
Scambiatori di Calore

Temperatura media logaritmica

Corso di Generatori di Vapore

Scambiatori

Con il nome di scambiatori di calore sono indicate le apparecchiature nelle quali il calore è trasferito da un fluido "caldo", ovvero a temperatura più alta, ad un fluido "freddo", ovvero a temperatura più bassa. Nella maggior parte delle applicazioni sono utilizzati scambiatori "a superficie" nei quali i due fluidi sono separati da una sottile parete metallica. In tali scambiatori, nell'ipotesi di regime stazionario, il flusso termico incontra almeno tre resistenze in serie : una convettiva tra fluido caldo e parete, una conduttiva della parete e un'altra convettiva tra parete e fluido freddo. Schematizziamo per semplicità il principio di funzionamento degli scambiatori nel seguente modo:

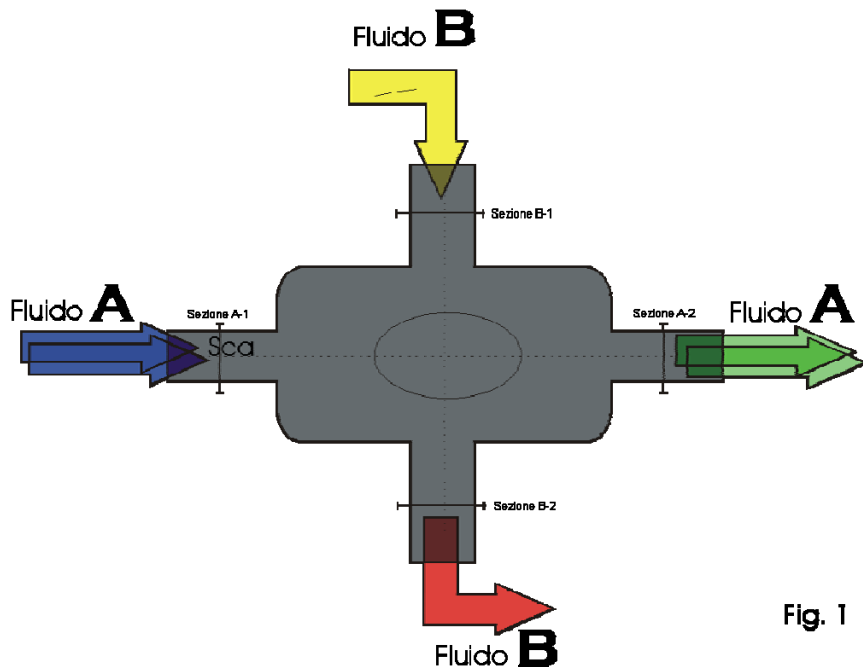
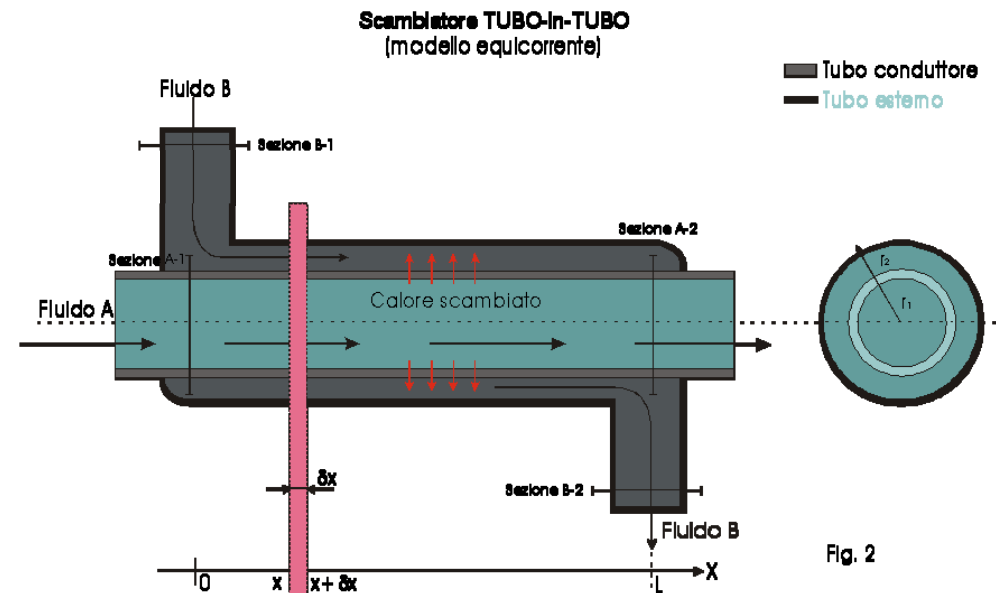


Fig. 1

Scambiatori

SCAMBIATORI DEL TIPO TUBO IN TUBO: CASO EQUICORRENTE.

Tale tipo di scambiatore di calore è formato da due tubi concentrici, in cui passano due fluidi a temperature diverse. Il tubo più interno è costituito da materiali ad alta conducibilità termica, che consentono lo scambio più alto possibile di calore tra i due fluidi. Per ragioni di ingombro, gli scambiatori a tubi concentrici non possono avere superfici di scambio superiori a qualche metro quadrato: da qui la loro limitatezza di impiego alla fascia più bassa dei flussi termici da scambiare. Il tubo più interno è solitamente fabbricato con materiali ad alta conducibilità termica al fine di permettere il maggior scambio di calore tra i due fluidi. In campo industriale il materiale più impiegato per questo uso è senza dubbio l'acciaio che offre un'alta resistenza all'usura; esso implica inoltre dei procedimenti di pulizia molto elementari della parete interna del tubo. Per quanto riguarda il tubo esterno vengono utilizzati materiali a bassa conducibilità termica per avere una minore dispersione di calore.



Scambiatori

1. Scambio termico: per il dimensionamento delle superfici di scambio si può scrivere

$$Q = \frac{\Delta t}{R_{tot}}$$

dove con ΔT viene indicata la differenza di temperatura tra i due fluidi e con R_{TOT} la resistenza termica complessiva dello scambiatore.

2. Calcolo energetico: sfruttando il primo principio della termodinamica

3.

$$Q = M_B C_{PB} (T_{B2} - T_{B1})$$

$$Q = M_A C_{PA} (T_{A2} - T_{A1})$$

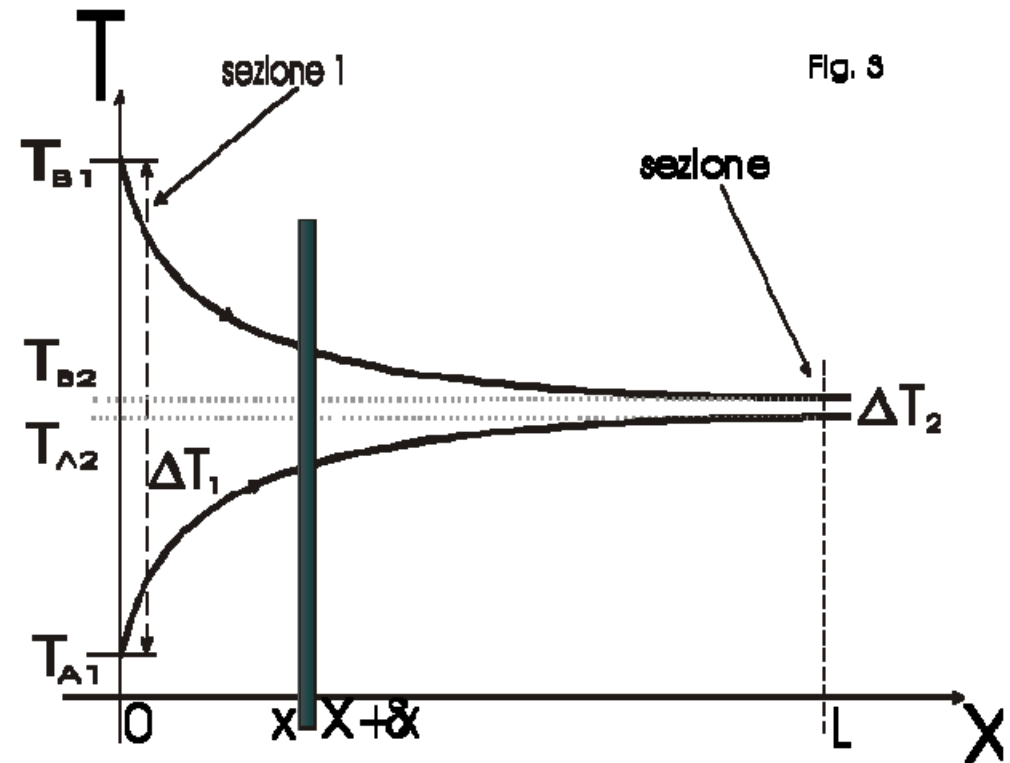
M rappresenta la portata dei due fluidi, 1 e 2 le sezioni, rispettivamente, di ingresso e di uscita dei due fluidi stessi.

Scambiatori

M rappresenta la portata dei due fluidi, 1 e 2 le sezioni, rispettivamente, di ingresso e di uscita dei due fluidi stessi. Considerando la pressione praticamente costante, ovvero liquidi incomprimibili, le due relazioni sono motivate dal fatto che la potenza termica può essere interpretata in due modi equivalenti, uno riferito al fluido A e che si sta riscaldando, e uno riferito al fluido di servizio B che si sta raffreddando.

Il calcolo energetico è dato semplicemente dal bilancio dell'entalpia (tanto calore cede un fluido, tanto l'altro ne riceve), lo scambio termico invece è più articolato: ciò è dovuto al fatto che si devono calcolare le resistenze termiche, i coefficienti di convezione e il funzionamento delle superfici di scambio. Dal punto di vista termico, quindi, sono presenti due problemi da risolvere: la determinazione della ΔT e della RTOT.

Consideriamo uno scambiatore in equicorrente, in cui il fluido A è a temperatura di ingresso più bassa del fluido B, e analizziamo il tratto di lunghezza L, tra la sezione A1 e A2, come mostrato in fig. 2. Si otterrà un grafico che esprime la temperatura in funzione della distanza dall'ingresso del sistema;



Scambiatori

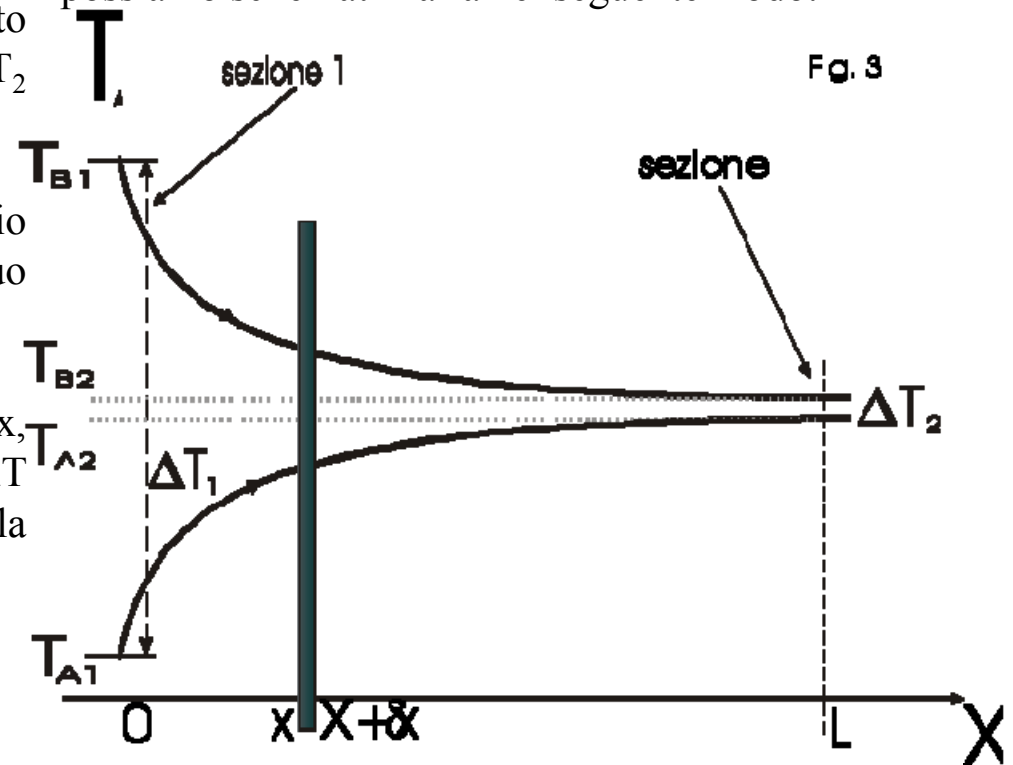
In esso viene visualizzato un ΔT che varia evidenziando così un flusso termico variabile in maniera non lineare: in prossimità della sezione 1, siamo in presenza di un $\Delta T = \Delta T_1$ elevato da cui si può dedurre che il flusso termico tra A e B sarà piuttosto elevato, mentre nelle vicinanze della sezione 2 dove il $\Delta T = \Delta T_2$ è molto basso, il flusso termico sarà prossimo allo zero.

Viste la capacità di variare di ΔT , siamo obbligati, nello studio della potenza scambiata, a considerare in realtà un (il suo valore medio), e di conseguenza un medio.

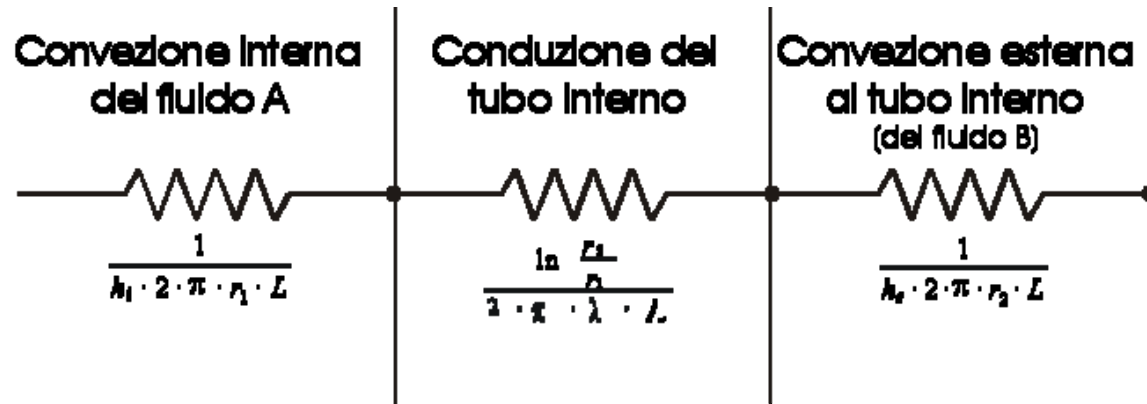
Consideriamo uno "scambiatore" infinitesimo di lunghezza δx , all'interno del quale possiamo ritenere l'andamento di ΔT praticamente lineare. Ottengo quindi una relazione, alla coordinata x :

$$\delta \dot{Q} = \frac{T_B(x) - T_A(x)}{R_{TOT}}$$

dove R_{TOT} rappresenta la resistenza termica dello scambiatore infinitesimo: per una maggiore chiarezza possiamo schematizzarla nel seguente modo:



Scambiatori



Abbiamo che

λ è la *conducibilità termica* del materiale con il quale è costruito il tubo interno,

h_i è il coefficiente di convezione interno,

h_e è il coefficiente di convezione esterno,

L è la lunghezza dello scambiatore considerato, in questo caso δx .

La resistenza totale R_{Tot} è la somma dei tre termini (poiché la lunghezza dello scambiatore è infinitesima, si ottiene rapidamente che la resistenza termica risulta infinita).

Definiamo ora il *coefficiente globale di scambio* K in relazione alla superficie di scambio S come:

$$R_{TOT} = \frac{1}{KS} ; \quad \dot{Q} = KS\Delta T ; \quad \delta\dot{Q} = K2\pi r_1 \alpha [T_B - T_A]$$

ovvero il $\delta\dot{Q}$ (che è un infinitesimo: compare infatti il δx a numeratore) in funzione di $[T_B - T_A]$.

Scambiatori

Osserviamo ora che il δQ può essere anche espresso attraverso le relazioni energetiche date dalle formule (2) e (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta \dot{Q} = \dot{M}_B C_{PB} \delta(T_B) \\ \delta \dot{Q} = \dot{M}_A C_{PA} \delta(T_A) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \delta(T_B) = \frac{\delta \dot{Q}}{\dot{M}_B C_{PB}} \\ \delta(T_A) = \frac{\delta \dot{Q}}{\dot{M}_A C_{PA}} \end{array} \quad \delta(T_A) - \delta(T_B) = \delta \dot{Q} \left(\frac{1}{\dot{M}_A C_{PA}} - \frac{1}{\dot{M}_B C_{PB}} \right)$$

o anche facendo la differenza tra le due equazioni: $\delta(T_A) - \delta(T_B)$ e per le proprietà della derivata: $\delta(T_A - T_B)$ in cui compare ancora il termine $[T_B - T_A]$.

$$\delta(T_A - T_B) = -\delta \dot{Q} \left(\frac{1}{\dot{M}_A C_{PA}} - \frac{1}{\dot{M}_B C_{PB}} \right)$$

Sostituendo nell'equazione (8), la relazione (12) ottenuta, si ha:
ovvero un'equazione differenziale a variabili separabili:

$$\delta(T_B - T_A) = K 2\pi r_1 \delta x (T_B - T_A)$$

$$\frac{\delta(T_B - T_A)}{(T_B - T_A)} = -K 2\pi r_1 \delta x \left(\frac{1}{\dot{M}_A C_{PA}} + \frac{1}{\dot{M}_B C_{PB}} \right)$$

Scambiatori

Integrando il primo membro tra la *sezione 1* e la *sezione 2*, e il secondo membro su tutta la lunghezza dello scambiatore, tra 0 ed L , otteniamo:

$$\ln \frac{(T_{Bi} - T_{Ai})}{(T_{Bf} - T_{Af})} = -K2\pi r_1 \delta x L \left(\frac{1}{\dot{M}_A C_{PA}} + \frac{1}{\dot{M}_B C_{PB}} \right); \quad \dot{Q} = KS \overline{\Delta T}$$

Poiché però si vuole arrivare ad un'espressione del tipo:

ricaviamo il termine KS da

$$\ln \frac{(T_{B2} - T_{A2})}{(T_{B1} - T_{A1})} = -K2\pi r_1 \delta x L \left(\frac{1}{\dot{M}_A C_{PA}} + \frac{1}{\dot{M}_B C_{PB}} \right)$$

$$KS = - \frac{\ln \frac{(T_{B2} - T_{A2})}{(T_{B1} - T_{A1})}}{\frac{1}{\dot{M}_A C_{PA}} + \frac{1}{\dot{M}_B C_{PB}}} \left\{ \begin{array}{l} \dot{Q} = \dot{M}_B \cdot C_{PB} \cdot (T_{B2} - T_{B1}) \\ \dot{Q} = \dot{M}_A \cdot C_{PA} \cdot (T_{A2} - T_{A1}) \end{array} \right\} \frac{1}{\dot{M}_B C_{PB}} = \frac{(T_{B2} - T_{B1})}{\dot{Q}} \quad KS = - \frac{\left[\ln \frac{(T_{B2} - T_{A2})}{(T_{B1} - T_{A1})} \right] \dot{Q}}{(T_{B1} - T_{A1}) + (T_{B2} - T_{A2})}$$

Scambiatori

Sostituendo in $\dot{Q} = KS\overline{\Delta T}$; Si ottiene
$$\dot{Q} = \dot{Q} \overline{\Delta T} \frac{\ln \frac{(T_{B2} - T_{A2})}{(T_{B1} - T_{A1})}}{(T_{B1} - T_{A1}) + (T_{B2} - T_{A2})}$$

ovvero l'espressione che cercavamo per il $\overline{\Delta T}$ che sarà quindi un $\overline{\Delta T}$ medio logaritmico:

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

in cui i vari $\overline{\Delta T}_n$ rappresentano le differenze di temperatura tra i due fluidi, all'entrata e all'uscita del sistema.

SCAMBIATORI DEL TIPO TUBO IN TUBO: CASO CONTROCORRENTE

Scambiatore TUBO-in-TUBO
(modello controcorrente)

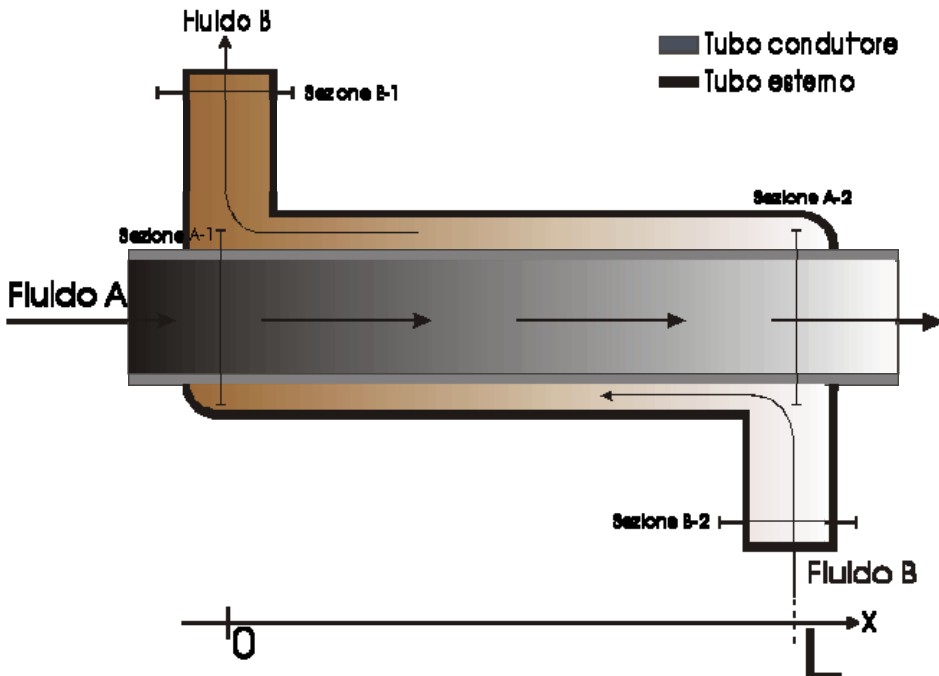


Fig. 4

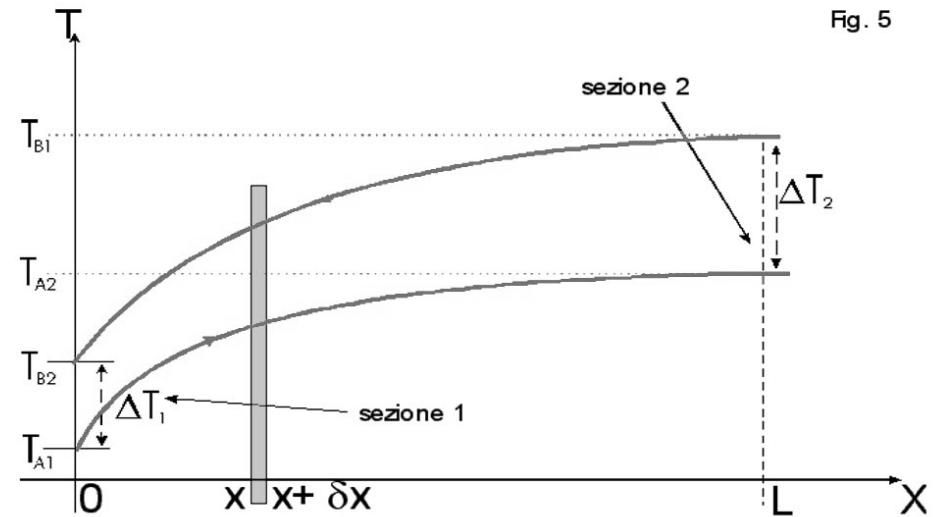


Fig. 5