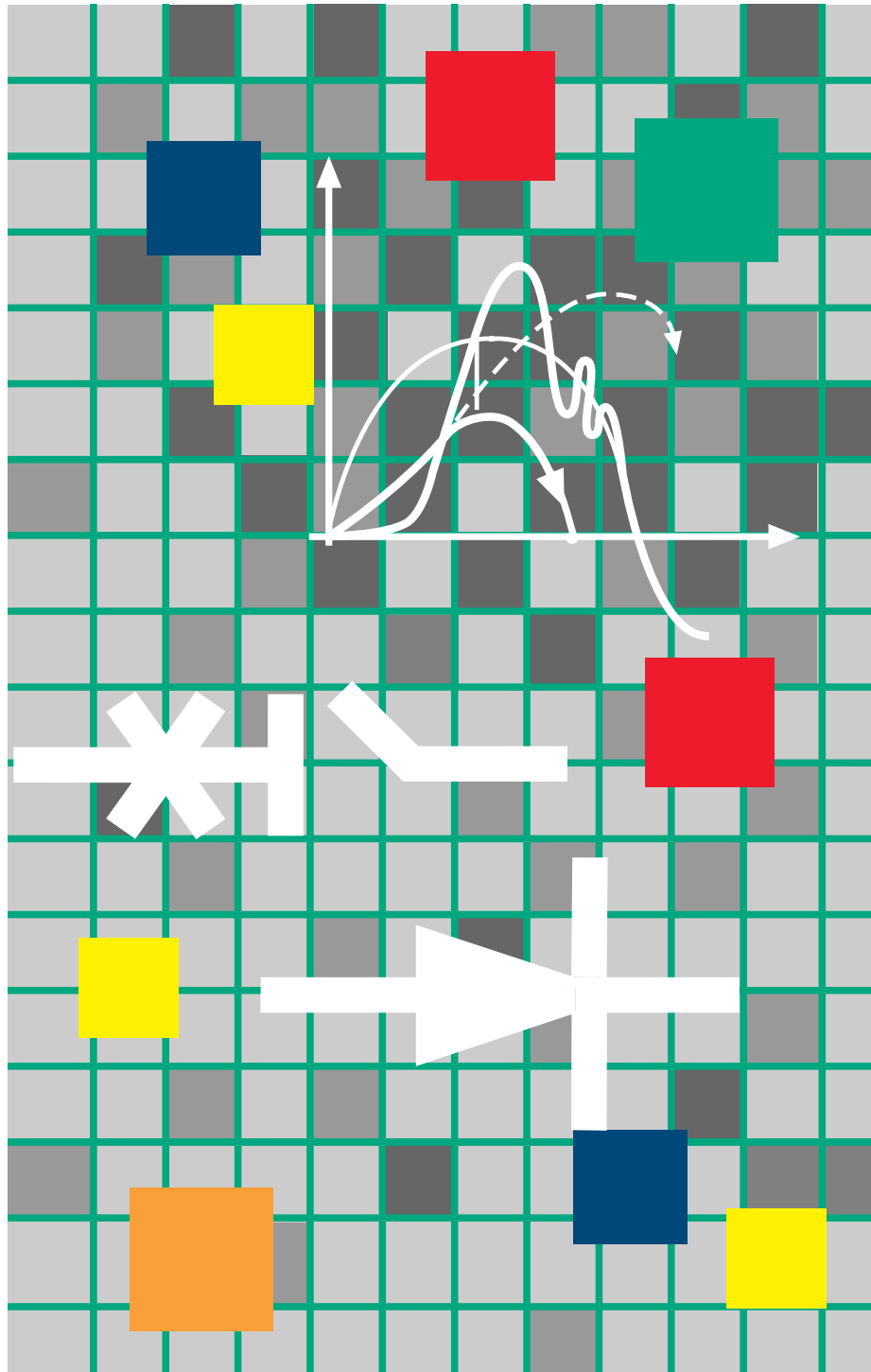


# *Dossier tecnico n° 2*

Studio termico  
dei quadri elettrici  
di bassa tensione



GROUPE SCHNEIDER

■ Magrini Galileo ■ Merlin Gerin ■ Modicon ■ Square D ■ Telemecanique

**Dossier tecnico n° 2**  
Redatto a cura della  
Attività Bassa Tensione

Questo quaderno tecnico ha lo scopo di portare un contributo alla comprensione e alla padronanza dei problemi termici relativi ad un quadro elettrico di Bassa Tensione. Dopo un richiamo delle norme e dei fenomeni termici: conduzione-irraggiamento-conduzione, si mostra come, utilizzando le tecniche di studio su modello generalmente riservate ad altri campi, si può realizzare un modello dei quadri di Bassa Tensione. Lo studio attraverso modello porta naturalmente a sistemi logici matematici che aiutano il progetto dei quadri elettrici contenenti interruttori. I risultati ottenuti sono comparati con le misure reali di temperatura. Infine sono richiamate la metodologia e le possibilità fornite dalla guida IEC 890.

# Studio termico dei quadri elettrici di bassa tensione

## Indice

<b>1. Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>2. I problemi termici in un quadro</b>	<b>3</b>
Cause, effetti e soluzioni	3
Punto sulle norme	4
<b>3. Comportamento termico di un quadro elettrico BT</b>	<b>5</b>
Richiamo dei principali fenomeni termici	5
Scambi nel caso di un quadro	7
<b>4. Presentazione dello studio su modello</b>	<b>8</b>
Principio	8
Modello della convenzione	9
Applicazione agli involucri BT	9
<b>5. Comportamento delle sorgenti di calore</b>	<b>10</b>
Le sbarre	10
Gli apparecchi	10
<b>6. Metodo di calcolo della temperatura negli involucri</b>	<b>12</b>
Principio	12
Descrizione dei dati da fornire e dei risultati ottenuti	12
Configurazioni studiate	12
Risultati	13
<b>7. Risultati sperimentali</b>	<b>14</b>
<b>8. Metodo proposto nella norma CEI 17.43 (rapporto IEC 890)</b>	<b>15</b>
<b>9. Conclusione</b>	<b>16</b>

Questa pubblicazione fa parte della collana "Dossier tecnici" coordinata dai Servizi Tecnici Centrali di Schneider Electric S.p.A. I Dossier Tecnici rappresentano un agile strumento di lavoro frutto del patrimonio di esperienze e competenze aziendali. La collezione ha lo scopo di fornire informazioni più approfondite ed essere un valido strumento di riferimento nei campi specifici delle apparecchiature elettromeccaniche, dell'elettronica industriale, del trasporto e della distribuzione dell'energia elettrica.

# Studio termico dei quadri elettrici di bassa tensione

---

## 1. Introduzione

### **Conoscenza termica dei quadri elettrici per bassa tensione.**

I nuovi metodi di fabbricazione sviluppati nell'industria negli ultimi anni (flusso teso...) hanno evidenziato una nuova nozione:

#### **la sicurezza industriale**

Questo concetto, che racchiude due aspetti differenti:

la sicurezza delle persone e dei beni e la disponibilità dell'energia elettrica, quando applicato a procedimenti complessi, mette in evidenza i punti critici, il cui funzionamento deve essere perfettamente conosciuto.

#### **Il quadro elettrico è uno di questi punti critici**

Occorre notare che il problema è simile per quanto riguarda il grande terziario.

Considerato un tempo come un semplice punto di passaggio, il quadro elettrico è diventato il vero centro nevralgico degli impianti elettrici. Dalla sua sicurezza dipende la sicurezza dell'insieme dell'impianto e quindi di tutta l'attività industriale o terziaria.

La padronanza del suo funzionamento richiede la conoscenza ed il controllo non solo del funzionamento dei suoi costituenti ma anche delle influenze esterne alle quali essi sono sottoposti. Un quadro elettrico corrisponde all'associazione di quattro elementi fondamentali:

- l'involucro;
- gli apparecchi;
- i collegamenti;

■ le funzioni che presiedono alla segnalazione, al comando, al trattamento dell'informazione.

Il quadro elettrico è **sempre più tecnico**.

Esso richiede un certo numero di **studi di base** al fine di padroneggiare, al momento del progetto, le condizioni di funzionamento dei suoi costituenti in un determinato ambiente.

Questi studi riguardano in particolare **gli aspetti termici**, che sono l'oggetto di questo quaderno tecnico.

---

## 2. I problemi termici in un quadro

La conoscenza del comportamento termico è sempre più importante per tre principali ragioni:

- tendenza a installare gli apparecchi elettrici entro quadri (sicurezza), sempre più spesso realizzati in materiali isolanti (di modesta efficacia nella dissipazione del calore);
- evoluzione degli apparecchi, che sempre più spesso contengono elettronica e le cui dimensioni sono sempre più ridotte;
- tendenza a riempire i quadri al massimo, con coefficienti di contemporaneità sempre più elevati.

### 2.1 Cause, effetti e soluzioni

■ dell'effetto Joule ( $P = R I^2$ ), vale a dire della sua resistenza al passaggio della corrente;

■ della temperatura ambiente.

L'apparecchio elettrico è progettato nel rispetto delle norme di prodotto che definiscono le temperature massime da non superare per la sicurezza delle persone: temperatura della scatola e degli organi di manovra, sovratemperatura massima per i terminali. Questo è verificato con prove

di tipo dei prodotti. In un quadro elettrico, poiché i materiali sono sottoposti a condizioni di utilizzazione molto variate, le cause di sovratemperatura sono molteplici.

La tabella di figura 1 presenta le cause principali, i loro effetti ed i possibili rimedi.

Tutto il problema consiste nel garantirsi, al momento della progettazione del quadro, che i suoi componenti funzioneranno in condizioni di temperatura meno gravose di quelle previste dalle loro norme di prodotto.

Gli apparecchi di connessione, (interruttori, contattori, ecc...), dovranno evidentemente poter essere attraversati dalla corrente prevista senza problemi.

Oltre all'obiettivo di sicurezza per le persone ed i beni, non devono essere perduti di vista altri due obiettivi.

■ disponibilità dell'energia elettrica, (nessun funzionamento intempestivo o "non funzionamento");

■ durata della vita dei componenti.

In definitiva, la sfida consiste nel prevedere con un buon grado di certezza lo stato di funzionamento termico del quadro.

Per questo, vi sono tre tipi di soluzioni:

- l'esperienza del costruttore;
  - le prove reali per i quadri in esecuzione ripetitiva;
  - l'utilizzazione di metodi matematici con i quali è possibile determinare, in funzione delle caratteristiche dell'involucro, la coppia corrente/temperatura per ognuna delle sorgenti di calore, (apparecchi-conduttori) (vedi paragrafo 4), e questo funzione della loro posizione e della temperatura dell'aria che li circonda.
- È evidente l'utilità di un metodo matematico verificato dall'esperienza e dalle prove che permetta di studiare comparativamente le numerose configurazioni di installazione possibile e quindi di ottimizzare la realizzazione del quadro sui piani termico e di costo.

cause	effetti	protezione	rimedi	
<b>norma IEC 439</b>				
temperatura esterna troppo alta	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ temperatura interna del quadro troppo elevata</li> <li>■ intervento degli sganciatori termici</li> <li>■ invecchiamento dell'elettronica</li> <li>■ temperatura delle pareti dell'involucro troppo elevata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ allarme</li> <li>■ avvio della ventilazione</li> </ul>	migliorare la ventilazione dei locali o del quadro	situazioni aleatorie possibili pur con un progetto secondo la regola dell'arte
coefficiente di contemporaneità elevato superamento delle possibilità dell'impianto	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ intervento della protezione di testa del quadro</li> <li>■ temperatura interna del quadro troppo elevata</li> <li>■ temperatura delle pareti dell'involucro troppo elevata</li> </ul>	distacco di carico	dimensionamento corretto del quadro	
<b>norma IEC 634</b>				
corto circuito o sovraccarico	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ deterioramento dei conduttori</li> <li>■ deterioramento dei supporti isolanti delle sbarre</li> </ul>	intervento di protezione	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ dimensionamento corretto dei conduttori</li> <li>■ buona tenuta elettrodinamica dei supporti a temperatura elevata</li> </ul>	
cattivo serraggio	distruzione dei conduttori degli apparecchi	intervento lato monte aleatorio	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ verifica dei serraggi</li> <li>■ individuazione dei punti di riscaldamento</li> </ul>	problemi di montaggio e di manutenzione
<b>norma IEC 898</b>				
sezione dei conduttori troppo esigua	distruzione dei conduttori	nessuna	dimensionamento corretto dei conduttori	errore di progetto dell'impianto
<b>norma IEC 947</b>				
errore sul declassamento degli apparecchi o loro cattivo posizionamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ funzionamento anormale (intervento)</li> <li>■ invecchiamento prematuro</li> </ul>	intervento o segnalazione	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ rivedere la scelta dei costituenti e/o il loro posizionamento</li> <li>■ ventilazione</li> </ul>	errore nella scelta o nell'utilizzazione degli apparecchi

Figura 1 - Problemi termici: cause ed effetti

# Studio termico dei quadri elettrici di bassa tensione

## 2. 2 Il punto sulle norme

Numerose norme si occupano del campo della bassa tensione, ad esempio, in Italia la norma CEI 64-8, che definisce le norme da rispettare per tutti gli impianti BT.

Per gli aspetti di definizione e di progetto degli apparecchi e dei quadri BT ci si riferisce rispettivamente:

- alle norme degli apparecchi, ad esempio la IEC 947;
- alla norma IEC 439 per i quadri BT.

**La norma internazionale IEC 439** è divisa in quattro parti:

- IEC 439.1 che riunisce le prescrizioni per i quadri totalmente sottoposti a prove di tipo (AS) e parzialmente sottoposti a prove di tipo (ANS);
- IEC 439.2 che da le prescrizioni per i condotti sbarre;
- IEC 439.3 che riguarda i quadri di bassa tensione installati in luoghi accessibili a persone non addestrate;
- IEC 439.4 che da le prescrizioni per i quadri per cantiere.

La parte che ci riguarda particolarmente per i quadri di bassa tensione è la IEC 439.1, la cui terza edizione è stata pubblicata nel 1992.

Nel contesto europeo, quest'ultima norma serve da struttura portante per la maggior parte delle norme nazionali (British standard, NFC, CEI, DDE...).

In effetti il contenuto di queste ultime riprende abbastanza fedelmente il testo della norma IEC e le poche differenze corrispondono più ad abitudini proprie del paese che a posizioni contrarie ai punti fondamentali delle norme IEC. In Italia la norma corrispondente è la EN60 439.1.

L'apporto essenziale di questa norma è stato quello di definire in modo preciso due nozioni che vanno tutte e due nel senso di un miglioramento della sicurezza.

Esse sono:

- la nozione di quadri totalmente provati AS o parzialmente provati ANS;
- la nozione di forme di segregazione (vedi figura 2).

Senza entrare nei particolari, si può dire che i quadri AS corrispondono a prodotti completamente definiti e fissi sia a livello dei loro componenti (disegno preciso di ciascuno dei componenti) sia della pubblicazione (istruzioni di montaggio...) e che devono soddisfare alle prove di tipo (riscaldamento, corto-circuito, continuità delle masse...) definite dalla norma.

I quadri ANS corrispondono a quadri

la cui struttura di base è un AS al quale sono state apportate una o più modifiche che devono essere verificate attraverso il calcolo o con una prova specifica.

Quanto alla nozione di forme, essa corrisponde a una definizione precisa dei gradi di separazione che si possono trovare in un quadro e che aumentano la protezione delle persone per mezzo di una non accessibilità alle parti attive (sbarre...).

Si distinguono quattro tipi di forme che vanno da un'assenza totale di separazione (forma 1) a una segregazione completa dei vari elementi del quadro (forma 4). Si deve notare che queste compartimentazioni hanno evidentemente un'incidenza assai importante sul comportamento termico del quadro.

La norma CEI definisce analogamente la prova di riscaldamento con la quale si deve verificare un quadro.

Essa precisa le condizioni ed i limiti di riscaldamento che i diversi componenti del quadro non devono superare (paragrafo 8.2.1 della norma).

### Condizioni di prova

- il quadro deve essere disposto come nel servizio normale,
- la corrente corrispondente al valore nominale è ripartita fra i diversi apparecchi tenendo conto di un fattore di contemporaneità (K) variabile a seconda del numero di circuiti principali.

□  $4 < \text{numero di partenze} < 5$      $K = 0,8$

□  $6 < \text{numero di partenze} < 9$      $K = 0,7$   
□  $\text{numero di partenze} > 10$      $K = 0,6$

■ la stabilizzazione termica è raggiunta se la variazione di temperatura non supera  $1^\circ \text{C/h}$ .

I conduttori collegati agli apparecchi devono essere di sezioni conformi alle prescrizioni della norma,

- le misure di temperatura sono effettuate per mezzo di termocoppie,
- la temperatura ambiente di riferimento è  $35^\circ \text{C}$ .

Con riferimento alla temperatura ambiente, non si devono superare le sovratemperature:

- $70^\circ \text{K}$  per i terminali di collegamento dei conduttori esterni;
- $25^\circ \text{K}$  per organi manuali di comando;
- $30^\circ \text{K}$  o  $40^\circ \text{K}$  per le superfici metalliche esterne accessibili o non accessibili;
- valori specifici particolari per i costituenti incorporati e per gli isolanti in contatto con i conduttori.

Da segnalare inoltre l'esistenza in campo normativo di una guida tecnica per la predeterminazione di queste sovratemperature (CEI 17.43). Essa fornisce risultati corretti per configurazioni semplici (involucro poco compartimentato, sorgenti di calore uniformemente distribuite...).

Una presentazione di questo metodo è proposta nel paragrafo 7, a confronto con il nostro approccio di progettisti di involucri.

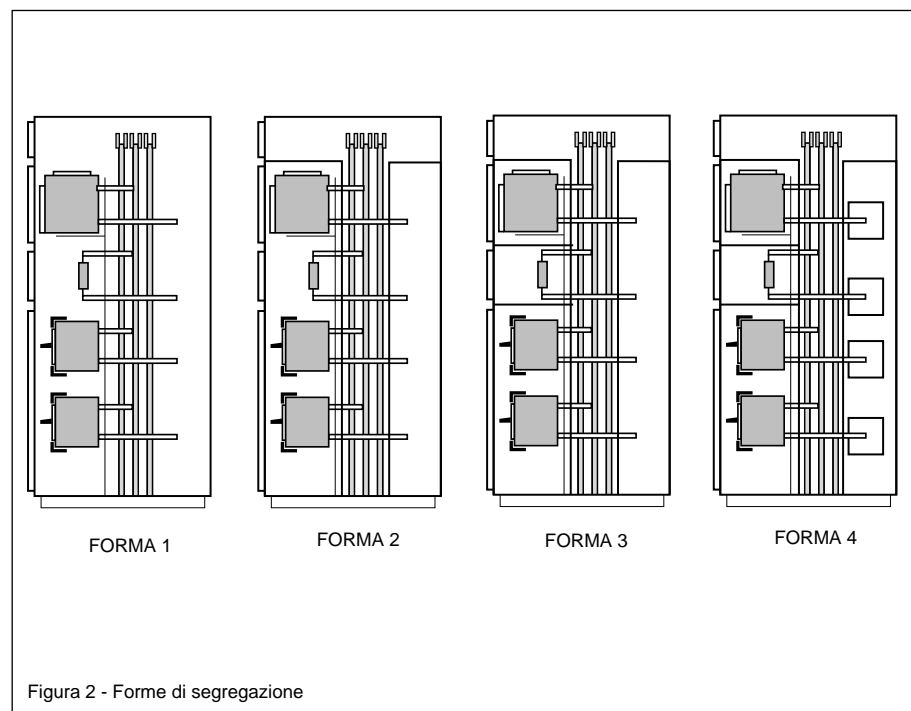


Figura 2 - Forme di segregazione

### 3. Comportamento termico di un quadro elettrico BT

Un quadro elettrico è un sistema costituito da un fluido (l'aria), e di corpi solidi nei quali il passaggio di corrente elettrica si accompagna a perdite di energie che provocano un aumento di temperatura.

L'evoluzione verso l'equilibrio termico avviene per trasferimento del calore delle parti attive (apparecchi, conduttori...) dove esso è generato dalle parti in contatto con l'esterno che la trasmettono a loro volta all'ambiente circostante.

#### 3.1 Richiamo sui principali fenomeni termici

Gli scambi termici permettono di descrivere il comportamento di un sistema qualsiasi, fra cui il sistema quadro elettrico.

Essi comportano tre tipi di fenomeni diversi.

##### Fenomeno di conduzione

Che corrisponde ad un trasferimento di calore all'interno di corpi solidi (vedi figura 3).

Si distinguono:

- sia i fenomeni di conduzione semplice per i quali il corpo considerato non è sede di alcun fenomeno termico; per esempio: conduzione all'interno di un muro,
- sia i fenomeni di conduzione viva in cui il corpo studiato è sede di una produzione di calore; per esempio: sbarra in rame percorsa da una corrente elettrica.

I calcoli che riguardano la trasmissione del calore per conduzione sono basati sulla legge di Fourier che, per geometrie semplici, si riduce alla relazione:

$$\phi_{ij} = \frac{\lambda \cdot S}{d} \cdot (T_i - T_j) \text{ con}$$

$\phi_{ij}$ : flusso scambiato entro due punti i e j in W

$\lambda$ : conduttività termica in W/m° C

S: superficie di scambio in m<sup>2</sup>

T<sub>i</sub>, T<sub>j</sub>: temperatura dei due punti i e j in °C

d: distanza tra i due punti in m  
 $\lambda$  è caratteristico del mezzo "conduttore". Il suo valore è funzione della temperatura ma è quasi sempre considerato una costante.

##### Fenomeno di irraggiamento

Corrisponde al trasferimento di calore tra corpi solidi separati da un mezzo più o meno trasparente (vedi figura 4).

Questi scambi, che si stabiliscono tra le superfici di corpi qualsiasi disposti uno di fronte all'altro, sono rappresentati da relazioni molto complesse in cui intervengono:

- l'emissione del solido che, se è considerato come un corpo nero, è funzione soltanto della sua temperatura,
  - gli stati superficiali attraverso il coefficiente di emissività che caratterizza lo scarto delle superfici di questi corpi rispetto al riferimento costituito dal corpo nero,
  - fenomeni di riflessione e di assorbimento,
  - la disposizioni di queste superfici le une rispetto alle altre, attraverso i fattori di forma.
- Tuttavia nel caso particolare in cui una superficie (per esempio j) attornia completamente l'altra (i) in modo che il rapporto S<sub>i</sub>/S<sub>j</sub> sia basso, queste espressioni si semplificano e si ottiene:

$$\phi_i = \epsilon \sigma S_i (T_j^4 - T_i^4) \text{ dove}$$

$\phi_i$  flusso di calore trasferito attraverso la superficie i in W,

$\epsilon_i$  coefficiente di emissività della superficie i,

$\sigma$  costante di Stefan-Boltzmann (5,67032 · 10<sup>-8</sup>W · m<sup>-2</sup> · K<sup>-4</sup>),

S<sub>j</sub>: superficie in m<sup>2</sup>.

T<sub>i</sub>, T<sub>j</sub>: temperatura delle superfici affacciate in °K.

##### alcuni valori di $\lambda$ in W/m °C

argento	$\lambda = 420$
rame	$\lambda = 385$
alluminio	$\lambda = 203$
acciaio	$\lambda = 45$
materiali plastici	$\lambda = 0,2$
cemento	$\lambda = 0,935$
ottone	$\lambda = 0,657$
lana di vetro	$\lambda = 0,055$
aria (30°C)	$\lambda = 0,02$

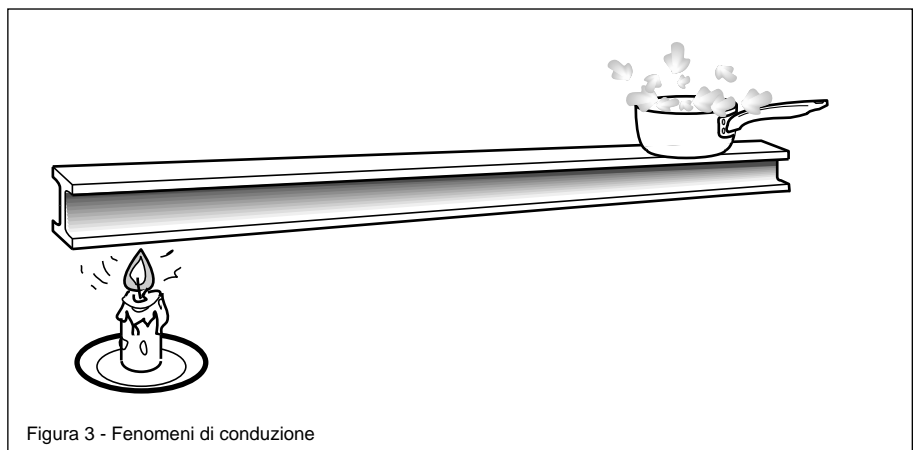


Figura 3 - Fenomeni di conduzione



Figura 4 - Fenomeni di irraggiamento

# Studio termico dei quadri elettrici di bassa tensione

## Fenomeni di convezione

Sotto il termine generale di convezione si raggruppano in realtà due fenomeni diversi, ma spesso accoppiati:

■ **il fenomeno di convezione propriamente detto** che corrisponde ad un trasferimento di calore tra un corpo solido ed un fluido in movimento.

A seconda dell'origine del movimento del fluido si distinguono la convezione naturale e la convezione forzata (vedi figura 5).

Questi trasferimenti sono caratterizzati da coefficienti di scambio  $h_i$

$\phi_i = h_i \cdot S_i \cdot (T_f - T_i)$  dove

$\phi_i$  flusso di calore scambiato sulla superficie  $S_i$  in W,

$h_i$  coefficiente di scambio in  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$T_f, T_i$ : temperatura del fluido e della superficie di scambio in  $^\circ C$

Dal punto di vista fisico, il problema di scambio di calore per convezione è strettamente legato ad un problema di meccanica dei fluidi.

Tuttavia dal punto di vista pratico, può essere affrontato "semplicemente" attraverso i coefficienti di scambio la cui espressione fa intervenire:

□ i parametri che descrivono la natura dello scorrimento del fluido (velocità...);

□ le proprietà fisiche del fluido (conduttività termica, viscosità dinamica, calore specifico, massa volumica...), associate spesso in forma di numeri senza dimensioni o caratteristiche (numeri di Nusselt, Prandtl, Reynolds, Grasshof, ...).

**Esempio:** espressione del coefficiente di scambio in convezione naturale per una geometria semplice: piastra piana verticale di altezza L e a temperatura uniforme

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{Dh}$$

Nu: numero di Nusselt

$$Nu = 0,53 (Gr \cdot Pr)^{0,25}$$

dove Gr e Pr sono rispettivamente i numeri di Grasshof e di Prandtl funzioni delle proprietà fisiche del fluido e dello scarto di temperatura tra il fluido e la superficie di scambio

$\lambda$ : conducibilità termica del fluido ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

Dh: dimensione caratteristica (m).

Nella maggioranza dei casi essa corrisponde alla dimensione maggiore del corpo solido in contatto con il fluido in movimento, in questo caso L.

**Osservazione:** è interessante notare che il coefficiente di scambio dipende dallo scarto di temperatura soltanto alla potenza 0,25 quindi:  $h = K (t)^{0,25}$

## ■ il fenomeno di movimenti convettivi

che corrisponde al trasferimento di calore entro il fluido attraverso spire di conduzione che spiegano per esempio il gradiente di temperatura osservato tra la base e la parte alta del volume di un fluido chiuso, sede di fenomeni termici.

I movimenti d'aria tra i due volumi sono caratterizzati da portate di massa funzione delle sezioni di passaggio e della velocità di scorrimento (vedi figura 6).

Il trasferimento di calore è rappresentato da:

$$\phi_{ij} = \dot{M} \cdot c_p \cdot (T_i - T_j) \text{ con}$$

$\phi_{ij}$ : flusso di calore scambiato tra i e j in W,

$\dot{M}$ : portata di massa in kg/s,

$c_p$ : calore specifico del fluido in  $J/kg \cdot ^\circ C$

$T_i, T_j$ : temperatura del fluido nei volumi

i e j ( $^\circ C$ )

**Osservazione:** Il trasferimento di calore è imposto dal senso dello scorrimento.

Espressione della velocità del fluido: nel caso della convezione naturale il fluido è messo in movimento tra i punti i e j, dalle variazioni della sua massa volumica con la temperatura.

La velocità è quindi supposta proporzionale a queste variazioni e pertanto funzione della differenza di temperatura tra i e j.

$$V_{ij} = Cste \cdot \sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho}} \cdot g \cdot D_{ij} \text{ con}$$

$\sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho}}$  variazione relativa di massa

volumica

g: accelerazione di gravità in  $m/s^2$

$D_{ij}$ : distanza tra i due punti i, j in m

Inoltre, se si suppone che il fluido

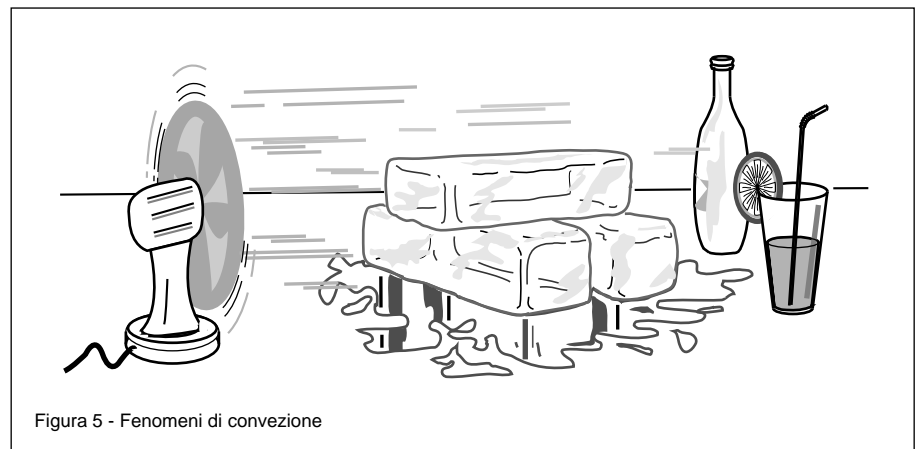


Figura 5 - Fenomeni di convezione

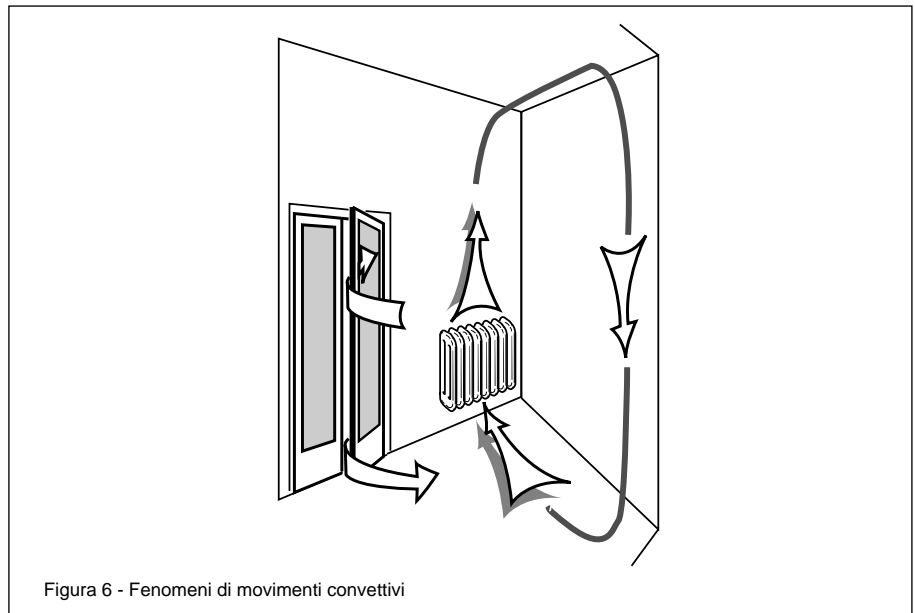


Figura 6 - Fenomeni di movimenti convettivi

considerato abbia un comportamento di gas perfetto,

$$\sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} = \beta \cdot (T_i - T_j) \text{ da cui}$$

$$V_{i,j} = Cste \cdot \sqrt{\beta(T_i - T_j) \cdot g \cdot D_{i,j}} \text{ con}$$

$$\beta = \frac{1}{(T_i + T_j)/2} \text{ (caso di gas perfetto)}$$

$T_i, T_j$ : temperatura del fluido in °K. Queste formule corrispondono a movimenti di volumi di fluido ascendenti o discendenti.

Nel caso di movimento di fluido lungo la parete, si tratta di un problema misto termico/idraulico che può essere risolto in certi casi in modo analitico (scorrimento laminare lungo una parete). In questo caso la velocità del fluido lungo la parete ha un'espressione simile, vale a dire essa è proporzionale a uno scarto di temperatura (fluido-parete).

### 3.2 Scambi nel caso di un quadro

Nello schema seguente (vedi figura 7) sono presentati gli elementi costituenti il sistema studiato: aria ambiente, involucro, aria interna, e le differenti sorgenti di calore.

Questa descrizione dello stato termico del quadro mostra che **tutti i fenomeni**

**di scambio descritti precedentemente devono essere considerati** e sono fortemente interconnessi.

Per esempio:

■ la temperatura dell'aria interna è il risultato:

□ degli scambi per convezione tra l'aria interna e le superfici degli apparecchi, dei conduttori e delle pareti,

□ del calore trasportato dai movimenti convettivi dell'aria,

■ il calore sviluppato per effetto Joule negli apparecchi è scambiato:

□ per convezione tra la loro superficie di scambio e l'aria interna,

□ per conduzione con le sbarre e i cavi,

□ per irraggiamento con le pareti dell'involucro e le superfici degli altri apparecchi.

I fenomeni più importanti che intervengono sul comportamento dell'insieme sono i fenomeni di convezione.

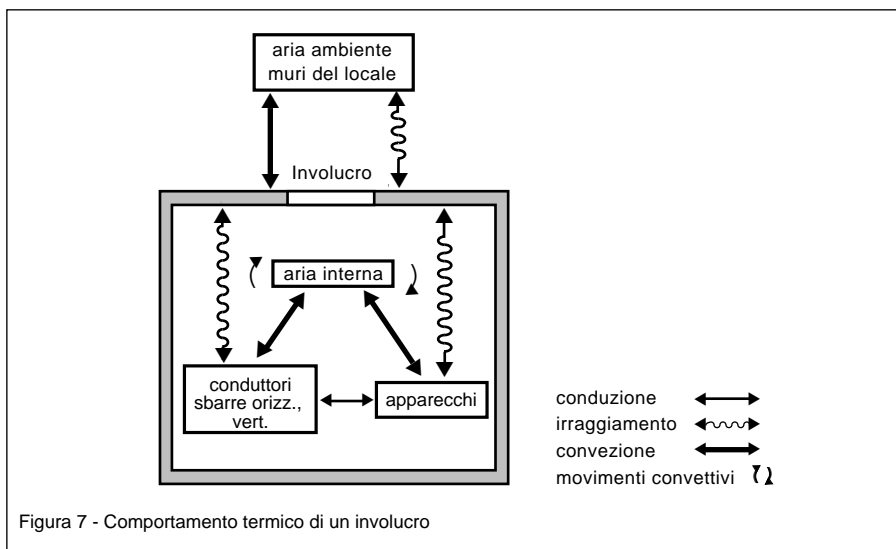


Figura 7 - Comportamento termico di un involucro



# Studio termico dei quadri elettrici di bassa tensione

## 4. Presentazione dello studio su modello

### 4.1 Principio

Tutti i metodi di soluzione sono basati su una separazione del sistema da studiare su modello in blocchi elementari sia che si tratti di un metodo Monte Carlo, o alle differenze finite, o agli elementi finiti.

Il metodo scelto, **l'analisi nodale**, è derivata da un approccio secondo le differenze finite.

L'interesse di questa tecnica, benché classica, è di consentire di presentare il comportamento termico di un sistema complesso prendendo in considerazione le interazioni tra le diverse parti o componenti che lo costituiscono.

Per esempio, essa può essere utilizzata in campi molto diversi per descrivere il comportamento di un satellite artificiale, di un motore elettrico, le condizioni climatiche all'interno di una stazione di trasformazione o di un fabbricato con numerose stanze. In linea di principio, questo metodo consiste nel decomporre il sistema studiato in vari **volumi isotermi** chiamati **nodi**. Ad ogni nodo sono associati differenti parametri, tra cui anche una temperatura ed eventualmente un apporto di calore indipendente dagli scambi termici.

Ci si interessa in seguito dei **collegamenti tra nodi**, vale a dire agli scambi tra i volumi, il che permette di scrivere le equazioni di bilancio (conservazione dell'energia e dimateria dell'elemento di volume collegato a un determinato nodo).

Questo approccio che corrisponde in realtà ad una discretizzazione spaziale del sistema porta a definire una **rete termica** con i suoi nodi, le sue capacità, e sue sorgenti di calore, le sue conduttanze, che traducono differenti collegamenti tra nodi (analogia dei fenomeni elettrici/termici) (vedi tabella).

Si arriva così ad un sistema di equazioni dipendenti, eventualmente, non lineari, che permetteranno di definire una matrice, la **matrice di ammettenza termica**.

A questo punto restano da precisare i valori numerici degli elementi di questa matrice, che corrispondono alle **conduttanze termiche**.

■ Espressione delle conduttanze per tipo di scambio

□ Conduzione:  $G_{ij} = \lambda_i \cdot S_{ij} / D_{ij}$

□ Irraggiamento:

$G_{ij} = \alpha \cdot \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot F_{ij} \cdot (T_i + T_j) \cdot (T_i^2 + T_j^2)$

□ Convezione:  $G_{ij} = h_i \cdot S_{ij}$

□ Movimento convettivo:  $G_{ij} = \overline{M} \cdot cp$

■ espressione del flusso termico equivalente alla corrente elettrica:  
 $I = 1/R (\Delta U)$

$\phi_{ij} = G_{ij} \cdot (T_i - T_j)$  con

$\phi_{ij}$ : flusso energetico scambiato tra i nodi i e j

$G_{ij}$ : conduttanza tra i e j, funzione del tipo di scambio considerato

$T_i, T_j$ : temperature associate rispettivamente ai nodi i e j.

Prendiamo come esempio la modellizzazione di un volume nel quale esiste una sorgente di calore.

Si decompone questo sistema in quattro nodi: q 1 per l'aria interna, q 2 per le pareti (interna ed esterna), q 3 per l'aria ambiente esterna.

Rappresentazione nodale (semplificata) (vedi figura 9).

Equazioni che traducono il flusso termico per questo sistema semplice.

nodo 1:

$$Q_1 - h_{1,2} \cdot S_{1,2} \cdot (T_1 - T_2) + \overline{M}_{4,1} \cdot cp \cdot (T_4 - T_1)$$

$$\overline{M}_{1,4} \cdot cp \cdot (T_1 - T_4) = \rho_1 \cdot V_1 \cdot cp_1 \cdot \overline{T}$$

nodo 2:

$$h_{1,2} \cdot S_{1,2} \cdot (T_1 - T_2) - \frac{\lambda_2 - S_{2,3}}{d_{2,3}} (T_2 - T_3) = \rho_2 \cdot V_2 \cdot cp_2 \cdot \overline{T}$$

nodo 3:

$$\frac{\lambda_2 \cdot S_{2,3}}{S_{2,3}} \cdot (T_3 - T_3) - h_{3,4} \cdot S_{3,4} (T_3 - T_4) = \rho_3 \cdot V_3 \cdot cp_3 \cdot \overline{T}$$

nodo 4:

$$h_{3,4} \cdot S_{3,4} \cdot (T_3 - T_4) + \overline{M}_{1,4} \cdot cp \cdot (T_1 - T_4) + \overline{M}_{4,1} \cdot cp \cdot (T_4 - T_1) = \rho_4 \cdot V_4 \cdot cp_4 \cdot \overline{T}$$

Nota: i termini di  $T_1$  corrispondono a

$$\frac{dT_i}{dt}$$

Essi non sono dunque da tenere in considerazione quando ci si interessa soltanto alla condizione di regime e a temperature stabilizzate.

A partire da queste equazioni si deduce il sistema d'equazioni  $[G] \cdot [T] = [R]$

corrispondente naturalmente a:

$\phi_{ij} = G_{ij} \cdot (T_i - T_j)$  dove

G: è la matrice di ammettenza termica

T: è il vettore delle temperature incognite

R: è il vettore delle sollecitazioni imposte (sorgente di calore Q1, temperatura, ....).

Questo tipo di approccio ha permesso di elaborare i codici di calcolo e le regole proprie dei problemi termici degli stabili.

grandezze termiche	grandezze elettriche
temperatura	potenziale
resistenza termica	resistenza elettrica
flusso di calore	corrente
$\phi = G \cdot (T_2 - T_1)$	$I = \frac{1}{R} (U_2 - U_1)$
capacità termica	capacità elettrica

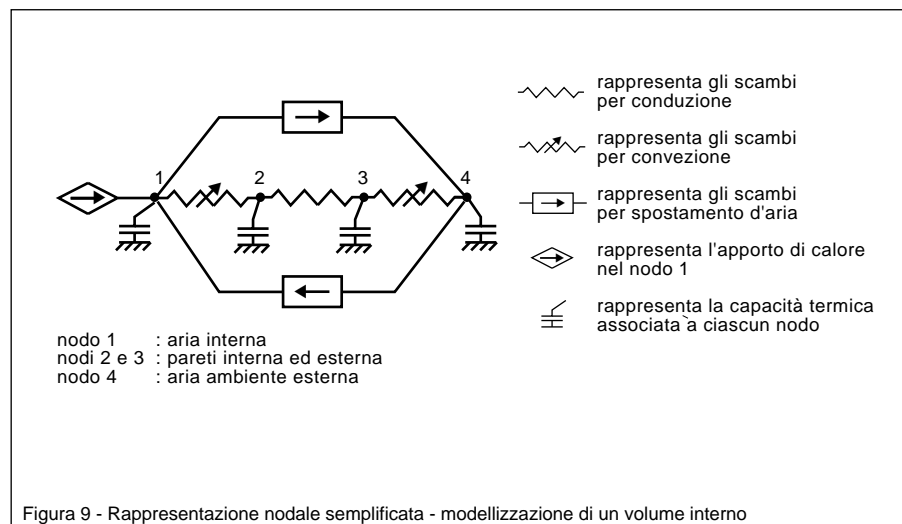


Figura 9 - Rappresentazione nodale semplificata - modellizzazione di un volume interno

## 4.2 Modello della convezione

Come già indicato nel paragrafo 2, nel termine di convezione sono compresi due fenomeni spesso uniti (scambi tra corpo e fluido e scambi nel fluido stesso).

Il modello degli scambi per convezione deve essere dunque diviso in due parti, una che descrive le portate di massa (movimento d'aria) l'altra gli scambi termici (coefficiente di scambio) e entrambe collegate dai corrispondenti trasferimenti di massa/termico (vedi figura 10).

## 4.3 Applicazione agli involucri BT

Per la modellizzazione si distinguono due grandi tipi di involucri:

**n involucri non compartimentati** (cassette, armadi...). In questo caso lo schema nodale, quello della figura 11, è molto vicino a quello della figura 10, contenendo in più, le sorgenti di calore,

### ■ involucri fortemente compartimentati

con o senza ventilazione naturale. Sono possibili due diversi modi di realizzare il modello:

□ sia si realizza il modello di ciascuna zona del quadro come si è detto sopra e si associano insieme i singoli volumi. Questo modo di procedere condurrà a matrici molto grandi, dato che si può arrivare ad avere una decina di zone da associare,

□ sia si realizza un approccio più globale, senza realizzare i modelli delle spire di convezione all'interno dei singoli volumi e tenendo conto soltanto delle portate di aria all'interno delle zone (vedi figura 12).

Questi modelli hanno portato ad elaborare programmi adatti a ciascun tipo di involucro.

Tali programmi sono tutti strutturati nello stesso modo.

Prima di entrare più nei particolari nell'utilizzazione di un programma (vedi paragrafo 5), conviene conoscere meglio le sorgenti di calore (sistemi sbarre, apparecchi) per determinare il livello di funzionamento reale di un quadro.

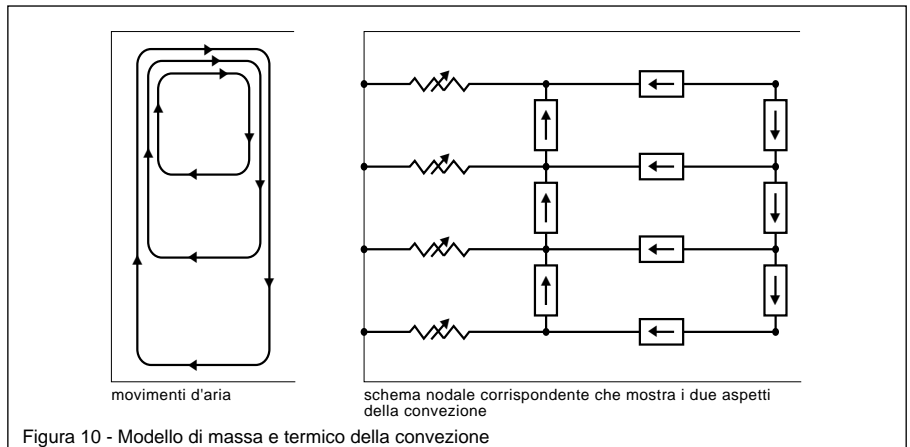


Figura 10 - Modello di massa e termico della convezione

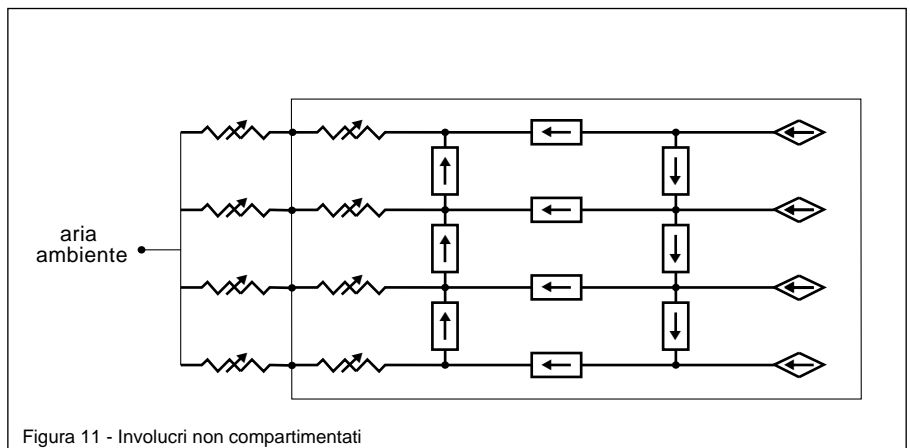


Figura 11 - Involucri non compartimentati

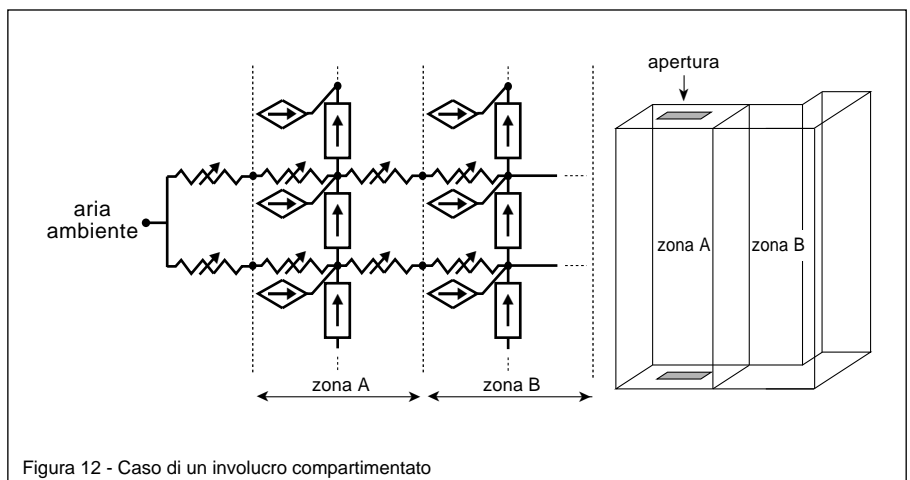


Figura 12 - Caso di un involucro compartimentato

## 5. Comportamenti delle sorgenti di calore

### Caratteristiche

Le sorgenti di calore considerate nello studio dei modelli sono i sistemi di sbarre, i conduttori di collegamento e gli apparecchi elettrici. Per quanto riguarda questi ultimi, essi sono considerati come "scatole nere" che dissipano le calorie e non come nodi del modello. Questo significa che non si calcola la loro temperatura di funzionamento, ma la corrente massima che essi possono portare nella configurazione di impianto data, senza superare la loro temperatura limite di utilizzazione.

### 5.1 Le sbarre

Le sbarre sono calcolate in modo da verificare due condizioni:

- poter portare la corrente nominale desiderata senza produrre un riscaldamento delle sbarre che comporti deterioramento degli isolanti che le sostengono. Per esempio le sbarre possono essere dimensionate in modo da non superare, in regime permanente, una temperatura di 110°C; tale valore dipende esclusivamente dalla natura di materiali isolanti in contatto con esse; per esempio i supporti.
- La tabella della figura 13 da, per una temperatura ambiente di 50° e 65°C, alcuni valori di temperatura delle sbarre;

- poter supportare una corrente di corto-circuito senza subire deformazioni sensibili delle sbarre, rottura dei supporti isolanti, riscaldamento eccessivo.
- La seconda condizione corrisponde al problema di sforzi elettrodinamici e può essere studiata separatamente; al contrario la prima richiede la conoscenza globale del funzionamento dell'assieme. In particolare occorre tenere conto della temperatura dell'aria attorno alle sbarre per dimensionarle in modo preciso e evitare che esse superino una temperatura critica in relazione alla natura del materiale utilizzato per i supporti. Così, conoscendo la temperatura dell'aria nelle differenti zone del quadro, si può determinare, a conclusione del programma, la temperatura delle sbarre in funzione delle loro caratteristiche (dimensioni, forme, disposizioni...) e quindi confermare il loro dimensionamento.

**Osservazione:** Per quanto riguarda i calcoli di flusso termico, si considera che le sbarre dissipino principalmente il calore per convezione e irraggiamento con l'aria interna.

### 5.2 Gli apparecchi

Nei quadri di distribuzione elettrica, gli interruttori costituiscono l'essenziale dell'apparecchiatura di potenza. Questi, e gli altri costituenti quali contattori e sezionatori fusibili, dissipano calorie allorché sono percorsi da corrente elettrica. La tabella della figura 14 ci dà, a titolo indicativo, alcuni valori di potenza dissipata per fase (per polo). È interessante constatare che le potenze dissipate a  $I_n$  sono dello stesso ordine di grandezza, ma con un certo vantaggio a favore dell'interruttore rispetto al sezionatore fusibile e anche in confronto al contattore, che ha contatti duri ma resistivi.

Esaminiamo, più in particolare, gli interruttori in relazione problemi termici:

- la potenza dissipata è proporzionale al quadrato della corrente che li attraversa:

$$P_w = P_N \cdot \left(\frac{I}{I_n}\right)^2$$

dove  $P_N$  rappresenta la potenza dissipata alla corrente nominale  $I_n$ .

- la corrente nominale ( $I_n$ ) di un interruttore corrisponde ad una temperatura ambiente determinata, per esempio 40°C, fissata dalla norma di prodotto. In realtà, per alcuni interruttori, la temperatura ambiente a cui

corrisponde  $I_n$  può raggiungere e anche superare 50°C, il che da loro un margine, per esempio in vista dell'utilizzazione in paesi caldi;

- la corrente di funzionamento ( $I$ ) può variare in funzione della temperatura ambiente, e questo a seconda del tipo di "sganciatore": termico semplice, termico compensato, elettronico, (vedi figura 15) il che può permettere di definire una corrente massima di utilizzazione differente da  $I_n$ .

I parametri che intervengono nella determinazione del declassamento, tengono conto, oltre che della temperatura dell'aria attorno all'apparecchio ( $T_i$ ):

- della temperatura limite ( $T_L$ ) dei componenti interni all'interruttore:
  - temperatura massima di funzionamento del bimetallo per un interruttore magnetotermico,
  - temperatura dei componenti elettronici per interruttori con sganciatori elettronici integrati,
  - temperatura da non superare per i materiali plastici più esposti in un interruttore con un'elettronica riportata (relais esterni/interruttore aperto...).

Queste temperature limite sono comprese tra 100 e 150°C

temperatura in vicinanza delle sbarre	sezione	corrente	potenza dissipata	temperatura delle sbarre
50°C	1 sb 100x5	1000A	45 W	79°C
50°C	1 sb 100x5	1500A	107 W	109°C
50°C	3 sb 100x5	1500A	10 W	65°C
50°C	3 sb 100x5	3400A	61 W	110°C
65°C	1 sb 100x5	1000A	45 W	92°C
65°C	3 sb 100x5	1500A	11 W	80°C

Figura 13 - Valori termici relativi ad alcuni sistemi di sbarre installati in un determinato ambiente

interruttore				
potenza misurata mediante wattmetro e non calcolata partendo dalla misura di resistenza				
$I_n$ (A)	250	400	630	800
$P_w$ - esecuzione fissa	17,4	25	21	36
$a I_n$ - esecuzione estraibile	23	35	54	58
sezionatori-fusibili				
$I_n$ (A)	250	400	630	800
$P_w$ a $I_n$	30	44	67	—
contattori				
$I_n$ (A)	265	400	630	780
$P_w$ a $I_n$	22	45	48	60

Figura 14 - Potenza dissipata a  $I_n$  da apparecchi tipici

■ del rapporto tra la corrente nominale  $I_n$  dello sganciatore e la corrente reale di intervento quando lo sganciatore è posto alla temperatura di definizione di  $I_n$

$$K_1 = \frac{I_d}{I_n}$$

(vedi figura 16);

■ delle sezioni dei cavi o delle sbarre di collegamento che fungono da radiatore.

Della loro influenza si tiene conto attraverso un coefficiente  $K_2$ .

**Nota:**

va tenuto presente che la sezione dei conduttori utilizzati è raramente uguale a quella utilizzata in occasione delle prove di tipo degli interruttori. Il declassamento che tiene conto di questi diversi criteri si può esprimere matematicamente.

**Formula di declassamento**

l'interruttore e i suoi conduttori di collegamento dissipano essenzialmente per convezione.

Si ha dunque la relazione:

$$W1 = h \cdot S \cdot (T_L - T_i) \text{ con}$$

$W1$ : potenza dissipata in W

$h$ : coefficiente di scambio in  $W/m^2 \cdot ^\circ C$

$S$ : superficie di scambio in  $m^2$

$T_L$ : temperatura del punto caldo in  $^\circ C$  (per esempio il bimetallo)

$T_i$ : temperatura dell'aria interna intorno all'apparecchio in  $^\circ C$

$$h = cste \cdot S \cdot (T_L - T_i)^{0,25}$$

(vedi paragrafo 2)

$$\text{da cui } W1 = cste \cdot S \cdot (T_L - T_i)^{1,25}$$

Quando l'apparecchio si trova in aria libera a  $40^\circ C$  la relazione è simile.

$$W2 = cste \cdot S \cdot (T_L - 40)^{1,25}$$

$$\text{da cui } \frac{W1}{W2} = \left( \frac{T_L - T_i}{T_L - 40} \right)^{1,25}$$

Si sa inoltre che

$$W1 = RI^2 \text{ e } W2 = RI_d^2$$

$$\text{quindi } I = I_d \cdot \left( \frac{T_L - T_i}{T_L - 40} \right)^{0,62}$$

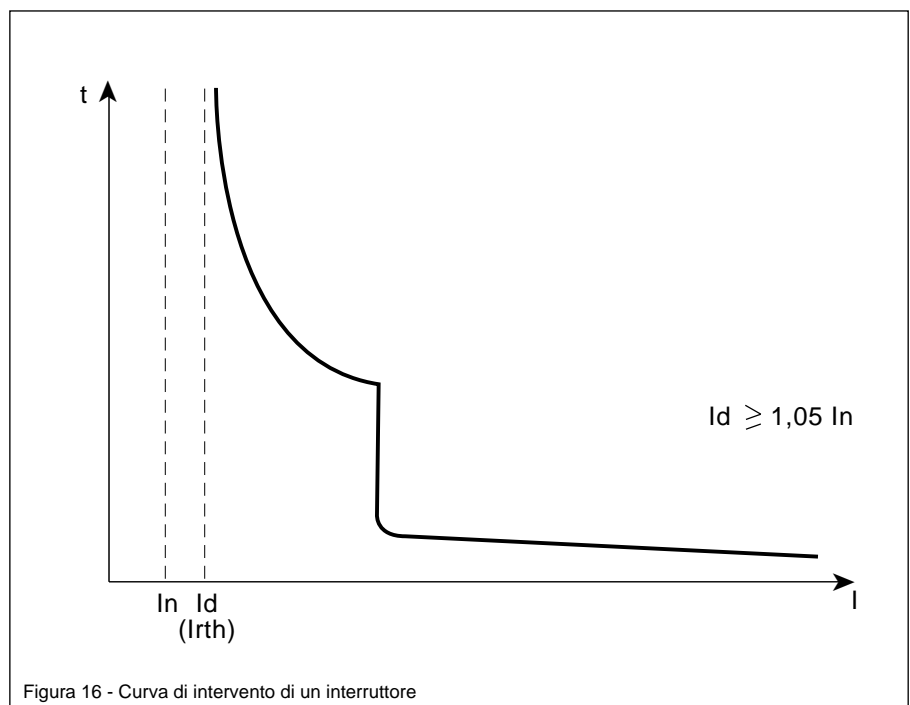
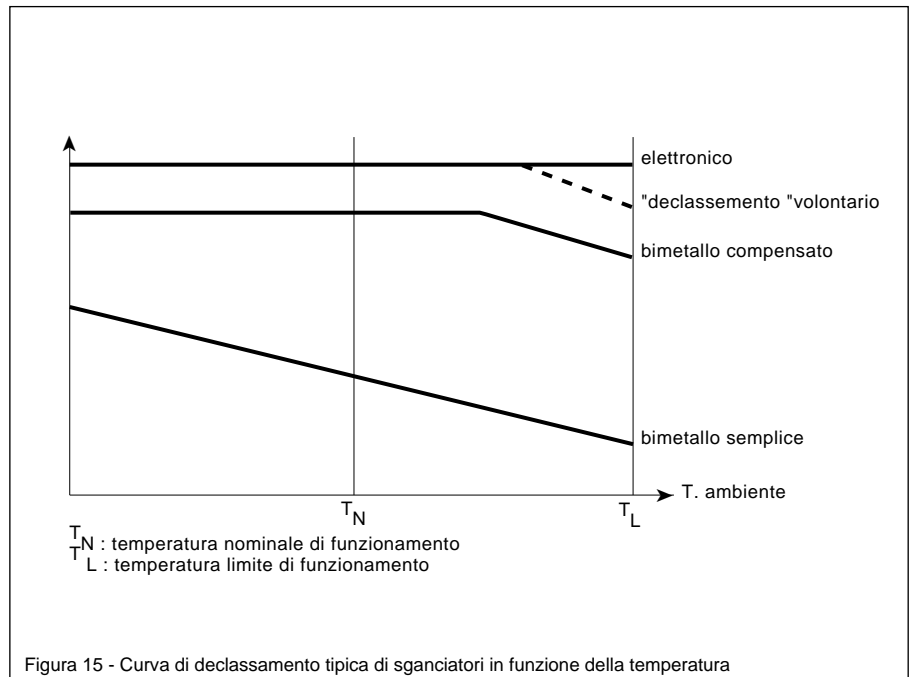
con  $I$  corrente che attraversa l'apparecchio e  $I_d = K1 \cdot I_n$

**Relazione finale**

tenendo conto infine dell'effetto delle sezioni (coefficiente  $K2$ ).

$$I = I_n \cdot k1 \cdot k2 \cdot \left( \frac{T_L - T_i}{T_L - 40} \right)^{0,62}$$

■ i dati corrispondenti al comportamento dell'interruttore, e che intervengono in questa formula, sono in archivi richiamati dal programma di calcolo al momento del calcolo della temperatura nell'armadio.



# Studio termico dei quadri elettrici di bassa tensione

## 6. Metodo di calcolo della temperatura negli involucri

Lo studio su modello presentato sopra è servito di base per lo sviluppo del nostro metodo di calcolo che ci permette di determinare il funzionamento ideale di un quadro (corrente massima su ogni partenza ...) e pertanto di utilizzare l'assieme al meglio con sicurezza nota.

Come capita spesso in problemi termici, le numerose relazioni tra parametri richiedono un approccio interattivo e pertanto l'elaborazione di un programma di cui presentiamo qui di seguito il principio.

### 6.1 Principio

Il programma procede con due anelli di interazione embricati, al fine di determinare le condizioni di funzionamento dell'involucro a regime. L'una riguarda la risoluzione del problema termico, l'altra i coefficienti di declassamento. Lo schema di calcolo è rappresentato sulla figura 17.

**Prima tappa:** descrizione della configurazione, vale a dire tipo di involucro utilizzato, nome degli apparecchi e loro posizione. È a questo punto che il programma fa ricorso all'archivio apparecchio per prelevare i dati descritti precedentemente.

**Seconda tappa:** divisione dell'involucro in sottovolumi isotermi (nodi del modello nodale).

**Terza tappa:** inizio degli anelli di interazione con calcolo:

- della potenza dissipata (alla prima interazione i coefficienti di declassamento sono presi uguale a 1);

- dei coefficienti della matrice di ammettanza a partire dalle equazioni di bilancio termico;

- delle temperature interne (risoluzione del problema termico);

- dei nuovi coefficienti di declassamento e successivo confronto con i precedenti.

Se lo scarto è giudicato troppo grande (prova di arresto dell'interazione) si riparte calcolando le nuove correnti che attraversano l'apparecchio, poi di nuovo la potenza dissipata...

**Quarta tappa:** uscita dei risultati

### 6.2 Descrizione dei dati da fornire e dei risultati ottenuti

Dati:

- tipo di involucro (cassetta, armadio, quadro) e materiale;

- grado di protezione;
- temperatura ambiente intorno all'involucro;
- numero di file di apparecchi;
- nome degli apparecchi, per permettere la ricerca nell'archivio;
- configurazione del quadro e posizione degli apparecchi.

**Risultati:**

- scelta di un sistema di sbarre orizzontale e verticale (sezione) e correnti in esse;
- potenza termica totale dissipata nel quadro;

- coefficiente di declassamento per i vari apparecchi, da cui le correnti che li attraversano;

- eventualmente la temperatura raggiunta dalle sbarre ed il suo valore nelle varie zone del quadro.

### 6.3 Configurazioni studiate

Certamente non possono essere calcolate con il programma tutte le configurazioni di impianto possibili. Si sono considerate soltanto le più frequenti, vale a dire quelle che permettono di rispondere al 90% dei bisogni; vedi figura 18, che fornisce un esempio.

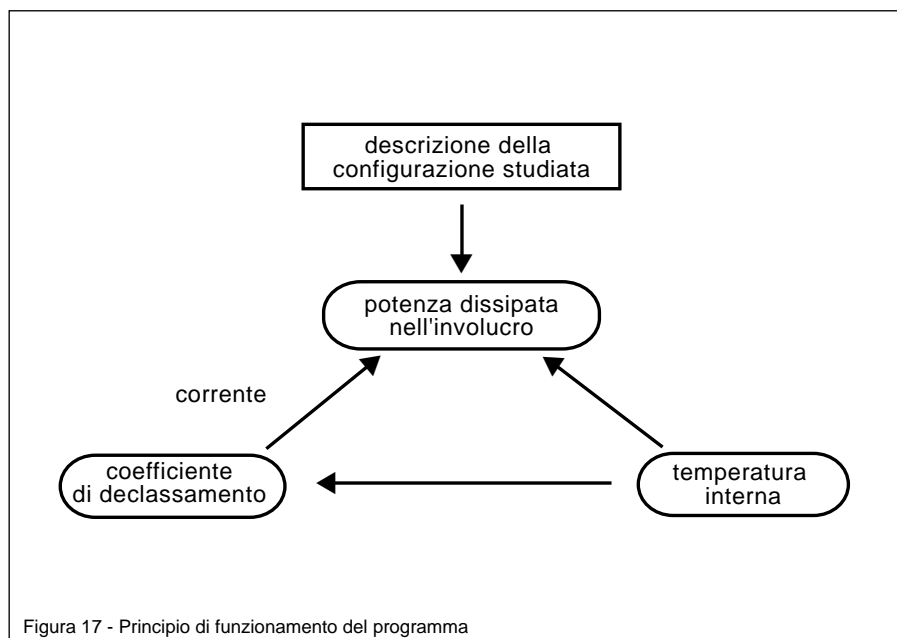


Figura 17 - Principio di funzionamento del programma

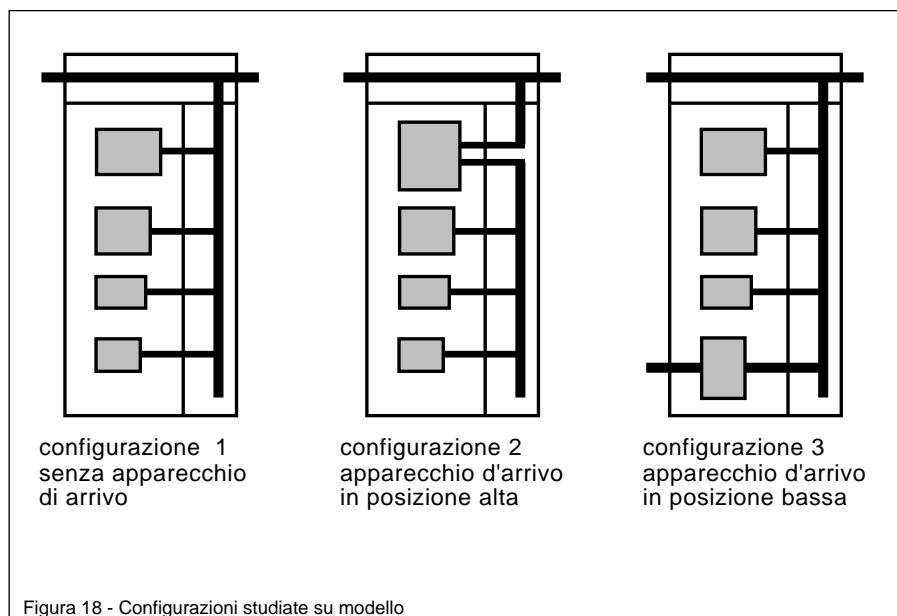


Figura 18 - Configurazioni studiate su modello

## 6.4 Risultati

Questo approccio "programma" è particolarmente interessante perché permette di effettuare i seguenti studi:

**Studio nei particolari di una data configurazione** per ottimizzare la posizione di un apparecchio o la scelta di un sistema di sbarre, conoscere la potenza dissipata dall'assieme per dimensionare un adatto raffreddamento...

L'esempio che segue riguarda una colonna di un quadro industriale di potenza compartimentato in forma 2 e contenente:

- un sistema di sbarre orizzontale che alimenta l'apparecchio di arrivo e una colonna adiacente,
- un apparecchio di arrivo da 2500A,
- diversi interruttori scatolati.

Il programma ci fornisce tra l'altro:

- i coefficienti di declassamento Kdecl,
- la corrente che percorre ogni apparecchio Ir.

**Osservazione sul fattore di contemporaneità (Kdiv):** questo coefficiente permette di tenere conto del coefficiente di contemporaneità o di diversità partenza per partenza. Vale a dire condizioni di carico dei diversi apparecchi in un istante dato.

Esempio: in un istante dato 2 partenze sono caricate al massimo e le altre a metà delle loro possibilità, da cui le conseguenze sul regime termico dell'assieme.

I risultati sono presentati sul foglio di calcolo di figura 19.

### Tabella di declassamento per una configurazione data

Questa possibilità di utilizzazione del programma, assai vicina all'utilizzazione precedente, permette di riunire, per una configurazione frequente, i declassamenti di diversi apparecchi tenendo conto della loro posizione reale nel quadro, delle sezioni di conduttori utilizzati, dei gradi di protezione e della temperatura ambiente esterna.

La figura 20 presenta un esempio di quadro che riguarda apparecchi installati in una colonna di un quadro industriale di potenza.

### Tabella di declassamento per un determinato tipo di apparecchio

Per la maggioranza degli interruttori scatolati il declassamento è relativamente indipendente dalla configurazione del quadro. I coefficienti di declassamento sono pertanto dati, per eccesso, supponendo gli apparecchi nella parte alta del quadro o del compartimento.

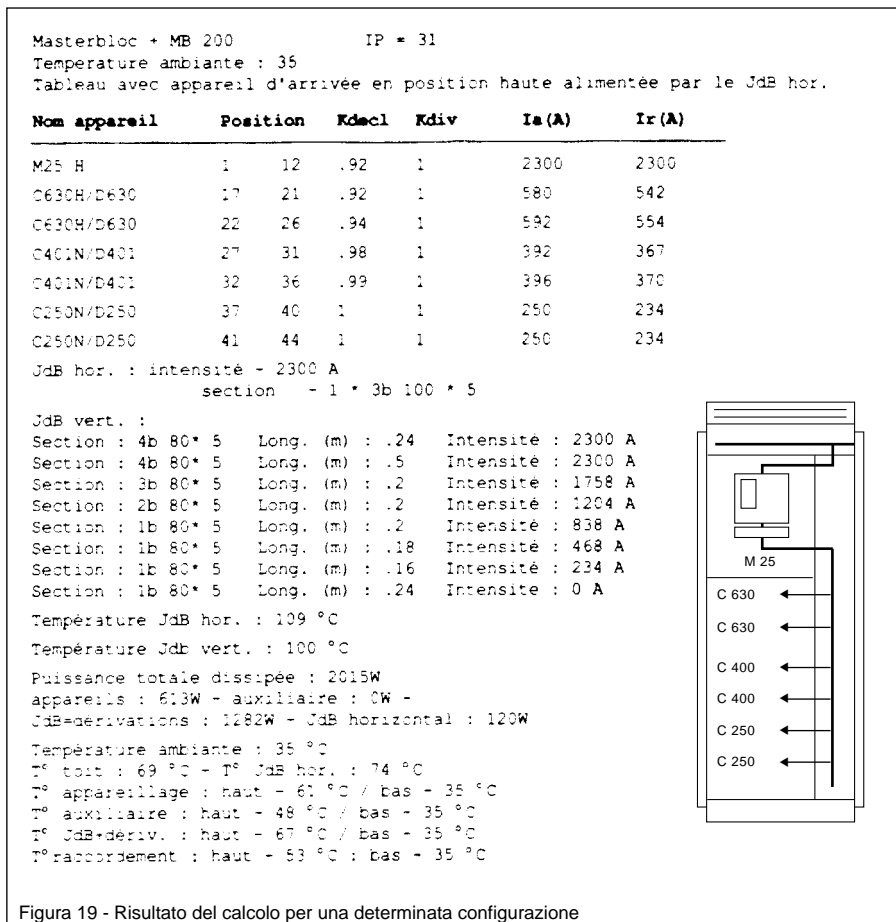


Figura 19 - Risultato del calcolo per una determinata configurazione

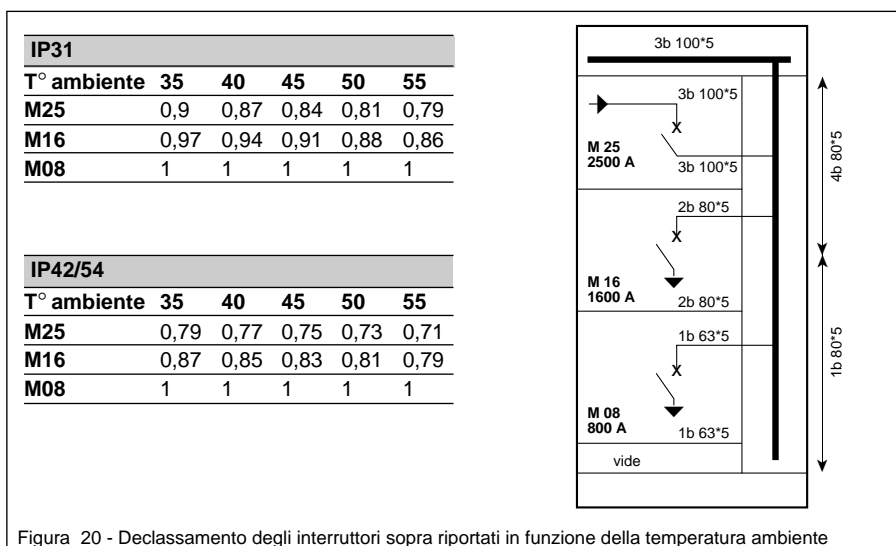


Figura 20 - Declassamento degli interruttori sopra riportati in funzione della temperatura ambiente

T° ambiente	IP31					IP42/54				
	35	40	45	50	55	35	40	45	50	55
C125N/H	0,95	0,91	0,88	0,84	0,80	0,82	0,79	0,76	0,72	0,69
C125L	0,94	0,90	0,86	0,83	0,79	0,80	0,77	0,74	0,71	0,68
C161N/H	0,95	0,92	0,88	0,85	0,82	0,81	0,78	0,76	0,73	0,69
C161L	0,94	0,91	0,87	0,84	0,82	0,79	0,76	0,73	0,70	0,67
C250N/H	0,94	0,90	0,87	0,83	0,80	0,82	0,79	0,76	0,72	0,69
C250L	0,93	0,89	0,86	0,82	0,78	0,79	0,76	0,73	0,70	0,67
C401N/H	0,94	0,91	0,87	0,84	0,81	0,79	0,76	0,74	0,72	0,69

Figura 21 - Declassamento degli interruttori Compact posti sotto gli interruttori d'arrivo

# Studio termico dei quadri elettrici di bassa tensione

## Curve che caratterizzano il comportamento termico di un determinato involucro

Si sono definiti due tipi di grafici:

- un insieme di curve che permette di determinare la temperatura media all'interno di un determinato involucro in funzione della potenza dissipata e della temperatura dell'aria ambiente esterna. Vedi curve di figura 22 che riguardano un tipo di quadro di distribuzione compartimentato;

- curve che permettono di determinare la potenza in Watt che gli involucri considerati possono dissipare a fronte di una determinata sovratemperatura, in funzione delle loro caratteristiche dimensionali.

Esempio:  $T^\circ$  ambiente esterna  $35^\circ\text{C}$   
sovratemperatura dell'aria ambiente massima auspicata  $T = 30^\circ\text{C}$

□ armadio: altezza 2 m larghezza 0,9 m  
profondità 0,4 m,

**potenza dissipabile 850W**

□ armadio: altezza 2 m larghezza 0,9 m  
profondità 0,6 m,

**potenza dissipabile 1000W**

vedere curve di figura 23

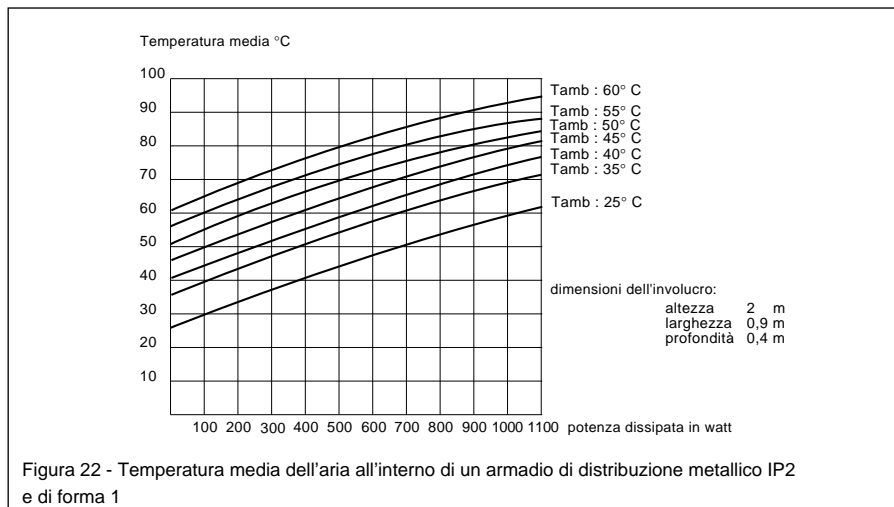


Figura 22 - Temperatura media dell'aria all'interno di un armadio di distribuzione metallico IP2 e di forma 1

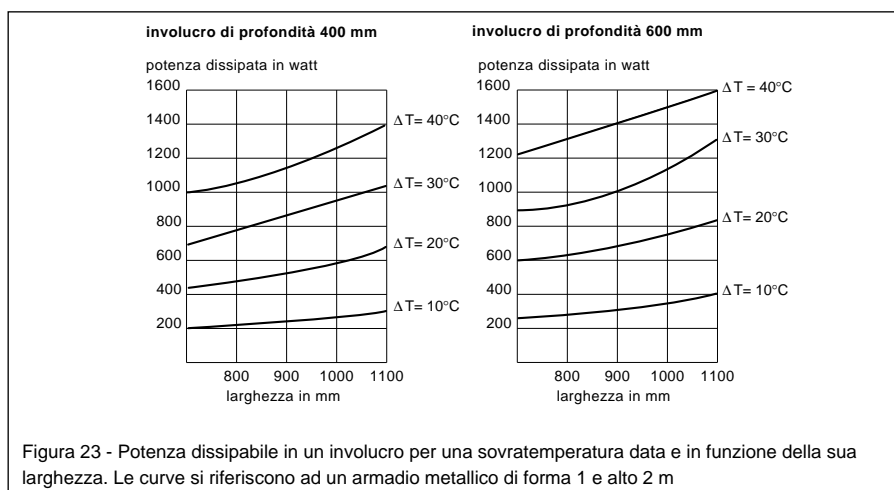


Figura 23 - Potenza dissipabile in un involucro per una sovratemperatura data e in funzione della sua larghezza. Le curve si riferiscono ad un armadio metallico di forma 1 e alto 2 m

## 7. Risultati sperimentali

Prove di riscaldamento sono state realizzate nel laboratorio Ampère dell'ASEFA su diversi tipi di involucri: cassette in lamiera o in materia plastica, quadro PRISMA, quadro di distribuzione MASTERBLOC.

In occasione di queste prove, sono state effettuate misure di:

- di temperature:

- dell'aria nelle diverse zone dell'involucro,

- dei conduttori: sistema sbarre e derivazioni,

- dei punti caldi degli apparecchi (bimetalli, ambiente dell'elettronica),

- corrente;

- parametri che intervengono nel modello, in particolare nei coefficienti di scambio aria/pareti.

Queste misure hanno permesso, da una parte di verificare la conformità

alla norma IEC 439.1 di alcuni valori (vedi limiti di sovratemperatura indicati nei paragrafi 1.2 sulle norme), e d'altra parte di confermare il modello.

Per quanto riguarda le temperature dell'aria, lo scarto tra i valori misurati e quelli calcolati dipende dal tipo di involucro studiato su modello, poiché a livello di modello gli approcci differiscono secondo che si considerino gli involucri compartimentati o no.

Sull'assieme delle prove effettuate sui quadri, di diverse forme, (compartimentati o non compartimentati), gli scarti massimi constatati sono sempre stati inferiori a  $6^\circ\text{C}$ .

Le temperature calcolate per le sbarre mostrano ugualmente una buona concordanza con le misure che ci hanno permesso di confermare il metodo di calcolo.

Per quanto riguarda le correnti, gli scarti sono in media inferiori al 5%.

Grazie a tutto questo, in occasione della recente omologazione di una configurazione del quadro Masterbloc in riscaldamento, il metodo di calcolo ci ha permesso di prevedere le condizioni di funzionamento del quadro.

## 8. Metodo proposto dalla norma CEI 17.43 (rapporto IEC 890)

Ancora non molto tempo fa, molti quadri elettrici erano scelti e attrezzati/riempiti, in funzione dell'esperienza; questo per quanto riguarda il tasso di riempimento e la valutazione della temperatura all'interno del quadro in funzionamento.

Per esempio: Temperatura esterna massima 30°C e interna massima 60°C (i fabbricanti di apparecchi ne forniscono il declassamento fino a 60°C).

Questa pratica portava sia ad una utilizzazione non ottimale del materiale, sia a interventi intempestivi delle protezioni o alla necessità per l'esercente di funzionare con le porte aperte.

Il metodo proposto dalla norma CEI, tanto più provenendo da una guida IEC, è pertanto di un evidente interesse. Ne richiamiamo qui di seguito le basi, ne mostriamo i limiti e lo confrontiamo con il metodo presentato nel quaderno tecnico.

Come principio, questo metodo si applica negli involucri per i quali sono valide le seguenti ipotesi:

- potenza dissipata ripartita uniformemente;
- apparecchi disposti in modo da non ostacolare la circolazione dell'aria;
- non più di tre separazioni orizzontali.

### Dati necessari:

- dimensioni dell'involucro;
- potenza dissipata nell'involucro (apparecchi, conduttori);
- tipo di installazione (quadro isolato, o di estremità...); (vedi figura 25)

**Calcolo:** la temperatura è calcolata unicamente in due punti dell'involucro:

**a media altezza**  $T_{0,5} = T_a + T_{0,5}$

con  $T_{0,5} = d \cdot k \cdot P_w^{0,804}$

dove

- **d** è un coefficiente che tiene conto dell'esistenza delle separazioni orizzontali;
  - se  $A_e < 1,25 \text{ m}^2$   $d=1$  (definizione di  $A_e$  vedi sopra),
  - se  $A_e > 1,25 \text{ m}^2$   $d=1$  con e senza finestre di ventilazione nel caso che non esista alcuna separazione,
- $d=1,05$  con e senza finestre di ventilazione per una separazione.
- $d=1,10$  o  $1,15$  se vi sono finestre di ventilazione e nel caso di 2 separazioni.

$d=1,15$  o  $1,30$  se vi sono finestre di ventilazione e 3 separazioni.

■ **k** è una costante che caratterizza l'involucro; il suo valore è determinato mediante diagrammi (vedi figura 24);

**k** è funzione della superficie di scambio dell'involucro  $A_e$  ( $\text{m}^2$ )

$A_e = \Sigma A_0 \cdot b$  dove  
 $A_0$  è la superficie geometrica delle diverse pareti dell'involucro.

**b** è una costante che tiene conto del tipo di parete e del tipo di installazione. valori di **b**:

- parte superiore esposta  $b = 1,4$ ,
- parte superiore coperta  $b = 0,7$ ,
- pareti laterali esposte  $b = 0,9$ ,
- pareti laterali coperte  $b = 0,5$ ,

- pareti laterali degli involucri centrali  $b = 0,5$ ,
- parte a pavimento  $b = 0,5$ ,

■ **P<sub>w</sub>** potenza dissipata in watt

**in cima all'involucro:**  $T_1 = T_a + T_1$  con

$$\Delta T_1 = c \cdot \Delta T_{0,5}$$

dove

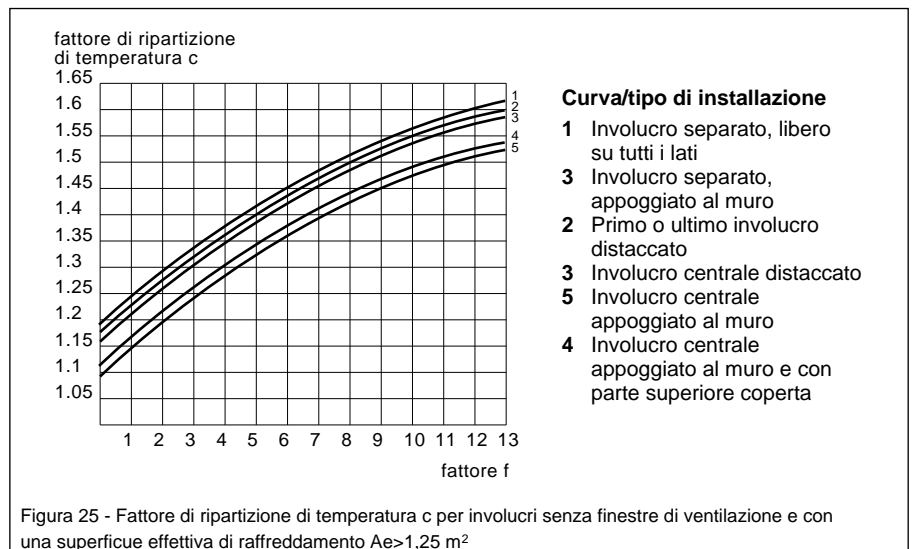
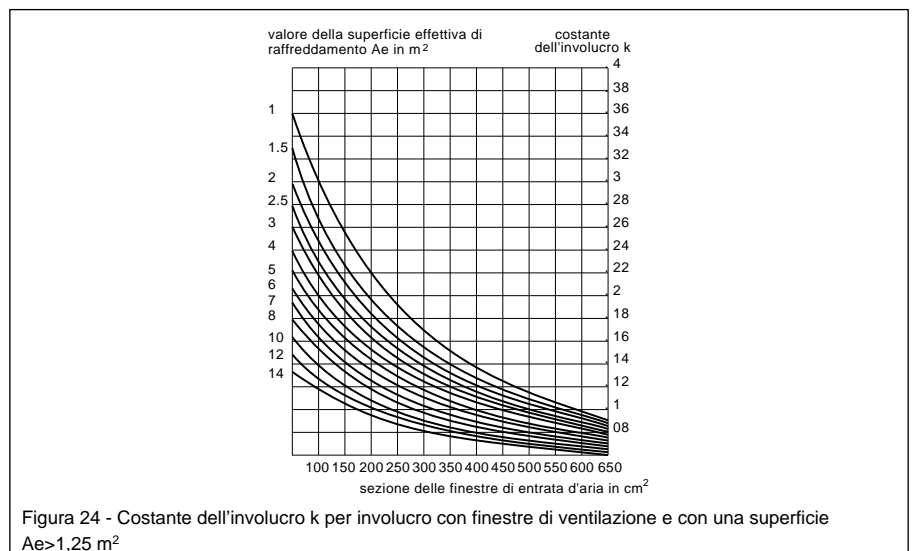
$\Delta T_{0,5}$  rappresenta la sovratemperatura precedente;

■ **c** è una costante di riscaldamento determinata mediante diagrammi.

Esempio di diagramma (vedi figura 25)  
**c** è funzione di  $A_e$  e di uno dei due fattori **f** o **g**

$$f = h_{1,35}/(L \cdot P) \quad \text{se } A_e > 1,25 \text{ m}^2$$

$$g = h_{1,35}/L \quad \text{se } A_e < 1,25 \text{ m}^2$$



### Curva/tipo di installazione

- 1 Involucro separato, libero su tutti i lati
- 3 Involucro separato, appoggiato al muro
- 2 Primo o ultimo involucro distaccato
- 3 Involucro centrale distaccato
- 5 Involucro centrale appoggiato al muro
- 4 Involucro centrale appoggiato al muro e con parte superiore coperta



# Studio termico dei quadri elettrici di bassa tensione

■ **limiti:** i limiti essenziali di questo metodo risiedono nel fatto che;

- esso si applica bene a involucri non compartimentati di tipo armadio, cassette e non a quadri di potenza fortemente compartimentati,
- non tiene conto delle posizioni delle sorgenti di calore, spesso non ripartite in modo uniforme,
- confronto con il nostro approccio.

Si constata che i due approcci danno risultati simili per armadi non compartimentati e con sorgenti di calore ripartite (vedi curva di figura 26).

Per quanto riguarda gli involucri fortemente compartimentati la localizzazione delle sorgenti di calore e gli scambi fra le diverse zone influenzano molto il riscaldamento.

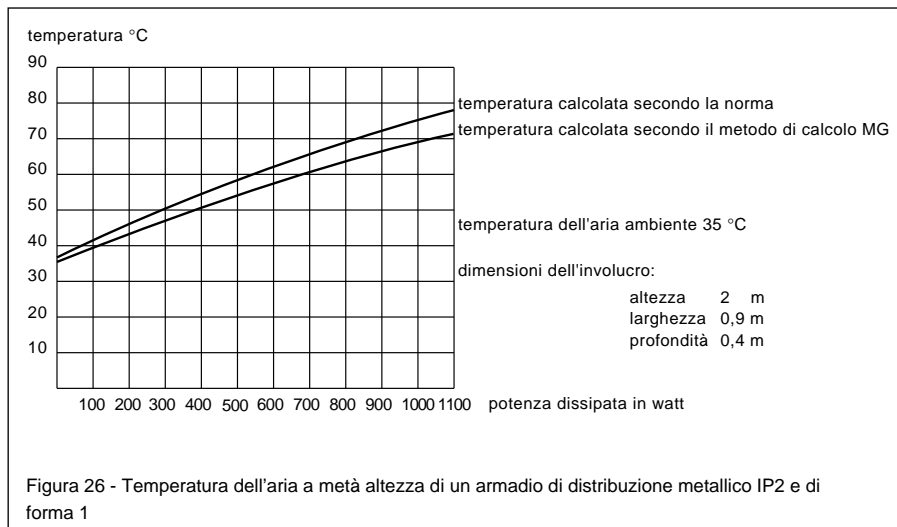


Figura 26 - Temperatura dell'aria a metà altezza di un armadio di distribuzione metallico IP2 e di forma 1

## 9. Conclusione

L'importanza dei quadri elettrici nella distribuzione non richiede più dimostrazioni.

Quando la disponibilità dell'energia elettrica e la sicurezza di funzionamento divengono inderogabili, la conoscenza termica dei quadri elettrici è un obiettivo fondamentale. Le norme che riguardano gli involucri ed i componenti precisano i limiti termici che non devono essere superati.

Restava alle persone del mestiere diventare degli "architetti termici" del progetto degli involucri e dei quadri elettrici; oggi è cosa fatta, e anche per i quadri compartimentati.

**Richiamo:** definizione delle diverse scale di temperatura:

■ grado Celsius (anticamente centigrado) °C: temperatura relativa

Punti di riferimento: 0°C: temperatura del ghiaccio fondente 100°C: temperatura dell'acqua bollente alla pressione atmosferica normale;

■ grado Fahrenheit °F: unità utilizzata nei paesi di lingua inglese:

Punti di riferimento: 32°F: temperatura del ghiaccio fondente 242° F temperatura dell'acqua bollente alla pressione atmosferica normale.

$$\text{Equivalenza } 1^\circ\text{F} = \frac{5}{9}^\circ\text{C} = 0,55^\circ\text{C}$$

$$\text{Conversione } T^\circ\text{F} = \frac{T}{0,55}^\circ\text{C} + 32;$$

■ grado Kelvin °K: unità del sistema internazionale (SI). Scala di temperatura assoluta perchè la sua definizione poggia su basi fisiche precise.

Stessa graduazione della scala Celsius, ma sfasamento dell'origine: la temperatura del ghiaccio fondente corrisponde a 273°K

$$\text{Conversione: } T^\circ\text{K} = T^\circ\text{C} + 273.$$

**Schneider Electric S.p.A.** 20041 AGRATE (MI) Italia  
Tel. (039) 6558111  
Tfax (039) 6056900  
Telex 301535 MAGGAL I

In ragione dell'evoluzione delle Norme e dei materiali, le caratteristiche riportate nei testi e nelle illustrazioni del presente documento si potranno ritenere impegnative solo dopo conferma da parte di Schneider Electric.