

**POLITECNICO DI TORINO**



**Politecnico  
di Torino**

**ALSTOM**

**Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica**

**Definizione del modello termico dei cavi  
di potenza in un veicolo ferroviario**

**Relatori**

**Enrico PONS**

**Riccardo CIGNETTI**

**Candidato**

**Marco MAZZOTTI**

**Marzo 2026**



# Sommario

Il lavoro di tesi è stato svolto in collaborazione con Alstom Ferroviaria S.p.A., e verte sullo studio del comportamento elettrico e termico dei cavi di alta tensione installati nelle motrici ferroviarie.

Il treno ha un'importanza socio-economica estremamente rilevante; secondo i dati ISTAT, nel 2024 il numero di passeggeri totali trasportati ammonta ad oltre 825 milioni di persone, un dato quasi raddoppiato rispetto al 2021 essendo ancora in piena crisi pandemica. Inoltre, sempre nel 2024, i chilometri percorsi dai treni merci ammontano a poco più di 50 milioni, per un totale di circa 34 milioni di tonnellate di merci trasportate.

Per soddisfare le esigenze sociali ed industriali, i treni hanno subito un processo di affinata evoluzione tecnologica, non solo per quanto riguarda la mera meccanica costruttiva ed efficienza, ma anche in relazione al comfort e ai servizi forniti al fruitore. La moltitudine dei servizi ausiliari presenti nelle carrozze convive sinergicamente con il sistema che permette la trazione ferroviaria, rendendo la gestione dell'impianto elettrico del treno un problema complesso.

Il problema affrontato in questo lavoro di tesi si concentra nella possibilità di riduzione della sezione di alcuni cavi posti all'interno di canaline senza variare il carico di potenza, al fine ultimo di diminuire l'ingombro e ricavare ulteriore spazio nei condotti; difatti, data la presenza di molti collegamenti tra gli utilizzatori presenti, le canaline poste, ad esempio, sotto il piano di calpestio o sul tetto della carrozza sono fortemente stipate di cavi di diversa sezione tra loro.

I cavi proposti nell'analisi sono dotati di speciali isolanti rispondenti alle specifiche indicate nella normativa CEI EN 50382, in grado di resistere fino a temperature di 120/150 °C e aventi speciali caratteristiche contro il fuoco e i fumi generati.



# Ringraziamenti

Ringrazio Riccardo Cignetti e Ferdinando Tanino di Alstom Ferroviaria S.p.A. per l'opportunità di tesi e per il loro supporto tecnico durante questi mesi di sviluppo del lavoro.

Ringrazio il professor Enrico Pons per la disponibilità e la chiarezza delle indicazioni teoriche fornite, e per gli spunti necessari all'organizzazione e allo sviluppo del lavoro.



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Stato dell'arte . . . . .	2
1.2	Scopo della tesi . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Analisi del contesto normativo</b>	<b>7</b>
2.1	Norma CEI EN 50343 . . . . .	9
2.2	Norma CEI EN 50382 . . . . .	14
2.3	Norma CEI IEC 60287 . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Modello termico del singolo cavo e risultati delle simulazioni</b>	<b>21</b>
3.1	Modello termico del singolo cavo . . . . .	23
3.2	Software LTspice . . . . .	34
3.3	Premesse alle simulazioni per il singolo cavo . . . . .	39
3.4	Risultati simulazioni per il singolo cavo . . . . .	41
3.5	Analisi di sensitività . . . . .	56
3.6	Modello termico per cavo dotato di guaina . . . . .	62
<b>4</b>	<b>Implementazione resistenza esterna <math>T_4'''</math></b>	<b>66</b>
4.1	Cenni di convezione termica . . . . .	67
4.2	Cenni di irraggiamento termico . . . . .	74
4.3	Modello termico e simulazioni . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Modello termico di cavi multipli e risultati delle simulazioni</b>	<b>86</b>
5.1	Modello termico per installazione di cavi multipli . . . . .	88
5.2	Simulazioni FEMM 4.2 . . . . .	92

5.3	Modifica della resistenza termica $T'_4$ : fattore correttivo $m$ . . . . .	103
5.4	Confronto con metodo di calcolo attraverso $\tau_{th}$ . . . . .	110
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b> . . . . .	<b>112</b>
6.1	Confronto tra norma CEI IEC 60287 e modello termico con $T''_4$ modificata . . . . .	114
6.2	Determinazione coefficiente $m$ e proposta di soluzione . . . . .	116
6.3	Valutazione della riduzione della sezione dei cavi . . . . .	119
6.4	Considerazioni conclusive . . . . .	121
<b>A</b>	<b>Appendice</b> . . . . .	<b>122</b>
A.1	Tabelle delle norme . . . . .	123
A.2	Tabelle risultati aggiuntivi delle simulazioni . . . . .	128
	<b>Elenco delle tabelle</b> . . . . .	<b>130</b>
	<b>Elenco delle figure</b> . . . . .	<b>133</b>
	<b>Bibliografia</b> . . . . .	<b>137</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

Nel documento di tesi si vuole affrontare il problema dello stipamento dei cavi all'interno delle canaline presenti nelle carrozze dei treni, focalizzandosi principalmente su due ambiti strettamente legati fra loro; da una parte è una questione legata essenzialmente allo spazio all'interno delle canaline stesse: la presenza di più cavi che collegano anche diversi utilizzatori, data la moltitudine degli ausiliari presenti, rende molto spesso i condotti "sovraffollati", con la gestione dei collegamenti che può diventare difficoltosa. Legato a questo aspetto, da un punto di vista termico la vicinanza di più cavi caricati ad una certa intensità di corrente può portare a surriscaldamenti, con la conseguente necessità di ridurre la potenza [1].

L'analisi è effettuata soltanto per la trazione in corrente continua. Nella spiegazione delle normative utilizzate a supporto, verranno riportati di conseguenza soltanto gli aspetti principali e i parametri che si riferiscono alla corrente continua; alcune delle norme considerate nello sviluppo del problema di tesi infatti possono essere adoperate anche in un'eventuale approccio in corrente alternata.

## 1.1 Stato dell'arte

La normative di riferimento utilizzate nell'analisi del problema sono la CEI EN 50382 [2] [3] e la CEI EN 50343 [4]. Esse sono normative specifiche per la trazione su rotaia, applicabili sia per installazioni in DC che AC.

In particolare, la normativa CEI EN 50382, divisa in due parti, definisce nella prima parte i livelli di tensione nominale (Tabella 1.1) per i quali un cavo è progettato, e definisce le prove elettriche da effettuare su di esso al fine di verificare alcuni parametri di conformità.

**Tabella 1.1:** Tabella parametri di tensione nominale norma CEI EN 50382

Tensione nominale [V]			
$U_0$	$U$	$U_m$	$V_0$
1800	3000	3600	2700
3600	6000	7200	5400

La Tabella 1.1 riportata corrisponde alla tabella 1 presente nella norma CEI EN 50382, dove:

- $U_0$ : valore efficace tra qualsiasi conduttore isolato e la terra, cioè il rivestimento metallico del cavo o del mezzo circostante;
- $U$ : valore efficace tra due conduttori di fase di un cavo multipolare o di un sistema di cavi unipolari;
- $U_m$ : valore efficace massimo della “tensione più elevata del sistema” per il quale l'apparecchiatura può essere utilizzata;
- $V_0$ : valore di tensione in corrente continua tra qualsiasi conduttore isolato e la terra;

In un sistema in corrente alternata, la tensione nominale del cavo dev'essere almeno uguale alla tensione nominale del sistema per il quale è prevista; in un sistema in corrente continua, invece, i cavi devono avere una tensione massima in rapporto a

$V_0$  non maggiore a 1,5 volte la  $U_0$  del cavo stesso.

Come sarà specificato nel documento, i cavi utilizzati nel caso studio proposto da Alstom Ferroviaria S.p.A. sono cavi privi di guaina e dotati di isolanti speciali con caratteristiche termofisiche aumentate, in grado di resistere fino a temperature di 120/150 °C. Sempre la normativa CEI EN 50382, elenca una serie di sigle e test di conformità per mescole di isolanti in grado di resistere in particolari condizioni operative. Nella fattispecie, gli isolanti utilizzati rispondono alla sigla **EI 111** definita nella norma, aventi le seguenti caratteristiche:

- resistenti a temperature estremamente basse;
- resistenti all'olio.

Questa tipologia di isolamento vale sia per cavi dotati che privi di guaina; i materiali che costituiscono l'isolante devono essere costituiti dei materiali indicati al punto 3.1 presente nella norma (**gomma siliconica reticolata SiR**).

Le caratteristiche costruttive dei cavi considerati sono state dedotte da cataloghi [5] forniti da Alstom Ferroviaria S.p.A.

Un'altra norma di riferimento è la CEI EN 50153 [6], specifica per la trazione ferroviaria e utilizzata nella considerazione dei livelli di tensione.

**Tabella 1.2:** Tabella livelli di tensione CEI EN 50153

Livello di tensione	Tensione nominale	
	$U_n$	
	AC	DC
I	$U \leq 25$	$U \leq 60$
II	$25 < U \leq 50$	$60 < U \leq 120$
III	$50 < U \leq 1000$	$120 < U \leq 1500$
IV	$U > 1000$	$U > 1500$

In Tabella 1.2 i livelli I e II si riferiscono alla bassa tensione (BT), il livello III

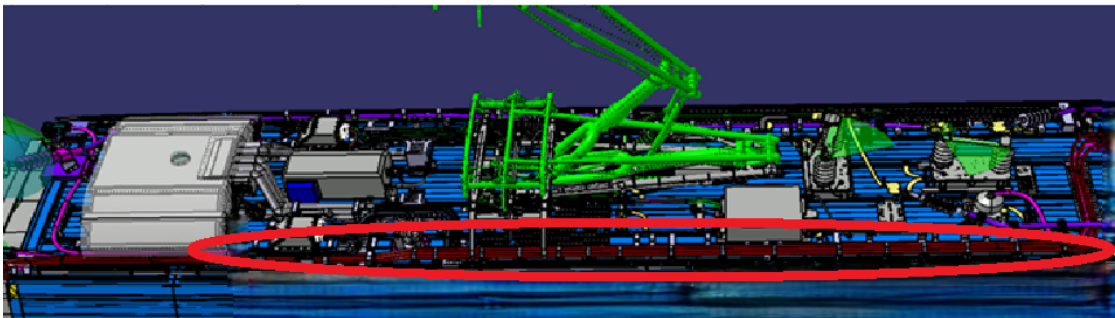
alla media tensione (MT) e il livello IV alla alta tensione (AT). Solitamente, la potenza elettrica necessaria al funzionamento della motrice proviene, tramite il pantografo, da una linea aerea di contatto in AT; i convertitori e i trasformatori presenti sul treno permettono l'ottenimento dei valori di tensione in media e bassa tensione utilizzabili dai servizi elettrici installati nelle carrozze [7].

Per il calcolo delle caratteristiche elettriche dei cavi si è fatto riferimento alla norma CEI EN 50343; lo sviluppo e la giustificazione delle portate di corrente e delle sezioni dei cavi saranno specificate nel corso del documento di tesi.

## 1.2 Scopo della tesi

Alstom Ferroviaria S.p.A. ha fornito le specifiche riguardo il seguente caso studio:

- il collegamento è denominato con la dicitura "*I – IRBOX – (OUTPUT – HVBOX)*", effettuato tramite due cavi alla tensione di **3 kV**;
- ciascun cavo ha una sezione pari a **240 mm<sup>2</sup>**, caricato in corrente continua;
- i cavi sono posti all'interno di una canalina, installata sul tetto del motrice in prossimità del pantografo, come in Figura 1.1;



**Figura 1.1:** Posizione della canalina e cavi del caso studio

- in Figura 1.1 è evidenziato il tratto più sollecitato termicamente, poiché oltre ai due cavi del collegamento sono presenti altri tre cavi: lo studio verte, di conseguenza, nell'analisi del caso peggiore per **5 cavi** di 240 mm<sup>2</sup>;

Alstom Ferroviaria S.p.A. ha fornito anche le correnti specifiche fluenti nei suddetti cavi, riportate in Tabella 1.3.

**Tabella 1.3:** Tabella delle correnti nei cavi

<b>I [Arms] corrente termica in base alla costante di tempo</b>										
t [s]	0,0	10,0	30,0	60,0	300,0	600,0	900,0	1500,0	1800,0	3600,0
Normal Mode	472,1	463,3	461,1	460,4	450,9	392,3	355,3	332,4	281,0	238,3
Degraded1	487,8	481,7	478,5	477,4	473,2	455,7	417,9	393,5	339,8	288,7
Degraded2	486,4	482,8	478,5	476,6	476,1	473,4	462,6	445,8	402,1	340,0
<b>Worst</b>	487,8	482,8	478,5	477,4	476,1	473,4	462,6	445,8	402,1	340,0

La Tabella 1.3 è da interpretare considerando che alla riga  $s$  sono indicati gli intervalli di tempo per i quali i cavi devono sopportare le correnti continue riportate nelle righe inferiori; l'analisi è effettuata tenendo conto della peggiore delle correnti tra le tre modalità, che in generale si possono così definire:

- *Normal Mode*: funzionamento ordinario del treno, che lavora come previsto in fase di progettazione senza guasti;
- *Degraded1* e *Degraded2*: condizioni in cui il treno circola con uno o più guasti, tali da modificare significativamente gli assorbimenti di corrente sui cavi di distribuzione.

Per sopportare si intende che le temperature degli isolanti non devono superare i valori massimi ammissibili (120/150 °C) [2].

L'obiettivo del lavoro di tesi è quello di sviluppare il modello termico dei cavi, al fine di analizzare lo stress termico su di essi a diverse correnti per differenti intervalli di tempo. La valutazione si concentrerà sui parametri termici dei cavi, attraverso lo sviluppo del modello termico di essi, avvelendosi dell'analogia tra mondo elettrico e mondo termico [8]. Il circuito termico dei cavi è dedotto dalle indicazioni della norma CEI IEC 60287 e CEI EN 50343; lo sviluppo del modello termico si concentrerà dapprima sul cavo singolo, valutando anche una modifica [9] [10] dei parametri di resistenza termica definiti dalla CEI IEC 60287. Lo stesso

procedimento sarà eseguito anche nell'analisi del caso studio a 5 cavi; verranno riportati grafici e risultati di temperature dei conduttori e degli isolanti dei cavi tramite l'ausilio di programmi di simulazione.

## Capitolo 2

# Analisi del contesto normativo

Nella stesura di questo testo sono state consultate le seguenti normative CEI EN e IEC:

- **CEI EN 50343:** [4] è stata utilizzata per la corretta scelta dei diversi coefficienti  $k$  relativi alla posa dei cavi, dei quali la norma indica i criteri di scelta per i differenti valori; tali fattori, sono fondamentali per il calcolo della portata del cavo  $I_{corr}$ , della quale la norma indica una procedura di valutazione. Nel documento sono presenti numerose tabelle che guidano alla corretta valutazione dei fattori  $k$  e altre tabelle utili al calcolo della portata;
- **CEI EN 50382:** [2] la norma, suddivisa in due parti, specifica i cavi per ambienti ferroviari con caratteristiche speciali contro il fuoco. Si è usufruito di questa norma al fine di seguire le direttive indicate per i cavi in grado di sopportare temperature per un tempo indefinito fino a 120°C o 150°C. A questa norma rispondono i cavi utilizzati da Alstom Ferroviaria S.p.A. [5] nello studio dei collegamenti tra gli apparecchi installati sulle motrici, considerati nell'analisi effettuata nel documento. Nella norma sono anche presenti i dati relativi alle caratteristiche meccaniche, fisiche, chimiche e altre che i costruttori devono verificare al termine dei test di conformità normativa effettuati sui cavi;

- **IEC 60287:** in questa norma, suddivisa in tre parti ciascuna composta da altre tre sottosezioni, si definiscono nella parte 1 [11] le diverse resistenze termiche associate alle diverse porzioni che compongono un cavo, che esso sia unipolare o multipolare, e le prescrizioni generali al fine di calcolare i fattori di perdita nei cavi e le correnti. Nella parte 2 [12] sono esplicitate le formule delle resistenze termiche definite nella parte 1 della norma, differenziandosi tra le diverse porzioni di cavo a cui fanno riferimento. Le formule sono organizzate anche in modo tale da considerare le diverse condizioni di posa dei cavi o la presenza di uno o più cavi adiacenti tra loro.

La norma in tutte le sue parti e sezioni distingue il caso in cui i cavi siano caricati in corrente alternata o in continua; nel riassunto della normativa, si considereranno gli aspetti legati alla sola corrente continua.

- **altre norme:** nel documento sono citate altre normative CEI EN o IEC dalle quali sono state prese informazioni utili alla giustificazione dei diversi parametri dei modelli termici. Sono state citate: la **CEI EN 50153** [6] nell'identificazione dei vari livelli di tensione; **CEI EN 60288** [13] per specificare le caratteristiche dei conduttori da utilizzare per i cavi in grado di resistere fino a 120/150 °C; **CEI EN 50125** [14][15] essendo la normativa principale in ambito della trazione ferroviaria.

## 2.1 Norma CEI EN 50343

La normativa CEI EN 50343 specifica le prescrizioni per l'installazione di cablaggi all'interno dei veicoli ferroviari e degli armadi elettrici montati sugli stessi. E' valida anche per treni a levitazione magnetica e filobus. Il documento si concentra sui cablaggi utilizzati nelle connessioni elettriche tra le diverse apparecchiature elettriche presenti sui treni, compresi cavi, sbarre, terminali e dispositivi spina/presa. I diversi criteri di selezione dei materiali riportati nella norma si riferiscono a cavi con conduttori in rame. La norma è stata principalmente utilizzata per la selezione del tipo e della taglia dei cavi elettrici utilizzati nello sviluppo del modello. In particolare, si è fatto riferimento a quanto descritto nel capitolo 4 della normativa, in cui sono esplicitate le definizioni di  $I_{load}$ ,  $I_{cable}$  e  $I_{corr}$ .

### Definizione delle correnti

Per  $I_{load}$  si intende la corrente di carico, ovvero la corrente che un cavo deve sopportare per periodi prolungati durante il normale servizio. E' definita con la seguente formula:

$$I_{load} = \sqrt{\frac{1}{t_1} \int i^2 dt} \quad (2.1)$$

- $t_1$  [min]: durata di un tipico ciclo di lavoro durante il servizio;
- $i$  [A]: corrente istantanea, incluso l'eventuale sovraccarico.

La norma [4] definisce  $I_{load} = i$  per il funzionamento continuo a corrente continua.

La corrente  $I_{cable}$  è definita come la portata del cavo a 90°C e differisce in base alle diverse sezioni nominali dei conduttori. I relativi valori di portata e sezione sono riportati in Tabella A.2.

La corrente  $I_{corr}$  è definita come l'effettiva portata del cavo nelle specifiche condizioni di posa, di tipologia del cavo e di installazione. Di seguito l'espressione che la definisce (2.2):

$$I_{corr} = I_{cable} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \quad (2.2)$$

Una volta calcolata la portata  $I_{corr}$ , bisogna verificare che essa sia maggiore della corrente termica  $I_{th}$  del cavo, ovvero quel valore di corrente che si verifica nell'istante

di tempo pari alla costante termica del cavo  $\tau_{th}$ . L'espressione della costante termica è di seguito riportata (2.3):

$$\tau_{th} = 1,8 \cdot (\sqrt{A} - 5) \quad (2.3)$$

dove  $A$  è la sezione in  $\text{mm}^2$  del conduttore. Il significato della costante termica del cavo è quanto tempo è necessario affinché il cavo raggiunga il 63,2 % del suo valore finale di temperatura [16].

## Definizione dei coefficienti $k$

La portata di riferimento del cavo  $I_{cable}$  è definita per una massima temperatura ammissibile dell'isolante pari a  $90^\circ\text{C}$  e una temperatura di riferimento dell'ambiente di  $45^\circ\text{C}$ . Volendo considerare altre condizioni di funzionamento, in relazione anche alla posa, al numero e alla tipologia dei cavi, si definiscono i coefficienti correttivi  $k$ .

Il coefficiente  $k_1$  è il fattore correttivo utilizzato per la temperatura di installazione del cavo rispetto la temperatura di riferimento. L'espressione che lo definisce è la seguente:

$$k_1 = \sqrt{\frac{T_{c,max} - T}{T_{c,max} - T_{ref}}} \quad (2.4)$$

dove:

- $T_{c,max}$  è la massima temperatura ammissibile del conduttore;
- $T$  è la temperatura ambiente stimata nelle condizioni di servizio del cavo;
- $T_{ref}$  è la temperatura di riferimento per la quale è calcolata  $I_{cable}$ ;

Tutte le temperature riportate sono da riferirsi in  $^\circ\text{C}$ . In Tabella A.4 i valori predefiniti di  $k_1$  in base alle diverse temperature ambiente: se  $T = T_{ref}$  allora  $k_1 = 1$ .

Il coefficiente  $k_2$  è il fattore di correzione che si riferisce alle condizioni di installazione dei cavi. Esso tiene conto del numero di cavi e delle diverse disposizioni possibili (posa piana, posa piana su due o più strati, posa in condotto tubolare

etc.). I valori di  $k_2$  sono tabellati in Tabella A.5.

Il coefficiente  $k_3$  è il fattore di correzione che tiene conto di una prevista riduzione della vita utile dei cavi. E' indicato con la seguente formula presente nell'allegato E della norma:

$$k_3(\Delta T) = \sqrt{\frac{(T_{c,\max} + \Delta T - T_{\text{ref}}) \cdot (1 + 0,004 \cdot T_{c,\max})}{(T_{c,\max} - T_{\text{ref}}) \cdot (1 + 0,004 \cdot (T_{c,\max} + \Delta T))}} \quad (2.5)$$

Sono presenti valori tabellati in Tabella A.6.  $k_3 = 1$  qualora non sia prevista una riduzione nella vita utile dei cavi.

Il coefficiente  $k_4$  è il fattore di correzione che considera la corrente di breve durata nel caso in cui il funzionamento non fosse continuativo. Una procedura di calcolo del coefficiente è indicata nell'allegato A presente nella norma. Se il funzionamento è di tipo continuativo,  $k_4=1$ .

Il coefficiente  $k_5$  è il fattore di correzione per i cavi multipolari, ed applicabile ad ogni singolo nucleo all'interno del cavo. Se il cavo è unipolare,  $k_5=1$ , e se sulla medesima passerella sono installati sia cavi unipolari che multipolari, la portata  $I_{corr}$  di ciascun cavo sarà differente in base alla tipologia del cavo stesso. I valori di  $k_5$  sono riportati in Tabella A.1.

## Verifica del valore della portata

La taglia corretta del cavo, ovvero la sezione del conduttore, deve essere scelta in modo tale che la portata  $I_{corr}$  del cavo e la corrente  $I_{load}$  siano legate dalla seguente relazione:

$$I_{corr} \geq I_{load} \quad (2.6)$$

Riferendosi alle formule 2.2 e 2.6, si ottiene:

$$I_{cable} \geq \frac{I_{load}}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5} \quad (2.7)$$

Note a priori le condizioni di carico del cavo, in altri termini conoscendo  $I_{load}$ , si può dunque calcolare  $I_{cable}$  e selezionare la taglia del cavo; successivamente, avendo stabilito i valori dei coefficienti  $k$  sulla base dell'applicazione, si può stimare  $I_{corr}$  (2.2).

In alternativa, si può valutare la portata anche con il processo inverso, cioè partendo dalla taglia nota del cavo, associare alla sezione la relativa  $I_{cable}$  dalla Tabella A.2 e calcolare la portata  $I_{corr}$  secondo l'equazione 2.2. Infine, bisogna soltanto verificare che  $I_{corr} \geq I_{load}$  (2.6).

## Coefficiente $k^*$

Nell'allegato C presente nella norma, è riportata la formula per calcolo del coefficiente  $k^*$  (2.8), definito come il fattore correttivo che tiene conto di temperature massime ammissibili di isolanti di classe diversa da 90°C.

$$k^* = \sqrt{\frac{(T_{c,max}^* - T_{ref}^{45})(1 + 0.004 \cdot T_{c,max}^{90})}{(T_{c,max}^{90} - T_{ref}^{45})(1 + 0.004 \cdot T_{c,max}^*)}} \quad (2.8)$$

dove:

- $T_{c,max}^*$  è la nuova classe di temperatura da calcolare;
- $T_{ref}^{45}$  è la temperatura ambiente di riferimento;
- $T_{c,max}^{90}$  è la temperatura di riferimento per la classe di conduttori considerata.

La formula è da utilizzarsi usando valori delle temperature in [K]. In Tabella A.3 sono riportati i valori di  $k^*$  per alcune classi di isolanti a temperature note.

Il valore di  $k^*$  è da moltiplicarsi a  $I_{cable}$  e di conseguenza la formula 2.2 si modifica come di seguito:

$$I_{corr} = I_{cable} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k^* \quad (2.9)$$

Analogamente, anche la 2.7 subisce una variazione:

$$I_{cable} \geq \frac{I_{load}}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k^*} \quad (2.10)$$

## 2.2 Norma CEI EN 50382

La normativa è suddivisa in due parti, ove la prima sezione indica le prescrizioni generali applicabili ai cavi descritti nella seconda sezione. In particolare per la CEI EN 50382-2 ci si è riferiti nello sviluppo del modello di cavi unipolari **privi di guaina** isolati in gomma siliconica, aventi le seguenti caratteristiche:

- sia per cavi in grado di funzionare fino a 120 che 150 °C, i conduttori devono essere in rame stagnato ricotto di classe 5 o 6 [13];
- gli isolanti rispondono alla dicitura **EI 111** [2] come già indicato in precedenza nel documento;
- i cavi sono privi di guaina, realizzati per tensioni nominali di **3,6/6 kV** [3];

La norma descrive una serie di cavi con relative sigle che indicano la presenza della guaina, se i cavi sono in grado di resistere a basse o a bassissime temperature e se sono resistenti all'olio. I cavi scelti nello sviluppo del modello sono in grado di resistere a **bassissime temperature** e all'**olio**.

La norma comprende, sia nella prima che nella seconda parte, definizioni valide in generale e inoltre sono anche riportate le tabelle riguardo caratteristiche meccaniche ed elettriche che i cavi devono rispettare nei test di conformità: tali prescrizioni non verranno approfondite nell'elaborato di tesi.

Ulteriori informazioni riguardo la normativa sono già state riportate nella sezione 1.1 del documento.

## 2.3 Norma CEI IEC 60287

La norma IEC 60287 è organizzata in tre parti, ciascuna delle quali è a sua volta suddivisa in altrettante sottosezioni. La norma è applicabile alle condizioni di funzionamento stazionario di cavi a tutte le tensioni alternate e continue fino a **5 kV**, in una qualsiasi condizione di posa interrata, in canalina o condotto, o in aria libera. Per *funzionamento stazionario* si intende la condizione in cui la corrente circolante nei cablaggi è continua costante, al 100% del suo fattore di carico.

Nello sviluppo del modello riportato nella tesi, si è usufruito principalmente della parte 1, sezione 1 [11] e della parte 2, sezione 1 [12] della CEI IEC 60287, che a scopo semplificativo verranno indicate nel documento rispettivamente come CEI IEC 60287-1-1 e CEI IEC 60287-2-1.

### CEI IEC 60287-1-1

La norma CEI IEC 60287-1-1 fornisce le formule per il calcolo dei valori di corrente nominale e delle perdite nel cavo. Distingue i casi in cui la corrente sia alternata o continua, sia nel calcolo della corrente nominale che nel calcolo delle perdite. Il caso studio prevede cavi caricati in corrente continua; di conseguenza, si è deciso di non considerare i capitoli della norma relativi alle correnti alternate, così come di non valutare effetti tipici dei cavi in AC come effetto pelle ed effetto prossimità. Inoltre, come sarà esplicitato più approfonditamente nei prossimi capitoli del documento, non si considerano gli effetti delle perdite dielettriche essendo fenomeni classici delle correnti alternate e dipendenti dalla frequenza. Infine, non si è proceduto al calcolo delle correnti di circolazione e parassite nello schermo e nella guaina metallica, poiché non sono applicabili alle correnti continue e inoltre perché i cavi che saranno utilizzati nello sviluppo del modello termico ed elettrico sono provvisti soltanto di conduttore al quale è avvolto soltanto l'isolante esterno.

Di seguito le principali formule e i parametri fondamentali dei materiali utilizzati nello sviluppo del modello che sono stati recepiti dalla norma CEI IEC 60287-1-1.

- Formula della *resistenza in DC* dipendente dalla temperatura del conduttore

rispetto ad una temperatura di riferimento di 20°C:

$$R_{dc} = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\theta - 20)] \quad (2.11)$$

con  $R_{20}$  resistenza del conduttore a 20°C,  $\alpha_{20}$  coefficiente termico del materiale del conduttore e  $\theta$  temperatura del conduttore in °C;

- I valori di **resistività** e **coefficiente termico** del rame utilizzati nel calcolo delle resistenze termiche (Tabella 2.1):

**Tabella 2.1:** Coefficienti rame

<b>materiale</b>	$\rho$ a 20°C [ $\Omega \cdot m$ ]	$\alpha_{20}$ a 20°C [ $K^{-1}$ ]
<i>rame</i>	$1,7241 \cdot 10^{-8}$	$3,93 \cdot 10^{-3}$

All'interno della norma sono inoltre definite le **resistenze termiche** utili al calcolo della corrente nominale del cavo, sia in AC che in DC; tali resistenze sono state utilizzate nello sviluppo del modello termico equivalente del cavo utilizzato nel caso studio. Le resistenze termiche sono di seguito definite:

- $T_1$ : resistenza termica tra conduttore e guaina;
- $T_2$ : resistenza termica tra guaina e armatura;
- $T_3$ : resistenza termica dell'isolante esterno;
- $T_4$ : resistenza termica esterna al cavo (dell'ambiente circostante).

Tutte le resistenze termiche sono associate all'unità di misura  $[\frac{K \cdot m}{W}]$ .

## CEI IEC 60287-2-1

All'interno di questa parte della norma CEI IEC 60287, sono indicate le formule per il calcolo delle resistenze termiche. Non esistono equazioni univoche per tali resistenze, ma per ogni tipologia di cavo e condizione di posa sono previste precise formulazioni. Al fine di ricondursi al caso reale di cablaggi in alta tensione su locomotiva a trazione elettrica, si sono considerate le formule relative a cavi unipolari posati in canalina metallica chiusa esposta all'aria libera. Si riportano le relative equazioni.

- Resistenza termica  $T_1$  tra conduttore e guaina metallica

$$T_1 = \frac{\rho_1}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_1}{d_c}\right) \cdot \frac{1}{C_{LL}} \quad (2.12)$$

- $\rho_1$  resistività del materiale isolante [ $\frac{K \cdot m}{W}$ ];
- $t_1$  spessore dello strato isolante [ $mm$ ];
- $d_c$  diametro del conduttore [ $mm$ ];
- $C_{LL}$  fattore di correzione che considera la posa dei nuclei. Una formula è riportata nell'allegato A della norma e di seguito trascritta:

$$C_{LL} = \sqrt{1 + \left[\frac{\pi \cdot C_{fl} \cdot D_p^*}{L_L^*}\right]} \quad (2.13)$$

con  $C_{fl}$  fattore che tiene conto del numero di nuclei caricati, i cui valori sono riportati in Tabella A.7:  $D_p^*$  è il diametro del singolo nucleo [ $m$ ] e  $L_L^*$  è la lunghezza assiale del cavo su cui i nuclei compiono un giro elicoidale completo [ $m$ ]. Per cavi unipolari questo valore è da considerarsi pari a 1.

- Resistenza termica  $T_2$  tra guaina e armatura

$$T_2 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_2}{D_s}\right) \quad (2.14)$$

- $t_2$ , spessore dell'armatura [ $mm$ ];
- $D_s$ , diametro esterno della guaina [ $mm$ ].

- Resistenza termica  $T_3$  dell'isolante esterno

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_3}{D'_a}\right) \quad (2.15)$$

- $t_3$ , spessore dell'isolante esterno [mm];
- $D'_a$ , diametro esterno dell'armatura [mm].

L'analisi sulla resistenza termica esterna  $T_4$  è da effettuarsi tenendo conto di alcune considerazioni preliminari. La normativa non indica una formula specifica per cavi installati in canaline o condotti, ma prevede che tale resistenza sia la somma del contributo di tre sotto resistenze:

$$T_4 = T'_4 + T''_4 + T'''_4 \quad (2.16)$$

Tali resistenze sono così definite:

- $T'_4$ : è la resistenza termica del mezzo (aria) interposto tra la superficie esterna del cavo e la superficie interna del condotto;

$$T'_4 = \frac{U}{1 + 0,1 \cdot (V + Y\theta_m)D_e} \quad (2.17)$$

con:

- $U$ ,  $V$  e  $Y$  valori costanti dipendenti dall'installazione e riportati nella Tabella A.8 (nella norma IEC 60287-2-1 è la Tabella 5);
- $\theta_m$  temperatura media [°C] dello spazio compreso tra la superficie esterna del cavo e la parete interna della canalina;
- $D_e$  diametro esterno del cavo [mm].

- $T''_4$ : è la resistenza termica del condotto stesso:

$$T''_4 = \frac{1}{2\pi} \rho_T \ln\left(\frac{D_0}{D_d}\right) \quad (2.18)$$

con:

- $D_0$  diametro esterno del condotto/canalina [mm];

-  $D_d$  diametro interno del condotto/canalina [mm];

-  $\rho_T$  resistività termica del materiale del condotto [ $\frac{K \cdot m}{W}$ ], i cui valori a seconda del materiale sono riportati nella Tabella 1 della normativa IEC 60287-2-1.

La norma prevede che per le canaline metalliche questa resistenza termica possa essere trascurata, e di fatto si procederà senza inserirla nel modello termico.

- $T_4'''$ : è la resistenza termica esterna al condotto. La normativa non definisce un'equazione valida in generale per le canaline, ma indica di riferirsi alle formule di  $T_4$  esistenti per le altre condizioni di posa (in aria, interrata etc.) e sostituire al diametro del cavo  $D_e^*$  il diametro/dimensione di riferimento del condotto. Nello sviluppo del modello, si è deciso di ricondursi al caso di canalina posata in aria libera, del quale si riporta di seguito la relativa formula (2.19):

$$T_4''' = \frac{1}{\pi D_e^* h (\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}} \quad (2.19)$$

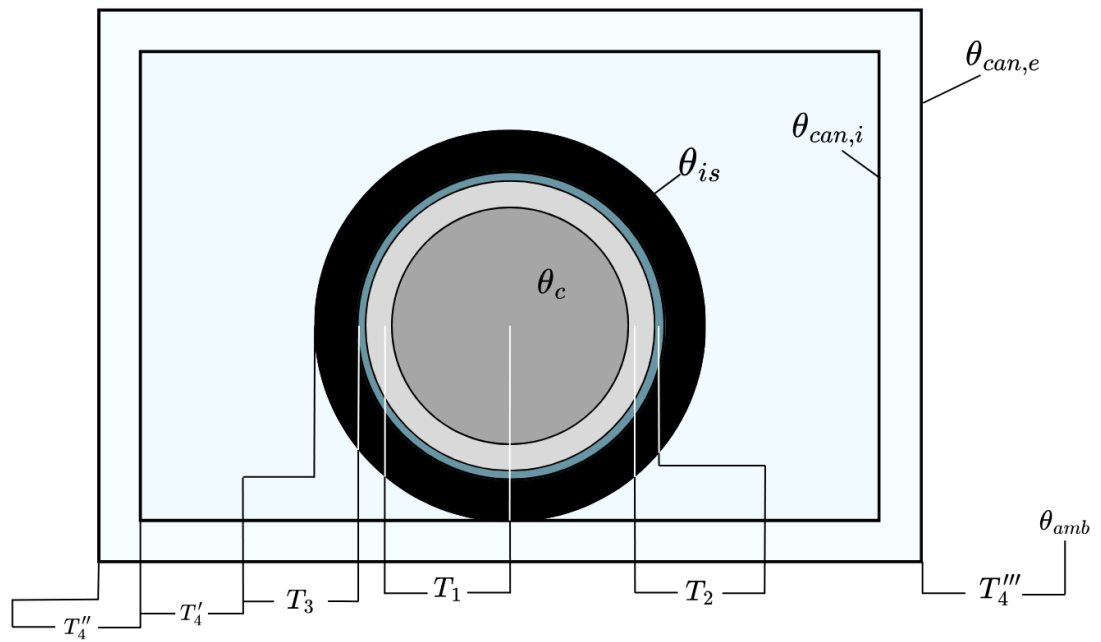
con:

$$h = \frac{Z}{(D_e^*)^{C_g}} + E \quad (2.20)$$

-  $h$ : coefficiente di scambio termico [ $\frac{W}{m^2} (K)^{\frac{5}{4}}$ ], utilizzando i corretti valori delle costanti  $Z$ ,  $E$  e  $C_g$  forniti in Tabella A.9;

-  $\Delta\theta_s$ : incremento di temperatura della superficie del cavo rispetto la temperatura ambiente [ $K$ ]. Nella norma si riporta sia un metodo iterativo per il suo calcolo, sia un procedimento per poter scegliere il dato in maniera grafica. Nei capitoli successivi, verrà giustificata nel dettaglio la scelta del parametro  $(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}$  secondo il metodo grafico.

Si riporta in Figura 2.1 la rappresentazione grafica delle resistenze termiche e delle temperature di riferimento delle formule. Il contorno rettangolare rappresenta una generica canalina chiusa, non rappresentativa nella sua geometria di quella considerata nel caso studio.



**Figura 2.1:** Spaccato in sezione del cavo CEI IEC 60287

## Capitolo 3

# Modello termico del singolo cavo e risultati delle simulazioni

Come studio preliminare al caso di 5 cavi di eguali dimensioni si vuole costruire il modello termico dapprima considerando un singolo cavo. Nelle sezioni di questo capitolo sono specificate le principali caratteristiche costruttive del cavo in esame, giustificandone i criteri di scelta sulla base delle normative analizzate in precedenza nel documento. Il software di supporto utilizzato nello sviluppo del circuito è **LTspice**, il quale è importante precisare che non consente di restituire risultati con unità di misura proprie del mondo termico, ma nella coerenza dei dati immessi rispetta le corrispondenze di tensione/temperatura, corrente/potenza e resistenza elettrica/resistenza termica [8].

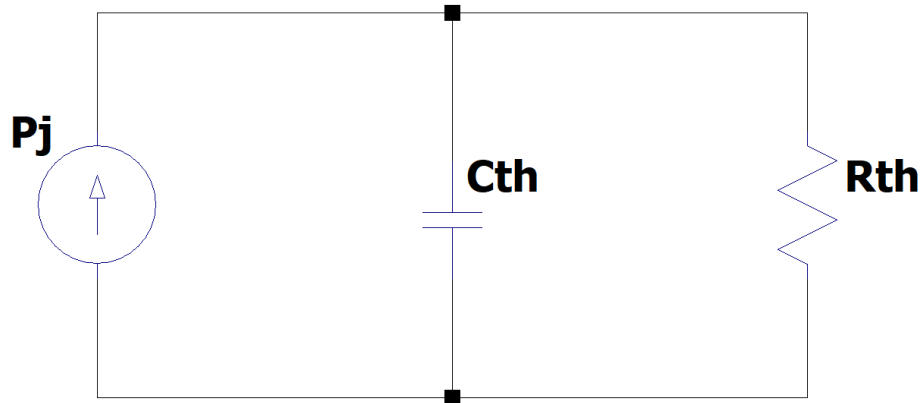
Le simulazioni valutano il comportamento termico del cavo alla sua portata e alle correnti in (Tabella 1.3), effettuando una riduzione della sezione del cavo e osservando l'eventuale violazione dei limiti termici.

L'analisi e le simulazioni sui modelli termici proposti saranno implementate considerando un cavo privo di guaina, come rappresentato in Figura 3.5); è proposto, a titolo di esempio, il modello termico secondo la norma CEI IEC 60287 per un cavo dotato di guaina, rispondente alle caratteristiche **EM 106** riportate nella norma

CEI EN 50382 [2], in grado di resistere fino ad una temperatura di 120 °C. Le caratteristiche del cavo sono dedotte dal catalogo [5].

### 3.1 Modello termico del singolo cavo

Il circuito termico generico di riferimento di un cavo è riportato in Figura 3.1.



**Figura 3.1:** Modello termico generico del cavo

Il generatore di corrente ideale modella le **perdite per effetto Joule** generate nel passaggio di corrente all'interno del conduttore del cavo, e sono calcolate attraverso la seguente espressione:

$$P_j = \rho \frac{l}{S} \cdot I^2 \quad (3.1)$$

- $\rho$ : resistività del materiale conduttore;
- $l$ : lunghezza del cavo considerata (unitaria);
- $S$ : sezione del conduttore;

$R_{th}$  indica la resistenza termica del cavo e in generale la si indica con la seguente equazione [7]:

$$R_{th} = \frac{\Delta\theta}{P_j} = \frac{\Delta\theta \cdot S}{\rho \cdot I^2} \quad (3.2)$$

dove  $\Delta\theta$  indica la differenza di temperatura ai capi della resistenza termica.

Si definisce la costante termica del circuito  $\tau$  come

$$\tau = R_{th} \cdot C_{th} \quad (3.3)$$

nella quale  $C_{th}$  è la capacità termica del cavo.

In Tabella 3.1 [8] si riassumono le corrispondenze termiche ed elettriche.

**Tabella 3.1:** Analogia termico/elettrica

<b>Mondo elettrico</b>	<b>Mondo termico</b>	<b>Componente circuitale</b>
Differenza di potenziale $\Delta V$	Differenza di temperatura $\Delta\theta$	Generatore ideale di tensione
Intensità di corrente $I$	Potenza termica (Joule) $W$	Generatore ideale di corrente
Resistenza elettrica $\Omega$	Resistenza termica $\frac{K}{W}$	Resistore
Capacità elettrica $F$	Capacità termica $\frac{J}{K}$	Condensatore

La soluzione del circuito è dunque ottenuta seguendo le classiche regole dell'elettrotecnica. Ad esempio, volendo calcolare l'andamento della differenza di temperatura ai capi della resistenza termica  $R_{th}$ , considerando la costante termica  $\tau$  del circuito la formula è la seguente:

$$\Delta\theta = R_{th} \cdot P_j \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = R_{th} \cdot \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot I^2 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.4)$$

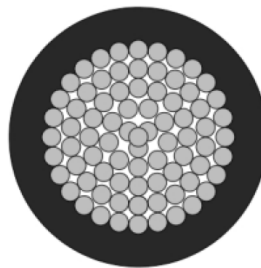
## Modello termico del cavo secondo la norma CEI IEC 60287

Si riportano nella Tabella 3.2 le principali caratteristiche costruttive e dimensionali del cavo considerato nello studio di tesi. I dati sono stati acquisiti dal catalogo del cavo [5], dalla norma CEI EN 50343 [4], dalla CEI EN 50382 [2][3], dalla CEI IEC 60287 [11][12] e dalla CEI EN IEC 60288 [13].

**Tabella 3.2:** Caratteristiche costruttive del cavo

Costruttore	<b>SIECHEM</b>
Tensione di riferimento	<b>3,6/6 kV</b>
Sezione conduttore	<b>240 mm<sup>2</sup></b>
Temperatura di riferimento	<b>45°C</b>
Resistenza conduttore a 20°C	<b>0,0817 <math>\frac{\Omega}{km}</math></b>
Coefficiente termico $\alpha$	<b>0,00393 K<sup>-1</sup></b>
Lunghezza	<b>unitaria</b>
Diametro minimo/massimo cavo	<b>25.4/29.8 mm</b>
Spessore rivestimento esterno	<b>3.4 mm</b>
Temperatura massima isolante	<b>150°C</b>
Tipologia isolante	<b>EI 111</b>
Costante termica cavo	<b>1133.13 s</b>

La Figura 3.2 rappresenta lo spaccato in sezione del cavo, nel quale si può notare che il cavo è privo di guaina e di armatura, ma dotato soltanto di isolante esterno direttamente applicato al conduttore.



**Figura 3.2:** Spaccato sezione del cavo

Si riassumono brevemente le ipotesi semplificative attuabili sul cavo [11] [12]:

- essendo il cavo in DC, si possono escludere i fenomeni elettromagnetici di effetto pelle ed effetto prossimità, che le norme in questione considerano con appositi coefficienti di calcolo;
- non si considerano le perdite dielettriche poiché fenomeni tipici delle correnti AC ed espressamente citate nella norma per correnti alternate;
- non vengono presi in considerazione i fattori di perdita per correnti di circolazione  $\lambda_1'$  e correnti parassite (eddy currents)  $\lambda_1''$ , poiché andrebbero a distribuirsi nello schermo e nell'armatura metallica ( $\lambda_2$ ) delle quali il cavo è privo;
- per le stesse motivazioni, non sono di conseguenza implementate le resistenze  $T_2$  e  $T_3$  rappresentative rispettivamente della resistenza termica tra conduttore e guaina e della resistenza termica tra guaina e armatura;

Si richiama infine la formula 2.3 presente nella norma CEI EN 50343 [4] in allegato A per il calcolo della costante termica:

$$T = 1,8 \cdot (\sqrt{A} - 5)$$

il cui valore indicato nella Tabella 3.2 è di **1133,13 s** per una sezione pari a  $240 \text{ mm}^2$ .

Essendo dunque il cavo dotato solo di conduttore ed isolante esterno, le resistenze termiche che si possono modellizzare sono la  $T_1$  e la  $T_4$ . Si richiama la formula 2.12 della resistenza termica dell'isolante esterno:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2t_3}{d_c}\right) \cdot \frac{1}{C_{LL}}$$

Il valore  $\rho_T$  di resistività termica è riportato per una vasta gamma di materiali isolanti nella norma CEI IEC 60287-2-1 [12] alla Tabella 1: non è riportato in tale tabella il valore della tipologia di gomma siliconica reticolata EI 111, poiché non presente a livello normativo. Nei capitoli successivi del documento, sarà proposta un'analisi di sensitività impostando all'isolante diversi valori di  $\rho_T$ , osservando il comportamento della temperatura dell'isolante al variare di questo valore.

Si richiama la formula 2.16 per il calcolo della resistenza esterna  $T_4$  ad un tubo/condotto/ canalina chiusa, prevista dalla norma CEI IEC 60287-2-1 [12]:

$$T_4 = T_4' + T_4'' + T_4'''$$

dove:

- $T_4'$  è modellizzata con la formulazione indicata all'equazione 2.17. I parametri costanti  $U$ ,  $V$  e  $Y$  sono scelti sulla base del tipo di canalina (metallica) e si riportano in Tabella 3.3, secondo quanto descritto in Tabella A.8 [12]:

**Tabella 3.3:** Parametri costanti di  $T_4'$  per canalina metallica

U	V	Y
5,2	1,4	0,011

Il valore di temperatura media  $\theta_m$  indica il valor medio della temperatura interna la canalina, calcolato nel caso in esame in due modi dei quale sarà valutato un paragone:

1.  $\theta_m$  è fissato ad un valore costante e si osserverà l'impatto sulla resistenza impostandone diversi valori;
  2.  $\theta_m$  è implementato come valore non costante pari alla media tra la temperatura dell'isolante esterno e la temperatura della parete interna della canalina. In questo modo,  $\theta_m$  e la temperatura interna della canalina variano con la sollecitazione termica del conduttore del cavo;
- $T_4''$  è trascurata secondo quanto indicato dalla norma CEI IEC 60287-2-1 [12]: per canaline metalliche, il valore della resistenza termica del condotto stesso può essere considerato nullo.
  - $T_4'''$  (2.19) è calcolata riferendosi alla formula 4.2.1 della norma CEI IEC 60287-2-1 [12] per cavi in aria libera, considerando la canalina metallica in aria libera e sostituendo al valore richiesto del diametro del cavo quello della canalina stessa.

Il termine  $D_e^*$  è rappresentativo del raggio del condotto: considerando la canalina avente sezione quadrata di altezza pari a 10 cm, si valuta come  $D_e^*$  il valor medio tra il raggio della circonferenza iscritta e circoscritta alla sezione quadrata, ottenendo  $D_e^* = D_h = 12,071$  cm.

Il termine  $h$  rappresenta il coefficiente di scambio termico tra canalina ed ambiente esterno. Esso è calcolato attraverso la formula 2.20, i cui coefficienti costanti  $Z$ ,  $E$  e  $C_g$  sono tabellati nella norma e variano in base al numero di cavi/canaline presenti e alla loro reciproca disposizione. Questo termine di scambio termico considera già al suo interno la convezione e l'irraggiamento della canalina all'aria esterna.

$\Delta\theta_s$  rappresenta la differenza di temperatura tra la superficie del cavo e la temperatura ambiente, e per cavi non protetti dalle radiazioni solari (paragrafo 4.2.1.2 della norma CEI IEC 60287-2-1), esso è calcolato attraverso il seguente procedimento:

- **calcolo del fattore  $K_A$** : termine che tiene conto delle resistenze termiche interne al cavo, dei fattori di perdita  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  e del numero di anime. La formula è la seguente:

$$K_A = \frac{\pi D_e^* h}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \cdot \left( \frac{T_1}{n} + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right) \quad (3.5)$$

Si può semplificare l'espressione ponendo a zero i fattori di perdita  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  per quanto detto in precedenza nel paragrafo, così come escludere il contributo delle resistenze termiche  $T_2$  e  $T_3$ . Di conseguenza si ottiene:

$$K_A = \pi D_e^* h T_1 \quad (3.6)$$

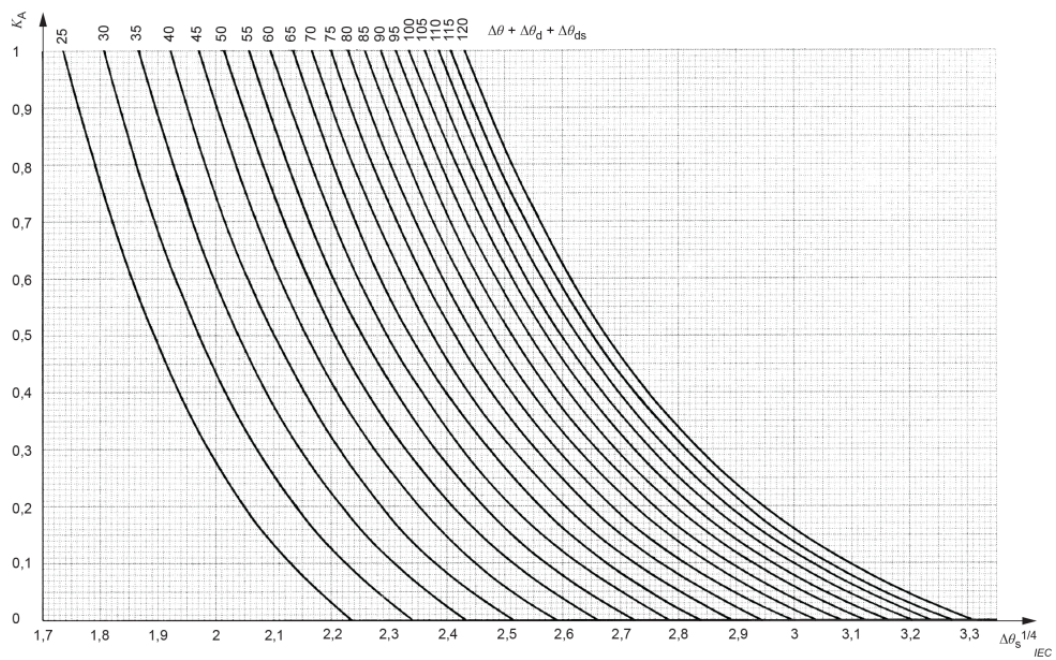
- **calcolo del contributo  $\Delta\theta_{ds}$** : differenza di temperatura aggiuntiva che considera la diretta radiazione solare sul cavo/canalina, calcolata attraverso una formula che similmente alla 3.5 tiene conto dei fattori di perdita e delle resistenze termiche interne al cavo e che può anch'essa essere semplificata, ottenendo:

$$\Delta\theta_{ds} = \sigma D_e^* E_e T_1 \quad (3.7)$$

dove  $\sigma$  è il coefficiente di assorbimento delle radiazioni solari pari a 1 per

convenzione, mentre  $E_e$  rappresenta l'intensità della radiazione solare assunta pari a  $1000 \frac{W}{m^2}$ ;

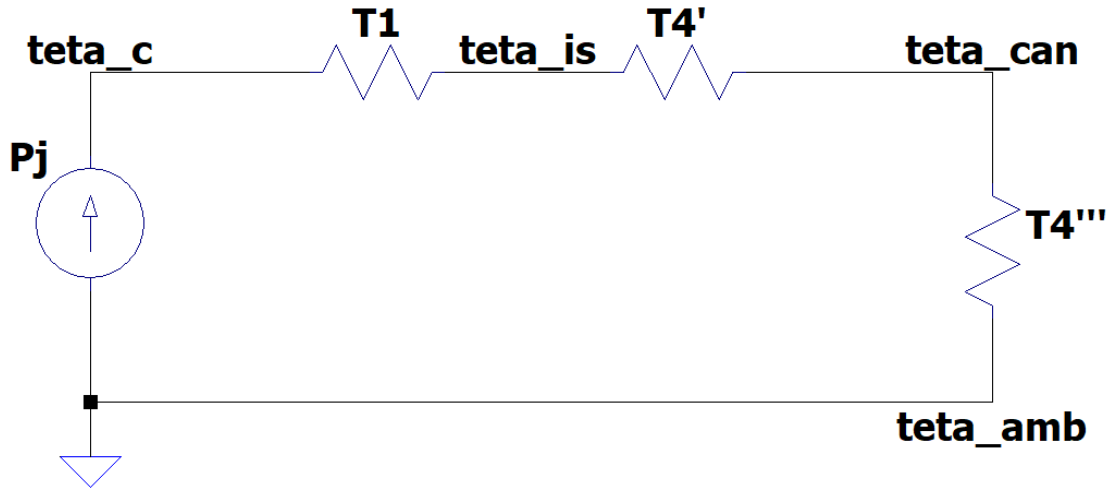
- **calcolo di  $(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}$** : si può calcolare il coefficiente seguendo il metodo iterativo indicato nella norma [12], oppure lo si può valutare graficamente intersecando i valori di  $K_A$  e di  $\Delta\theta + \Delta\theta_{ds}$ , con  $\Delta\theta$  differenza di temperatura tra la massima temperatura ammissibile dell'isolante e la temperatura di riferimento. In Figura 3.3 si riportano le curve per il calcolo grafico del parametro.



**Figura 3.3:** Grafico per il calcolo di  $(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}$

## Costruzione del modello termico del cavo

Le resistenze termiche  $T_1$ ,  $T_4'$  e  $T_4'''$ , sono inserite all'interno del modello termico del cavo come in Figura 3.4.



**Figura 3.4:** Modello termico con le sole resistenze

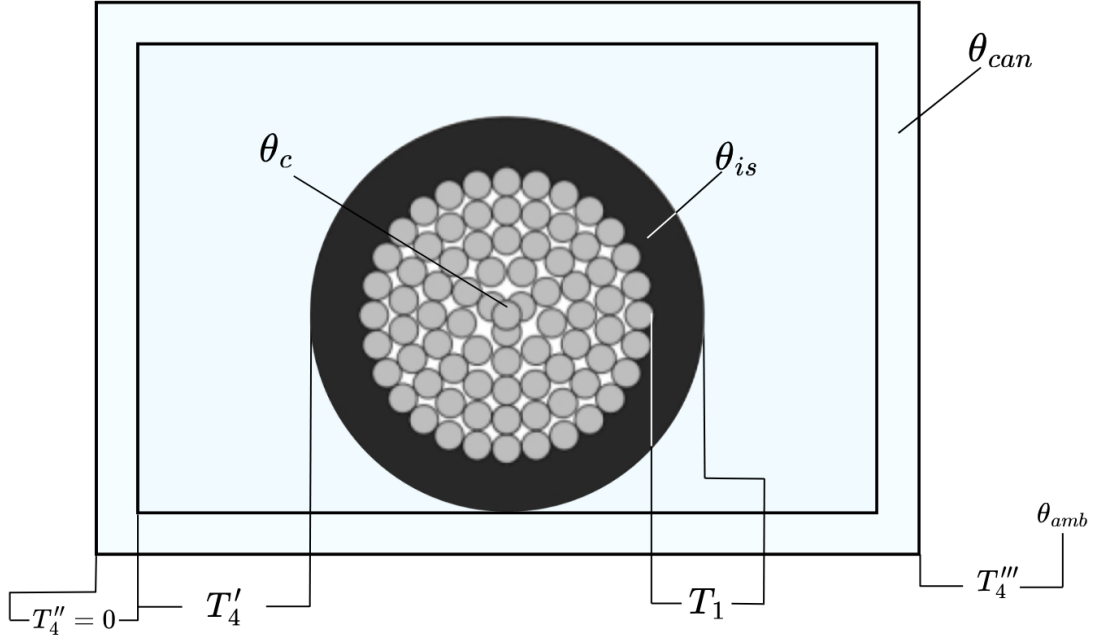
Si richiamano le formule 3.1 per le perdite Joule e la 2.11 per la resistenza in corrente continua variabile con la temperatura  $\theta_c$  del conduttore, ottenendo:

$$P_j = R_{dc} \cdot I^2 = R_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_c - 20)] \cdot I^2 \quad (3.8)$$

- $R_{20} = 0,0817 \frac{\Omega}{km}$  resistenza del conduttore di sezione  $240 \text{ mm}^2$  a  $20^\circ\text{C}$ [13] [5];
- $\alpha_{20} = 0,00393 \text{ K}^{-1}$  coefficiente termico del rame [9];
- $\theta_c$  temperatura del conduttore;
- $I$  è la corrente elettrica continua alla quale è sottoposto il conduttore.

Il nodo "teta\_c" ( $\theta_c$ ) è il nodo di riferimento della temperatura del conduttore, il nodo "teta\_is" ( $\theta_{is}$ ) è il nodo di riferimento della temperatura superficiale dell'isolante esterno e il nodo "tetacan" ( $\theta_{can}$ ) è il nodo di riferimento della temperatura della superficie interna della canalina. Coerentemente alla norma CEI IEC 60287-2-1, la resistenza dell'isolante esterno  $T_1$  è collocata tra il nodo  $\theta_c$  e il nodo  $\theta_{is}$ , la

resistenza  $T_4'$  è posta tra il nodo  $\theta_{is}$  e il nodo  $\theta_{can}$  come resistenza termica dell'aria circostante il cavo e la resistenza  $T_4'''$  tra il nodo  $\theta_{can}$  e il nodo "teta\_amb" ( $\theta_{amb}$ ).  $\theta_{amb}$  è pari a 45 °C convenzionalmente come temperatura di riferimento.



**Figura 3.5:** Spaccato in sezione del cavo utilizzato nel caso studio

Richiamando la formula 2.17 della resistenza  $T_4'$  e riferendosi a quanto detto nel precedente paragrafo riguardo i metodi di implementazione, la temperatura  $\theta_m$  è calcolata come media aritmetica tra la temperatura al nodo  $\theta_{is}$  e la temperatura al nodo  $\theta_{can}$ :

$$\theta_m = \frac{\theta_{is} + \theta_{can}}{2} \quad (3.9)$$

Il circuito in Figura 3.4 è rappresentativo una volta che il regime termico è stato raggiunto. Al fine di studiare il comportamento in transitorio, è necessario implementare le **capacità termiche** del cavo [17]. È possibile individuare due capacità termiche, una relativa al conduttore  $C_1$  e una relativa all'isolante  $C_2$ .

Le capacità termiche  $C_1$  e  $C_2$  sono rispettivamente inserite a monte e a valle della resistenza  $T_3$ , tra il nodo  $\theta_c$  e l'ambiente e tra il nodo  $\theta_{is}$  e l'ambiente (Figura 3.6). Per entrambe le capacità, la formula seguita al fine di calcolarne il valore è

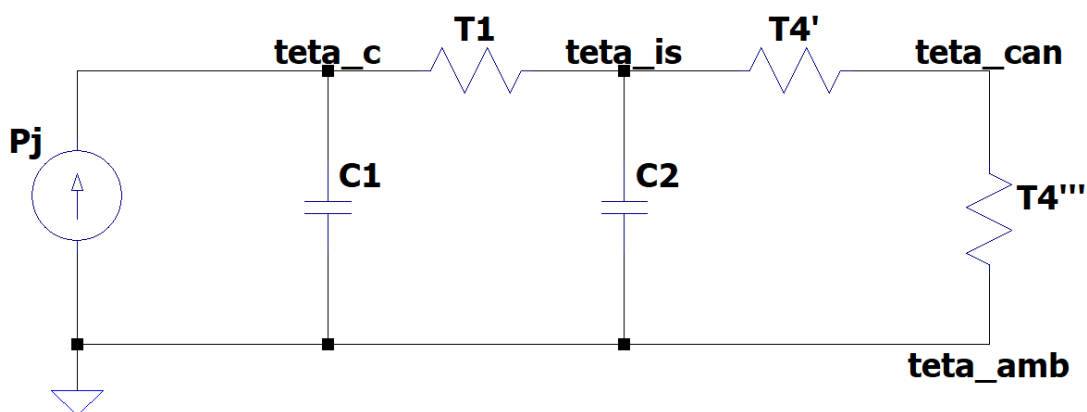


Figura 3.6: Modello termico completo

generalizzabile come di seguito:

$$C = P \cdot c_{sp} = p_{sp} \cdot V \cdot c_{sp} \quad (3.10)$$

con

- $P = p_{sp} \cdot V$  [ $g$  o  $\frac{g}{m}$ ], peso del materiale (conduttore o isolante) ottenuto come prodotto tra  $p_{sp}$  peso specifico in  $\frac{g}{m^3}$  e  $V$  volume  $m^3$  del materiale considerato. Tali valori possono anche essere espressi per unità di lunghezza;
- $c_{sp}$  è il calore specifico del materiale considerato in  $\frac{J}{K \cdot g}$ .

Si riportano in Tabella 3.4 i relativi valori dei parametri appena descritti riferiti al conduttore (rame) e al materiale isolante; si specifica che per quanto riguarda l'isolante i dati riportati sono riferiti all'XLPE (temperatura massima ammissibile pari a 90 °C), e nelle prove utilizzando diversi valori di resistività termica  $\rho_T$  saranno anche fatte variare le capacità termiche.

Tabella 3.4: Tabella proprietà capacità termiche

	$P$ [ $\frac{g}{m}$ ]	$p_{sp}$ [ $\frac{g}{m^3}$ ]	$c_{sp}$ [ $\frac{J}{K \cdot g}$ ]	$C$ [ $\frac{J}{K}$ ]
Conduttore	2150,4	8,96	0,385	<b>827,904</b>
XLPE	387,838	1,454	variabile	<b>variabile</b>

Secondo quanto descritto nell'articolo [18], il valore del calore specifico dell'XLPE

non è costante ma dipende dalla temperatura alla quale è sottoposto l'isolante; di conseguenza, nella Tabella 3.4 alle voci di calore specifico  $c_{sp}$  e capacità termica totale  $C$  non si può definire un valore univoco. Nell'articolo [18] vengono forniti alcuni valori a determinate temperature riportati nella Tabella 3.5.

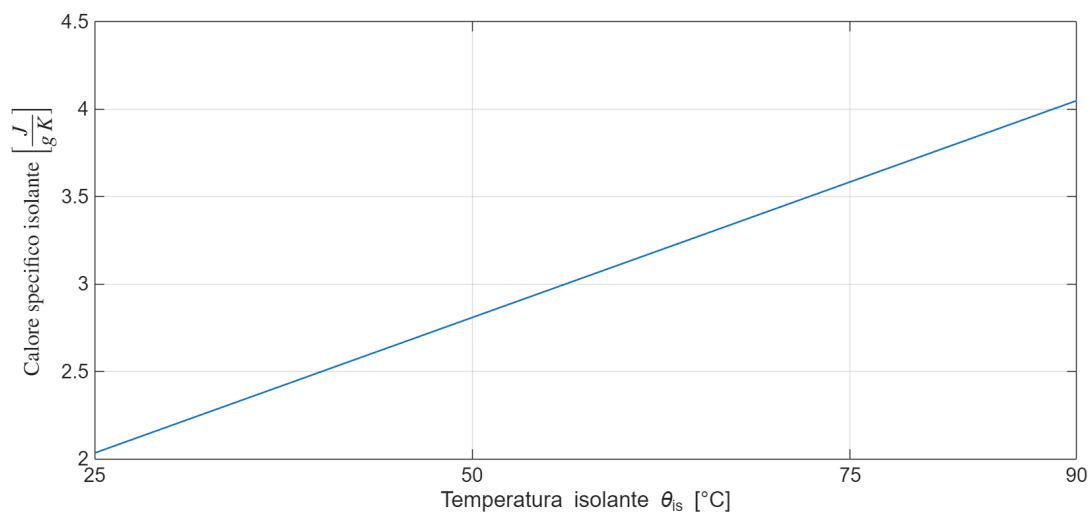
**Tabella 3.5:** Calore specifico XLPE dipendente dalla temperatura

Temperatura [ $^{\circ}C$ ]	25	55	90
Calore specifico [ $\frac{J}{K \cdot g}$ ]	2,034	2,976	4,049

Al fine di permettere al software LTspice il calcolo del transitorio termico, si è attuata una linearizzazione del calore specifico dell'XLPE secondo i dati riportati in Tabella 3.5, riportandone poi la caratteristica in Figura 3.7, secondo la funzione di linearizzazione seguente:

$$c_{sp} = 0,031 * \theta_{is} + 1,259 \quad (3.11)$$

che evidenzia la dipendenza del calore specifico dell'XLPE dalla temperatura superficiale dell'isolante.



**Figura 3.7:** Andamento del calore specifico dell'XLPE

## 3.2 Software LTspice

LTspice è in grado di lavorare sia con resistenze e capacità lineari che non lineari. Vi sono essenzialmente due metodi per implementare i parametri non lineari all'interno del circuito: con l'ausilio delle **behavioral sources** o **lavorando direttamente sui componenti**. Si analizzeranno brevemente entrambi i metodi, e al termine della descrizione si sceglierà il secondo metodo proposto per semplicità computazionale e grafica.

### Behavioral sources

LTspice permette la scelta di una vasta gamma di componenti circuitali. I *behavioral sources* possono essere di corrente o di tensione, ed è possibile impostare ad essi un'espressione matematica che crea una dipendenza del generatore da altre grandezze presenti nel circuito. In questo modo è possibile "far comportare" il generatore fittiziamente come un componente passivo del circuito. In Figura 3.8 il circuito con i generatori behavioral current sources.

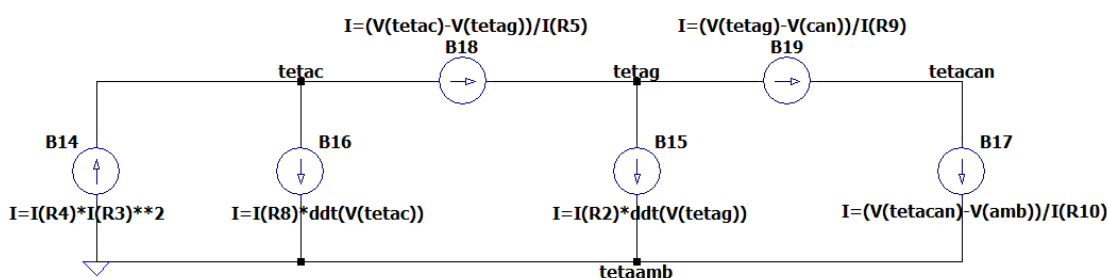
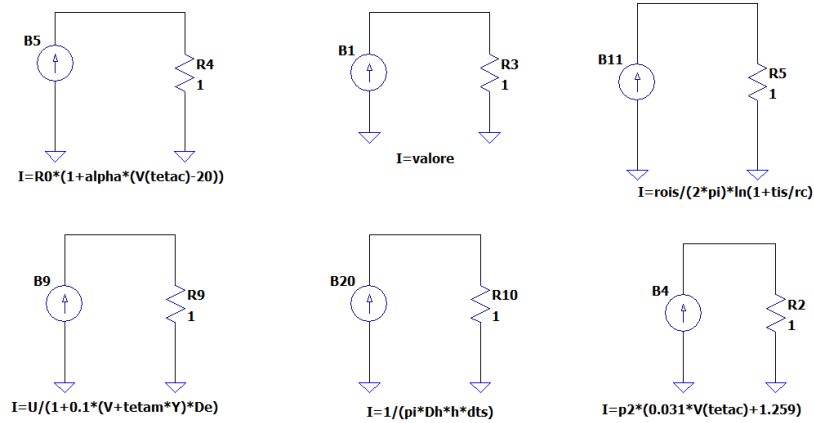


Figura 3.8: Modello termico con behavioral current sources

Sono stati scelti behavioral current sources da inserire nel circuito e da voler far comportare come resistenze o capacità. La sintassi dei generatori, come si può osservare in Figura 3.8, si riferisce nelle formule ad altre variabili ( $I(R2)$ ,  $I(R3)$ ,  $I(R8)$ ...) implementate in altri sottocircuiti e riportati in Figura 3.9.

Ciascuno dei generatori nei sottocircuiti, inietta una "corrente fittizia" che dal punto di vista fisico assume un significato diverso a seconda dell'applicazione. Ad esempio, la corrente del generatore B5 che fluisce nella resistenza R4, rappresenta la resistenza  $R_{dc}$  ed è indicata nel circuito in Figura 3.8 con  $I(R4)$ . La corrente



**Figura 3.9:** Circuiti ausiliari behavioral sources

$I(R3)$  in Figura 3.8, generata da B1 in Figura 3.9, è invece una corrente "reale": il prodotto  $I(R4) \cdot I(R3)^2$  indicato come corrente del generatore  $P_j$  rappresenta appunto le perdite Joule del circuito (equazione 3.1). In maniera analoga sono modellizzate anche le resistenze e le capacità del circuito.

Le resistenze termiche  $T_1$ ,  $T'_4$  e  $T''_4$  seguono una sintassi generica  $I = \frac{\Delta V}{R}$ : lo scopo è quello di assegnare al behavioral current source il valore di corrente che fluisce in quel ramo di circuito. Difatti, prendendo come esempio il generatore B18, il parametro  $I(R5)$  in Figura 3.8 si riferisce alla corrente iniettata nella resistenza R5 del circuito del generatore B11 in Figura 3.9, avente come espressione della corrente fittizia la formula della resistenza termica  $T_1$ : in questo modo, nel ramo ove è presente il generatore  $T_1$  fluisce una corrente pari al rapporto tra la differenza di temperatura tra conduttore ed isolante e il valore della resistenza termica  $T_1$ . Con la medesima logica, si procede all'implementazione delle rimanenti resistenze termiche del circuito.

I generatori B16 e B15 in Figura 3.8 si riferiscono alle capacità termiche del circuito e seguono anch'esse lo stesso ragionamento appena descritto per le resistenze termiche. L'equazione di riferimento per le capacità è  $I = C \cdot \frac{dV}{dt}$ : la derivata della tensione è implementata con la sintassi LTspice  $ddt()$ .

Il vantaggio principale dell'utilizzo dei behavioral current sources per simulare le resistenze e le capacità non lineari del circuito risiede nella possibilità di cambiare i parametri del circuito immediatamente e di assegnare i valori dei componenti ad altri circuiti ausiliari: in questo modo, è possibile semplificare le capacità di calcolo dei componenti del circuito principale.

Al contrario, questo metodo non è di immediata comprensione se si osserva il circuito di riferimento. Inoltre, nei rami del circuito si impongono le correnti che devono fluire attraverso degli artifici matematici e circuitali. Infine, dal punto di vista grafico non si può valutare immediatamente quale sia il significato fisico pratico dei differenti behavioral current sources inseriti.

Si osserva che dal punto di vista di risultati restituiti questo metodo è coerente con il metodo che verrà proposto di seguito.

## Componenti classici

È possibile descrivere la non linearità di resistenze e capacità anche direttamente agendo sui componenti. In Figura 3.10 il modello termico del cavo con le relative formule di resistenze e capacità.

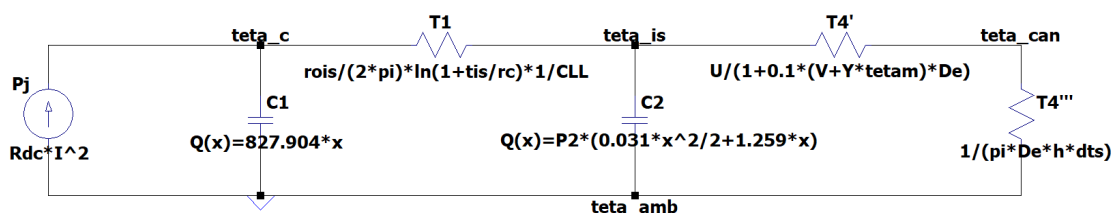


Figura 3.10: Modello termico del cavo

La non linearità delle resistenze termiche è gestita scrivendo nell'equazione della resistenza stessa direttamente il nodo di tensione/temperatura dal quale dipende, secondo la forma  $V(\dots)$  (ad esempio,  $V(\text{tetam})$ ). Il modello termico del cavo prevede che le resistenze siano tutte lineari eccetto la  $T_4'$  che dipende da  $\theta_m$ : nel circuito in Figura 3.10, per chiarezza grafica si è lasciato indicato nella formula "tetam" al denominatore, ma tale temperatura andrebbe descritta attraverso  $V(\text{tetam})$  qualora ci fosse il nodo "tetam" nel circuito, oppure coerentemente con quanto indicato nella formula 3.9 andrebbe definito il parametro della temperatura media tramite la dicitura [19]

$$\frac{V(teta\_g)+V(tetacan)}{2}$$

La capacità termica  $C_1$  del conduttore è costante e si potrebbe assegnare alla capacità direttamente il valore; la capacità termica  $C_2$  dell'isolante è invece non lineare e non è possibile su LTspice riportare nello spazio riservato al valore della capacità la formula 3.11 del calore specifico dell'XLPE. Le capacità non lineari sono implementabili su LTspice ricorrendo alla definizione della carica della capacità in funzione di una variabile generica  $x$ : questa variabile  $x$  rappresenta una tensione/temperatura non costante, che assume il significato della tensione al nodo + della capacità. Descrivendo dunque entrambe le capacità in funzione della variabile  $x$  si ottiene:

- $C_1(x) = 827,904 \frac{J}{K}$ , essendo costante è indipendente dalla tensione/temperatura  $x$ ;
- $C_2(x) = P_2 \cdot (0,031 \cdot x + 1,259) \frac{J}{K}$ , con  $P_2$  peso totale dell'isolante;

Si scrive dunque la carica in funzione di  $x$  delle capacità secondo la legge

$$Q(x) = \int C(x)dx \quad (3.12)$$

ottenendo le espressioni:

- $Q_1(x) = 827,904 \cdot x$ ;
- $Q_2(x) = P_2 \cdot (0,031 \cdot \frac{x^2}{2} + 1,259 \cdot x)$ .

In questo modo, il programma è in grado di risolvere i transienti e di interpretare correttamente il comportamento delle capacità, rispettandone le costanti di tempo termiche.

Infine, per comodità di gestione del parametro della resistenza in continua  $R_{dc}$  variabile con la temperatura del conduttore, si è mantenuto il behavioral current source per la modellizzazione delle perdite  $P_j$ .

Il vantaggio di utilizzare questa metodologia risiede principalmente in una maggiore comprensione dei componenti presenti nel circuito e del loro comportamento;

LTspice permette comunque lo studio anche in presenza di parametri non lineari descrivendo tale non linearità direttamente nel componente stesso.

Può risultare non pratico dal punto di vista computazionale lo sviluppo tramite l'equazione della carica della non linearità delle capacità, tramite la variabile  $x$ ; tuttavia, una volta che si è correttamente dimensionata l'espressione, il circuito si comporta in maniera "naturale" e non è forzato nella sua evoluzione così come invece accadeva con il metodo avente i behavioral current sources.

### 3.3 Premesse alle simulazioni per il singolo cavo

In questa sezione sono riportati i risultati più rilevanti delle simulazioni effettuate con il software LTspice. Sono proposti ed analizzati più casi, differenti tra loro nel valore delle correnti impostate e per alcune modifiche del circuito che verranno giustificate nel documento. Come riferimento circuitale, si tengono conto i circuiti definiti nel Capitolo 3.

Inizialmente, sono riportati i risultati delle analisi effettuate sul cavo singolo, considerando come isolante l'XLPE con temperatura massima ammissibile pari a  $90^{\circ}\text{C}$ , il cui valore di resistività termica  $\rho_T$  è riportato in tabelle nella norma CEI IEC 60287-2-1. E' riportato in questa sezione un confronto dei risultati ottenuti con  $\theta_m$  inizialmente costante per tutto l'intervallo della simulazione e dei risultati con essa variabile.

Inoltre è proposta un'analisi di sensitività variando il valore di  $\rho_T$  e del calore specifico  $c_{sp}$  dell'isolante, riportando il comportamento delle temperature  $\theta_{is}$  e  $\theta_{can}$  in funzione di questi due parametri.

Si riportano brevemente le ipotesi di analisi del caso studio fornito da Alstom Ferroviaria S.p.A.:

- la porzione del collegamento più gravosa dal punto di vista termico è quella che prevede la posa contemporanea dei cinque cavi;
- le correnti riportate in Tabella 1.3 si riferiscono al singolo cavo e indicano quanta corrente il cavo deve essere in grado di portare per il tempo indicato senza eccedere i limiti termici indicati dalle norme [4];
- la sezione del conduttore dei cavi è pari a  $240 \text{ mm}^2$  e la temperatura massima ammissibile dell'isolante è di  $150^{\circ}\text{C}$ , secondo quanto indicato dalle norme [2], [3] e [4];

## Analisi delle correnti

Si osservino i dati in Tabella 1.3. Si considera la peggiore delle tre correnti riportate per ogni istante di tempo, come indicato nella riga *Worst*. Si riportano in Tabella 3.6 i valori scelti dei coefficienti correttivi  $k$  e della portata  $I_{corr}$  [4], validi per il singolo cavo.

**Tabella 3.6:** Coefficienti  $k$  e portata del cavo

sezione	$I_{cable}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k^*$	$I_{corr}$
240 $mm^2$	675 A	1	1	1	1	1	1	675 A

La portata del cavo  $I_{corr}$  è calcolata secondo l'equazione 2.9 [4]. È inoltre da verificare la disuguaglianza 2.6:  $I_{load}$  in questo caso può essere valutata come la peggiore delle correnti all'istante di tempo pari alla  $\tau$  costante termica del circuito. La costante termica del circuito è pari 1133,13 s in accordo con la formula 2.3 riportata nella CEI EN 50343 in allegato A; tramite interpolazione lineare con i valori di corrente riportati in Tabella 1.3, si ottiene:

$$I_{load} = I_{th} = 456,1 \text{ A}$$

La disuguaglianza risulta rispettata, in quanto  $I_{load} = I_{th} \leq I_{corr}$ , in accordo con l'equazione 2.6.

## 3.4 Risultati simulazioni per il singolo cavo

In questa sezione sono riportati i risultati delle simulazioni effettuate sul software LTspice. Sono riportati i valori della temperatura del conduttore, della guaina e della canalina al termine della simulazione.

Inizialmente si valutano le simulazioni seguendo esattamente le indicazioni della norma CEI IEC 60287-2-1; si propone preliminarmente una variazione al circuito in Figura 3.10, imponendo la serie tra le resistenze  $T_4'$  e  $T_4'''$ : di conseguenza, il nodo "tetacan" non è più evidenziato e la temperatura media  $\theta_m$  dell'aria interna la canalina sarà impostata ad un valore di riferimento costante. Successivamente, saranno effettuate le simulazioni con le due resistenze termiche esterne al cavo "divise", pur sempre mantenute in serie, evidenziando nel circuito il nodo "tetacan": la temperatura  $\theta_m$  sarà implementata secondo l'equazione 3.9. La resistenza  $T_4$  è valutata attraverso queste due metodologie per osservare l'impatto che ha sul circuito una  $\theta_m$  costante o variabile.

Verrà effettuato un confronto tra ciascun risultato ottenuto, valutando quale possa essere il più indicativo. Infine, la sezione del conduttore del cavo sarà ridotta e si sceglierà dal catalogo [5] un nuovo cavo, sul quale saranno effettuate le medesime simulazioni e si stabilirà se nel caso del singolo cavo è possibile effettuare una riduzione della sezione senza violare i parametri termici.

## Circuito con $T_4$ implementata in un'unica resistenza

Si considera il circuito in Figura 3.11.

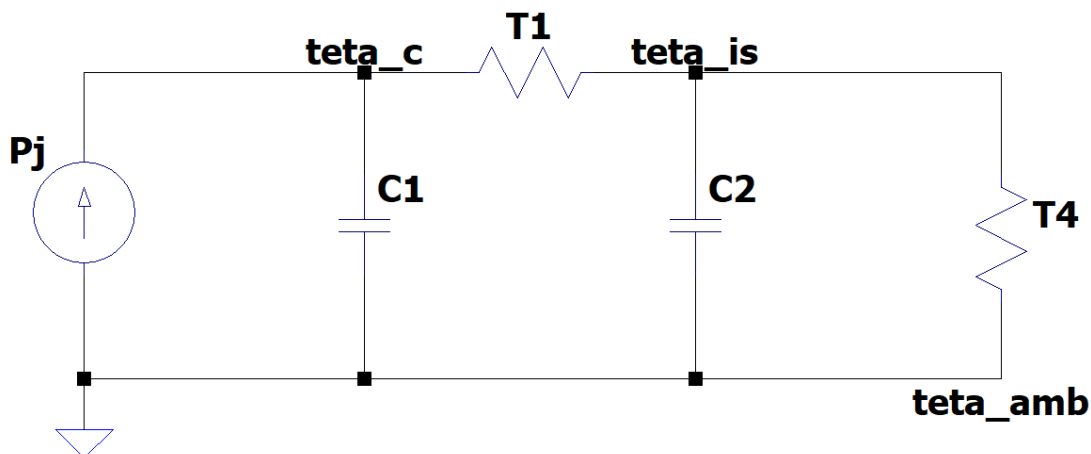


Figura 3.11

Si riportano le formule associate a tutti i componenti del circuito, con i valori dei relativi parametri.

- $P_j = R_{dc} \cdot I^2$

con  $R_{dc}$  calcolata tramite la formula 2.11 e  $I$  che sarà pari al valore di corrente peggiore della tabella 1.3 a seconda dell'istante di tempo considerato. I parametri  $R_0$  e  $\alpha$  sono riportati in Tabella 3.2;

- $T_1 = 0,18304 \frac{K \cdot m}{W}$

valore costante calcolato in accordo all'equazione 2.12, con il valore di  $\rho_T$  riportato nella CEI IEC 60287-2-1,  $t_1$  e  $r_c$  in Tabella 3.2 e  $C_{LL} = 1$ ;

- $T_4 = T_4' + T_4'' + T_4''' \left[ \frac{K \cdot m}{W} \right]$

in accordo alle formule 2.16 per la  $T_4$ , alla 2.17 per la  $T_4'$  e alla 2.19 per la  $T_4'''$ , imponendo la resistenza termica della canalina stessa  $T_4'' = 0$ . Riferirsi

alla Tabella 3.3 e alla Tabella 3.2.

Per quanto riguarda le costanti introdotte nella formula per il calcolo di  $T_4'''$ , ci si riferisce alla formula 2.20 per il calcolo del coefficiente di scambio termico  $h$ , ponendo le costanti presenti nell'equazione pari ai valori indicati in Tabella 3.7 [12]:

**Tabella 3.7:** Parametri costanti calcolo coefficiente di scambio  $h$

Z	E	C <sub>g</sub>
0,21	3,94	0,6

ottenendo:

$$h = 4,68675$$

Si segue il procedimento indicato nella sezione 2.3 per il calcolo di  $T_4'''$ . Applicando la formula 3.6:

$$K_a = 0,32532$$

Per entrambe  $h$  e  $K_a$  si è considerato un raggio normalizzato della canalina metallica di sezione quadrata pari a  $D_h = 12,071 \text{ cm}$ .

Avendo calcolato  $K_a$ , si valuta dall'equazione 3.7 il contributo dato dalle radiazioni solari  $\Delta\theta_{ds} = 5^\circ\text{C}$ ; si considera inoltre  $\Delta\theta = 45^\circ\text{C}$  come massima differenza di temperatura tra la massima temperatura ammissibile dell'isolante del cavo ( $90^\circ\text{C}$ ) e la temperatura di riferimento ( $45^\circ\text{C}$ ). In possesso di questi dati, si ottiene il valore di  $(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}$  dal grafico in Figura 3.3:

$$(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}} = 2,315$$

- $C_1 = 827,904 \frac{J}{K}$

capacità termica totale del conduttore (rame), calcolata tramite l'equazione 3.10 con i valori riportati in Tabella 3.4. È un valore costante, ed è riportato nel modello termico su LTspice con l'espressione della carica del condensatore  $Q_1(x) = C_1(x) \cdot x$ ;

- $C_2 = P_{is} \cdot c_{sp} \left[ \frac{J}{K} \right]$

capacità termica totale dell'isolante, con  $P_{is}$  peso totale dell'isolante riportato in Tabella 3.4 e  $c_{sp}$  calore specifico variabile dell'isolante che segue la formula 3.11. Nel modello termico in LTspice è riportata analogamente alla capacità  $C_1$  con l'espressione della relativa carica  $Q_2(x) = P_{is} \cdot (0,031 \cdot \frac{x^2}{2} + 1,259 \cdot x)$ ;

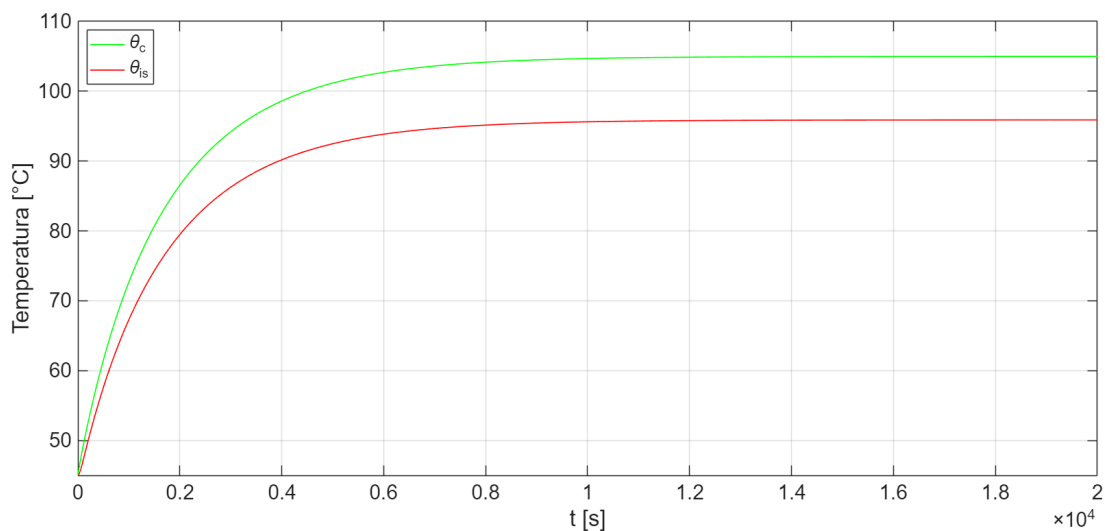
Avendo inizializzato tutti i valori di ciascun parametro circuitale, riferendosi alla tabella di Tabella 1.3 si riportano le temperature ai nodi "tetac" e "tetag" rispettivamente del conduttore e dell'isolante del cavo. Si imposta inizialmente la temperatura media interna alla canalina  $\theta_m = 75^\circ C$ .

**Tabella 3.8:** Risultati simulazione con parametri norma IEC 60287

$t$ [s]	0	10	30	60	300	600	900	1500	1800	3600	regime
$I$ [A]	487,77	482,78	478,52	477,36	476,11	473,38	462,59	445,84	402,05	339,98	<b>675</b>
$\theta_c$ [°C]	45	45,25	45,69	46,3	50,34	54,31	56,95	60,22	58,53	57,14	<b>104,84</b>
$\theta_{is}$ [°C]	45	45,02	45,16	45,49	48,85	52,32	54,67	57,61	56,29	55,26	<b>95,75</b>

Si può osservare in Tabella 3.8 che il valore a regime della temperatura dell'isolante ( $\theta_{is}$ ) con il cavo caricato alla portata  $I_{corr} = 675 A$  eccede di qualche grado il limite teorico dell'isolante pari a  $90^\circ C$ : ciò può essere imputabile alle necessarie approssimazioni effettuate nell'implementazione del circuito e nell'interpretazione dei parametri normativi. Nell'ipotesi che il cavo non sia invece caricato con altre correnti entro i limiti temporali indicati, si può osservare che le temperature si mantengono notevolmente al di sotto della temperatura massima ammissibile dell'isolante.

In Figura 3.12 si osserva l'andamento della temperatura del conduttore (traccia verde) e dell'isolante (traccia rossa). I grafici convergono ai valori riportati in Tabella 3.8 e il regime è raggiunto a circa 3 ore.

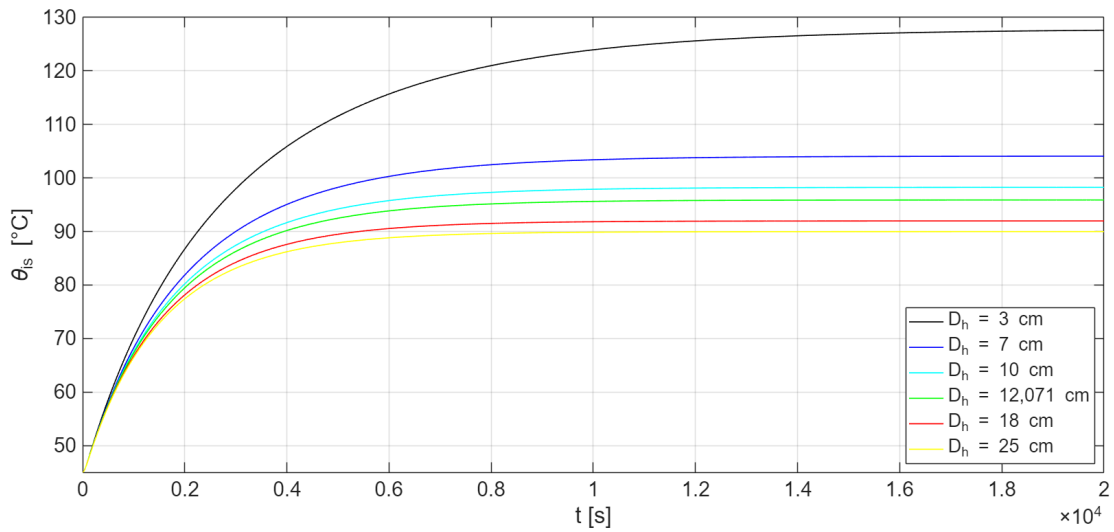


**Figura 3.12:** Andamento temperature alla corrente  $I_{corr}$

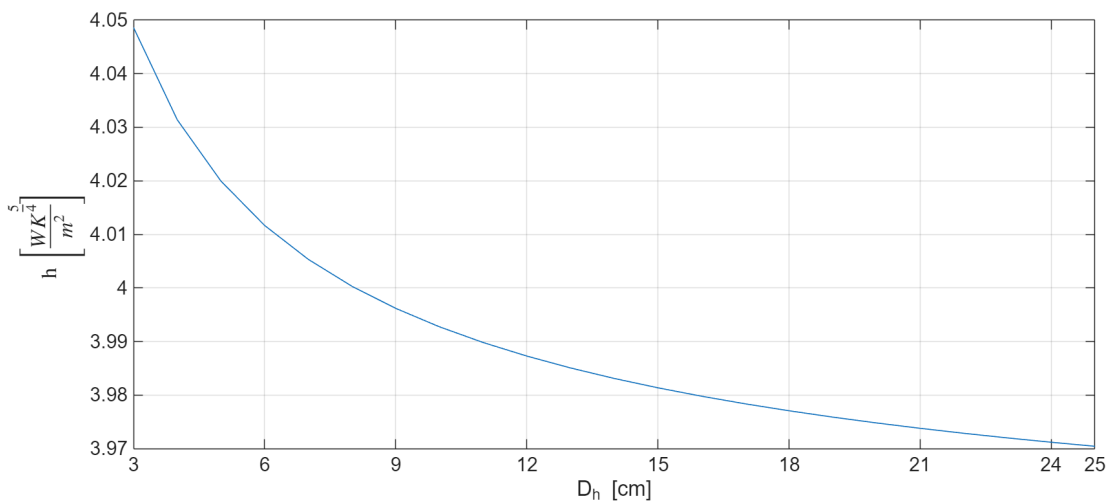
Osservando l'equazione 2.19 di  $T_4'''$ , si evidenzia la sua dipendenza inversa dalle dimensioni della canalina (il parametro  $D_h$ ). Le dimensioni della canalina a sezione quadrata sono circa quattro volte quelle del cavo, e la formula indica che al diminuire della sezione della canalina la resistenza  $T_4'''$  aumenta, con conseguente aumento della temperatura dell'isolante  $\theta_{is}$ . Al fine di valutare l'impatto dell'altezza  $D_h$  della canalina su  $\theta_{is}$ , si devono modificare i valori del coefficiente  $h$  e del fattore  $K_a$  dipendenti anch'essi da  $D_h$  (equazione 2.20), e di conseguenza  $(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}$ .

I risultati riportati in Figura 3.13 indicano un forte incremento della temperatura al diminuire della sezione della canalina. Da un punto di vista pratico/costruttivo, ipotizzando la presenza di altri cavi non è possibile pensare a canaline aventi diametri inferiori ad una certa quota, o comunque prossimi a quelli del cavo. Inoltre questo modello prevede l'unione in serie delle resistenze  $T_4'$  e  $T_4'''$ , non riuscendo a valutare la temperatura della parete della canalina.

Un altro parametro che influenza la resistenza termica totale  $T_4$  è la temperatura media dell'aria all'interno della canalina  $\theta_m$ . In precedenza è stato specificato il valore iniziale della temperatura media interna alla canalina  $\theta_m = 75^\circ C$ , assunto tenendo conto della presenza di altri cavi nella canalina; la resistenza termica dell'isolante  $T_4'$  dipende inversamente dalla  $\theta_m$ , comportando che ad una diminuzione della temperatura media all'interno della canalina la resistenza termica aumenta:



**Figura 3.13:** Andamento di  $\theta_{is}$  al variare di  $D_h$



**Figura 3.14:** Andamento di  $h$  al variare di  $D_h$

di conseguenza, la temperatura dell'isolante si incrementa. Si valuta soltanto il caso con il cavo caricato alla portata  $I_{corr} = 675 A$  l'impatto di differenti valori di  $\theta_m$ , riportata in Tabella 3.9. Si precisa che il diametro della canalina è  $D_h = 12,071 cm$ .

L'inizializzazione e l'aggiornamento manuale del parametro  $\theta_m$  non è puntuale dal punto di vista termico e non è probabile che la temperatura media interna alla canalina rimanga costante al valore fissato per tutto il tempo di simulazione.

**Tabella 3.9:** Temperature conduttore e isolante a diverse  $\theta_m$  alla portata  $I_{corr}$

$\theta_m$	45°C	60°C	90°C	105°C	120°C
$\theta_c$ [°C]	111,87	108,14	102,22	98,78	97,61
$\theta_{is}$ [°C]	102,61	98,98	93,17	90,13	88,73

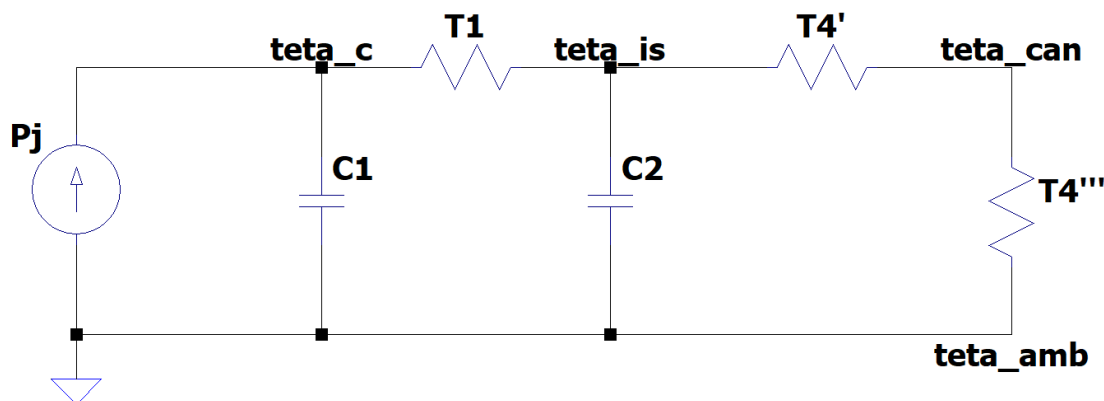
Inoltre, l'ipotesi che sorregge la scelta di un valore piuttosto che di un altro, ovvero la presunta presenza di altri cavi nella canalina, non è sufficiente e presuppone la conoscenza a priori di tale temperatura.

Dai risultati delle simulazioni, ad impattare maggiormente è il variare delle dimensioni del diametro della canalina, a parità di  $\theta_m$  (Figura 3.13); il viceversa risulta meno influente (Figura 3.14). In entrambi i casi, si possono evidenziare delle problematiche: riguardo il parametro  $D_h$ , la sua modifica con questo modello non permette di valutare concretamente la temperatura della canalina e se lo scambio termico con l'esterno avviene efficacemente, mentre per il fattore  $\theta_m$  risulta forzata l'ipotesi che esso rimanga costante ad un valore per tutta la durata della simulazione.

Risulta dunque più efficace disgiungere la serie tra le resistenze  $T'_4$  e  $T''_4$  al fine di evidenziare un ulteriore nodo "tetacan", rappresentativo della temperatura sulla parete interna della canalina. Le analisi e le simulazioni sono valutate nel prossimo paragrafo.

## Circuito con $T_4'$ e $T_4'''$ singolarmente esplicitate

Si considera il circuito in Figura 3.15.



**Figura 3.15:** Modello termico con resistenze termiche  $T_4$  singolarmente esplicitate

Rispetto ai valori riportati nel paragrafo 3.4 non ci sono modifiche da evidenziare nei parametri del circuito. Soltanto la temperatura media interna della canalina  $\theta_m$  subisce una diversa interpretazione, non venendo più inizializzata ad un valore costante ma facendola dipendere dai valori di temperatura dell'isolante (nodo "teta<sub>g</sub>") e della parete della canalina (nodo "teta<sub>can</sub>"). Si riporta ancora una volta l'equazione rappresentativa della  $\theta_m$ :

$$\theta_m = \frac{\theta_{is} + \theta_{can}}{2}$$

$\theta_m$  è dunque implementata come media aritmetica tra la temperatura dell'isolante  $\theta_{is}$  e la temperatura della parete interna della canalina  $\theta_{can}$ . In questo modo la temperatura media interna alla canalina  $\theta_m$  non è più costante e dipende direttamente dalla sollecitazione termica del cavo, senza dover ipotizzare a priori un numero presunto di cavi o la temperatura interna e senza modificare manualmente tale valore. Analogamente a quanto descritto nel precedente paragrafo, si valutano i valori di temperatura per conduttore e isolante, osservando inoltre anche la temperatura della parete della canalina e la temperatura media interna. Si riportano i risultati in Tabella 3.10.

Confrontando i dati in Tabella 3.10 e in Tabella 3.8, si può affermare che non

**Tabella 3.10:** Risultati simulazione con parametri norma IEC 60287

$t$ [s]	0	10	30	60	300	600	900	1500	1800	3600	regime
$I$ [A]	487,77	482,78	478,52	477,36	476,11	473,38	462,59	445,84	402,05	339,98	<b>675</b>
$\theta_c$ [°C]	45	45,25	45,68	46,29	50,37	54,42	57,19	60,68	59,03	57,85	<b>104,7</b>
$\theta_{is}$ [°C]	45	45,02	45,15	45,49	48,91	52,49	54,97	58,11	56,82	55,98	<b>95,64</b>
$\theta_{can}$ [°C]	45	45,004	45,03	45,1	45,84	46,62	47,18	47,88	47,59	47,41	<b>57,06</b>
$\theta_m$ [°C]	45	45,01	45,09	45,3	47,38	49,56	51,08	53	52,21	51,7	<b>76,35</b>

si apprezzano significative differenze nei valori di temperatura di conduttore ed isolante. Tuttavia, si può notare che per quanto riguarda la temperatura media  $\theta_m$  raggiunta internamente alla canalina i valori per le correnti diverse dalla portata sono ben inferiori ai  $75^\circ C$  inizializzati nel precedente caso, valore che invece è pressoché raggiunto caricando il cavo a  $I_{corr}$ .

Analogamente a quanto visto nel precedente paragrafo, si vuole nuovamente valutare l'impatto del parametro  $D_h$ , su  $\theta_{can}$ . I risultati in Tabella 3.11 sono riportati tenendo conto che il cavo sia caricato alla sua portata  $I_{corr}$ .

**Tabella 3.11:** Temperatura isolante e canalina a diversi valori  $D_h$  alla portata  $I_{corr}$

$D_h$	25 cm	18 cm	10 cm	7 cm	3 cm
$h$	4,22451	4,52756	4,77602	4,97552	5,66166
$(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}$	2,145	2,225	2,355	2,410	2,535
$\theta_{is}$ [°C]	90,47	92,40	97,66	102,43	122,10
$\theta_{can}$ [°C]	51,60	53,60	59,16	64,17	84,60

La temperatura della parete interna della canalina  $\theta_{can}$  aumenta con andamento simile a quello di  $\theta_{is}$ , discostandosi di parecchio dal valore della temperatura di

riferimento dell'ambiente esterno pari a 45 °C.

Dividendo le due resistenze termiche esterne al cavo  $T_4'$  e  $T_4'''$ , in modo tale da evidenziare il nodo "tetacan" per far variare la temperatura media interna la canalina, nel confronto in Tabella 3.28 si può affermare che che questo secondo metodo sia accettabile, poiché conferma al netto di qualche minima differenza il procedimento indicato nella norma CEI IEC 60287-2-1.

**Tabella 3.12:** Confronto risultati dei circuiti con  $T_4$  unita e  $T_4'/T_4'''$  singolarmente esplicitate

$t$	$T_4$ unita		$T_4'$ e $T_4'''$ divise	
	1500 s	regime	1500 s	regime
$I$ [A]	445,84	675	445,84	675
$\theta_c$ [°C]	60,22	104,84	60,28	104,7
$\theta_{is}$ [°C]	57,61	95,75	58,11	95,64
$\theta_{can}$ [°C]	-	-	47,88	57,06
$\theta_m$ [°C]	75	75	53	76,35

Si reputa accettabile di conseguenza anche l'equazione che implementa la  $\theta_m$  come media aritmetica tra la temperatura dell'isolante  $\theta_{is}$  e della canalina  $\theta_{can}$ .

Ad ogni modo, rimane ancora da interpretare come può agire la resistenza termica esterna sulla temperatura della canalina e del cavo, poiché in questo senso la norma CEI IEC 60287-2-1 non presenta specifiche in grado di valutare puntualmente lo scambio termico con l'esterno, in termini di convezione e di irraggiamento.

## Valutazione riduzione sezione a 185 e 150 mm<sup>2</sup>

In Tabella A.2 [4], la sezione subito inferiore a 240 mm<sup>2</sup> fino ad'ora utilizzata è 185 mm<sup>2</sup>, con relativo valore  $I_{cable,185} = 560$  A. Si riportano di seguito i nuovi valori associati ai componenti del circuito, dapprima specificando le nuove caratteristiche geometriche del cavo in Tabella 3.13, riferendosi sempre al catalogo del cavo [5].

**Tabella 3.13:** Caratteristiche costruttive del cavo con sezione ridotta a 185 mm<sup>2</sup>

Costruttore	<b>SIECHEM</b>
Tensione di riferimento	<b>3,6/6 kV</b>
Sezione conduttore	<b>185 mm<sup>2</sup></b>
Raggio conduttore $r_c$	<b>7,674 mm</b>
Temperatura di riferimento	<b>45°C</b>
Resistenza conduttore a 20°C	<b>0,108 <math>\frac{\Omega}{km}</math></b>
Coefficiente termico $\alpha$	<b>0,00393 K<sup>-1</sup></b>
Lunghezza	<b>unitaria</b>
Diametro minimo/massimo cavo	<b>22,6/26,5 mm</b>
Spessore isolante	<b>3,2 mm</b>
Temperatura massima isolante	<b>90°C</b>
Tipologia isolante	<b>XLPE</b>
Costante termica cavo	<b>928,96 s</b>

Il circuito preso come riferimento è quello in Figura 3.15. L'interpretazione dei diversi coefficienti  $k$  non cambia, e si riportano in Tabella 3.14 per completezza i relativi valori.

**Tabella 3.14:** Coefficienti  $k$  e portata del cavo a sezione ridotta a 185 mm<sup>2</sup>

sezione	$I_{cable}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k^*$	$I_{corr}$
185 mm <sup>2</sup>	560 A	1	1	1	1	1	1	560 A

È rispettata la disequazione tale che  $I_{load} = I_{th} \leq I_{corr}$ , in quanto interpolando i

valori di corrente riportati in Tabella 1.3 per l'istante di tempo pari alla nuova costante termica  $\tau_{185}$ , si ottiene come peggior valore  $I_{th} = 461,78 A$ , risultando inferiore a  $I_{corr,185} = 560 A$  (Tabella 3.14).

A questo punto è necessario ricalcolare i parametri del circuito che dipendono direttamente dalle caratteristiche costruttive del cavo.

- *Perdite Joule  $P_j$* : si considera il nuovo valore della resistenza a  $20^\circ C$  del conduttore pari a  $R_{20} = 0,108 \frac{\Omega}{km}$  per una sezione  $S = 185 mm^2$ ;
- *Resistenza termica dell'isolante  $T_3$* : si considera  $t_1$  spessore dell'isolante pari al valore riportato in Tabella 3.13 e la misura del diametro totale  $D_e$  pari a quella minima sempre riportata in Tabella 3.13. Si ottiene di conseguenza il nuovo valore di  $T_1$ :

$$T_1 = 0,19415 \frac{K \cdot m}{W}$$

- *Resistenza termica esterna  $T_4$* : la resistenza termica esterna  $T_4'''$  si modifica nei parametri  $K_a$  e  $(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}$ , mentre il coefficiente di scambio termico  $h$  rimane invariato:

$$K_a = 0,34507$$

$$(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}} = 2,295$$

- *Capacità termica del conduttore  $C_1$* : a parità di lunghezza (unitaria) del cavo e di peso specifico, cambia il peso totale poiché è diminuita la sezione. Di conseguenza, diminuisce il valore totale della capacità termica:

$$C_1 = 638,136 \frac{J}{K}$$

- *Capacità termica dell'isolante  $C_2$* : si modifica di conseguenza anche il peso totale dell'isolante, mentre non cambia la formulazione del calore specifico

Si riportano i risultati delle simulazioni in Tabella 3.15, seguendo lo stesso procedimento per quelle in Tabella 3.10.

**Tabella 3.15:** Risultati simulazione con cavo a sezione  $185 \text{ mm}^2$

$t$ [s]	0	10	30	60	300	600	900	1500	1800	3600	<b>regime</b>
$I$ [A]	487,77	482,78	478,52	477,36	476,11	473,38	462,59	445,84	402,05	339,98	<b>560</b>
$\theta_c$ [°C]	45	45,42	46,16	47,17	53,89	60,38	64,58	69,59	66,73	64,07	<b>103,49</b>
$\theta_{is}$ [°C]	45	45,04	45,29	45,91	51,62	57,33	61,1	65,64	63,38	61,34	<b>94,74</b>
$\theta_{can}$ [°C]	45	45,008	45,06	45,18	46,34	47,52	48,33	49,3	48,83	48,38	<b>56,05</b>
$\theta_m$ [°C]	45	45,02	45,18	45,55	48,98	52,43	54,72	57,47	56,11	54,86	<b>75,4</b>

A regime il cavo caricato alla sua portata  $I_{corr,185} = 560 \text{ A}$  rispetta i vincoli termici imposti dall'isolante, a conferma del fatto che il modello termico è valido indipendentemente dalla sezione del cavo impostata. A parità di correnti ai diversi istanti di tempo, si confrontano i dati appena riportati con quelli in Tabella 3.10 validi per la sezione pari a  $240 \text{ mm}^2$ ; si osserva un aumento massimo poco inferiore a  $8^\circ\text{C}$  in corrispondenza di  $I(t = 1500\text{s}) = 445,84 \text{ A}$ , rimanendo per tutti le correnti considerate e i relativi intervalli di tempo al di sotto della portata  $I_{corr,185}$ .

Osservando la Tabella A.2, volendo ridurre ulteriormente la sezione del cavo a  $150 \text{ mm}^2$  la corrente  $I_{cable,150}$  associata è  $490 \text{ A}$ , superiore alla massima corrente presunta in Tabella 1.3 ( $t = 0$ ,  $I_0 = 487,77 \text{ A}$ ); volendo estremizzare il concetto di riduzione del cavo, si riporta un esempio di simulazioni per il singolo cavo ridotto nella sua sezione fino a  $150 \text{ mm}^2$  con una rispettiva  $I_{cable,150} = 490 \text{ A}$ . Si riportano nelle Tabella 3.16, Tabella 3.17 e Tabella 3.18 le caratteristiche costruttive principali del cavo e i valori modificati dei parametri dei circuiti, riferendosi sempre al modello in Figura 3.15.

Non sono ulteriormente specificate in Tabella 3.16, ma rimangono invariate, le seguenti voci: costruttore (SIECHEM), tensione di riferimento ( $3,6/6 \text{ kV}$ ), temperatura di riferimento ( $45^\circ\text{C}$ ), coefficiente termico  $\alpha$  ( $0,00393 \text{ K}^{-1}$ ), lunghezza (unitaria), temperatura massima isolante ( $90^\circ\text{C}$ ), tipologia di isolante (XLPE).

$I_{th,150} = 465,87 \text{ A}$  è inferiore alla portata del cavo  $I_{corr,150} = 490 \text{ A}$  riportata in

**Tabella 3.16:** Caratteristiche costruttive del cavo a  $150 \text{ mm}^2$

Sezione conduttore	<b>150 <math>\text{mm}^2</math></b>
Raggio conduttore $r_c$	<b>6,91 <math>\text{mm}</math></b>
Resistenza conduttore a $20^\circ\text{C}$	<b>0,132 <math>\frac{\Omega}{\text{km}}</math></b>
Diametro minimo/massimo cavo	<b>20,8/24,4 <math>\text{mm}</math></b>
Spessore isolante	<b>3,1 <math>\text{mm}</math></b>
Costante termica cavo	<b>782,72 <math>s</math></b>

**Tabella 3.17:** Coefficienti  $k$  e portata del cavo a  $150 \text{ mm}^2$

sezione	$I_{cable}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k^*$	$I_{corr}$
$150 \text{ mm}^2$	490 A	1	1	1	1	1	1	490 A

**Tabella 3.18:** Valori parametri circuito cavo a  $150 \text{ mm}^2$

$R_{20} [\frac{\Omega}{\text{km}}]$	$T_1 [\frac{K \cdot m}{W}]$	$h [\frac{W}{K \cdot m^2}]$	$K_a$	$(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}$	$C_1 [\frac{J}{K}]$	$P_{is} [\frac{g}{m}]$
0,132	0,20645	4,68675	0,36693	2,285	517,44	275,994

Tabella 3.17, rispettando la disequazione 2.6.

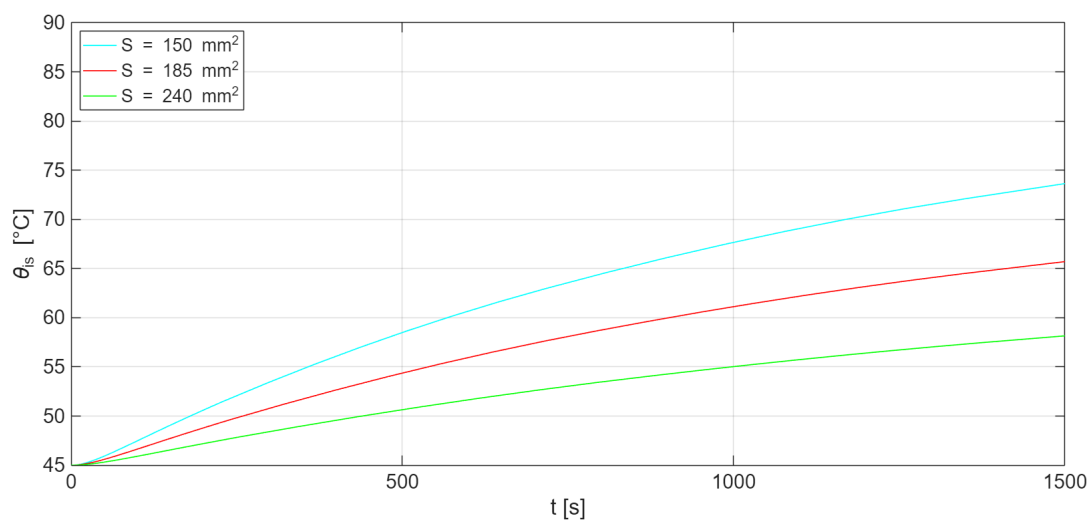
Di seguito in Tabella 3.19 i risultati delle simulazioni.

**Tabella 3.19:** Risultati simulazione con cavo a sezione  $150 \text{ mm}^2$

$t [s]$	0	10	30	60	300	600	900	1500	1800	3600	regime
$I [A]$	487,77	482,78	478,52	477,36	476,11	473,38	462,59	445,84	402,05	339,98	<b>490</b>
$\theta_c [^\circ\text{C}]$	45	45,63	46,74	48,24	58,04	67,21	72,92	79,41	75,15	70,65	<b>103,66</b>
$\theta_{is} [^\circ\text{C}]$	45	45,06	45,44	46,34	54,54	62,48	67,56	73,45	70,13	66,67	<b>94,29</b>
$\theta_{can} [^\circ\text{C}]$	45	45,01	45,08	45,26	46,85	48,46	49,51	50,74	50,05	49,32	<b>56,41</b>
$\theta_m [^\circ\text{C}]$	45	45,04	45,26	45,8	50,7	55,47	58,54	62,1	60,09	58	<b>75,35</b>

Ancora una volta, la situazione più gravosa si presenta in  $t = 1500$  s per  $I(t) = 445,84$  A, ma la temperatura dell'isolante si mantiene inferiore al limite di  $90^\circ$  C della guaina. Si ritiene incerto, tuttavia, il voler ulteriormente ridurre a questa sezione il cavo poiché tenendo conto che tali simulazioni andranno riproposte per il caso a 5 cavi, certamente la portata di ciascun singolo sarà inferiore alla massima corrente in Tabella 1.3, dovendo modificare il coefficiente  $k_2$ : ponendo  $k_2 = 0,68$  per il caso di 5 cavi posati su due layer (Tabella A.5), per l'XLPE a  $90^\circ$  C si pongono tutti i gli altri coefficienti  $k$  pari a 1, e si otterrebbe con  $I_{cable,150} = 490$  A una portata  $I_{corr,150} = 333,2$  A. Nel caso più permissivo dell'isolante a  $150^\circ$  C,  $k^* = 1,46$  e di conseguenza  $I_{corr,150} = 486,5$  A. È evidente che la corrente  $I(t) = 487,77$  A è soltanto una corrente di spunto, non dovendo essere mantenuta per nessun intervallo di tempo; sarà oggetto di valutazione nei casi a più cavi qualora si volesse ridurre la sezione del cavo a  $150$  mm<sup>2</sup>.

Per tutte e tre le simulazioni effettuate (Tabella 3.10, Tabella 3.15 e Tabella 3.19) si osserva che la situazione più gravosa dal punto di vista termico si verifica per  $t = 1500$  s con  $I(t) = 445,84$  A. Si riporta in Figura 3.16 il grafico che confronta l'andamento della temperatura  $\theta_{is}$  al variare della sezione ( $240$  mm<sup>2</sup>,  $185$  mm<sup>2</sup> e  $150$  mm<sup>2</sup>), a parità di corrente  $I(t) = 445,84$  A dopo  $1500$  s.



**Figura 3.16:** Confronto  $\theta_{is}$  a  $t = 1500$  s e  $I = 445,85$  A

## 3.5 Analisi di sensitività

Le simulazioni svolte nelle precedenti sezioni del capitolo sono valutate sui valori di resistività termica e calore specifico per l'isolante XLPE a 90 °C [12][18].

La norma CEI EN 50382, con la sigla riferita alla tipologia di isolante EI 111, indica una certa miscela appartenente alla famiglia delle gomme siliconiche con elevate prestazioni meccaniche. Né a livello accademico né normativo è stato possibile stabilire valori puntuali dei parametri di resistività termica e calore specifico, mentre per quanto riguarda il peso specifico dell'isolante riferito precisamente alla tipologia EI 111 è stato possibile stabilirlo valutando il dato del peso totale fornito a catalogo [5].

Al variare della tipologia di isolante, bisogna considerare che modificando il valore di resistività termica  $\rho_T$  cambia di conseguenza anche il valore del calore specifico  $c_{sp}$ ; la proprietà fisica che lega resistività e calore specifico è definita dalla **diffusività** del materiale, la cui espressione è di seguito riportata (3.13).

$$\alpha = \frac{k_T}{p_{sp} \cdot c_{sp}} = \frac{1}{\rho_T \cdot p_{sp} \cdot c_{sp}} \quad (3.13)$$

La diffusività misura la capacità di un materiale di condurre energia termica rispetto alla sua capacità di immagazzinarla [9].

E' necessario anche modificare il coefficiente  $k^*$  [4]; a tal fine, ci si riferisce all'equazione 2.8.

### Valutazione del fattore $\alpha$

L'ipotesi iniziale di studio si basa sull'estensione fino a 150 °C delle leggi implementate per l'XLPE, in particolare la linearizzazione dell'andamento del calore specifico dell'XLPE (3.10). Il valore di resistività termica  $\rho_T$  indicato nelle tabelle della norma CEI IEC 60287-2-1 è valido per una temperatura dell'isolante pari a 90 °C. Il peso specifico  $p_{sp}$  invece lo si considera costante.

L'assunzione preliminare di voler estendere le proprietà dell'XLPE a 150 °C, valide certamente fino a 90 °C, tramite delle formule linearizzate, è un'ipotesi che si può considerare cautelativa e che sarà oggetto di valutazione nell'analisi di sensitività. Di seguito si riporta la Tabella 3.20 di valori puntuali di  $c_{sp}$  e  $\rho_T$  dell'XLPE a

determinate temperature.

**Tabella 3.20:** Valori puntuali di  $\rho_T$  e  $c_{sp}$  a specifiche temperature

Temperatura isolante °C	$\rho_T \frac{K \cdot m}{W}$	$c_{sp} \frac{J}{K \cdot g}$
25	4,484	2,034
55	3,745	2,976
90	3,571	4,049

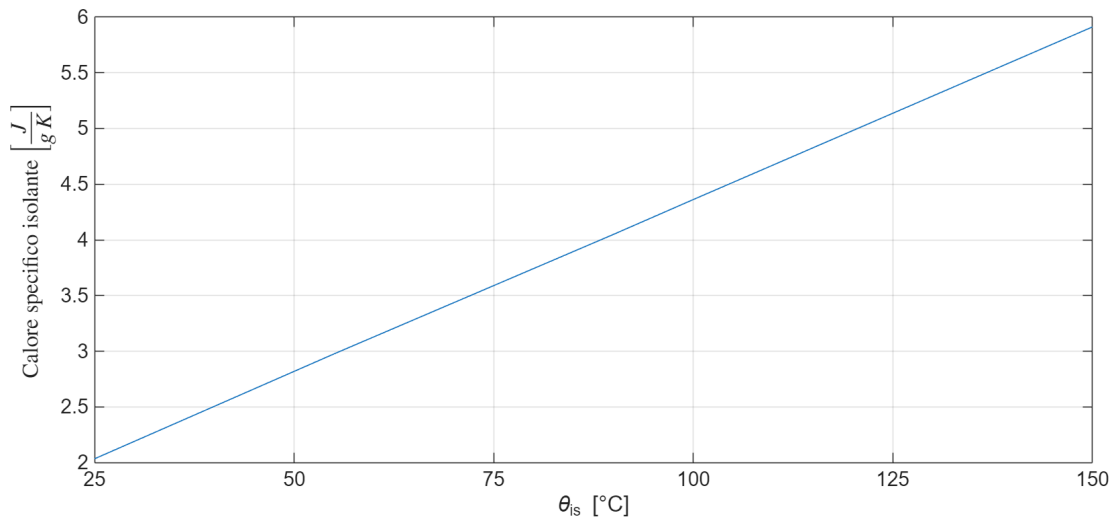
Si rammenta l'espressione linearizzata utilizzata per valutare la variazione del calore specifico dell'isolante:

$$c_{sp} = 0,031 \cdot \theta_{is} + 1,259$$

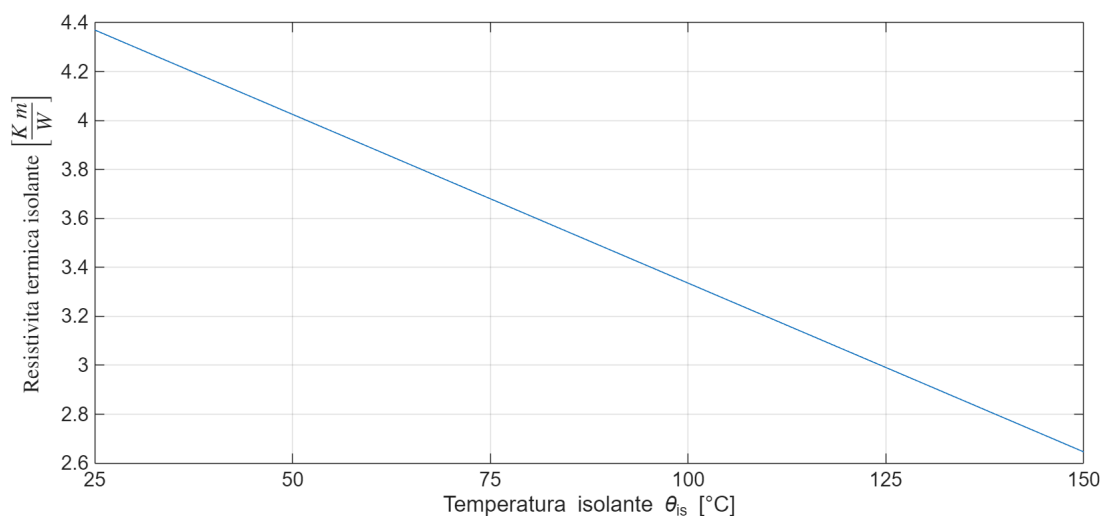
Dai valori di  $\rho_T$  riportati in Tabella 3.20, si esprime analogamente al calore specifico un'espressione di linearizzazione della resistività termica, valida fino a 150 °C:

$$\rho_T = -0,01379 \cdot \theta_{is} + 4,71456 \quad (3.14)$$

Per entrambe le linearizzazioni, si riportano in Figura 3.17 e Figura 3.18 gli andamenti tra le temperature di 25 °C e 150 °C.



**Figura 3.17:** Andamento del calore specifico  $c_{sp}$



**Figura 3.18:** Andamento della resistività termica  $\rho_T$

Basandosi sui valori riportati in Tabella 3.20, si implementa un valore variabile della diffusività  $\alpha$  sfruttando l'equazione 3.13. Non si riporta l'espressione della linearizzazione.

L'analisi di sensitività vedrà variare i valori di  $\rho_T$  e  $c_{sp}$  sulla base delle linearizzazioni, con conseguente calcolo di  $T_1$  e  $C_2$ .

## Valutazione della resistenza termica $T_1$ e della capacità termica $C_2$ dell'isolante

Progressivamente al calcolo di  $\rho_T$  e  $c_{sp}$ , per ciascuna temperatura nell'intervallo  $90\text{ }^\circ\text{C}/150\text{ }^\circ\text{C}$  si calcolano la resistenza termica  $T_1$  (2.12) e la capacità termica  $C_2$  (3.10) dello strato isolante, osservando la variazione di temperatura dell'isolante in funzione di queste modifiche.

Nel catalogo di riferimento del cavo [5] è riportato il peso totale (inteso come somma di conduttore ed isolante), dal quale si può calcolare il peso totale dell'isolante e valutarne il peso specifico: in questo caso, il peso specifico ottenuto si riferisce alla tipologia di isolante EI 111. Si riportano in Tabella 3.21 il peso totale del cavo, del peso totale dell'isolante e del suo peso specifico  $p_{sp,is}$  considerando un peso totale del conduttore pari a

$$P_{cu} = p_{sp,cu} \cdot S_{cu} \cdot l_{cu} = 2150,4 \frac{g}{m}$$

per una sezione del conduttore  $S_{cu} = 240 \text{ mm}^2$  e una lunghezza  $l_{cu}$  unitaria.

**Tabella 3.21:** Caratteristiche di peso isolante EI 111

Peso totale $\frac{g}{m}$	Peso isolante $\frac{g}{m}$	$p_{sp,is} \frac{Kg}{m^3}$
2539	387,838	1454,17

Per il calcolo della resistenza  $T_1$  e la capacità termica dell'isolante si richiamano rispettivamente le equazioni 2.12 e 3.10.

## Risultati

I valori attesi di  $\rho_T$  e  $c_{sp}$  alle diverse temperature  $\theta_{is,n}$ , si interpretano come i valori di resistività e calore specifico dell'isolante per una temperatura massima ammissibile dell'isolante pari appunto a  $\theta_{is,n}$ .

Gli andamenti di resistività termica e calore specifico sono ovviamente lineari, e in Tabella 3.22 si riportano i rispettivi valori alle temperature di 90 e 150 °C.

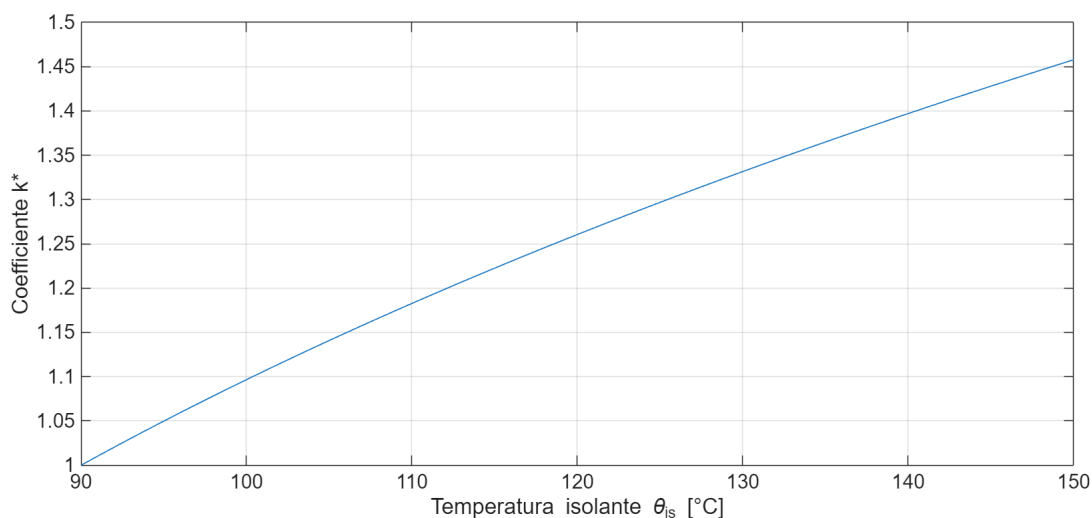
**Tabella 3.22:** Valori estremi di  $\rho_T$  e  $c_{sp}$

Temperatura $\theta_{is}$ [°C]	Resistività $\rho_T$ [ $\frac{K \cdot m}{W}$ ]	Calore specifico $c_{sp,is}$ [ $\frac{J}{K \cdot g}$ ]
<b>90</b>	3,571	4,049
<b>150</b>	2,646	5,912

In Figura 3.19 l'andamento del fattore  $k^*$  al variare della massima temperatura ammissibile.

Le simulazioni sul circuito LTspice di riferimento (Figura 3.15) saranno così svolte:

- scelta della massima temperatura ammissibile dell'isolante  $\theta_{is}$  che si vuole ottenere;
- nel circuito, si imposta il valore di resistività termica  $\rho_T$  relativo alla temperatura. Le simulazioni delle sezioni precedenti sono sempre state svolte con un valore di  $\rho_T$  costante ( $3,5 \frac{K \cdot m}{W}$ )[12];



**Figura 3.19:** Fattore  $k^*$

- valutazione della portata del cavo secondo l'equazione 2.9: per il cavo singolo, si continuano a considerare pari a 1 tutti i diversi coefficienti  $k$  ad eccezione del fattore  $k^*$ , il quale verrà valutato in base al valore calcolato alla relativa massima temperatura ammissibile prevista e ai riferimenti in Tabella A.3;
- modifica del coefficiente di scambio termico  $h$  della resistenza esterna  $T_4'''$ , poiché in base alla massima temperatura ammissibile che si vuole ottenere cambia il termine  $\Delta\theta$  della massima differenza di temperatura rispetto il riferimento di 45 °C.

**Tabella 3.23:** Risultati di  $\theta_{is}$  a diverse  $I_{corr}$

$\theta_{max,is}$ [°C]	$k^*$	$I_{corr}$ [A]	$\rho_T$ [ $\frac{K \cdot m}{W}$ ]	$(\Delta\theta_s)^{(\frac{1}{4})}$	$\theta_{is}$ [°C]
90	1	675	3,5	2,315	92,12
105	1,14	769,5	3,267	2,45	105,70
120	1,26	850,5	3,059	2,57	118,59
140	1,4	945	2,794	2,7	135,25
150	1,46	985,5	2,646	2,75	145,58

Si riportano in Tabella 3.23 i valori di temperatura dell'isolante  $\theta_{is}$  calcolati su LTspice, con i riferimenti della portata e del fattore  $k^*$  considerati; si rammentano le caratteristiche del cavo in Tabella 3.2, con  $I_{cavo} = 675 \text{ A}$  (Tabella A.2). Si riporta per ciascun valore di temperatura massima ammissibile  $\theta_{max,is}$  il relativo fattore di scambio termico  $h$ .

In prima analisi osservando i dati di  $\theta_{is}$  si può affermare che i valori di resistività e calore specifico inseriti sono plausibili: le temperature dell'isolante convergono alla massima ammissibile.

### 3.6 Modello termico per cavo dotato di guaina

Si considera il cavo in Figura 3.20.

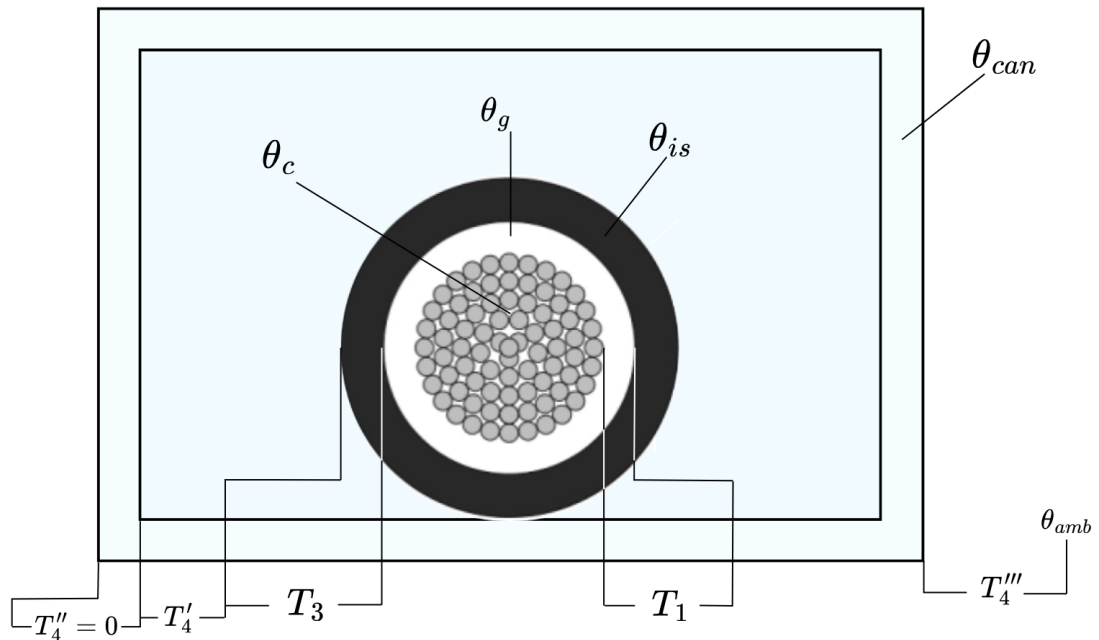


Figura 3.20: Spaccato in sezione cavo dotato di guaina

Il modello termico del cavo è riportato in Figura 3.21.

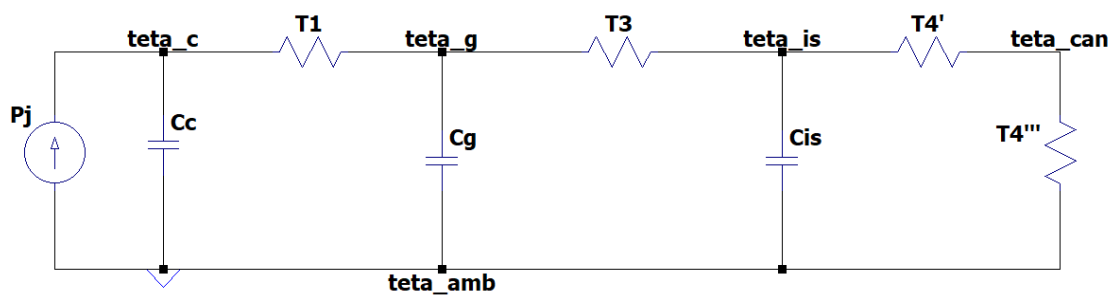


Figura 3.21: Modello termico cavo dotato di guaina

Si riportano in Tabella 3.24 le caratteristiche geometriche dei vari strati del cavo [5]. I dati riportati nelle precedenti tabelle di introduzione al cavo e non presenti

nella seguente, sono invariati per questo cavo e di conseguenza sottintesi.

**Tabella 3.24:** Caratteristiche costruttive del cavo dotato di guaina a  $240 \text{ mm}^2$

Costruttore	<b>SIECHEM</b>
Tensione di riferimento	<b>3,6/6 kV</b>
Sezione conduttore	<b>240 <math>\text{mm}^2</math></b>
Raggio conduttore $r_c$	<b>8,74 mm</b>
Diametro minimo/massimo cavo	<b>29,4/34,4 mm</b>
Spessore guaina	<b>1,9 mm</b>
Spessore isolante	<b>3,4 mm</b>
Temperatura massima guaina/isolante	<b>120°C</b>
Tipologia guaina	<b>XLPE/EM 106 [2]</b>
Tipologia isolante	<b>XLPE/EI 111 [2]</b>

In Tabella 3.25 si rammentano i valori dei coefficienti  $k$  considerati e le portate  $I_{corr}$  sulla base della massima temperatura ammissibile dell'isolante.

**Tabella 3.25:** Coefficienti  $k$  e portata del cavo dotato di guaina

sezione	$I_{cable}$	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$	$k_5$	$k^*$	$I_{corr}$
$240 \text{ mm}^2$	675 A	1	1	1	1	1	1/1,26	675/850,5 A

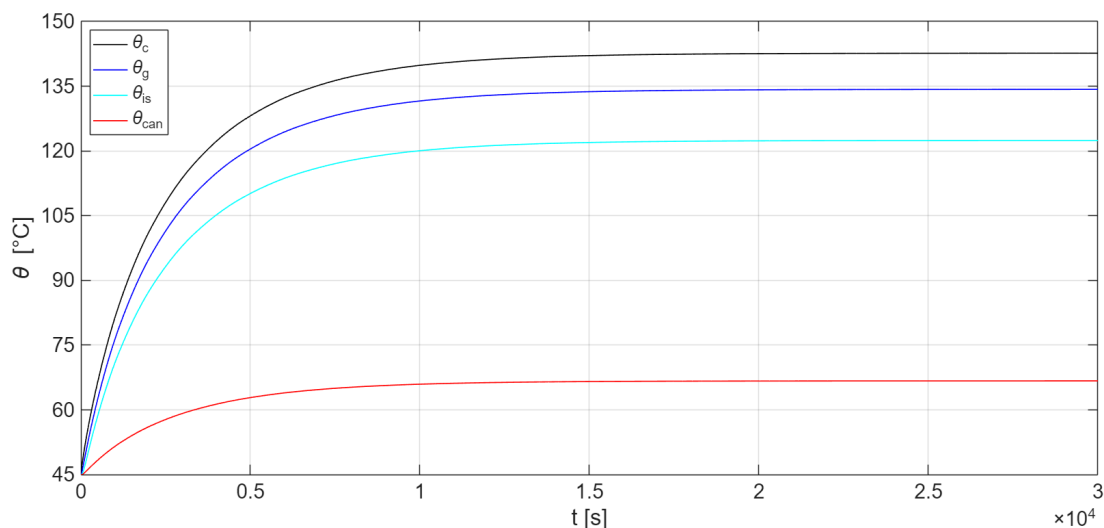
I procedimenti seguiti e le formule utilizzate al calcolo delle resistenze e delle capacità termiche sono i medesimi già riportati nelle precedenti sezioni. Si riportano nelle tabelle successive i valori delle temperature ottenute da simulazioni effettuate su LTspice; è specificato il tipo di guaina e la portata dei cavi, oltre ad effettuare la prova per le correnti in Tabella 1.3.

Sono specificati i valori di resistività ( $\rho_g$  e  $\rho_{is}$ ) e calore specifico ( $c_{sp,g}$  e  $c_{sp,is}$ ) di guaina e isolante, considerando lo stesso materiale per entrambi. Di conseguenza,  $\rho_g = \rho_{is}$  e  $c_{sp,g} = c_{sp,is}$ .

Si riporta in Figura 3.22 l'andamento delle temperature  $\theta_c$ ,  $\theta_g$ ,  $\theta_{is}$  e  $\theta_{can}$ , per una temperatura massima ammissibile del cavo pari a  $120 \text{ °C}$  e una portata  $I_{corr} = 850,5 \text{ A}$  ( $k^* = 1,26$ ).

**Tabella 3.26:** Valori di  $\rho_g$ ,  $\rho_{is}$ ,  $c_{sp,g}$  e  $c_{sp,is}$

Temperatura $\theta_{is}$ [°C]	Resistività $\rho_g = \rho_{is}$ [ $\frac{K \cdot m}{W}$ ]	Calore specifico $c_{sp,g} = c_{sp,is}$ [ $\frac{J}{K \cdot g}$ ]
<b>90</b>	3,571	4,049
<b>120</b>	3,059	4,982



**Figura 3.22:** Andamento temperature ai nodi del modello termico del cavo dotato di guaina

Considerando sempre una temperatura massima del cavo pari a 120 °C, si riportano in Tabella 3.27 i valori di temperatura per le correnti definite in Tabella 1.3.

Si propone infine un confronto dei risultati del modello termico del cavo secondo la norma CEI IEC 60287 ( $T'_4$  e  $T''_4$  singolarmente esplicitate) per il cavo privo di guaina (Tabella 3.10) e del circuito del cavo dotato di guaina. Si considerano i cavi con sezione  $S = 240 \text{ mm}^2$  con temperatura massima ammissibile pari a 90 °C.

**Tabella 3.27:** Temperature alle diverse correnti, cavo dotato di guaina

$t$ [s]	0	10	30	60	300	600	900	1500	1800	3600	<b>regime</b>
$I$ [A]	487,77	482,78	478,52	477,36	476,11	473,38	462,59	445,84	402,05	339,98	<b>850,5</b>
$\theta_c$ [°C]	45	45,24	45,65	46,19	49,51	52,77	55,07	58,18	56,94	56,59	<b>142,69</b>
$\theta_g$ [°C]	45	45,04	45,22	45,57	48,49	51,59	53,8	55,78	56,82	55,65	<b>134,29</b>
$\theta_{is}$ [°C]	45	45,002	45,04	45,19	47,56	50,35	52,38	55,14	54,32	54,33	<b>122,43</b>
$\theta_{can}$ [°C]	45	45,001	45,01	45,05	45,61	46,29	46,79	47,48	47,29	47,28	<b>66,74</b>

**Tabella 3.28:** Confronto risultati dei circuiti con  $T_4$  unita e  $T_4'/T_4'''$  singolarmente esplicitate

$t$	<b>Cavo senza guaina</b>		<b>Cavo dotato di guaina</b>	
	<b>1500 s</b>	<b>regime</b>	<b>1500 s</b>	<b>regime</b>
$I$ [A]	445,84	675	445,84	675
$\theta_c$ [°C]	60,28	104,7	58,18	106,23
$\theta_g$ [°C]	-	-	55,78	100,76
$\theta_{is}$ [°C]	58,11	95,64	55,14	93,07
$\theta_{can}$ [°C]	53	76,35	47,48	58,88

## Capitolo 4

# Implementazione resistenza esterna $T_4'''$

Al fine di comprendere più puntualmente quali siano i contributi di convezione ed irraggiamento, si vuole modificare la modellizzazione della resistenza termica esterna  $T_4'''$ . La costruzione del modello termico del cavo rimane fedele alle indicazioni delle norme CEI IEC 60287-1-1 e CEI IEC 60287-2-1; la resistenza termica  $T_1$  e le capacità termiche  $C_1$  e  $C_2$ , così come il generatore di corrente per le perdite Joule  $P_j$ , rimangono invariate nella loro interpretazione ed implementazione. L'obiettivo delle simulazioni rimane il medesimo, ovvero riscontrare nei risultati se è possibile in definitiva ridurre la sezione dei cavi rimanendo entro i limiti termici ammissibili.

Prendendo come riferimento il circuito proposto negli articoli [10] e [20], si valuta una nuova formulazione del coefficiente di scambio termico  $h$  [9], al fine di valutare la convezione naturale e l'irraggiamento solare sulla canalina.

La norma CEI IEC 60287 valuta nell'espressione del coefficiente  $h$  entrambi i contributi di convezione (naturale) e irraggiamento; tuttavia, non esprimendoli singolarmente, non si riesce con tale modello termico a osservare i rispettivi impatti.

## 4.1 Cenni di convezione termica

La convezione descrive lo scambio di energia tra una superficie e un fluido in moto o in quiete che agisce su di essa. La convezione tra un oggetto e un fluido varia a seconda della forma della superficie di tale oggetto (piana, cilindrica, sferica etc.) e in virtù del fluido considerato [9].

Si può ritenere la canalina metallica come una superficie orizzontale piana, isoterma e di spessore trascurabile, poiché come anche previsto dalla norma la resistenza termica stessa della canalina  $T_4''$  è nulla. Il fluido che lambisce la superficie della canalina è l'aria. Si può dunque parlare di ventilazione naturale o forzata dell'aria sulla canalina, a seconda delle condizioni di quiete o di moto della canalina; difatti, calandosi nel caso della canalina installata sul tetto della motrice ferroviaria, si possono distinguere il caso in cui ipoteticamente il treno sia fermo e la canalina sia sottoposta ad una convezione (ventilazione) naturale innescata dalla differenza di temperatura tra la canalina stessa e l'aria e, allo stesso modo, si può parlare di convezione (ventilazione) forzata qualora il treno sia in moto ad una sua determinata velocità, valutando l'aria sulla canalina avente una velocità circa pari alla velocità del treno in verso opposto al moto. Nel capitolo non sarà analizzato il caso di ventilazione forzata, poiché andrebbero considerate una notevole quantità di approssimazioni e semplificazioni, tali da ridurre il problema ad un caso troppo diverso dalla realtà; per completezza, se ne riportano soltanto dei cenni teorici. Tutte le informazioni di questo paragrafo fanno riferimento al libro di testo riportato in bibliografia [9].

## Convezione forzata

Si definisce  $u_\infty$  come la velocità dell'aria in condizioni di *flusso libero*; ad essa è associato il parametro  $\delta$ , ovvero il valore di  $y$  in un riferimento cartesiano tale che  $\frac{u}{u_\infty} = 0,99$ , con  $u$  velocità effettiva sulla superficie. Infine, è definito  $\tau$  come lo *shear stress* (sforzo di taglio) dipendente dalla viscosità dinamica  $\mu$  e dalla velocità, al fine di calcolare il coefficiente di frizione locale  $C_f$ . Questi parametri definiscono il profilo di velocità.

Al profilo di velocità si può associare il profilo di temperatura, che vede definita  $T_\infty$  come la temperatura dell'aria in condizioni di *flusso libero* e  $\theta_s$  la temperatura della superficie lambita dall'aria; con  $\delta_t$  si indica il *thermal boundary layer*, quel valore tale per cui  $\frac{\theta_s - \theta}{\theta_s - \theta_\infty} = 0,99$ . Si definisce inoltre, in dipendenza di  $x$ , sempre in un riferimento cartesiano, il flusso termico totale:

$$q'' = -k_f \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h(\theta_s - T_\infty) \quad (4.1)$$

dove  $k_f$  è la conducibilità termica dell'aria e  $h$  il coefficiente di scambio termico. L'equazione 4.1 indica che sulla superficie lo scambio termico avviene solo per conduzione, poiché in prossimità della superficie la velocità dell'aria è nulla.

L'obiettivo di questa analisi è stabilire un valore il più adeguato possibile di  $h$ . È fondamentale capire, che si stia studiando il problema in condizioni di quiete o di moto del treno, se il flusso d'aria è di tipo laminare o turbolento. Sulla base della velocità dell'aria in flusso libero  $u_\infty$ , la superficie lambita è sottoposta tipicamente ad una porzione lunga  $x_c$  lungo  $x$  di moto laminare, per la quale l'aria segue un flusso ordinato, seguita da una zona di transizione e infine dalla zona di moto turbolento, nella quale l'aria si muove in maniera caotica. Il punto di passaggio tra zona laminare e zona turbolenta è come detto il punto  $x_c$ , valutato tramite il **numero di Reynolds**: esso è definito come il rapporto tra le forze d'inerzia e quelle viscosive, la cui formulazione è riportata nell'equazione 4.2.

$$Re_x = \frac{\rho \cdot u_\infty \cdot x_c}{\mu} \quad (4.2)$$

Il valore di Reynolds assunto tipicamente come di passaggio da moto laminare a turbolento è pari a  $5 \cdot 10^5$ , dal quale si ricava la distanza di transizione  $x_c$ . Nell'equazione 4.2,  $\rho$  è la densità dell'aria mentre  $\mu$  è la viscosità dinamica del fluido. Il numero di Reynolds per un qualsiasi punto  $x$  da un bordo della piastra può anche essere descritto come:

$$Re = \frac{\rho \cdot u_\infty \cdot x}{\mu} = \frac{u_\infty \cdot x}{\nu} \quad (4.3)$$

con  $\nu$  indicante la viscosità cinematica del fluido.

Dall'equazione 4.1 si può anche ricavare il **numero di Nusselt**, definito come il rapporto tra il gradiente di temperatura che si verifica effettivamente sulla superficie e un gradiente di riferimento. Nell'equazione 4.4 la formulazione del numero di Nusselt per moto esterno, dove un corpo qualunque è investito da un fluido in movimento.

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} = \frac{-\frac{\partial T}{\partial y} |_{y=0}}{\frac{\theta_s - T_\infty}{L_c}} \quad (4.4)$$

$L_c$  rappresenta la lunghezza caratteristica dell'oggetto sottoposto al moto del fluido.

Come ultimo coefficiente notevole necessario allo studio della convezione, si definisce il **numero di Prandtl**, che in generale esprime il rapporto tra lo spessore dello strato limite dinamico e quello termico. La sua espressione vale:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu \cdot c}{k} \quad (4.5)$$

con  $\alpha$  che è la diffusività termica del fluido. Il numero di Prandtl è proprio del fluido ed è presente in tabelle, per il relativo fluido in diverse condizioni di temperatura; tendenzialmente per i gas,  $Pr \approx 1$ . In generale, si può anche definire il numero di Prandtl come:

$$Pr^n = \frac{\delta}{\delta_t} \quad (4.6)$$

con  $\delta$  spessore dello strato dinamico,  $\delta_t$  spessore dello strato termico e  $n$  esponente positivo.

## Convezione forzata su lastra piana

Tenendo conto delle dovute approssimazioni, si può considerare la canalina metallica come un piano orizzontale isotermico, sul quale agisce un flusso di aria parallelo alla superficie. L'ipotesi di una differenza di temperatura nulla tra parete inferiore e superiore del piano è da riferirsi alle indicazioni della norma CEI EN 60287, tale che per le canaline metalliche la resistenza termica stessa  $T_4''$  è nulla. Di conseguenza, si trascura anche lo spessore del piano orizzontale.

Per il calcolo del coefficiente di scambio termico  $h$  è innanzitutto necessario distinguere le formulazioni per zona laminare e zona turbolenta. Si rammenta che il passaggio da moto laminare a moto turbolento avviene per quel valore  $x_c$  tale per cui  $Re_{x_c} \approx 5 \cdot 10^5$ .

- **Moto laminare**

Si definisce il numero di Nusselts locale per  $Pr > 0,6$ :

$$Nu_{x,lam} = \frac{h_x \cdot x}{k} = 0,332 Re_x^{0,5} Pr^{0,33} \quad (4.7)$$

Il valore medio del coefficiente di scambio termico  $h$  è definito come:

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{k}{x} Nu_x dx = \frac{k}{L} 0,664 Re_x^{0,5} Pr^{0,33} \quad (4.8)$$

da cui si ricava il numero di Nusselts medio per  $Pr \geq 0,6$ :

$$\bar{Nu} = \frac{\bar{h}L}{k} = 0,664 Re_x^{0,5} Pr^{0,33} \quad (4.9)$$

- **Moto turbolento**

Anche in questo caso si definisce il numero di Nusselts locale valido per la regione turbolenta:

$$Nu_{x,turb} = 0,0296 Re_x^{0,8} Pr^{0,33} \quad (4.10)$$

Il coefficiente di scambio termico medio  $\bar{h}$  e il numero di Nusselts medio  $\bar{Nu}$  bisogna considerare che fino alla distanza  $x_c$  il flusso è di tipo laminare:

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \left( \int_0^{x_c} \frac{k}{x} Nu_{x,lam} dx + \int_{x_c}^L \frac{k}{x} Nu_{x,turb} dx \right) \quad (4.11)$$

da cui:

$$\bar{N}u = (0,037Re_l^{0,8} - 871)Pr^{0,33} \quad (4.12)$$

L'espressione 4.12 è valida nelle seguenti condizioni:

$$0,6 \leq Pr \leq 60$$

$$5 \cdot 10^5 \leq Re_L \leq 10^8$$

$$Re_{x_c} = 5 \cdot 10^5$$

La temperatura alla quale si valutano le proprietà termofisiche in cui avviene la convezione è la temperatura dello strato limite, e in assenza di indicazioni che ne specificano una si utilizza normalmente la temperatura di film, definita con l'espressione 4.13.

$$\theta_f = \frac{T_p + T_\infty}{2} \quad (4.13)$$

Per questo tipo di convezione, la lunghezza caratteristica  $L_c$  corrisponde alla lunghezza della piastra. Per la convezione naturale, come si vedrà, sarà intesa diversamente.

## Convezione naturale

La valutazione della convezione naturale può risultare più complessa della convezione forzata. In generale, si può affermare che la convezione naturale è dovuta da gradienti di densità in cui il campo di moto e quello termico sono dipendenti l'uno dall'altro; in altri termini, il campo di temperatura genera il campo di moto che a sua volta modifica quello termico [21].

Come fattore di distinzione tra moto laminare e moto turbolento si utilizza il **numero di Rayleigh** (espressione 4.14), ottenuto come prodotto tra il *numero di Grashof* e il numero di Prandtl:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta L_c^3(\theta_s - T_\infty)}{\nu\alpha} \quad (4.14)$$

con  $g$  accelerazione di gravità,  $\beta$  modulo di dilatazione termica che per un gas perfetto è  $\beta = \frac{1}{T_\infty}$  e  $L_c = \frac{A}{2p}$  lunghezza caratteristica dell'oggetto indicata come rapporto tra la sua area  $A$  e il perimetro  $2p$ . Un valore di riferimento del numero di Rayleigh che distingue il moto da laminare a turbolento è  $Ra \approx 10^7$ .

Considerando una convezione naturale esterna si possono distinguere diverse equazioni per il calcolo del numero di Nusselts, a seconda delle condizioni di temperatura delle superfici del piano orizzontale e del tipo di moto.

- **Superficie superiore calda o superficie inferiore fredda**

In base al numero di Rayleigh  $Ra$ , si distinguono due espressioni:

$$\bar{Nu} = 0,54Ra_L^{0,25} (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7, Pr \geq 0.7) \quad (4.15)$$

$$\bar{Nu} = 0,15Ra_L^{0,33} (10^7 \leq Ra_L \leq 10^{11}, \forall Pr) \quad (4.16)$$

- **Superficie superiore fredda o superficie inferiore calda**

Si calcola un unico numero di Nusselt:

$$\bar{Nu} = 0,52Ra_L^{0,2} (10^4 \leq Ra_L \leq 10^9, Pr \geq 0.7) \quad (4.17)$$

Il numero di Nusselt medio si può generalizzare in un'unica espressione valida per la convezione naturale, dalla quale si può successivamente ricavare il coefficiente di scambio termico medio  $\bar{h}$ . L'espressione è la seguente:

$$\bar{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} = C \cdot Ra_L^n \quad (4.18)$$

con  $n = 0,25$  per il moto laminare e  $n = 0,33$  per il moto turbolento. Di conseguenza, ribaltando l'equazione 4.18, si ottiene l'espressione per il coefficiente di scambio termico medio  $\bar{h}$ :

$$\bar{h} = \bar{Nu}_L \frac{k}{L} \quad (4.19)$$

con  $k$  conducibilità termica dell'aria alla temperatura  $\theta_f$  ed  $L = \frac{A}{2p}$ .

## 4.2 Cenni di irraggiamento termico

L'irraggiamento termico è un meccanismo di trasmissione dell'energia sotto forma di calore, e a differenza della convezione può avvenire anche in assenza di una massa o di un supporto materiale. La teoria riguardo questa modalità di scambio del calore è vasta, e nel caso in esame ci si concentra principalmente sull'irraggiamento solare, considerando la canalina metallica esposta alle radiazioni provenienti dal sole.

In generale, la valutazione dell'energia radiativa emessa (o assorbita) da una superficie deve tenere conto che le caratteristiche di scambio termico sono legate sia alla direzione in cui il corpo emette/assorbe sia alla lunghezza d'onda, e dunque alla frequenza, dell'onda radiativa. Dal punto di vista ingegneristico, la proprietà energetica fondamentale più importante risulta essere il **potere emissivo**  $E$ , ovvero l'energia emessa da una superficie [21]. Può essere valutato su base *spettrale* (o monocromatica) e *globale*. Il potere emissivo è definito come l'integrale dell'*intensità di radiazione*  $I(\lambda)$ , che a sua volta dipende in maniera inversamente proporzionale dal coseno dell'angolo d'incidenza del raggio solare sulla superficie. Nota dunque la funzione di  $I(\lambda)$  è possibile ricavare il *potere emissivo monocromatico*  $E_\lambda(\lambda)$ , e di conseguenza il potere emissivo globale  $E$ :

$$E = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (4.20)$$

L'unità di misura del potere emissivo è  $\frac{W}{m^2}$ .

Analogamente, è possibile definire l'**irradianza**  $G$ , ovvero quanto la superficie è irradiata dall'ambiente circostante. Anche in questo caso l'irradianza dipende dall'intensità di radiazione, dalla quale si può ricavare l'*irradianza monocromatica*  $G_\lambda(\lambda)$  e di conseguenza l'irradianza globale  $G$ :

$$G = \int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (4.21)$$

Infine, si definisce la **radiosità**  $J$  come la radiazione termica che lascia una superficie per unità di tempo e di area. La radiosità dipende sempre dall'intensità di radiazione secondo differenti coordinate spaziali rispetto  $E$  e  $G$ , da cui si ricava

la *radiosità monocromatica*  $J_\lambda(\lambda)$  e la *radiosità globale*  $J$ :

$$J = \int_0^\infty J_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (4.22)$$

Un modello importante volto a semplificare il problema dell'irraggiamento è il **corpo nero**, definito come un corpo avente le seguenti caratteristiche:

- è in grado di assorbire tutta la radiazione incidente;
- nessuna superficie può emettere di più di un corpo nero, indipendentemente dalla temperatura e dalla lunghezza d'onda  $\lambda$  assegnata;
- è un emettitore diffuso, l'emissione non è funzione della direzione.

Il potere emissivo totale del corpo nero è definito dalla *legge di Planck*:

$$E_n = \sigma T^4 \quad (4.23)$$

con  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$  *costante di Stefan-Boltzmann*.

Il modello del corpo nero è poco applicabile alle superfici reali, che per definizione di corpo nero emettono meno alla stessa temperatura. Si definisce pertanto l'**emissività emisferica monocromatica** come rapporto tra il potere emissivo monocromatico  $E_\lambda(\lambda)$  e quello del corpo nero  $E_{\lambda,n}(\lambda)$ , e in maniera analoga si definisce l'**emissività emisferica globale**:

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{E_n(T)} \quad (4.24)$$

Da queste considerazioni si può dedurre che l'emissività del corpo nero è unitaria e che il potere emissivo globale può essere riscritto nella seguente forma dalla legge di Planck (4.23):

$$E(T) = \epsilon(T) \sigma \cdot T^4 \quad (4.25)$$

Un altro coefficiente importante è il **fattore di assorbimento**  $\alpha$ , definito tramite la *legge di Kirchhoff*, che afferma che a una temperatura fissata  $T$ :

$$\epsilon_{\lambda,\theta}(T) = \alpha_{\lambda,\theta}(T) \quad (4.26)$$

intesi  $\epsilon_{\lambda,\theta}$  e  $\alpha_{\lambda,\theta}$  in termini monocromatici e direzionali. La dimostrazione prevede che in restrittive ipotesi l'irradianza assorbita è uguale all'energia emessa da un volume di controllo di area  $A_1$  e irradianza  $G = E_n(\theta_s)$ :

$$\alpha_1 G A_1 = E(T_1) A_1 \quad (4.27)$$

Considerando  $T_1 = \theta_s$ , si ottiene

$$\alpha_1 = \frac{E_1(\theta_s)}{E_n(\theta_s)} \quad (4.28)$$

che per l'equazione 4.24 risulta di conseguenza  $\epsilon_1 = \alpha_1$ .

Per il corpo nero vale  $\epsilon = \alpha$  come coefficienti globali, e in generale vale  $\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$  qualora entrambi i fattori siano indipendenti da  $\lambda$ : in questo caso si parla di *superficie grigia*.

Per quanto riguarda le superfici reali, queste considerazioni non valgono in assoluto; tuttavia, è frequente che  $\epsilon_\lambda$  e  $\alpha_\lambda$  siano costanti in un campo di lunghezze d'onda: dunque si può definire come superficie grigia anche una superficie reale in cui i due fattori sono costanti nel campo di lunghezze d'onda in cui assorbe ed emette. Inoltre, se sono anche indipendenti dalla direzione dell'onda radiativa, si può definire la superficie come *grigia e diffusa*, comportandosi come un corpo nero alla stessa temperatura al netto dell'emissività  $\epsilon$ . Nella valutazione del coefficiente di scambio termico per irraggiamento  $h_{rad}$  si considererà la canalina come una superficie grigia e diffusa, in cui i coefficienti  $\epsilon$  e  $\alpha$  sono uguali, al fine di semplificare la trattazione.

Il calcolo del coefficiente di scambio termico  $h_{rad}$  si sviluppa dall'equazione 4.25 del potere emissivo globale. Considerando l'espressione:

$$q' = h_{rad}(\theta_s - \theta_\infty) \quad (4.29)$$

con  $q'$  flusso termico e inteso come il potere emissivo globale  $E(T)$ ,  $\theta_s$  temperatura della superficie (la canalina) e  $\theta_\infty$  la temperatura dell'aria, si ottiene

$$h_{rad} = \frac{E(T)}{\theta_s - \theta_\infty} = \frac{\epsilon \sigma (\theta_s^4 - \theta_\infty^4)}{\theta_s - \theta_\infty} \quad (4.30)$$

Tramite passaggi matematici si ottiene la formula che verrà in seguito utilizzata nelle simulazioni del coefficiente di scambio termico  $h_{rad}$ :

$$h_{rad} = \epsilon\sigma(\theta_s + \theta_\infty)(\theta_s^2 + \theta_\infty^2) \quad (4.31)$$

La formula della resistenza termica per irraggiamento è la seguente:

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad}A_s} \quad (4.32)$$

con  $A_s$  area della superficie considerata della canalina.

Al netto del coefficiente di emissività scelto, le simulazioni vedranno implementata l'equazione 4.32, e si valuterà il suo impatto rispetto la resistenza termica per convezione.

### 4.3 Modello termico e simulazioni

Si riporta in Figura 4.1 il modello termico con la resistenza  $T_4'''$  implementata.

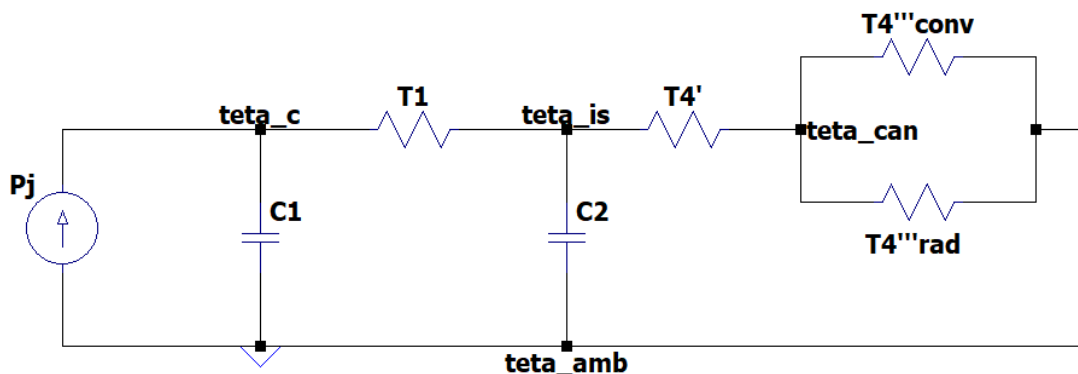


Figura 4.1: Modello termico del cavo

La resistenza termica indicata con  $T_{4,conv}'''$  rappresenta il contributo dato dalla convezione, mentre la  $T_{4,rad}'''$  quello dall'irraggiamento. Per quanto riguarda tutti gli altri componenti del circuito, ci si riferisce alla loro modellizzazione secondo quanto indicato nelle normative CEI IEC 60287-1-1 e 60287-2-1; il cavo analizzato inizialmente è quello a sezione pari a  $240 \text{ mm}^2$ , le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 3.2, Tabella 3.4, Tabella 3.6 e in tutte le altre tabelle delle normative riportate in appendice nel documento.

Riferendosi alla teoria riguardo la convezione descritta precedentemente nel documento, si valutano degli esempi di calcolo applicati su una canalina di determinate dimensioni, in differenti condizioni di temperatura e in base al tipo di convezione. L'irraggiamento, invece, è implementato nel modello di resistenza (4.32) secondo la formula 4.31 del coefficiente di scambio termico  $h_{rad}$ .

Si ipotizza una canalina metallica con le seguenti caratteristiche geometriche:

- lunghezza  $l = 15 \text{ m}$ , larghezza  $w = 0,15 \text{ m}$  e altezza  $D_h = 0,12071 \text{ m}$ ;
- canalina come piano orizzontale isotermico, in accordo con le prescrizioni della norma CEI IEC 60287-2-1 che prevede resistenza termica della canalina stessa  $T_4'' = 0$  se metallica;

- spessore della canalina trascurabile, come conseguenza del secondo punto;

Si specificano le seguenti ipotesi:

- si considera che lo scambio termico sia costante su tutta la superficie della canalina, e di conseguenza anche il fattore  $\bar{h}$ ;
- si considera una iniziale temperatura di film  $\theta_f$  (4.13) necessaria alla scelta delle principali proprietà termofisiche dell'aria per il calcolo dei numeri notevoli. Si considerano tali proprietà costanti durante la simulazione, pur non essendo tuttavia questa un'ipotesi realistica, poiché significa in altri termini che la temperatura  $\theta_s$  non si modifichi nel tempo. Per semplicità di simulazione, verranno comunque mantenuti costanti i parametri termofisici alla temperatura  $\theta_f$ ;

### 1. *Convezione naturale*

Lo studio della convezione naturale della canalina è il caso che più si avvicina alle indicazioni della norma CEI IEC 60287.

In primo luogo, si prevede una temperatura superficiale della canalina costante  $\theta_s = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  e una temperatura di riferimento dell'aria  $\theta_\infty = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Tabella 4.1:** Proprietà termofisiche aria a  $\theta_f = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$

$\rho \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$	$\mu \cdot 10^5 \left[ \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2} \right]$	$\nu \cdot 10^5 \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$	$k \cdot 10^2 \left[ \frac{\text{W}}{\text{K}\cdot\text{m}} \right]$	$\alpha \cdot 10^5 \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right]$	$Pr$
1,094	1,942	1,797	2,782	2,557	0,704

In Tabella 4.1 le principali proprietà termofisiche dell'aria per una temperatura di film  $\theta_f = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Si riportano in Tabella 4.2 i principali risultati delle temperature:

**Tabella 4.2:** Risultati convezione libera a  $\theta_f = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$

$I_{corr}$	$\theta_{is,max} \text{ }^\circ\text{C}$	$Ra$	$\bar{Nu}$	$\bar{h}$	$\theta_c \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{is} \text{ }^\circ\text{C}$	$\theta_{can} \text{ }^\circ\text{C}$
985,5 A	150	$1,37 \cdot 10^5$	10,38	3,89	163,04	145,98	58,97

Per quanto riguarda il contributo dato dall'*irraggiamento solare*, si considera la canalina come una superficie *grigia e diffusa*, ovvero con emissività

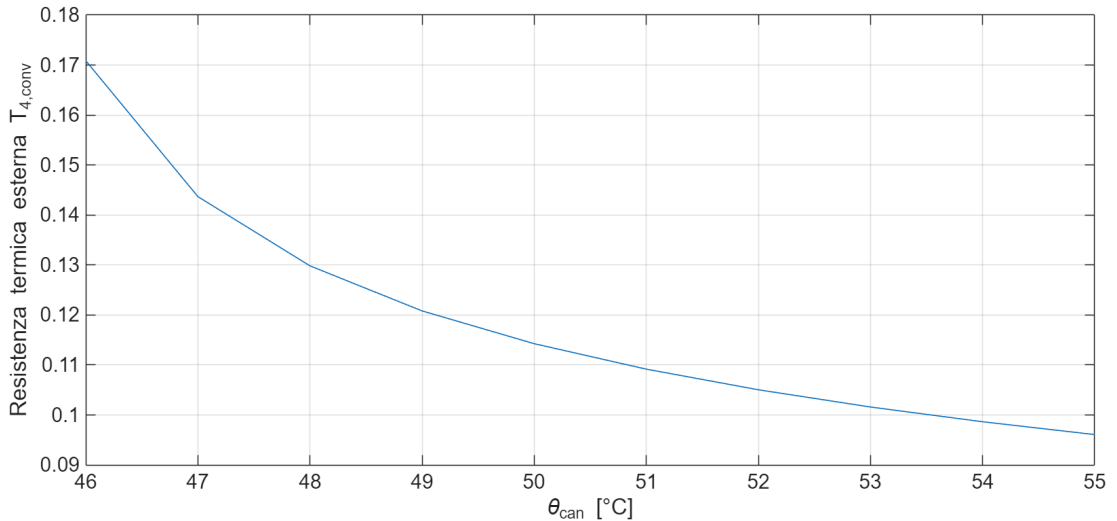
$\epsilon$  e assorbimento  $\alpha$  costanti per il campo di lunghezze d'onda considerate, modellizzando la resistenza in Figura 4.1 secondo le formule 4.31 e 4.32. Per le prime simulazioni si porrà  $\epsilon = \alpha = 1$  come se la canalina fosse un corpo nero; si varierà successivamente  $\epsilon$  osservandone l'impatto.

Al fine di valutare una temperatura variabile sulla canalina, si può procedere in prima approssimazione nel seguente modo: si mantengono costanti le proprietà termofisiche ad una certa temperatura dell'aria (per esempio il riferimento a 45 °C) e nel circuito di riferimento si evidenzia la dipendenza dalla temperatura della canalina. Si ricordano le equazioni 4.14, 4.18 e 4.19 e in riferimento ai valori in Tabella 4.1 si può descrivere il coefficiente di scambio termico medio per convezione naturale come:

$$h = \frac{k}{L_c} \cdot 0,54 \left( \frac{g\beta L_c^3}{\nu\alpha} \right)^{0,25} \cdot (\theta_s - \theta_\infty)^{0,25} = K \cdot (\theta_s - \theta_\infty)^{0,25} \quad (4.33)$$

$K = \frac{k}{L_c} \cdot 0,54 \left( \frac{g\beta L_c^3}{\nu\alpha} \right)^{0,25}$  è una costante che per i dati in Tabella 4.1 è pari a  $K = 7,01$ . La formula per la resistenza termica per la convezione è la 4.34:

$$R = \frac{1}{h \cdot A_s} \quad (4.34)$$



**Figura 4.2:** Andamento resistenza termica  $T_{4,conv}'''$

Utilizzando la formula 4.34, si ottengono i risultati in Tabella 4.3.

**Tabella 4.3:** Risultati convezione libera con  $\theta_s/\theta_{can}$  variabile

$I_{corr}$	$\theta_{is,max}$ °[C]	$\theta_c$ °[C]	$\theta_{is}$ °[C]	$\theta_{can}$ °[C]
675 A	90	98,23	89,32	50,37
769,5 A	105	114,57	103,23	51,91
850,5 A	120	130,54	116,93	53,43
945 A	140	151,16	135,11	55,42
985,5 A	150	160,61	143,55	56,36

Si propone un'analisi similare, variando la temperatura esterna dell'ambiente  $\theta_\infty$  a temperature diverse da 45 °C. Variando  $\theta_\infty$  cambia di conseguenza anche la  $\theta_f$  di film e le proprietà termofisiche dell'aria (non verranno riportate nel documento). In Tabella 4.4 i risultati delle simulazioni.

**Tabella 4.4:** Risultati convezione libera a diverse  $\theta_\infty$

$\theta_\infty$ °[C]	$\theta_c$ °[C]	$\theta_{is}$ °[C]	$\theta_{can}$ °[C]
35	159,09	142,18	54,77
25	158,17	141,27	53,86
15	158,72	140,66	53,25
5	157,11	140,36	52,64
0	156,95	140,05	52,49

Si può osservare in Tabella 4.4 che le temperature dei diversi nodi non variano di molto; il motivo è da ricercarsi nel coefficiente di scambio  $h$  e di conseguenza nella resistenza termica  $T_{4,conv}'''$ .

In Tabella 4.4 il regime termico corrisponde ad un temperatura della canalina  $\theta_{can}$  poco inferiore ai 55 °C; dalla Figura 4.3 si osserva che in corrispondenza di tale temperatura il coefficiente  $h$  ha valori abbastanza simili, che si riflettono nella resistenza termica in Figura 4.4 dove la differenza tra  $T_{inf} = 35$  °C e  $T_{inf} = 0$  °C è minima.

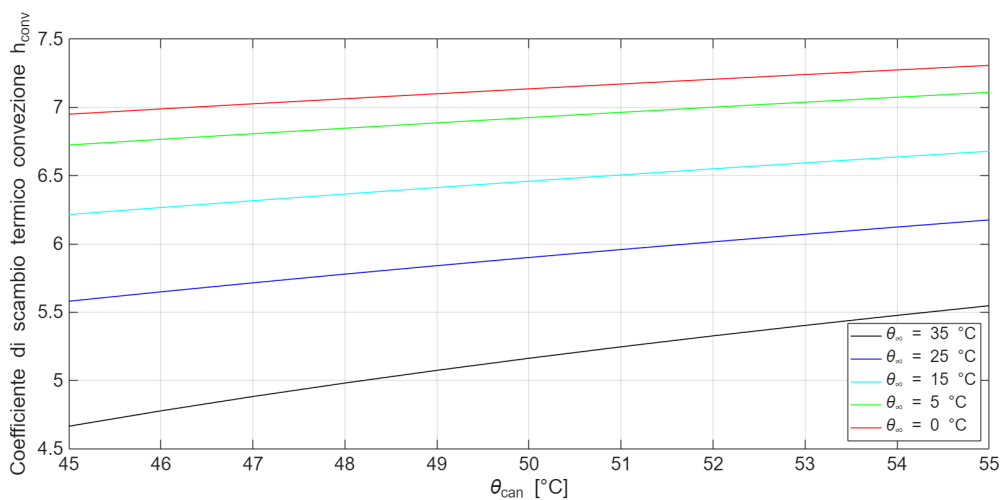


Figura 4.3: Andamento  $h$  a diverse  $\theta_{\infty}$

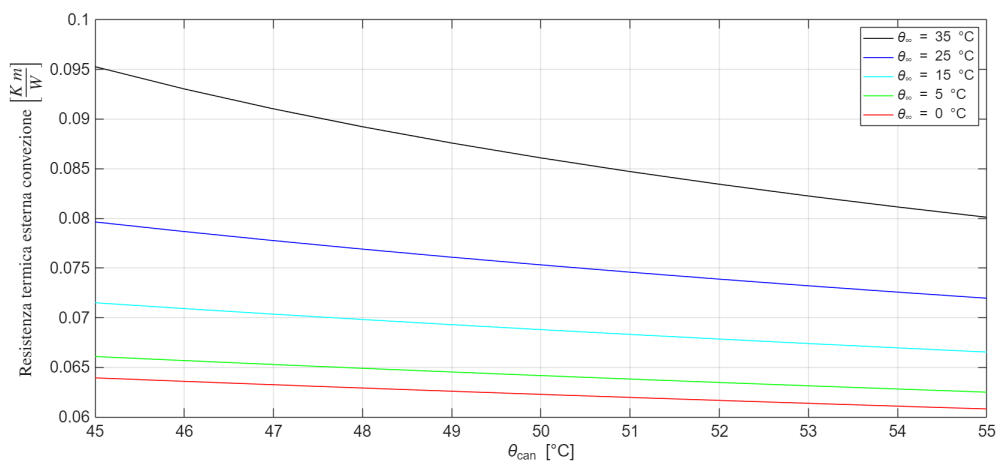


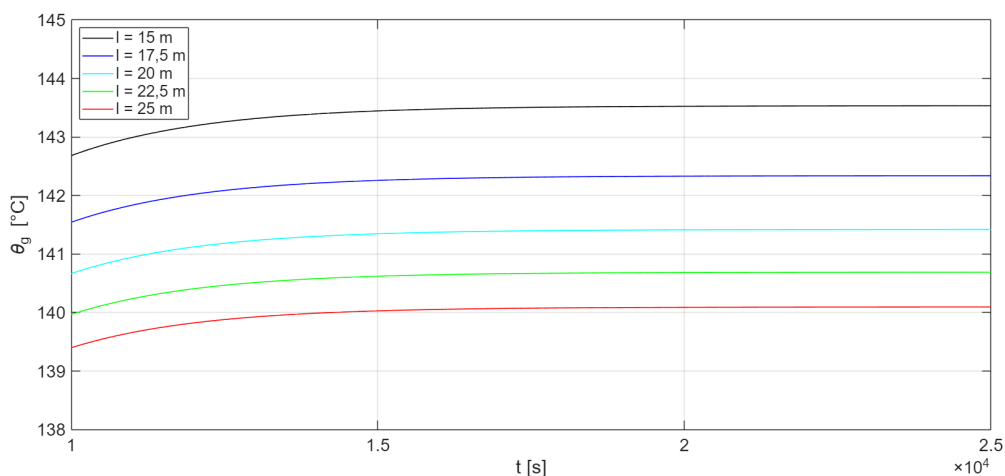
Figura 4.4: Andamento  $T_{4,conv}'''$  a diverse  $\theta_{\infty}$

Si rammenta la formulazione del parametro  $L_c$  lunghezza caratteristica:

$$L_c = \frac{A_s}{2p}$$

con  $A_s = l \cdot w$  e  $2p = 2 \cdot (l + w)$ . Si vuole osservare l'andamento della temperatura  $\theta_{is}$  per una  $\theta_{is,max} = 150$  °C al variare della lunghezza  $l$  della canalina.

Dalla Figura 4.5 si nota che all'aumentare della lunghezza  $l$  della canalina la



**Figura 4.5:** Temperature  $\theta_{is}$  a regime al variare di  $l$  lunghezza della canalina

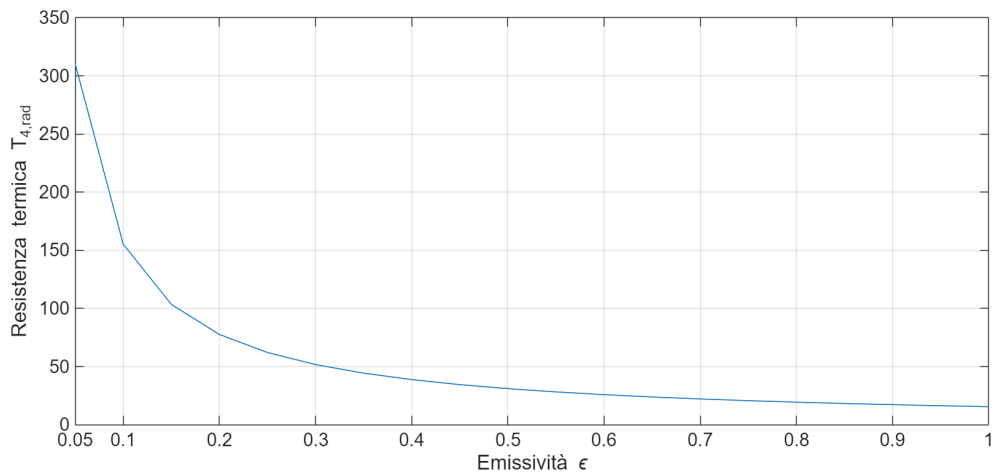
temperatura cala, seppur di poco. Osservando l'equazione 4.33 e l'equazione 4.34, non si poteva prevedere tale risultato a priori poiché non era direttamente osservabile quale fosse il parametro tra  $L_c$  e  $A_s$  che dominava l'equazione. In generale si può affermare che dall'equazione 4.33 usciva  $\frac{1}{L_c^{0.25}}$ , che moltiplicandosi a denominatore con  $A_s$  nell'equazione 4.34 al suo incrementarsi andava a ridurre anche la resistenza termica per convezione, diminuendo di conseguenza la temperatura  $\theta_{is}$ .

Si valuta infine l'impatto del parametro di emissività  $\epsilon$  all'irraggiamento solare. I sistemi di canalizzazioni metalliche possono essere di diverso tipo [22], e in base a come è trattato il metallo (nel caso in esame acciaio) cambiano i valori di emissività associati. Le normative di riferimento per i costruttori sono la EN 10147, CEI EN 61537 e EN 50085, ma in base alla lavorazione possono rispondere ad altre norme (ad esempio EN 10111 per una canalina d'acciaio al carbonio zincata a caldo). Si riportano a titolo di esempio alcuni valori di emissività di differenti lavorazioni dell'acciaio (Tabella 4.5).

Riferendosi al cavo avente sezione di  $240 \text{ mm}^2$  con isolante in grado di resistere fino a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , si valuta l'impatto della resistenza per irraggiamento sul circuito al variare di  $\epsilon$ . Per quanto riguarda la convezione, si considerano le ipotesi dei calcoli riportati in Tabella 4.3.

**Tabella 4.5:** Tabella valori emissività  $\epsilon$  per alcuni acciai

Tipologia di acciaio	Temperatura di riferimento [ $^{\circ}C$ ]	$\epsilon$
Acciaio al carbonio in lamiera	30-100	0,4-0,7
Acciaio galvanizzato	30	0,28
Acciaio inossidabile	20-700	0,16-0,45
Acciaio laminato a freddo	30	0,7-0,9
Acciaio ossidato	30	0,7-0,9
Acciaio zincato in lamiera	30	0,23
Corpo nero	-	1



**Figura 4.6:** Andamento della resistenza  $T_{4,rad}'''$  al variare di  $\epsilon$  per  $\theta_{can}$  a regime termico

In Figura 4.6 si osserva l'andamento della resistenza termica esterna per irraggiamento  $T_{4,rad}'''$ , considerando che la canalina abbia raggiunto la sua temperatura di regime (circa  $55^{\circ}C$ ). Anche per valori di  $\epsilon$  prossimi a quelli validi per il corpo nero, la resistenza termica esterna è valutabile intorno ad un valore di  $15 \frac{K \cdot m}{W}$  ( $\epsilon = 1$ ); comparando con l'andamento in Figura 4.2 della resistenza termica per convezione, si osserva che alla temperatura  $\theta_{can} = 55^{\circ}C$ :

$$T_{4,conv}''' \ll T_{4,rad}'''$$

poiché  $T_{4,conv}'''$  assume un valore poco inferiore a  $0,1 \frac{K \cdot m}{W}$ , circa 150 volte più piccolo rispetto a  $T_{4,rad}'''$  a parità di  $\epsilon$  e  $\theta_{can}$ .

In definitiva, dal punto di vista termico la potenza si dissipa prevalentemente attraverso  $T_{4,conv}'''$ , e dunque le perdite per convezione sono molto più grandi rispetto quelle per irraggiamento, riportandone a titolo di esempio alcuni valori in Tabella 4.6 a regime termico raggiunto.

**Tabella 4.6:** Confronto perdite per convezione ed irraggiamento a due  $\epsilon$  estreme

Emissività $\epsilon$	$P_{j,conv} [\frac{W}{m}]$	$P_{j,rad} [\frac{W}{m}]$
0,1	123,21	0,077
1	122,42	0,768

L'irraggiamento dunque non impatta significativamente sulle temperature di canalina e di isolante del cavo, essendo la convezione è dominante.

## Capitolo 5

# Modello termico di cavi multipli e risultati delle simulazioni

Il problema principale derivante dalla disposizione di due o più cavi adiacenti tra loro è l'influenza reciproca dal punto di vista termico. Difatti ogni singolo cavo del gruppo dissipa una certa quantità di energia sotto forma di calore che viene in parte assorbita dagli altri cavi che lo circondano [10]. Quanto un cavo possa influenzare il surriscaldamento di un altro cavo (e allo stesso tempo esserne condizionato) dipende essenzialmente dalla posizione e dalla distanza reciproca tra i cavi. Ipotizzando, ad esempio, un gruppo di tre cavi in posa piana, quello centrale subirà due contributi aggiuntivi di calore dai cavi posti a lato, i quali invece riceveranno il solo apporto dal cavo di mezzo. Il mutuo scambio di calore sarà tanto meno impattante tanto più i cavi saranno lontani tra loro, fino a raggiungere una distanza tale da non influenzarsi più direttamente a vicenda [20].

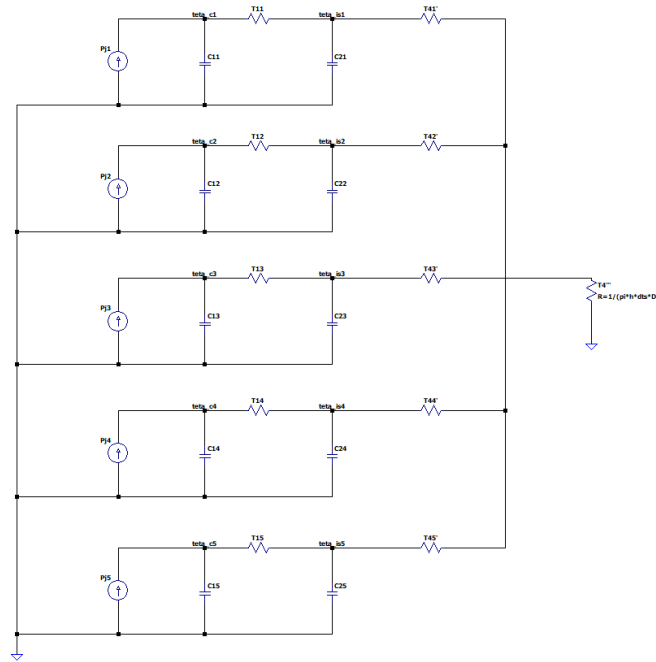
Oltre alla distanza reciproca tra i cavi, è necessario considerare anche la posizione del cavo nella canalina. Come noto, l'innalzamento della temperatura della parete della canalina è dovuta dal surriscaldamento dei cavi; tuttavia, un cavo posizionato al centro del condotto è maggiormente sollecitato rispetto ai cavi più vicini alle pareti, poiché esso (quello centrale) risente meno della temperatura esterna ambiente in

prossimità delle pareti di ca. Verranno proposte simulazioni con il software *FEMM* 4.2 volte ad evidenziare la differenza di temperatura tra i cavi centrali e quelli periferici.

L'interazione termica tra i cavi può essere implementata attraverso una resistenza dipendente dalla distanza reciproca tra essi. Sperimentalmente [10] [20], si osserva che la definizione di tale resistenza è effettuata attraverso approssimazioni empiriche dedotte da sperimentazioni di laboratorio: nel capitolo, non verrà di conseguenza implementato un modello di resistenza di influenza reciproca tra i cavi, ma si procederà al confronto dell'impatto che hanno sulla temperatura della canalina la presenza di uno o più cavi caricati. Inoltre, al fine di valutare la diversa disposizione dei cavi in canalina, si modificherà la resistenza termica  $T'_4$  nel circuito LTspice propria del cavo valutando le differenze di temperatura su FEMM 4.2 delle differenti pose analizzate.

## 5.1 Modello termico per installazione di cavi multipli

Si riporta di seguito il modello completo di una disposizione piana orizzontale di 5 cavi in canalina (Figura 5.1).



**Figura 5.1:** Modello termico di 5 cavi in posa piana orizzontale non a contatto

In Figura 5.1 il modello termico è valido per cavi non a contatto tra loro, sufficientemente distanti per essere termicamente isolati. Difatti l'unico contributo reciproco è sull'impatto della  $\theta_{can}$ .

Il principio alla base dello sviluppo è replicare per cinque volte lo schema del cavo singolo. Ciascun cavo vede implementata la propria resistenza  $T_4'$ , mentre la resistenza termica esterna  $T_4'''$  è unica poiché posta fuori dalla canalina.

Il nodo "teta\_can" è il terminale di tutti e tre i circuiti, che sono messi a terra al nodo "teta\_amb".

I cavi dissipano energia nell'ambiente subito a loro esterno per convezione naturale. La prima analisi proposta è l'impatto sulla temperatura della canalina che

si ottiene qualora nella canalina fosse caricato un solo cavo, due cavi e così via fino a cinque cavi. Lo studio non può essere effettuato a parità di corrente poiché la portata massima diminuisce all'aumentare del numero di cavi caricati [4]; si propone un confronto tra il modello termico indicato dalla normativa CEI IEC 60287 (Figura 3.6) e il modello che prevede l'implementazione della resistenza  $T_4'''$  attraverso le resistenze per convezione  $T_{4,conv}'''$  e per irraggiamento  $T_{4,rad}'''$  (Figura 4.1). Si considera l'isolante dei cavi in grado di resistere fino a  $150\text{ }^\circ\text{C}$ , in accordo con la norma CEI EN 50382, tale per cui  $k^* = 1,46$ . Tutti gli altri coefficienti  $k_i$  sono posti pari a 1, tranne il fattore  $k_2$  che sarà specificato volta per volta. Si considera nel calcolo della resistenza per irraggiamento termico un fattore di assorbimento  $\epsilon = 0,8$ .

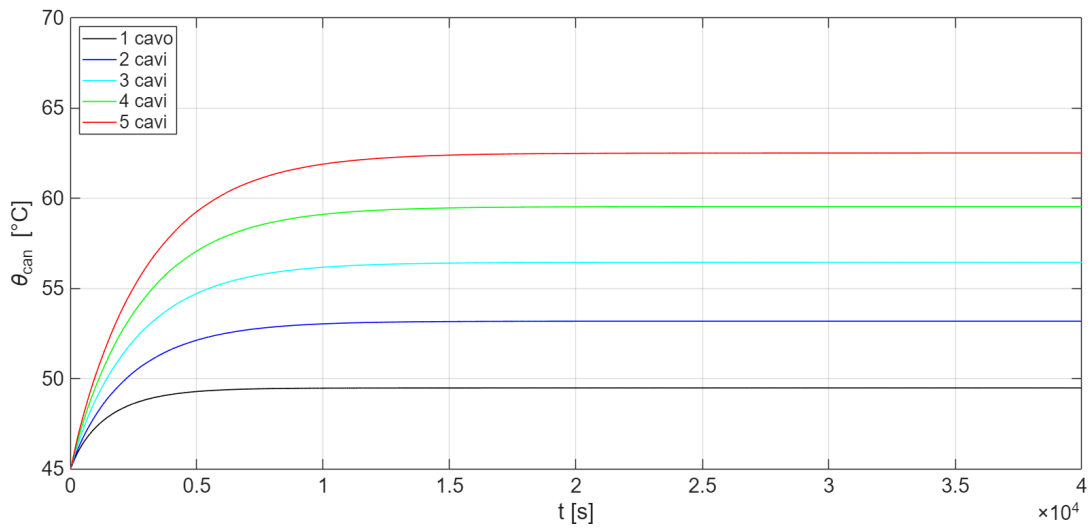
**Tabella 5.1:** Analisi impatto sulla temperatura di canalina  $\theta_{can}$

# cavi	$k_2$	$I_{corr}$ [A]	CEI IEC 60287			$T_4'''$ modificata		
			$\theta_{is}$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$\theta_{can}$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$\theta_m$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$\theta_{is}$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$\theta_{can}$ [ $^\circ\text{C}$ ]	$\theta_m$ [ $^\circ\text{C}$ ]
1	1	985,5	156,76	71,11	113,94	143,55	56,36	99,95
2	0,8	788,4	149,29	77,24	123,23	133,67	58,37	96,02
3	0,7	689,85	137,24	80,65	123,09	119,25	59,54	89,39
4	0,65	640,575	135,12	85,55	125,21	113,85	60,97	87,41
5	0,62	611,01	137,64	92,45	130,11	111,53	62,62	87,08

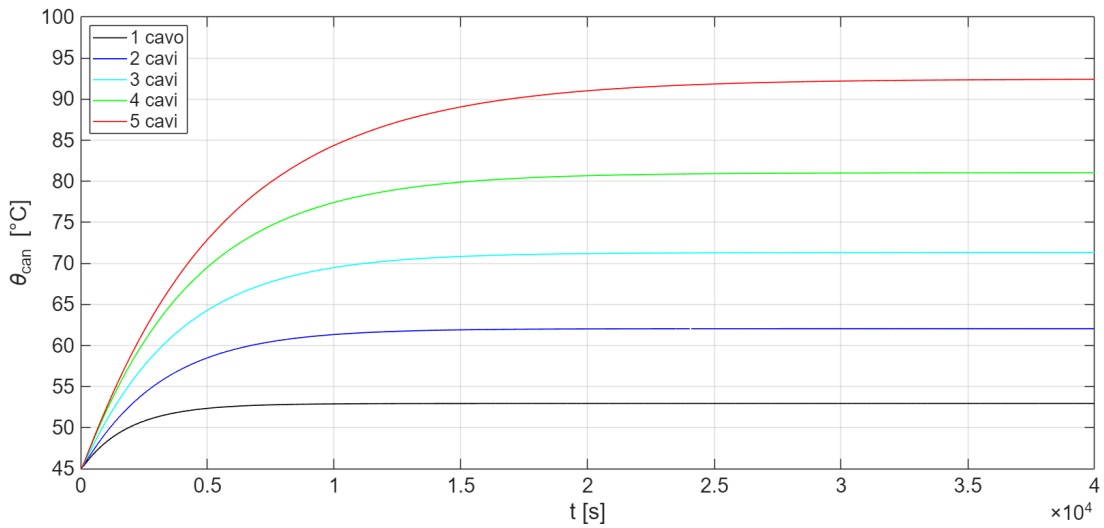
Si evidenzia dai risultati in Tabella 5.1 che dal modello della normativa le temperature sono più gravose; in particolare, è la temperatura di canalina  $\theta_{can}$  ad essere notevolmente più alta, impattando di conseguenza anche sugli isolanti dei cavi. Per entrambi i modelli in generale si può affermare che all'aumentare del numero di cavi caricati, pur tuttavia diminuendo l'intensità di corrente fluente, aumenta la temperatura della parete di canalina e diminuisce quella dell'isolante del cavo. La temperatura media all'interno della canalina  $\theta_m$  è calcolata come media pura tra  $\theta_{is}$  e  $\theta_{can}$ , mentre la temperatura di riferimento per la resistenza  $T_4'$  (equazione 2.17) è calcolata come media tra le temperature degli isolanti di tutti i cavi caricati e  $\theta_{can}$ . E' necessario sottolineare come  $\theta_{is}$  sia uguale per tutti i cavi, poiché si considerano ad una distanza tale da non influenzarsi termicamente a vicenda. L'unico impatto

reciproco lo si può apprezzare sull'aumento della temperatura  $\theta_{can}$  che come detto si incrementa con il numero di cavi. A titolo puramente informativo, si riportano i risultati di simulazioni effettuati mantenendo la corrente nei cavi uguale indipendentemente dal numero di essi caricato. Si inietta una corrente  $I_{corr} = 611,01 A$  tale che sia normativamente valida fino a cinque cavi installati in canalina.

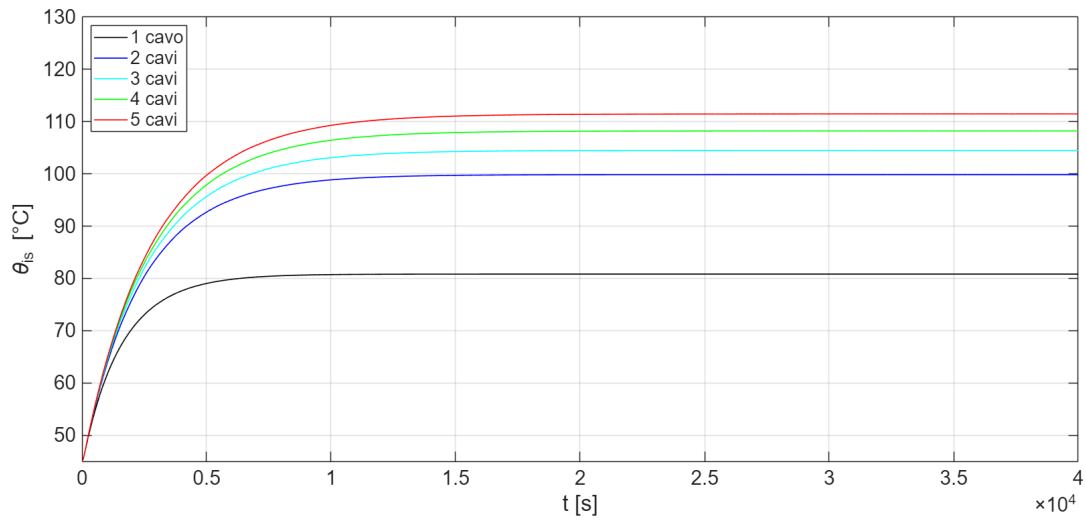
Dalla Figura 5.2 e Figura 5.3 si osserva che in generale all'aumentare del numero di cavi aumenta  $\theta_{can}$  anche se i cavi stessi non interagiscono direttamente tra loro; questo innalzamento di  $\theta_{can}$  si riflette sulla temperatura dell'isolante  $\theta_{is}$  che si incrementa, come è possibile osservare in Figura 5.4 e Figura 5.5.



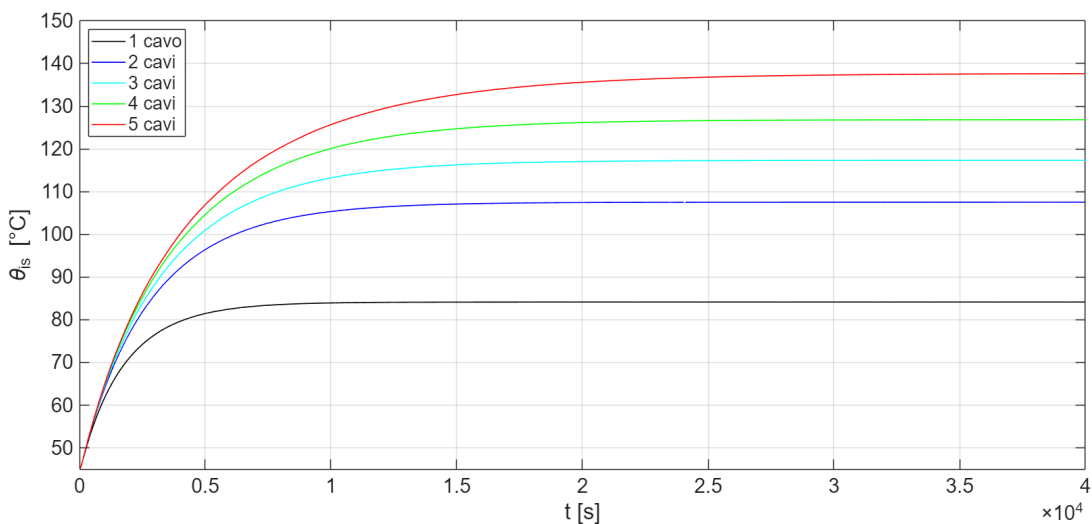
**Figura 5.2:** Andamento di  $\theta_{can}$  all'aumentare del numero di cavi caricati a parità di corrente  $I_{corr} = 611,01 A$  secondo il modello termico con  $T_4'''$  implementata



**Figura 5.3:** Andamento di  $\theta_{can}$  all'aumentare del numero di cavi caricati a parità di corrente  $I_{corr} = 611,01 A$  secondo il modello termico della norma CEI IEC 60287



**Figura 5.4:** Andamento di  $\theta_{is}$  all'aumentare del numero di cavi caricati a parità di corrente  $I_{corr} = 611,01$  A secondo il modello termico con  $T_4'''$  implementata



**Figura 5.5:** Andamento di  $\theta_{is}$  all'aumentare del numero di cavi caricati a parità di corrente  $I_{corr} = 611,01$  A secondo il modello termico della norma CEI IEC 60287

## 5.2 Simulazioni FEMM 4.2

Nella sezione precedente si è ipotizzato che i cavi fossero sufficientemente distanti tali da non interagire direttamente dal punto vista termico tra loro; non si era anche considerata la posizione dei cavi nella canalina, che come detto influisce nelle

temperature di guaina.

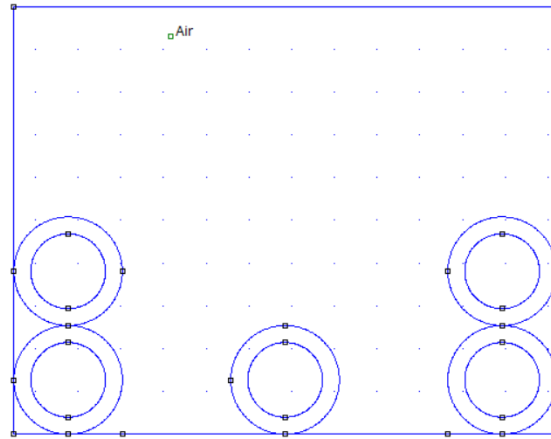
La sola interazione reciproca tra i cavi, dunque, si è osservata nella sezione precedente nell'incremento di  $\theta_{can}$  e di riflesso di  $\theta_{is}$ . I cavi, essendo caricati della stessa corrente e avendo i parametri circuitali degli stessi valori compresi quelli della resistenza  $T'_4$ , sono conversi alla medesima  $\theta_{is}$ ; al fine di valutare l'interazione reciproca diretta per distanze tali da generarla, si osserva nelle simulazioni che verranno proposte nella sezione l'impatto che ha la diversa disposizione dei cavi nella canalina. Tale valutazione verrà effettuata sia analizzando l'effetto sul gruppo di cavi, sia quello sul singolo cavo. I risultati e le considerazioni ottenute saranno prese in considerazione al fine di modificare il valore di  $T'_4$  proprio di ciascun cavo ed implementandola nella prossima sezione nel circuito LTspice.

Di seguito si evidenziano le ipotesi di studio:

- si considerano 5 cavi in canalina metallica chiusa isoterma;
- ciascun cavo è di sezione pari a  $240 \text{ mm}^2$ , avente le caratteristiche indicate in Tabella 3.2;
- ciascun cavo è caricato con una corrente  $I_{corr} = 611,01 \text{ A}$ , secondo le indicazioni fornite dalla norma CEI EN 50343;
- le valutazioni sulla modifica del valore di  $T'_4$  e delle diverse disposizioni dei cavi in canalina sono dedotte dai risultati delle simulazioni effettuate sul software *FEMM 4.2*, delle quali verranno riportati alcuni esempi;

## Posa su due strati simmetrica, cavi non a contatto (Posa A)

Si propone come primo caso da analizzare la disposizione all'interno della canalina dei cinque cavi come in Figura 5.6.



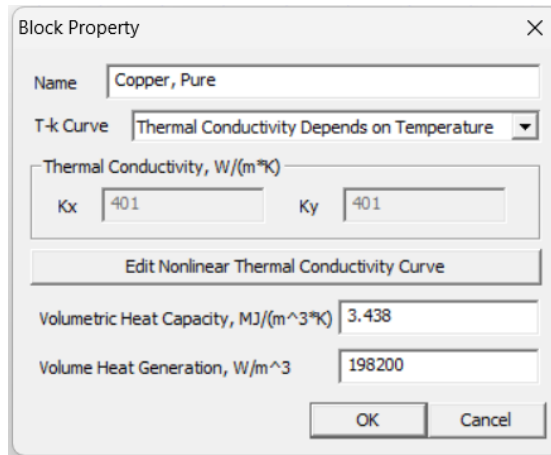
**Figura 5.6:** Posa simmetrica su due strati, cavi non a contatto

Si effettua un'analisi tramite il software FEMM 4.2 tenendo conto delle seguenti ipotesi di simulazione:

- in Figura 5.6 il contorno rettangolare rappresenta la canalina metallica, di larghezza  $w = 3 \cdot D_e + 2 \cdot 0,75D_e = 114,3 \text{ mm}$  e altezza  $D_h = 120,71 \text{ mm}$ . La misura  $0,75 \cdot D_e$  indica la distanza minima tale per cui i cavi non hanno più diretta interazione termica [10];
- al contorno rappresentante la canalina, è possibile impostare una *boundary condition*: si impone dunque una temperatura  $\theta_{rif} = \theta_{can}$  costante pari a  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  ipotizzando una convezione ideale, e successivamente osservando i dati in Tabella 5.1 si impone  $\theta_{ref} = 92 \text{ }^\circ\text{C}$  come valore di regime per cinque cavi secondo il modello della norma CEI IEC 60287 e  $\theta_{ref} = 63 \text{ }^\circ\text{C}$  secondo il modello con  $T_4'''$  implementata;
- i cavi sono caricati con una corrente  $I_{corr} = 611,01 \text{ A}$ , definita nel software attraverso l'inserimento del dato "*Volume Heat Generation (VHG)*" del rame. Tale valore, è calcolato considerando la formula 2.11 imponendo  $\theta = 150 \text{ }^\circ\text{C}$

(massima temperatura ammissibile isolante) e calcolando le perdite Joule a regime secondo l'equazione 3.1: dividendo le perdite ottenute per il volume del cavo, si ottiene  $VHG = 198200 \frac{W}{m^3}$ ;

- è necessario specificare che i risultati proposti sono a regime termico raggiunto;



**Figura 5.7:** Volume Heat Generation conduttore rame, cavo avente sezione  $240 \text{ mm}^2$  caricato a  $I_{corr} = 611,01 \text{ A}$

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni alle diverse  $\theta_{rif} = \theta_{can}$  per la disposizione in Figura 5.6.

**Tabella 5.2:** Risultati di  $\theta_{is}$  a diverse  $\theta_{can}$ , posa simmetrica, cavi non a contatto

$\theta_{can} [^{\circ}C]$	$\theta_{is,1} [^{\circ}C]$	$\theta_{is,2} [^{\circ}C]$	$\theta_{is,3} [^{\circ}C]$	$\theta_{is,4} [^{\circ}C]$	$\theta_{is,5} [^{\circ}C]$	$\theta_{is,m} [^{\circ}C]$
45	84	107	84	102	102	<b>95,8</b>
63	100	123	100	118	118	<b>111,8</b>
92	126	146	126	142	142	<b>136,4</b>

Con  $\theta_{g,1}$  si indica il primo cavo da sinistra dello strato inferiore,  $\theta_{g,2}$  il cavo centrale dello strato inferiore e  $\theta_{g,3}$  il cavo più a destra sempre del primo strato; da sinistra,  $\theta_{g,4}$  e  $\theta_{g,5}$  sono i cavi dello strato superiore.

Si osserva dai risultati in Tabella 5.2 che il cavo numero 2 è il più sollecitato, a causa della sua posizione centrale e distante dalle pareti laterali; difatti, i cavi 1

e 3 sono i meno sollecitati poichè toccano le pareti della canalina in due punti. Inoltre, si conferma che all'aumentare della temperatura di canalina  $\theta_{can}$  aumenta la temperatura di isolante dei cavi.

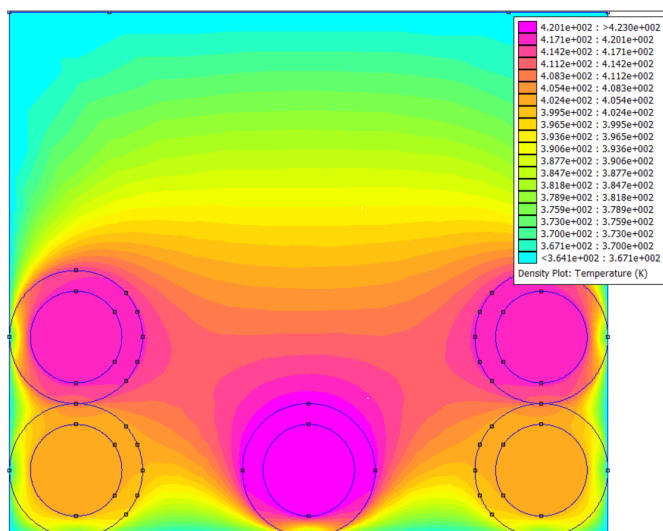


Figura 5.8: Surriscaldamento termico cavi, posa A

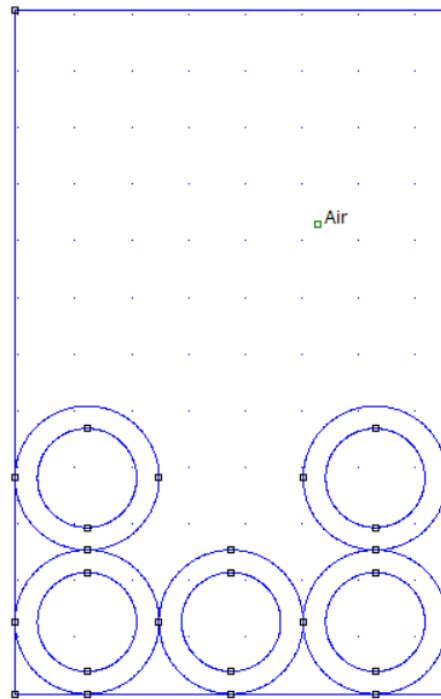
Con i dati immessi, a regime e alla loro portata i cavi tendono a rispettare le temperature ammissibili dell'isolante. Rimane una notevole discrepanza di valori tra il modello della norma CEI IEC 60287 e il modello che prevede la resistenza esterna  $T_4'''$  esplicitata nei contributi di convezione ed irraggiamento.

## Posa su due strati simmetrica, cavi a contatto (Posa B)

Dopo aver valutato la casistica di cavi non a contatto con l'ipotesi di non interazione termica diretta tra loro [10], si valuta ora cosa succede qualora fossero direttamente a contatto. (Figura 5.9)

Le dimensioni della canalina cambiano soltanto per quanto riguarda il dato della larghezza, che diventa ora  $w = 3 \cdot D_e = 76,2 \text{ mm}$ . Di seguito i risultati delle simulazioni.

Rispetto ai dati riportati in Tabella 5.2, ora i cavi più sollecitati sono quelli dello strato superiore. Il cavo di mezzo dello strato inferiore risente maggiormente delle pareti laterali che si sono avvicinate, pur essendo adesso più stipato tra i quattro



**Figura 5.9:** Posa simmetrica su due strati, cavi a contatto

**Tabella 5.3:** Risultati di  $\theta_{is}$  a diverse  $\theta_{can}$ , posa simmetrica, cavi a contatto

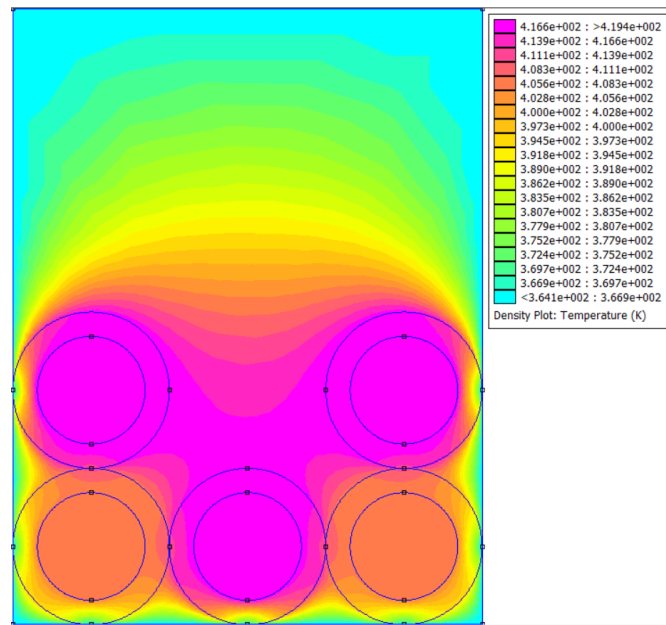
$\theta_{can}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,1}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,2}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,3}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,4}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,5}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,m}$ [ $^{\circ}C$ ]
45	87	102	87	103	103	<b>96,4</b>
63	103	117	103	119	119	<b>112,2</b>
92	129	141	129	143	143	<b>137</b>

cavi a lui adiacenti.

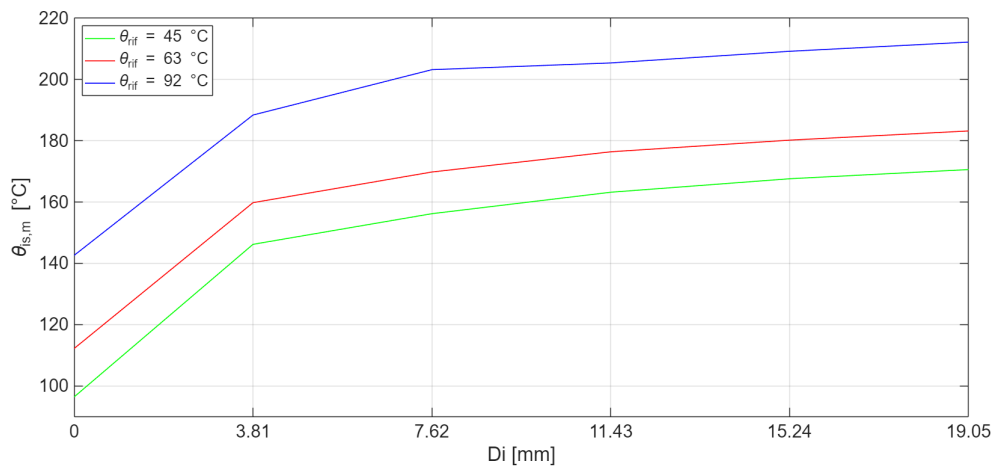
Anche per questa disposizione le temperature degli isolanti rispettano i limiti termici imposti dalle guaine.

Mantenendo questa posa con i cavi a contatto, si vuole valutare il loro comportamento in funzione di una distanza delle pareti dai cavi esterni sempre maggiore.

Gli andamenti riportati nel grafico in Figura 5.11 rappresentano la media tra le temperature degli isolanti  $\theta_{g,i}$  dei cavi sia per una diversa temperatura di canalina  $\theta_{can}$  sia per un progressivo aumento della distanza tra i cavi esterni e le pareti di canalina. Si può osservare, ad ulteriore conferma, che ad incidere maggiormente è



**Figura 5.10:** Surriscaldamento termico cavi, posa B

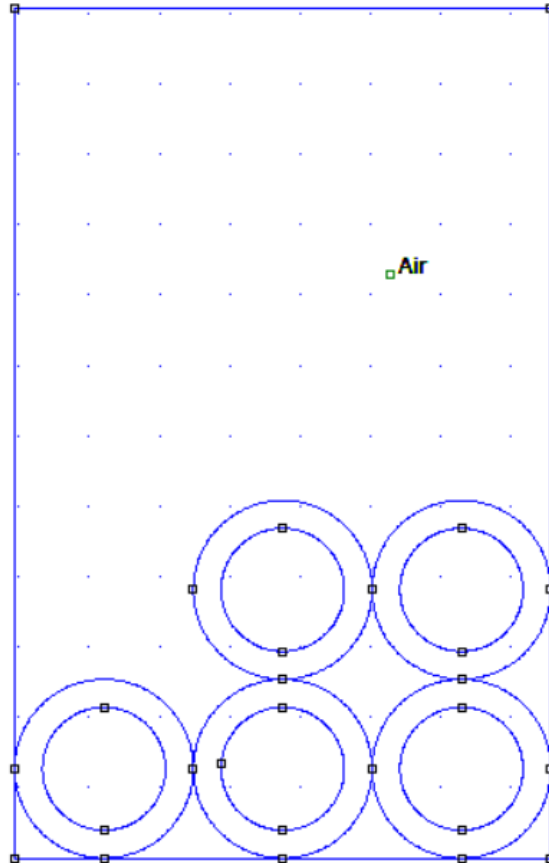


**Figura 5.11:** Posa simmetrica su due strati, cavi a contatto, confronto all'aumentare della distanza dei cavi dalle pareti laterali della canalina

appunto la posizione del cavo all'interno della canalina: tanto più questi si trovano lontani dalle pareti, tanto più tendono a surriscaldarsi. Di fatto questo aspetto è preponderante, almeno in una disposizione simmetrica dei cavi, rispetto alla distanza reciproca tra i cavi stessi.

## Posa su due strati asimmetrica, cavi a contatto (Posa C)

Si propone una disposizione non simmetrica, con i cavi a contatto fra loro e alle pareti di canalina. (Figura 5.12)



**Figura 5.12:** Posa asimmetrica su due strati, cavi a contatto

Dai risultati delle simulazioni precedenti, si può ipotizzare che il cavo numero 4 (il cavo centrale dello strato superiore) sia maggiormente sollecitato rispetto alla disposizione simmetrica, in cui era a contatto con una delle pareti laterali. Di conseguenza, anche il cavo numero 2 (il cavo centrale dello strato inferiore) subirà un'incremento di temperatura rispetto i casi precedenti. Di seguito (Tabella 5.4) si riportano i risultati delle simulazioni.

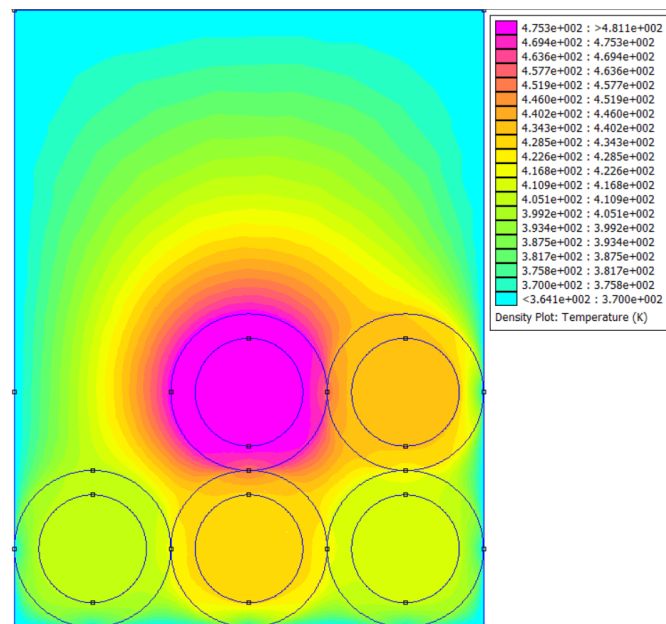
Confrontando con i risultati in Tabella 5.2 e in Tabella 5.3, i cavi numero 2 e

**Tabella 5.4:** Risultati di  $\theta_{is}$  a diverse  $\theta_{can}$ , posa asimmetrica, cavi a contatto

$\theta_{can}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,1}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,2}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,3}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,4}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,5}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,m}$ [ $^{\circ}C$ ]
45	89	118	94	170	122	<b>118,6</b>
63	105	132	110	183	137	<b>133,4</b>
92	130	155	134	205	160	<b>156,8</b>

numero 4 sono fortemente più sollecitati; ciò conferma l'ipotesi precedentemente avanzata, dovuta principalmente dalla distanza maggiore dalle pareti per il cavo 4 e di una maggiore sollecitazione termica proveniente da un altro cavo per il numero 2.

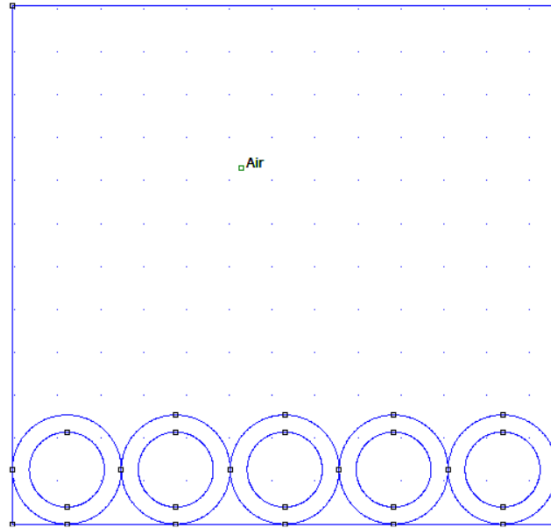
Certamente per una disposizione asimmetrica a cavi separati analoga a quella di Figura 5.6, i cavi esterni si troverebbero in una situazione termica meno gravosa poiché distanziati dai cavi centrali; tuttavia, proprio i cavi di mezzo subirebbero un ulteriore surriscaldamento dovuto ad una maggiore distanza dalle pareti laterali, come si è già osservato nei grafici in Figura 5.11.



**Figura 5.13:** Surriscaldamento termico cavi, posa C

## Posa piana su singolo strato, cavi a contatto (Posa D)

Come ultimo esempio, si propone una posa piana su singolo strato, al fine di valutare l'interazione diretta tra i cavi. (Figura 5.14)



**Figura 5.14:** Posa piana su singolo strato, cavi a contatto

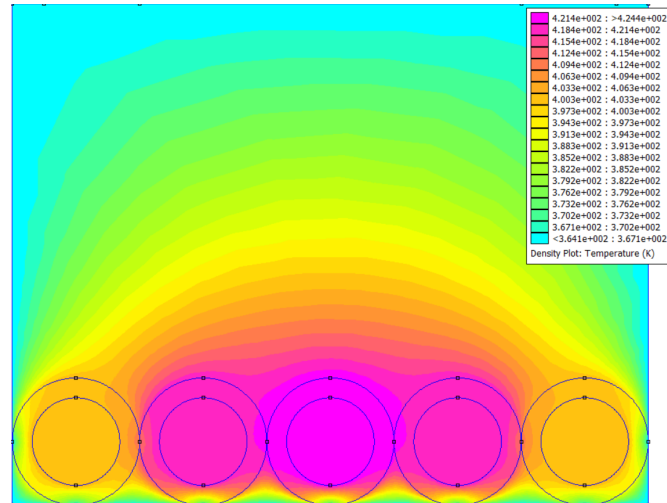
Da quanto visto nelle simulazioni precedenti, il cavo centrale (numero 3) sarà il più sollecitato; a seguire i due cavi intermedi (2 e 4) e infine i meno sollecitati, poiché a contatto in due punti della canalina, i cavi esterni.

**Tabella 5.5:** Risultati di  $\theta_{is}$  a diverse  $\theta_{can}$ , posa piana, cavi a contatto

$\theta_{can}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,1}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,2}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,3}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,4}$ [ $^{\circ}C$ ]	$\theta_{is,5}$ [ $^{\circ}C$ ]	
45	84	105	110	105	84	<b>97,6</b>
63	100	120	125	122	106	<b>114,6</b>
92	126	144	148	144	126	<b>137,6</b>

L'ipotesi è confermata dai valori in Tabella 5.5. I valori di temperatura eccedono, per quanto riguarda il cavo centrale, di qualche grado le temperature ammissibili dell'isolante. Nell'ipotesi che nella canalina non debbano essere caricati altri cavi, è possibile provare a ridurre l'altezza della canalina stessa. Si valuta una temperatura

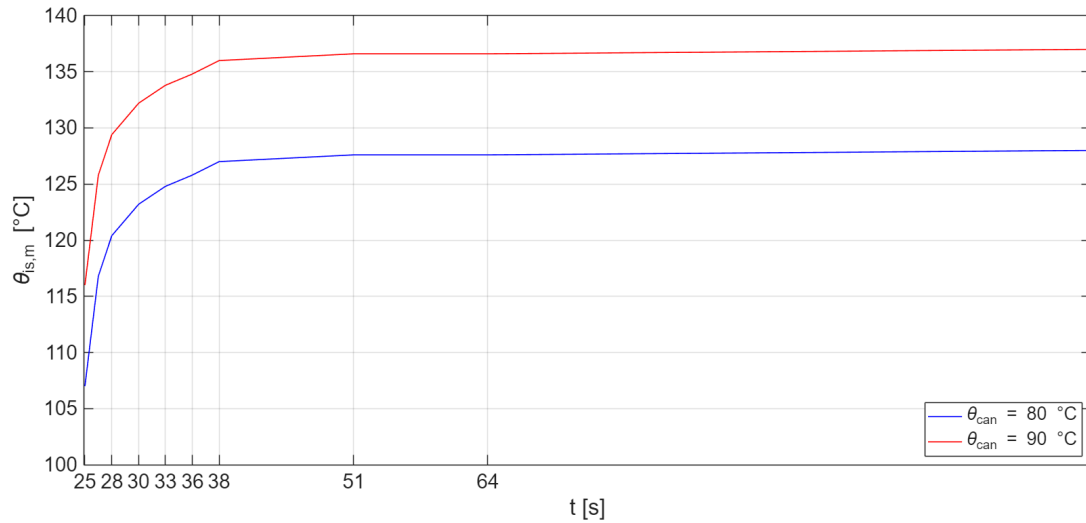
di canalina intermedia tra i valori ottenuti in precedenza, ponendo come *boundary condition* per la simulazione FEMM  $\theta_{rif} = \theta_{can} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $\theta_{rif} = \theta_{can} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ . I cavi sono caricati alla medesima portata  $I_{corr} = 611,01 \text{ A}$ .



**Figura 5.15:** Surriscaldamento termico cavi, posa D

Avendo svolto le simulazioni, si sono ottenuti i risultati in Figura 5.16 al variare dell'altezza di canalina.

L'andamento proposto è quello della temperatura media tra i vari isolanti all'aumentare dell'altezza di canalina; l'incremento di temperatura è sensibile fino ad un misura di circa  $38 \text{ mm}$  ( $d_h = 1,5D_e$ ), salvo poi stabilizzarsi per altezze superiori. Il caso studio fornito dall'azienda, tuttavia, si concentra per dimensioni della canalina predefinite; l'analisi effettuata e proposta è a puro scopo informativo, al fine di valutare l'impatto dei diversi parametri coinvolti e che possono modificarsi.



**Figura 5.16:** Posa piana, confronto all'aumentare dell'altezza di canalina  $d_h$  per due diverse  $\theta_{rif}$

### 5.3 Modifica della resistenza termica $T'_4$ : fattore correttivo $m$

Dai risultati valutati nella precedente sezione, si vuole modificare il parametro  $T'_4$  nel circuito LTspice di riferimento (Figura 5.1) al fine di simulare nel modello termico la diversa posizione dei cavi all'interno della canalina. Nella precedente sezione, infatti, si è potuto constatare che più un cavo è vicino alle pareti della canalina esposte all'aria libera, tanto più questo vede i suoi effetti termici attenuati. Nel circuito LTspice i cavi sono caricati alla medesima corrente, e avendo uguali tutti i parametri circuitali non si evidenziano differenze nei nodi di temperatura. Questo è vero in particolari condizioni, difficilmente riconducibili ad un caso reale, dove nella maggior parte delle applicazioni i cavi si ritrovano spesso a contatto fra loro e stipati con altri cavi di diverse destinazioni.

Si procede dunque alla modifica dei valori di resistenza esterna  $T'_4$ , sulla base dei risultati ottenuti nelle simulazioni FEMM e confrontandoli con i risultati relativi all'ipotesi di cavi non a contatto e termicamente isolati (Tabella 5.1).

L'ipotesi di modifica è essenziale per ragioni pratiche; con gli strumenti a disposizione, si vuole soltanto osservare se effettivamente i valori degli isolanti cambiano rimanendo entro i limiti termici ammissibili. Si applica un coefficiente correttivo pari al rapporto tra la temperatura media del cavo misurata su FEMM del particolare caso analizzato e riportata nelle tabelle nella precedente sezione ( $\theta_{is,FEMM}$ ), e la temperatura media  $\theta_{is,TAB}$  indicata in Tabella 5.1 per il caso a cinque cavi. L'espressione è la seguente:

$$m = \frac{\theta_{is,FEMM}}{\theta_{is,TAB}} \quad (5.1)$$

Questo coefficiente correttivo  $m$  viene applicato direttamente alla resistenza termica  $T'_4$  a numeratore: quest'assunzione non è propriamente esatta, poiché il rapporto è calcolato sulle temperature e le correzioni andrebbero valutate su tutti i componenti del circuito. Per ragioni semplificative, lo si implementa direttamente su  $T'_4$ .

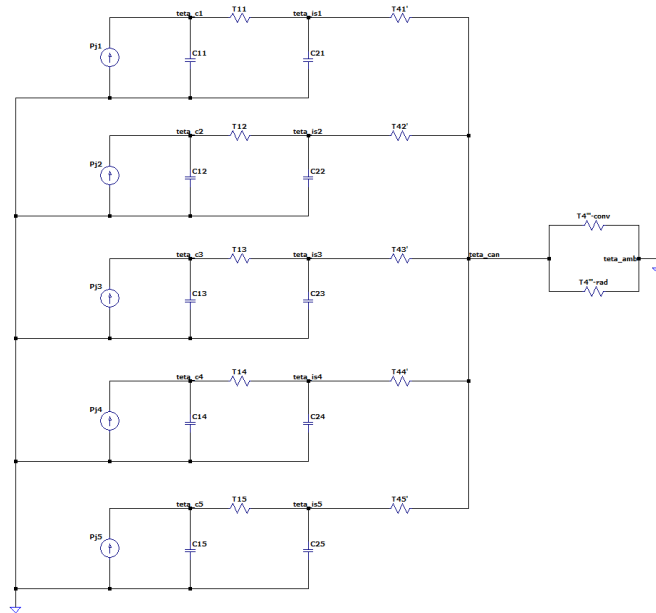
## Posa su due strati simmetrica, cavi non a contatto (Posa A)

Si considera la disposizione in Figura 5.6 e i risultati in Tabella 5.2. Applicando la formula 5.1, di seguito in Tabella 5.6 si riportano i dati.

**Tabella 5.6:** Calcolo del coefficiente correttivo  $m$

n° cavo	CEI IEC 60287, $\theta_{can} = 92 \text{ }^\circ\text{C}$			$T_4'''$ modificata, $\theta_{can} = 63 \text{ }^\circ\text{C}$		
	$\theta_{is,FEMM} [^\circ\text{C}]$	$\theta_{is,TAB} [^\circ\text{C}]$	$m$	$\theta_{is,FEMM} [^\circ\text{C}]$	$\theta_{is,TAB} [^\circ\text{C}]$	$m$
1	126	137,64	<b>0,915</b>	100	111,53	<b>0,897</b>
2	146	137,64	<b>1,061</b>	123	111,53	<b>1,103</b>
3	126	137,64	<b>0,915</b>	100	111,53	<b>0,897</b>
4	142	137,64	<b>1,032</b>	118	111,53	<b>1,058</b>
5	142	137,64	<b>1,032</b>	118	111,53	<b>1,058</b>

Si applicano al modello termico della norma CEI IEC 60287 in Figura 5.1 e al circuito in Figura 5.17 rispettivamente i coefficienti  $m$  calcolati.



**Figura 5.17:** Modello termico dei 5 cavi con  $T_4'''$  implementata

Si rammentano ancora una volta le caratteristiche dei cavi installati:

- cinque cavi aventi sezione pari a  $240 \text{ mm}^2$ , caricati ad una portata  $I_{corr} = 611,01 \text{ A}$  calcolata sulla base delle indicazioni della norma CEI EN 50343;
- le caratteristiche dei cavi [5] sono da riferirsi alle specifiche definite in Tabella 3.2. Essi sono dotati di speciali isolanti in gomma siliconica reticolata della tipologia EI 111 secondo la norma CEI EN 50382, in grado di resistere fino a temperature di  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- i cavi sono caricati all'interno di una canalina metallica chiusa isoterma di lunghezza  $L = 15 \text{ m}$ , altezza  $D_h = 0,12071 \text{ m}$  e larghezza  $w = 0,15 \text{ m}$ , secondo il caso studio fornito da Alstom;

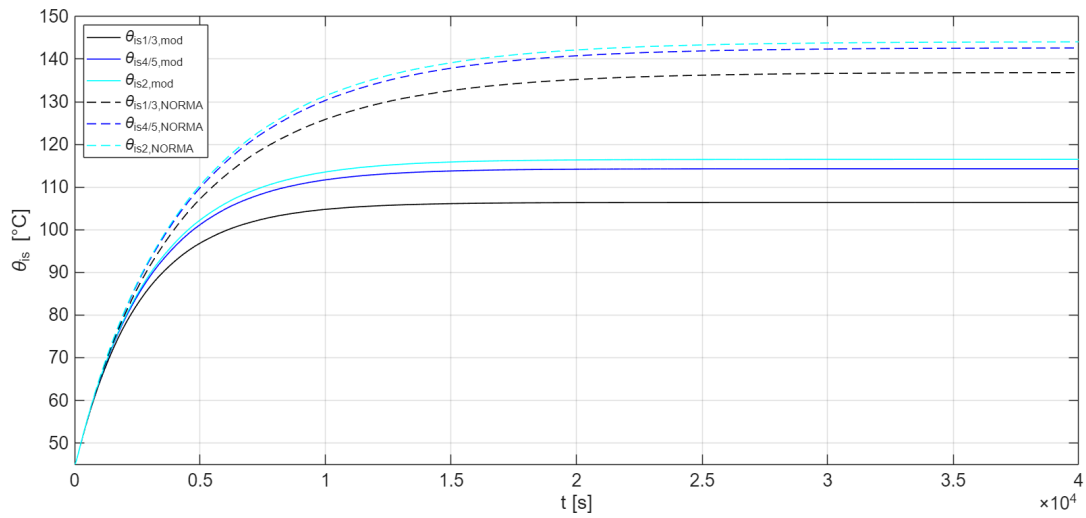
Dal punto di vista circuitale, i risultati riportati in Tabella 5.1 presentano temperature alle guaine e ai conduttori uguali; questo è dovuto dal fatto che essendo i cavi caricati alla medesima corrente ed avendo gli stessi valori dei parametri di circuito, i nodi dei circuiti presenteranno lo stesso andamento termico. Si può dunque, come già affermato in precedenza, considerare questo come il caso di cinque cavi termicamente isolati fra di loro.

Modificando specificatamente per ciascun singolo circuito un parametro, in questo caso la resistenza termica  $T'_4$ , i circuiti si comporteranno diversamente a parità di corrente: in questo modo, si vogliono simulare sul software LTspice le diverse disposizioni possibili all'interno della canalina.

Si riportano in Figura 5.18 e in Tabella 5.7 i risultati delle simulazioni.

In Figura 5.18 in linea tratteggiata si riportano gli andamenti delle temperature secondo il modello termico della norma CEI IEC 60287, mentre in linea continua quelle relative al circuito con  $T_4'''$  modificata. Per entrambi i modelli, in azzurro si indica il cavo numero 2 della disposizione che risulta essere il maggiormente sollecitato anche su LTspice; in colore blu sono rappresentati gli andamenti dei cavi numero 4 e 5 dello strato superiore, mentre in nero i cavi 1 e 3 che sono i meno stressati termicamente del gruppo.

I valori indicati in Tabella 5.7 riportano una rilevante differenza tra i valori di temperatura degli isolanti secondo i due modelli termici. Inoltre, le temperature valutate



**Figura 5.18:** Confronto tra le temperature degli isolanti dei cavi secondo la norma CEI IEC 60287 e la modifica di  $T_4'''$

**Tabella 5.7:** Valori temperature degli isolanti dei singoli cavi

n° cavo	CEI IEC 60287			$T_4'''$ modificata		
	$\theta_{is,FEMM}$ [°C]	$\theta_{is}$ [°C]	$\theta_{can}$ [°C]	$\theta_{is,FEMM}$ [°C]	$\theta_{is}$ [°C]	$\theta_{can}$ [°C]
1	126	136,89	92,36	100	106,42	62,53
2	146	144,11	92,36	123	116,53	62,53
3	126	136,89	92,36	100	106,42	62,53
4	142	142,64	92,36	118	114,26	62,53
5	142	142,64	92,36	118	114,26	62,53

su FEMM 4.2 vedono una differenza tra i cavi più sollecitati e i cavi minormente surriscaldati molto più ampia di quella che si verifica su LTspice.

## Posa su due strati asimmetrica, cavi a contatto (Posa C)

Il caso di posa simmetrica con i cavi a contatto non è valutato secondo l'analisi di questa sezione, poiché da come si può osservare in Tabella 5.3 e in Tabella 5.2 i valori delle temperature non differiscono di molto.

Di conseguenza, si considera la disposizione in Figura 5.12 e i risultati in Tabella 5.4 per una posa asimmetrica di cavi a contatto, poiché dalle simulazioni si può osservare una maggiore discrepanza di valori. Applicando la formula 5.1, di seguito in Tabella 5.8 si riportano i dati.

**Tabella 5.8:** Calcolo del coefficiente correttivo  $m$ , posa asimmetrica a contatto

n° cavo	CEI IEC 60287, $\theta_{can} = 92 \text{ }^\circ\text{C}$			$T_4'''$ modificata, $\theta_{can} = 63 \text{ }^\circ\text{C}$		
	$\theta_{is,FEMM} [^\circ\text{C}]$	$\theta_{is,TAB} [^\circ\text{C}]$	$m$	$\theta_{is,FEMM} [^\circ\text{C}]$	$\theta_{is,TAB} [^\circ\text{C}]$	$m$
1	130	137,64	<b>0,944</b>	105	111,53	<b>0,941</b>
2	155	137,64	<b>1,126</b>	132	111,53	<b>1,183</b>
3	134	137,64	<b>0,973</b>	110	111,53	<b>0,986</b>
4	205	137,64	<b>1,489</b>	183	111,53	<b>1,641</b>
5	160	137,64	<b>1,162</b>	137	111,53	<b>1,228</b>

Analogamente al caso visto in precedenza, si correggono i parametri di resistenza  $T_4'$  nei circuiti in Figura 5.1 e in Figura 5.17 con i valori del coefficiente  $m$  riportati in Tabella 5.8. I risultati in Tabella 5.9.

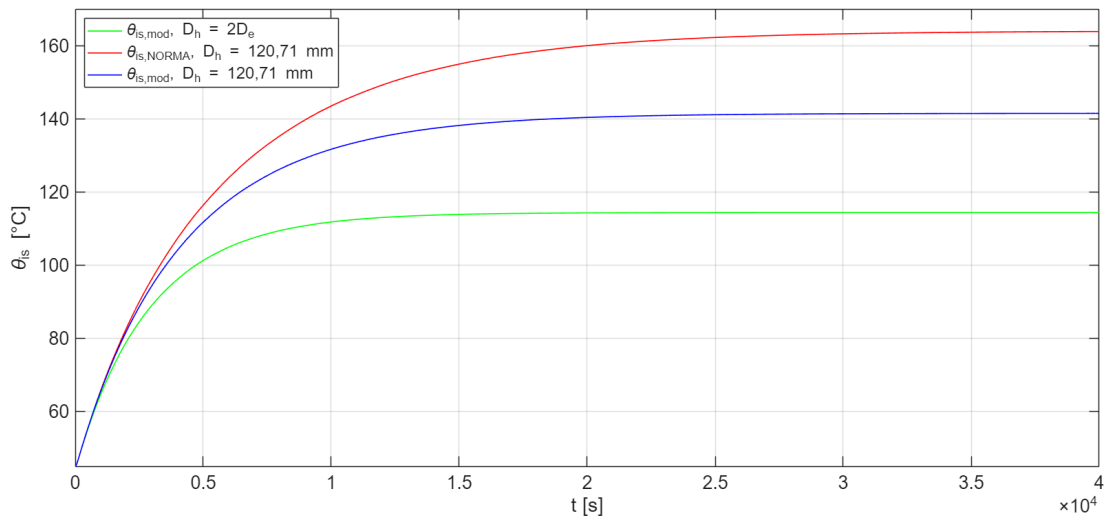
Anche in questo caso, i valori di temperatura calcolati su LTspice hanno meno discrepanza fra loro che quelli riportati da FEMM 4.2; secondo il modello termico previsto dalla norma CEI EN 60287, il cavo numero 4 eccede la temperatura massima dell'isolante pari a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , mentre il circuito con  $T_4'''$  modificata permette il rispetto di tutte le temperature.

Data la forte discrepanza tra i valori calcolati da LTspice e FEMM 4.2, non si può per questo caso di cavi a contatto in posa asimmetrica affermare che la disposizione dei cavi non sia dannosa per gli isolanti dei cavi; una modifica che si può effettuare è quella di ridurre l'altezza di canalina e osservare i risultati. Dalla Figura 5.16 si può dedurre che per un'altezza di canalina di circa due volte il diametro del cavo,

**Tabella 5.9:** Valori temperature degli isolanti dei singoli cavi

n° cavo	CEI IEC 60287			$T_4'''$ modificata		
	$\theta_{is,FEMM}$ [°C]	$\theta_{is}$ [°C]	$\theta_{can}$ [°C]	$\theta_{is,FEMM}$ [°C]	$\theta_{is}$ [°C]	$\theta_{can}$ [°C]
1	130	138,51	92,36	105	107,96	62,87
2	155	147,38	92,36	132	119,67	62,87
3	134	140,07	92,36	110	110,16	62,87
4	205	165,13	92,36	183	141,59	62,87
5	160	149,12	92,36	137	121,74	62,87

non si apprezzano più sostanziali riduzioni di temperature sui cavi; per una posa a due strati, si valuta il caso in cui l'altezza di canalina  $d_h = 2 \cdot D_e$ , a contatto con i cavi superiori. Questa analisi non viene effettuata nel modello termico della norma in quanto, osservando in Figura 3.13 e Figura 5.16, la norma CEI IEC 60287 e FEMM 4.2 danno due risposte temperatura completamente diverse.



**Figura 5.19:** Confronto tra  $\theta_{is}$  del cavo più sollecitato, posa asimmetrica di cavi a contatto

Su FEMM 4.2,  $\theta_{is}$  del cavo numero 4 è pari a 118 °C con  $D_h = 2 \cdot D_e$ .

## 5.4 Confronto con metodo di calcolo attraverso $\tau_{th}$

Si propone in ultima analisi un confronto dei risultati ottenuti nelle precedenti sezioni con il metodo implementabile attraverso la definizione di  $\tau_{th}$ . Il circuito di riferimento è quello in Figura 3.1.

Si richiama ancora una volta la formula della costante termica del cavo  $\tau_{th}$ , definita nell'norma CEI EN 50343 [4]:

$$\tau_{th} = 1,8 \cdot (\sqrt{A} - 5)$$

dove  $A$  è la sezione del cavo.

La resistenza termica globale  $R_{th}$  è calcolata attraverso la formula 3.2:

- $\Delta\theta$  è valutata come differenza  $\theta_{max} - \theta_{rif}$ , con  $\theta_{max}$  massima temperatura ammissibile dell'isolante e  $\theta_{rif} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- $\rho$  è la resistività del conduttore (rame) alla temperatura di regime  $\theta_{max}$ ;
- $I$  è la corrente caricata nel cavo. Il cavo converge alla sua temperatura massima se  $I = I_{corr}$  portata del cavo;

Si analizzano i cavi aventi sezione  $S = 240 \text{ mm}^2$ ,  $S = 185 \text{ mm}^2$  e  $S = 150 \text{ mm}^2$ , sia considerando l'isolante XLPE a  $90 \text{ }^\circ\text{C}$  che quello in grado di resistere fino a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ ; rispettivamente è assegnato il fattore  $k^* = 1$  e  $k^* = 1,46$ . Il modello termico in Figura 3.1 prevede una corrente pari alla portata  $I_{corr}$  relativa a ciascun cavo; si riporta il valore di  $R_{th}$  sulla base di  $\Delta\theta$  e  $I_{corr}$  e si calcola tramite LTspice il valore di  $\theta_{is}$ . In Tabella 5.10 si riportano i risultati: per  $\theta_{is,\tau}$  si intendono i valori di temperatura valutati con il metodo descritto in questa sezione, mentre  $\theta_{is,IEC}$  considera i valori di isolante valutati attraverso il modello termico della norma CEI IEC 60287, con  $T_4'$  e  $T_4'''$  singolarmente esplicitate.

I risultati in tabella si riferiscono al cavo singolo. La capacità termica  $C_{th}$  del cavo è calcolata dalla formula di  $\tau_{th}$  avendo precedentemente stabilito il valore di  $R_{th}$ .

In tabella si riportano inoltre le temperature dell'isolante valutate nelle precedenti sezioni. Si rammenta che eccetto  $k^*$  tutti gli altri coefficienti  $k$  sono posti pari a 1.

**Tabella 5.10:** Valori  $\theta_{is}$  attraverso  $\tau_{th}$

$S$ [ $mm^2$ ]	$\tau_{th}$ [s]	$k^*$	$I_{corr}$ [A]	$R_{th}$ [ $\frac{K \cdot m}{W}$ ]	$\theta_{is,\tau}$ [°C]	$\theta_{is,IEC}$ [°C]
240	1133,13	1	675	1,106	98,97	95,64
		1,46	985,5	1,021	175,5	156,64
185	928,96	1	560	1,239	84,82	94,74
		1,46	817,6	1,144	135,92	154,95
150	782,72	1	490	1,312	76,45	94,29
		1,46	715,4	1,211	114,46	157,59

# Capitolo 6

## Conclusioni

Lo sviluppo del caso studio fornito da Alstom Ferroviaria S.p.A. si è concentrato sull'analisi termica dei cavi, al fine di valutare un possibile modello termico di essi. Le simulazioni termiche si sono dapprima focalizzate sul singolo cavo del gruppo; successivamente, si è analizzato il complesso dei cinque cavi, tenendo valide le considerazioni dedotte per il singolo cavo. Si sono valutati gli impatti che hanno i diversi parametri della norma CEI IEC 60287 sul modello termico (altezza di canalina  $D_h$  in Figura 3.13, impatto del parametro  $(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}$ ), confrontandoli con i risultati ottenuti con il software FEMM 4.2 e la successiva modifica della resistenza termica esterna  $T_4'''$ .

Si riportano le principali ipotesi alla base delle simulazioni effettuate nel documento di tesi:

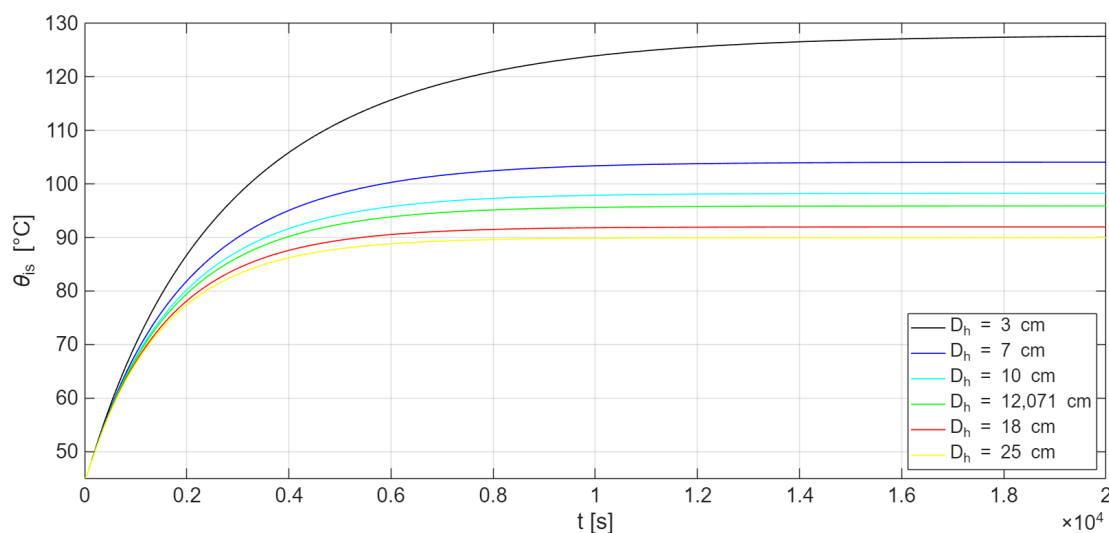
- in tutte le simulazioni, per entrambi i modelli proposti, la variazione della temperatura media  $\theta_m$  presente in  $T_4'$  all'interno della canalina è approssimata come media aritmetica tra la temperatura dell'isolante  $\theta_{is}$  e la temperatura della canalina  $\theta_{can}$ . Nelle simulazioni comprendenti più cavi, si è considerata la media tra tutte le  $\theta_{is}$  e  $\theta_{can}$ ;
- per le simulazioni effettuate sul modello termico proposto dalla norma CEI IEC 60287, implementando i parametri del circuito attraverso le indicazioni delle norme CEI EN 50343 e CEI EN 50382, il parametro  $(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}$  è stato valutato graficamente [12] ipotizzando il contributo dato dalle radiazioni solari  $\Delta\theta_{ds} = 5 \text{ } ^\circ\text{C}$ , considerando l'intensità di radiazione solare  $E_e = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Il

coefficiente di scambio termico globale  $h$  proposto dalla norma tiene conto sia del contributo della convezione che dell'irraggiamento, ed è stato considerato costante per l'intervallo di tempo della simulazione;

- le simulazioni effettuate sul modello termico che prevede una modifica del parametro  $T_4'''$  dalle indicazioni della norma, esplicitando direttamente i contributi di convezione ed irraggiamento [20], ha avuto il vantaggio di poter valutare più propriamente i singoli contributi delle resistenze termiche, ma il limite di dover impostare a priori e di mantenere costanti ad una determinata temperatura le proprietà termofisiche dell'aria per tutto il processo di simulazione, indipendentemente dal fatto che la temperatura di canalina variasse nel tempo;
- le simulazioni effettuate sui modelli termici dei cinque cavi, hanno tenuto conto di queste precedenti ipotesi; sul software FEMM 4.2, non è possibile implementare direttamente una funzione di convezione e si possono soltanto valutare i risultati a regime raggiunto (e non in transitorio): la *boundary condition* di una  $\theta_{rif}$  impostata sulla geometria di canalina, è stata valutata tenendo conto dei risultati delle simulazioni di entrambi i modelli termici per il caso a cinque cavi (Tabella 5.1). Di seguito, rapportando i risultati ottenuti per il modello termico di cavi non a contatto e termicamente isolati con i risultati delle diverse pose implementate su FEMM 4.2, si è modificato manualmente il valore della resistenza termica  $T_4'$  su LTspice e si sono osservati i dati.

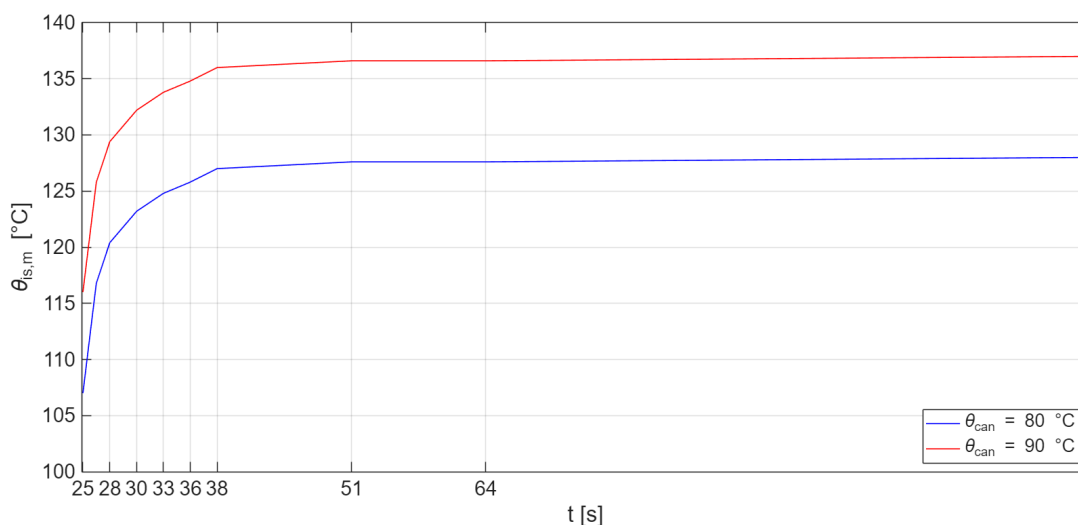
## 6.1 Confronto norma CEI IEC 60287 e modello termico con $T_4'''$ modificata

La normativa CEI IEC 60287 nella sua parte 2 definisce le formule relative alle resistenze termiche dei vari strati che compongono un cavo elettrico. Distingue le casistiche di posa dei cavi, che siano essi interrati o in aria libera, e nella fattispecie di cavi installati in canaline chiuse non esplicita un procedimento di calcolo *ad hoc*, bensì indica di riferirsi alla formule valide per altre pose, con le dovute modifiche specificate nella norma. Al fine di analizzare meglio l'impatto di una posa in canalina, si è studiato nel dettaglio il contributo della convezione naturale e l'irraggiamento [9], considerando la canalina come una piastra metallica isoterma [12]. Si evidenzia di seguito la maggior ambiguità tra i due modelli proposti nel documento di tesi.



**Figura 6.1:** Andamento di  $\theta_{is}$  al variare di  $D_h$ , norma CEI IEC 60287

Se i due modelli [17], vale a dire quello fedele alla normativa e il circuito invece che prevede una modifica della resistenza esterna  $T_4'''$  proposta dalla norma, hanno uguali i parametri di  $T_1$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  e  $P_j$  poiché propri delle caratteristiche costruttive



**Figura 6.2:** Posa piana, confronto all’aumentare dell’altezza di canalina  $d_h$  per due diverse  $\theta_{rif}$ , simulazioni FEMM 4.2

del cavo, le principali differenze emergono con la resistenza  $T_4'''$ . Le due immagini riportate (Figura 6.1 e Figura 6.2) riportano risultati opposti: difatti, la Figura 6.1 che si riferisce ad un isolante in grado di resistere fino a  $90$  °C, indica che per la norma CEI IEC 60287 all’aumentare dell’altezza di canalina la temperatura dell’isolante diminuisce [12], mentre secondo la Figura 6.2 implementata con FEMM 4.2 e il modello termico a  $T_4'''$  modificata, la temperatura dell’isolante diminuisce con il diminuire dell’altezza di canalina. Questi risultati diametralmente opposti andrebbero verificati sperimentalmente, tenendo conto che da un lato si può pensare che la temperatura di canalina aumenti per una minore distanza tra la parete superiore della stessa e l’isolante dei cavi, andando di conseguenza ad influenzare le guaine; tuttavia, si deve anche considerare che essendo la canalina più *bassa*, i cavi risentono maggiormente della temperatura esterna di riferimento che è a sua volta minore della temperatura media interna la canalina. [19]

In generale, dai risultati delle simulazioni riportate nei vari capitoli, la norma CEI IEC 60287 riporta risultati di temperatura generalmente più alti rispetto il modello termico che vede distinte le resistenze di convezione ed irraggiamento; questo secondo modello, non prevede che il parametro dell’altezza di canalina  $D_h$  sia

direttamente esplicitato nel circuito di riferimento: di conseguenza, questo modello termico non può valutare l'incremento della temperatura di canalina dovuta ad una riduzione di  $D_h$ , e per questo motivo i risultati riportati presentano le grandi differenze descritte. Si rammenta che le simulazioni FEMM 4.2 sono state svolte impostando un valore di  $\theta_{can} = \theta_{rif}$  costante sulla base dei risultati delle simulazioni svolte su LTspice, e tale valore di temperatura, confrontando i dati tra i due modelli, ha un impatto maggiorativo sulle temperature degli isolanti.

## 6.2 Determinazione coefficiente $m$ e proposta di soluzione

Dalle simulazioni effettuate su FEMM 4.2, si è potuto osservare che a parità di corrente caricata nei cavi, ad influenzare maggiormente la temperatura degli isolanti non sia più di tanto la distanza reciproca tra essi ma la loro posizione all'interno della canalina. Riferendosi, ad esempio, alla Figura 5.9 e alla Figura 5.12, il cavo numero 4, vale a dire il primo cavo da sinistra dello strato superiore, presenta nelle due diverse disposizioni una forte differenza di temperatura.

**Tabella 6.1:** Confronto tra posa simmetrica ed asimmetrica di cavi a contatto secondo il modello termico con  $T_4'''$  modificata,  $\theta_{can} = 63 \text{ }^\circ\text{C}$

Posa dei cavi	$\theta_{is,1} [^\circ\text{C}]$	$\theta_{is,2} [^\circ\text{C}]$	$\theta_{is,3} [^\circ\text{C}]$	$\theta_{is,4} [^\circ\text{C}]$	$\theta_{is,5} [^\circ\text{C}]$
<b>Simmetrica</b>	103	117	103	119	119
<b>Asimmetrica</b>	105	132	110	183	137

In Tabella 6.1,  $\theta_{is,4}$  evidenzia, come detto, una differenza rilevante, che è comunque presente anche per gli altri cavi ma in misura minore. Il cavo numero 2 e il cavo numero 5 ( $\theta_{is,2}$  e  $\theta_{is,5}$ ) subiscono un incremento dovuto al surriscaldamento del cavo 4, ma è evidente che la posizione più centrale nella disposizione asimmetrica impatti maggiormente che il contatto tra i cavi stessi.

Al fine di valutare l'andamento attraverso l'analisi circuitale, si è implementato un coefficiente di correzione  $m$ , valutato come rapporto tra le temperature di isolante calcolate con il circuito in Figura 5.1 e le temperature di isolante calcolate con

FEMM 4.2 nei diversi casi di posa considerati. Il valore del rapporto lo si moltiplica nei modelli circuitali alla resistenza  $T'_4$  secondo la seguente espressione:

$$T'_4 = m \cdot \frac{U}{1 + 0,1(V + Y\theta_m)D_e} \quad (6.1)$$

I risultati delle simulazioni sono riportati in Tabella 6.2, in cui alla colonna "cavo" si riporta il cavo più surriscaldato del gruppo.

**Tabella 6.2:** Confronto  $\theta_{is}$  calcolate con il coefficiente correttivo  $m$

		CEI IEC 60287, $\theta_{can} = 92 \text{ }^\circ\text{C}$			$T_4'''$ modificata, $\theta_{can} = 63 \text{ }^\circ\text{C}$		
Posa	# cavo	m	$\theta_{is,FEMM} [^\circ\text{C}]$	$\theta_{is}(m) [^\circ\text{C}]$	m	$\theta_{is,FEMM} [^\circ\text{C}]$	$\theta_{is}(m) [^\circ\text{C}]$
A	2	1,061	146	144,11	1,103	123	116,53
B	4/5	1,039	143	142,93	1,067	119	114,75
C	4	1,489	205	165,13	1,641	183	141,59
D	3	1,075	148	144,71	1,121	125	117,26

In generale, dalle tabelle dei risultati termici riportate nelle precedenti sezioni, si può affermare che:

- in dipendenza della posizione all'interno della canalina, un cavo è maggiormente sollecitato tanto più si trova lontano dalle pareti, ponendo  $m > 1$ ;
- per le medesime ragioni, un cavo che si presume essere a contatto con le pareti di canalina può vedere ridotta la sua temperatura rispetto alle previsioni della norma CEI IEC 60287, ponendo  $m \lesssim 1$ ;
- per quanto riguarda la vicinanza dei cavi, ipotizzando il caso peggiore in cui questi siano a contatto all'interno della canalina, si può ulteriormente incrementare il coefficiente  $m$ , tenendo conto tuttavia che l'impatto dell'adiacenza dei cavi è meno rilevante della posizione (secondo i risultati proposti nella tesi);
- rispetto ad una simulazione con gli elementi finiti (FEMM 4.2), i risultati circuitali su LTspice, pur prendendo come riferimento le temperature su FEMM 4.2, restituiscono risultati più bassi, a volte anche notevolmente inferiori;

Valutando i risultati ottenuti su FEMM 4.2 e su LTspice, si possono proporre delle fasce di valori di  $m$  in Tabella 6.3 tali per cui, in base alla disposizione dei cavi e alla reciproca distanza, applicati sui modelli termici proposti possono dare una valutazione di massima delle temperature.

**Tabella 6.3:** Tabella coefficiente di correzione  $m$

Posizione	parete			centrale		
	1	2	3+	1	2	3+
<b>Strato</b>	1	2	3+	1	2	3+
<b>Valori</b>	0,8/1	1/1,1	1,2/1,3	1,1/1,2	1,3/1,6	1,7/2
<b>Adiacenza con altri cavi</b>						
<b>1/2 cavi</b>	+0/0,15	+0,1/0,2	+0,15/0,25	+0/0,1	+0,1/0,2	+0,2/0,3
<b>circondato</b>	+0/0,2	+0,1/0,2	+0,2/0,3	+0/0,1	+0,1/0,2	+0,2/0,3
<b>separati</b>	+0/0,05	+0/0,05	+0/0,1	+0/0,05	+0,05/0,1	+0,1/0,15

La Tabella 6.3 la si legge valutando la **Posizione** del cavo nella canalina, se adiacente alla parete o in posizione più centrale; **Strato** indica a quello livello si trova nel caso in cui la posa sia su più strati; si sceglie in **Valori** il valore base di  $m$ . Al fine di considerare anche i contributi dei cavi vicini al cavo considerato, in base al numero di quanti lo circondano si somma al valore base precedentemente trovato gli intervalli riportati nelle varie celle. Si ottiene il coefficiente correttivo  $m$  da implementare nella formula di  $T'_4$  (equazione 6.1).

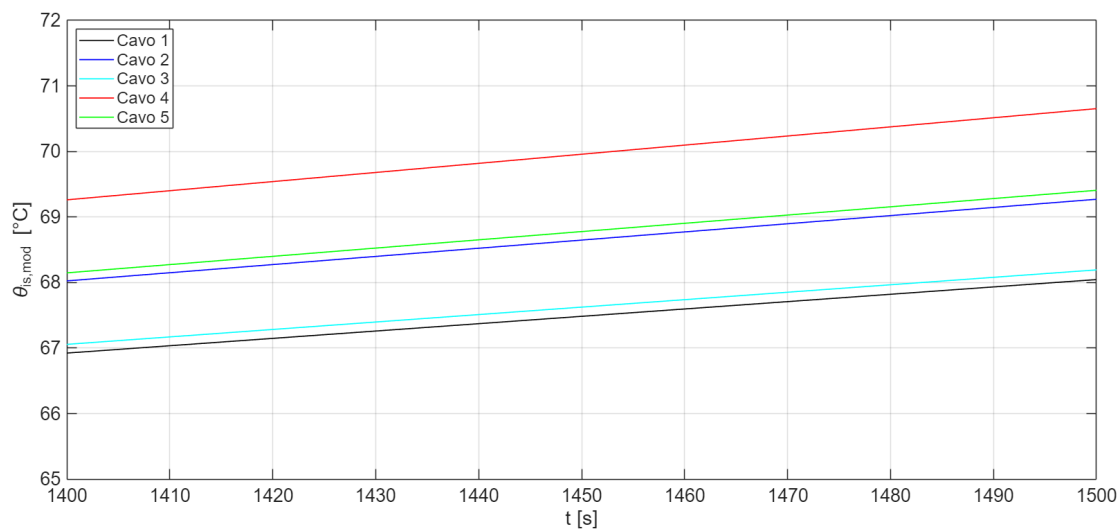
## 6.3 Valutazione della riduzione della sezione dei cavi

Avendo osservato che i valori delle temperature a regime dei cavi, caricati con le portate massime, in entrambi i modelli conferiscono riscontri positivi, si vuole valutare una riduzione della sezione dei cavi. Si considera nella seguente analisi:

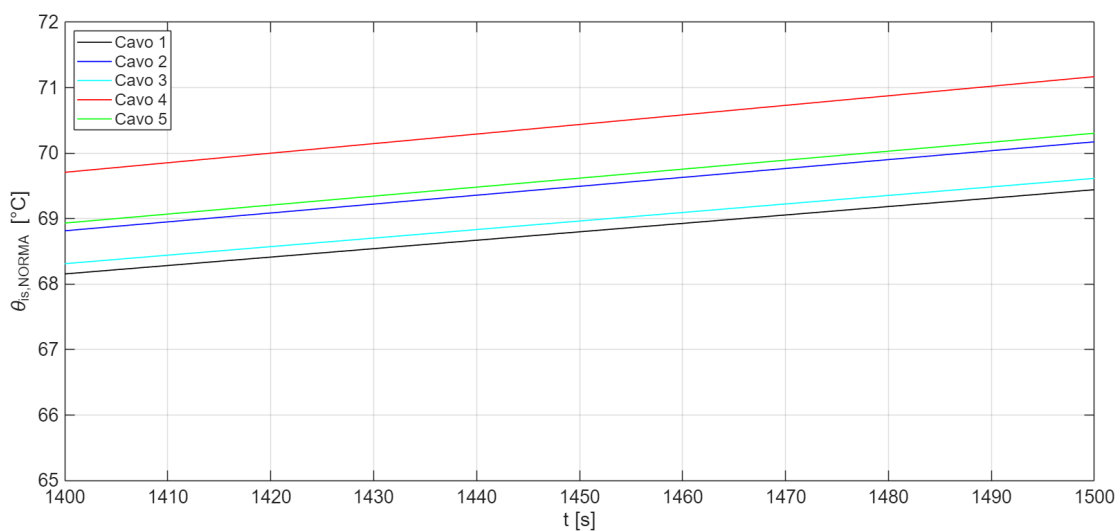
- dal caso studio conferito da Alstom Ferroviaria S.p.A. si valuta come caso più gravoso per  $t = 1500$  s e  $I = 445,85$  A: il valore di Volume Heat Generation da impostare su FEMM 4.2 risulta essere  $VHG = 175325 \frac{W}{m^3}$ ;
- cavi aventi sezione pari a  $S = 185$  mm<sup>2</sup>: si considera una portata massima dei cavi con  $k_2 = 0,62$  e  $k^* = 1,46$  pari a  $I_{corr,185} = 506,91$  A [4];
- si propone un confronto tra i risultati restituiti dal modello termico della norma CEI IEC 60287 e dal modello termico con  $T_4'''$  modificata [9], valutando puntualmente per ciascun cavo il coefficiente correttivo  $m$  appropriato;
- l'analisi è effettuata sul caso peggiore di posa valutata nei precedenti capitoli: posa asimmetrica di 5 cavi a contatto su due strati (Posa C). I risultati calcolati tramite FEMM 4.2 sono a regime termico raggiunto, dunque per intervalli maggiori di  $t = 1500$  s.

Si riportano nei grafici in Figura 6.3 e Figura 6.4 gli andamenti delle  $\theta_{is}$  dei cavi per entrambi i modelli termici.

Si riportano in Appendice anche i risultati puntuali delle temperature dell'isolante dei cavi. Si evidenzia dalle figure che il regime termico non è stato raggiunto e che in quell'istante di tempo le temperature dei cavi sono pressoché uguali, indipendentemente dalla posizione del cavo nella canalina e dai contatti reciproci.



**Figura 6.3:**  $\theta_{is,mod}$  all'istante  $t = 1500$  s, modello termico con  $T_4'''$  modificata



**Figura 6.4:**  $\theta_{is,NORMA}$  all'istante  $t = 1500$  s, modello termico della norma CEI IEC 60287

## 6.4 Considerazioni conclusive

In conclusione, valutando i risultati per una sezione ridotta dei cavi nel paragrafo precedente, si può affermare che secondo le ipotesi e le simulazioni proposte in tutto il documento, in linea teorica la riduzione della sezione dei cavi può essere effettuata, poiché secondo il caso peggiore delle correnti proposte da Alstom Ferroviaria S.p.A. i limiti termici degli isolanti sono rispettati. Tale valutazione è valida per una posa all'interno di una canalina ove i cinque cavi sono a contatto fra loro.

Per tali correnti negli intervalli specificati in Tabella 1.3, non si apprezza una significativa differenza tra il modello termico proposto dalla norma CEI IEC 60287 e il modello termico valutato con la resistenza termica  $T_4'''$ ; principalmente, le differenze maggiori che si presentano tra i due circuiti si osservano a regime termico raggiunto, con il modello della norma che riporta valori di temperatura più alti. Rispetto ad un'analisi con gli elementi finiti (FEMM 4.2), i modelli circuitali restituiscono temperature più basse degli isolanti; per questo motivo, è necessario valutare a livello sperimentale (in laboratorio) quanto la convezione naturale impatti sulla canalina anche tenendo conto del materiale che la compone, considerando eventualmente la possibilità di una modifica della geometria o della tipologia di canalina.

Nella valutazione generale del problema, la norma CEI IEC 60287 propone un modello termico del cavo esaustivo per quanto riguarda il cavo stesso, mentre è lacunosa nell'implementazione della resistenza esterna e nella valutazione della convezione e dell'irraggiamento. Il modello termico che prevede la  $T_4'''$  della norma modificata evidenzia maggiormente tali scambi termici.

Infine, dalle valutazioni in Figura 6.4 e Figura 6.3, osservando i valori di temperatura raggiunta in relazione alla temperatura massima ammissibile dell'isolante si potrebbero proporre ulteriori riduzioni di sezione dei cavi, sebbene è necessario considerare che tali previsioni sarebbero da confermare con prove sperimentali.

Appendice A

Appendice

## A.1 Tabelle delle norme

- **Tabella 8.1:** riportante i valori relativi al fattore di correzione  $k_5$ . Per il singolo nucleo caricato  $k_5 = 1$ . [4]

**Tabella A.1:** Tabella fattore di correzione  $k_5$

Numero di nuclei caricati	2	3	4	5	7	9	12	19
fattore di correzione $k_5$	0,91	0,78	0,63	0,59	0,51	0,46	0,41	0,38

- **Tabella 8.2:** riportante i valori relativi delle portate di riferimento  $I_{cable}$  per una serie di sezioni. [4]

**Tabella A.2:** Portata  $I_{cable}$  di riferimento cavi a diverse sezioni

Sezione nominale dei conduttori [ $mm^2$ ]	Portata $I_{cable}$ [A]
1	20
1,5	25
2,5	33
...	...
150	490
185	560
240	675
300	775
400	950

- **Tabella 8.3:** riportante i valori relativi del fattore di correzione  $k^*$  a diverse temperature di riferimento. Per una qualsiasi temperatura  $T_c(max)$  riferirsi alla formula 2.8.[4]

**Tabella A.3:** Tabella fattore di correzione  $k^*$

$T_c(max)$ [ $^{\circ}C$ ]	Fattore $k^*$
90	1,0
105	1,14
120	1,26
140	1,40
150	1,46

- **Tabella 8.4:** riportante i valori del fattore di correzione  $k_1$  per diverse temperature ambiente di riferimento  $T_{amb}$  e differenti temperature massime ammissibili dell'isolante  $T_{c,max}$ . [4]

**Tabella A.4:** Tabella fattore di correzione  $k_1$

$T_{amb}$ [ $^{\circ}C$ ]	$k_1$ @ $T_{c,max} = 90$ $^{\circ}C$	$k_1$ @ $T_{c,max} = 105$ $^{\circ}C$	$k_1$ @ $T_{c,max} = 120$ $^{\circ}C$	$k_1$ @ $T_{c,max} = 140$ $^{\circ}C$	$k_1$ @ $T_{c,max} = 150$ $^{\circ}C$
35	1,11	1,06	1,06	1,05	1,05
45	1	1	1	1	1
55	0,88	0,91	0,93	0,95	0,95
65	0,75	0,82	0,86	0,89	0,90
75	0,58	0,71	0,77	0,83	0,85
85	0,33	0,58	0,68	0,76	0,79
95	-	0,41	0,58	0,69	0,72
105	-	-	0,45	0,61	0,65
115	-	-	0,26	0,51	0,58
125	-	-	-	0,40	0,49
135	-	-	-	0,23	0,38
145	-	-	-	-	0,22

- **Tabella 8.5:** riportante i valori del fattore di correzione  $k_2$  per il numero di cavi installati e la tipologia di posa.[4]

**Tabella A.5:** Tabella fattore di correzione  $k_2$

Numero di cavi caricati insieme	Cavi in aria libera	Cavi su canaline, singolo strato	Cavi su canaline, doppio strato	Cavi su canaline, strati multipli	Cavi su pavimento o su muro	Cavi su soffitto o sotto pavimento	Cavi in tubo, condotto o canalina chiusa	Cavi in tubo o condotto chiuso, termicamente isolato
1	1	1	1	1	1	0,95	0,95	0,76
2	-	0,87			0,85	0,81	0,80	0,61
3	-	0,83	0,83		0,79	0,72	0,70	0,53
4	-	0,78	0,71	0,71	0,75	0,68	0,65	0,49
8	-	0,74	0,59	0,52	0,75	0,62	0,52	0,40
12	-	0,73	0,54	0,45	0,75	0,61	0,45	0,34
16	-	0,72	0,51	0,41	0,75	0,61	0,41	0,31
20+	-	0,71	0,47	0,38	0,75	0,61	0,38	0,29

- **Tabella 8.6:** riportante i valori del fattore di correzione  $k_3$  sulla base dell'incremento di temperature  $\Delta T$  rispetto la temperatura massima ammissibile del cavo.[4]

**Tabella A.6:** Tabella fattore di correzione  $k_3$

$\Delta T$ [K]	$k_3(\Delta T)$	Influence on predicted cable lifetime
0	1,00	Unchanged predicted lifetime
10	1,10	Lifetime divided by 2
20	1,18	Lifetime divided by 4
30	1,26	Lifetime divided by 8

- **Tabella 8.7:** riportante i valori del fattore di correzione  $C_{fl}$  del coefficiente  $C_{LL}$  (2.13) per il calcolo della resistenza termica  $T_1$  (equazione 2.12). Il fattore di correzione è valutato sulla base del numero di nuclei caricati nel cavo; per un nucleo caricato,  $C_{fl} = 1$ . [12]

**Tabella A.7:** Tabella fattore di correzione  $C_{fl}$

Numero di nuclei	2	3	4	5	6
Fattore $C_{fl}$	1,16	1,29	1,53	1,80	2,08

- **Tabella 8.8:** riportante i valori dei coefficienti  $U$ ,  $V$  e  $Y$  per il calcolo della resistenza termica  $T'_4$ , sulla base della tipologia di canalina installata. [12]

**Tabella A.8:** Tabella coefficienti  $U$ ,  $V$  e  $Y$

Condizione di installazione	U	V	Y
Condotto metallico	5,2	1,4	0,011
Condotto in fibra in aria	5,2	0,83	0,006
Condotto in fibra nel cemento	5,2	0,91	0,010
In amianto in aria	5,2	1,2	0,006
In amianto nel cemento	5,2	1,1	0,011
Cavo pressione gas in tubo	0,95	0,46	0,0021
Cavo tipo tubo di pressione olio	0,26	0,0	0,0026
Condotto in plastica	1,87	0,312	0,0037
Condotto in terracotta	1,87	0,28	0,0036
Condotto in plastica riempiti d'acqua	0,1	0,03	0,001

- **Tabella 8.9:** riportante i valori dei coefficienti  $Z$ ,  $E$  e  $C_g$  per il calcolo della resistenza termica esterna  $T_4'''$ , sulla base del numero di cavi installati e della loro disposizione. [12]

**Tabella A.9:** Tabella valori  $Z$ ,  $E$  e  $C_g$

No.	Installazione	$Z$	$E$	$C_g$
1	Cavo singolo	0,21	3,94	0,60
2	Due cavi a contatto, orizzontali	0,29	2,35	0,50
3	Tre cavi, posa a trifoglio	0,96	1,25	0,20
4	Tre cavi a contatto, orizzontali	0,62	1,95	0,25
5	Due cavi a contatto, verticali	1,42	0,86	0,25
6	Due cavi non a contatto, $D_e^*$ verticale	0,75	2,80	0,30
7	Tre cavi a contatto, verticali	1,61	0,42	0,20
8	Tre cavi non a contatto, $D_e^*$ verticale	1,31	2,00	0,20

## A.2 Tabelle risultati aggiuntivi delle simulazioni

- Posa su due strati simmetrica, cavi a contatto (Posa B)

**Tabella A.10:** Posa B, risultati simulazioni

n° cavo	CEI IEC 60287, $\theta_{can} = 92 \text{ }^{\circ}\text{C}$			$T_4'''$ modificata, $\theta_{can} = 63 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
	$m$	$\theta_{is,FEMM} [^{\circ}\text{C}]$	$\theta_{is} [^{\circ}\text{C}]$	$m$	$\theta_{is,FEMM} [^{\circ}\text{C}]$	$\theta_{is} [^{\circ}\text{C}]$
1	0,942	135	140,58	0,923	103	107,71
2	1,026	147	144,40	1,049	117	113,89
3	0,942	135	140,58	0,923	103	107,71
4	1,033	148	144,67	1,067	119	114,75
5	1,033	148	144,67	1,067	119	114,75

- Posa piana su singolo strato, cavi a contatto (Posa D)

**Tabella A.11:** Posa D, risultati simulazioni

n° cavo	CEI IEC 60287, $\theta_{can} = 99 \text{ }^{\circ}\text{C}$			$T_4'''$ modificata, $\theta_{can} = 63 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
	$m$	$\theta_{is,FEMM} [^{\circ}\text{C}]$	$\theta_{is} [^{\circ}\text{C}]$	$m$	$\theta_{is,FEMM} [^{\circ}\text{C}]$	$\theta_{is} [^{\circ}\text{C}]$
1	0,915	126	136,89	0,896	100	106,26
2	1,046	144	143,37	1,076	120	115,04
3	1,075	148	144,71	1,121	125	117,26
4	1,046	144	143,37	1,094	122	115,91
5	0,915	126	136,89	0,951	106	108,96

- Posa su due strati asimmetrica, cavi a contatto (Posa C), risultati a regime termico raggiunto per una corrente pari a 445,83 A

**Tabella A.12:** Posa C, risultati simulazioni a regime per  $I = 445,83 A$

n° cavo	CEI IEC 60287, $\theta_{can} = 80 \text{ }^\circ C$			$T_4'''$ modificata, $\theta_{can} = 58 \text{ }^\circ C$		
	$m$	$\theta_{is,FEMM} [^\circ C]$	$\theta_{is} [^\circ C]$	$m$	$\theta_{is,FEMM} [^\circ C]$	$\theta_{is} [^\circ C]$
1	0,926	108	113,91	0,899	87	92,56
2	1,089	127	119,89	1,126	109	101,27
3	0,961	112	115,26	0,951	92	93,43
4	1,398	163	131,05	1,519	147	116,49
5	1,123	131	121,13	1,157	112	102,50

- Posa su due strati asimmetrica, cavi a contatto (Posa C), risultati a  $t = 1500 s$  per una corrente pari a 445,83 A

**Tabella A.13:** Posa C, risultati simulazioni a  $t = 1500 s$  per  $I = 445,83 A$

n° cavo	CEI IEC 60287			$T_4'''$ modificata		
	$m$	$\theta_{can} [^\circ C]$	$\theta_{is} [^\circ C]$	$m$	$\theta_{can} [^\circ C]$	$\theta_{is} [^\circ C]$
1	0,926	55,05	69,44	0,899	50,66	68,04
2	1,089	55,05	70,17	1,126	50,66	69,27
3	0,961	55,05	69,61	0,951	50,66	68,19
4	1,398	55,05	71,17	1,519	50,66	70,65
5	1,123	55,05	70,30	1,157	50,66	69,41

# Elenco delle tabelle

1.1	Tabella parametri di tensione nominale norma CEI EN 50382 . . . . .	2
1.2	Tabella livelli di tensione CEI EN 50153 . . . . .	3
1.3	Tabella delle correnti nei cavi . . . . .	5
2.1	Coefficienti rame . . . . .	16
3.1	Analogia termico/elettrica . . . . .	24
3.2	Caratteristiche costruttive del cavo . . . . .	25
3.3	Parametri costanti di $T'_4$ per canalina metallica . . . . .	27
3.4	Tabella proprietà capacità termiche . . . . .	32
3.5	Calore specifico XLPE dipendente dalla temperatura . . . . .	33
3.6	Coefficienti $k$ e portata del cavo . . . . .	40
3.7	Parametri costanti calcolo coefficiente di scambio $h$ . . . . .	43
3.8	Risultati simulazione con parametri norma IEC 60287 . . . . .	44
3.9	Temperature conduttore e isolante a diverse $\theta_m$ alla portata $I_{corr}$ . . . . .	47
3.10	Risultati simulazione con parametri norma IEC 60287 . . . . .	49
3.11	Temperatura isolante e canalina a diversi valori $D_h$ alla portata $I_{corr}$ . . . . .	49
3.12	Confronto risultati dei circuiti con $T_4$ unita e $T'_4/T''_4$ singolarmente esplicitate . . . . .	50
3.13	Caratteristiche costruttive del cavo con sezione ridotta a $185 \text{ mm}^2$ . . . . .	51
3.14	Coefficienti $k$ e portata del cavo a sezione ridotta a $185 \text{ mm}^2$ . . . . .	51
3.15	Risultati simulazione con cavo a sezione $185 \text{ mm}^2$ . . . . .	53
3.16	Caratteristiche costruttive del cavo a $150 \text{ mm}^2$ . . . . .	54
3.17	Coefficienti $k$ e portata del cavo a $150 \text{ mm}^2$ . . . . .	54
3.18	Valori parametri circuito cavo a $150 \text{ mm}^2$ . . . . .	54

3.19 Risultati simulazione con cavo a sezione $150 \text{ mm}^2$ . . . . .	54
3.20 Valori puntuali di $\rho_T$ e $c_{sp}$ a specifiche temperature . . . . .	57
3.21 Caratteristiche di peso isolante EI 111 . . . . .	59
3.22 Valori estremi di $\rho_T$ e $c_{sp}$ . . . . .	59
3.23 Risultati di $\theta_{is}$ a diverse $I_{corr}$ . . . . .	60
3.24 Caratteristiche costruttive del cavo dotato di guaina a $240 \text{ mm}^2$ . .	63
3.25 Coefficienti $k$ e portata del cavo dotato di guaina . . . . .	63
3.26 Valori di $\rho_g$ , $\rho_{is}$ , $c_{sp,g}$ e $c_{sp,is}$ . . . . .	64
3.27 Temperature alle diverse correnti, cavo dotato di guaina . . . . .	65
3.28 Confronto risultati dei circuiti con $T_4$ unita e $T_4'/T_4'''$ singolarmente esplicitate . . . . .	65
4.1 Proprietà termofisiche aria a $\theta_f = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . . . . .	79
4.2 Risultati convezione libera a $\theta_f = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . . . . .	79
4.3 Risultati convezione libera con $\theta_s/\theta_{can}$ variabile . . . . .	81
4.4 Risultati convezione libera a diverse $\theta_\infty$ . . . . .	81
4.5 Tabella valori emissività $\epsilon$ per alcuni acciai . . . . .	84
4.6 Confronto perdite per convezione ed irraggiamento a due $\epsilon$ estreme	85
5.1 Analisi impatto sulla temperatura di canalina $\theta_{can}$ . . . . .	89
5.2 Risultati di $\theta_{is}$ a diverse $\theta_{can}$ , posa simmetrica, cavi non a contatto	95
5.3 Risultati di $\theta_{is}$ a diverse $\theta_{can}$ , posa simmetrica, cavi a contatto . . .	97
5.4 Risultati di $\theta_{is}$ a diverse $\theta_{can}$ , posa asimmetrica, cavi a contatto . .	100
5.5 Risultati di $\theta_{is}$ a diverse $\theta_{can}$ , posa piana, cavi a contatto . . . . .	101
5.6 Calcolo del coefficiente correttivo $m$ . . . . .	105
5.7 Valori temperature degli isolanti dei singoli cavi . . . . .	107
5.8 Calcolo del coefficiente correttivo $m$ , posa asimmetrica a contatto .	108
5.9 Valori temperature degli isolanti dei singoli cavi . . . . .	109
5.10 Valori $\theta_{is}$ attraverso $\tau_{th}$ . . . . .	111
6.1 Confronto tra posa simmetrica ed asimmetrica di cavi a contatto secondo il modello termico con $T_4'''$ modificata, $\theta_{can} = 63 \text{ }^\circ\text{C}$ . . . .	116
6.2 Confronto $\theta_{is}$ calcolate con il coefficiente correttivo $m$ . . . . .	117
6.3 Tabella coefficiente di correzione $m$ . . . . .	118

A.1	Tabella fattore di correzione $k_5$ . . . . .	123
A.2	Portata $I_{cable}$ di riferimento cavi a diverse sezioni . . . . .	123
A.3	Tabella fattore di correzione $k^*$ . . . . .	124
A.4	Tabella fattore di correzione $k_1$ . . . . .	124
A.5	Tabella fattore di correzione $k_2$ . . . . .	125
A.6	Tabella fattore di correzione $k_3$ . . . . .	125
A.7	Tabella fattore di correzione $C_{fl}$ . . . . .	126
A.8	Tabella coefficienti $U$ , $V$ e $Y$ . . . . .	126
A.9	Tabella valori $Z$ , $E$ e $C_g$ . . . . .	127
A.10	Posa B, risultati simulazioni . . . . .	128
A.11	Posa D, risultati simulazioni . . . . .	128
A.12	Posa C, risultati simulazioni a regime per $I = 445,83 A$ . . . . .	129
A.13	Posa C, risultati simulazioni a $t = 1500 s$ per $I = 445,83 A$ . . . . .	129

# Elenco delle figure

1.1	Posizione della canalina e cavi del caso studio . . . . .	4
2.1	Spaccato in sezione del cavo CEI IEC 60287 . . . . .	20
3.1	Modello termico generico del cavo . . . . .	23
3.2	Spaccato sezione del cavo . . . . .	25
3.3	Grafico per il calcolo di $(\Delta\theta_s)^{\frac{1}{4}}$ . . . . .	29
3.4	Modello termico con le sole resistenze . . . . .	30
3.5	Spaccato in sezione del cavo utilizzato nel caso studio . . . . .	31
3.6	Modello termico completo . . . . .	32
3.7	Andamento del calore specifico dell'XLPE . . . . .	33
3.8	Modello termico con behavioral current sources . . . . .	34
3.9	Circuiti ausiliari behavioral sources . . . . .	35
3.10	Modello termico del cavo . . . . .	36
3.11	. . . . .	42
3.12	Andamento temperature alla corrente $I_{corr}$ . . . . .	45
3.13	Andamento di $\theta_{is}$ al variare di $D_h$ . . . . .	46
3.14	Andamento di $h$ al variare di $D_h$ . . . . .	46
3.15	Modello termico con resistenze termiche $T_4$ singolarmente esplicitate	48
3.16	Confronto $\theta_{is}$ a $t = 1500 s$ e $I = 445,85 A$ . . . . .	55
3.17	Andamento del calore specifico $c_{sp}$ . . . . .	57
3.18	Andamento della resistività termica $\rho_T$ . . . . .	58
3.19	Fattore $k^*$ . . . . .	60
3.20	Spaccato in sezione cavo dotato di guaina . . . . .	62
3.21	Modello termico cavo dotato di guaina . . . . .	62

3.22 Andamento temperature ai nodi del modello termico del cavo dotato di guaina . . . . .	64
4.1 Modello termico del cavo . . . . .	78
4.2 Andamento resistenza termica $T_{4,conv}'''$ . . . . .	80
4.3 Andamento $h$ a diverse $\theta_\infty$ . . . . .	82
4.4 Andamento $T_{4,conv}'''$ a diverse $\theta_\infty$ . . . . .	82
4.5 Temperature $\theta_{is}$ a regime al variare di $l$ lunghezza della canalina . .	83
4.6 Andamento della resistenza $T_{4,rad}'''$ al variare di $\epsilon$ per $\theta_{can}$ a regime termico . . . . .	84
5.1 Modello termico di 5 cavi in posa piana orizzontale non a contatto .	88
5.2 Andamento di $\theta_{can}$ all'aumentare del numero di cavi caricati a parità di corrente $I_{corr} = 611,01 A$ secondo il modello termico con $T_4'''$ implementata . . . . .	91
5.3 Andamento di $\theta_{can}$ all'aumentare del numero di cavi caricati a parità di corrente $I_{corr} = 611,01 A$ secondo il modello termico della norma CEI IEC 60287 . . . . .	91
5.4 Andamento di $\theta_{is}$ all'aumentare del numero di cavi caricati a parità di corrente $I_{corr} = 611,01 A$ secondo il modello termico con $T_4'''$ implementata . . . . .	92
5.5 Andamento di $\theta_{is}$ all'aumentare del numero di cavi caricati a parità di corrente $I_{corr} = 611,01 A$ secondo il modello termico della norma CEI IEC 60287 . . . . .	92
5.6 Posa simmetrica su due strati, cavi non a contatto . . . . .	94
5.7 Volume Heat Generation conduttore rame, cavo avente sezione 240 $mm^2$ caricato a $I_{corr} = 611,01 A$ . . . . .	95
5.8 Surriscaldamento termico cavi, posa A . . . . .	96
5.9 Posa simmetrica su due strati, cavi a contatto . . . . .	97
5.10 Surriscaldamento termico cavi, posa B . . . . .	98
5.11 Posa simmetrica su due strati, cavi a contatto, confronto all'aumentare della distanza dei cavi dalle pareti laterali della canalina . . . .	98
5.12 Posa asimmetrica su due strati, cavi a contatto . . . . .	99
5.13 Surriscaldamento termico cavi, posa C . . . . .	100

5.14	Posa piano su singolo strato, cavi a contatto . . . . .	101
5.15	Surriscaldamento termico cavi, posa D . . . . .	102
5.16	Posa piana, confronto all'aumentare dell'altezza di canalina $d_h$ per due diverse $\theta_{rif}$ . . . . .	103
5.17	Modello termico dei 5 cavi con $T_4'''$ implementata . . . . .	105
5.18	Confronto tra le temperature degli isolanti dei cavi secondo la norma CEI IEC 60287 e la modifica di $T_4'''$ . . . . .	107
5.19	Confronto tra $\theta_{is}$ del cavo più sollecitato, posa asimmetrica di cavi a contatto . . . . .	109
6.1	Andamento di $\theta_{is}$ al variare di $D_h$ , norma CEI IEC 60287 . . . . .	114
6.2	Posa piana, confronto all'aumentare dell'altezza di canalina $d_h$ per due diverse $\theta_{rif}$ , simulazioni FEMM 4.2 . . . . .	115
6.3	$\theta_{is,mod}$ all'istante $t = 1500$ s, modello termico con $T_4'''$ modificata . .	120
6.4	$\theta_{is,NORMA}$ all'istante $t = 1500$ s, modello termico della norma CEI IEC 60287 . . . . .	120



# Bibliografia

- [1] Stephan Frei Anika Henke. «Analytical Thermal Cable Model for Bundles of Identical Single Wire Cables». In: (ott. 2023) (cit. a p. 1).
- [2] CEI EN 50382-1. *Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Cavi per materiale rotabile per alte temperature aventi speciali caratteristiche di comportamento al fuoco Parte 1: Prescrizioni generali*. 2009-01 (cit. alle pp. 2, 5, 7, 14, 22, 25, 39, 63).
- [3] CEI EN 50382-2. *Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Cavi per materiale rotabile per alte temperature aventi speciali caratteristiche di comportamento al fuoco Parte 2: Cavi unipolari isolati con gomma siliconica per temperature di 120 °C o 150 °C*. 2009-01 (cit. alle pp. 2, 14, 25, 39).
- [4] CEI EN 50343. *Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Materiale rotabile - Regole per l'installazione del cablaggio*. 2024-12 (cit. alle pp. 2, 7, 9, 25, 26, 39, 40, 51, 56, 89, 110, 119, 123–125).
- [5] Siechem: Wires Cables. *Siechem BS EN 50382-2 Single Core, ATC Conductor, Silicone Rubber Insulated and Unsheathed 3.6/6kV Rated Type FX 120 C Rolling Stock Cable* (cit. alle pp. 3, 7, 22, 25, 30, 41, 51, 56, 58, 62, 106).
- [6] CEI IEC 50153. *Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Materiale rotabile - Misure di protezione contro i pericoli di origine elettrica*. 2014 (cit. alle pp. 3, 8).
- [7] R. Cignetti. «Automatizzazione della procedura di dimensionamento dei cavi delle linee di Alta, Media e Bassa Tensione». Master Universitario di II Livello. Torino, Italia: Politecnico di Torino, 2023/2024 (cit. alle pp. 4, 23).

- [8] Diana Enescu, Angela Russo, Radu Porumb e George Seritan. «Dynamic Thermal Rating of Electric Cables: A Conceptual Overview». In: (2020) (cit. alle pp. 5, 21, 24).
- [9] F.P. Incropera T.D. Bergman A.S. Lavine e D.P. Dewitt. *Introduction to Heat Transfer (6th edition)*. 2011 (cit. alle pp. 5, 30, 56, 66, 67, 114, 119).
- [10] Gomaa F. A. Osman Ossama E. Gouda. «Enhancement of the thermal analysis of power cables installed in polyvinyl chloride (PVC) ducts under continuous and cyclic current loading conditions». In: *IET: The Institution of Engineering and Technology* (nov. 2020) (cit. alle pp. 5, 66, 86, 87, 94, 96).
- [11] CEI IEC 60287-1-1. *Part 1-1: Current rating equations and calculation of losses — General*. 2023 (cit. alle pp. 8, 15, 25, 26).
- [12] CEI IEC 60287-2-1. *Part 2-1: Thermal resistance — Calculation of thermal resistance*. 2023 (cit. alle pp. 8, 15, 25–27, 29, 43, 56, 59, 112, 114, 115, 126, 127).
- [13] CEI EN IEC 60288. *Conduttori per cavi isolati*. 2024-11 (cit. alle pp. 8, 14, 25, 30).
- [14] CEI EN 50125-1. *Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Condizioni ambientali per gli equipaggiamenti Parte 1: Equipaggiamenti di bordo per materiale rotabile*. 2014-10 (cit. a p. 8).
- [15] CEI EN 50125-2. *Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane - Condizioni ambientali per gli equipaggiamenti Parte 2: Impianti elettrici fissi*. 2003-04 (cit. a p. 8).
- [16] ME Joseph Nowarski M.Sc. «Thermal Time Constant - TTC». In: (mag. 2022) (cit. a p. 10).
- [17] Stephan Meier Damian Aegerter. «Model-based predictive control for use in RTTR temperature sensing systems of high voltage cables». In: (giu. 2019) (cit. alle pp. 31, 114).

- [18] Yong Sung Choi Kyoung - Yong Lee Jong - Seok Yang e Dae - Hee Park. «Specific Heat and Thermal Conductivity Measurement of XLPE Insulator and Semiconducting Materials». In: *School of Electrical, Electronic and Information Engineering Wonkwang University 344-2 Sinyong-Dong, Iksan, Jeonbuk, Republic of Korea* (2006) (cit. alle pp. 32, 33, 56).
- [19] Ali Sedaghat, Haowei Lu, Abdullah Bokhari e Francisco de León. «Enhanced Thermal Model of Power Cables Installed in Ducts for Ampacity Calculations». In: (2018) (cit. alle pp. 36, 115).
- [20] IEEE Ali Sedaghat Student Member e IEEE Francisco de León Senior Member. «Thermal Analysis of Power Cables in Free Air: Evaluation and Improvement of the IEC Standard Ampacity Calculations». In: (ott. 2014) (cit. alle pp. 66, 86, 87, 113).
- [21] Ezio Zandegiacomo. *Appunti di Trasmissione del Calore*. Corso di Fisica Tecnica per Ingegneria Industriale. 2009/2010 (cit. alle pp. 72, 74).
- [22] ABB. *Sistemi di canalizzazioni in metallo* (cit. a p. 83).