

Gli scambiatori di calore

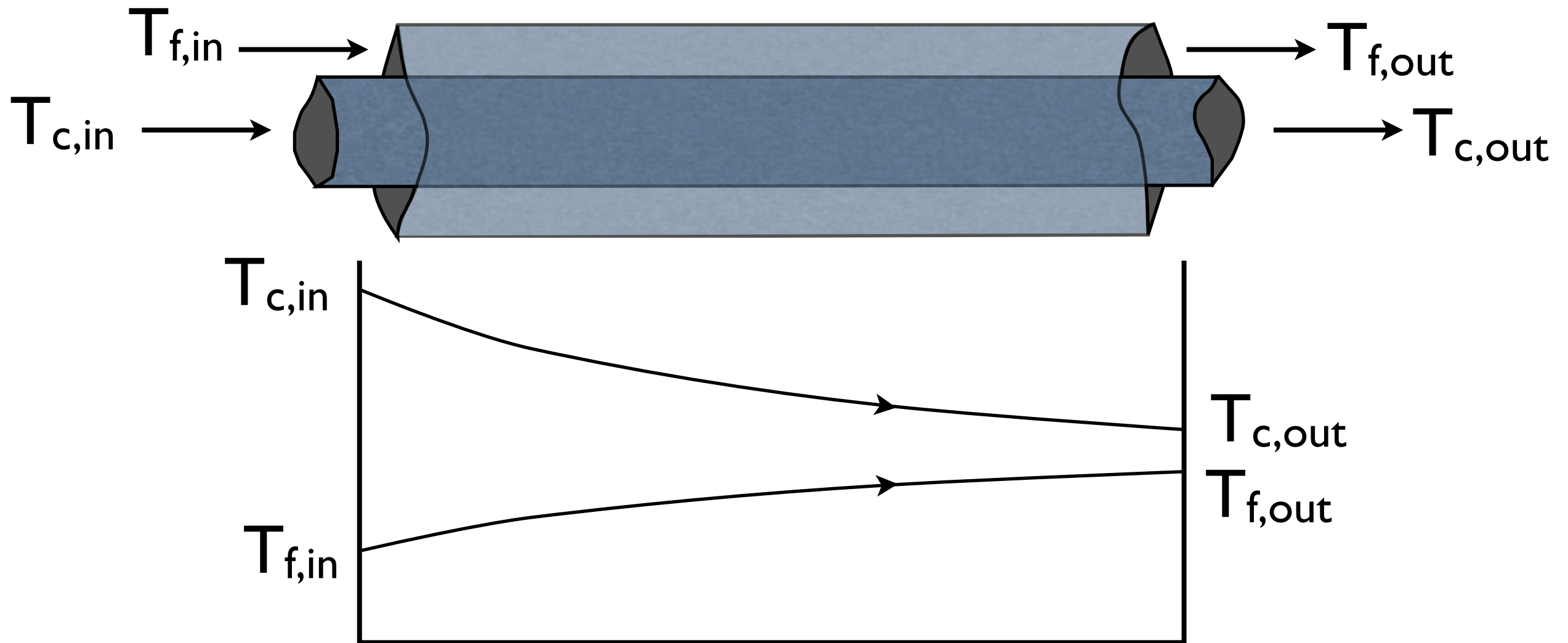
Principi di Ingegneria Chimica Ambientale

Gli scambiatori di calore

Gli scambiatori di calore sono apparecchiature che facilitano lo scambio di calore tra due fluidi a temperatura differente. Il calore viene scambiato per convezione in entrambi i fluidi e per conduzione attraverso il mezzo di separazione tra di essi.

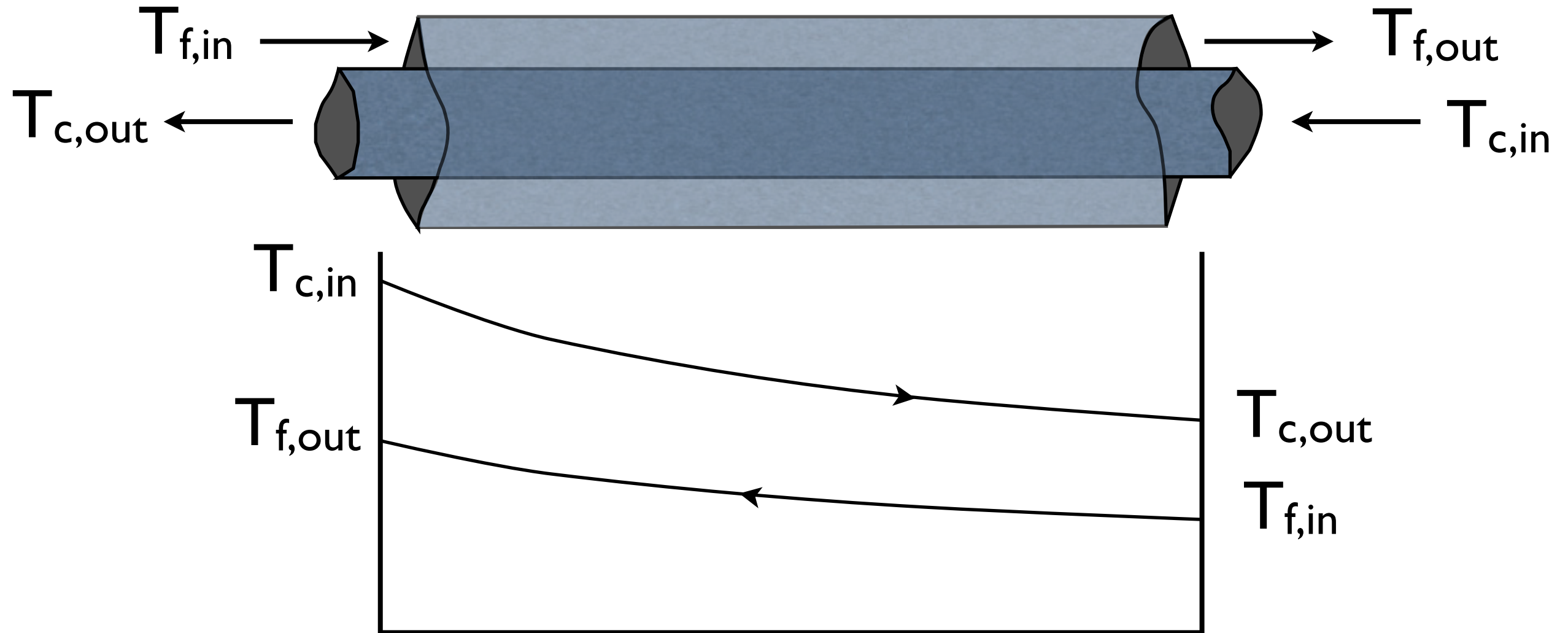
Lo scambiatore più semplice, detto **a doppio tubo**, consiste in due tubi di calore concentrici di diametri differenti: un fluido scorre nel tubo di diametro inferiore e l'altro nel condotto anulare tra le due tubazioni. Sono possibili due differenti tipi di flusso: **l'equicorrente**, quando i fluidi percorrono lo scambiatore nello stesso verso entrando dallo stesso lato; il **controcorrente**, quando i fluidi percorrono lo scambiatore in direzioni opposte entrando da lati opposti.

Lo scambiatore in equicorrente



Nello scambiatore in equicorrente i due fluidi scorrono nello stesso senso. Nell'attraversare lo scambiatore le temperature dei due fluidi si avvicinano sempre più. Lo scambio termico è massimo all'ingresso e poi diminuisce verso l'uscita. La temperatura del fluido freddo all'uscita può al massimo eguagliare la temperatura del fluido caldo all'uscita, e non si avvicina mai a quella del fluido caldo all'ingresso.

Lo scambiatore in controcorrente



Nello scambiatore in controcorrente i due fluidi scorrono in senso opposto. Nell'attraversare lo scambiatore le temperature dei due fluidi si mantengono pressochè alla stessa distanza. Lo scambio termico è pertanto abbastanza omogeneo lungo lo scambiatore. La temperatura del fluido freddo all'uscita può superare la temperatura del fluido caldo all'uscita, ed avvicinarsi a quella del fluido caldo all'ingresso.

I bilanci sullo scambiatore

Bilancio sul fluido caldo:

La quantità di calore ceduta dal fluido caldo (che si raffredda) si ricava dal bilancio di energia a regime:

$$\dot{Q}_c = w_c C_{p_c} (T_{cin} - T_{cout})$$

in cui

- \dot{Q}_c è una quantità positiva (in Watt)
- w_c è la portata massica del fluido caldo
- C_{p_c} è il C_p medio (entalpico) del fluido caldo (nella pratica si sostituisce con il C_p alla temperatura media fra l'entrata e l'uscita)

I bilanci sullo scambiatore

Bilancio sul fluido freddo:

La quantità di calore assorbita dal fluido freddo (che si riscalda) si ricava dal bilancio di energia a regime:

$$\dot{Q}_f = w_f C_{pf} (T_{fout} - T_{fin})$$

in cui

- \dot{Q}_f è una quantità positiva (in Watt)
- w_f è la portata massica del fluido freddo
- C_{pf} è il C_p medio (entalpico) del fluido caldo (nella pratica si sostituisce con il C_p alla temperatura media fra l'entrata e l'uscita)

I bilanci sullo scambiatore

a regime, in assenza di perdite di calore verso l'esterno, il calore ceduto dal fluido caldo viene assorbito dal fluido freddo:

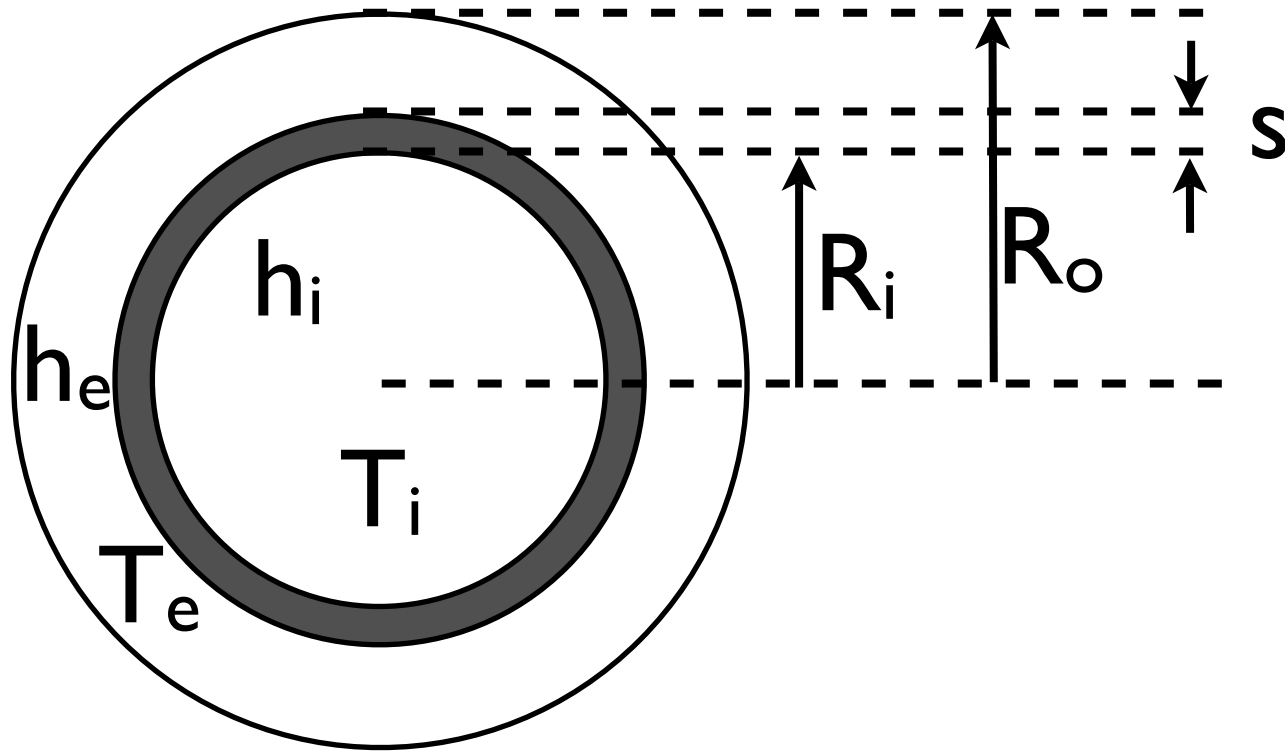
$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_f$$

e quindi

$$w_c C_{p_c} (T_{cin} - T_{cout}) = w_f C_{p_f} (T_{fout} - T_{fin})$$

questa equazione ci consente di calcolare, ad esempio, il salto termico di uno dei due fluidi essendo note tutte le altre variabili, oppure la portata necessaria per effettuare una determinata operazione

I bilanci sullo scambiatore



In ogni sezione dello scambiatore, i fluidi scambiano calore a causa della differenza di temperatura.

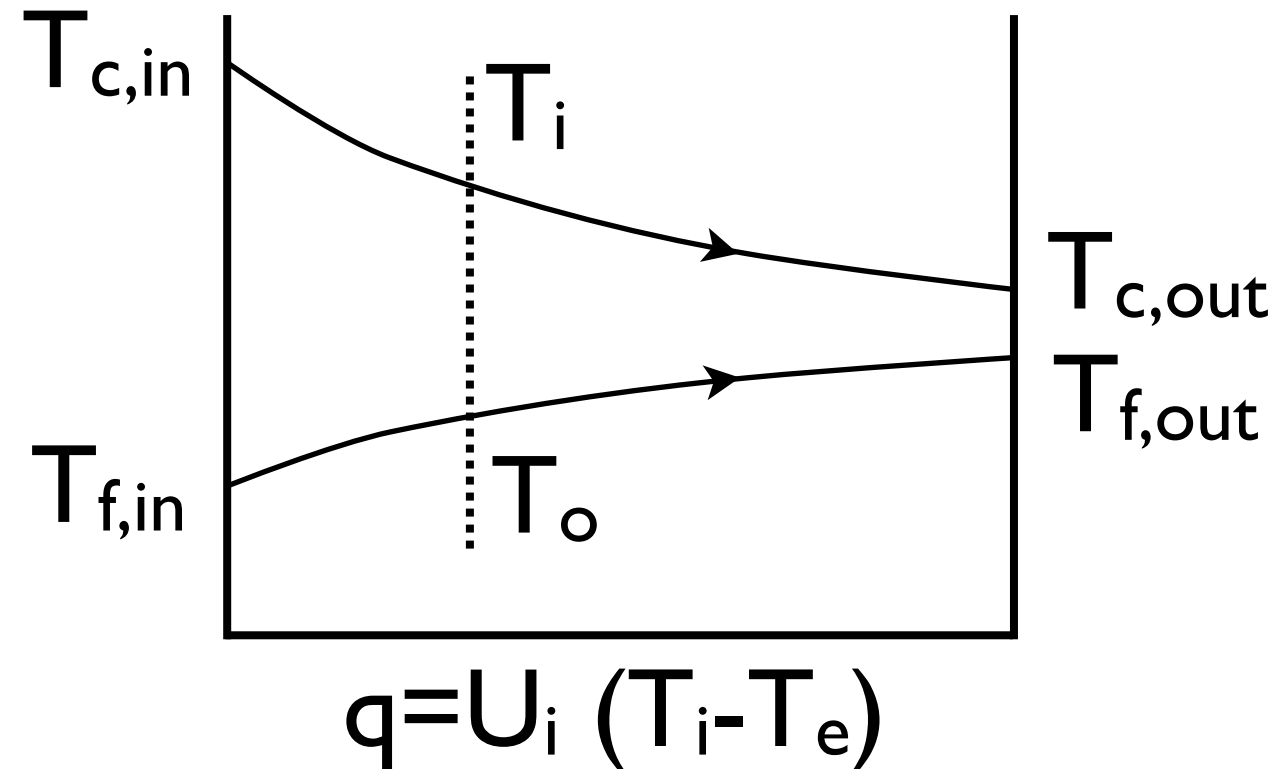
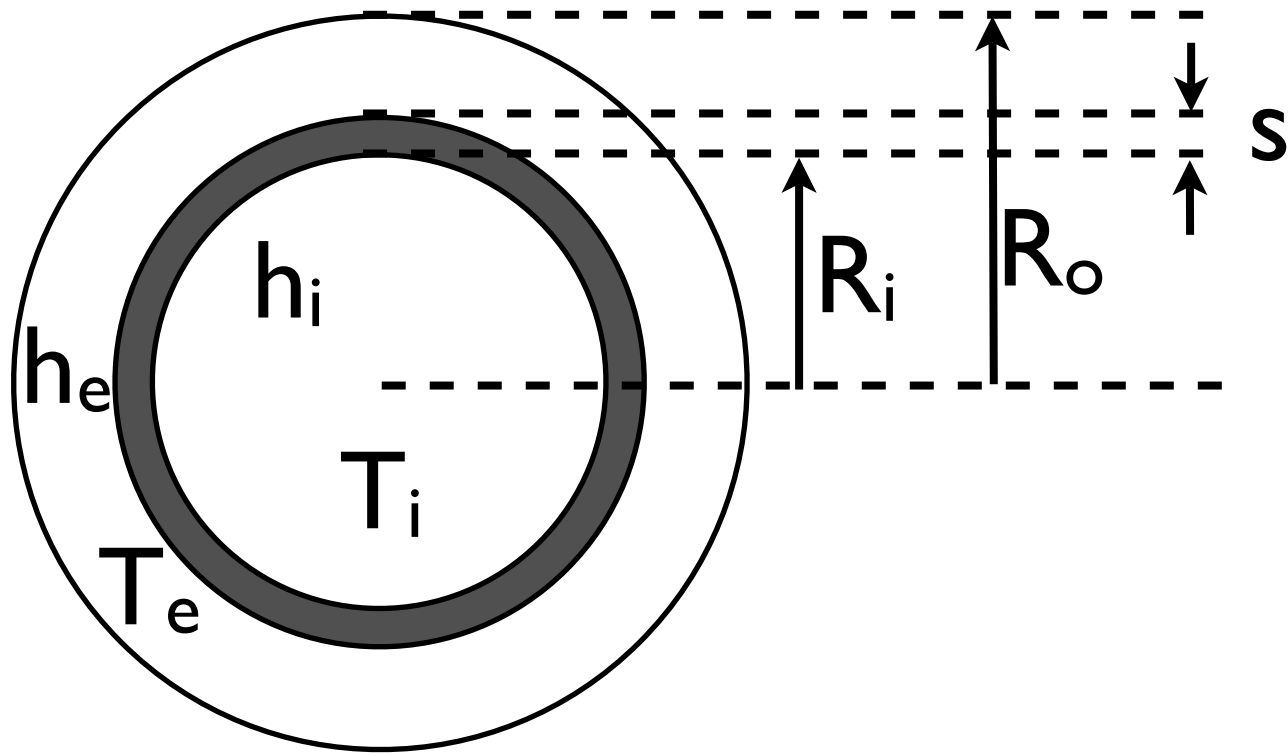
Questo flusso termico, positivo in direzione radiale, si può scrivere

$$q = U_i (T_i - T_e)$$

con U_i coefficiente complessivo di scambio termico radiale riferito al raggio interno:

$$U_i = \frac{1}{R_i} \left(\frac{1}{R_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{R_i + s}{R_i}\right)}{k} + \frac{1}{(R_i + s) h_e} \right)^{-1}$$

I bilanci sullo scambiatore

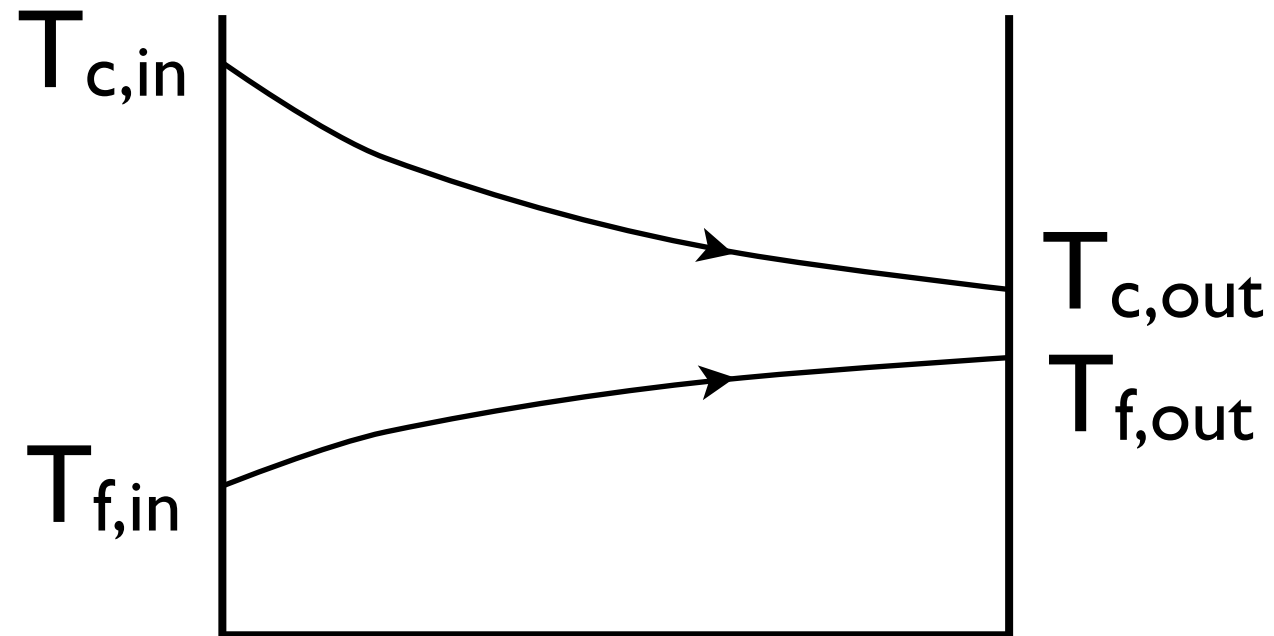


La quantità di calore totale scambiata (\dot{Q}) è l'integrale di q lungo tutto lo scambiatore

Questo integrale fornisce: $\dot{Q} = \bar{U}_i 2\pi R_i L \Delta T_{ml}$

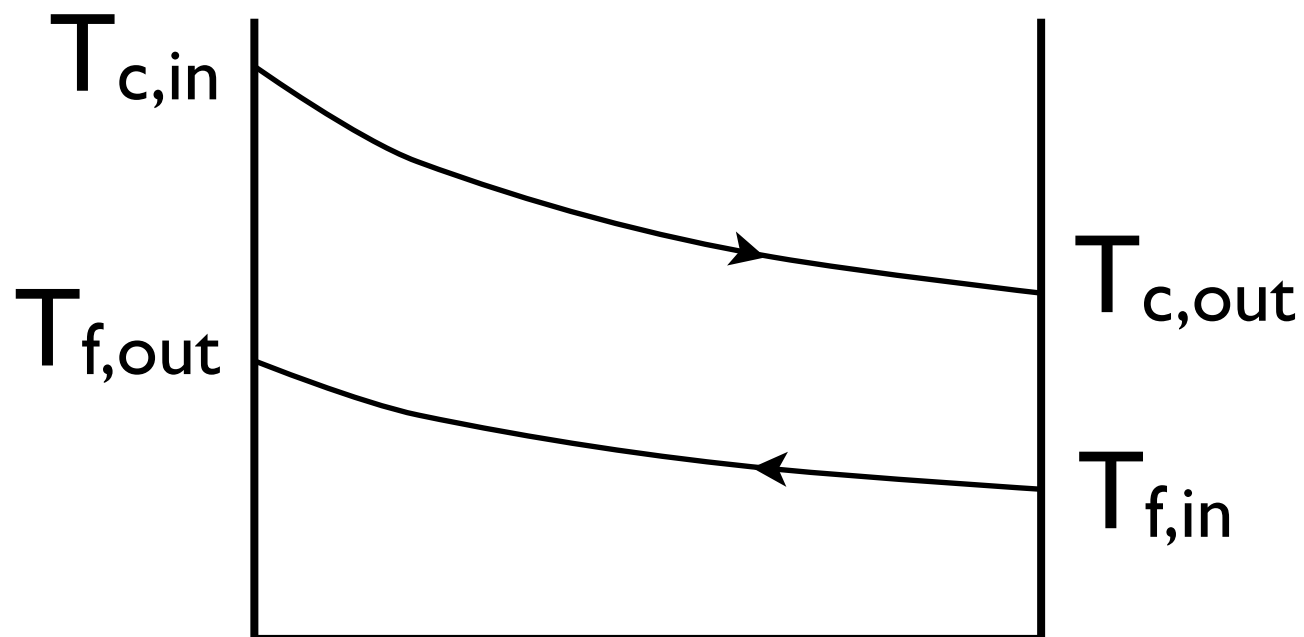
ΔT_{ml} è la differenza di temperatura media logaritmica fra le due sezioni estreme dello scambiatore

La differenza di temperatura media logaritmica



in equicorrente

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{c,in} - T_{f,in}) - (T_{c,out} - T_{f,out})}{\ln\left(\frac{T_{c,in} - T_{f,in}}{T_{c,out} - T_{f,out}}\right)}$$



in controcorrente

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{c,in} - T_{f,out}) - (T_{c,out} - T_{f,in})}{\ln\left(\frac{T_{c,in} - T_{f,out}}{T_{c,out} - T_{f,in}}\right)}$$

I bilanci sullo scambiatore

$$\bar{U}_i = \frac{1}{R_i} \left(\frac{1}{R_i h_{i,ml}} + \frac{\ln\left(\frac{R_i+s}{R_i}\right)}{k} + \frac{1}{(R_i+s)h_{e,ml}} \right)^{-1}$$

k è la conducibilità del solido di cui è fatto il condotto interno

$h_{i,ml}$ è calcolato dalle relazioni $Nu=f(Re,Pr)$ con le proprietà fisiche valutate alla temperatura media fra ingresso e uscita del fluido che scorre all'interno

$h_{e,ml}$ è calcolato con lo stesso procedimento, ma come lunghezza caratteristica si usa il **diametro idraulico D_h**

$$D_h = \frac{4A}{P_b} = 2(R_o - R_i - s)$$

$$A = \text{area di passaggio} = \pi [R_o^2 - (R_i + s)^2]$$
$$P_b = \text{perimetro bagnato} = 2\pi (R_o + (R_i + s))$$

I bilanci sullo scambiatore

in definitiva, sullo scambiatore possiamo scrivere tre equazioni:

$$\dot{Q} = w_f C_{pf} (T_{fout} - T_{fin})$$

$$\dot{Q} = w_c C_{pc} (T_{cfin} - T_{cout})$$

$$\dot{Q} = U_i 2\pi R_i L \Delta T_{ml}$$

l'ultima delle quali ci permette, ad esempio, di calcolare la lunghezza L di uno scambiatore necessaria per effettuare una determinata operazione