

LE SOVRACORRENTI NEI CAVI ELETTRICI DI BASSA TENSIONE. EFFICACIA DELLE PROTEZIONI E RELATIVI RISCHI RESIDUI

F. D'ANNA^(*)

G. GIACONIA^(^o)

M.G. IPPOLITO^(^o)

F. MASSARO^(^o)

Sommario

Nel lavoro vengono indagati e discussi gli aspetti che sembrano maggiormente cogenti nella protezione dalle sovracorrenti delle condutture elettriche in cavo. Per condizioni di installazione tipiche nel settore civile, lo studio della problematica termica ha consentito di sviluppare e implementare un modello termico attraverso il quale sono state ricavate le curve di sovraccaricabilità (tempo-corrente) dei cavi, fissando la massima sollecitazione termica tollerabile. I risultati ottenuti presentano notevoli spunti di interesse con riguardo sia all'efficacia delle attuali prescrizioni normative nel nostro paese, sia alle principali differenze che caratterizzano altri approcci. Gli aspetti indagati, in considerazione del carattere di non eludibilità dei rischi associati alle sovracorrenti e della complessità del rapporto fra conformità alle prescrizioni normative, rischi accettabili e rischi residui, potrebbero costituire una base di interesse comune per meglio orientare in alcuni casi le scelte progettuali, per intraprendere ulteriori studi e in prospettiva dell'evoluzione normativa in materia.

1. INTRODUZIONE

La crescente sensibilità alle problematiche di sicurezza impone un'attenzione sempre maggiore verso tutti i fattori di rischio presenti in ogni ambiente domestico e di lavoro, per la ricerca dei provvedimenti di prevenzione e/o protezione più adeguati. Con specifico riferimento ai pericoli derivanti dalla presenza e dall'esercizio di impianti elettrici a servizio di utenze di diverso tipo (domestico, del terziario, industriale etc...), un possibile rischio è quello relativo al surriscaldamento delle condutture elettriche per la presenza di sovracorrenti di lunga durata (sovraccarichi) e di breve durata (cortocircuiti). Tali sovracorrenti, se non interrotte tempestivamente, possono avere conseguenze gravi sia in termini di danni materiali sia in termini di perdita di vite umane. In accordo con le prescrizioni normative in materia, la protezione delle condutture dalle sovracorrenti è affidata ad idonei dispositivi automatici di interruzione posti a monte delle condutture stesse e dimensionati in modo tale da limitare le sollecitazioni termiche associate ad ogni evento di sovracorrente entro soglie ritenute convenzionalmente tollerabili. La logica generale che ispira i criteri di coordinamento (dispositivi di protezione-cavi) è quella di limitare l'invecchiamento dei materiali isolanti al 10% della loro durata di vita convenzionale e in ogni caso di interrompere le sovracorrenti di breve durata prima che vengano raggiunte temperature comunque inammissibili. Più in particolare, supposto che durante l'esercizio possano verificarsi al più 100 eventi (sovracorrenti), la conformità delle protezioni alle norme dovrebbe limitare la riduzione della vita dell'isolante allo 0,1% per ogni evento di sovracorrente.

In questa logica, si dovrebbe accertare caso per caso che la curva di sovraccaricabilità (corrente-tempo) corrispondente ad una perdita di vita dello 0,1% rimanga sempre al di sopra della caratteristica di intervento del dispositivo di protezione. Questa verifica non viene normalmente condotta, a causa della complessità dei modelli di studio e delle procedure di calcolo che potrebbero consentirne l'esecuzione. In alternativa, le norme impongono condizioni di verifica (separate per sovraccarichi e cortocircuiti) di più agevole applicazione, ragionevolmente ritenute di equivalente efficacia.

Nel lavoro, una volta evidenziata l'incidenza statistica del rischio in esame, viene proposta un'analisi approfondita della problematica e del cosiddetto rischio accettato con specifico riferimento alla possibilità che, pur nel rispetto delle norme, possano verificarsi eventi con riduzioni maggiori dello 0,1% della vita utile dell'isolante (invecchiamento precoce del dielettrico). A tale scopo vengono presentati e discussi i risultati di uno studio condotto sui transistori termici dovuti alla presenza di sovracorrenti in conduttori in cavo (isolati in PVC) e posati all'interno di tubazioni incassate (a parete, a soffitto o a pavimento). Per questa situazione, che rappresenta una delle soluzioni più diffusamente impiegate per la distribuzione all'interno di utenze in bassa tensione in ambito civile, è stato studiato e messo a punto un accurato modello termico nel quale, oltre ai principali aspetti che caratterizzano gli scambi termici e che vengono presi in considerazione in altri studi presenti in letteratura, si è tenuto conto anche del contributo dell'irraggiamento e del possibile contatto dei cavi con la tubazione. Attraverso questo modello è stato possibile simulare il comportamento della conduttura valutando gli effetti termici dovuti alla circolazione di correnti superiori alla portata. Per i tipi di cavi di più diffuso impiego, con le simulazioni effettuate è stato possibile ricavare le curve di sovraccaricabilità (corrente-tempo), fissando la massima riduzione di vita del materiale isolante (in accordo con le norme CENELEC/IEC) o, in alternativa, fissando la temperatura massima consentita per carico d'emergenza (come dalle raccomandazioni ANSI/IEEE), con l'obiettivo di valutare quali siano i reali margini di sicurezza garantiti dalle protezioni installate e coordinate seguendo le attuali prescrizioni normative.

^(*) *Vigili del Fuoco, Ispettorato Piemonte, Strada del Barrocchio 71/73, 10095 Grugliasco (TO).*

^(^o) *Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo.*

2. CAUSE ELETTRICHE D'INCENDIO: LE SOVRACORRENTI NELLE CONDUTTURE

Gli incendi che si verificano all'interno di edifici e che richiedono l'intervento dei Vigili del Fuoco sono in Italia circa 30.000 all'anno. Di essi, una percentuale variabile dal 10% al 20% (cioè da 8 a 16 incendi al giorno) è riconducibile a cause elettriche. In base ad uno studio condotto su iniziativa dell'Istituto Italiano del Marchio di Qualità (IMQ) [1], con riferimento agli anni 1994-95, buona parte degli incendi d'origine elettrica ha avuto luogo in edifici civili (il 39% nel 1994 e il 37% nel 1995). Con riguardo ai componenti dell'impianto elettrico o agli apparecchi utilizzatori sui quali gli incendi si sono originati, dai dati disponibili emergono con evidenza le incertezze derivanti dal fatto che gli effetti distruttivi degli incendi rendono estremamente difficile l'individuazione esatta della loro origine. Ciò che è certo è che le cause elettriche d'incendio sono sempre riconducibili all'effetto Joule e all'arco elettrico. Fra tali cause, analizzate in dettaglio in [2], le sovracorrenti nelle condutture assumono un'importanza particolare (assieme ai quadri elettrici e ai televisori), come si rileva anche dall'esame della tabella 1. Una statistica della National Fire Protection Association (NFPA) americana rileva, inoltre, che gli incendi di origine elettrica sono dovuti [3]: ai cavi (31%), ai motori (30%), alle giunzioni dei cavi (21%), a componenti ed apparecchi (11%), a cause diverse (7%).

Tabella 1- Origine degli incendi di natura elettrica (anni 1994-1995)

Origine degli incendi (in %)			
Non precisato	69,4	Prese a spina	1,8
Quadri elettrici	6	Lavatrici	1,6
Televisori	4,5	Elettrodomestici vari	1,6
Condutture elettriche	4,2	Apparecchi di illuminazione	1,3
Contatori elettrici	3,1	Forni o piastre elettriche	1
Coperte elettriche	2,6	Stufe elettriche	1
Frigoriferi	1,9		

Per sovracorrente, com'è noto, si intende una condizione anomala caratterizzata dalla presenza di una corrente in una conduttura elettrica di valore superiore alla portata⁽¹⁾ della conduttura stessa. Tale condizione determina un incremento della temperatura dei conduttori, con una riduzione della vita convenzionale dell'isolamento dei cavi e con la possibilità, oltre certi valori di temperatura, d'innescare d'incendio.

3. CRITERI DI PROTEZIONE DALLE SOVRACORRENTI

La protezione delle condutture elettriche dalle sovracorrenti è affidata a dispositivi di interruzione posti a monte delle condutture stesse e dimensionati in modo tale da limitare le sollecitazioni termiche associate ad ogni evento di sovracorrente entro soglie ritenute convenzionalmente tollerabili.

In base all'origine di una sovracorrente, si distingue tra:

- correnti di sovraccarico, che si stabiliscono in circuiti elettricamente sani;
- correnti di cortocircuito, originate da guasti di impedenza trascurabile tra punti a diverso potenziale elettrico in condizioni ordinarie.

3.1. PROTEZIONE CONTRO I SOVRACCARICHI

La norma CEI 64-8 (in accordo con la [4]), sulla protezione dei cavi contro i sovraccarichi, prescrive le note condizioni:

$$\begin{cases} I_B \leq I_n \leq I_Z \\ I_f \leq 1.45 \cdot I_Z \end{cases} \quad (1)$$

essendo I_B la corrente di impiego del circuito, I_Z la portata in regime permanente della conduttura, I_n la corrente nominale del dispositivo di protezione e I_f la corrente convenzionale d'intervento, ovvero la corrente che, nelle condizioni stabilite dalle norme, assicura l'intervento del dispositivo di protezione entro il tempo convenzionale.

Il valore 1,45 rappresenta un compromesso fra le esigenze di sicurezza (un sovraccarico del 45% è consentito per una durata massima pari al tempo convenzionale), e quelle di sfruttamento della conduttura. Si comprende infatti facilmente come il cavo sia:

- tanto meno protetto quanto più ampio è l'intervallo $[I_Z \quad I_f]$; per sovraccarichi di piccola entità il dispositivo di protezione potrebbe intervenire in tempi molto lunghi (con temperature inammissibili per il suo isolamento) o, nel caso peggiore, non intervenire affatto;
- tanto meno utilizzato quanto più ampio è l'intervallo $[I_B \quad I_Z]$.

Per una verifica più puntuale della protezione del cavo si dovrebbe accertare, caso per caso, che la caratteristica di intervento tempo-corrente del dispositivo di protezione si mantenga in ogni punto al di sotto di una curva limite di sovraccaricabilità del cavo stesso, ricavabile fissando una soglia di tollerabilità per la sollecitazione termica associata ad ogni evento di sovracorrente.

⁽¹⁾ La portata di un cavo è definita come il più elevato valore di corrente che a regime e in condizioni di installazione determinate il cavo può trasmettere senza superare la temperatura massima di funzionamento.

In sede europea si ritiene tollerabile una perdita di vita del cavo complessiva del 10% (rispetto alla durata di vita convenzionale) per eventi di sovracorrente. Supposto pari a 100 il numero medio atteso di tali eventi durante l'intera vita del cavo, ne discende una perdita di vita convenzionalmente accettabile dello 0,1% per ogni evento di sovracorrente.

Un approccio diverso per determinare la sovraccaricabilità delle condutture in cavo è contemplato dalle raccomandazioni ANSI/IEEE [5]. Oltre alla temperatura massima di funzionamento, in base alla quale viene determinata la portata di un cavo, le ANSI/IEEE definiscono una *temperatura di carico di emergenza* θ_E , che può essere tollerata per un determinato tempo massimo per ciascun sovraccarico, fissato il numero massimo di sovraccarichi per anno.

Con tali assunzioni, a partire da una condizione iniziale di pieno carico, l'insieme dei punti (t, I_E) della curva di sovraccaricabilità dovrà soddisfare la seguente relazione:

$$I_E = I_z \sqrt{\frac{\frac{\theta_E - \theta_a}{\theta_z - \theta_a} - e^{-\frac{t}{K_T}}}{1 - e^{-\frac{t}{K_T}}} \cdot \frac{230 + \theta_z}{230 + \theta_E}} \quad (2)$$

essendo I_E la sovracorrente associata alla durata t , I_z la portata del cavo, θ_E la temperatura di carico di emergenza, θ_a la temperatura ambiente, K_T la costante di tempo termica del cavo (tabella 2) e 230 il valore di temperatura (approssimato e cambiato di segno) per il quale risulta nulla la resistività del materiale conduttore.

Sezione dei cavi (in mm ²)	Posa in aria		Posa interrata	
	Senza tubazione	Entro tubazione	Diretta	Entro tubazione
< 35	0,33	0,67	1,25	1,00
35-120	1,00	1,50	3,00	2,50
≥ 120	1,50	2,50	6,00	4,00

Tabella 2 – Costanti di tempo (in ore) termiche secondo le raccomandazioni ANSI/IEEE

La temperatura θ_E è fissata in 130 °C per cavi isolati in etilenpropilene (EPR) e in 90 °C per cavi isolati in polivinilcloruro (PVC); per altri tipi di isolamento si rimanda alle [5].

3.2. PROTEZIONE CONTRO I CORTOCIRCUITI

La protezione delle condutture in cavo dai cortocircuiti è affidata a dispositivi di interruzione che:

- siano in grado di interrompere e chiudere la massima corrente presunta di cortocircuito;
- realizzino l'interruzione delle correnti di guasto in tempi sufficientemente brevi da evitare effetti termici che potrebbero danneggiare le condutture.

In altri termini, con riferimento a quest'ultima condizione, l'isolamento dei cavi non deve mai superare la *massima temperatura di cortocircuito* θ_F stabilita dalle norme. Più in particolare:

- i materiali termoplastici (come il PVC) non devono superare la temperatura di rammollimento di 160 °C;
- i materiali elastomerici (come l'EPR) non devono superare temperature massime stabilite fra 200 e 250 °C in base allo specifico tipo di isolante.

Per limitare la temperatura entro il valore stabilito, nell'ipotesi che il fenomeno di riscaldamento sia adiabatico, è necessario che l'energia specifica lasciata passare dal dispositivo di protezione non superi quella massima sopportabile dal circuito a valle, ovvero:

$$I^2 t \leq K^2 S^2 \quad (3)$$

essendo I la corrente di cortocircuito termicamente equivalente, t la durata del cortocircuito, K un coefficiente dipendente dal materiale conduttore e dal tipo di isolamento ed S la sezione del cavo.

4. SPUNTI DI INDAGINE

Nel quadro ampio e variegato di tutte le problematiche coinvolte nel comportamento termico dei cavi in bassa tensione e nei criteri di protezione dalle sovracorrenti adottati, per le finalità del presente lavoro è sembrato utile:

- A. indagare il rischio associato alla possibilità che, pur nel rispetto delle prescrizioni normative, possano verificarsi eventi di sovracorrente con sollecitazioni termiche più gravose rispetto a quelle ritenute convenzionalmente tollerabili;
- B. con particolare riferimento ai sovraccarichi, condurre le indagini di cui al precedente punto A, assumendo la massima sollecitazione termica ammissibile sia in termini di perdita di vita dei materiali isolanti (in coerenza con l'approccio CENELEC/IEC), sia per fissata temperatura di carico di emergenza (come nelle raccomandazioni ANSI/IEEE).

Con tali obiettivi, nei paragrafi che seguono vengono presentati e discussi i risultati di uno studio condotto simulando i transitori termici dovuti all'instaurarsi di sovracorrenti in condutture realizzate con cavi isolati in PVC e posati all'interno di tubazioni incassate. Per questa situazione, che rappresenta una delle soluzioni più diffusamente impiegate per la distribuzione all'interno di utenze in bassa tensione in ambito civile, è stato studiato e messo a punto un modello termico nel quale, seppure nei limiti di alcune assunzioni semplificative, si è cercato di tenere conto di tutti i principali aspetti che caratterizzano gli scambi termici (compresi i contributi dell'irraggiamento e dei possibili contatti dei cavi con la superficie interna della tubazione). Il modello (implementato in ambiente Matlab) può rappresentare un valido strumento di indagine del comportamento termico transitorio e a regime dei cavi di bassa tensione (nelle condizioni di posa prima specificate) grazie anche alla sua estrema flessibilità che permette, variando opportunamente alcuni parametri, di cambiare tipo di cavo, sezione del conduttore, tipo di isolamento, corrente iniettata, numero di cavi caricati, etc....

5. DESCRIZIONE DEL MODELLO TERMICO

Si consideri il sistema costituito da un singolo cavo sistemato all'interno di una tubazione annegata nel calcestruzzo.

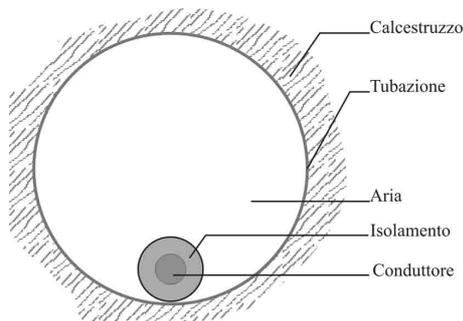


Figura 1 - Geometria del sistema conduttore- tubazione- calcestruzzo

Dalla geometria del sistema, schematicamente rappresentata in figura 1, risulta chiaramente evidente che il calore, prodotto per effetto Joule nell'anima del conduttore, si propaga all'esterno verso il calcestruzzo attraversando prima l'isolamento, quindi lo strato d'aria e infine la tubazione.

Lo scambio termico attraverso l'isolante è di tipo conduttivo; trascurando il fenomeno della convezione, in considerazione dell'esiguità dello strato d'aria interposto fra cavo e tubazione, anche lo scambio termico attraverso l'aria può essere assunto di tipo conduttivo. Esiste anche un'altra via di scambio per conduzione, attraverso la superficie di contatto fra il cavo e la tubazione. Oltre agli scambi termici di tipo conduttivo, si può considerare lo scambio termico per irraggiamento fra isolamento e tubazione. Attraversate le resistenze termiche corrispondenti all'isolante, all'aria e alla tubazione, il flusso termico generato nel conduttore si disperde verso il calcestruzzo circostante la tubazione.

Nel modello adottato sono state considerate solo le capacità termiche dell'anima in rame e del calcestruzzo, trascurando quelle dell'isolante e dell'aria interna. Per lo studio del fenomeno termico, inoltre, il sistema costituito da un cavo inserito in una tubazione è stato rappresentato come due cilindri infinitamente lunghi (ciò è lecito in considerazione del fatto che la lunghezza delle tubazioni e dei cavi è di gran lunga maggiore dei rispettivi raggi).

Le considerazioni sin qui espresse definiscono le principali assunzioni di base a partire dalle quali è stato sviluppato il modello termico e, pertanto, i limiti di validità del modello stesso. Con riferimento al caso di un singolo cavo (caso più semplice che ha solo validità teorica) tali assunzioni possono essere sintetizzate nei seguenti punti:

- il sistema costituito dalla tubazione e dal cavo in essa contenuto è considerato come equivalente a due cilindri ad asse parallelo infinitamente lunghi;
- lo scambio termico nell'aria è assunto di tipo conduttivo senza che si inneschi alcun processo convettivo;
- lo strato d'aria, l'isolamento e la tubazione si considerano rappresentabili attraverso resistenze termiche concentrate;
- il conduttore in rame e il calcestruzzo circostante la tubazione si considerano rappresentabili attraverso capacità termiche concentrate;
- si trascurano le capacità termiche dell'isolante e dell'aria interna;
- si tiene conto degli scambi termici per irraggiamento fra isolante e tubazione.

In tali ipotesi, al sistema termico di figura 1 può essere associato il circuito elettrico equivalente rappresentato in figura 2.

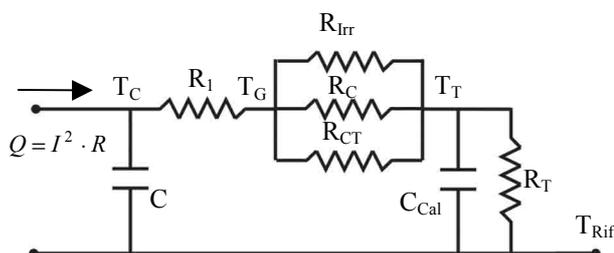


Figura 2 - Equivalente elettrico del sistema conduttore- tubazione- calcestruzzo

Le resistenze e le capacità termiche possono essere calcolate attraverso le seguenti espressioni ([6]), con il significato dei simboli riportato in appendice A1:

$$R_I = \frac{\ln r_{PVC}/r_{Cu}}{2\pi \cdot \chi_{PVC}} \frac{K \cdot m}{W} \quad R_C = \frac{\ln r_c/r_{PVC}}{2\pi \cdot \chi_a} \frac{K \cdot m}{W} \quad (4)$$

$$R_T = \frac{\ln(r_c + l)/r_c}{2\pi \cdot \chi_a} \frac{K \cdot m}{W} \quad C = d \cdot S \cdot c_p \frac{J}{K \cdot m}$$

Maggiori difficoltà presenta il calcolo della resistenza equivalente di irraggiamento R_{irr} giacchè, come è noto, l'irraggiamento dipende dalle quarte potenze delle temperature in gioco. Tuttavia, in certi casi, è possibile attuare una procedura di linearizzazione, riportando anche i fenomeni radiativi a dipendere, tramite un coefficiente, dalla prima potenza della differenza di temperatura. Il procedimento di linearizzazione è applicabile (e comporta un errore modesto nei calcoli) nel caso in cui le temperature assolute in gioco siano tali da soddisfare la seguente relazione:

$$(T_1 - T_2) \ll \begin{cases} T_1 \\ T_2 \end{cases}$$

ovvero, quando la differenza fra la temperatura della superficie emittente T_1 (nel caso in esame dell'isolante) e quella della superficie ricevente T_2 (cioè quella della tubazione) è molto più piccola rispetto alle stesse T_1 e T_2 . In generale, il flusso di irraggiamento per metro di conduttore, q_{irr} , è esprimibile come:

$$q_{irr} = \frac{\sigma \cdot 2\pi \cdot r_{PVC} \cdot (T_G^4 - T_T^4)}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{r_{PVC}}{r_C}\right)} \quad (5)$$

Tale espressione si riferisce a due cilindri coassiali indefiniti, ed è stata adattata al caso in esame nel quale le emissività ε del materiale radiante (l'isolamento) e del materiale ricevente (la tubazione) risultano eguali, essendo entrambe realizzate in PVC. Il significato dei simboli utilizzati, con riferimento a tutte le espressioni riportate, è quello indicato in appendice A1. Ponendo allora:

$$c_{irr} = \frac{\sigma \cdot 2\pi \cdot r_{PVC}}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{r_{PVC}}{r_C}\right)} \quad (6)$$

si ottiene:

$$q_{irr} = c_{irr} \cdot (T_G^4 - T_T^4) \quad (7)$$

Il flusso di irraggiamento viene così a dipendere dal parametro c_{irr} e dalla differenza delle quarte potenze delle temperature di emittitore e di ricevente. Il parametro c_{irr} dipende dalle caratteristiche termiche e geometriche, che, per dato sistema, rimangono costanti. Nell'ipotesi di applicabilità del processo di linearizzazione, precedentemente espresse, può scriversi:

$$T_G = T_T + \Delta T \quad (8)$$

Ponendo $f(T) = T^4$ ed essendo dalla (11) $f(T_G) = f(T_T + \Delta T)$, sviluppando in serie di Taylor si ottiene:

$$q_{irr} \cong c_{irr} \cdot 4T_T^3 \cdot (T_G - T_T) \quad (9)$$

Dalla (9) si può esprimere la resistenza equivalente di irraggiamento:

$$R_{irr} = \frac{1}{c_{irr} \cdot 4T_T^3} \quad (10)$$

Per la R_{CT} , l'espressione che permette di calcolare la resistenza termica di contatto fra due corpi è la seguente ([7]):

$$R_{CT} = \frac{1}{h_{CT} \cdot A} \quad (11)$$

dove A è l'area di contatto teorica fra i due corpi ed essendo:

$$h_{CT} = \frac{1}{\xi_A + \xi_B} \cdot \left(\frac{A_e}{A} \cdot \frac{2 \cdot \chi_A \cdot \chi_B}{\chi_A + \chi_B} + \frac{A_v}{A} \cdot \chi_f \right) \quad (12)$$

Risulta naturalmente:

$$A_v = A - A_e \quad (13)$$

Particolarizzando la (12) al caso d'interesse, tenuto conto della (13) si ottiene:

$$h_{CT} = \frac{1}{2 \cdot \xi} \cdot \left[\chi_a + \frac{A_e}{A} \cdot (\chi_{PVC} - \chi_a) \right] \quad (14)$$

Nella (14) si è considerato che entrambi i corpi a contatto sono costituiti da PVC, e che il fluido interposto sia aria.

Determinata la resistenza di contatto R_{CT} , occorre valutare la capacità termica del calcestruzzo. L'aspetto più complesso è qui legato alla corretta quantificazione della quantità di calcestruzzo che si riscalda insieme al cavo. Si può quantificare in circa tre o quattro diametri della tubazione la zona limite oltre la quale non vi è più variazione di temperatura nel calcestruzzo per effetto della presenza del cavo. Trascurando i gradienti di temperatura all'interno di tale zona e ritenendo di maggiore interesse la capacità termica introdotta dal calcestruzzo, è possibile, ricorrendo ad un artificio, pensare ad un manicotto di materiale di dimensioni opportune, concentrico alla tubazione, che si porti interamente alla stessa temperatura; il volume così considerato è più piccolo del reale volume di calcestruzzo che verrebbe ad essere interessato dal transitorio termico: portandosi però il materiale ad una sola temperatura in tutti i punti (avendone trascurato i gradienti termici), esso immagazzinerà la stessa quantità di energia. A partire da tali assunzioni, è sembrato ragionevole riferirsi ad un manicotto di materiale di spessore pari a 5mm, concentrico alla tubazione. Fissata la geometria, risulta immediato il calcolo della capacità termica del manicotto.

Esprese tutte le resistenze e le capacità termiche in funzione dei parametri geometrici e fisici del sistema, per la rappresentazione analitica del modello termico è sufficiente scrivere le equazioni del circuito equivalente riportato in figura 2. Da esso, infatti, si ottiene:

$$C \cdot R_{TOT} \frac{dT_C}{dt} = I^2 \cdot R \cdot R_{TOT} - T_C + T_T \quad (15)$$

$$C_{Cal} \cdot R_T \frac{dT_T}{dt} = \left(I^2 \cdot R - C \frac{dT_C}{dt} \right) \cdot R_T - T_T + T_{Rif} \quad (16)$$

$$T_G = \frac{T_C - T_T}{R_{TOT}} \cdot R_{//} + T_T \quad (17)$$

La resistenza elettrica R del conduttore come è noto varia linearmente con la temperatura del conduttore medesimo. Per essa, con il noto significato dei simboli, si può scrivere:

$$R = \frac{\rho_{T_C}}{S} = \frac{\rho_{20^\circ} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_C - 20)]}{S} \quad (18)$$

Le equazioni (15)-(18) consentono di implementare al calcolatore il modello termico appena definito.

5.1 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO TERMICO

L'implementazione al computer del modello è stata realizzata in ambiente Matlab tramite l'utilizzo del programma di simulazione Simulink. Lo schema di simulazione è rappresentato in figura 3.

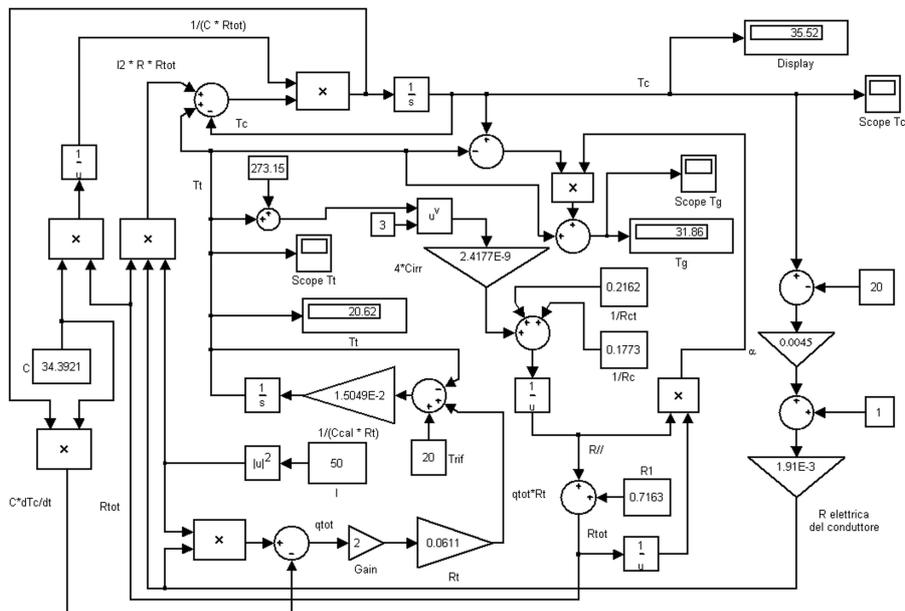


Figura 3 - Schema a blocchi utilizzato per la simulazione in ambiente Matlab

Il modello implementato, oltre alle condizioni di carico elettrico della conduttura, riceve in ingresso i valori di tutte le resistenze e le capacità termiche rappresentate nel circuito equivalente di figura 2, restituendo in uscita le temperature T_C , T_G , T_T , rispettivamente del conduttore, dell'isolante e della tubazione. Lo stesso sistema di simulazione può essere utilizzato anche per studiare il comportamento di più cavi installati nella medesima tubazione. L'ipotesi (ovviamente soltanto teorica) di considerare la presenza di un solo cavo può essere, infatti, superata in ragione delle considerazioni che seguono. Si supponga di voler simulare il comportamento termico di un circuito monofase costituito da due cavi posati all'interno della stessa tubazione e percorsi dalla stessa corrente. I due cavi, in questa condizione, generano la stessa quantità di calore e si trovano nelle medesime condizioni di scambio termico con l'esterno.

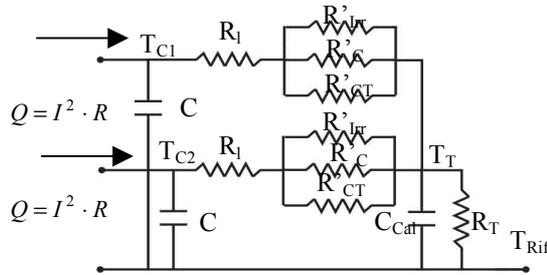


Figura 4 - Equivalente elettrico del sistema a due cavi

Si consideri lo schema presentato in figura 4: della presenza del secondo cavo si è tenuto conto attraverso una seconda capacità C , un altro parallelo di resistenze R'_{irr} , R'_C , R'_{CT} che, per la diversa geometria del sistema, assumeranno valori diversi rispetto alle resistenze termiche R_{irr} , R_C e R_{CT} di figura 2. Per il sistema così rappresentato i due cavi risultano termicamente indipendenti (senza cioè scambio termico reciproco) giacché si portano, istante per istante, alla stessa temperatura. La tubazione, essendo investita da un flusso termico doppio, si porta ad una temperatura T_T più elevata rispetto al caso di cavo singolo. L'innalzamento di T_T comporta un peggior scambio termico dei due cavi per i quali è lecito aspettarsi un certo aumento di temperatura. Con riferimento al simulatore schematizzato in figura 3, il numero di cavi presenti nella conduttura (ad esempio 2) può essere impostato attraverso un blocco (di gain) appositamente previsto. Ciò avrà l'effetto di sollecitare il blocco di calcolo di T_T con $2 \cdot \left(I^2 \cdot R - C \frac{dT_C}{dt} \right) \cdot R_T$, ovvero si otterrà un flusso termico sulla T_T doppio, in accordo con le considerazioni precedentemente espone. Sul singolo cavo rimane la sollecitazione termica derivante dal termine $I^2 \cdot R$, tuttavia, la differenza che si produce sulla T_T influenzerà i suoi scambi termici, innalzando i valori di temperatura.

6. CASI SIMULATI

Attraverso il modello implementato è stato indagato il comportamento termico di due particolari condutture in cavo (d'ora in poi indicate come condutture di tipo A e di tipo B), le cui caratteristiche principali sono riassunte nelle tabelle 3 e 4.

Tabella 3- Conduttura di tipo A

Cavo da 10 mm ² in tubazione sottotraccia	
Tipo circuito / numero cavi	Monofase / 2
Sezione del conduttore	10mm ²
Tipo di isolante	PVC
Diametro Tubazione	32 mm
Tabella di riferimento	App. A2

Tabella 4- Conduttura di tipo B

Cavo da 1,5 mm ² in tubazione sottotraccia	
Tipo circuito / numero cavi	Monofase / 2
Sezione del conduttore	1,5 mm ²
Tipo di isolante	PVC
Diametro Tubazione	16 mm
Tabella di riferimento	App. A2

Nella scelta di tali casi studio si è cercato di individuare situazioni tipiche, ragionevolmente rappresentative delle soluzioni impiantistiche più diffuse nel settore civile (residenziale e terziario). In quest'ottica sono state prese in considerazione condutture realizzate con cavi isolati in polivinilcloruro e posti all'interno di tubazioni incassate (a parete, a pavimento o a soffitto). Per quanto attiene alla scelta delle sezioni, si è ritenuto che:

- i valori di 1,5 e 10 mm² possono ragionevolmente rappresentare le due sezioni limite adottate per i circuiti di distribuzione interni ad utenze civili;
- i cavi da 1,5 mm², spesso utilizzati per le derivazioni su circuiti principali di sezione maggiore (2,5 o 4 mm²), possono trovarsi in condizioni termiche particolarmente gravose se i dispositivi di protezione vengono coordinati con i circuiti principali.

Per i due casi indagati, nelle figure 5 e 6 sono riportati a titolo esemplificativo gli andamenti temporali delle temperature nei conduttori, negli isolanti e nelle tubazioni in una delle numerose condizioni di carico simulate.

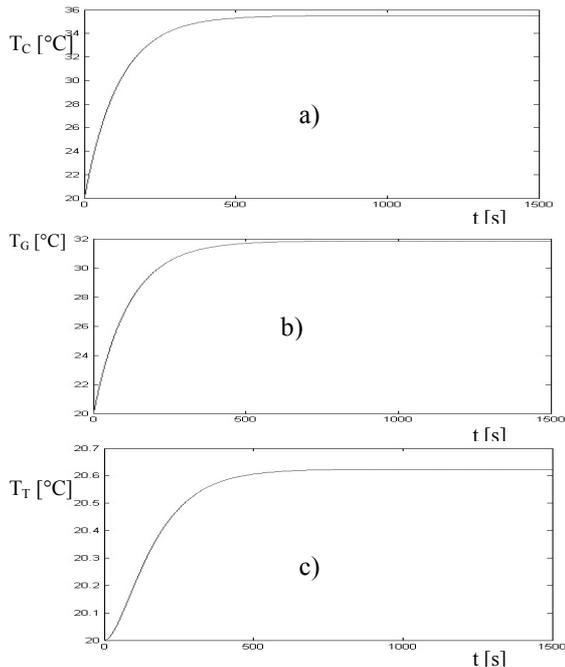


Figura 5 – Conduttura di tipo A. Andamento della temperatura:
a) del conduttore, b) dell’isolante, c) della tubazione

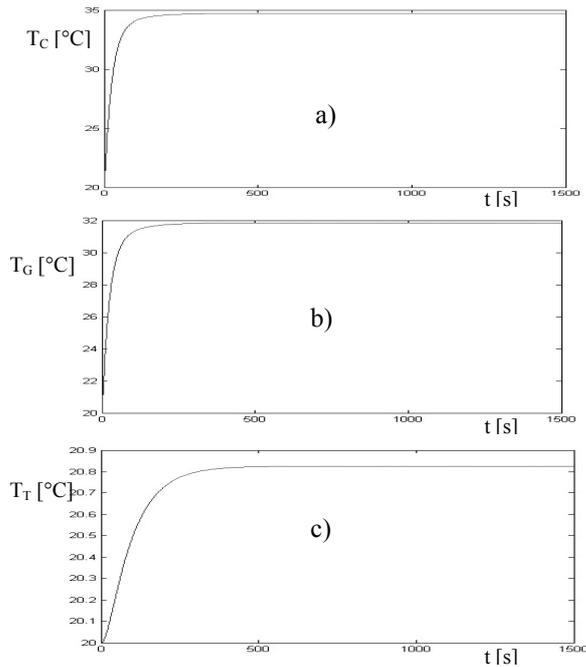


Figura 6 – Conduttura di tipo B. Andamento della temperatura:
a) del conduttore, b) dell’isolante, c) della tubazione

6.1. SENSIBILITÀ DEL MODELLO ALLA VARIAZIONE DEI PARAMETRI DI SIMULAZIONE

In considerazione delle finalità applicative dello studio e tenuto conto delle incertezze su alcuni dei parametri caratteristici utilizzati, è sembrato opportuno indagare la sensibilità del modello alla variazione:

- della resistenza di contatto fra cavo e tubazione;
- dell’emissività del materiale isolante.

6.1.1 VARIAZIONE DELLA RESISTENZA DI CONTATTO R_{CT}

La resistenza di contatto R_{CT} varia al modificarsi di tre ulteriori parametri (riferiti a ciascun cavo):

- il rapporto fra la superficie libera \bar{A}_l e la superficie esterna totale A_e ;
- il rapporto fra la superficie di effettivo contatto A_e e la superficie di contatto teorica A ;
- la rugosità ξ del materiale isolante.

Al variare dei parametri indicati, rispetto ai valori ragionevolmente presunti utilizzati nelle simulazioni, è stata condotta un’analisi della risposta del modello implementato.

Con specifico riferimento alla conduttura di tipo A (cavo da 10 mm²), nelle figure 7, 8 e 9 si riportano gli andamenti delle temperature dell’anima del conduttore e dell’isolante in funzione dei valori assunti dai parametri di simulazione all’interno di intervalli di ragionevole variazione. Per gli stessi parametri, la tabella 5 indica i valori presunti utilizzati come valori principali nelle simulazioni.

Tabella 5 – Valori principali dei parametri di simulazione per la conduttura di tipo A

Parametro	Simbolo	Valore utilizzato
Rapporto fra la superficie di contatto teorica e la superficie laterale totale	\bar{A}_l / A_l	0.999
Rapporto % fra la superficie di effettivo contatto e la superficie di contatto teorica	A_e / A	0.25
Rugosità del materiale isolante (PVC)	ξ	4 μm
Emissività del PVC	ϵ	0.5

Gli andamenti riportati nelle figure che seguono sono stati ottenuti facendo variare singolarmente ciascuno dei parametri considerati e mantenendo costanti gli altri.

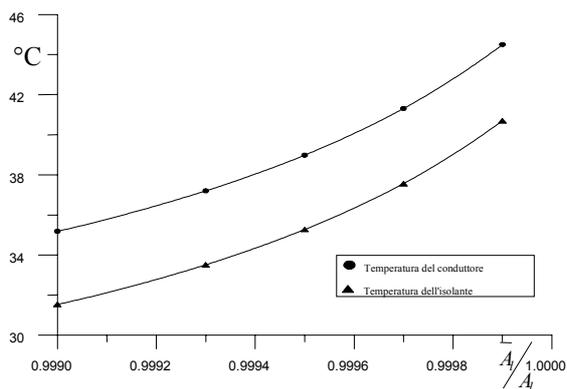


Figura 7- Variazione delle temperature in funzione del rapporto \bar{A}_1/A_2 (per condutture di tipo A)

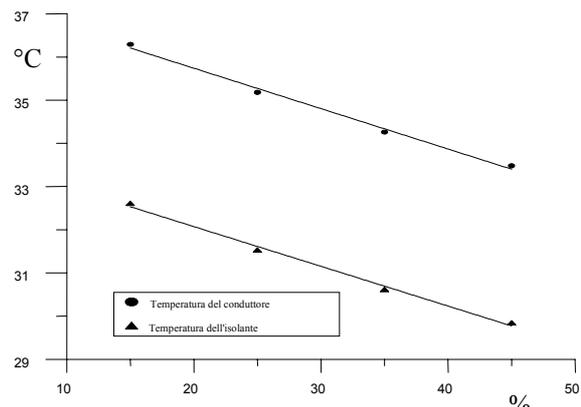


Figura 8- Variazione delle temperature in funzione del rapporto A_0/A (per condutture di tipo A)

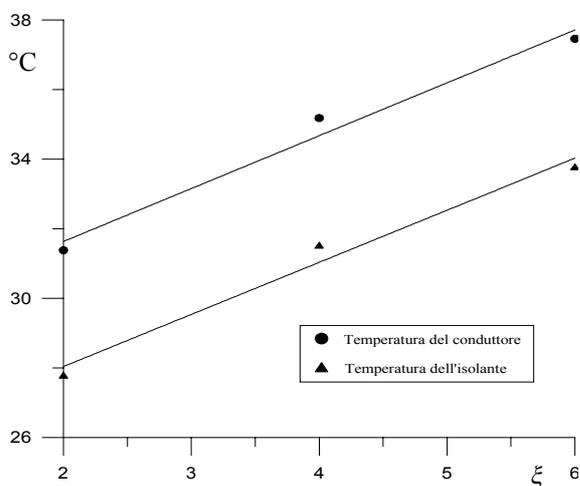


Figura 9 - Variazione delle temperature in funzione della rugosità ξ (per condutture di tipo A)

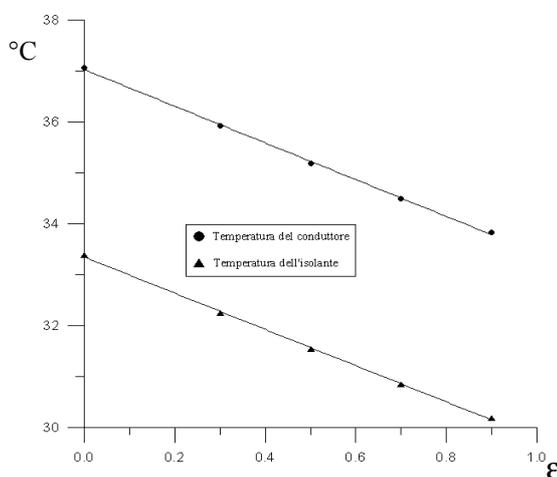


Figura 10 - Variazione delle temperature in funzione dell'emissività ϵ (per condutture di tipo A)

Come mostra la figura 7, al tendere ad uno del rapporto \bar{A}_1/A_2 (situazione limite per la quale si perde il contatto del cavo con la tubazione), le temperature calcolate dal simulatore aumentano. Le variazioni massime di temperatura riscontrate, come si rileva anche dalle figure 8 e 9, sono dell'ordine del 10%.

6.1.2 VARIAZIONE DELLA EMISSIVITÀ DELL'ISOLANTE

La variazione dell'emissività dell'isolante del cavo influisce sullo scambio termico per irraggiamento fra la tubazione e l'isolante stesso. La figura 10 mostra come variano le temperature in uscita per valori coefficiente di emissività ϵ variabili tra 0 e 1.

L'analisi degli andamenti riportati pone in chiara evidenza l'influenza dello scambio termico per irraggiamento, trascurando il quale (che equivale ad assumere per ϵ il valore nullo) la temperatura del conduttore subisce un significativo innalzamento.

6.2 CURVE DI SOVRACCARICABILITÀ

Per una conduttura in cavo, il luogo dei punti (I, t) corrispondenti ad una sollecitazione termica pari ad un valore limite convenzionalmente fissato (come soglia di tollerabilità e quindi di ritenzione del rischio relativo) individua nel piano corrente-tempo la cosiddetta curva di sovraccaricabilità della conduttura.

Utilizzando il modello termico implementato e per i due casi studio presi in esame (condutture di tipo A e di tipo B), sono state ricavate le curve di sovraccaricabilità ottenibili secondo due diversi approcci:

1. fissando la perdita di vita del cavo tollerabile per ogni evento di sovracorrente, in coerenza con i criteri di base dai quali discendono le condizioni di verifica prescritte dalle norme CENELEC/IEC;

2. fissando la temperatura massima del cavo, secondo la logica delle raccomandazioni ANSI/IEEE.

Più in particolare, con riferimento al primo approccio, per rappresentare l'invecchiamento dei cavi è stato assunto il modello di Arrhenius ed è stata fissata una perdita di vita dello 0,1 % della durata di vita convenzionale.

Le curve ricavate seguendo il secondo approccio, invece, si riferiscono ad una temperatura di emergenza fissata (per isolamento in PVC) in 90 °C.

Per tener conto della già evidenziata sensibilità del modello alla variazione di alcuni parametri termici e geometrici, è sembrato opportuno ricavare anche le curve di sovraccaricabilità estreme, ovvero quelle riferite alle condizioni estreme (migliori e peggiori) di scambio termico. In tabella 6 sono indicati i valori dei parametri utilizzati per la costruzione, nei diversi casi simulati, delle curve minime, intermedie e massime.

Tabella 6 – Valori dei parametri utilizzati nelle simulazioni

Parametro	Valore assunto per la curva minima	Valore assunto per la curva intermedia	Valore assunto per la curva massima
\bar{A}_l / A_l	0.9999	0.999	0.995
A_e / A	0.15	0.25	0.45
ξ	6 μ m	4 μ m	2 μ m
ε	0.3	0.5	0.9

Assumendo per gli altri parametri di simulazione i valori riportati in appendice A2, per entrambi gli approcci sopra indicati, sono state ricavate le curve di sovraccaricabilità i cui andamenti sono mostrati nelle figure 11 e 12, per condutture di tipo A, e nelle figure 13 e 14 per le condutture di tipo B.

Tutti gli andamenti evidenziano come le curve massime, intermedie e minime tendano per tempi piccoli a sovrapporsi. Ciò è dovuto al fatto che, al diminuire dei tempi, il sistema tende a divenire adiabatico e perde, quindi, sensibilità rispetto ai parametri caratteristici delle condizioni di scambio termico.

6.3 SINTESI DEI RISULTATI

Le curve di sovraccaricabilità sopra riportate sono state confrontate con le curve di intervento tempo-corrente di tipici dispositivi automatici di interruzione utilizzati per la protezione di condutture in bassa tensione. Più in particolare, il confronto è stato effettuato con le caratteristiche di intervento di interruttori magnetotermici di diverse case costruttrici, tra quelli commercialmente disponibili, aventi:

- $I_n = 40$ A per le condutture di tipo A;
- $I_n = 16$ A per le condutture di tipo B.

In entrambi i casi, naturalmente, risultano verificate le condizioni di verifica prescritte dalle norme per la protezione dalle sovracorrenti.

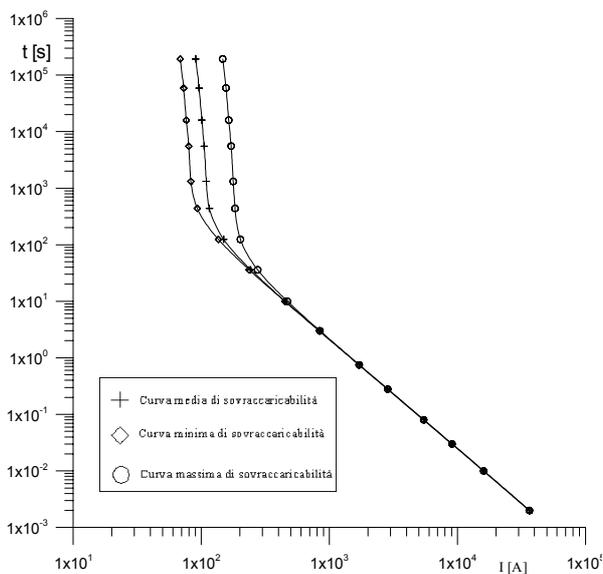


Figura 11- Curve di sovraccaricabilità a perdita di vita fissata (0,1%) per condutture di tipo A.

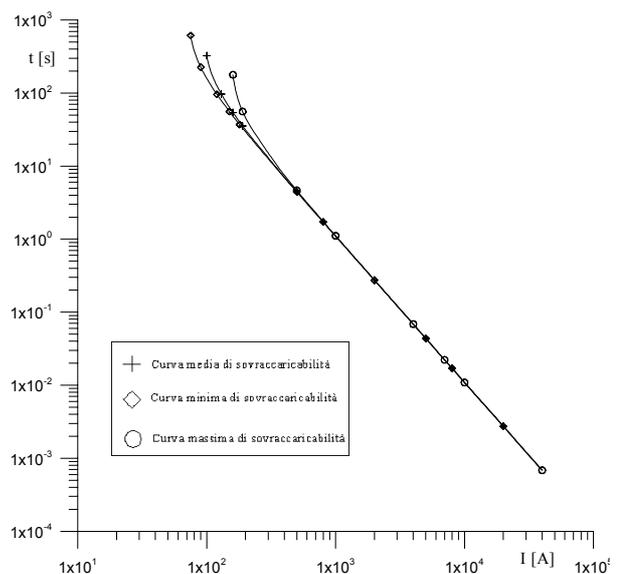


Figura 12 - Curve di sovraccaricabilità a temperatura di carico di emergenza di 90°C per condutture di tipo A .

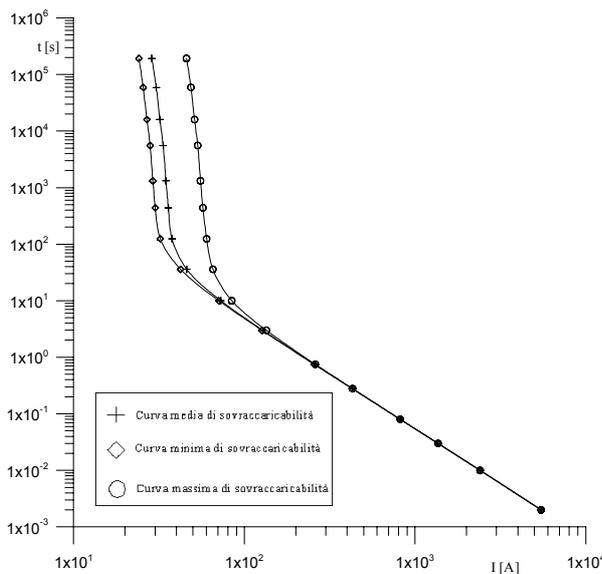


Figura 13 - Curve di sovraccaricabilità a perdita di vita fissata (0,1%) per condutture di tipo B.

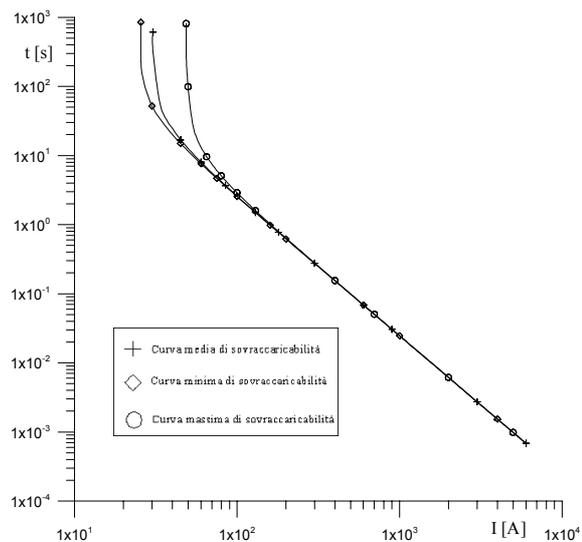


Figura 14 - Curve di sovraccaricabilità a temperatura di carico di emergenza di 90°C per condutture di tipo B.

I risultati dell'analisi comparativa condotta possono essere sintetizzati nei seguenti punti:

- nel piano tempo-corrente tutte le curve di sovraccaricabilità ricavate per entrambe le condutture tipo (A e B) stanno sempre al di sopra (nel campo dei sovraccarichi) delle caratteristiche di sicuro non intervento dei rispettivi dispositivi di protezione;
- il risultato precedente può essere esteso anche alle caratteristiche di sicuro intervento solo per le condutture di tipo A;
- per le condutture di tipo B, invece, le caratteristiche di sicuro intervento di alcuni costruttori intersecano le curve di sovraccaricabilità e assumono valori più elevati rispetto ad esse per ampi intervalli di corrente che precedono il valore di sgancio magnetico. In tale zona, pertanto, si potrebbero verificare eventi di sovracorrente associati a perdite di vita dei cavi superiori a quella convenzionale e temperature più elevate rispetto a quella di carico d'emergenza.

Sovrapponendo, infine, le curve di sovraccaricabilità ricavate per la stessa conduttura con i due diversi criteri illustrati nel lavoro, ovvero le curve riportate nelle figure 11 e 12 per condutture di tipo A e quelle riportate nelle figure 13 e 14 per le condutture di tipo B, si evidenzia che:

- per piccoli sovraccarichi le curve a perdita di vita costante sono generalmente meno restrittive (cioè più alte); all'aumentare della corrente gli andamenti si presentano approssimativamente coincidenti;
- le curve di sovraccaricabilità a temperatura di carico d'emergenza costante, ottenibili attraverso la (2) con le costanti di tempo termiche indicate nella tabella 2, sono nettamente meno restrittive rispetto a quelle ricavate attraverso le simulazioni. Ciò è dovuto al fatto che le condutture tipo indagate presentano costanti di tempo termiche più basse rispetto a quelle riportate nella già citata tabella.

7. CONCLUSIONI

Per condutture elettriche tipicamente utilizzate nel settore civile per gli impianti di distribuzione interni è stato condotto uno studio sulla problematica termica correlata alla circolazione di sovracorrenti. I risultati dello studio, per il quale ci si è avvalsi di un modello termico appositamente definito ed implementato, confermano la generale efficacia dei sistemi di protezione più diffusamente adottati, basati sull'impiego di interruttori magnetotermici coordinati con i cavi in accordo con le prescrizioni normative. Tuttavia, in alcune situazioni (in particolare quando la corrente nominale del dispositivo di protezione è molto vicina alla portata della conduttura) potrebbe essere opportuna l'adozione di più attente valutazioni da parte del progettista al fine di conseguire livelli di sicurezza superiori.

Infine, dal confronto fra i criteri di protezione propri delle norme CENELEC/IEC e quelli relativi alle raccomandazioni ANSI/IEEE, sembra emergere l'opportunità di indagini e valutazioni più accurate per approfondire in particolare:

- i reali margini di sicurezza (soprattutto per sovracorrenti di una certa entità) associati all'applicazione delle curve di sovraccaricabilità ANSI/IEEE con le costanti di tempo termiche suggerite dalle raccomandazioni stesse;
- la possibilità di rendere più restrittive le condizioni normative europee nella zona dei piccoli sovraccarichi duraturi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] V. Carrescia, *L'elettricità uccide ancora. Incendi di origine elettrica e infortuni da folgorazione in Italia*, TuttoNormel, Febbraio 1997.
- [2] V. Carrescia, G. Corbellini, *Cause elettriche d'incendio*, Giornata di Studio AEI "L'incendio e le installazioni elettriche", Milano, 13-14 Novembre 1985.
- [3] A. Cavaliere, *Impianti elettrici. Rischio incendio ed esplosione*, Edizione E.P.C.
- [4] IEC 364-4-43 "Electrical installations of buildings", ch. 43 "Protection against overcurrents", 1977.
- [5] Recommended Practice ANSI/IEEE Std 242, ch.8 "Conductor Protection", 1986.
- [6] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, *Introduction to Heat Transfer*, 3rd edition, Wiley.
- [7] J.P. Holman, *Heat Transfer*, SI metric edition, Mc Graw Hill.

APPENDICE A1: Lista dei simboli

<i>Simbolo</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Simbolo</i>	<i>Descrizione</i>
R_I	Resistenza termica di un metro di strato isolante	χ_{PVC}	Conduttività termica dell'isolamento
R_C	Resistenza termica di un metro d'aria	χ_a	Conduttività termica dell'aria
R_T	Resistenza termica di un metro di tubazione	d	Densità del rame
R_{CT}	Resistenza termica di contatto	c_p	Calore specifico del rame
R_{Irr}	Resistenza termica eq. di irr. per metro di cavo	α	Coefficiente di temperatura del rame
C	Capacità termica di un metro di conduttore	σ	Costante di Boltzmann
C_{Cal}	Capacità termica del calcestruzzo	ε	Emissività del PVC
T_C	Temperatura dell'anima del cavo	ξ	Rugosità del PVC
T_G	Temperatura esterna dell'isolante	r_c	Raggio della tubazione
T_T	Temperatura della tubazione in PVC	A_l	Area laterale per metro di cavo
T_{Rif}	Temperatura di riferimento del sistema	A	Area di contatto teorica
r_{PVC}	Raggio esterno dell'isolante	A_e	Area di contatto effettiva
r_{CU}	Raggio interno dell'isolante	c_{PCal}	Calore specifico del calcestruzzo
r_C	Raggio interno della tubazione	ρ_{cal}	Densità del calcestruzzo
Q	Flusso termico generato per effetto Joule da un metro di conduttore	ρ	Resistività del rame a 20° C
R	Resistenza elettrica di un metro di conduttore	I_B	Corrente di impiego del circuito
I	Corrente che percorre il conduttore	I_Z	Portata in regime permanente della conduttura
I_n	Corrente nominale del dispositivo di protezione	I_f	Corrente convenzionale d'intervento
I_E	Sovracorrente associata alla durata t	θ_E	Temperatura di carico di emergenza
θ_a	Temperatura ambiente	K_T	Costante di tempo termica del cavo
θ_F	Massima temperatura di cortocircuito	K	Coefficiente dipendente dal materiale conduttore e dal tipo di isolamento
S	Sezione del cavo	ξ_A, ξ_B	Rugosità dei due materiali
A_e	Area di contatto effettiva fra i due corpi	A	Area di contatto teorica
A_v	Area vuota, riempita dal fluido	χ_A, χ_B, χ_f	Conducibilità termiche rispettivamente del corpo A, del corpo B e del fluido
q_{Irr}	Flusso di irr. per metro di conduttore		

APPENDICE A2: Valori numerici utilizzati nelle simulazioni

Valori dei parametri per le condutture di tipo A e B

Simbolo	Valore utilizzato		Unità di misura
	TIPO A	TIPO B	
R_I	0,716	0,880	[K·m/W]
R_C	5,641	5,963	[K·m/W]
R_T	0,061	0,126	[K·m/W]
R_{CT}	4,624	10,042	[K·m/W]
C	34,392	5,158	[J/K·m]
C_{Cal}	1086,833	616,851	[J/K·m]
r_{PVC}	3,8	1,75	[mm]
r_{CU}	1,784	0,69	[mm]
r_C	16	8	[mm]

Valori delle costanti fisiche

Simbolo	Valore utilizzato	Unità di misura
χ_{PVC}	0,168	[W/K·m]
χ_a	0,0406	[W/K·m]
d	8933	[Kg/m ³]
c_p	385	[J/Kg·K]
α	0,0045	[1/K]
σ	5,67·E-08	[W/K ⁴ ·m ²]
ε	0,5	adim.
ξ	4	[μm]
r_c	16	[mm]
A_l	0,0239	[m ²]
A	$A_l/1000$	[m ²]
A_e	$0,25 \cdot A$	[m ²]
c_{PCal}	1100	[J/Kg·K]
ρ_{cal}	1700	[Kg/m ³]
ρ	1,91·E-08	[Ω·m]