Ondate di calore e rischio blackout: ecco come prevenirli

DURANTE I PERIODI DI GRANDE CALDO LE AREE URBANE DELLE CITTÀ DENSAMENTE ABITATE SONO SEMPRE PIÙ SOGGETTE A FUORI SERVIZIO CHE INTERESSANO LE RETI DI DISTRIBUZIONE INTERRATE. DA RSE UN APPROCCIO GLOBALE PER AFFRONTARE IL PROBLEMA DEI GUASTI ESTIVI DELLE LINEE IN MEDIA TENSIONE E INCREMENTARE LA RESILIENZA DELLA RETE

di Giovanni Pirovano, Emanuele Ciapessoni, Riccardo Bonanno, Johnny Borghetto, Andrea Pitto, Matteo Lacavalla, *RSE – Ricerca sul Sistema Energetico*

Le aree urbane delle città densamente abitate sono sempre più soggette a fuori servizio che interessano le reti di distribuzione in Media Tensione (MT) interrate, in particolare durante i periodi di grande caldo estivo. Nella maggioranza dei casi le interruzioni sono legate a guasti dei giunti di collegamento per la sostituzione di tratti di vecchi cavi con isolamento in olio/carta con nuovi cavi con isolamento estruso.

Un tale aumento del tasso di guasto nei periodi estivi può essere attribuito alla combinazione di un'elevata temperatura ambientale e di un elevato carico in corrente del cavo, dovuto al sempre maggiore utilizzo di sistemi di raffrescamento; questo può causare una forte essiccazione del terreno intorno al cavo, con la diminuzione della sua conducibilità termica, che a sua volta può produrre un surriscaldamento dei giunti e il loro invecchiamento precoce.

RSE ha approfondito il problema, affrontando il tema sotto differenti punti di vista e coinvolgendo esperti di differenti settori (meteorologia e climatologia, in-

gegneria, fisica e modellistica) al fine di fornire un quadro complessivo della problematica e differenti approcci alla soluzione della stessa. L'articolo riassume le diverse attività messe in atto per affrontare il tema della definizione delle ondate di calore, le modalità in cui queste si esplicano, le tecniche diagnostiche e la proposta di un approccio per quantificare le probabilità di guasto e incrementare la resilienza della rete.

Definizione di ondata di calore

A causa del cambiamento climatico, durante i mesi estivi diventano sempre più frequenti e intensi i fenomeni delle ondate di calore, caratterizzati dal protrarsi di giornate con temperature molto elevate, con escursioni termiche limitate tra il giorno e la notte e una prolungata assenza di precipitazioni. Per arrivare ad una approfondita ed esaustiva comprensione dei disservizi associati alle ondate di calore è necessario caratterizzare e descrivere al meglio le condizioni atmosferiche (temperatura) e di suolo (temperatura e umidità) in concomitanza di questi fenomeni estremi.

Per definire un'ondata di calore dal punto di vista meteorologico si può fare riferimento agli enti ufficiali internazionali che si occupano di clima. Secondo il vocabolario meteorologico internazionale del World Meteorological Organization (WMO), un'ondata di calore è definita come un marcato riscaldamento dell'aria o un'avvezione di aria molto calda su una vasta area e dalla durata variabile, da pochi giorni fino a qualche settimana. Nel glossario del Gruppo intergovernativo di esperti sul Cambiamento Climatico IPCC, un'ondata di calore è definita come un periodo di caldo anomalo rispetto ad una soglia climatologica predefinita di temperatura, la cui durata va da due giorni a qualche mese.

Un'ondata di calore è definita come un marcato riscaldamento dell'aria o un'avvezione di aria molto calda su una vasta area e dalla durata variabile, da pochi giorni fino a qualche settimana

Non c'è un'indicazione specifica sulla definizione della durata e soprattutto della soglia climatologica di temperatura di riferimento. Esistono però degli indici climatologici per l'identificazione degli eventi estremi relativi alle variabili di temperatura e precipitazione, definiti da un gruppo di esperti istituito dallo stesso WMO (Expert Team on Climate Change Detection and Indices – ETCDI). Il percentile di riferimento tipicamente utilizzato per l'identificazione degli estremi è il 90° percentile della distribuzione delle temperature riferito ad una climatologia di riferimento. Alla luce delle considerazioni riportate, in questo contesto si è definita ondata di calore un periodo anomalo di almeno due giorni consecutivi in cui la temperatura massima è superiore al 90° percentile della distribuzione di temperature, composta dalle temperature massime relative allo stesso giorno dell'anno degli anni disponibili del periodo climatologico di riferimento. Il periodo climatologico di riferimento è solitamente un trentennio antecedente il periodo che si vuole analizzare.

Volendo indagare le ondate di calore estive, si è ritenuto opportuno andare ad analizzare le temperature massime giornaliere. Si è definito periodo estivo quello da maggio ad agosto, nel quale si osserva un incremento nel numero di guasti sulle linee di distribuzione interrate. Per ogni giorno del periodo si è quindi considerata la distribuzione delle temperature massime tra il 1986 e il 2010 e si è calcolato il 90° percentile. Una giornata è considerata anomala se la temperatura massima giornaliera supera il 90° percentile relativo a quel determinato giorno dell'anno. Una determinata giornata appartiene ad un periodo di ondata di calore se rientra in un intervallo di tempo in cui avviene il superamento della soglia del 90° percentile per almeno due giorni di seguito.

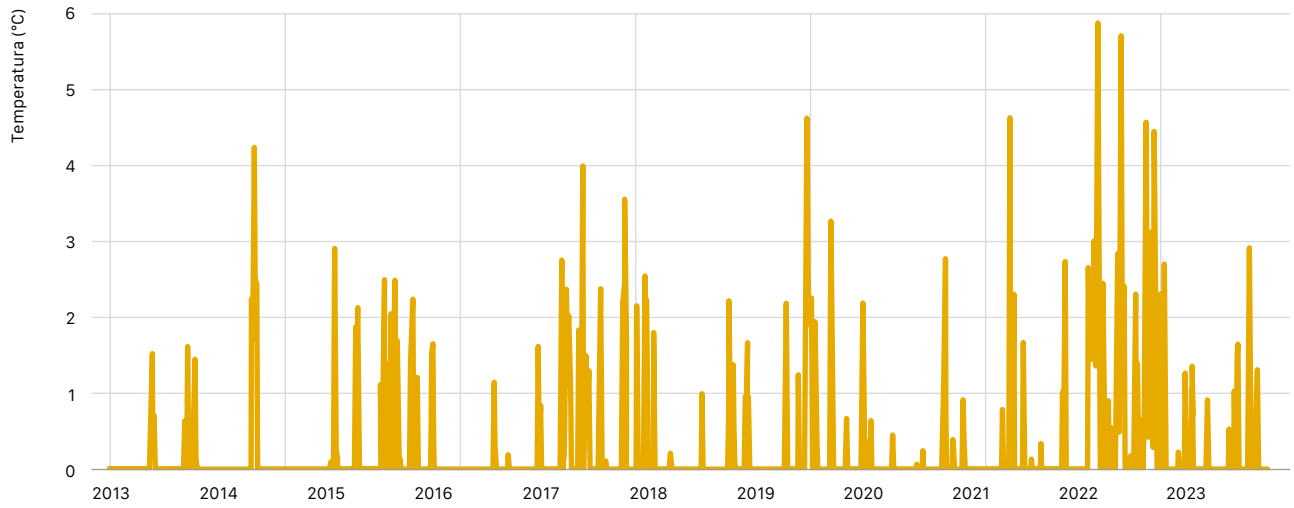
Temperatura e umidità: il caso di Milano

I dati di temperatura a 2 metri sulla città di Milano sono derivati dal dataset di rianalisi meteorologica MERIDA (MEteorological Reanalysis Italian Dataset), sviluppato in RSE. Il dataset ha una risoluzione spaziale di 7 km, copre l'intero dominio italiano e rappresenta una ricostruzione del passato attraverso un modello numerico meteorologico che assimila i dati osservativi. Inoltre, MERIDA consente di fornire dati sulla temperatura e l'umidità del suolo, la cui disponibilità, a livello di misurazioni sperimentali, è ancora più limitata rispetto a quella dei dati atmosferici (come temperatura e precipitazione).

Poiché l'analisi dei guasti è condotta sul decennio 2013-2023, si è considerato come periodo climatologico di riferimento per il calcolo del 90° percentile il periodo di 25 anni antecedente (1986-2010). Nella **Figura 1** sono rappresentate le anomalie (in °C) della temperatura massima giornaliera a 2 metri per il periodo 2013-2023.

Figura 1 **Anomalie di temperatura massima giornaliera a 2 metri dal suolo rispetto al periodo climatologico di riferimento 1986-2010**

Fonte: *RSE*



Le anomalie di un'ondata di calore indicano la magnitudine di superamento (in °C) della soglia del 90° percentile delle temperature massime per quel giorno e rispetto al periodo climatologico di riferimento 1986-2010. In tal modo, oltre a identificare le ondate di calore, è possibile quantificarne anche l'intensità.

Si nota come, nell'ultimo decennio, ci sia stato un sensibile aumento della frequenza e dell'intensità delle ondate di calore sull'area urbana milanese. Si evidenzia in particolare l'anno 2022, che risulta esser stato tra i più estremi, ma anche notoriamente per il persistere di condizioni particolarmente siccitose sulla nostra Penisola, non solo durante l'estate ma anche negli antecedenti periodi invernale e primaverile.

Per caratterizzare il fenomeno dei disservizi relativi alle linee di distribuzione interrate risulta importante capire come sono state le condizioni di temperatura e umidità del suolo nell'ultimo decennio, per valutare le condizioni al con-

Nel caso di Milano, negli ultimi dieci anni si sono aggravate le condizioni ambientali, atmosferiche e di suolo. Come conseguenza risulta più difficoltosa la dispersione del calore a livello del cavo e viene favorito l'innesco di guasti dei giunti nella rete di distribuzione

torno in cui la rete di distribuzione si è trovata durante i periodi estivi. Per questo si sono analizzati i trend climatologici della temperatura a 2 metri e della temperatura e umidità del suolo a diverse profondità a cui sono disponibili tali dati da rianalisi MERIDA (5, 25 e 70 cm). A tal fine, si sono aggregati i dati disponibili considerando le medie mensili di tutte le variabili prese in considerazione. È stato eseguito un fit delle serie storiche di queste variabili con un semplice modello lineare ed è stata poi valutata la significatività statistica del coefficiente angolare del fit per valutare se il trend di una specifica variabile sia statisticamente significativo. In **Figura 2** sono rappresentate le serie temporali delle diverse variabili con il fit lineare sovrapposto e il coefficiente angolare (slope) assieme alla sua significatività statistica (indicata con un asterisco).

Le variabili di temperatura del suolo mostrano un trend di crescita negli ultimi 10 anni, statisticamente significativo per la temperatura del suolo alla profondità di 5 e 25 cm. L'umidità del suolo mostra invece una diminuzione a tutte e tre le profondità, statisticamente significativa ad ogni livello.

In generale, è quindi possibile affermare che negli ultimi dieci anni in media si sono aggravate le condizioni ambientali, atmosferiche e soprattutto di suolo che possono favorire l'innescarsi dei guasti a livello dei giunti della rete di distribuzione urbana milanese. Sono infatti presenti condizioni di suolo sempre più calde e secche che rendono più difficoltosa la dispersione del calore a livello del cavo.

Tecniche diagnostiche per la rilevazione dei guasti

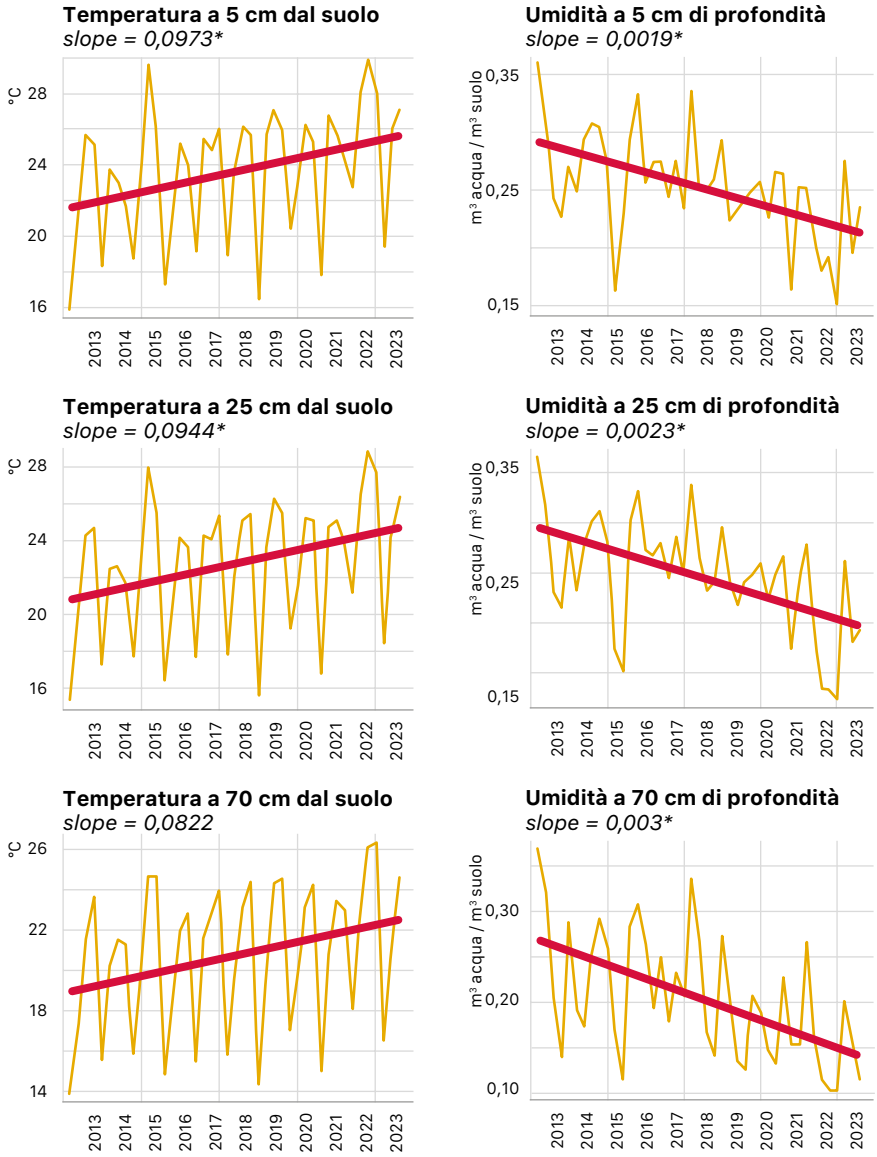
Al fine di analizzare il fenomeno di degrado e guasto nei giunti MT, grazie alla collaborazione con Unareti (gestore della rete di distribuzione di Milano e provincia), sono stati realizzati set-up sperimentali ad hoc con diversi tipi di giunti, nuovi e prelevati dall'esercizio, collegati a formare un circuito chiuso. I circuiti sono stati alimentati a tensione nominale e sottoposti a cicli di corrente per ri-

Figura 2 **Andamento delle serie temporali delle principali variabili di suolo analizzate per il periodo 2013-2023 e aggregate a livello mensile (medie)**

Fonte: *RSE*

Fit lineare

slope = Coefficiente angolare del fit
(la significatività statistica è evidenziata con l'asterisco)



produrre la variazione giornaliera del carico estivo tipica di una rete MT, senza mai eccedere i valori di progetto del componente.

I due diversi set-up riproducono diverse condizioni ambientali a cui il cavo può essere sottoposto: secco e caldo, umido e piovoso.

La prima condizione è stata riprodotta mediante feltri avvolti intorno ai cavi per simulare la ridotta conducibilità termica e la quasi assenza di umidità del terreno tipiche dei periodi estivi. Il secondo allestimento mira a riprodurre la presenza di pioggia, anche di notevole intensità, e a monitorare i parametri ambientali di temperatura e umidità del terreno in prossimità del cavo. Il monitoraggio avviene attraverso sensori di diverse tipologie, alcuni collegati a un sistema di trasmissione IoT appositamente progettato.

Ogni set-up di prova è stato inoltre replicato (con la stessa tipologia di giunti) da circuiti immagine che hanno permesso di misurare la temperatura all'interno dei giunti, grazie all'assenza di tensione, per mezzo di termocoppie installate negli strati interni degli stessi.

Per analizzare il fenomeno sono state implementate diverse tecniche diagnostiche: Scariche Parziali (PD), Spettroscopia Dielettrica in Frequenza (FDS) e misure del fattore di dissipazione (Tanδ).

In particolare, la formazione di difetti e le relative evoluzioni sotto le sollecitazioni termoelettriche sono state monitorate mediante misure di scariche parziali eseguite da accoppiatori induttivi in alta frequenza (HFCT), installati nella terminazione dello schermo del cavo collegato a terra. L'HFCT, collegato a un sistema di monitoraggio PD, ha consentito l'acquisizione simultanea di segnali ogni dieci minuti durante i cicli termici. Sono stati inoltre eseguite misure di scariche parziali a diversi livelli di tensione su ciascun cavo, utilizzando accoppiatori capacitivi, per convalidare i risultati del monitoraggio PD. Le condizioni di isolamento sono state dedotte analizzando i modelli di PD a risoluzione di fase, ipotizzando che le diverse fonti di PD (diversi tipi di difetti) possano essere associate a forme ben definite di modelli di scarica.

I risultati sperimentali sul primo set-up hanno mostrato che le tecniche di monitoraggio *online* riescono a fornire indicazioni diagnostiche su potenziali difetti con largo anticipo rispetto alle metodologie diagnostiche usate *offline*, che forniscono indicazioni utili solo in presenza di difetto conclamato.

Grazie alla metodologia scelta, è stato possibile monitorare la risposta in frequenza delle diverse tipologie di giunto, identificando quelle che presentano minori perdite durante l'esercizio: per alcuni componenti si è registrato che tali perdite hanno generato in alcuni casi un incremento della temperatura del giunto anche per la sola presenza di tensione nel cavo, in presenza di condizioni al contorno di temperature superiori a circa 55 °C.

Una possibile spiegazione dei meccanismi di degrado del sistema isolante nei periodi estivi è riconducibile ai fenomeni dell'espansione e ritiro dei diversi materiali utilizzati all'interno dei giunti. Durante il periodo iniziale, i vuoti – sede di scariche parziali – si formano durante l'espansione termica dei materiali e scompaiono a causa del ritiro del materiale.

A questo fenomeno si associa anche quello dell'incremento del fattore di dissipazione, che dà luogo a un ulteriore aumento della temperatura, accelerando i processi di invecchiamento.

Considerando le condizioni di bagnato, le misurazioni FDS hanno permesso di evidenziare per alcuni giunti fenomeni di degrado accelerato delle barriere, poste a monte e valle del componente per impedire la penetrazione dell'acqua, a seguito di un numero considerevole di cicli applicati (circa 800).

Vulnerabilità di cavi e giunti: il modello RSE

Le attività di previsione delle variabili meteo influenti e di prova sui componenti maggiormente vulnerabili alle ondate di calore (cavi e giunti) sono propedeutiche per lo sviluppo di modelli analitici per la valutazione del rischio di guasti legati alle ondate di calore.

I risultati sperimentali hanno mostrato che le tecniche di monitoraggio *online* forniscono indicazioni su potenziali difetti con largo anticipo rispetto alle metodologie diagnostiche *offline*, che danno indicazioni utili solo in presenza di difetto conclamato

A tal proposito RSE ha sviluppato un modello analitico per la vulnerabilità di cavi e giunti alle ondate di calore, che opportunamente combinato con le previsioni a breve termine delle principali forzanti ambientali (umidità e temperatura del suolo alla profondità tipica di interramento dei cavi) consente di stimare la probabilità di guasto dei componenti.

Il modello di vulnerabilità comprende:

- un modello termico dinamico, per simulare la sovratemperatura transitoria dell'isolamento del cavo/giunto rispetto alla temperatura ambiente;
- un modello di invecchiamento, per calcolare la riduzione della vita equivalente a seguito dell'evento di sovratemperatura: il modello di accumulo di invecchiamento proposto è utilizzato per tenere conto dei carichi variabili nel tempo;
- un modello per stimare il tasso e la probabilità di guasto su un intervallo di tempo che utilizza una distribuzione di Weibull.

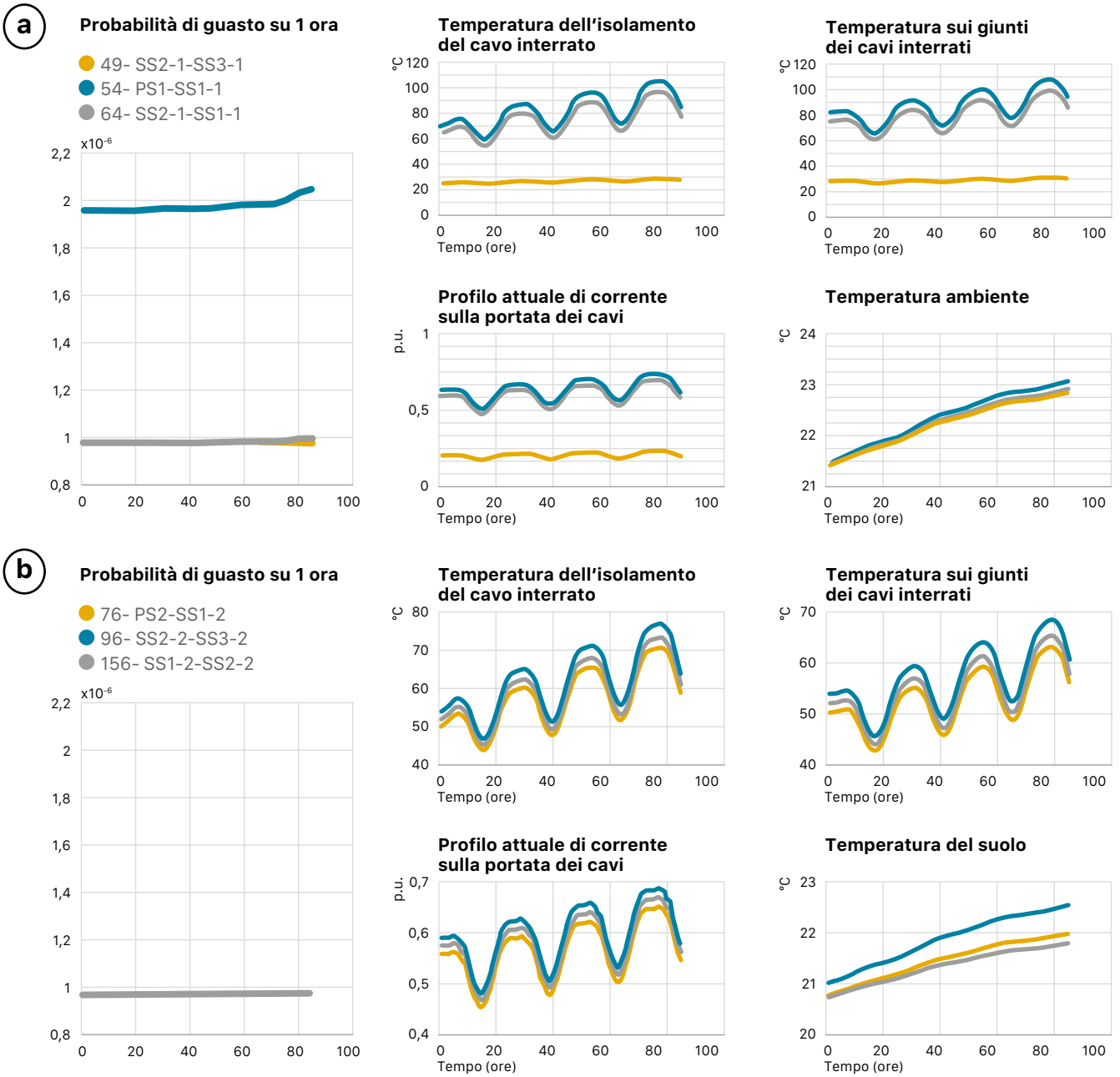
Con riferimento al modello termico, la valutazione delle sovratemperature dei diversi strati dei cavi e dei giunti MT si basa sugli standard internazionali IEC 60287 (per condizioni termiche stazionarie) e IEC 60853 (per transitori termici). In particolare, la quantificazione della resistenza termica del suolo è fondamentale per il corretto calcolo della temperatura di isolamento, ma implica anche un elevato livello di complessità, a causa del verificarsi del fenomeno del *dry-out* – la riduzione dell'umidità in prossimità di un cavo causata dal calore sprigionato dal cavo stesso – che aumenta la resistenza termica del terreno vicino al cavo. Il *dry-out* è modellato sia in termini statici sia dinamici, sfruttando anche il modello di Kersten per legare la resistività del suolo alla percentuale di umidità relativa del terreno.

La modellazione del giunto è ancora oggetto di ricerca a causa della sua intrinseca complessità, dovuta ai criteri costruttivi che sono diversi per applicazioni MT o AT; al tipo di giunti (carta impregnata o polimero); alla storia operativa precedente (numero di sovraccarichi, condizioni operative); nonché all'effettivo processo di installazione. Tutti aspetti che possono avere un'influenza significativa sul comportamento dei giunti.

Il valore aggiunto del modello proposto consiste nel fatto che rappresenta un buon compromesso tra accuratezza e semplicità: rileva alcuni dei fattori principali che influenzano i meccanismi di guasto dei cavi e dei giunti ma rimane sufficientemente semplice da poter essere applicato a molte migliaia di componenti.

Per la modellazione dinamica dei giunti è applicato un modello di "rete a scala". Nel modello proposto

Figura 3 **Principali risultati per cavi e giunti più sollecitati sul *feeder* 1 (a) e sul *feeder* 2 (b) in caso di ondata di calore del 29 giugno 2019**



i parametri sono specificati per le principali tipologie di tecnologie per cavi (carta impregnata e polimero) e tipi di giunti (omogenei carta-carta, omogenei polimero-polimero e carta-polimero), diffuse nelle attuali reti di distribuzione.

Il modello di invecchiamento termico adottato è basato sull'applicazione della legge di Arrhenius nel caso di carichi di corrente tempo-varianti, e consente di identificare la vita rimanente del componente sulla base della vita operativa pregressa (ricostruita tramite ipotesi ragionevoli relative all'entità e alla frequenza di sovraccarichi termici nella vita).

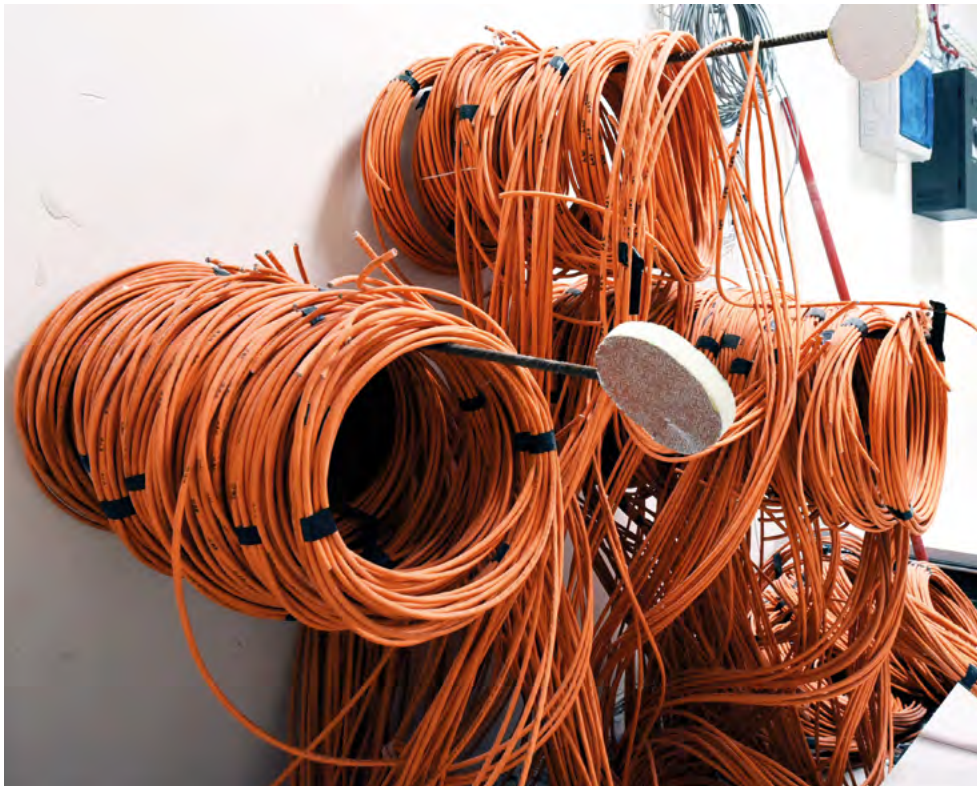
Infine, il modello probabilistico di Weibull quantifica il tasso di guasto e di conseguenza la probabilità di guasto a breve termine del componente.

Il modello acquisisce in input sia le variabili endogene del sistema (ovvero i profili temporali previsti delle correnti su ogni ramo

dei feeder) sia le variabili esogene (profili temporali di temperatura e umidità del suolo su una griglia di punti con risoluzione 7x7 km) maggiormente coinvolte nel determinare la risposta degli asset alle ondate di calore.

La **Figura 3** mostra i principali risultati relativi alle probabilità di guasto a breve termine, alla temperatura del suolo e alle temperature di isolamento e giunto per i tre cavi più sollecitati su due *feeder* della rete di distribuzione di Milano durante l'ondata di calore del 2019 (rispettivamente il *feeder* 1 ha subito guasti, il *feeder* 2 no).

Le simulazioni di questi e altri *feeder* dell'area di Milano mostrano che il modello di vulnerabilità proposto fornisce indicazioni piuttosto selettive circa i *feeder* più critici (dove sono stati effettivamente registrati guasti), nonostante l'uso di dati standard per caratterizzare le singole tipologie di cavi e giunti. In termini di capacità di classificazione dei *feeder* critici, si rileva che l'accuratezza di classificazione del modello definita come (VP± VN)/(P+N), dove V=Vero, F=Falso, P=Positivo, N=Negativo, è pari all'83 per cento sul set di *feeder* analizzato. Inoltre, non si riscontrano Falsi Negativi (ovvero situazioni in cui il modello non segnala la criticità di un *feeder* che in effetti ha subito guasti), il che è molto importante nel caso di utilizzo in un sistema di previsione dei guasti.



Quantificare la resistenza termica del suolo, fondamentale per il corretto calcolo della temperatura di isolamento, è complicato dal fenomeno del *dry-out* – la riduzione dell'umidità in prossimità di un cavo, causata dal calore sprigionato dal cavo stesso – che aumenta la resistenza termica del terreno

Conclusioni

L'aumento dei guasti alle reti di distribuzione MT interrate nelle aree urbane durante i periodi di caldo estivo è un problema complesso che richiede un approccio multidisciplinare. RSE svolge diverse attività per affrontare questa problematica, a partire dalla definizione di ondate di calore, per la quale è stata sviluppata una metodologia di identificazione e classificazione in base alla loro intensità e durata. Per valutarne l'impatto sulla rete elettrica sono stati condotti studi per quantificare l'aumento del rischio di guasto dei giunti MT in relazione a diversi fattori, tra cui la temperatura ambiente, il carico in corrente del cavo e le caratteristiche del terreno. Su questa base sono state sviluppate tecniche diagnostiche innovative per la valutazione dello stato di salute dei giunti MT e per l'identificazione di quelli maggiormente soggetti a guasti. Infine, è stato definito un approccio analitico per la quantificazione del rischio di guasto utile per incrementare la resilienza della rete, presentando un modello che consente di calcolare la probabilità di guasto dei giunti e cavi MT in funzione di diversi fattori di rischio. Il modello può essere utilizzato per identificare le aree della rete più vulnerabili e per pianificare interventi di manutenzione mirati.

Questo lavoro è stato finanziato dal Fondo di Ricerca per il Sistema Elettrico nell'ambito del Piano Triennale 2022-2024 (DM MITE n. 337, 15.09.2022), in ottemperanza al DM 16 aprile 2018