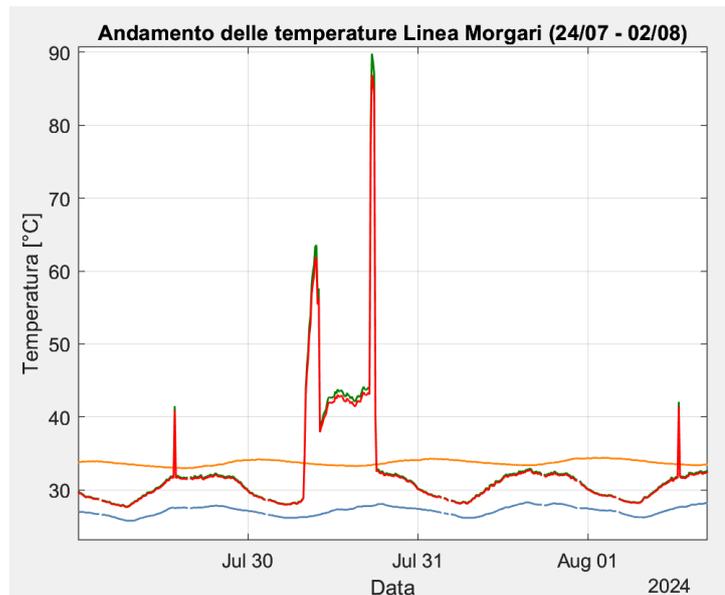


Figura 6.3: Zoom Applicazione Mod. Termico Linea Morgari (11 agosto - 17 agosto 2024)

4. Oltre al fatto che il modello trascura l'inerzia termica del cavo, vi sono diversi altri fattori non considerati che potrebbero influenzare la discrepanza tra la temperatura misurata e quella calcolata.

Tra questi, la variabilità della resistività termica del terreno gioca un ruolo significativo, poiché le proprietà del suolo possono cambiare nel tempo a causa di fattori ambientali, come l'umidità e la composizione del terreno. Inoltre, le condizioni di dissipazione del calore potrebbero non essere uniformi lungo l'intero percorso della linea, influenzando la dispersione termica in modo non omogeneo. Un altro aspetto da considerare è l'influenza termica di altre linee elettriche poste nelle vicinanze, che potrebbero contribuire all'innalzamento della temperatura locale, alterando le condizioni di scambio termico previste dal modello. Infine, vi sono altri fenomeni fisici complessi e difficili da modellizzare con precisione, come le variazioni nelle condizioni atmosferiche, la presenza di materiali con differenti proprietà termiche o effetti transitori legati a cambiamenti improvvisi nel carico.

Tutti questi elementi possono contribuire alle discrepanze tra i valori calcolati e quelli effettivamente misurati.

5. Un'altra possibile causa della discrepanza tra la temperatura stimata e quella misurata potrebbe essere legata agli errori di misura delle termocoppie. In particolare, la tolleranza dello strumento introduce un margine di errore

intrinseco (tipicamente $\pm 2-3^{\circ}\text{C}$), che dipende dal tipo e dalla classe di precisione. Inoltre, un posizionamento non ottimale della termocoppia sul cavo, ad esempio con un contatto non uniforme o in una zona con dissipazione termica anomala, può compromettere l'accuratezza della rilevazione, portando a valori non rappresentativi della reale temperatura del cavo.

6. Per quanto riguarda il secondo periodo di osservazione (11 agosto-17 agosto), i cui risultati sono riportati nella Figura 6.2, si nota che la temperatura stimata della linea Morgari risulta superiore a quella effettivamente misurata. Questo comportamento è coerente con le aspettative, in quanto, in genere, le normative di riferimento prevedono sempre un certo margine di sicurezza nel calcolo delle temperature, al fine di garantire condizioni operative conservative e prevenire potenziali rischi dovuti a sottostime della temperatura reale.
7. Oltre alla temperatura della superficie del cavo, è stata calcolata anche quella del conduttore interno, che corrisponde alla temperatura interna dell'isolamento. Questo calcolo è stato effettuato per valutare eventuali scostamenti significativi rispetto alla temperatura superficiale e verificare se essa potesse raggiungere valori critici.
L'analisi dei risultati conferma che la temperatura del conduttore è effettivamente più alta rispetto alla temperatura superficiale del cavo, ma la differenza risulta minima. Osservando i due andamenti, si nota che essi si sovrappongono quasi completamente, indicando una distribuzione termica uniforme e un gradiente di temperatura quasi trascurabile tra il conduttore e la superficie del cavo.

6.2.2 Caso Linea IEN

Per la linea IEN, nelle Figure 6.4 e 6.5, vengono presentati graficamente i risultati ottenuti dall'applicazione del modello termico sviluppato con Matlab, nei due periodi di interesse, evidenziando i valori massimi e minimi delle grandezze. I grafici mostrano i principali dati di ingresso utilizzati nel modello: la temperatura dell'asfalto e la corrente della linea IEN. Inoltre, includono i risultati derivanti dall'analisi termica, ossia la temperatura del conduttore (che corrisponde alla temperatura interna dell'isolamento) e la temperatura sulla superficie del giunto. Per effettuare un confronto tra la temperatura calcolata del giunto e quella misurata, viene anche riportata la temperatura TC4 della superficie esterna del giunto L3 appartenente alla linea IEN.

6 Applicazione del modello termico alle linee interrrate di Torino

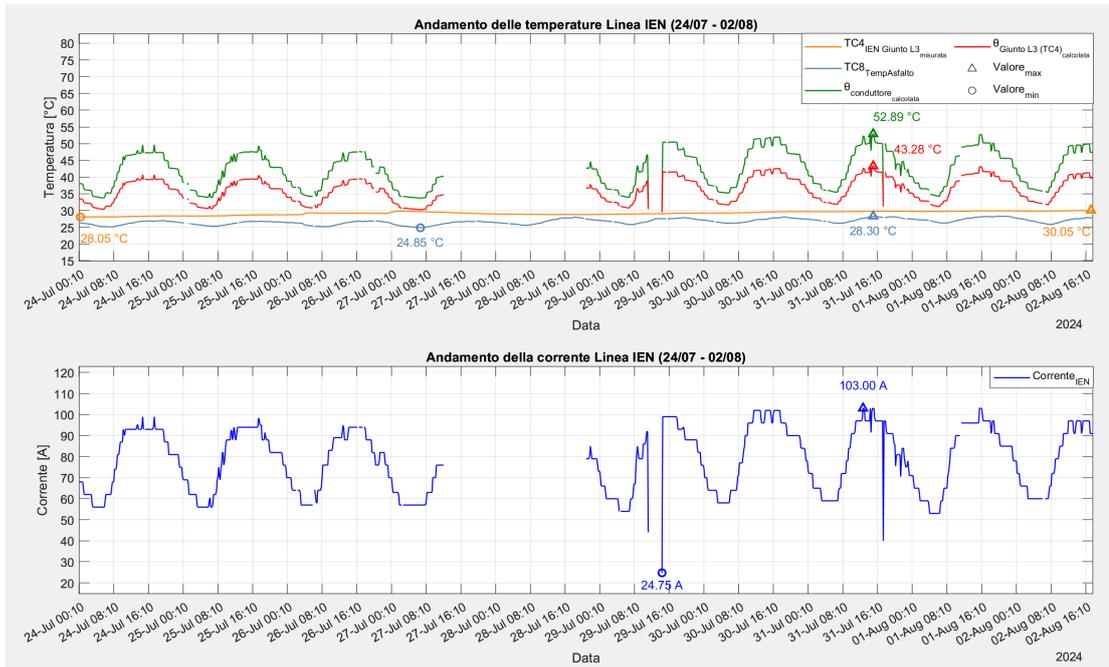


Figura 6.4: Applicazione Mod. Termico Linea IEN (24 luglio - 2 agosto 2024)

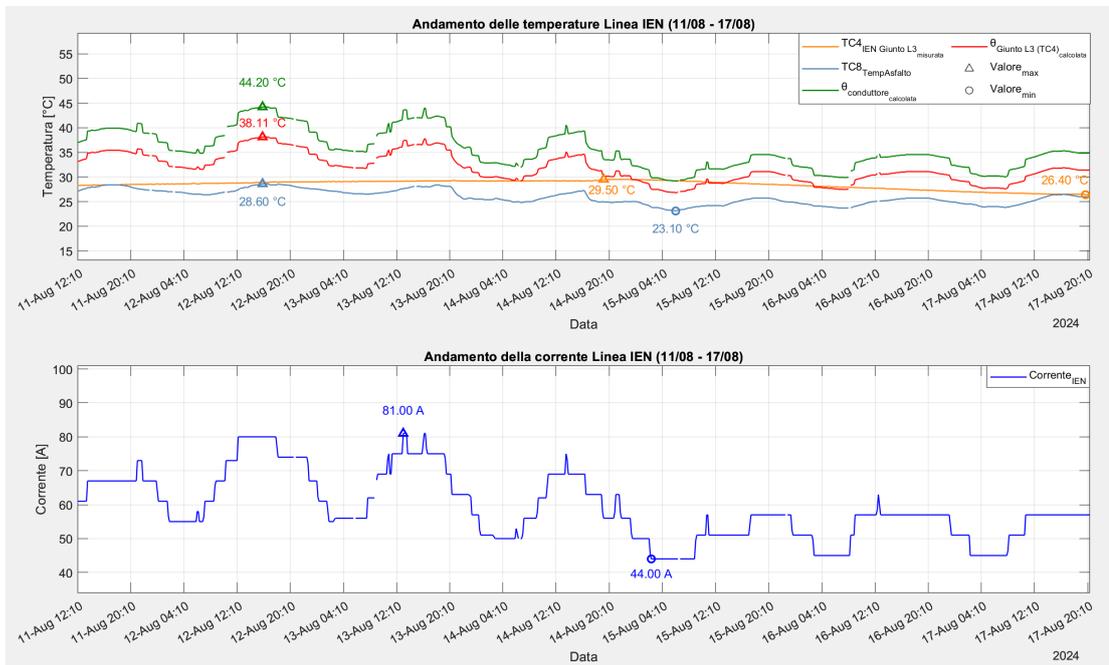


Figura 6.5: Applicazione Mod. Termico Linea IEN (11 agosto - 17 agosto 2024)

Dall'analisi dei risultati ottenuti mediante l'applicazione del modello termico sulla linea IEN, per entrambi i periodi di osservazione, si possono trarre le seguenti considerazioni:

1. Confrontando la temperatura misurata e stimata del giunto della linea IEN, emerge una discrepanza significativa:
 - In primo luogo si osserva che la temperatura stimata del giunto risulta superiore a quella misurata lungo l'intero periodo di osservazione. Ciò probabilmente è dovuto alla semplificazione del modello IEC 60287, che non considera tutte le variabili reali. Tuttavia, una stima più alta della temperatura del cavo è a favore della sicurezza, poiché offre un margine per prevenire surriscaldamenti, garantendo l'affidabilità e la durata del sistema.
 - Inoltre, si osserva che la discrepanza tra la temperatura stimata e quella misurata del giunto non riguarda solo l'entità del valore, ma anche il suo andamento nel tempo. In entrambi i periodi di osservazione, infatti, la temperatura misurata del giunto rimane quasi costante, mentre quella stimata dal modello oscilla in risposta alle variazioni della corrente e della temperatura dell'asfalto. Questo comportamento suggerisce che il giunto possiede una significativa inerzia termica, probabilmente superiore a quella del cavo, data la differente geometria tra il cavo unipolare e il giunto tripolare, quest'ultimo caratterizzato da dimensioni maggiori. Di conseguenza, la risposta del giunto alle variazioni termiche è più lenta di quanto previsto dal modello, che calcola la temperatura in regime stazionario, senza considerare adeguatamente questa caratteristica.
 - Tuttavia, la discrepanza tra la temperatura misurata e quella calcolata può derivare non solo dai limiti intrinseci del modello termico, ma anche da possibili errori di misura causati da vari fattori, come il posizionamento delle termocoppie o l'incertezza intrinseca dello strumento di misura.
2. Nonostante le discrepanze riscontrate, si evidenzia una certa coerenza tra i dati di temperatura stimati e quelli misurati. Esaminando la Figura 6.5, si può notare che sia la temperatura stimata che quella misurata del giunto tendono a diminuire nel tempo. Questa riduzione è attribuibile alla simultanea diminuzione della temperatura dell'asfalto e della corrente.
3. Oltre alla temperatura superficiale del giunto, viene calcolata anche la temperatura del conduttore all'interno del giunto, per verificare se essa raggiunga valori critici. A differenza del caso Morgari, in cui le temperature del cavo e del conduttore coincidono quasi completamente; per la linea IEN, in cui la misura avviene sul giunto, la differenza tra la temperatura del giunto e

quella del conduttore risulta maggiore, circa 10 °C. Questo scostamento è attribuibile alla maggiore dimensione del giunto tripolare rispetto al cavo, che causa una temperatura rilevata sulla superficie del giunto minore rispetto alla temperatura del conduttore interno.

6.3 Considerazioni finali sui risultati ottenuti

L'applicazione del modello termico, tratto dalla norma IEC 60287, alle linee elettriche interrate IEN e Morgari di Torino ha messo in luce alcune osservazioni significative. In particolare, sono emersi i limiti del modello termico, le caratteristiche specifiche del cavo e del giunto che influenzano il comportamento termico, e possibili errori di misura nel monitoraggio delle temperature.

Sulla base di questa analisi, si possono trarre le seguenti considerazioni finali:

- **Comportamento conservativo del modello:** Nella maggior parte dei casi, il modello termico della norma IEC 60287 fornisce stime conservative, ovvero calcola temperature del cavo e del giunto superiori rispetto a quelle misurate. Questo aspetto risulta positivo dal punto di vista della sicurezza, poiché garantisce un margine di protezione nella progettazione e nell'esercizio delle linee elettriche.
- **Caso di sottostima della temperatura:** È stato rilevato un caso in cui la temperatura stimata del cavo risulta inferiore a quella effettivamente misurata. Tale discrepanza potrebbe comportare errori nel dimensionamento delle linee o nelle impostazioni dei sistemi di monitoraggio, con potenziali implicazioni sulla gestione della capacità del cavo, in particolare nella regolazione della sua portata in funzione alle condizioni ambientali reali.
- **Cause della discrepanza:** Le differenze tra temperature stimate e misurate possono derivare principalmente da due fattori:
 1. **Limiti del modello termico:** Il modello non tiene conto della capacità termica del cavo né della variabilità di numerosi parametri ambientali, il che può portare a imprecisioni nelle stime.
 2. **Errori nel sistema di misura:** Le discrepanze possono anche essere attribuibili a imprecisioni del sistema di rilevamento delle temperature, dovute sia a un possibile errato posizionamento della termocoppia, sia all'incertezza intrinseca dello strumento di misura.

Queste considerazioni evidenziano la necessità di affinare il modello termico, integrando la capacità termica del cavo per ottenere stime di temperatura più precise. Inoltre, è fondamentale migliorare l'accuratezza del sistema di monitoraggio, così

da garantire una valutazione più affidabile della temperatura dei cavi interrati e delle condizioni ambientali circostanti.

Capitolo 7

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha analizzato l'impatto delle ondate di calore sulla resilienza delle reti di distribuzione, con un focus specifico sulle linee elettriche interrate in media tensione. Dall'analisi condotta è emerso come questi eventi estremi influenzino l'intero sistema elettrico, coinvolgendo generazione, rete e carichi, ma con effetti particolarmente critici sulle linee interrate, a causa delle difficoltà di dissipazione del calore e della maggiore vulnerabilità dei giunti.

I risultati ottenuti sottolineano l'importanza di adottare soluzioni mirate per ottimizzare le condizioni operative delle reti interrate, soprattutto nei mesi estivi, quando l'incremento delle temperature ambientali aumenta il rischio di guasti.

Di seguito sono riportate le possibili strategie attuabili al fine di migliorare la resilienza della rete in media tensione alle ondate di calore.

- **Monitoraggio avanzato delle linee interrate:** Un metodo efficace per mitigare l'impatto delle ondate di calore sulle linee elettriche interrate consiste nell'implementazione di sistemi di monitoraggio avanzati, capaci di adattare dinamicamente la portata del cavo alle condizioni ambientali e operative, riducendo così il rischio di surriscaldamento. Tuttavia, la complessità della modellizzazione di alcuni parametri ambientali, come l'essiccazione del terreno e la radiazione solare, richiede ulteriori studi e approfondimenti per perfezionare i modelli termici dei cavi e prevedere con maggiore accuratezza le temperature raggiungibili in esercizio.
- **Modifica del sistema di collegamento degli schermi dei cavi:** Una alternativa al sistema attualmente utilizzato nelle reti di Torino è l'adozione di configurazioni diverse per il collegamento degli schermi dei cavi. Tra queste, la configurazione Single Point Bonding prevede che lo schermo dei cavi sia collegato a terra esclusivamente in cabina secondaria, mentre in cabina primaria

rimanga isolato. La Figura 7.1 mostra un esempio di questa soluzione, in cui gli schermi dei cavi non vengono connessi a terra e sono collegati tra loro con nastro isolante.



Figura 7.1: Collegamento Single point bonding degli schermi dei cavi MT

Questa scelta consente di eliminare le correnti parassite negli schermi, riducendo il rischio di surriscaldamento e la formazione di punti caldi nei giunti dei cavi dovuti alla circolazione di corrente. Tuttavia, presenta lo svantaggio che, nell'estremità non collegata a terra, possono generarsi sovratensioni. Per questo motivo, è essenziale approfondire la questione e individuare soluzioni più efficaci, in grado di eliminare le correnti indesiderate senza introdurre sovratensioni.

- **Ottimizzazione dei sistemi di giunzione:** Migliorare le tecniche di giunzione e potenziare la formazione del personale tecnico rappresentano ulteriori passi fondamentali per aumentare la resilienza della rete. Un personale adeguatamente formato e l'impiego di metodi di giunzione più efficienti contribuirebbero a ridurre la resistenza di contatto delle giunzioni e, di conseguenza, le perdite termiche nei punti critici della rete.

In definitiva, affrontare le sfide poste dalle ondate di calore sulle reti elettriche interrate richiede un approccio integrato e multidisciplinare, che combini innovazione tecnologica, ottimizzazione delle pratiche di installazione e strategie di monitoraggio avanzate. Solo attraverso una gestione attenta di questi fattori sarà possibile migliorare la resilienza delle reti di distribuzione in media tensione e affrontare con maggiore efficacia gli effetti delle ondate di calore, sempre più frequenti e intense.

Bibliografia

- [1] CIRED Working Group. *Resilience of Distribution Grids*. Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution (CIRED), 2018 (cit. alle pp. 3, 5, 6).
- [2] Hamidreza Ashrafi e Tarannom Parhizkar. «Electricity sector resilience in response to extreme weather and climate-related events: Tools and datasets». In: *The Electricity Journal* 36.6 (2023), p. 107290 (cit. alle pp. 3, 4).
- [3] CRED. *2023 Disasters in Numbers: A Significant Year of Disaster Impact*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2024 (cit. alle pp. 4, 8).
- [4] Amin Gholami, Tohid Shekari, Mohammad Hassan Amirioun, Farrokh Aminifar, M. Hadi Amini e Arman Sargolzaei. «Toward a Consensus on the Definition and Taxonomy of Power System Resilience». In: *IEEE Access* 6 (2018), pp. 32035–32053 (cit. a p. 4).
- [5] e-distribuzione. *Quando Vaia sconvolse l'Italia*. 2020 (cit. a p. 4).
- [6] INGENIO. *Rapporto Alluvione Emilia-Romagna: interventi strutturali e non contro i cambiamenti climatici e i rischi idrogeologici*. 2023 (cit. a p. 4).
- [7] C. S. Holling. «Resilience and Stability of Ecological Systems». In: *Annual Review of Ecology and Systematics* 4 (1973), pp. 1–23. ISSN: 00664162. URL: <http://www.jstor.org/stable/2096802> (visitato il giorno 06/12/2024) (cit. a p. 5).

- [8] Marianthi Theocharidou, Georgios Giannopoulos et al. «Risk assessment methodologies for critical infrastructure protection. Part II: A new approach». In: *JRC Science and Policy Report* (2015) (cit. a p. 6).
- [9] Alfred R Berkeley, Mike Wallace e Constellation Co. «A framework for establishing critical infrastructure resilience goals». In: *Final report and recommendations by the council, national infrastructure advisory council* 26 (2010) (cit. a p. 6).
- [10] TERNA. *RESILIENZA*. URL: <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/ruolo-terna/resilienza> (cit. a p. 6).
- [11] E Ciapessoni, D Cirio, A Pitto, M Van Harte e M Panteli. «Power System Resilience: definition, features and properties». In: *Cigré Science & Engineering Journal* 30 (2023) (cit. a p. 6).
- [12] Jordan J. Plotnek e Jill Slay. «Power systems resilience: Definition and taxonomy with a view towards metrics». In: *International Journal of Critical Infrastructure Protection* 33 (2021), p. 100411. ISSN: 1874-5482 (cit. a p. 6).
- [13] Sujay A. Kaloti e Badrul H. Chowdhury. «Toward Reaching a Consensus on the Concept of Power System Resilience: Definitions, Assessment Frameworks, and Metrics». In: *IEEE Access* 11 (2023), pp. 81401–81418. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3300292](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3300292) (cit. a p. 7).
- [14] Mathaios Panteli, Pierluigi Mancarella, Dimitris N. Trakas, Elias Kyriakides e Nikos D. Hatziargyriou. «Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems». In: *IEEE Transactions on Power Systems* 32.6 (2017), pp. 4732–4742. DOI: [10.1109/TPWRS.2017.2664141](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2017.2664141) (cit. a p. 7).
- [15] E. Amicarelli, L. Ferri, M. De Masi, A. Suich e G. Valtorta. «Assessment of the resilience of the electrical distribution grid: e-distribuzione approach». In: *2018 AEIT International Annual Conference*. 2018, pp. 1–6. DOI: [10.23919/AEIT.2018.8577322](https://doi.org/10.23919/AEIT.2018.8577322) (cit. alle pp. 8, 9).

- [16] Selma B Guerreiro, Richard J Dawson, Chris Kilsby, Elizabeth Lewis e Alistair Ford. «Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities». In: *Environmental Research Letters* 13.3 (2018), p. 034009 (cit. a p. 8).
- [17] Elizaveta Felsche, Andrea Böhnisch, Benjamin Poschlod e Ralf Ludwig. «European hot and dry summers are projected to become more frequent and expand northwards». In: *Communications Earth & Environment* 5.1 (2024), p. 410 (cit. a p. 8).
- [18] Daniela D’Ippoliti et al. «The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project». In: *Environmental Health* 9 (2010), pp. 1–9 (cit. a p. 8).
- [19] Chong Wang, Ping Ju, Feng Wu, Xueping Pan e Zhaoyu Wang. «A systematic review on power system resilience from the perspective of generation, network, and load». In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167 (2022), p. 112567. ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112567> (cit. a p. 8).
- [20] Amin Dindar, Moein Choobineh e Salman Mohagheghi. «Socially and Environmentally ware Power Management in a Residential Neighborhood under Heat Wave Events». In: *2020 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. 2020, pp. 1–8. DOI: [10.1109/IAS44978.2020.9334807](https://doi.org/10.1109/IAS44978.2020.9334807) (cit. a p. 9).
- [21] Luca Bellani, Michele Compare, Enrico Zio, Alessandro Bosisio, Bartolomeo Greco, Gaetano Iannarelli e Andrea Morotti. «A reliability-centered methodology for identifying renovation actions for improving resilience against heat waves in power distribution grids». In: *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 137 (2022), p. 107813. ISSN: 0142-0615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107813> (cit. a p. 9).
- [22] Andrea Mazza, Yang Zhang, Chiara Carrozzo, Ettore Bompard, Gianfranco Chicco, Emiliano Roggero e Giuliana Galofaro. «Evaluation of the Impact of Heat-Wave on Distribution System Resilience». In: *2021 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. 2021, pp. 1–6. DOI: [10.1109/SEST50973.2021.9543201](https://doi.org/10.1109/SEST50973.2021.9543201) (cit. a p. 9).

- [23] Massimo Pompili, Luigi Calcara e Silvia Sangiovanni. «Heatwaves and underground MV cable joints failures». In: *2021 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. 2021, pp. 1–5. DOI: [10.23919/AEIT53387.2021.9627070](https://doi.org/10.23919/AEIT53387.2021.9627070) (cit. alle pp. 9–11, 34).
- [24] Konstantia Tolika. «Assessing heat waves over Greece using the excess heat factor (EHF)». In: *Climate* 7.1 (2019), p. 9 (cit. a p. 10).
- [25] L. Calcara, S. Sangiovanni e M. Pompili. «MV underground cables: Effects of soil thermal resistivity on anomalous working temperatures». In: *2017 AEIT International Annual Conference*. 2017, pp. 1–5. DOI: [10.23919/AEIT.2017.8240508](https://doi.org/10.23919/AEIT.2017.8240508) (cit. alle pp. 11, 32).
- [26] Comitato Elettrotecnico Italiano. *CEI-UNEL 35027: Cavi elettrici con tensione nominale da 1 kV a 30 kV - Portate di corrente in regime stazionario - Posa in aria ed interrata*. Rapp. tecn. Seconda Edizione. Comitato Elettrotecnico Italiano, 2009 (cit. alle pp. 11, 35, 46).
- [27] Vincenzo Cataliotti. *Impianti Elettrici, Volume III*. Flaccovio Editore, 1995 (cit. a p. 13).
- [28] Gianfranco Chicco. «Dispense del corso di Distribuzione ed Utilizzazione dell'Energia Elettrica». Materiale didattico non pubblicato. 2023 (cit. a p. 13).
- [29] Enrico Carpaneto. «Dispense del corso di Sistemi elettrici di potenza». Materiale didattico non pubblicato. 2022 (cit. a p. 13).
- [30] *Piano di Sviluppo Distribuzione Energia Elettrica 2023-2027*. Documento ufficiale disponibile online. IRETI, 2023 (cit. alle pp. 13, 18–20).
- [31] Massimo Pompili e Romeo Rendina. *Linee elettriche in cavo*. Società Editrice Esculapio, 2019 (cit. alle pp. 21, 27, 28, 31, 36, 49).
- [32] Roberto Benato, Sebastian Dambone Sessa, Giovanni Rinzo, Oscar Marchese, Luca Tanzi e Roberto Zapelloni. «Different Screen Arrangements of Distribution Insulated Cables». In: *2018 AEIT International Annual Conference*. 2018, pp. 1–6. DOI: [10.23919/AEIT.2018.8577277](https://doi.org/10.23919/AEIT.2018.8577277) (cit. a p. 21).

- [33] «IEEE Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV». In: *IEEE Std 575-2014 (Revision of IEEE Std 575-1988)* (2014), pp. 1–83. DOI: [10.1109/IEEESTD.2014.6905681](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6905681) (cit. a p. 21).
- [34] Rolf R. Beer e Roy A. Nelson. «Practice and Accepted Rules of Shielding Power Cables». In: *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-14.4 (1978), pp. 352–356. DOI: [10.1109/TIA.1978.4503550](https://doi.org/10.1109/TIA.1978.4503550) (cit. alle pp. 24, 25).
- [35] Comitato Elettrotecnico Italiano. *CEI 11-17: Impianti di produzione, trasmissione e distribuzione pubblica energia elettrica - Linee in cavo*. Rapp. tecn. Comitato Elettrotecnico Italiano, 2006 (cit. alle pp. 26, 28).
- [36] Comitato Elettrotecnico Italiano. *CEI 11-1: Impianti elettrici con tensione superiore a 1 kV in corrente alternata*. Rapp. tecn. Comitato Elettrotecnico Italiano (cit. a p. 26).
- [37] Fangyi Li, Haijun Liu, Tongxun Wang, Yongbin Liu, Dedong Chang, Zixuan Wang e Yupeng Guo. «Influence of Superimposed Harmonic Current on Grounding Current in Metal Shielding Layer of 10kV Cables». In: *2024 21st International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. 2024, pp. 427–432. DOI: [10.1109/ICHQP61174.2024.10768819](https://doi.org/10.1109/ICHQP61174.2024.10768819) (cit. a p. 29).
- [38] T. Bragatto, M. Cresta, F.M. Gatta, A. Geri, M. Maccioni e M. Paulucci. «Underground MV power cable joints: A nonlinear thermal circuit model and its experimental validation». In: *Electric Power Systems Research* 149 (2017), pp. 190–197. ISSN: 0378-7796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2017.04.030>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779617301840> (cit. a p. 32).
- [39] Massimo Pompili, Luigi Calcara e Silvia Sangiovanni. «MV Underground Power Cable Joints Premature Failures». In: *2020 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. 2020, pp. 1–4. DOI: [10.23919/AEIT50178.2020.9241185](https://doi.org/10.23919/AEIT50178.2020.9241185) (cit. alle pp. 32, 33).

- [40] Hualong Zheng, Simon M. Rowland, Ibrahim Idrissu e Zepeng Lv. «Electrical treeing and reverse tree growth in an epoxy resin». In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 24.6 (2017), pp. 3966–3973. DOI: [10.1109/TDEI.2017.006729](https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006729) (cit. a p. 33).
- [41] Luigi Calcara, Luigi D’Orazio, Maurizio Della Corte, Guglielmo Di Filippo, Alessio Pastore, Davide Ricci e Massimo Pompili. «Faults Evaluation of MV Underground Cable Joints». In: *2019 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. 2019, pp. 1–6. DOI: [10.23919/AEIT.2019.8893351](https://doi.org/10.23919/AEIT.2019.8893351) (cit. alle pp. 33, 34).
- [42] International Electrotechnical Commission. *IEC 60287: Electric Cables - Calculation of the Current Rating*. Rapp. tecn. International Electrotechnical Commission, 2023 (cit. alle pp. 35, 36, 40, 45).
- [43] Luigi Calcara e Bruno Antonio Cauzillo. «La portata al limite termico dei cavi per la trasmissione dell’energia elettrica». Materiale didattico non pubblicato. 2024 (cit. alle pp. 36, 41, 93).
- [44] Gossen Metrawatt GmbH. *Manuale d’uso GEOHM C – Misuratore di terra* (cit. a p. 45).
- [45] Alfonso Sturchio, Gianluigi Fioriti, Massimo Pompili e Bruno Cauzillo. «Failure rates reduction in SmartGrid MV underground distribution cables: Influence of temperature». In: *2014 AEIT Annual Conference - From Research to Industry: The Need for a More Effective Technology Transfer (AEIT)*. 2014, pp. 1–6. DOI: [10.1109/AEIT.2014.7002030](https://doi.org/10.1109/AEIT.2014.7002030) (cit. alle pp. 46, 49).
- [46] L. Calcara, M. Pompili e B. A. Cauzillo. «Ampacity of MV underground cables: The influence of soil thermal resistivity». In: *2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE)*. 2015, pp. 1–5. DOI: [10.1109/IYCE.2015.7180738](https://doi.org/10.1109/IYCE.2015.7180738) (cit. alle pp. 47, 48).
- [47] Alfonso Sturchio, Gianluigi Fioriti, Vincenzo Salusest, Luigi Calcara e Massimo Pompili. «Thermal behavior of distribution MV underground cables». In: *2015 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. 2015, pp. 1–5. DOI: [10.1109/AEIT.2015.7415247](https://doi.org/10.1109/AEIT.2015.7415247) (cit. a p. 48).