

Università degli Studi di Bologna
Scuola di Ingegneria e Architettura
“Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica”

**Metodologie di Progettazione delle
Macchine Elettriche M**

Elementi di trasmissione del calore e reti termiche

Prof. Giovanni Serra

Dipartimento di
Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione “G. Marconi”
Università degli Studi di Bologna
Viale Risorgimento, 2
40136 Bologna
Tel. 051-2093582/ Fax 051-2093588
e-mail: giovanni.serra@mail.ing.unibo.it

Trasmissione del calore per conduzione

- ❑ Trasmissione del calore per conduzione attraverso una parete piana

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \frac{s}{\lambda} \frac{Q}{S}$$

Unità di
misura SI

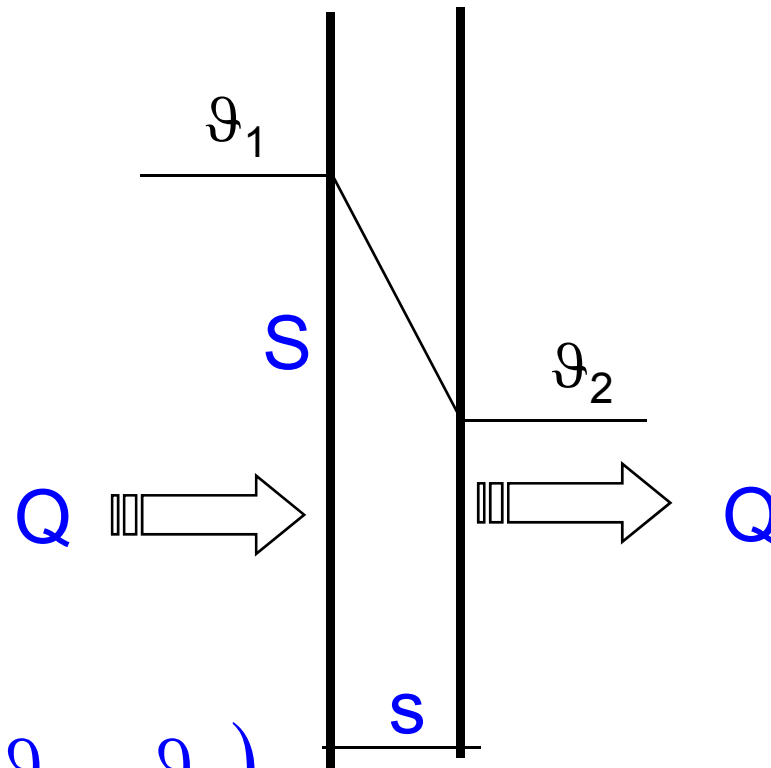
λ conducibilità termica

S superficie

Q Potenza

s spessore

$$\Delta\vartheta_m = \frac{1}{2}(\vartheta_1 - \vartheta_2)$$



Trasmissione del calore per conduzione

□ Alcuni valori di λ

Rame	380	$\frac{W}{m^{\circ}K}$
Acciaio	40-50	
Ghisa	62	
Alluminio	218	
Isolamenti classe A	0.1	
Isolamenti classe B	0.15	
Aria secca 40°C	0.027	

Trasmissione del calore per conduzione

- Trasmissione del calore per conduzione attraverso più pareti piane (s_j, λ_j) aventi la medesima superficie S

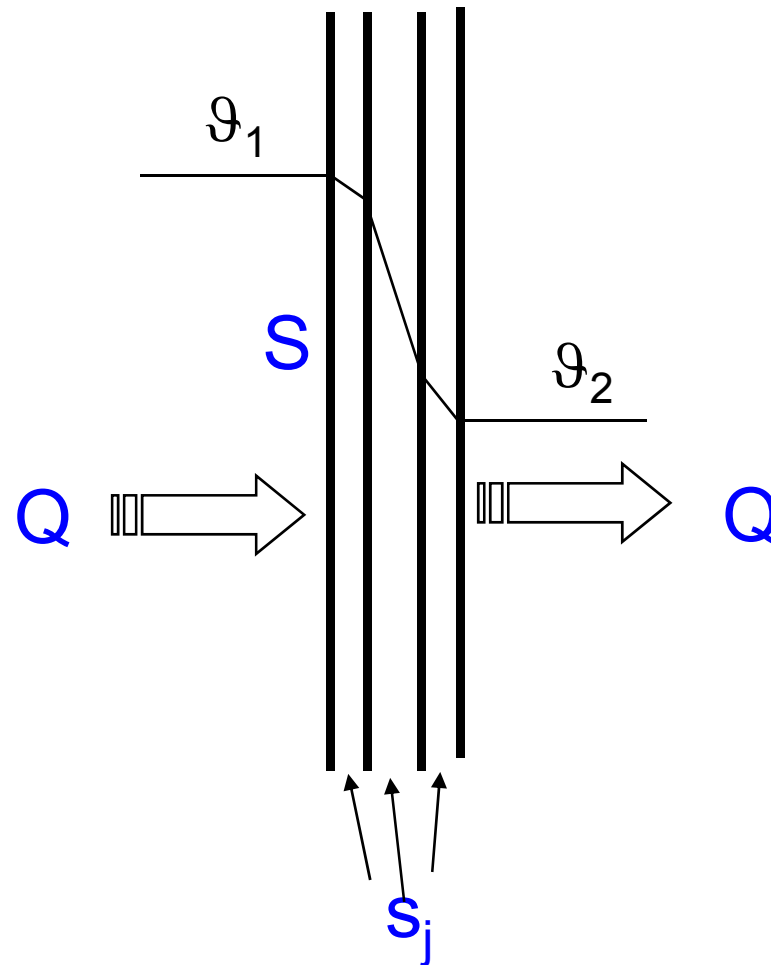
$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \sum_j \frac{s_j}{\lambda_j} \frac{Q}{S}$$

Da cui

$$\lambda = \frac{S}{\sum_j \frac{s_j}{\lambda_j}}$$

ove

$$S = \sum_j s_j$$



Trasmissione del calore per conduzione

- ❑ Calore generato all'interno di una parete adiabatica

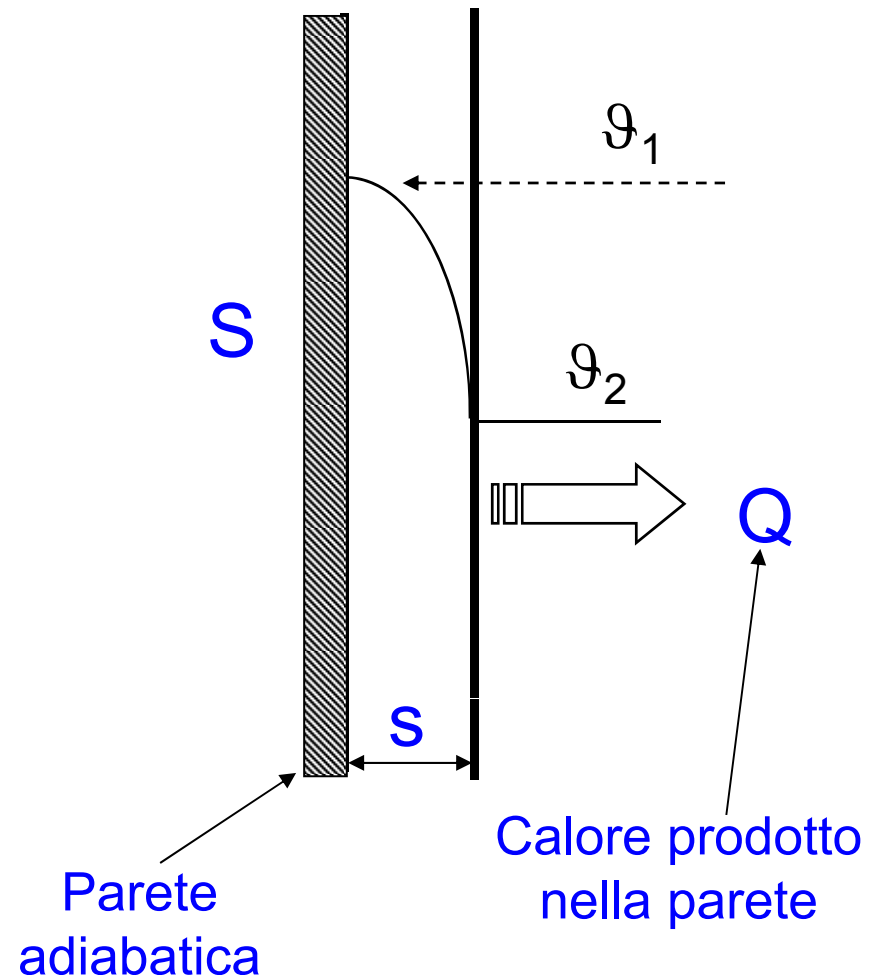
$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \frac{s}{2\lambda} \frac{Q}{S}$$

Sovratemperatura media
della parete

$$\Delta\vartheta_m = \frac{2}{3} (\vartheta_1 - \vartheta_2)$$

ovvero

$$\Delta\vartheta_m = \frac{1}{3} \frac{s}{\lambda} \frac{Q}{S}$$



Trasmissione del calore per conduzione

- Calore generato all'interno di una parete

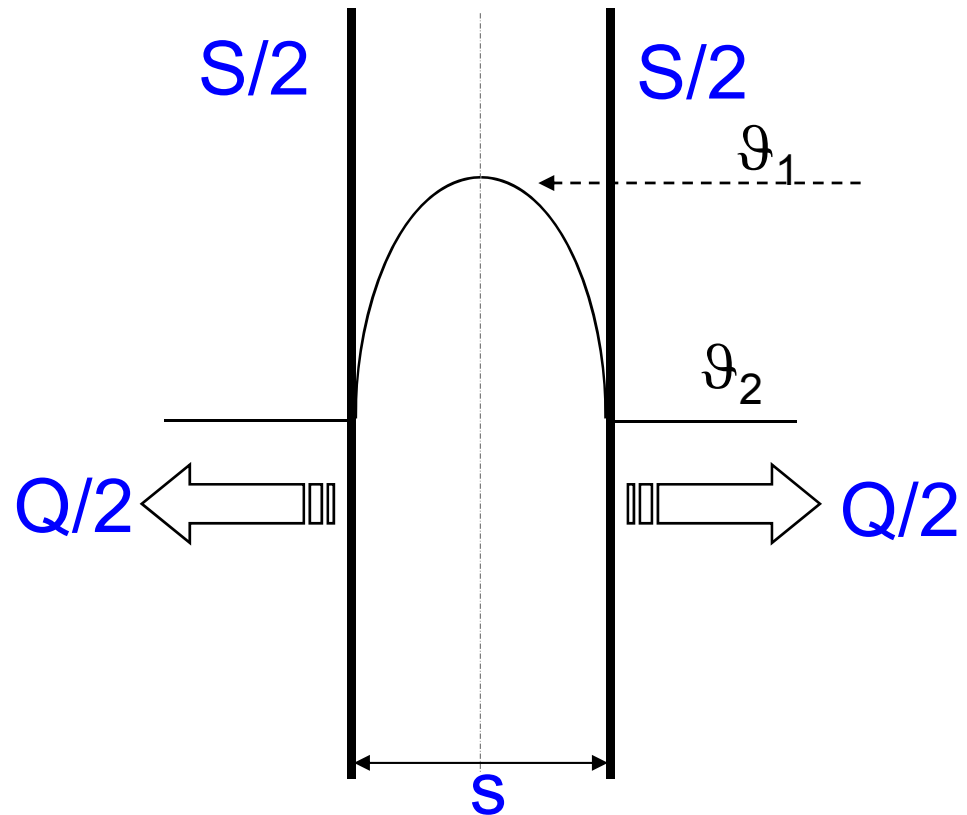
$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \frac{s}{4\lambda} \frac{Q}{S}$$

Temperatura media della parete

$$\Delta\vartheta_m = \frac{2}{3} (\theta_1 - \theta_2)$$

ovvero

$$\Delta\vartheta_m = \frac{1}{6} \frac{s}{\lambda} \frac{Q}{S}$$



Trasmissione del calore per irraggiamento

- Trasmissione del calore per irraggiamento da un corpo di superficie S_{e1} a temperatura ass. T_1 ad un corpo di superficie S_{e2} a temp. ass. T_2 .

$$Q = s_r \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] S_{e1} \quad \frac{1}{s_r} = \frac{1}{s_1} + \frac{S_{e1}}{S_{e2}} \left(\frac{1}{s_2} - \frac{1}{s^*} \right)$$

s_1 s_2 costanti di irraggiamento delle due superfici

s [W/(m² °K⁴)]

s^* costante del corpo nero

Corpo nero 5.77

Alluminio 0.46

Vernice all'alluminio 2.3 - 3.2

Calcina 5.5. - 5.6

Altre vernici 4.8 - 5.5

Unità di
misura SI

Trasmissione del calore per irraggiamento

- S_{e1} ed S_{e2} sono le superfici libere di irraggiamento
(proiezioni secondo le direzioni di irraggiamento)

$$Q = s_r \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] S_{e1} \quad \frac{1}{s_r} = \frac{1}{s_1} + \frac{S_{e1}}{S_{e2}} \left(\frac{1}{s_2} - \frac{1}{s^*} \right)$$

- ESEMPIO:

per

$$0 \leq \frac{S_{e1}}{S_{e2}} \leq 1$$

Unità di
misura SI

$$s_1 = 5.4 \text{ [W/(m}^2 \text{ °K}^4\text{)]} , \quad s_2 = 5.5 \text{ [W/(m}^2 \text{ °K}^4\text{)]}$$

si ha: $\mathbf{s_r = 5.3}$ [W/(m² °K⁴)]

Trasmissione del calore per irraggiamento

Approssimazione nel campo delle temperature di pratico impiego

□ Per $T_2 \approx 273 + 20$ e ponendo $T_1 = T_2 + \theta$
ove θ = sovratemperatura rispetto alla temp. ambiente, la precedente relazione può approssimarsi con la seguente:

$$Q = \alpha_i \theta A_i \quad \text{ove} \quad \alpha_i \approx 2.65 \sqrt[4]{\theta} \quad \text{Unità di misura SI}$$

con A_i superficie libera di irraggiamento.

Esempio: con $\theta = 25^\circ\text{C}$ si ha $\alpha_i = 6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
ovvero **1 m² di sup. emette 6•θ W**

Trasmissione del calore per convezione naturale in aria

- ❑ Trasmissione del calore da una parete verticale avente una sovratemperatura θ rispetto all'aria:

$$Q = \alpha_k \theta S_e$$

Unità di
misura SI

$$\alpha_k = 5.64 \sqrt{\frac{\theta}{T_2 h}} \sqrt{\frac{B}{760}} \quad [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$$

T_2 temperatura assoluta aria ambiente
 h altezza parete
 B pressione barometrica in mm Hg

Il coefficiente α_k si riduce con temperature crescenti dell'aria e decrescenti della pressione atmosferica.

Trasmissione del calore per convezione naturale in aria

$$Q = \alpha_k \theta S_e$$

Unità di
misura SI

$$\alpha_k = 5.64 \sqrt{\frac{\theta}{T_2 h}} \sqrt{\frac{B}{760}} \quad [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$$

- ❑ **Velocità dell'aria = 1 m/s**
- ❑ **Zona di convezione = 8 ÷ 12 mm**

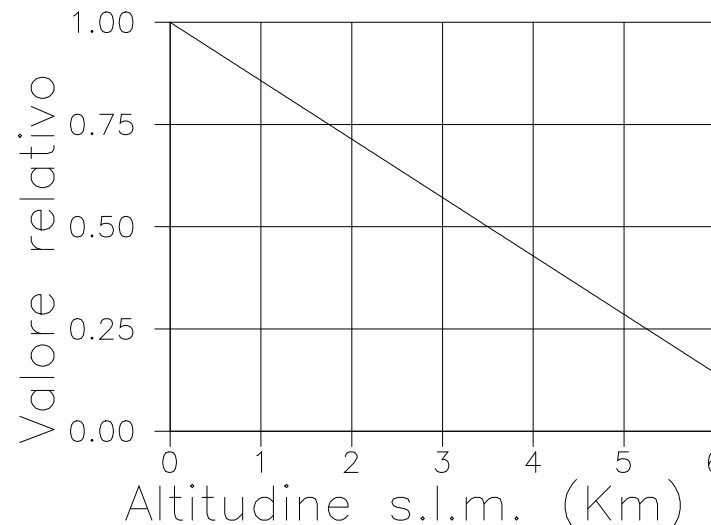
Trasmissione del calore per **convezione naturale in aria**

- Per valori di $T_2 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ e $B=760\text{ mmHg}$ l'espressione di α_k si può semplificare nella seguente

$$\alpha_k = 2.5\sqrt[4]{\theta} \quad [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$$

valore simile a quello del coefficiente di irraggiamento.

Effetto dell'altitudine di
installazione sul valore
del coefficiente di
convezione



Trasmissione del calore per **convezione naturale in Olio**

- ❑ Per convezione naturale in olio si ha

$$\alpha_{ko} = 38 \sqrt[4]{\theta} \sqrt{\frac{\vartheta_m}{50}} \quad [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}]$$

Con $\vartheta_m = 85^\circ\text{C}$ si può porre

$$\alpha_{ko} \cong 50 \sqrt[4]{\theta}$$

N.B. 20 volte il
valore dell'aria

Temperatura superficie
di scambio termico ($^\circ\text{C}$)

Ad esempio $\theta = 30^\circ$ risulta
 $\alpha_{ko} = 110 \text{ W}/(\text{m}^2\text{C})$

- ❑ **Velocità dell'olio = 1 cm/s**
- ❑ **Zona di convezione \approx 3 mm**

Trasmissione del calore per **convezione forzata**

All'equilibrio termico:

$$Q = \gamma q c \Delta \vartheta$$

Q = calore ceduto al fluido

γ = densità del fluido

q = portata del fluido

c = calore specifico

$\Delta \vartheta$ = variazione di temperatura del fluido

Trasmissione del calore per **convezione forzata**

La relazione è la stessa della convezione naturale ma con un diverso valore del coefficiente di convezione.

$$Q = \alpha_{kf} \theta S_e$$

- Se la temperatura della parete o quella del fluido non sono uniformi allora se ne considera il valore medio.

Fluido in canale: Espressione del Gotter per α_k

$$\alpha_{kf} = M d^{-0.22} v^{0.75}$$

d diametro idraulico = (Sezione x 4) / perimetro canale

v velocità del fluido

Esempio: canale anulare cilindrico costituito dal traferro delle macchine rotanti. In questi casi $d = 2\delta$.

Trasmissione del calore per **convezione forzata**

Il fattore M dipende dalla natura del fluido e dalla sua temperatura.

$$\alpha_{kf} = M d^{-0.22} v^{0.75}$$

Aria (press. atm.)	M= 2.9
Acqua	M= 3560
Olio	M= 1420

Unità di
misura SI

*Valori di M per temperature
del fluido fra 20 e 60 °C*

$$Q = \alpha_{kf} \theta S_e$$

Esempio: d= 20 mm, v = 10 m/s risulta $\alpha_k = 39$ (aria)
d= 20 mm, v = 20 m/s risulta $\alpha_k = 65$ (aria)

Trasmissione del calore per **convezione forzata**

Fattore di convezione nel caso di parti cilindriche rotanti (collettori, testate ecc.)

$$\alpha_{kf} = C_1(10 + v) \quad [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$$

ove v =velocità periferica in m/s e $3 < C_1 < 5$.

Per macchine fortemente ventilate è più opportuna la seguente

$$\alpha_{kf} = 50(1 + c_2\sqrt{v}) \quad [\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$$

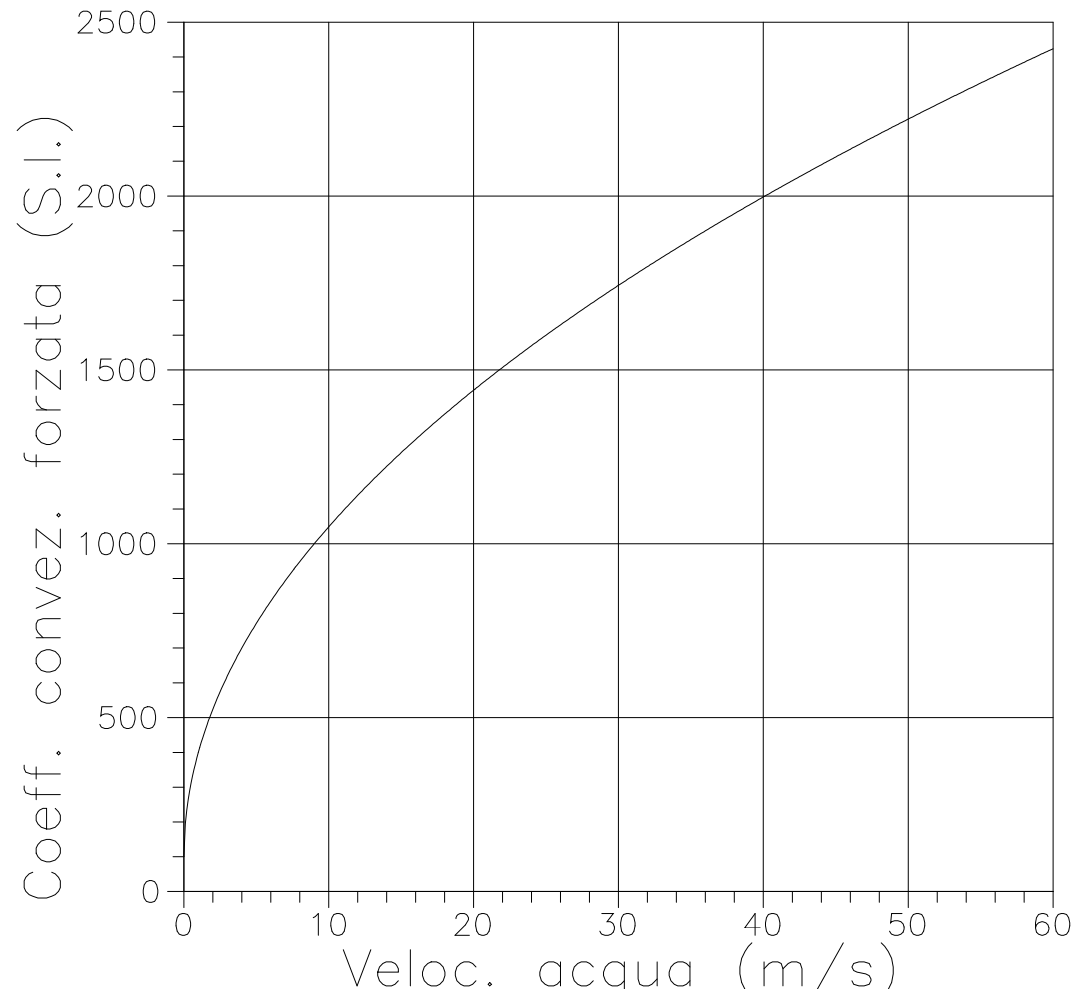
con $0.6 < C_2 < 1.3$ dipendentemente dall'efficacia della ventilazione

Trasmissione del calore per **convezione forzata**

Coefficiente di convezione forzata nel caso di **acqua che lambisce una parete**

$$\alpha_{\text{kfp parete}} = \frac{1 + 3\sqrt{v}}{0.01}$$

$[\text{W m}^{-2}\text{°K}^{-1}]$



Reti termiche

Le macchine elettriche sono costituite da

- ❑ materiali attivi in cui si genera energia termica
 - Ferro, Conduttori
- ❑ materiali inerti attraversati dal flusso termico
 - Materiali isolanti
 - Superfici strutturali lambite dal fluido a contatto

Il comportamento termico, in condizioni di regime, può essere analizzato rappresentando la macchina con una

RETE TERMICA

costituita da

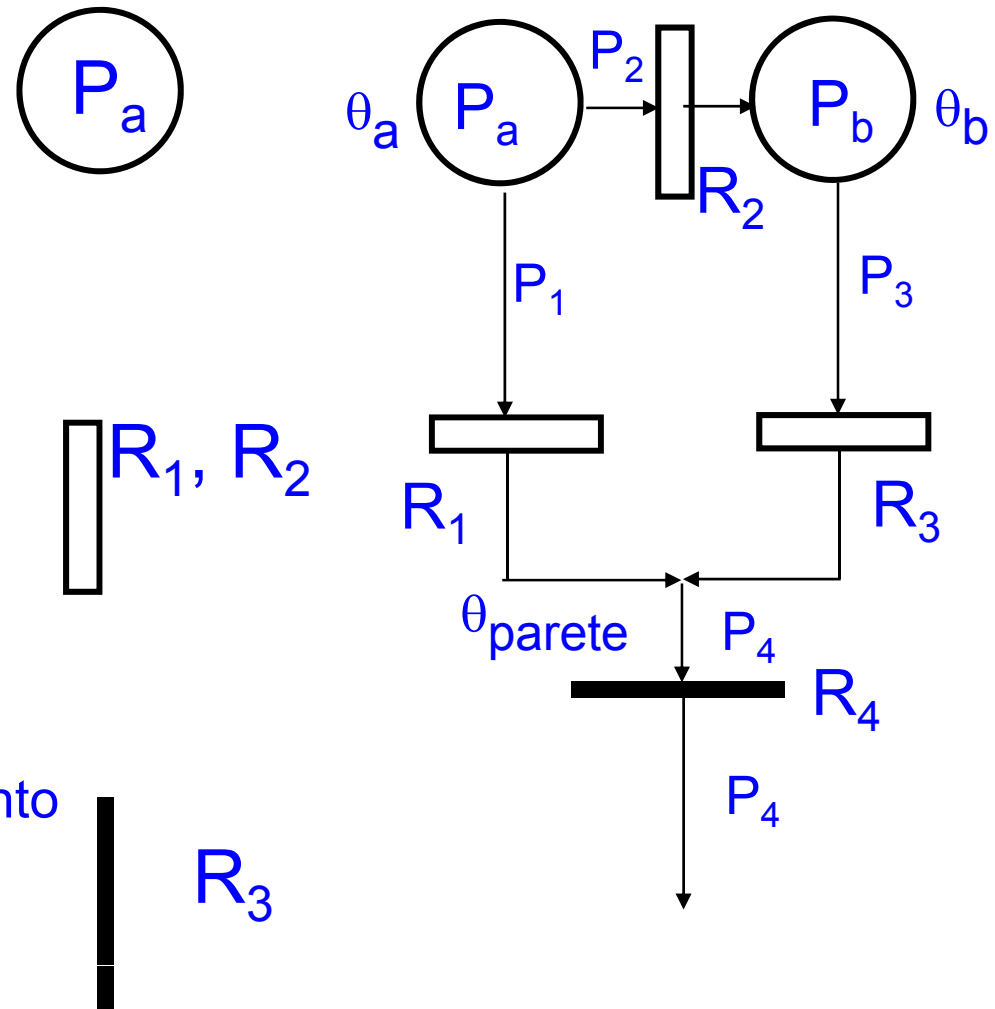
- ❑ Sorgenti di calore $P_{cu1}, P_{cu2}, P_{fe1}, P_{fe2}, \dots$
- ❑ Correnti termiche P_1, P_2, P_3, \dots
- ❑ Resistenze termiche R_1, R_2, R_3, \dots
- ❑ Sovratemperature θ (rispetto al fluido)

La resistenza termica
è definita da

$$R = \theta / P$$

Reti termiche

- ❑ **Sorgente di calore**
rappresenta la parte di macchina nella quale si produce il calore P
- ❑ **Resistenza termica**
parte di macchina che, attraversata da un flusso termico, produce un salto termico θ
- ❑ **Superficie di raffreddamento**
parte di macchina ove si cede il calore al fluido refrigerante



Reti termiche - Regole

□ Regole delle reti termiche

- La somma algebrica delle potenze termiche in un nodo è nulla
- la somma delle potenze termiche generate uguaglia la somma delle potenze termiche emesse dalle superfici di raffreddamento
- la temperatura in un punto è la stessa, indipendentemente dal percorso con cui si calcola.

Reti termiche - Regole

□ Espressioni delle resistenze termiche

Ricordando che

Resistenza termica per conduzione

$$R_{\text{cond}} = \frac{s}{\lambda S}$$

$$\theta_1 - \theta_2 = \frac{s}{\lambda} \frac{Q}{S}$$

$$Q = \alpha(\theta_1 - \theta_2)S_e$$

Resistenza termica di emissione,

irraggiamento

$$R_i = \frac{1}{\alpha_i S_{ei}}$$

convezione

$$R_k = \frac{1}{\alpha_k S_{ek}}$$

Nel caso di irraggiamento e convezione

$$R = \frac{1}{\alpha_i S_{ei} + \alpha_k S_{ek}}$$

Per la serie ed il parallelo
delle resistenze termiche
valgono le stesse regole
delle resistenze elettriche

Reti termiche - Simboli grafici

□ Equazioni:

$$P_a = P_1 + P_2$$

$$P_3 = P_2 + P_b$$

$$P_4 = P_1 + P_3$$

$$P_1 R_1 = \theta_a - \theta_{\text{parete}}$$

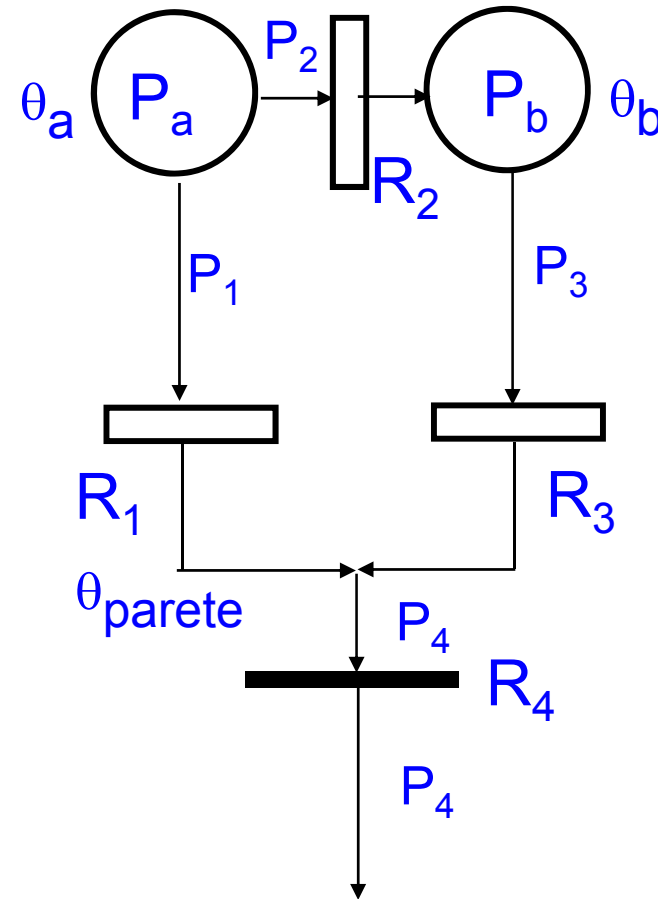
$$P_2 R_2 = \theta_a - \theta_b$$

$$P_3 R_3 = \theta_b - \theta_{\text{parete}}$$

$$P_4 R_4 = \theta_{\text{parete}}$$

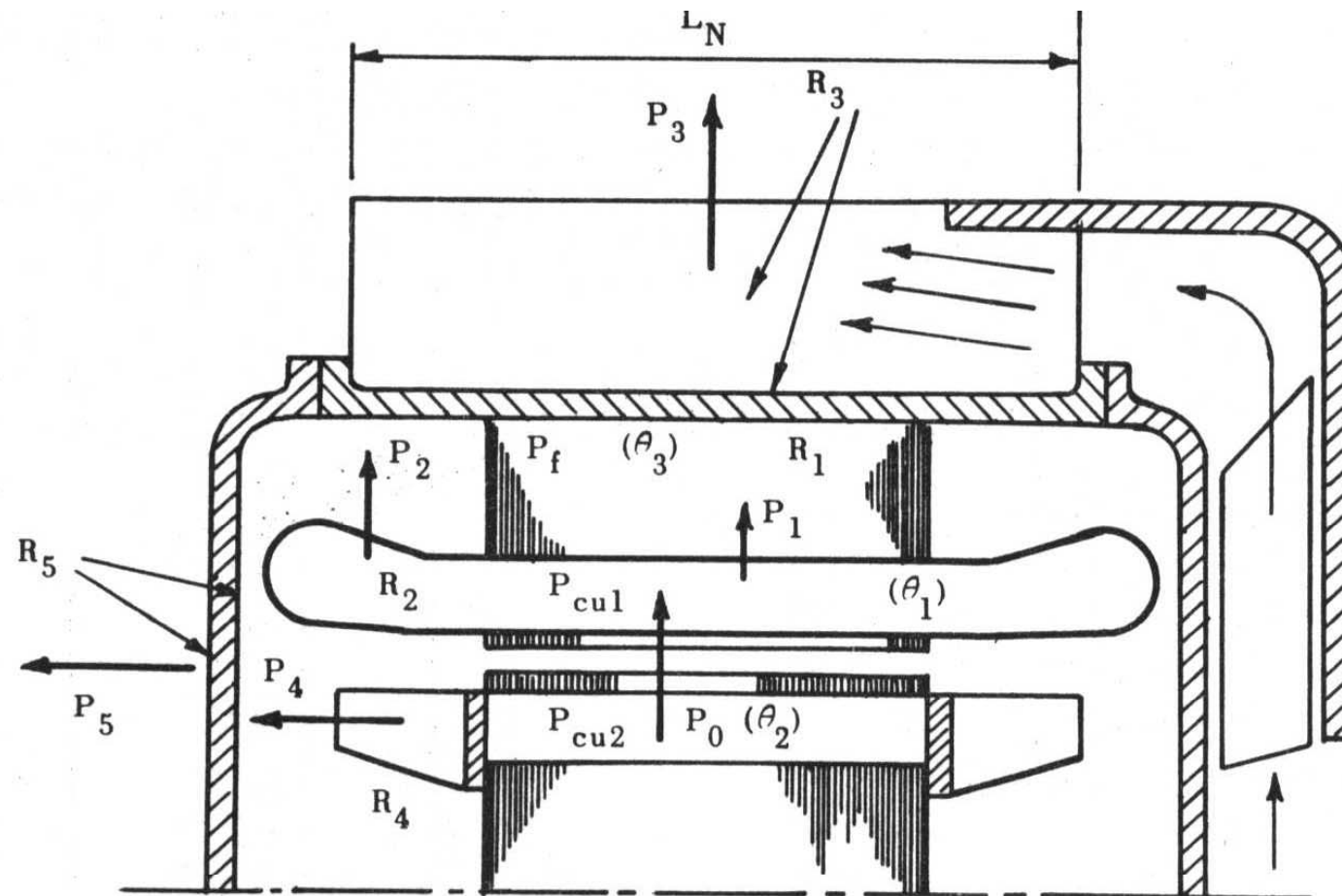
Termini noti: P_a , P_b

Incognite: P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , θ_a , θ_b , θ_{parete}



Reti termiche - Modello termico

Modello termico di un motore asincrono autoventilato



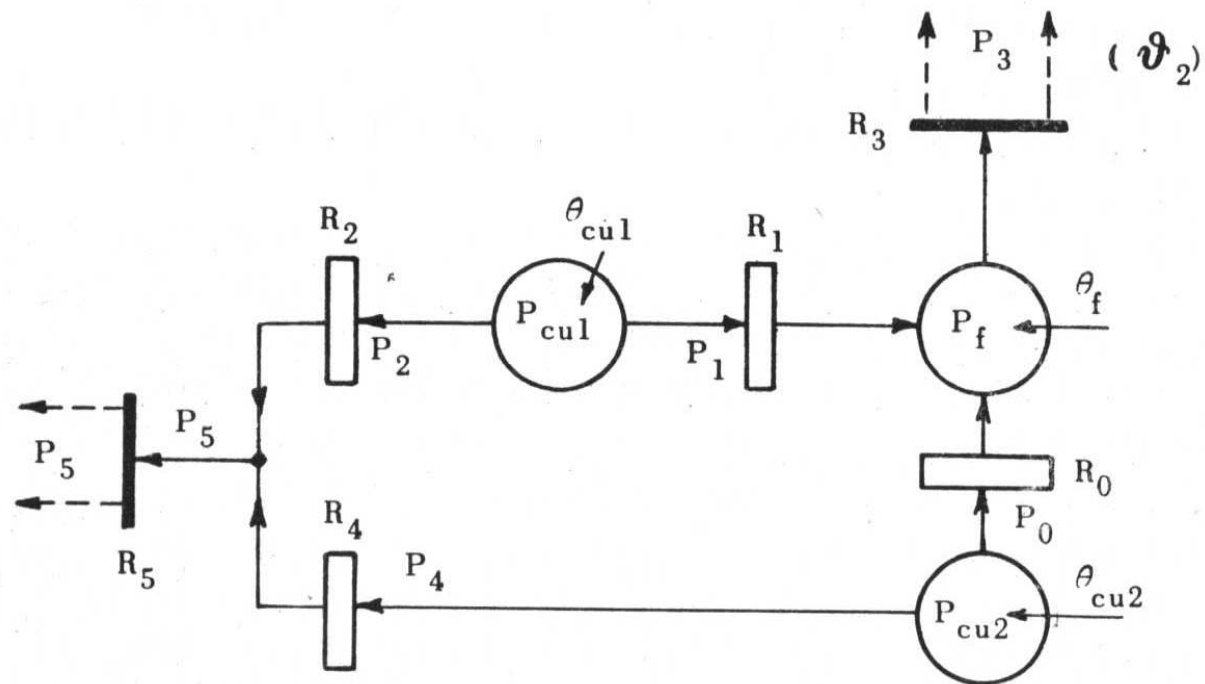
Reti termiche - Flussi termici

Flussi termici

- P_{cu2} Le perdite Joule rotoriche defluiscono con
 - P_4 attraverso gli anelli di c.c. e le alette
 - P_0 lungo il traferro verso lo statore
 - La corrente P_4 incontra la resistenza di convezione R_4 , la corrente P_0 deve superare la resistenza R_0 del traferro per poi unirsi alle perdite P_f nel ferro statorico
- P_{cu1} Le perdite Joule statoriche defluiscono con
 - P_2 attraverso le testate con resistenza di convezione R_2
 - P_1 verso il ferro statorico con resistenza di conduzione R_1
 - La corrente $P_5 = P_2 + P_4$
 - incontra la resistenza di convezione R_5 per raggiungere gli scudi e per defluire all'ambiente (2 convezioni)
 - La corrente $P_3 = P_1 + P_0$,
 - incontra la resistenza R_3 di conduzione sullo strato d'aria fra lamierini e carcassa e poi convezione attraverso le nervature.

Reti termiche - Esempio

Deduzione ed analisi della RETE TERMICA del motore



Passi della risoluzione del problema

- 1) Calcolo potenze dissipate in calore, P_f , P_{cu1} , P_{cu2}
- 2) Calcolo delle varie resistenze termiche
- 3) Risoluzione della rete con i metodi noti

Raffreddamento dei trasformatori

Raffreddamento Trasformatori

❑ Raffreddamento del cassone

Smaltimento delle perdite prodotte nel rame e nel ferro:

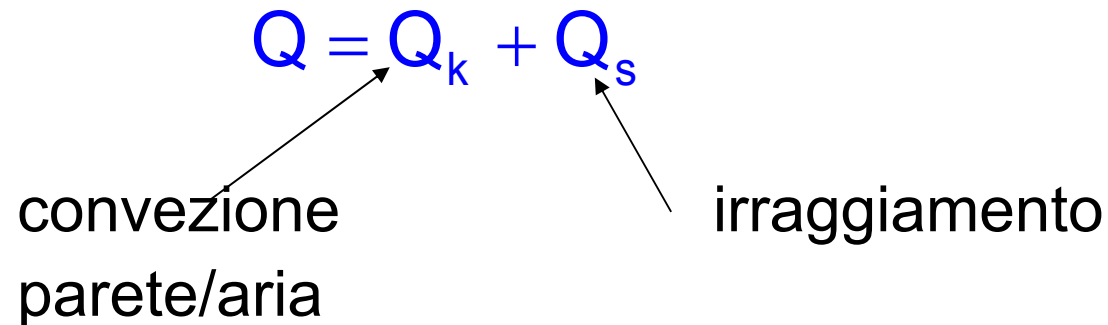
$$Q = P_{fe} + P_{cu}$$

Q = calore che attraversa la superficie esterna S_e del cassone

$$Q = Q_k + Q_s$$

convezione
parete/aria

irraggiamento



Raffreddamento Trasformatori

□ Raffreddamento del cassone

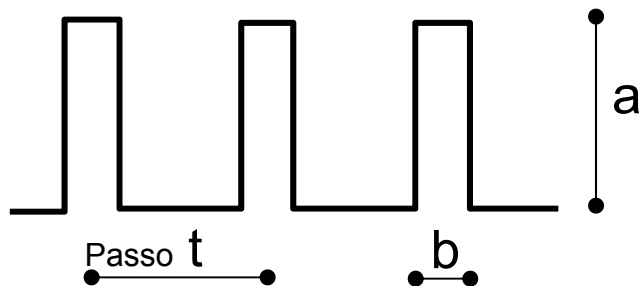
$$Q = Q_k + Q_s = \alpha_{ka} \theta_1 S_e + \alpha_s \theta_1 S_{ie} = \left(\alpha_{ka} + \alpha_s \frac{S_{ie}}{S_e} \right) \theta_1 S_e$$

In genere

$$\frac{S_{ie}}{S_e} = 0.1 \div 0.3$$

*Sovratemperatura
parete rispetto all'aria*

Esempio, con lamiere ondulate



$$\frac{S_{ie}}{S_e} = \frac{t}{t + 2a}$$

$$60 < a < 300$$

$$45 < t < 75$$

$$10 < b < 15$$

$$7.5 < c < 13$$

↑
Interno ondulazione

Raffreddamento Trasformatori

- Sovratemperatura media dell'olio rispetto al cassone

$$\theta_2 = \frac{Q}{S_e} \frac{1}{\alpha_{ko}}$$

- Sovratemperatura media dell'olio rispetto all'aria

$$\theta_{mol} = \theta_1 + \theta_2$$

$$\theta_1 = \frac{Q}{\left(\alpha_{ka} + \alpha_s \frac{S_{ie}}{S_e} \right) S_e} \quad \theta_2 = \frac{Q}{S_e} \frac{1}{\alpha_{ko}}$$

$$\theta_{mol} = \theta_1 + \theta_2 = \frac{Q}{\left(\alpha_{ka} + \alpha_s \frac{S_{ie}}{S_e} \right) S_e} + \frac{Q}{S_e} \frac{1}{\alpha_{ko}} = \frac{Q}{S_e} \left[\frac{1}{\left(\alpha_{ka} + \alpha_s \frac{S_{ie}}{S_e} \right)} + \frac{1}{\alpha_{ko}} \right]$$

Raffreddamento Trasformatori

□ Ricordando che $\alpha_i \approx 2.65\sqrt[4]{\theta}$ $\alpha_{ka} = 2.5\sqrt[4]{\theta}$ $\alpha_{ko} = 50\sqrt[4]{\theta}$
 si ha

$$\theta_1 = \frac{Q}{S_e} \frac{1}{\left(\alpha_{ka} + \alpha_s \frac{S_{ie}}{S_e} \right)} = \frac{Q}{S_e} \frac{1}{\left(2.5\sqrt[4]{\theta_1} + 2.65\sqrt[4]{\theta_1} \frac{S_{ie}}{S_e} \right)}$$

ovvero

$$\theta_1\sqrt[4]{\theta_1} = \theta_1^{5/4} = \frac{Q}{S_e} \frac{1}{\left(2.5 + 2.65 \frac{S_{ie}}{S_e} \right)}$$

Parete/aria

$$\theta_2 = \frac{Q}{S_e} \frac{1}{\alpha_{ko}}$$

$$\theta_2 = \frac{Q}{S_e} \frac{1}{50\sqrt[4]{\theta_2}}$$

$$\theta_2\sqrt[4]{\theta_2} = \theta_2^{5/4} = \frac{Q}{S_e} \frac{1}{50}$$

Olio/parete

Raffreddamento Trasformatori

□ Riassumendo:

$$\theta_1 = \left(\frac{Q}{S_e} \right)^{0.8} \frac{1}{\left(2.5 + 2.65 \frac{S_{ie}}{S_e} \right)^{0.8}} \quad \theta_2 = \left(\frac{Q}{S_e} \right)^{0.8} \frac{1}{50^{0.8}}$$

$$\theta_{\text{mol}} = \theta_1 + \theta_2 = \left(\frac{Q}{S_e} \right)^{0.8} \left[\frac{1}{\left(2.5 + 2.65 \frac{S_{ie}}{S_e} \right)^{0.8}} + \frac{1}{50^{0.8}} \right]$$

Relazione
di “verifica”

$$\theta_{\text{mol}} = \left(\frac{Q}{S_e} \right)^{0.8} [(0.443 \div 0.385) + 0.044]$$

Raffreddamento Trasformatori

Con alcuni passaggi...

$$\theta_{\text{mol}} = \left(\frac{Q}{S_e} \right)^{0.8} [(0.443 \div 0.3852) + 0.044]$$

$$\theta_{\text{mol}}^{1.25} = \frac{Q}{S_e} [(0.443 \div 0.3852) + 0.044]^{1.25}$$

$$\frac{Q}{S_e} = \frac{\theta_{\text{mol}}^{1.25}}{[(0.443 \div 0.3852) + 0.044]^{1.25}} \quad \text{W/m}^2$$

Contributo
scambio
parete/aria

Contributo
scambio
olio/parete

Esempio:

con $\theta_{\text{mol}} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\frac{Q}{S_e} \cong \frac{133}{0.377} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\frac{Q}{S_e} \cong 350 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Raffreddamento Trasformatori

$$S_e = \frac{Q}{\theta_{mol}^{1.25}} \left[\frac{1}{\left(2.5 + 2.65 \frac{S_{ie}}{S_e} \right)^{0.8}} + \frac{1}{50^{0.8}} \right]^{1.25}$$

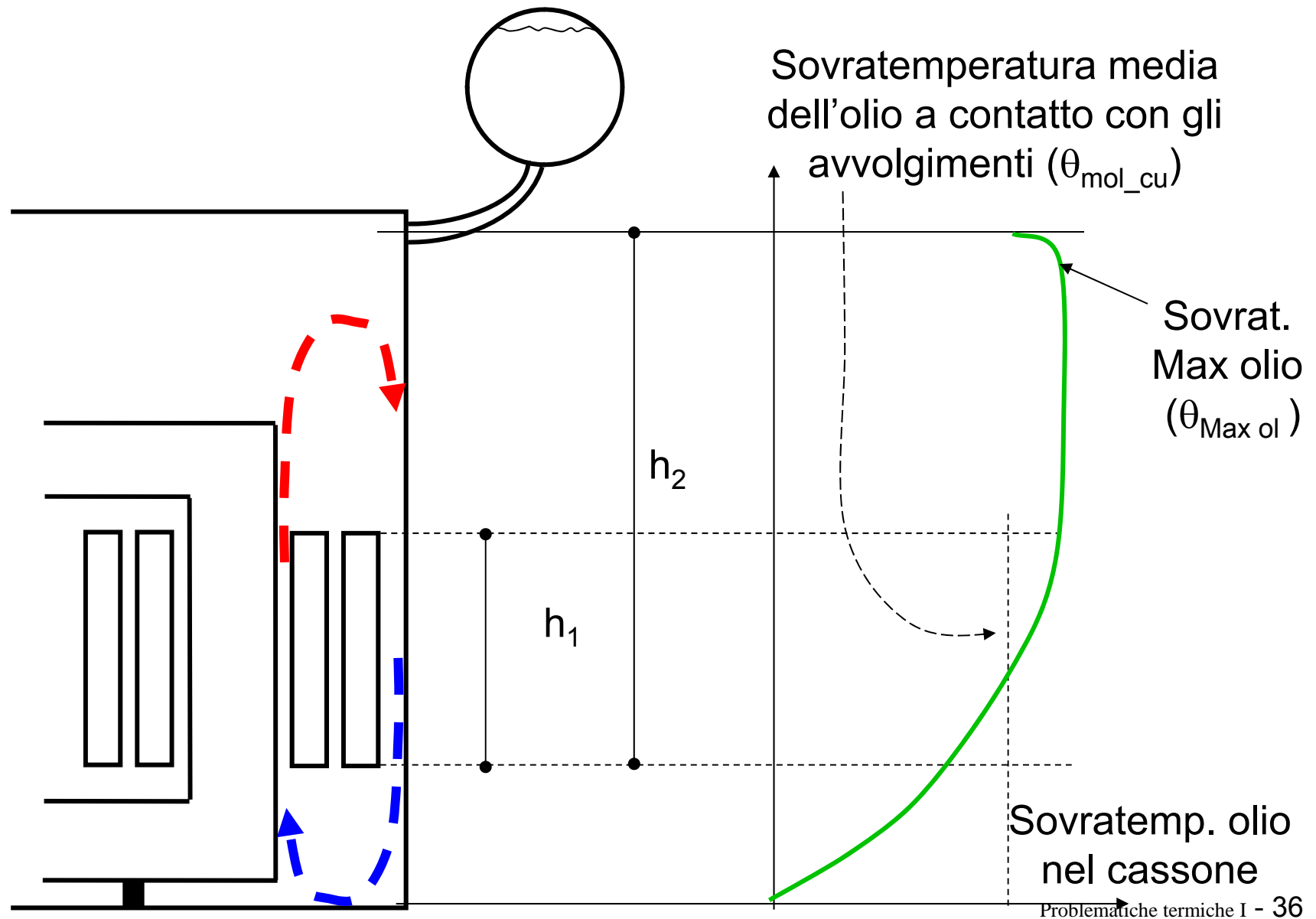
Relazione
di
“progetto”

$$S_e = \frac{Q}{\theta_{mol}^{1.25}} [(0.443 \div 0.3852) + 0.044]^{1.25}$$

Nei cassoni dei trasformatori $\theta_{Max\ ol} \cong (1.1 \div 1.15) \theta_{m\ ol}$

La sovratemperatura max dell'olio ($\theta_{Max\ ol}$) non deve superare 60 °C, (di solito < 50-55°C)

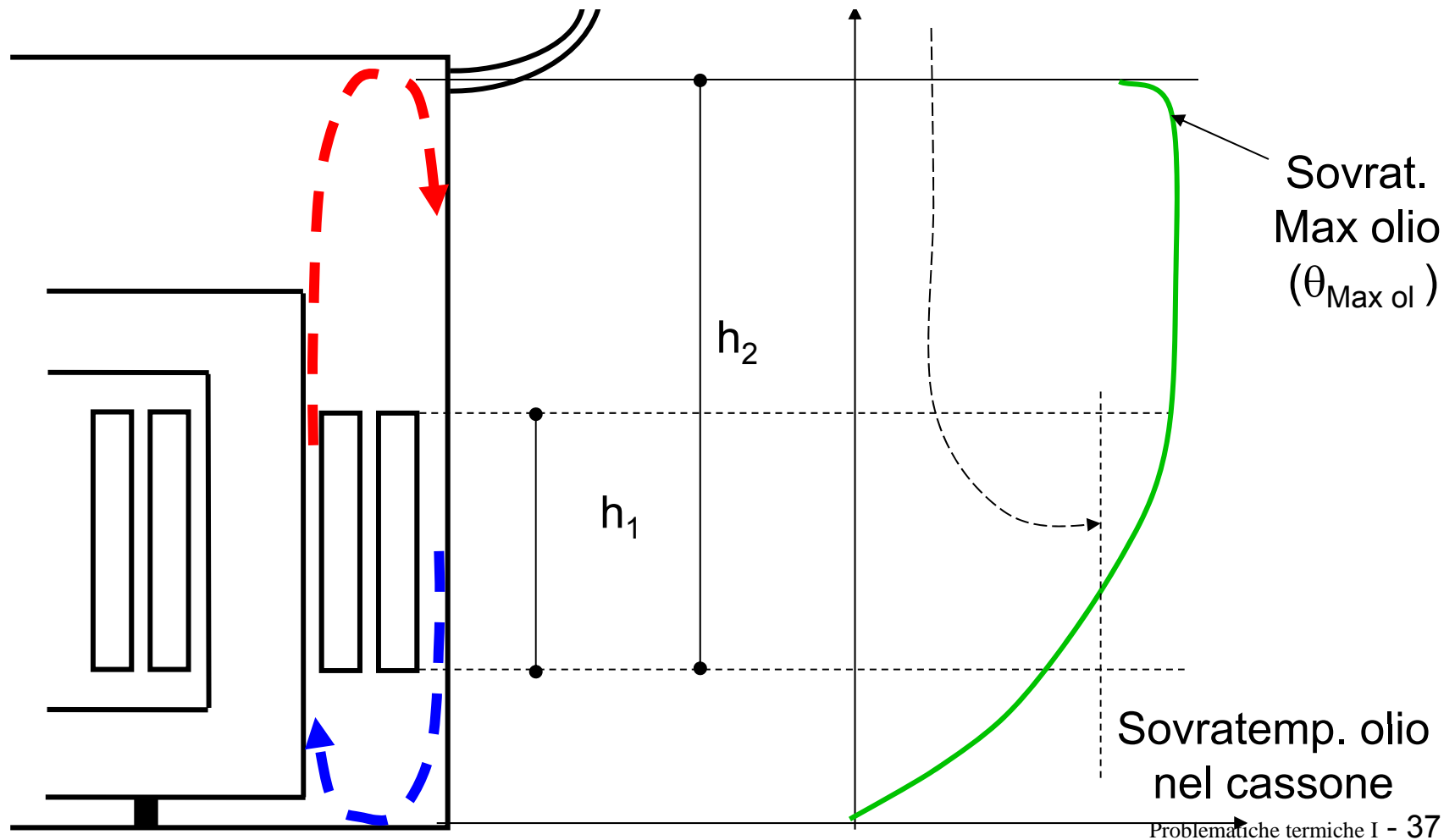
Schema Cassone Trasformatore



Sovrat. olio Cassone Trasformatore

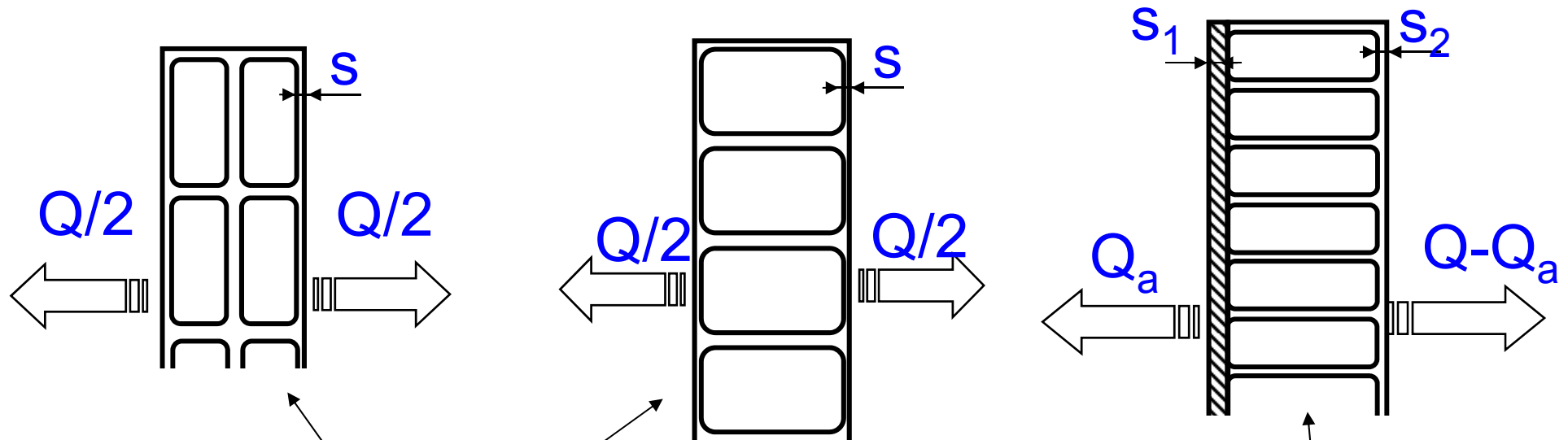
Per valori di $h_1/h_2 \cong 0.4 \div 0.5$ si ha

$$\theta_{\text{mol_cu}} = (0.75-0.8) \theta_{\text{Max_ol}} \quad \text{e quindi} \quad \theta_{\text{mol_cu}} = (0.82-0.92) \theta_{\text{mol}}$$



Raffreddamento Avvolgimenti

Avvolgimenti a bobine con grande superficie di scambio termico “verticale”.
 Si considera la parte interna della bobina a sovratemperatura uniforme θ_i .
 Se rappresenta la superficie attraversata dal flusso termico Q .

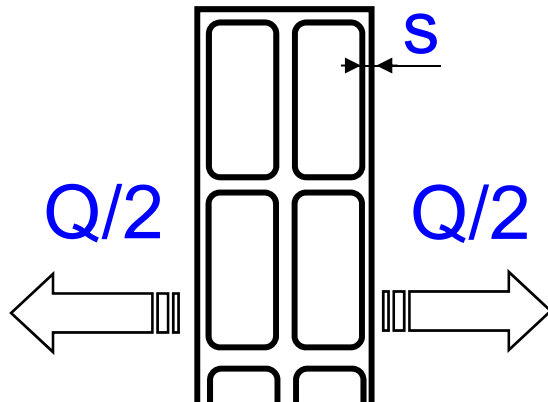


$$\theta_i - \theta_o = \frac{Q}{S_e} \left(\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ko}} \right)$$

$$Q = (\theta_i - \theta_o) \left(\frac{S_{e1}}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} + \frac{S_{e2}}{\frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} \right)$$

θ_o rappresenta la sovratemperatura media dell'olio a contatto con gli avvolgimenti

Raffreddamento Avvolgimenti



Esempio:

$$S = 0.1 \text{ mm}$$

$$\lambda = 0.2 \text{ W/(m } ^\circ\text{C)}$$

$$\alpha_{ko} = 100 \text{ W/(m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$\theta_i - \theta_o = \frac{Q}{S_e} \left(\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ko}} \right)$$

$$\theta_i - \theta_o = \frac{Q}{S_e} \left(\frac{0.0001}{0.2} + \frac{1}{100} \right) = \frac{Q}{S_e} (0.0005 + 0.01)$$

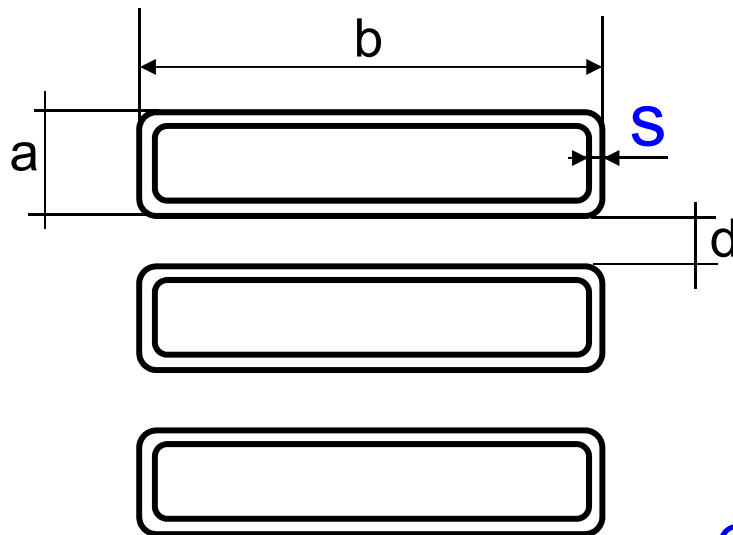
Isolante solido

Convezione
parete/olio

$$\theta_i - \theta_o = \frac{Q}{S_e} \frac{1}{95 \text{ W/(m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}}$$

Raffreddamento Avvolgimenti

Avvolgimenti a GALLETTE, con superficie di scambio termico sia verticale e sia orizzontale



$$Q_{ve} = \frac{S_{ve}}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} (\theta_i - \theta_o)$$

Calore smaltito
attraverso la superficie
a sviluppo verticale (a)

$$Q_{or} = \frac{S_{or}}{\frac{s}{\lambda} + \frac{2}{\alpha_{ko}}} (\theta_i - \theta_o)$$

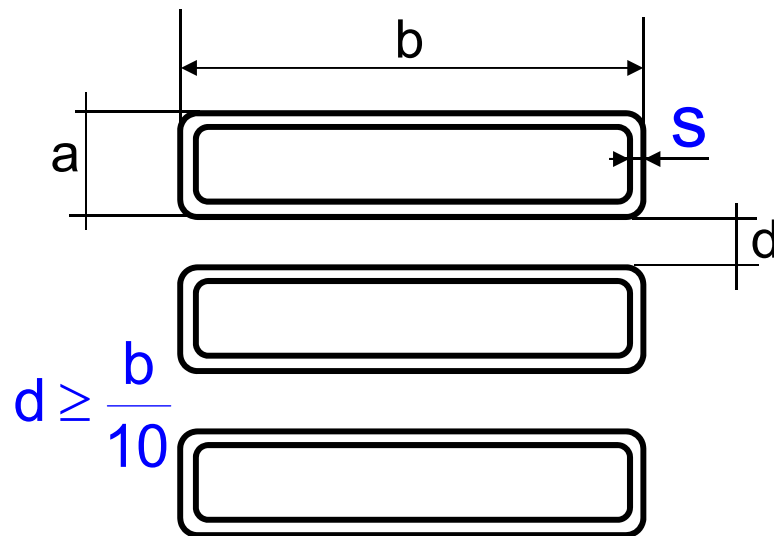
Calore smaltito
attraverso la superficie
a sviluppo orizzontale
(b)

$$d \geq \frac{b}{10}$$

$$d \geq 4 \div 5 \text{ mm}$$

Raffreddamento Avvolgimenti

Avvolgimenti a GALLETTE, con superficie di scambio termico sia verticale e sia orizzontale.



$$Q = Q_{or} + Q_{ve} =$$

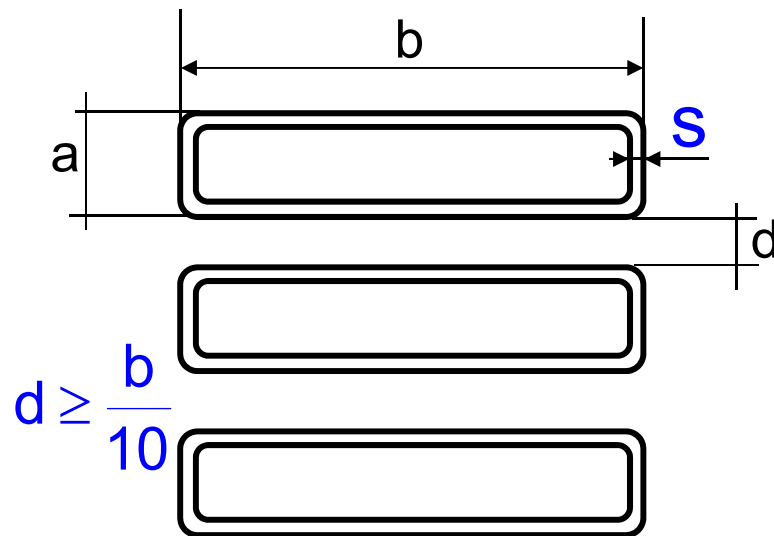
$$= \left(\frac{S_{or}}{\frac{s}{\lambda} + \frac{2}{\alpha_{ko}}} + \frac{S_{ve}}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} \right) (\theta_i - \theta_o) =$$

$$= S \left(\frac{S_{or}/S}{\frac{s}{\lambda} + \frac{2}{\alpha_{ko}}} + \frac{S_{ve}/S}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} \right) (\theta_i - \theta_o)$$

$$(\theta_i - \theta_o) = \frac{Q}{S} \frac{1}{\left(\frac{S_{or}/S}{\frac{s}{\lambda} + \frac{2}{\alpha_{ko}}} + \frac{S_{ve}/S}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} \right)}$$

Raffreddamento Avvolgimenti

Avvolgimenti a GALLETTE, con superficie di scambio termico sia verticale e sia orizzontale.



$$(\theta_i - \theta_o) = \frac{Q}{S} \frac{1}{\left(\frac{S_{or}/S}{\frac{s}{\lambda} + \frac{2}{\alpha_{ko}}} + \frac{S_{ve}/S}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} \right)}$$

Dalla geometria delle bobine risulta:

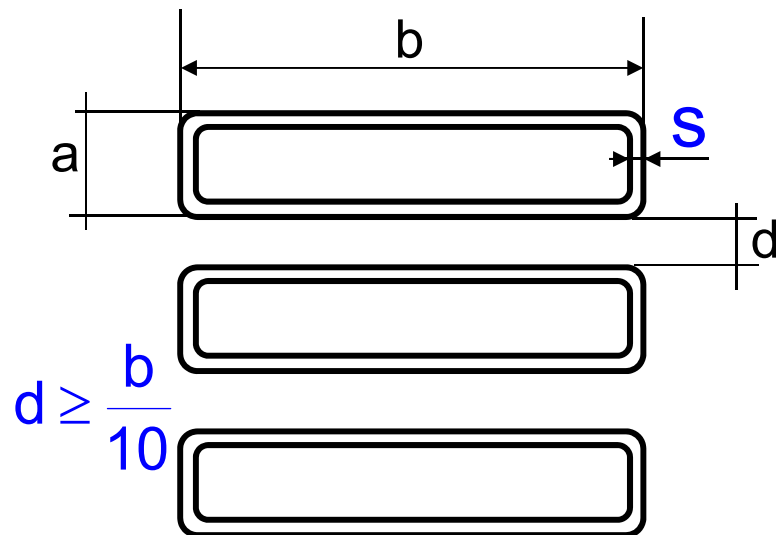
$$\frac{S_{or}}{S} = \frac{b}{a+b}$$

$$\frac{S_{ve}}{S} = \frac{a}{a+b}$$

$$(\theta_i - \theta_o) = \frac{Q}{S} \frac{1}{\frac{a}{a+b} \left(\frac{b/a}{\frac{s}{\lambda} + \frac{2}{\alpha_{ko}}} + \frac{1}{\frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} \right)}$$

Raffreddamento Avvolgimenti

Avvolgimenti a GALLETTE, con superficie di scambio termico sia verticale e sia orizzontale.



$$(\theta_i - \theta_o) = \frac{Q}{S} \frac{1}{\frac{a}{a+b} \left(\frac{\frac{b/a}{s} + \frac{1}{2}}{\frac{\lambda}{\alpha_{ko}}} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{ko}} \right)}$$

Esempio:

$$S = 0.1 \text{ mm}$$

$$\lambda = 0.2 \text{ W/(m } ^\circ\text{C)}$$

$$\alpha_{ko} = 100 \text{ W/(m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}$$

$$b/a = 1.5 \quad \theta_i - \theta_o = \frac{Q}{S_e} \frac{1}{67 \text{ W/(m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}}$$

$$b/a = 8 \quad \theta_i - \theta_o = \frac{Q}{S_e} \frac{1}{54 \text{ W/(m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}}$$

Raffreddamento Avvolgimenti

In definitiva, la sovratemperatura media degli avvolgimenti rispetto all'aria ambiente θ_{cu} è data da

$$\theta_{cu} = (\theta_i - \theta_o) + \theta_{mol_cu}$$

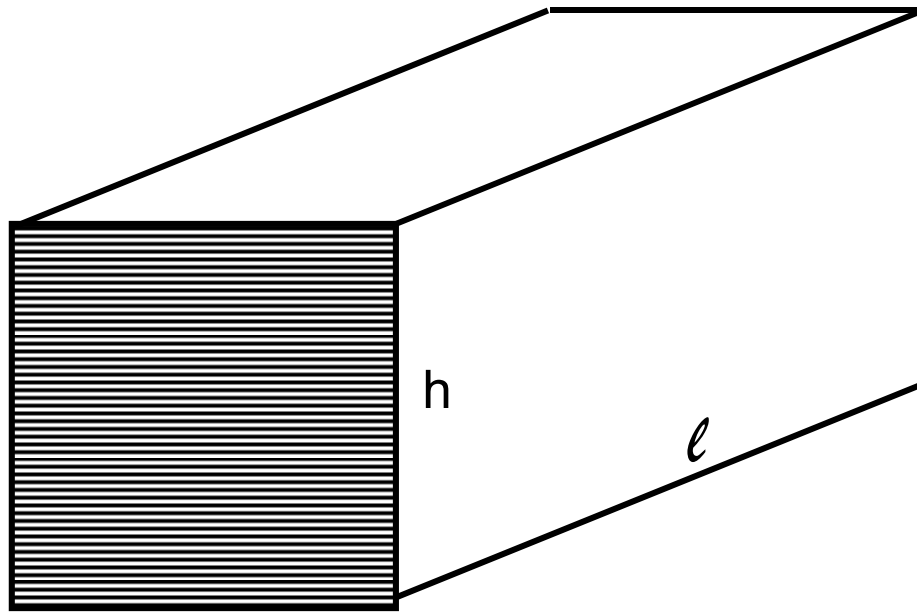
$$\theta_{cu} = (\theta_i - \theta_o) + (0.82 \div 0.92) \theta_{mol}$$

La verifica termica richiede che sia

$$\theta_{cu} + \vartheta_a \leq 105^{\circ}\text{C}$$

ϑ_a temp. aria ambiente: max 40 °C

Raffreddamento Nucleo Magnetico



Tronco di nucleo di circuito magnetico laminato di sezione $b \times h$ e lunghezza ℓ , densità γ , fattore di stipamento ξ e perdite specifiche p_{fe}

$$Q = p_{fe} b h \ell \gamma \xi$$

b Conducibilità

$\lambda_p = 21 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ parallela alla laminazione (laminati a freddo)

$\lambda_p = 19 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ parallela alla laminazione (laminati a caldo)

$\lambda_n = 2.8 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ normale alla laminazione

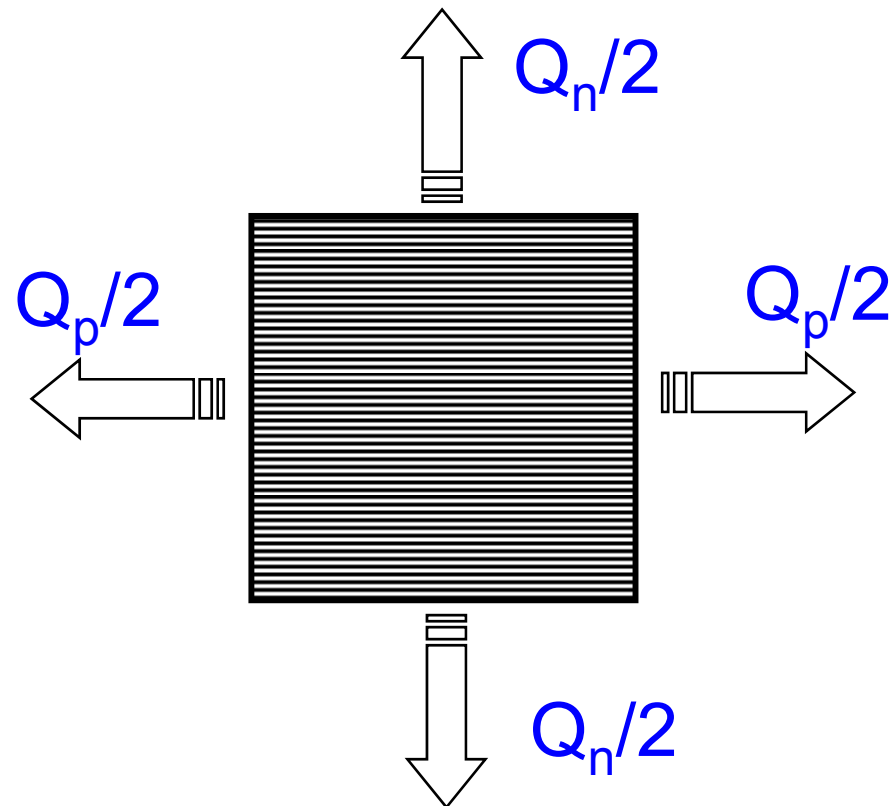
$\gamma = 7600 \text{ Kg/m}^3$

$\xi = 0.9 \div 0.96$

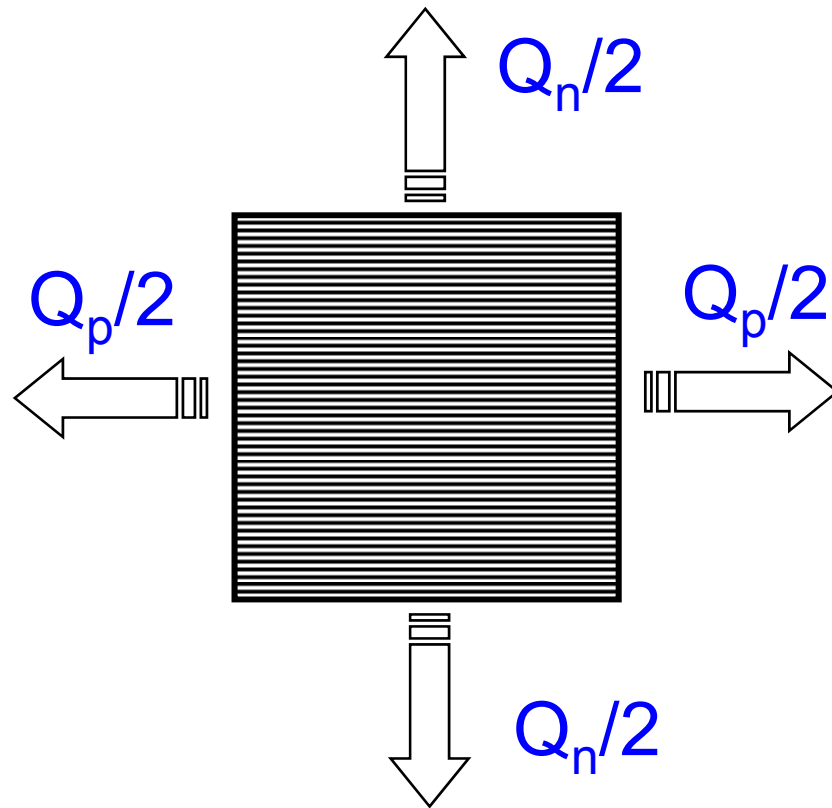
Raffreddamento Nucleo Magnetico

$$Q = p_{fe} b h \ell \gamma \xi = Q_p + Q_n$$

Ipotesi semplificativa



Raffreddamento Nucleo Magnetico



Ipotesi semplificativa:

Q_p e Q_n possono essere calcolati indipendentemente (errore circa 10%)

θ sovratemperatura del punto più caldo rispetto all'olio

$$Q_p = \frac{S_p}{\frac{b}{4\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} \theta, \quad S_p = 2h\ell$$

$$Q_n = \frac{S_n}{\frac{h}{4\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} \theta, \quad S_n = 2b\ell$$

Raffreddamento Nucleo Magnetico

$$Q_p = \frac{S_p}{\frac{b}{4\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} \theta \quad Q_n = \frac{S_n}{\frac{h}{4\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} \theta$$

$$Q_p + Q_n = Q = p_{fe} b h \ell \gamma \xi = \theta \left(\frac{2h\ell}{\frac{b}{4\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} + \frac{2b\ell}{\frac{h}{4\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} \right)$$

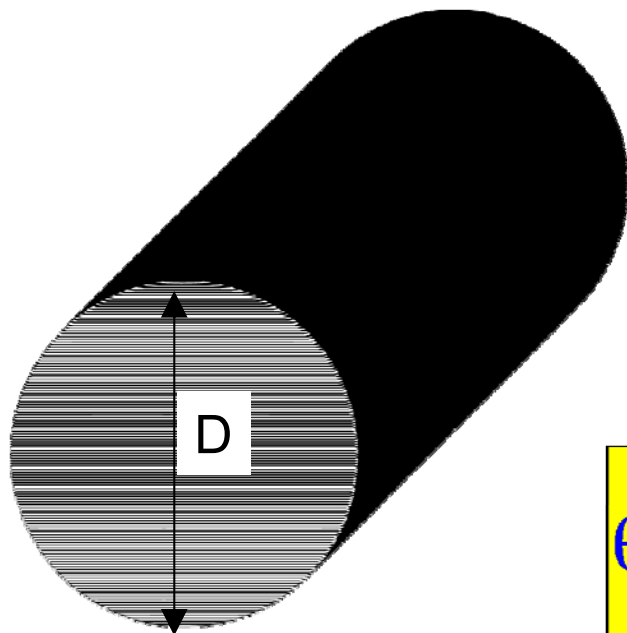
$$\theta = \frac{\frac{1}{2} p_{fe} b h \gamma \xi}{\frac{h}{\frac{b}{4\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} + \frac{b}{\frac{h}{4\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_{ko}}}}$$

Per nuclei a pacchi, applicare la relazione ad ogni pacco

Non sono previsti limiti termici espliciti.

“La temperatura del nucleo non deve danneggiare il nucleo stesso e le parti adiacenti”

Raffreddamento Nucleo Magnetico



Per nuclei a sezione circolare di diametro D , la relazione può fornire valori accettabili ponendo

$$b = h = D$$

$$\theta = \frac{\frac{1}{2} p_{fe} D \gamma \xi}{\frac{1}{\frac{b}{4\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_{ko}}} + \frac{1}{\frac{h}{4\lambda_n} + \frac{1}{\alpha_{ko}}}}$$

F i n e