Perdite di energia per frizione di sali fusi ad alta temperatura

Erminia Leonardi
3/10/00

Le perdite di energia per frizione in un fluido sono in generale una funzione complessa della geometria del sistema, delle proprieta' del fluido e della sua velocita' di flusso. Le misure sperimentali su tali perdite di energia, espresse in termini di altezza equivalente, hanno portato all'equazione di Darcy-Weisbach:

$$\Delta h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}, \tag{1}$$

dove L e' la lunghezza del tubo, D e' il diametro, v e' la velocita' media del fluido, g e' l'accelerazione di gravita'ed f e' il fattore di frizione, il quale dipende, a sua volta, dal numero di Reynolds, *Re*, dal rapporto tra la ruvidita', ε, ed il diametro del tubo, e dall'area della sezione trasversale, *A:*

$$f = f\left(\mathrm{Re}, \frac{\varepsilon}{D}, A\right). \tag{2}$$

Ricordiamo che il numero di Reynolds, *Re*, e' definito come:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v D}{\eta}, \tag{3}$$

dove η e' la viscosita' dinamica e ρ e' la densita' del fluido.

Per *flussi laminari* ($Re < 2000$), la perdida di altezza Δh_f e' proporzionale alla velocita' di flusso. Infatti, poiche' in questo caso il fattore di frizione e' inversamente proporzionale alla velocita':

$$f = \frac{64}{\mathrm{Re}}, \tag{4}$$

si ha:

$$\Delta h_f = \frac{32 \eta L v}{\rho g D^2}. \tag{5}$$

Per *flussi turbolenti* (*Re*>2000), Colebrook ha trovato una correlazione esplicita tra il fattore di frizione, la ruvidita'del tubo, il suo diametro ed il numero di Reynolds:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.869 \ln\left(\frac{\varepsilon / D}{3.7} + \frac{2.523}{\mathrm{Re}\sqrt{f}}\right), \tag{6}$$

Per passare dalle perdite in termini di altezza a quelle in termini di potenza basta ricordare che Δh_f e' legato alla caduta di pressione per frizione:

$$\Delta h_f = -\frac{\Delta P}{\rho g}\ , \tag{7}$$

e quindi, se moltiplicando Δh_f per ρg e per il flusso di fluido, *vA*, abbiamo :

$$\textit{Potenza persa per frizione} = \Delta h_f \rho g A v\,. \tag{8}$$

Perdite per frizione in una miscela equimolare di $NaNO_3/KNO_3$ a 873 K.

In molte applicazioni industriali, il trasporto dell'energia termica e' spesso affidato a sali fusi, generalmente, in miscele di piu' componenti, in modo che la temperatura di fusione sia la piu' bassa possibile.
Nell'impianto solare *Solar Two* di Barstow, in California, una miscela costituita dal 60 % in peso di $NaNO_3$ e dal 40 % in peso di KNO_3 ($T_{fusione}$=493 K) viene usata per trasportare ed immagazzinare l'energia solare raccolta dalla torre ricevente con una portata che raggiunge 100 kg/s (il trasporto del calore e' affidato ad un quantitativo complessivo di sale fuso pari a 1.5×10^6 kg). Per limitare le perdite di calore durante il trasporto, sono stati usati tubi di acciaio inossidabile rivestiti di lana di roccia.

Le perdite di calore per irraggiamento possono essere limitate anche in altri modi, per esempio, usando degli isolanti riflettenti. Un insieme di tubi concentrici, dei quali quello piu' interno contenente la miscela di sali fusi, e separati tra loro dal vuoto, puo' ridurre significativamente tali perdite. Naturalmente il materiale del tubo piu' interno deve rispondere a delle esigenze particolari rispetto agli altri. Infatti, essendo esso quello in contatto con i sali fusi ad alta temperatura, deve

avere ottime proprieta' di resistenza meccanica e chimica rispetto all'azione corrosiva del fluido. Per gli altri tubi, invece, e' importante che questi siano resistenti alle alte temperature ed abbiano buone proprieta' riflettenti. L'alluminio, per esempio, con una temperatura di fusione di 933 K ed un coefficiente di riflettivita' totale emisferico superiore a 0.9 su un ampio intervallo di temperature tra 100 ed 800 K, e' un buon candidato per questo tipo di uso. Da notare che per esercitare la loro azione riflettente e' sufficiente che questi tubi siano semplicemente verniciati di un'opportuna pittura, e quindi le proprieta' riflettenti del tubo sono in realta'dovute alle proprieta' riflettenti della vernice.

Le perdite per irraggiamento diminuiscono al diminuire del raggio del tubo. D'altra parte, se il raggio diventa troppo piccolo, diventano molto grandi le perdite di carico nel fluido dovute alla sua viscosita'. Dunque, per una data portata di fluido esiste un raggio ottimale, che rappresenta il miglior compromesso tra le perdite di energia per irraggiamento e quelle per caduta di pressione nel fluido; queste ultime vanno recuperate con lavoro aggiuntivo delle pompe, e quindi, al prezzo di un maggior consumo di energia elettrica.

Utilizzando le formule riportate sopra, abbiamo calcolato le perdite di energia per frizione in un tubo contenente una miscela equimolare di $NaNO_3$ e KNO_3 alla temperatura di 873 K.

Abbiamo fissato il raggio del tubo e la portata, *Q*, della miscela di sali fusi, espressa in kg/s . La velocita' media del fluido e' data da:

$$v = \frac{Q}{\pi r^2 \rho} \ . \qquad (9)$$

Il coefficiente di frizione viene calcolato usando l'eq. (4) oppure (6), a seconda del valore di *Re*, ed il coefficiente di ruvidita' e' stato fissato a $1x10^{-6}$ m.

Per calcolare la densita' della miscela assumiamo che questa abbia un comportamento ideale. Tale approssimazione e' ragionevole se si tiene conto del fatto che $NaNO_3$ e KNO_3 sono composti chimici molto simili.
Pertanto, se ρ_{NaNO_3}, PM_{NaNO_3} ρ_{KNO_3} e PM_{KNO_3} sono le densita' ed i pesi molecolari di $NaNO_3$ e KNO_3, rispettivamente, la densita' della miscela equimolare sara':

$$\rho(873K) = \frac{PM_{NaNO_3} \times \rho_{NaNO_3}(873K) + PM_{KNO_3} \times \rho_{KNO_3}(873K)}{PM_{NaNO_3} + PM_{KNO_3}}$$

Poiche' $\rho_{NaNO_3} = 1.9 \times 10^3$ kg/m^3 e $\rho_{KNO_3} = 1.865 \times 10^3$ kg/m^3 [2], la densita' della miscela e': $\rho = 1.881 \times 10^3$ kg/m^3.

Abbiamo considerato tre diversi valori della portata volumetrica: 5x10^{-3} m^3/s, 1x10^{-3} m^3/s e 5x10^{-4} m^3/s, corrispondenti ad un flusso di massa di 9.405 kg/s, 1.881 kg/s e 0.9405 kg/s, rispettivamente.
In figura 1 ed in tabella 1 e' riportata la dipendenza della viscosita' dalla temperatura per una miscela equimolare di $NaNO_3/KNO_3$ [1].

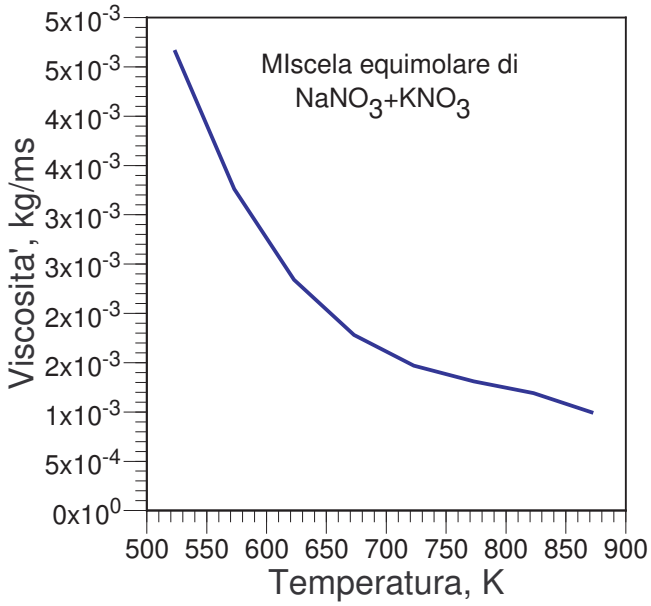

Figura 1: *Viscosita' in funzione della temperatura per una miscela equimolare di $NaNO_3/KNO_3$*

Temperatura, K	Viscosita', 10^{-3}x kg/ms
523	4.67
573	3.26
623	2.34
673	1.78
723	1.47
773	1.31
823	1.19
873	0.992

Tabella 1: *Dati di viscosita' per una miscela equimolare di $NaNO_3/KNO_3$*

La velocita' media di flusso della miscela di sali fusi aumenta, ovviamente, con l'aumentare della portata del fluido ed al diminuire del raggio del tubo, come e' mostrato in figura 2. Abbiamo considerato raggi compresi tra 0.05 m e 0.005 m.

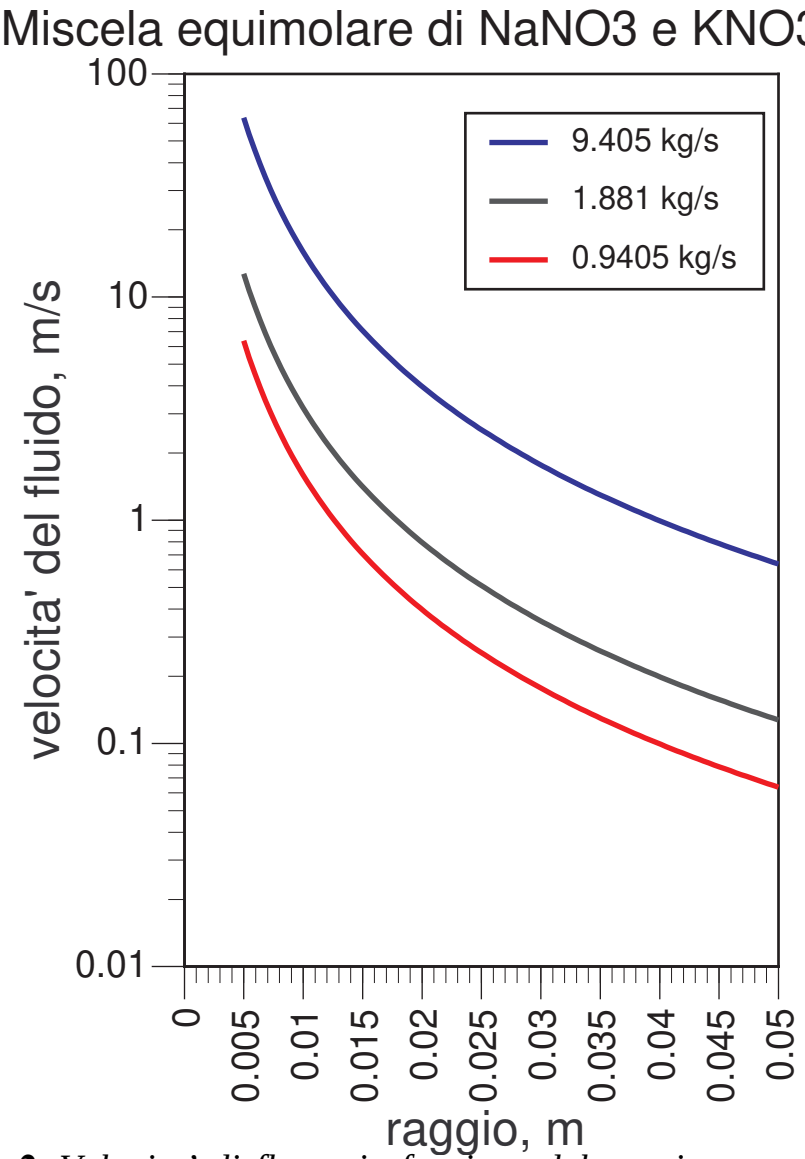

Figura 2: *Velocita' di flusso in funzione del raggio e per tre diverse portate di fluido*

La figura 3 mostra l'andamento della potenza persa per frizione in funzione del raggio del tubo e per tre diversi valori della portata. Assumendo un'efficienza di conversione dell'energia elettrica in lavoro di pressione della pompa dell'80 %, in figura 3 viene anche riportata la perdita di potenza in termini di watt elettrici per

lunghezza unitaria del tubo. L'energia persa per frizione aumenta con la portata del fluido ed al diminuire del raggio del tubo.

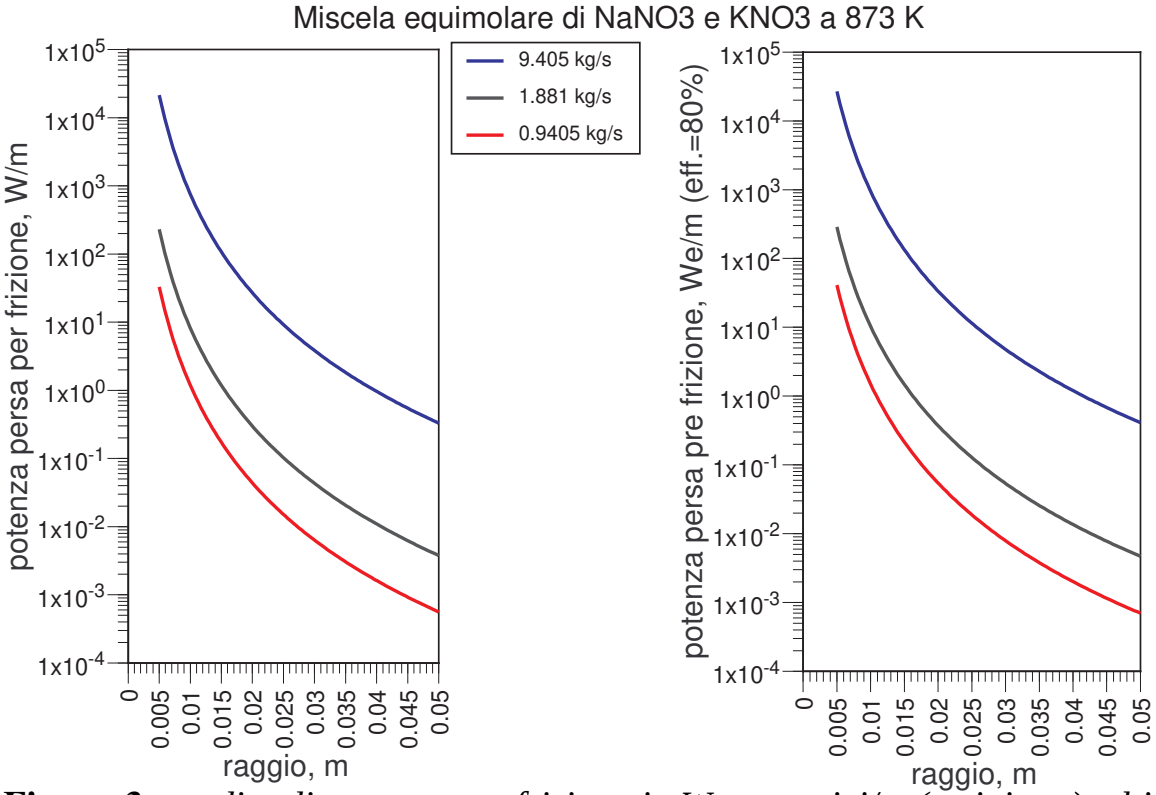

Figura 3: *perdita di potenza per frizione in Watt termici/m (a sinistra) ed in Watt elettrici/m (a destra) in funzione del raggio del tubo e per tre diverse portate. Si assume un'efficienza di conversione del lavoro elettrico in lavoro di pressione dell'80%.*

Infine, si e' confrontata la potenza persa per frizione con quella persa per irraggiamento dalla superficie del tubo.

In figura 4 e' riportata la perdita per irraggiamento da un sistema costituito da un singolo tubo alla temperatura di 873 K. Supponendo un'efficienza di conversione dell'energia termica in energia elettrica del 40 %, nella figura 4 a destra, tale perdita e' espressa in Watt elettrici per unita' di lunghezza di tubo.

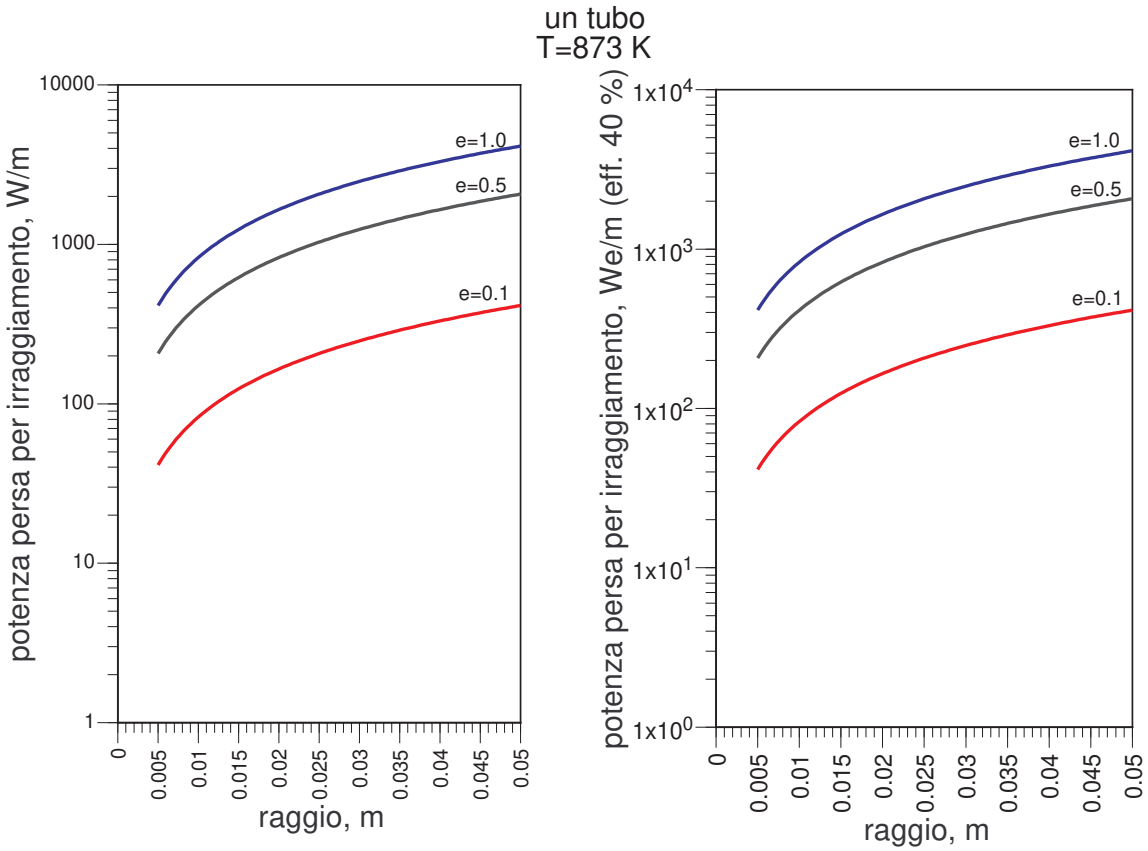

Figura 4: *potenza persa per irraggiamento da un tubo alla temperatura di 873 K, per tre diversi valori di emissivita'.*

Le figure 3-destra e 4-destra sono riunite in un'unico grafico in figura 5.
Si puo' cosi' vedere che, data una certa portata del fluido ed emissivita' del tubo, esiste un raggio ottimale, intersezione tra la linea blu e quella rossa, per il quale le perdite per irraggiamento sono uguali alle perdite per frizione e sono le minime possibili. A destra di questo punto di intersezione, e quindi per raggi piu' grandi predominano le perdite per irraggiamento, mentre a sinistra, per raggi piu' piccoli, predominano le perdite per frizione.

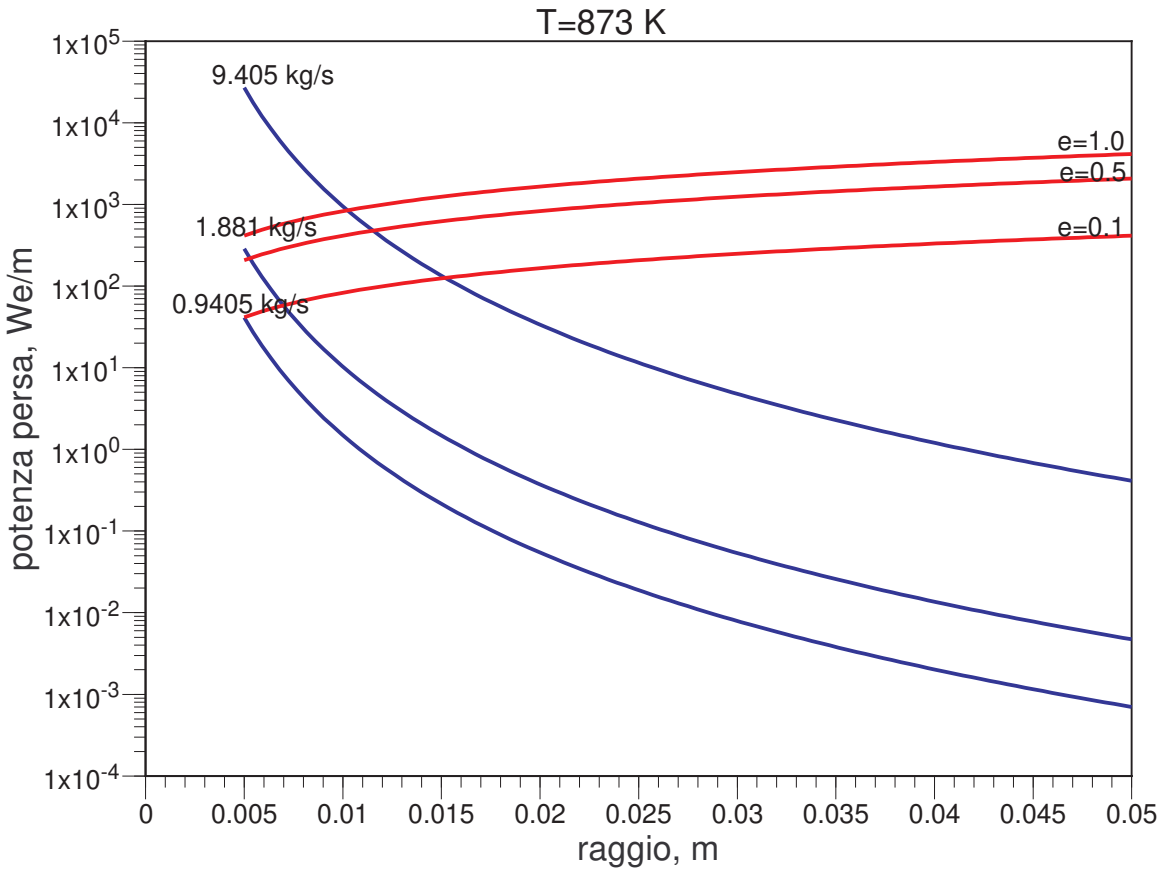

Figura 5: *Un singolo tubo contenente una miscela equimolare NaNO3 e KNO3 a 873 K: confronto tra la potenza persa per irraggiamento (linee rosse) e quella persa per frizione (linee blu) in We/m, in funzione del raggio del tubo.*

In figura 6 e', invece, mostrata la perdita di potenza per irraggiamento in funzione del raggio del tubo piu' interno per un sistema costituito da 100 tubi concentrici, dei quali quello piu' interno si trova alla temperatura di 873 K e quello piu' esterno alla temperatura di 300 K.

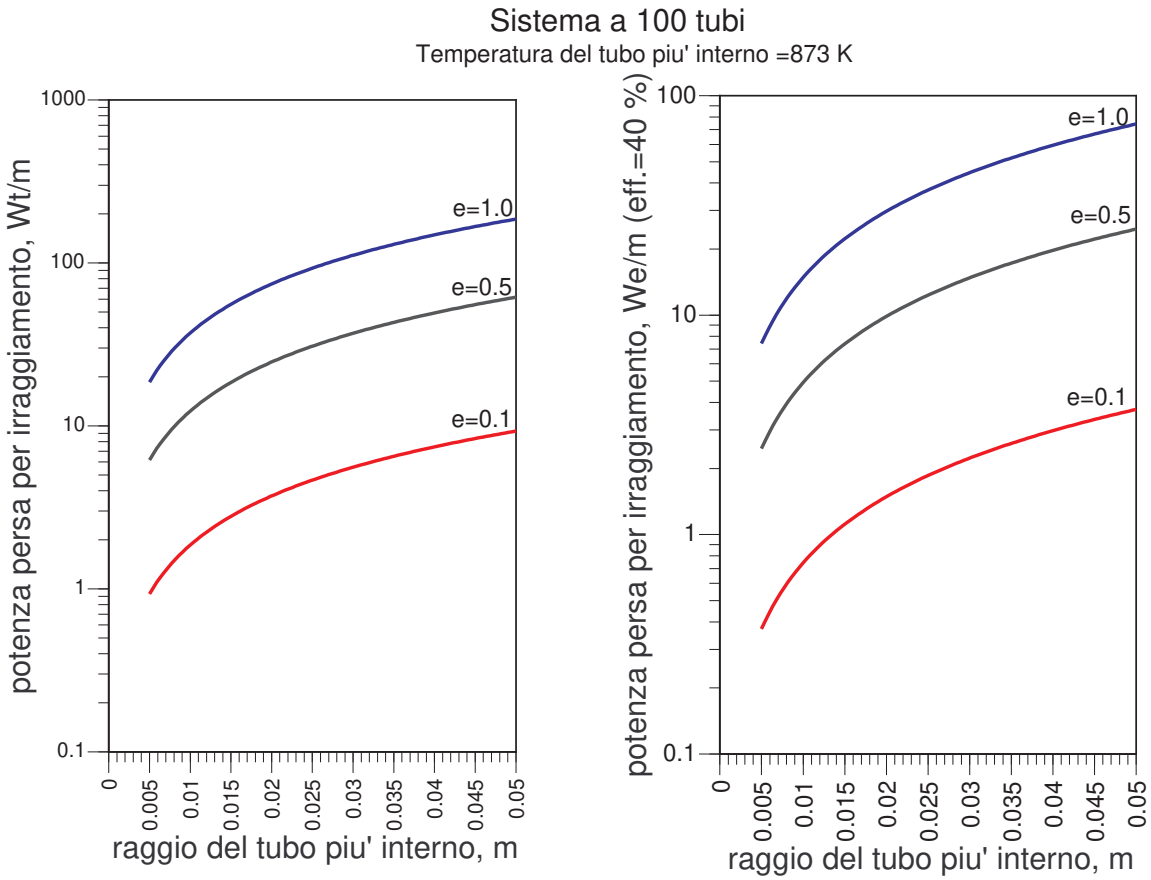

Figura 6: *potenza persa per irraggiamento, per tre diversi valori di emissivita', in funzione del raggio del tubo piu' interno in un sistema costituito da 100 tubi concentrici, dei quali quello piu' interno ha una temperatura di 873 K e quello piu' esterno di 300 K. A sinistra la potenza e' espressa in Watt termici/m, mentre a destra in Watt elettrici/m, assumendo un'efficienza di conversione termico-elettrico del 25 %.*

Le figure 3-destra e 6-destra sono riunite in un'unico grafico in figura 7.

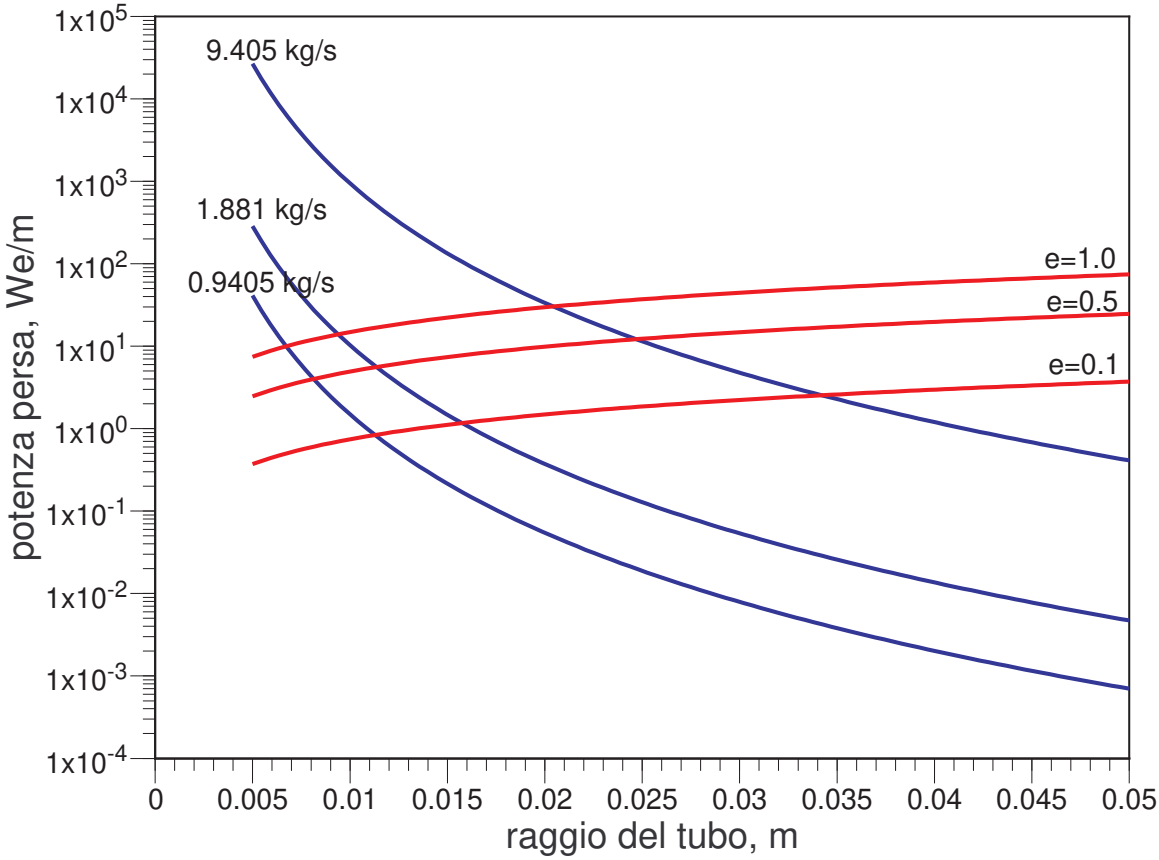

Figura 7: *Confronto tra la potenza persa per irraggiamento di un sistema a 100 tubi (linee rosse) e quella persa per frizione (linee blu) in We/m, in funzione del raggio del tubo. La temperatura del tubo piu' interno e' di 873 K.*

E' utile riunire le figure 3-destra, 5-destra e 7-destra in un unico grafico e vedere come varia il raggio ottimale in funzione della diminuzione delle perdite di energia per irraggiamento (vedi figura 8).

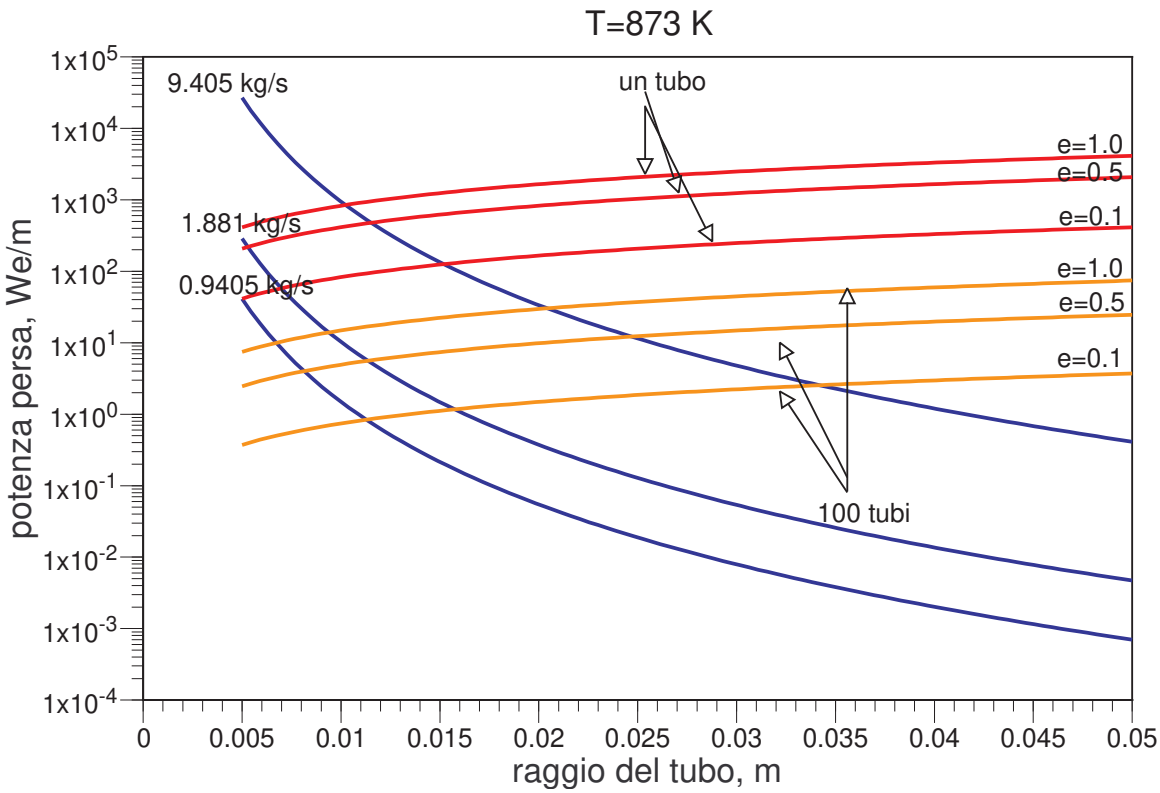

Figura 8: *Confronto tra la potenza persa per irraggiamento (linee rosse, nel caso di un singolo tubo e linee arancioni , nel caso di un sistema costituito da 100 tubi) e quella persa per frizione (linee blu) in We/m, in funzione del raggio del tubo.*

Questi risultati hanno un significato puramente qualitativo, e, affinche' questo possa essere anche quantitativo, devono essere valutate con maggior considerazione un certo numero di variabili tra le quali la portata del fluido che si vuole effettivamente realizzare, e quindi, il tipo di pompe utilizzabili con relativa efficienza, le proprieta' ottiche dei materiali usati per i tubi, e l'efficienza nella conversione dell'energia termica in energia elettrica.

Referenze:

[1] D.A. Nissen and R.W. Carling, "*Viscous Flow and Structure in Alkali Metal Nitrates*", Sandia report, SAND82-8669, April, 1982.
[2] Handbook of Chemistry and Physics, ed. D.R.Lide, 79th edition 1998-1999.