

Frascati, November 15, 2002

Note: **ME-13****STUDIO TERMICO DELLA CAMERA DA VUOTO DELLA ZONA DI INTERAZIONE "FINUDA" DI DAFNE**

L. Pellegrino

1. Introduzione

La camera da vuoto delle zone di interazione è sollecitata dall'effetto termico della corrente indotta dal passaggio dei fasci di particelle. Nel caso della zona relativa al rivelatore FINUDA, nessun sistema di raffreddamento è stato previsto, né può essere integrato a posteriori.

Scopo del presente lavoro è di rivedere la condizione termica prevedibile sulla base di ragionevoli condizioni al contorno ed evidenziare gli eventuali limiti di funzionamento.

2. Metodologia e impostazioni del calcolo

È stato preso in considerazione il tratto di camera da vuoto tra le flange di attacco delle due pompe da vuoto NEG poste subito fuori del rivelatore, lungo complessivamente circa 2 m. Sono state trascurate variazioni di sezione per giunzioni o inserzione di dispositivi, arrivando a schematizzare il tratto di camera come da Tabella 1, che rappresenta le grandezze rilevanti per metà della lunghezza, considerando la simmetria rispetto al punto di interazione.

Tabella 1: caratteristiche dei tratti della camera in esame
(k = conduttività termica, R = impedenza termica, ρ = resistività elettrica)

| | materiale | lungh. mm | diam. mm | spess mm | sez. mm ² | k W/mK | R K/W | ρ Ωm |
|--------|-----------|--------------|-------------|-------------|-------------------------|-----------|----------|-----------------------|
| sez. 1 | Al | 1024 | 110 | 5 | 1649 | 180 | 3.5 | 2.65 10 ⁻⁸ |
| sez. 2 | inox | 132 (1) | 110 | 0.1 | 35 | 20 | 191.3 | 20 10 ⁻⁸ |
| sez. 3 | inox | 135 | 110 | 2 | 678 | 20 | 10.0 | 20 10 ⁻⁸ |
| sez. 4 | Be | 80 | 110 | 0.5 | 172 | 180 | 2.6 | 4 10 ⁻⁸ |

(1) lunghezza linearizzata del soffiutto

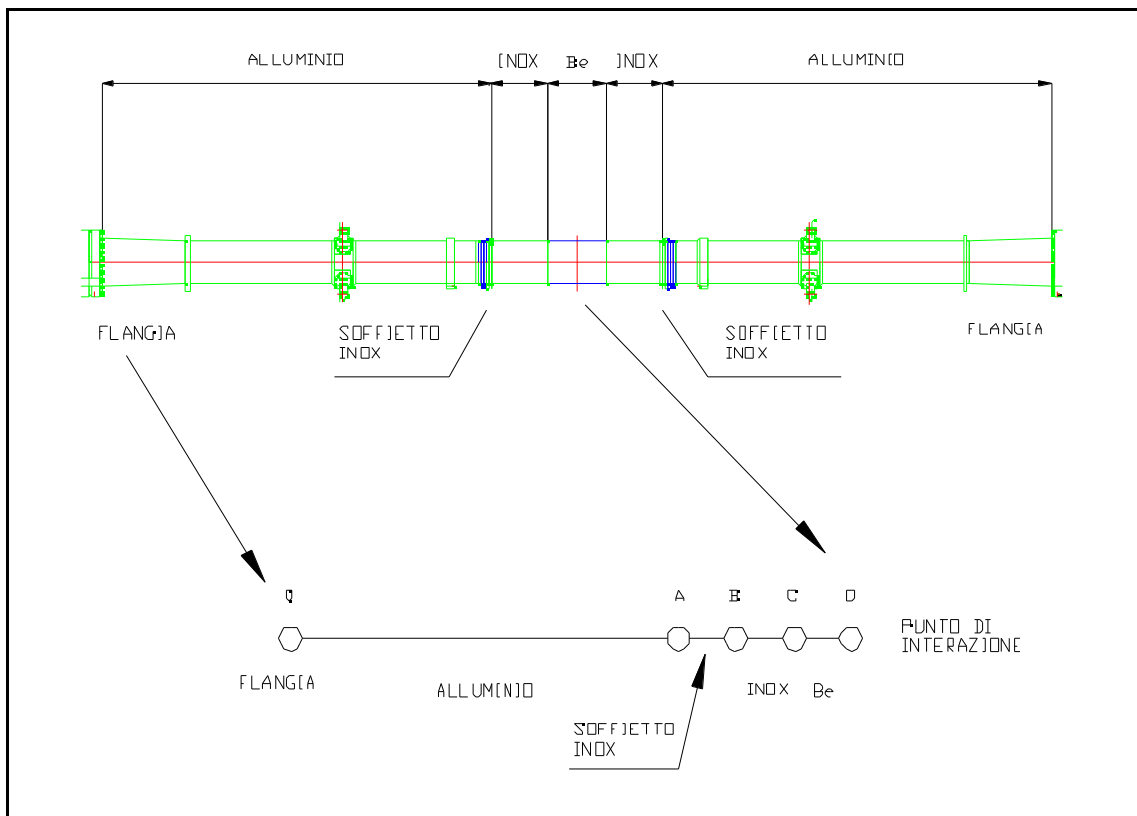


Figura 1: tratto di camera considerato e corrispondente modello semplificato

Si noti che il tratto 2 rappresenta la linearizzazione di un soffiello, per cui la sua lunghezza non è la effettiva occupazione di spazio. Il soffiello rappresenta l'impedenza termica più rilevante. Inoltre è stato considerato un diametro medio costante per tutti i tratti e pari a 110 mm.

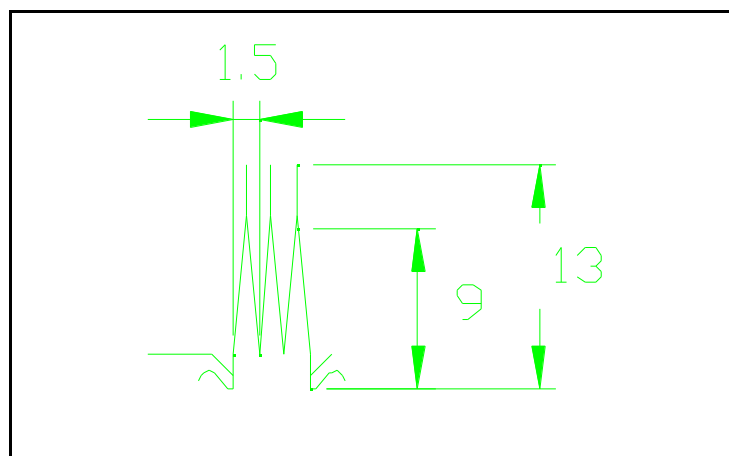


Figura 2: dimensioni reali del soffiello (mm).

Si considera nota la temperatura $T(0)$ in corrispondenza del circuito di raffreddamento della pompa NEG. Tale valore sarà compreso tra circa 25°C nel caso che il raffreddamento non sia attivato, come risulta dai rilevamenti sulle altre camere non raffreddate, e 18°C nel caso in cui il circuito della NEG sia alimentato dall'acqua di raffreddamento disponibile nella buca di FINUDA. Le temperature riportate nel seguito sono comunque da intendersi relative a questi valori, cioè differenze rispetto a $T(0)$.

Il carico termico distribuito è stato ricavato utilizzando il metodo riportato in [1] con i valori illustrati nella tabella 2 (si veda Appendice 1 per lo sviluppo analitico).

Da questa applicazione si ricavano i valori di carico termico della Tabella 3.

Tabella 2: valori adottati per il calcolo della potenza distribuita nel modello in [1]

| Input | nome | Unità | descrizione |
|--------|--------|-------|---------------------------|
| 0.0001 | s | m | spessore camera |
| 0.055 | b | m | raggio medio della camera |
| 0.02 | ibunch | A | corrente di bunch |
| 0.03 | | m | lunghezza del bunch |
| 105 | n_b | | numero di bunches |

Tabella 3: potenza termica distribuita e complessiva.

| | Materiale | lungh. mm | W distrib. W/m | W W |
|---------------|-----------|--------------|-------------------|-------------|
| sez. 1 | Al | 1024 | 1,0 | 1,02 |
| sez. 2 | inox | 132 | 2,7 | 0,36 |
| sez. 3 | inox | 135 | 2,7 | 0,36 |
| sez. 4 | Be | 80 | 1,2 | 0,10 |
| TOTALE | | 1371 | | 1,84 |

Il calcolo è stato svolto su un modello monodimensionale, caratterizzato come da Tabella 1 e Figura 1.

È stata integrata l'equazione di Fourier completa del termine di generazione distribuita di calore nei quattro tratti in cui il modello è stato diviso (0-A, A-B, B-C, C-D), imponendo la temperatura all'estremo 0, l'eguaglianza della temperatura e del flusso di calore ai 3 punti intermedi (A, B, C,) e la condizione di simmetria (flusso di calore nullo) all'estremo D (si veda Appendice 2 per la soluzione dell'equazione differenziale e lo sviluppo del sistema di equazioni).

Lo stesso calcolo è stato eseguito sia per mezzo di un semplice solutore (UTS TK Solver) sia del codice ad elementi finiti ANSYS.

Per eliminare l'eccessivo riscaldamento previsto sulla parte centrale della camera, è stato proposto il montaggio di una calza in filo di rame intorno al soffierto, riducendo l'impedenza termica complessiva, come evidenziato nella tabella 4.

Tabella 4: caratteristiche termiche della soluzione soffietto + calza in rame.

I dati della terza riga sono quelli di un tratto equivalente alla combinazione dei due precedenti.

| | lunghezza mm | diametro mm | spessore mm | sezione mm ² | conducibilità W/mK | resistenza K/W |
|----------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------------------|-----------------------|-------------------|
| soffietto inox | 132 | 110 | 0.1 | 35 | 20 | 191.3 |
| calza rame | 132 | 110 | 0.5 | 172 | 350 | 2.19 |
| inox+Cu equivalente | 132 | 110 | 0.6 | 206 | 295 | 2.17 |

Si noti che è stata considerata una lunghezza della calza di rame arbitrariamente pari a quella del soffietto linearizzato, ipotesi conservativa.

Il fissaggio della calza ai due lati del soffietto potrebbe essere fatto con delle semplici fascette metalliche. In alternativa potrebbero essere montate in modo analogo delle trecce di rame di sezione complessiva equivalente.

3. Analisi dei risultati

Come prevedibile, l'impedenza localizzata costituita dal soffietto causa un gradiente di temperatura notevole, che viene ridotto in maniera definitiva dal "ponte" in rame.

Lo spessore equivalente della calza è stato scelto in modo da ottenere caratteristiche termiche paragonabili agli altri tratti di alluminio e berillio.

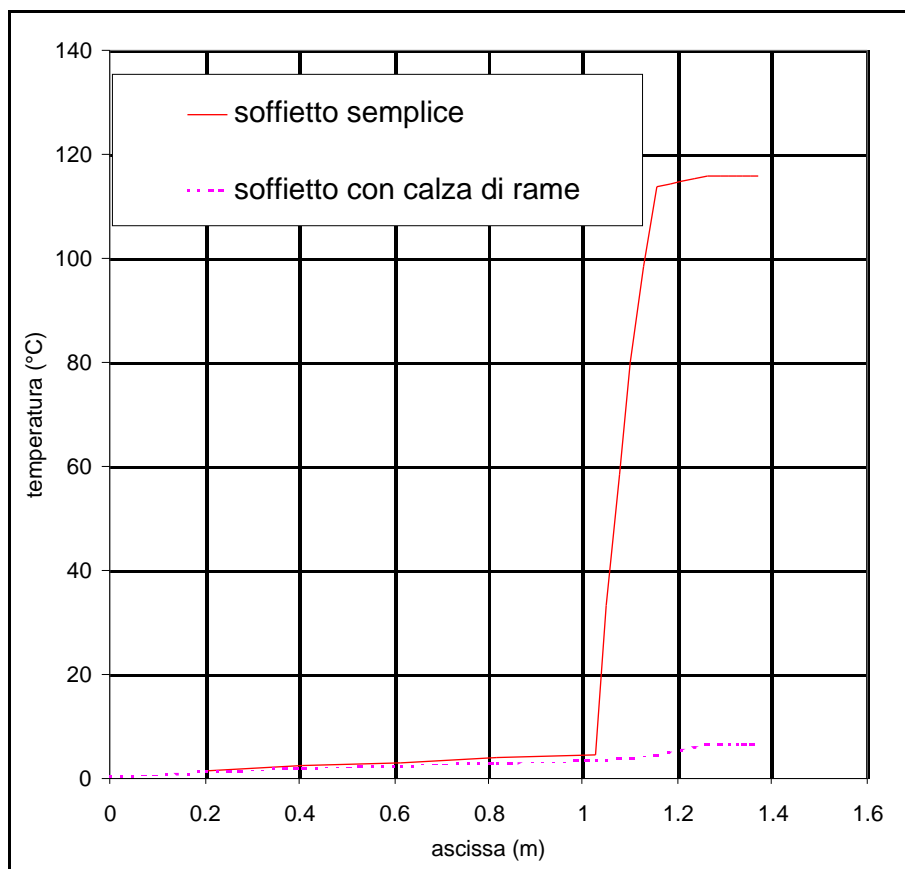


Figura 3: incremento di temperatura (°C) lungo metà del tratto di camera considerato in funzione dell'ascissa (m). A 1.37 m corrisponde il centro di interazione.

4. Conclusioni

La soluzione del problema pare essere non critica. Tuttavia rimane incognita la resistenza di contatto che si riuscirà ad ottenere nel fissaggio della calza di rame alla camera a monte ed a valle del soffiutto. Si ritiene quindi che debba essere posta la massima cura nell'esecuzione del montaggio.

Sarebbe utile il posizionamento di una termosonda subito dopo il soffiutto in direzione del punto di interazione dei fasci per verificare inizialmente e monitorare in seguito l'efficacia della soluzione proposta. La termosonda (una PT100 in esecuzione a lamina, collegamento a 4 fili ad un trasmettitore con uscita 4-20 mA e display locale da installare appena fuori del rivelatore e collegare ad una unità di lettura e registrazione in sala controllo) potrebbe essere bloccata dalle stesse fascette metalliche che fissano la calza.

Bibliografia

- [1] H. Halama, A. Clozza, M. Zobov: "**Interaction Region Vacuum Chamber and Pump Design**", IR-1, 13/1/1993.

APPENDICE 1

(sviluppo da Appendix 1 in [1])

La potenza dissipata per unità di lunghezza per una camera di sezione circolare è:

$$\frac{dP}{dz} = \frac{(eN)^2 k_{RW} n_b}{T_0}$$

in cui:

$$k_{RW} = \frac{c}{2\pi^2 b \sigma} \left(\frac{\rho}{s} \int_0^{\omega^* \sigma / c} e^{-x^2} dx + \sqrt{\frac{\mu_0 \rho c}{2\sigma}} \int_{\omega^* \sigma / c}^{\infty} \sqrt{x} e^{-x^2} dx \right)$$

semplificabile come segue nel caso in cui $\omega^* \sigma / c$ sia piccolo :

$$k_{RW} = \frac{c}{2\pi^2 b \sigma} \left(\frac{\rho}{s} \int_0^{\omega^* \sigma / c} e^{-x^2} dx + \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{Z_0 \rho}{2\sigma}} \Gamma(3/4) \right)$$

in cui:

$\omega^* = \frac{2\rho c}{Z_0 s^2} = 290928$ è la frequenza a cui lo skin depth è pari allo spessore della camera

$Z_0 = \frac{\mu_0}{\epsilon_0} = 277$ è l'impedenza caratteristica del vuoto

I valori utilizzati per il calcolo di dP/dz sono i seguenti:

| | | |
|-----------------------------|-----|------------------------------------|
| $b = 0.055$ | m | raggio della camera circolare |
| $\sigma = 0.03$ | m | lunghezza del bunch |
| $c = 3 \cdot 10^8$ | m/s | velocità della luce nel vuoto |
| $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ | C | carica elettrone |
| $N = 41 \cdot 10^9$ | | elettroni per bunch |
| $n_b = 105$ | | numero di bunches |
| $T_0 = 0.325 \cdot 10^{-6}$ | s | periodo di rivoluzione di un bunch |
| $R = 15.5$ | m | raggio della macchina |
| $i = 0.02$ A | | corrente di bunch |

Ai quattro tratti di camera corrispondono le potenze distribuite riportate nella tabella 5:

Tabella 5: potenza distribuita in relazione a resistività e spessore dei quattro tratti di camera e del tratto 2 (soffietto) modificato.

| | Resistività (Ωm) | Spessore (m) | potenza distribuita (W/m) |
|---------------------|-------------------------------------|-----------------|------------------------------|
| tratto 1 | $2.65 \cdot 10^{-8}$ | 0.005 | 0.993 |
| tratto 2 | $20 \cdot 10^{-8}$ | 0.0001 | 2.728 |
| tratto 3 | $20 \cdot 10^{-8}$ | 0.002 | 2.728 |
| tratto 4 | $4 \cdot 10^{-8}$ | 0.0005 | 1.220 |
| tratto 2 modificato | $2 \cdot 10^{-8}$ | 0.0006 | 0.863 |

APPENDICE 2

Il problema è risolto integrando l'equazione di Fourier monodimensionale

$$\nabla^2 T + \frac{W}{Ak} = 0$$

in cui W [W/m] è la distribuzione lineare di potenza termica, lungo l'ascissa della camera, divisa in 4 tratti (0-a, a-b, b-c, c-d).

L'integrazione produce:

$$T = -\frac{W}{2kA_i} x_i^2 + C_i x_i + D_i$$

con $i = 1, 2, 3, 4$

$0 < x_1 < a, a < x_2 < b, b < x_3 < c, c < x_4 < d$

Le condizioni al contorno sono:

1) congruenza della temperatura ai punti intermedi

$$T(b)_{\rightarrow} = T(b)_{\leftarrow}$$

$$T(c)_{\rightarrow} = T(c)_{\leftarrow}$$

$$T(d)_{\rightarrow} = T(d)_{\leftarrow}$$

2) congruenza del flusso termico ai punti intermedi

$$k_1 A_1 (dT/dx)_{a\rightarrow} = k_2 A_2 (dT/dx)_{a\leftarrow}$$

$$k_2 A_2 (dT/dx)_{b\rightarrow} = k_3 A_3 (dT/dx)_{b\leftarrow}$$

$$k_3 A_3 (dT/dx)_{c\rightarrow} = k_4 A_4 (dT/dx)_{c\leftarrow}$$

3) flusso termico nullo alla simmetria

$$(dT/dx)_d = 0$$

4) temperatura data all'estremo 0

$$T(0) = T_0 = \text{costante}$$

Si ottiene quindi il seguente sistema di equazioni:

$$D_1 = T_0$$

$$-(W_1 / (2 * k_1 * A_1)) * a^2 + C_1 * a + D_1 = D_2$$

$$-(W_2 / (2 * k_2 * A_2)) * (b-a)^2 + C_2 * (b-a) + D_2 = D_3$$

$$W_4 * (d-c) / (k_4 * A_4) = C_4$$

$$C_2 * k_2 * A_2 = k_1 * A_1 * (C_1 - W_1 * a / (k_1 * A_1))$$

$$k_2 * A_2 * (-W_2 * (b-a) / (k_2 * A_2) + C_2) = C_3 * k_3 * A_3$$

$$-(W_3 / (2 * k_3 * A_3)) * (c-b)^2 + C_3 * (c-b) + D_3 = D_4$$

$$k_3 * A_3 * (-W_3 / (k_3 * A_3)) * (c-b) + C_3 = C_4 * k_4 * A_4$$

che, risolto, fornisce i valori seguenti per i coefficienti:

| Name | Output | Name | Output | Name | Output |
|------|---------|------|----------|------|---------|
| A1 | .00165 | C1 | 13.796 | D1 | 0 |
| A2 | .000206 | C2 | 2635.285 | D2 | 10.243 |
| A3 | .000678 | C3 | 76.659 | D3 | 282.182 |
| A4 | .000172 | C4 | 6.609 | D4 | 288.432 |