



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
INDUSTRIALE**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA
CHIMICA E DEI MATERIALI**

**ELABORATO DI LAUREA
TRIENNALE**

**Codice di calcolo in formato Google
Sheets per il dimensionamento di
scambiatori di calore a fascio tubiero**

*A calculation code in Google Sheets format for sizing
shell and tube heat exchangers*

Relatore:

Prof. Massimiliano Barolo

Laureando:

Flavio De Giorgio

Matricola:

2049453

Anno Accademico 2023/2024

Sommario

Introduzione	3
Capitolo 1 - Foglio 1 - Dichiarazione dei dati	4
1.1 Dichiarazioni di processo	4
1.2 Dichiarazioni geometriche	6
Capitolo 2 - Foglio 2 - Dimensionamento 1/1-1/2n.....	8
2.1 Bilancio termico e portata mancante.....	8
2.2 Fase di scelta dei passaggi interni	9
2.2.1 Scambiatore 1/1	9
2.2.2 Scambiatore 1/2n	10
2.2.3 Scelta passaggi interni.....	11
2.3 Verifiche fluido interno.....	12
2.3.1 Verifica termica fluido interno.....	12
2.3.2 Verifica idraulica fluido interno.....	15
2.4 Verifiche fluido esterno.....	15
2.4.1 Calcolo dati geometrici del fasciame.....	15
2.4.1 Calcolo dei diaframmi.....	16
2.4.2 Verifica termica fluido esterno	17
2.4.3 Verifica idraulica fluido esterno	18
2.5 Calcolo finale di <i>U_{eff}</i> e configurazione suggerita	19
2.5.1 Configurazione suggerita	20
Capitolo 3 - Considerazioni finali sui risultati e conclusione	21
3.1 Limitazioni e possibili sviluppi futuri	21
Riferimenti bibliografici	22

Introduzione

Lo scopo del codice è quello di fornire la configurazione di uno scambiatore a fascio tubiero 1/1 o 1/2n dati in input dei dati geometrici e di processo. Complessivamente il programma è diviso in fogli (*Figura 0.*), di dichiarazione dei dati e di calcolo, a loro volta queste sono organizzate internamente in zone. Il programma è accessibile tramite condivisione sul proprio *Drive Google*, solo da un utente proprietario che decide di condividerlo, da lì sarà possibile scaricarlo e ottenere una versione personale, da aprire rigorosamente con *Google Sheets*. In particolare quindi, nell'elaborato si dedicherà un capitolo per ognuno dei fogli di calcolo:

1. Foglio 1 - Dichiarazione dei dati
2. Foglio 2 - Dimensionamento 1/1-1/2n

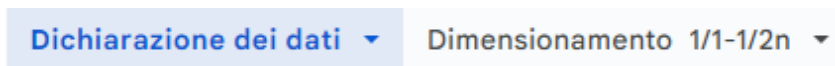


Figura 0. Impaginazione del programma in basso a sinistra del documento *Google*, grazie a questo menu si è in grado di passare da un foglio all'altro del programma.

Nel primo foglio “Dichiarazione dei dati” avverrà la scelta da parte dell'utente delle principali variabili geometriche e la dichiarazione delle variabili di processo. Infondo alla pagina verrà poi esposta, una volta svolte tali dichiarazioni, la configurazione suggerita dall'algoritmo.

Nel secondo foglio invece, avvengono i calcoli effettivi dei risultati per il dimensionamento. Tali cifre vengono sottoposte a verifiche di validità; in questo modo, nel caso in cui la configurazione scelta non riuscisse a dare il risultato sperato si potrà tornare a tale pagina per capire quale sia la variabile problematica, isolando il problema e trovando una soluzione.

Oltre alla parte prettamente di calcolo basilare che *Google Sheets* fornisce, sono state usate delle macro (algoritmi di codice in *java-script*) al fine di far svolgere al programma calcoli complessi e iterativi che saranno visualizzati in seguito.

Capitolo 1

Foglio 1 - Dichiarazione dei dati

All'interno del foglio vengono inizialmente dichiarate le variabili utilizzate nei calcoli.

Queste si dividono in due categorie:

- Dichiarazioni di processo
- Dichiarazioni geometriche

La logica da utilizzare è quella di inserire un “-“ nella casella “Usa valore personalizzato”, in questo modo il programma capirà automaticamente di utilizzare il valore preimpostato selezionato. Nel caso invece si volesse utilizzare un valore non preimpostato basterà sostituire il “-“ con un valore a scelta dell'utente.

1.1 Dichiarazioni di processo

Le dichiarazioni di processo si possono facilmente inserire nel riquadro verde, all'interno si nota inoltre una spunta, che servirà in seguito; appositamente piazzata per definire l'allocazione dei fluidi.

DATI INIZIALI				
Fluido 1	Lato tubi	inverti allocazione	Fluido 2	Lato fasciame
Portata [kg / h]	-	<input type="checkbox"/>	Portata [kg / h]	160000.00
t_1 [°C]	30.00		T_1 [°C]	116.00
t_2 [°C]	50.00		T_2 [°C]	66.00

Figura 1.1. Finestra di inserimento dati di temperature, portate e allocazione dei fluidi.

In tale didascalia l'utente dovrà inserire in primis le temperature operative del macchinario [°C] assieme alla relativa portata del fluido 2 [kg / h] (il sistema provvederà da solo, nel bilancio termico, a trovare la portata del fluido 1 necessaria). (Figura 1.1.)

Successivamente si dovranno inserire tutte le proprietà termofisiche operative dei due fluidi, necessarie al dimensionamento, Calore specifico c_p [kJ / (kg × K)], Conduttività k [W / (m × K)], Viscosità μ [cP], Densità ρ [kg / m³], Resistenze dovute allo sporco fluido [m² × K / W]. (Figura 1.2.)

Proprietà termofisiche	Fluido 1	Fluido 2
Calore specifico c_p [kJ / (kg*K)]	4.19	2.30
Conduttività k [W / (m*K)]	0.64	0.14
Viscosità μ [cP]	0.72	0.68
Correzione del numero di Nusselt dovuta alla variazione di viscosità?		
LEGGE fluido 1 $\mu =$ -		
LEGGE fluido 2 $\mu =$ 0.03388 * EXP(1092 / x)		
Densità ρ [kg / m ³]	990.00	800.00
Resistenza allo sporcamento fluido [m ² *K / W]	River water ▼	Light hydrocarbons ▼
Valore personalizzato delle singole resistenze [m ² *K / W]	-	-
Valore personalizzato di resistenza globale [m ² *K / W]	0.0003	
U_d di progetto [W/(m ² *K)]	600	

Figura 1.2. Finestra di inserimento delle proprietà termofisiche dei fluidi e di progetto, resistenze dovute allo sporcamento .

In questa fase, dovremmo inoltre inserire le leggi di correzione della viscosità (se presenti) da applicare alla formula del numero di Nusselt, il programma tradurrà automaticamente la stringa di testo come formula, U_d di progetto [W/(m² × K)], le perdite di carico massime e le velocità ottimali per il lato tubi e per il lato fasciame. (Figura 1.3.)

Perdite di carico max accettate lato tubi [atm]	0.7	Perdite di carico max accettate lato fasciame [atm]	0.5
Velocità ottimale lato tubi [m/s]	1.5	Velocità ottimale lato fasciame [m/s]	0.5

Figura 1.3. Finestra di inserimento delle perdite di carico massime e delle velocità ottimali.

Per quanto riguarda le resistenze dovute allo sporcamento [m² × K / W] invece, l'utente può procedere in 3 modi:

1. Assegnare un “Valore personalizzato di resistenza globale [m² × K / W]”
2. Assegnare un “Valore personalizzato delle singole resistenze [m² × K / W]”
3. Assegnare una “Resistenza dovuta allo sporcamento del fluido [m² × K / W]” già preimpostata dall'elenco (Figura 1.4.) . Tale elenco fa riferimento al [Towler, G. and R. Sinnott (2022). *Chemical Engineering Design – Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford (U.K.), p.829, Tab.19.2 colonna “Resistance”]

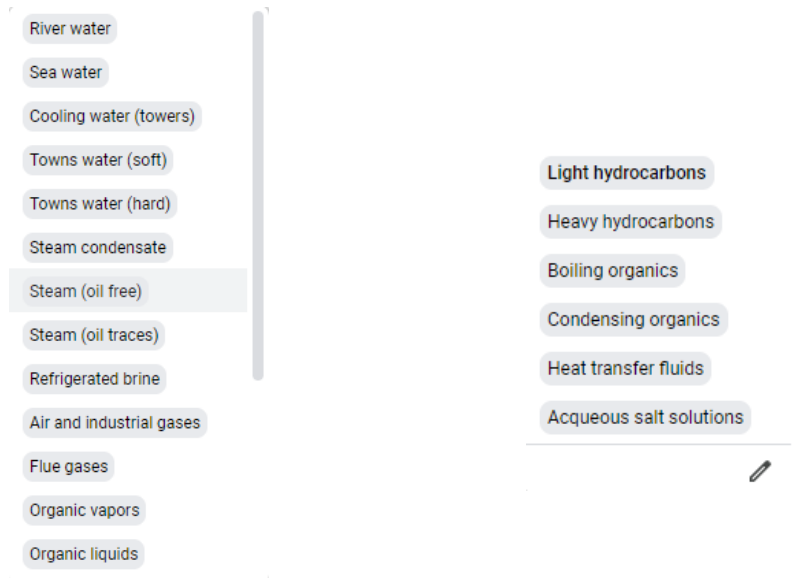


Figura 1.4. Menu a tendina per selezionare una delle resistenze dovute allo sporcamento preimpostate.

1.2 Dichiarazioni geometriche

Le dichiarazioni geometriche sono di competenza del riquadro giallo sulla destra. (Figura 1.5.)

Dichiarazioni geometriche	
Testata:	Split-ring floating head ▼
lunghezza [m]	4.88 ▼
Usa valore personalizzato[m]	-
Diametro esterno [m]	2.50E-02 ▼
Usa valore personalizzato[m]	2.33E-02
Spessore [m]	2.10E-03 ▼
Usa valore personalizzato[m]	-
Reticolo	Maglia quadrata ▼
Passo	1.25
Conduttività [W/(m*K)]	Acciaio al carbonio ▼

Figura 1.5. Zona di dichiarazione delle variabili geometriche caratterizzata dal colore giallo.

Parametri come: la testata, la lunghezza dei tubi, il diametro esterno, lo spessore, il reticolo, il passo, la conduttività vanno selezionate in questo riquadro specifico. In particolare all'utente sarà permesso di utilizzare sia valori preimpostati che valori personalizzati. In particolare valori preimpostati da scegliere nel caso non si volessero utilizzare personalizzati sono:

- Testata: *Pull-through floating head, Split-ring floating head, Outside packed head, Fixed and U-tube.*
- Lunghezza [m]: 1.88 , 2.44 , 3.66 , 4.88 , 6.10 , 7.32 .
- Diametro esterno e spessore [m]:

Outside Diameter	Wall Thickness [mm]
------------------	---------------------

[mm]					
16	1.2	1.7	2.1	-	-
19	-	1.7	2.1	2.8	-
25	-	1.7	2.1	2.8	3.4
32	-	-	2.1	2.8	3.4
50	-	-	2.1	2.8	3.4

[Towler-Sinnott - Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design - p.834 - Tab.19,3]

- Reticolo: maglia quadrata o maglia triangolare
- Passo: libera scelta dell'utente
- Conduttività $[W/(m*K)]$

Materiale	Conduttività $[W/(m*K)]$
Ferro	60
Acciaio al carbonio	45
Acciaio INOX	16
Vetro	0.84
Grafite	22
Monel	4.5

[Coulson and Richardson – volume 1B - pagina 11]

Nell'ultima parte del programma, sarà esposta la configurazione consigliata che riprenderà i risultati della pagina di dimensionamento. In particolare, saranno esposti in questa finestra il numero di passaggi interni, la testata selezionata, il numero di tubi, il diametro del fasciame, il numero dei diaframmi presenti e la loro distanza, le velocità effettiva e le perdite di carico, il coefficiente di cambio termico globale effettivo e la percentuale di sovradimensionamento.

Capitolo 2

Foglio 2 - Dimensionamento 1/1-1/2n

Nella pagina di dimensionamento per prima cosa i dati vengono riorganizzati e convertiti nelle unità di misura convenzionali utilizzate per i calcoli successivi. Per organizzazione si intende uno smistamento delle informazioni tra lato tubi e lato fasciame a seconda della spunta di assegnazione dei fluidi presente nella pagina di dichiarazione dei dati. (Figura 2.1.)

DATI INIZIALI			
Lato tubi - fluido 1		Lato fasciame - fluido 2	
Portata [kg / h]	219.570.41	Portata [kg / h]	160000.00
t_1 [°C]	30.00	T_1 [°C]	116.00
t_2 [°C]	50.00	T_2 [°C]	66.00
Velocità ottimale lato tubi [m/s]	1.5	Velocità ottimale lato fasciame [m/s]	0.5
ΔP_{max} accettate lato tubi [atm]	0.7	ΔP_{max} accettate lato fasciame [atm]	0.5
Proprietà termofisiche		Lato tubi - fluido 1	Lato fasciame - fluido 2
Calore specifico c_p [J / (kg*K)]		4190	2300
Conduttività k [W / (m*K)]		0.64	0.14
Viscosità μ [Pa*s]		7.20E-04	6.80E-04
LEGGE lato tubi $\mu = -$			
LEGGE lato fasciame $\mu = 0.03388 * EXP(1092 / x)$			
Densità ρ [kg / m³]		990	800
U_d di progetto [W / (m² *K)]		600	

Figura 2.1. Visualizzazione dei dati inseriti nel foglio 1 di dichiarazione e riorganizzati in base all'allocatione nel foglio 2.

Per quanto riguarda le dichiarazioni geometriche, queste vengono riportate nel riquadro sulla destra mantenendo la stessa logica di colore precedente. Viene inoltre calcolato il diametro interno. (Figura 2.2.)

Dichiarazione geometriche	
Materiale	Acciaio al carbonio
Tipologia	Split-ring floating head
Reticolo	Maglia quadrata
Lunghezza [m]	4.88
Diametro esterno [m]	2.33E-02
Diametro interno [m]	1.91E-02
Spessore [m]	2.10E-03
Passo [m]	0.029

Figura 2.2. Visualizzazione delle dichiarazioni geometriche calcolato il diametro interno.

2.1 Bilancio termico e portata mancante

Prima cosa, il programma esegue il bilancio termico del sistema, questo passaggio è

fondamentale sia per evidenziare la potenza termica scambiata (1.1), sia per trovare la portata mancante del fluido 1. (Figura 2.3.)

$$q = \frac{W_{fluido\ 2}}{3600} \times c_{p\ fluido\ 2} \times (T_1 - T_2) \quad (1.1)$$

$$q = q' \rightarrow W_{fluido\ 1} = \frac{q}{c_{p\ fluido\ 1} * (t_2 - t_1)} \times 3600$$

Bilancio termico	
Potenza termica [W]	5.11E+06
Portata lato mancante [kg / h]	219,570.41

Figura 2.3. Celle di bilancio termico e portata mancante.

2.2 Fase di scelta dei passaggi interni

Risolto il sistema del bilancio termico il programma si addentra nella zona viola, qui si esegue il dimensionamento della macchina provando le varie configurazioni disponibili. Per prima cosa si calcola il ΔT_{ml} (Figura 2.4.):

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \quad (1.2)$$

Dimensionamento	ΔT_{ml} [K]
	49.49

Figura 2.4. Calcolo preliminare di ΔT_{ml} per il dimensionamento .

2.2.1 Scambiatore 1/1

La prima configurazione che viene eseguita è quella dello scambiatore 1/1. Si suppone quindi una controcorrente perfetta, espressa tramite il fattore $F_t=1$. (Figura 2.5.)

$$\Delta T_m = \Delta T_{ml} \times F_t \quad (1.3)$$

Tale configurazione è da valutare partendo dal calcolo della superficie di scambio totale per lo scambio di calore.

scambiatore 1/1	Ft calcolato		Superficie scambio [m ²]	Velocità [m/s]
		1	0.138	0.448
	Economicamente svantaggioso			
ΔT_m	49.49			
Superficie [m ²]	172.11	NON ACCETTABILE	troppo grande per scambiatore 1/1 aumentare passaggi interni	
Numero di tubi	483			

Figura 2.5. Parte di codice dedicata al dimensionamento della configurazione 1/1.

$$q' = U_D \times \Delta T_m \times S \rightarrow S = \frac{q'}{U_D \times \Delta T_m} \quad (1.4)$$

Conoscendo la superficie totale di scambio termico sarà possibile calcolare il numero di tubi necessario, da quest'ultimo si potrà ricavare la superficie unitaria dei singoli tubi, poi la velocità u_i .

Superficie totale (1.4) di scambio termico:

$$S = \pi \times d_e \times l \times N_t \rightarrow N_t = \frac{S}{\pi \times d_e \times l} \quad (1.4)$$

Superficie A_i :
$$A_i = \left(\pi \times \frac{d_i^2}{4} \right) \times \frac{N_t}{n_{p,i}}$$
 Velocità u_i :
$$u_i = \frac{\frac{W'}{3600}}{\rho_{\text{fluido lato tubi}} \times A_i}$$

A questo punto ottenuti i risultati della configurazione esegue un'analisi di superficie e velocità. In particolare per uno scambiatore di calore 1/1, nel caso la superficie totale di scambio fosse superiore ai 50 m² o la velocità troppo differente da quella ottimale inserita dall'utente durante la dichiarazione dati, tale tipologia (1/1) sarebbe immediatamente scartata in quanto considerata economicamente svantaggiosa e quindi non accettabile.

Sia nel caso in cui la configurazione 1/1 risultasse idonea che non, il programma procede nel calcolo di un ipotetico scambiatore 1/2n idoneo alle caratteristiche date.

2.2.2 Scambiatore 1/2n

Scambiatore 1/2n	Ft calcolato	0.926			Velocità di ottimale [m/s]
	Economicamente vantaggioso				1.5
ΔT_m	45.846				
Superficie [m ²]	185.807				
Numero di tubi	521				

Figura 2.6. Dati preliminari per la scelta dei passaggi interni della configurazione 1/2n.

La controcorrente perfetta in questo caso non è più una condizione, il calcolo di F_t si modifica quindi in:

$$F_t = \frac{\sqrt{R^2 + 1} \times \ln \left[\frac{1-S}{1-RS} \right]}{(R-1) \times \ln \left[\frac{2-S(R+1-\sqrt{R^2+1})}{2-S(R+1+\sqrt{R^2+1})} \right]}$$

Considerando: $R = \frac{t_2 - t_1}{T_2 - T_1}$ $S = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1}$

Figura 2.6.1. formulazione di F_t ricavata dal Towler-Sinnott - Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design – p.842- eq.(19.8).

Si noti che sotto alla cella di calcolo dell' F_t si esegue un controllo numerico per cui, se tale valore non risultasse compreso tra $0.7 < F_t < 0.9$, la configurazione con qualsiasi numero di passaggi interni risulterebbe economicamente svantaggiosa e quindi scartabile dall'algoritmo.

Procedendo, il programma inizia trovando il $\Delta T_m = \Delta T_{ml} \times F_t$, calcolato con il nuovo F_t appena ricavato. Successivamente, inizia un'attenta analisi atta a trovare la configurazione che assicura allo scambiatore una velocità il più possibile vicino a quella dichiarata dall'utente. (Figura 2.6.) L'algoritmo di "scelta", parte come prima con il calcolo della superficie di scambio termico e del numero di tubi necessario.

$$S = \frac{q'}{U_D \times \Delta T_m} \quad (1.5)$$

$$N_t = \frac{S}{\pi \times d_e \times l} \quad (1.6)$$

Fatto questo, avviene un'inversione della formula che prima era usata per il calcolo diretto della velocità.

Di fatti, quest'ultima equazione è utilizzata per ricavare il numero ottimale di passaggi interni inserendo come velocità quella dichiarata come ottimale per il lato tubi nella pagina di input. Tale risultato sarà poi approssimato al numero intero più vicino.

Numero passaggi consigliati			
3.617	ovvero	4	
Il numero trovato è dispari?		FALSE	procedere con il numero pari di passaggi trovato

Figura 2.7. Frammento di codice con calcolo e arrotondamento del numero ottimale di passaggi interni.

$$n_{p,i} = \left(\pi \times \frac{d_i^2}{4} \right) \times \frac{N_t}{\left(\frac{W'}{3600} \right)} \times \rho_{fluido \text{ lato tubi}} \times u_i \quad (1.7)$$

Arrotondato il risultato si esegue un controllo numerico.

Tale controllo è inserito in quanto il numero di passaggi interni in uno scambiatore a fascio tubiero deve necessariamente essere un numero pari; per assicurarsi di ciò una funzione logica con risposta vero falso analizzerà il valore e darà un responso, nel caso in cui tale responso fosse "FALSE", l'algoritmo potrà procedere con il calcolo della velocità effettiva e della superficie unitaria dei singoli tubi. (Figura 2.7.)

Nel caso in cui il risultato della funzione logica fosse "TRUE" allora il codice esegue le stesse operazioni di calcolo di velocità e superficie che avrebbe dovuto svolgere su $n_{p,i}$, per $n_{p,i} \pm 1$, scegliendo in automatico la velocità risultante più vicina a quella ottimale. (Figura 2.8.)

Test con:	3	Superficie [m²]	0.05	Scelgo velocità che più si avvicina alla velocità di riferimento precedentemente scelta
		Velocità [m/s]	1.24	
Test con:	5	Superficie [m²]	0.03	
		Velocità [m/s]	2.07	

Figura 2.8. Calcolo degli eventuali passaggi interni da tenere in considerazione nel caso in cui l' $n_{p,i}$ calcolato fosse dispari.

2.2.3 Scelta passaggi interni

Nella parte destra del riquadro, vengono quindi illustrate le variabili calcolate in questa fase.

Il numero di passaggi interni è scelto selezionando tra tutte le ipotesi fatte, l' $n_{p,i}$ che ricava una velocità il più possibile prossima a quella ottimale.

I valori in questa tabella saranno utilizzati nei successivi calcoli, che andranno a dimensionare e verificare il lato fasciame dello scambiatore. (Figura 2.9.)

DATI CALCOLATI UTILIZZABILI PER VERIFICHE	
Test approvato con:	4
Superficie [m ²]	0.04
Velocità [m/s]	1.66
Tubi	521

Figura 2.9. Numero di passaggi interni finale suggerito e relativi dati calcolati nelle fasi precedenti riassunti.

2.3 Verifiche fluido interno

2.3.1 Verifica termica fluido interno

Per verificare che lo scambio termico sia efficace, una volta ottenuti i risultati dal capitolo precedente, l'algoritmo, tramite l'ausilio dei numeri adimensionali, arriverà a calcolare l' $h_{i,e}$.

I primi numeri adimensionali riportati e fondamentali successivamente sono il numero di Reynold e il numero di Prandl.

$$Re_i = \frac{d_i \times u_i \times \rho_{fluido\ lato\ tubi}}{\mu_{fluido\ lato\ tubi}}$$

(1.8)

$$Pr_i = \frac{c_p\ fluido\ lato\ tubi \times \mu_{fluido\ lato\ tubi}}{k_{fluido\ lato\ tubi}}$$

(1.9)

In particolare sul numero di Prandl si andrà a verificare la validità del dato; conoscendo infatti l'intervallo di controllo $0.48 < Pr_i < 16700$, nella casella a fianco del valore si avrà "ACCETTABILE" o "NON ACCETTABILE".

Un algoritmo di IF, invece, si occupa di definire il regime di moto definito dal numero di Reynold; nella casella a fianco al valore appena calcolato, il programma mostra se si tratta di:

Regime TURBOLENTO:

$$Re < 2100$$

Regime INTERMEDIO:

$$2100 \leq Re < 10000$$

Regime LAMINARE:

$$Re \geq 10000$$

Per calcolare il numero adimensionale di Nusselt, è necessario effettuare alcune considerazioni. Innanzitutto il programma comprende automaticamente leggendo la casella di assegnazione della legge di variazione della viscosità se considerare quest'ultima o no. La logica che segue, ovviamente, è quella avuta fin dall'inizio, ovvero nel caso la legge non fosse presente l'utente provvede ad inserire un "-" nella casella di allocazione. Una volta fatta questa distinzione, viene eseguito un controllo sul regime di moto tramite il numero di Reynold, in quanto le formulazioni del numero di Nusselt variano in base a quest'ultimo parametro.

2.3.1.1 Calcolo del numero di Nusselt interno senza correzione

```

1 function NunocorrectionINT(Re, Pr, diametro, lunghezza_tubo, visc_lato) {
2   if (Re <= 2100) { // Regime laminare
3     Nu_corretto = 1.86 * Math.pow(Re * Pr * (diametro / lunghezza_tubo), 1 / 3);
4   }
5   } else if (Re < Math.pow(10, 4)) { // Regime intermedio
6     Nu_corretto = 0.116 * (Math.pow(Re, 2 / 3) - 125) * Math.pow(Pr, 1 / 3) * (1 + Math.pow(diametro / lunghezza_tubo, 2 / 3));
7   }
8   } else { // Regime turbolento
9     var moltiplicatore_turbolento = 0.023;
10    if (visc_lato > 0.01) {
11      moltiplicatore_turbolento = 0.027; // Fluidi viscosi
12    }
13    Nu_corretto = moltiplicatore_turbolento * Math.pow(Re, 0.8) * Math.pow(Pr, 1 / 3); // Calcola il numero di Nusselt corretto
14  }
15  return Nu_corretto; // Ritorna il numero di Nusselt corretto
16 }
17
18

```

Figura 2.10. Algoritmo di calcolo che illustra le varie formulazioni a seconda del regime di moto: laminare, turbolento o intermedio.

Come illustrato in figura 2.10., il codice utilizza un algoritmo *IF* legge il valore di Re e assegna una formulazione specifica. In particolare:

Laminare:
$$1.86 \times (Re_{int} \times Pr_{int} \times (\frac{d_{int}}{l}))^{\frac{1}{3}} \quad (2.0)$$

Intermedio:
$$0.116 \times (Re_{int}^{\frac{2}{3}} - 125) \times Pr_{int}^{\frac{1}{3}} \times (1 + (\frac{d_{int}}{l}))^{\frac{2}{3}} \quad (2.1)$$

Turbolento:
$$X \times Re_{int}^{0.8} \times Pr_{int}^{\frac{1}{3}} \quad (2.2)$$

Nella formulazione turbolenta il parametro “X” è un moltiplicatore. Può assumere 2 valori a seconda della natura del fluido, viscoso o non viscoso:

- Viscosità > 0.01 : moltiplicatore = 0.027
- Viscosità < 0.01 : moltiplicatore = 0.023

2.3.1.2 Calcolo del numero di Nusselt interno con correzione

```

1 > /**...
15 function NucorrectionINT(T1, T2, t1, t2, Re, Pr, diametro, visc_lato, evalString, lunghezza_tubo) {
16   var Tmedia = (T1 + T2) / 2; // Calcola la temperatura media 1
17   var tmedia = (t1 + t2) / 2; // Calcola la temperatura media 2
18   var Tp = (Tmedia + tmedia) / 2;
19   var Nu_corretto; // Variabile per il numero di Nusselt
20
21   // Calcola il numero di Nusselt non corretto iniziale in base al valore di Re
22   if (Re <= 2100) {
23     var evalResult = EvalAndSubstituteX(evalString, (Tp + 273.15)); // Calcolo della correzione di Nu
24     Nu_corretto = 1.86 * Math.pow(Re * Pr * (diametro / lunghezza_tubo), 1 / 3) * Math.pow(((visc_lato / 0.001) / evalResult), 0.14);
25   }
26   } else if (Re < Math.pow(10, 4)) { // Regime intermedio
27     var evalResult = EvalAndSubstituteX(evalString, (Tp + 273.15)); // Calcolo della correzione di Nu
28     Nu_corretto = 0.116 * (Math.pow(Re, 2 / 3) - 125) * Math.pow(Pr, 1 / 3) * (1 + Math.pow(diametro / lunghezza_tubo, 2 / 3)) * Math.pow(((visc_lato / 0.001) / evalResult), 0.14);
29   }
30   } else {
31     var moltiplicatore = 0.023;
32     // Verifica se il fluido è viscoso o meno e imposta il moltiplicatore di conseguenza
33     if (visc_lato > 0.01) {
34       moltiplicatore = 0.027; // Fluidi viscosi
35     }
36     var evalResult = EvalAndSubstituteX(evalString, (Tp + 273.15)); // Calcolo della correzione di Nu
37     Nu_corretto = moltiplicatore * Math.pow(Re, 0.8) * Math.pow(Pr, 1 / 3) * Math.pow(((visc_lato / 0.001) / evalResult), 0.14); // Calcola il numero di Nusselt corretto
38   }
39   return Nu_corretto; // Ritorna il numero di Nusselt corretto
40 }

```

Figura 2.11. Algoritmo di calcolo che illustra le varie formulazioni a seconda del regime di moto, con correzione: laminare, turbolento o intermedio.

In **Figura 2.11.** la formulazione del numero di Nusselt non cambia; tuttavia dovremmo

aggiungere un parametro $(\frac{\mu_{fluido\ lato\ tubi}}{evalResult})^{0.14}$ ulteriore nella formula selezionata.

Il denominatore “*evalResult*” si tratta di un valore calcolato nell’algoritmo che legge la stringa di testo inserita (Figura 2.12.) dall’utente nella cella della legge di variazione e sostituisce la *x* incognita con la temperatura di parete, calcolata come:

$$T_{media\ fluido\ 1}: \quad t_{media\ fluido\ 1}: \quad T_{media\ di\ parete}: \\ \frac{T_1 + T_2}{2} \quad \frac{t_1 + t_2}{2} \quad \frac{T_{media\ fluido\ 1} + t_{media\ fluido\ 1}}{2}$$

(2.3)

```

1 > /**...
7 function EvalAndSubstituteX(ref, value) {
8   SpreadsheetApp.flush();
9   var result = null;
10  try {
11    // Sostituisci 'x' con il valore specificato nella formula
12    var expression = ref.replace(/x/g, value);
13
14    // Sostituisci "^" con "**" per il logaritmo
15    expression = expression.replace(/\^/g, "**");
16    // Sostituisci "LOG" con "Math.log" per il logaritmo
17    expression = expression.replace(/LOG\(/g, "Math.log(");
18    // Sostituisci "LN" con "Math.log" per il logaritmo naturale
19    expression = expression.replace(/LN\(/g, "Math.log(");
20    // Sostituisci "LOG_BASE(" con "Math.log(BASE," per il logaritmo con base
21    expression = expression.replace(/LOG_BASE\(/g, "Math.log(");
22    // Sostituisci "EXP" con "Math.exp" per l'esponenziale
23    expression = expression.replace(/EXP\(/g, "Math.exp(");
24    // Sostituisci "10^" con "Math.pow(10," per l'elevamento a potenza con base 10
25    expression = expression.replace(/10\^/g, "Math.pow(10,");
26    // Sostituisci "NUMERO_BASE^" con "Math.pow(NUMERO_BASE," per l'elevamento a potenza con base specifica
27    expression = expression.replace(/([0-9]+\)\^/g, "Math.pow($1,");
28    // Sostituisci "SQRT" con "Math.sqrt" per la radice quadrata
29    expression = expression.replace(/SQRT\(/g, "Math.sqrt(");
30    // Sostituisci "ABS" con "Math.abs" per il valore assoluto
31    expression = expression.replace(/ABS\(/g, "Math.abs(");
32
33    // Esegui l'evaluazione dell'espressione
34    result = eval(expression);
35  } catch (error) {
36    return "Errore: " + error.message;
37  }
38  return result;
39 }

```

Figura 2.12. Funzione EvalAndSubstituteX che legge e sostituisce il parametro *x* e esegue le operazioni indicate.

2.3.1.3 Calcolo di h_{ie}

Ora che si ha a disposizione il numero di Nu, l’algoritmo procede invertendo la formulazione di quest’ultimo per ricavare h_i :

$$h_i = \frac{Nu_i \times k_{fluido\ interno}}{d_i} \quad (2.4)$$

Tale valore dovrà poi risultare $\gg U_{Di\ progetto}$, il programma effettua infatti un controllo immediato. Fatto ciò la verifica termica si conclude calcolando l’ h_{ie} . (Figura 2.13.)

$$h_{ie} = h_i \times \frac{d_{interno}}{d_{esterno}} \quad (2.5)$$

Nu	197.94	Calcolato senza correzione viscosità
h_i [W/(m²*K)]	6,650.04	MAGGIORE DI U di progetto (accettabile)
h_{ie} [W/(m²*K)]	5,448.74	MAGGIORE DI U di progetto (accettabile)

Figura 2.13. Celle di calcolo di Nu interno, h_i e h_{ie} .

2.3.2 Verifica idraulica fluido interno

Questa parte di codice è dedicata al calcolo delle perdite di carico compressive. Per ottenere questo valore e verificarle, si inizia calcolando il fattore d'attrito:

$$\text{Regime LAMINARE:} \quad \frac{16}{Re_i} \quad (2.6)$$

$$\text{Regime TURBOLENTO:} \quad f = 0.1 \times Re_i^{-0.24} \quad (2.7)$$

Ottenuto il fattore di attrito, considero le perdite di carico distribuite e locali, Considerando nella formula $d_{eq} = d_i$, $L_{eq} = l \times n_{p,i}$

$$(\text{distribuite}) \Delta P_{d,i} = 4 \times f \times \frac{L_{eq}}{d_{eq}} \times \rho_{fluido\ interno} \times \frac{u_i^2}{2} \quad (2.8)$$

$$(\text{locali}) \Delta P_{l,i} = 3 \times \rho_{fluido\ interno} * \frac{u_i^2}{2} * n_{p,i} \quad (2.9)$$

Si effettua infine un controllo sul valore ottenuto, assicurandosi che sia inferiore al valore dichiarato dall'utente nelle dichiarazioni dei dati.

VERIFICA IDRAULICA FLUIDO INT.	
Fattore di attrito	0.007
ΔP tot	
ΔP LOCALI [Pa]	36,514.17
ΔP DISTRIBUITE [Pa]	16,341.09
tot [atm]	0.52
	ACCETTABILE

Figura 2.14. Interfaccia grafica delle verifiche idrauliche.

2.4 Verifiche fluido esterno

Nel paragrafo seguente viene illustrato come l'algoritmo va a gestire e ricavare tutti i dati necessari al dimensionamento del lato esterno, il lato del fasciame.

2.4.1 Calcolo dati geometrici del fasciame

VERIFICHE FLUIDO ESTERNO		Dati tecnici preliminari sul fluido esterno		Calcolo dei diaframmi (ipotetici)		Calcolo dei diaframmi (reali)	
Passaggi	4	K _t	0.158	Velocità ottimale [m/s]	0.50	Numero di diaframmi	8
D _e [m]	0.83	m	2.263	Calcolo Area [m ²]	0.11	Distanza diaframmi effettiva [m]	0.54
Testata dello scambiatore:		Spiral-ring floating head		Distanza diaframmi ipotetica [m]	0.62	Area effettiva [m ²]	0.10
L _{clear} [m]	0.07					Velocità effettiva [m/s]	0.57
Diametro fasciame [m]	0.90						

Figura 2.15. Interfaccia grafica dei dati geometrici ricavati per il lato fasciame.

Si inizia calcolando il diametro del fasciame. Quest'ultimo dato è fondamentalmente composto da due unità:

$$D_f = D_b + l_{clear} \quad (3.0)$$

Dove D_b è il diametro della piastra tubiera, me la l_{clear} è la distanza richiesta tra la corona più

esterna di tubi e l'interno del diametro del fasciame. Il primo parametro è facilmente ricavabile dall'equazione:

$$D_b = d_e \times \left(\frac{N_t}{k_1}\right)^{\frac{1}{n_1}} \quad (3.0)$$

[Towler-Sinnott - Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design , p.837, eq.(19.3b)]

I valori di k_1 e di n_1 sono costanti e si trovano facilmente nel manuale, queste variano con il numero di passaggi interni e la tipologia di maglia che l'utente decide di selezionare all'inizio. Nell'algoritmo è presente un codice *IF* che gestisce tutte le cifre fino a scambiatori 1/6, maglia triangolare o quadrata.

Per quanto riguarda invece il secondo parametro (l_{clear}), questo dipende in maniera lineare dalla tipologia di testata selezionata inizialmente dall'utente e da D_b . In particolare, sono state calcolate le rette che compongono il grafico per le varie testate e il programma automaticamente inserisce il valore di D_b ricavando l_{clear} . (Figura 2.16.)

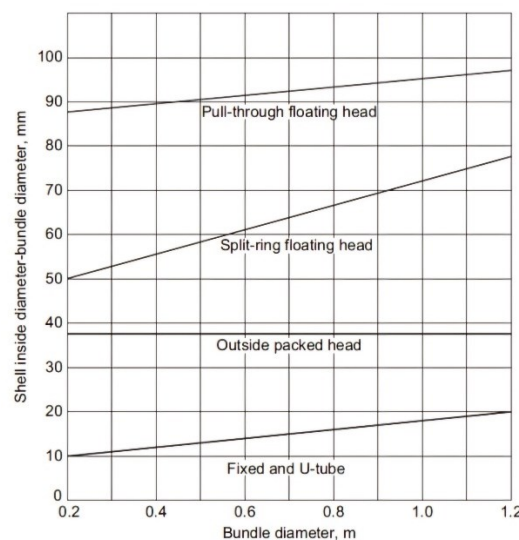


Figura 2.16. [Towler-Sinnott - Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design , p.836, Figura (19.19)].

2.4.1 Calcolo dei diaframmi

Ottenuti i dati geometrici generali del fasciame nel paragrafo precedente, come ultimo passo il codice calcola la distanza dei diaframmi, il numero di quest'ultimi, area e velocità del fluido esterno. Non si può calcolare direttamente la distanza fra i diaframmi senza sapere prima il loro numero (N_d):

$$N_d = \frac{l_{tubi}}{q^\circ} - 1 \quad (3.1)$$

Dove q° è la distanza effettiva tra i diaframmi ($0.2D_f < q^\circ < D_f$). Il numero di diaframmi (3.1)

deve essere necessariamente pari e intero. Utilizzando la velocità del fluido esterno inizialmente dichiarata come ottimale dall'utente, si procede con il calcolo dell'area ottimale ipotetica. Successivamente invertendo le formule della superficie (3.2) vado a ricavare il numero di diaframmi e la loro distanza ipotetica:

$$A_e^* = \frac{W}{\rho_{fluido\ fasciame} \times u_e^*} \quad (3.2)$$

$$A_e^* = q^\circ \times (p - d_e) \times \left(\frac{D_f}{p}\right) \rightarrow q^\circ = \frac{A_e^*}{(p - d_e) \times \left(\frac{D_f}{p}\right)} \rightarrow N_d = \frac{l_{tubi}}{q^\circ} - 1$$

Ricavato l' N_d , l'algoritmo procede con l'arrotondare all'intero pari più vicino e a cascata ricalcola con tale numero, tutti i parametri di superficie e velocità che precedentemente avevamo ipotizzato per arrivare al numero di diaframmi.

$$q^\circ(\text{effettiva}) = \frac{l_{tubi}}{N_d + 1} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \rightarrow A_e(\text{effettiva}) &= q^\circ(\text{effettiva}) \times (p - d_e) \times \left(\frac{D_f}{p}\right) \rightarrow u_e(\text{effettiva}) \\ &= \frac{W}{\rho_{fluido\ fasciame} \times A_e(\text{effettiva})} \end{aligned}$$

Così facendo il lato esterno è giunto alla conclusione del suo dimensionamento e si può procedere con le verifiche termiche e idrauliche.

2.4.2 Verifica termica fluido esterno

Analogamente al paragrafo dedicato alla verifica termica del fluido interno si procede prima con il calcolo dei numeri adimensionali e successivamente con il numero di Nusselt, il quale anche in questo caso avrà un algoritmo dedicato. Fondamentale da ricordare, è che il diametro equivalente calcolato prima di iniziare i calcoli, varia con la maglia scelta nello scambiatore, infatti:

Maglia triangolare:

$$d_{eq} = d_e \times (1.103 \times \left(\frac{p}{d_e}\right)^2 - 1) \quad (3.4)$$

Maglia quadrata:

$$d_{eq} = 4 \times \frac{p^2 - 4 \times \left[\frac{1}{4} \times \left(\frac{\pi}{4} \times d_e^2\right)\right]}{\pi \times d_e} \quad (3.5)$$

VERIFICA TERMICA FLUIDO EST.		Diametro eq. [m]	2.30E-02
Re	15,358.32	MOTO TURBOLENTO	
Pr	11.33	ACCETTABILE	
Nu	157.23	Calcolato con correzione viscosità	
h_e [W/(m ² *K)]	943.58	MAGGIORE DI U di progetto (accettabile)	

Figura 2.17. Interfaccia grafica della verifica termica lato fasciame.

Una volta calcolati il numero di Prandtl, un codice provvederà ad ottenere il valore del numero di Nusselt. Quindi, come illustrato in figura (Figura 2.18.), si calcolerà nuovamente la temperatura di parete, che sarà utilizzata per valutare la legge di correzione della viscosità, se presente (3.6). Per il fluido esterno, la formulazione di Nusselt diventa:

$$Nu_e = 0.36 \times Re^{0.55} \times Pr^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\mu_{fluido\ fasciame}}{\mu_p\ fluido\ fasciame} \right)^{0.14} \quad (3.6)$$

Eliminando se non presente il fattore di correzione della viscosità all'occorrenza.

```

1  /**
2  * Calcola il coefficiente di scambio termico iterativamente.
3  * @param {number} T1 - Temperatura iniziale 1.
4  * @param {number} T2 - Temperatura iniziale 2.
5  * @param {number} t1 - Temperatura finale 1.
6  * @param {number} t2 - Temperatura finale 2.
7  * @param {number} Re - Numero di Reynolds.
8  * @param {number} Pr - Numero di Prandtl.
9  * @param {number} conduttivita - Conduttività termica del fluido nel fasciame.
10 * @param {number} diametro - Diametro equivalente.
11 * @param {number} h_est - Coefficiente di scambio termico esterno.
12 * @param {number} visc_lato - Viscosità del fluido nel fasciame.
13 * @param {string} evalString - Stringa di codice per la correzione Nu.
14 * @param {number} iterazioni - Numero di iterazioni.
15 * @return Il coefficiente di scambio termico ottenuto dopo le iterazioni.
16 */
17 function NucorrectionEST(T1, T2, t1, t2, Re, Pr, visc_lato, evalString) {
18   var Tmedia = (T1 + T2) / 2; // Calcolo della temperatura media 1
19   var tmedia = (t1 + t2) / 2; // Calcolo della temperatura media 2
20   var Tp = (Tmedia + tmedia) / 2
21   var j=0.36*Math.pow(Re, 0.55)
22   var evalResult = EvalAndSubstituteX(evalString, Tp+273.15); // Calcolo della correzione di Nu
23   var Nu_corretto = j * Math.pow(Pr, 1/3) * Math.pow(((visc_lato / 0.001) / evalResult), 0.14); // Calcolo di Nu
24   return Nu_corretto;
25 }

```

Figura 2.18. Codice per il calcolo di Nusselt esterno con correzione sulla viscosità.

Trovato Nusselt l'algoritmo procede sulle celle e calcola h_e :

$$h_e = \frac{Nu_e \times k_{fluido\ esterno}}{d_{eq}} \quad (3.7)$$

2.4.3 Verifica idraulica fluido esterno

Come per quanto riguarda le verifiche idrauliche interno, in questo paragrafo si andrà a descrivere il processo di calcolo delle perdite di carico (3.8), che in questo caso saranno solamente distribuite.

$$(distribuite) \Delta P_{d,e} = 4 \times f \times \frac{L_{eq}}{d_{eq}} \times \rho_{fluido\ esterno} \times \frac{u_e^2}{2} \quad (3.8)$$

Per quanto riguarda il diametro equivalente il codice utilizza quello calcolato nei paragrafi precedenti. La lunghezza equivalente è calcolata tramite la formula 3.9:

$$L_{eq} = (N_d + 1) \times D_f \quad (3.9)$$

Il fattore d'attrito è ottenuto in maniera differente a seconda del regime di moto, in regime turbolento equivale a $f = 0.44 \times Re_e^{-0.19}$, mentre in regime turbolento $f = \frac{16}{Re_e}$. Nella parte finale del codice si effettua una verifica di sicurezza nel caso in cui le perdite di carico fossero superiori a quelle stabilite dall'utente.

VERIFICA IDRAULICA FLUIDO EST.	
Fattore di attrito	0.07
Lunghezza eq. [m]	8.12
ΔP tot	
ΔP DISTRIBUITE [atm]	0.13
	ACCETTABILE

Figura 2.19. Interfaccia di verifica idraulica delle perdite di carico nel lato esterno.

2.5 Calcolo finale di U_{eff} e configurazione suggerita

Come ultimo passaggio, il programma provvede a calcolare il coefficiente di scambio termico globale effettivo (4.0), comparandolo con il coefficiente di scambio termico globale di progetto, dichiarato dall'utente inizialmente, assicurandosi che sia inferiore.

Il calcolo dell' U_{eff} :

$$U_{eff} = \left[\frac{1}{h_{ie}} + \frac{1}{h_e} + \left(\frac{d_e}{2 \times k_{materiale\ di\ costruzione}} \ln \frac{d_e}{d_i} \right) + R_{sporcameto} \right]^{-1} \quad (4.0)$$

Per quanto riguarda la $R_{sporcameto}$ il programma utilizzerà se presente quella globale inserita dall'utente, mentre nel caso in cui si usassero dei valori personalizzati delle singole resistenze o comunque preimpostati si utilizzerà un calcolo differente. Infatti il lato tubi avrà come valore $R_{lato\ tubi} = R_{fluido\ lato\ tubi} \times \frac{d_e}{d_i}$, mentre il lato fasciame userà direttamente $R_{lato\ fasciame} = R_{fluido\ lato\ fasciame}$.

Una volta calcolato l' U_{eff} , un ultimo parametro necessario è il sovradimensionamento:

$$Sovradimensionamento = \frac{U_{eff} - U_D}{U_D} * 100 \quad (4.1)$$

Quest'ultimo parametro (4.1) dovrà risultare compreso tra il -5% e il 30% , altrimenti la configurazione suggerita dovrà essere rielaborata. (Figura 2.20.)

Resistenza allo sporcameto lato tubi [$m^2 * K / W$]		-
Resistenza allo sporcameto lato fasciame [$m^2 * K / W$]		-
Resistenza globale allo sporcameto [$m^2 * K / W$]	0.00033	
$U_{effettivo}$ [$W / (m^2 * K)$]	615.46	MAGGIORE DI U di progetto (accettabile)
Sovradimensionamento	2.58%	ACCETTABILE

Figura 2.20. Calcolo di U_{eff} .

2.5.1 Configurazione suggerita

Per concludere, nella pagina iniziale, saranno raggruppati tutti i vari dati raccolti nel dimensionamento e indicati con in Figura 2.21.

CONFIGURAZIONE SUGGERITA			
scambiatore	1/ 4		
testata	Split-ring floating head		
numero di tubi	521		
diametro fasciame [m]	0.90		
numero diaframmi	8	distanza diaframmi [m]	0.54
velocità tubi [m/s]	1.66	velocità fasciame [m/s]	0.57
ΔP tubi [Atm]	0.52	ΔP fasciame [Atm]	0.13
$U_{effettivo}$ [W / (m ² *K)]	615.463	MAGGIORE DI U di progetto (accettabile)	
Sovradimensionamento	2.58%		

Figura 2.21. Consegna della configurazione suggerita.

Capitolo 3

Considerazioni finali sui risultati e conclusione

3.1 Limitazioni e possibili sviluppi futuri

Il programma usa una procedura non iterativa nello scegliere la configurazione, nel caso in cui il coefficiente di scambio termico globale effettivo risultasse più piccolo di quello di progetto o la macchina fosse sovra o sotto dimensionata, il dimensionamento dovrebbe essere ridiscusso trovando una soluzione alternativa, ad esempio aumentando o diminuendo il numero di passaggi. Sarà possibile inoltre, in futuro, implementare alcune modifiche per migliorare il codice. Ad esempio valutare gli incroci di temperatura o una ipotetica configurazione $2/4n$, risolvere un sistema di equazioni in cui la portata mancante come dato iniziale sia quella del fluido 2. Inoltre un miglioramento possibile potrebbe essere quello di utilizzare un metodo iterativo per calcolare la temperatura di parete, oppure quello di utilizzare delle formule del fattore di attrito che variano con il materiale utilizzato. Di fatti le formule utilizzate nel codice odierno sono approssimative in quanto ottimali per tubature in acciaio ma non per altri materiali.

Riferimenti bibliografici

1. Towler, G. and R. Sinnott (2022). *Chemical Engineering Design – Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford (U.K.).
2. Serth, R.W. and T.G. Lestina (2014). *Process Heat Transfer – Principles and Applications*, 2nd ed., Academic Press, Oxford (U.K.).
3. Prof. Massimiliano Barolo - Dispense corso di impiantistica di processo anno accademico 2023-2024.