



Laurea Magistrale in INGEGNERIA ELETTRICA

RESILIENZA DELLA RETE DI DISTRIBUZIONE ELETTRICA ALLE ONDATE DI CALORE

Relatori

Prof. Andrea MAZZA

Prof. Gianfranco CHICCO

Candidato

Amedeo MARCONI

Marzo 2025

La Tesi affronta il tema della Resilienza della rete di Distribuzione Elettrica alle ondate di calore, con particolare riferimento alla rete urbana della Città di Torino. Negli ultimi anni, l'aumento della frequenza e dell'intensità delle ondate di calore ha evidenziato criticità nel funzionamento delle infrastrutture elettriche, portando a un incremento significativo dei guasti. L'obiettivo principale di questa ricerca è analizzare la correlazione tra condizioni climatiche estreme e affidabilità della rete, valutando l'adeguatezza dei modelli tradizionali di previsione dei guasti e proponendo un approccio basato sulla Resilienza.

La Distribuzione Elettrica consiste nel trasporto di elettricità in Media e Bassa Tensione (MT, BT) presso le aree urbane, tramite linee aeree o cavi interrati. Essa è di competenza dei Distributori o DSO (Distribution System Operator) che agiscono come monopolio locale. Nella Città di Torino il ruolo di Distributore è svolto da IRETI, azienda del gruppo Iren. La rete cittadina si sviluppa su 4654 km di cavi e linee aeree, a vari livelli di tensione: 27 kV, 22 kV e 6,3 kV per i tratti in MT, 400/230 V per la BT. La tensione nei 10 punti di interconnessione con la Rete di Trasmissione Nazionale è pari a 132 kV oppure 220 kV. L'attività di IRETI e di tutti gli altri DSO è regolamentata dall'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA), un ente amministrativo indipendente che ha il compito di vigilare su tariffe, accesso alle reti e qualità. Circa questo aspetto, ogni distributore è tenuto a registrare i disservizi sulla rete, per assegnare dei valori a alcuni parametri (SAIFI, SAIDI, CAIDI) univocamente definiti, che riflettono la bontà del servizio offerto. Qualora si registrasse una qualità insufficiente, l'ente Distributore è tenuto a risarcire i clienti e a versare indennizzi presso ARERA, che invece premia le realtà più virtuose. Emerge chiaramente la necessità di questa Tesi e dei numerosi altri studi che

trattano la tematica dell'impatto dei fenomeni climatici estremi, derivanti dal cambiamento climatico, sulla rete elettrica.

L'analisi si è concentrata su due aspetti principali. Il primo ha riguardato lo studio della vulnerabilità della rete elettrica alle ondate di calore, con particolare attenzione ai guasti che interessano componenti critici come Terminali, Giunti e Cavi interrati (detti guasti TGC). Il secondo è riferito alla valutazione dell'efficacia della teoria dell'affidabilità rispetto a un approccio dedicato alla resilienza, per determinare se i modelli probabilistici tradizionali, tuttora impiegati, siano in grado di prevedere correttamente i guasti in condizioni climatiche estreme.

L'affidabilità si concentra sulla capacità di un sistema di continuare a funzionare in seguito ad interruzioni tipiche del normale esercizio della rete, dove le cause non vengono approfondite in quanto ritenute frequenti e inevitabili. La resilienza, invece, si focalizza sulla capacità del sistema di adattarsi e riprendersi rapidamente dopo un evento critico, tipicamente raro ma di grande impatto sulle infrastrutture (evento HILP, High Impact Low Probability).

Lo studio è stato condotto utilizzando un dataset di guasti della rete di Distribuzione Elettrica della Città di Torino, correlato con dati meteorologici quali temperatura, precipitazioni e umidità, relativo agli anni dal 2019 al 2023. In particolare, sono stati utilizzati i registri delle interruzioni di servizio, contenenti informazioni sulla tipologia e la durata dei guasti e i dati meteorologici storici provenienti da rilevazioni locali, con particolare attenzione agli episodi di temperature elevate e sbalzi termici.

L'elaborazione dei dati è stata effettuata tramite script sviluppati in MATLAB, implementando diverse tecniche di analisi. Sono stati analizzati statisticamente la distribuzione dei guasti in

funzione della temperatura e di altri parametri climatici e calcolati indicatori di affidabilità per confrontare le previsioni con i dati reali. È stato inoltre studiato il legame tra guasti e sbalzi di temperatura, per comprendere il ruolo delle rapide variazioni termiche sui guasti.

Gli andamenti temporali dei guasti TGC nei cinque anni analizzati, del livello di temperatura apparente e di intensità della pioggia hanno permesso di evidenziare delle tendenze specifiche e delle criticità ancora da sanare. In media, si sono verificati 1,0301 guasti TGC al giorno (1883 totali), con il 42,57% dei giorni caratterizzati da almeno un evento di guasto. Nei giorni in cui il numero di guasti ha superato la media, si è notato un incremento della temperatura massima apparente oltre i 30 °C nel 39% dei casi. Inoltre, il 3,14% dei giorni con guasti elevati ha registrato precipitazioni superiori a 60 mm/h. Vi sono stati giorni in cui l'effetto simultaneo di temperatura elevata e pioggia intensa è coinciso con guasti oltre la media. Si noti la Figura 1, che evidenzia in rosso gli eventi HILP, rari ma di grande impatto (oltre il doppio dei guasti giornalieri medi).

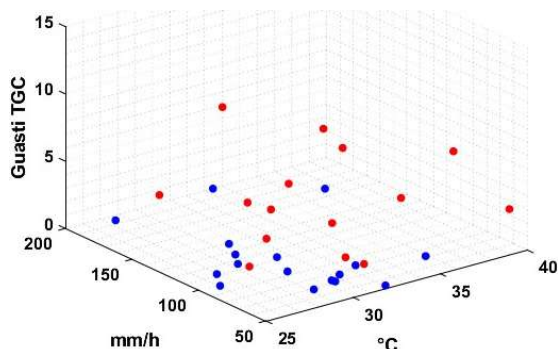


Figura 1, Grafico 3D dei guasti TGC, Temperatura e Intensità di pioggia

È emersa una chiara tendenza dei guasti TGC a concentrarsi nei momenti di maggior stress: lo studio dei guasti multipli (ovvero i guasti che si verificano in rapida successione a partire da un primo, cui sono correlati) ha dimostrato che su 762 guasti occorsi durante il caldo anomalo, l'89,64% sono multipli; in situazioni di pioggia molto intensa il dato sale a 92,54% e raggiunge il 97,62% con pioggia intensa e caldo anomalo.

Appare una correlazione positiva tra brusche variazioni termiche e aumento dei guasti nei giorni successivi. Si sono registrati picchi locali di interruzioni anche oltre i periodi estivi o primaverili, dove era lecito attendersi un'insorgenza maggiore dei guasti, ma anche in

corrispondenza di giorni interessati da rapidi sbalzi di temperatura, sia di crescita che di diminuzione. Tipicamente, guasti di questa natura si sono presentati con un ritardo temporale rispetto al fenomeno climatico. Questo suggerisce un'isteresi nei componenti della rete, che accumulano stress fino a cedere.

Si è ottenuta una conferma decisiva nel ritenere inadatto l'approccio affidabilistico nella gestione della rete elettrica di distribuzione dal calcolo delle funzioni cumulative di probabilità (CDF) dell'occorrenza giornaliera di guasti e del tempo medio tra guasti (MTBF, Mean Time Between Failures), Figura 2. Nei due casi i risultati teorici dell'affidabilità sono in linea con quelli reali fino a un limitato numero di guasti giornalieri o un alto MTBF, salvo sottostimare notevolmente le situazioni di numerosi guasti effettivi oppure di tempo tra guasti molto basso.

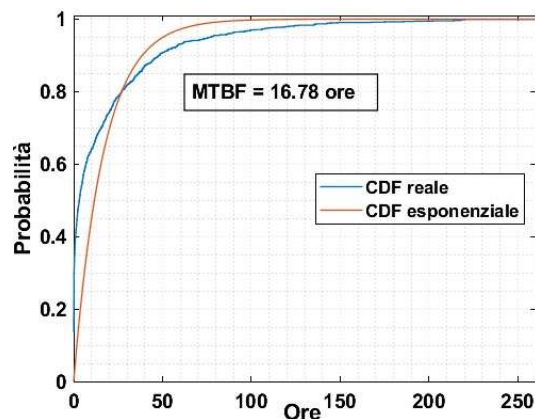


Figura 2, CDF del MTBF dei guasti TGC

Infine, è stato calcolato il Coefficiente di Correlazione Lineare tra le serie temporali dei guasti e della temperatura media. Come si vede in Figura 3, esso tende al valore limite superiore di 1 all'aumentare della temperatura, crescendo così la correlazione tra i dati.

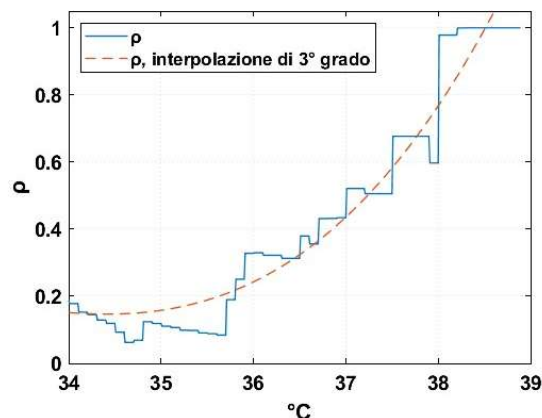


Figura 3, Correlazione Lineare e Temperatura