

Analisi dati e calcoli ingegneristici scambiatore di calore  
Laboratorio - Gruppo n.5 del 26/11/2021, fisica tecnica [140078] AA 2021/2022

Cristian Merli, matr. 211384

07/02/2022

Sommario

*Relazione sintetica con lo scopo di descrivere le scelte adottate, e discutere i risultati ottenuti dall'analisi dati e dalle modellazioni ingegneristiche effettuate. Il sistema oggetto di modellazione, è costituito da uno scambiatore di calore a fascio tubiero, all'interno del quale scorre acqua in entrambi i circuiti di scambio. Sono state effettuate diverse prove, in particolare: due in configurazione equi-corrente e due in configurazione contro-corrente, con diversi valori di portata volumetrica di fluido freddo.*  
*Nei capitoli successivi, verranno elencate le richieste di progetto avanzate dal docente e verranno ripercorse le varie tappe, che hanno condotto alla realizzazione e comparazione di diversi modelli ingegneristici più o meno raffinati, mediante l'analisi assistita da calcolatore dei dati raccolti durante l'esperienza di laboratorio (effettuata in data 26/11/2021 con il gruppo numero 5, presso i laboratori del dipartimento di fisica dell'università di Trento).*

Indice

Sommario . . . . . 1

1 Richieste . . . . . 2

2 Introduzione . . . . . 2

3 Linguaggio di programmazione . . . . . 2

4 Analisi dati . . . . . 2

5 Calcoli ingegneristici . . . . . 2

6 Conclusioni . . . . . 2

7 Formule . . . . . 2

7.1 Formule analisi dati . . . . . 2

7.1.1 Scelta miglior intervallo dati con condizioni stazionarie . . . . . 2

7.2 Formule calcoli ingegneristici . . . . . 2

7.2.1 Trasferimento di calore . . . . . 2

7.2.2 Metodo epsilon-NTU . . . . . 3

7.2.3 Metodo numeri adimensionali . . . . . 3

7.2.4 Convezione naturale esterna . . . . . 4

8 Tabelle . . . . . 4

9 Immagini e grafici . . . . . 4

Riferimenti bibliografici . . . . . 4

# 1 Richieste

Le richieste di progetto consistono principalmente nella realizzazione di un sistema di analisi dati "computerizzato", per poter cogliere da esso, le informazioni necessarie ad effettuare i diversi calcoli inerenti il fenomeno di scambio termico. Il tutto, con l'obiettivo di caratterizzare tale fenomeno sul manufatto oggetto di analisi sperimentale. In aggiunta, è stato richiesto di cogliere le analogie e tutto ciò in cui i risultati teorici attesi, differiscono da quelli sperimentali ottenuti, con particolare attenzione in riferimento alla non adiabaticità del sistema e alle varie approssimazioni effettuate in fase di modellazione, per lo studio del trasferimento di calore all'interno e all'esterno della macchina termica.

# 2 Introduzione

Per rispondere alle richieste di progetto, come riportato anche nel sommario di questo documento, è stata realizzata una parte di calcolo assistito con alcuni commenti per motivare e descrivere i vari passaggi effettuati. Questo elaborato ha quindi come unico scopo, quello di illustrare i passaggi cruciali, le scelte salienti adottate e discutere i risultati ottenuti nella parte tecnica. Per maggior trasparenza, è stato reso accessibile online l'intero codice sorgente realizzato, senza la necessità di effettuare alcuna installazione e/o configurazione dell'ambiente di sviluppo per poterlo consultare. Il seguente link, consente un accesso diretto alla repository di GitHub caricata personalmente, per poter approfondire tutto ciò che è stato realizzato: <https://github.com/CristianMerli/DataAnalysis.git>.

# 3 Linguaggio di programmazione

Il passo preliminare per poter portare a compimento le richieste avanzate da parte del docente [Capitolo 1, pagina 2], è stato quello di individuare un software di "data science", per la realizzazione della parte di analisi dati e calcolo ingegneristico. La scelta più ovvia in ambito accademico, sarebbe stata quella di utilizzare il software MatLab, ma si è optato per un programma di tipo open-source, riutilizzabile anche in futuro essendo libero da licenze. È stato quindi scelto un linguaggio denominato python, dotato di numerosi pacchetti dedicati al "data science", tra cui pandas e numpy. L'ambiente di sviluppo utilizzato (IDE) è Visual Studio Code, installato su una macchina linux con un ambiente virtuale python dedicato allo sviluppo di tale progetto (conda environment). Un esempio di configurazione simile per analisi dati, può essere trovato al seguente link: [vedi esempio](#). Infine, è stato utilizzato il sistema di gestione del codice "git", unitamente al servizio di hosting fornito da GitHub, con l'intento di pubblicare online e rendere facilmente accessibili tutti i contenuti realizzati. Il codice che compone la parte tecnica di questo progetto, è composto da uno script python principale di tipo JupyterNotebook e da un pacchetto (libreria) appositamente sviluppato, denominato "libs". Esso contiene diversi script in linguaggio nativo python, con compiti specifici tra cui: caricamento dati misure, esecuzione analisi dati, formule di calcolo ingegneristico, stampaggio a video di grafici, approssimazione polinomiale delle proprietà delle variabili termofisiche e molto altro.

"One of the really big growth areas for Python is in the sciences, where data analysis is a huge component." (by Bernard, Joey) [1]

# 4 Analisi dati

L'analisi dei dati, è stata

# 5 Calcoli ingegneristici

XSAHxsjhsavxsxgavsxgh

# 6 Conclusioni

XSAHxsjhsavxsxgavsxgh

# 7 Formule

## 7.1 Formule analisi dati

### 7.1.1 Scelta miglior intervallo dati con condizioni stazionarie

$$I_{condiz.staz.} = I(s_j) : \{I(s_j) = \min_{\forall I_M \in M} s_j\} \quad \text{con} \quad I(s_j) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m s_j \quad \text{e} \quad s_j = \sqrt[2]{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{Eq. 7.1.1.1})$$

## 7.2 Formule calcoli ingegneristici

### 7.2.1 Trasferimento di calore

$$Q_c = \dot{m}_c C_{p,c}(T) \Delta T_c \quad \text{e} \quad Q_f = \dot{m}_f C_{p,f}(T) \Delta T_f \quad (\text{Eq. 7.2.1.1})$$

$$\bar{Q} = \frac{|Q_c| + |Q_f|}{2} \quad \text{e} \quad \Delta Q_{c-f} = Q_c + Q_f \quad (\text{Eq. 7.2.1.2})$$

### 7.2.2 Metodo epsilon-NTU

$$\Delta T_{m.l.} = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{\log_e \left( \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \right)} \quad (\text{Eq. 7.2.2.1})$$

$$A_i = \pi d_i L N_t \quad \text{ed} \quad A_e = \pi d_e L N_t \quad (\text{Eq. 7.2.2.2})$$

$$U_i = \frac{\bar{Q}}{A_i \Delta T_{m.l.}} \quad \text{e} \quad U_e = \frac{\bar{Q}}{A_e \Delta T_{m.l.}} \quad \text{da} \quad \bar{Q} = U_i A_i \Delta T_{m.l.} = U_e A_e \Delta T_{m.l.} \quad (\text{Eq. 7.2.2.3})$$

$$\dot{C}_{min} = \min\{\dot{m}_c \mathcal{C}_{p,c}(T), \dot{m}_f \mathcal{C}_{p,f}(T)\} \quad \text{e} \quad \dot{C}_{max} = \max\{\dot{m}_c \mathcal{C}_{p,c}(T), \dot{m}_f \mathcal{C}_{p,f}(T)\} \quad (\text{Eq. 7.2.2.4})$$

$$\dot{C}_{ratio} = \frac{\dot{C}_{min}}{\dot{C}_{max}} \quad (\text{Eq. 7.2.2.5})$$

$$NTU = \frac{U_e A_e}{\dot{C}_{min}} \quad \text{equivalente a} \quad NTU = \frac{U_i A_i}{\dot{C}_{min}} \quad (\text{Eq. 7.2.2.6})$$

$$\varepsilon_{ec} = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + \dot{C}_{ratio})]}{1 + \dot{C}_{ratio}} \quad \text{ed} \quad \varepsilon_{cc} = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - \dot{C}_{ratio})]}{1 - \dot{C}_{ratio} \exp[-NTU(1 - \dot{C}_{ratio})]} \quad (\text{Eq. 7.2.2.7})$$

### 7.2.3 Metodo numeri adimensionali

$$R_{cond} = \frac{\log_e \left( \frac{d_e}{d_i} \right)}{2\pi \lambda_c(T) L N_t} \quad (\text{Eq. 7.2.3.1})$$

$$\mu(T) = \nu(T) \rho(T) \quad (\text{Eq. 7.2.3.2})$$

$$Re_t = \frac{4\dot{m}}{\pi d \mu(T)} \quad (\text{Eq. 7.2.3.3})$$

$$Re_s = \frac{\dot{m} d_{idr.eq.}}{A_f \mu(T)} \quad (\text{Eq. 7.2.3.4})$$

$$Re_{alt} = \frac{\dot{V} d_{idr.eq.}}{A_f \nu(T)} \quad (\text{Eq. 7.2.3.5})$$

$$Nu_{t,lam} = \begin{cases} 1.86 \left( \frac{d_i Re Pr(T)}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu(T)}{\mu(T_{sup})} \right)^{0.14} & Nu_{t,lam} \geq 3.66 \\ 3.66 & Nu_{t,lam} < 3.66 \end{cases} \quad (\text{Eq. 7.2.3.6})$$

$$\text{Se} \quad 0 < Re < 2300 \quad 0.48 < Pr(T) < 16700 \quad 0.0044 < \left( \frac{\mu(T)}{\mu(T_{sup})} \right) < 9.75$$

$$Nu_{t,turb} = \frac{(k_{attr}(Re)/2)(Re - 1000)Pr(T)}{1 + 12.7(k_{attr}(Re)/2)^{1/2}(Pr(T)^{2/3} - 1)} \quad \text{con} \quad k_{attr}(Re) = (1.58 \log_e(Re) - 3.28)^{-2}$$

$$\text{Se} \quad 300 < Re < 5 * 10^6 \quad 0.5 \leq Pr(T) \leq 2000 \quad (\text{Eq. 7.2.3.7})$$

$$Nu_s = 0.36 Re^{0.55} Pr(T)^{1/3} \left( \frac{\mu(T)}{\mu(T_{sup})} \right)^{0.14} \quad (\text{Eq. 7.2.3.8})$$

$$\text{Se} \quad 2000 < Re < 1 * 10^6$$

$$h = \frac{Nu \lambda_c(T)}{d_{term.eq.}} \quad (\text{Eq. 7.2.3.9})$$

$$h_{ss,tot} = h_{ss,1} + h_{ss,3} + h_{ss,1} \quad \text{ed} \quad \bar{h}_s = \frac{h_{ss,tot,in} + h_{ss,tot,out}}{2} \quad (\text{Eq. 7.2.3.10})$$

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (\text{Eq. 7.2.3.11})$$

$$T_{sup} = \bar{T} - (R_{conv,i} + R_{cond})Q \quad \text{da} \quad Q = \frac{\Delta T}{R} = \frac{\bar{T} - T_{sup}}{R_{conv,i} + R_{cond}} \quad (\text{Eq. 7.2.3.12})$$

$$R_{tot} = R_{conv,i} + R_{cond} + R_{conv,e} \quad (\text{Eq. 7.2.3.13})$$

$$U_{i,adim} = \frac{1/A_i}{R_{tot}} \quad \text{ed} \quad U_{e,adim} = \frac{1/A_e}{R_{tot}} \quad (\text{Eq. 7.2.3.14})$$

$$Q_{adim} = U_e A_e \Delta \bar{T}_{fl} \quad \text{equivalente a} \quad Q_{adim} = U_i A_i \Delta \bar{T}_{fl} \quad (\text{Eq. 7.2.3.15})$$

7.2.4 Convezione naturale esterna

$$Gr = \frac{gL^3\beta(T)|T_{sup} - T_{amb}|}{\nu^2}$$
 (Eq. 7.2.4.1)

$$Ra = GrPr(T)$$
 (Eq. 7.2.4.2)

$$Nu_{adim} = \left[ Nu_0^{1/2} + Ra^{1/6} \left( \frac{f_4(Pr(T))}{300} \right)^{1/6} \right]^2 \quad \text{con} \quad f_4(Pr(T)) = \left[ 1 + \left( \frac{0.5}{Pr(T)} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}$$
 (Eq. 7.2.4.3)

e  $Nu_0 = 0.68$  se  $Ra < 1 * 10^9$

8 Tabelle

Dati	Equi-corrente 1	Contro-corrente 1	Contro-corrente 2	Equi-corrente 1
F1 [l/h]	539.92	534.83	170.21	166.03
F2 [l/h]	562.52	568.41	574.23	578.83
T1 [°C]	15.25	15.41	15.33	15.41
T2 [°C]	51.24	51.52	51.30	51.47
T3 [°C]	24.35	24.82	33.51	33.24
T4 [°C]	41.90	41.69	45.01	45.50

Tab. 1: Valori delle variabili misurate ottenuti dall’analisi dei dati sperimentali

Dati/misure	Equi-corrente 1	Contro-corrente 1	Contro-corrente 2	Equi-corrente 1
Q <sub>fl.caldo</sub> [kW]	-6.02	-6.41	-4.14	-3.96
Q <sub>fl.freddo</sub> [kW]	5.70	5.84	3.59	3.43
ΔQ <sub>fl.caldo-fl.freddo</sub> [kW]	-0.32	-0.56	-0.55	-0.53
$\bar{Q}$ [kW]	5.86	6.12	3.86	3.70
ΔT <sub>m.l.</sub> [°C]	25.68	25.28	21.45	22.05
U <sub>int</sub> [ $\frac{kW}{m^2K}$ ]	2.6718	2.8354	2.1081	1.9629
U <sub>ext</sub> [ $\frac{kW}{m^2K}$ ]	2.1374	2.2683	1.6865	1.5703
NTU	0.3642	0.3902	0.9122	0.8708
ε	0.26	0.28	0.56	0.52

Tab. 2: Valori rilevati ottenuti mediante i calcoli ingegneristici effettuati (metodo ε-NTU)

Dati/misure	Equi-corrente 1	Contro-corrente 1	Contro-corrente 2	Equi-corrente 1
Re <sub>int</sub>	8475	8567	8892	9013
h <sub>int</sub> [ $\frac{W}{m^2K}$ ]	4303.85	4346.33	4458.61	4505.98
λ <sub>AISI-316</sub> [ $\frac{W}{mK}$ ]	13.5644	13.5675	13.6197	13.6218
$\bar{h}_{ext}$ [ $\frac{W}{m^2K}$ ]	2650.21	2633.57	1466.46	1450.12
U <sub>int,adim</sub> [ $\frac{kW}{m^2K}$ ]	1.6666	1.6677	1.1971	1.1917
U <sub>ext,adim</sub> [ $\frac{kW}{m^2K}$ ]	1.3333	1.3341	0.9577	0.9533
Q <sub>adim</sub> [kW]	3.81	3.77	2.43	2.46
Q <sub>perso</sub> [%]	5.4	8.8	13.3	13.4
ΔCalc(Q) [%]	35.0	38.4	37.2	33.5
Q <sub>perso,vetro</sub> [%]				

Tab. 3: Valori rilevati ottenuti mediante i calcoli ingegneristici effettuati (metodo numeri adimensionali)

Dati/misure	Equi-corrente 1	Contro-corrente 1	Contro-corrente 2	Equi-corrente 1
Gr <sub>ext</sub>	338032689	26692070	70486373	68353765
Ra <sub>ext</sub>	24114245	19041327	50282878	48761539
λ <sub>pyrex</sub> [ $\frac{W}{mK}$ ]	1.1318	1.1320	1.1343	1.1342
Q <sub>perso,vetro</sub> [W]	3.14	2.32	-7.79	-7.49

Tab. 4: Valori rilevati ottenuti mediante i calcoli ingegneristici effettuati (analisi convezione naturale)

9 Immagini e grafici

Riferimenti bibliografici

[1] Joey Bernard. *Python Data Analysis with pandas*, pages 37–48. Apress, Berkeley, CA, 2016.



Fig. 1: *Dati sperimentali analizzati dallo scambiatore di calore e rilevamento delle diverse misure*

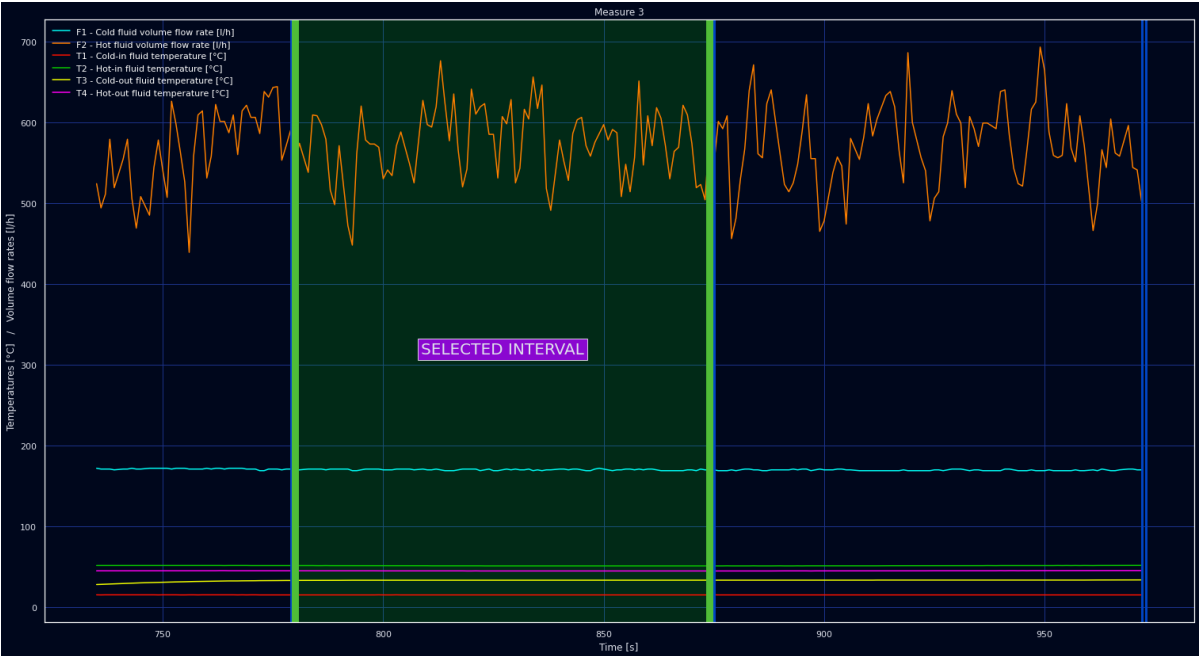


Fig. 2: *Scelta del miglior intervallo dati durante la terza misura (ricerca condizioni stazionarie)*

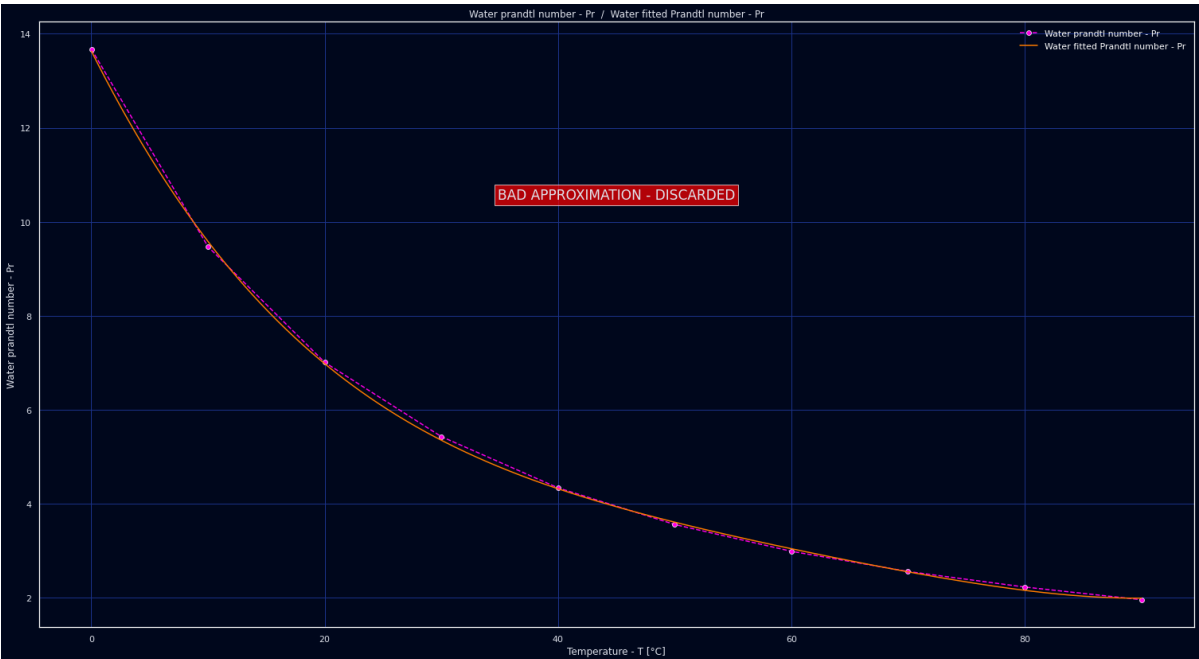


Fig. 3: *Fitting polinomiale numero di Prandtl acqua (scartato per approssimazione insoddisfacente)*

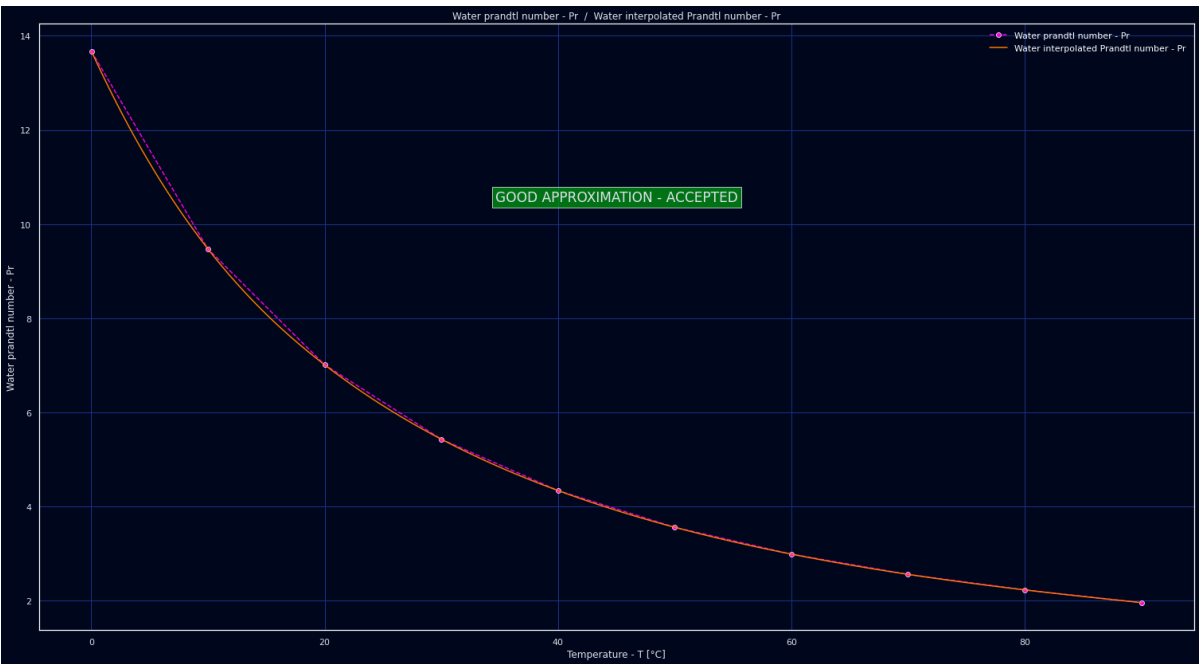


Fig. 4: *Interpolazione polinomiale numero di Prandtl acqua (accettata, buona approssimazione)*

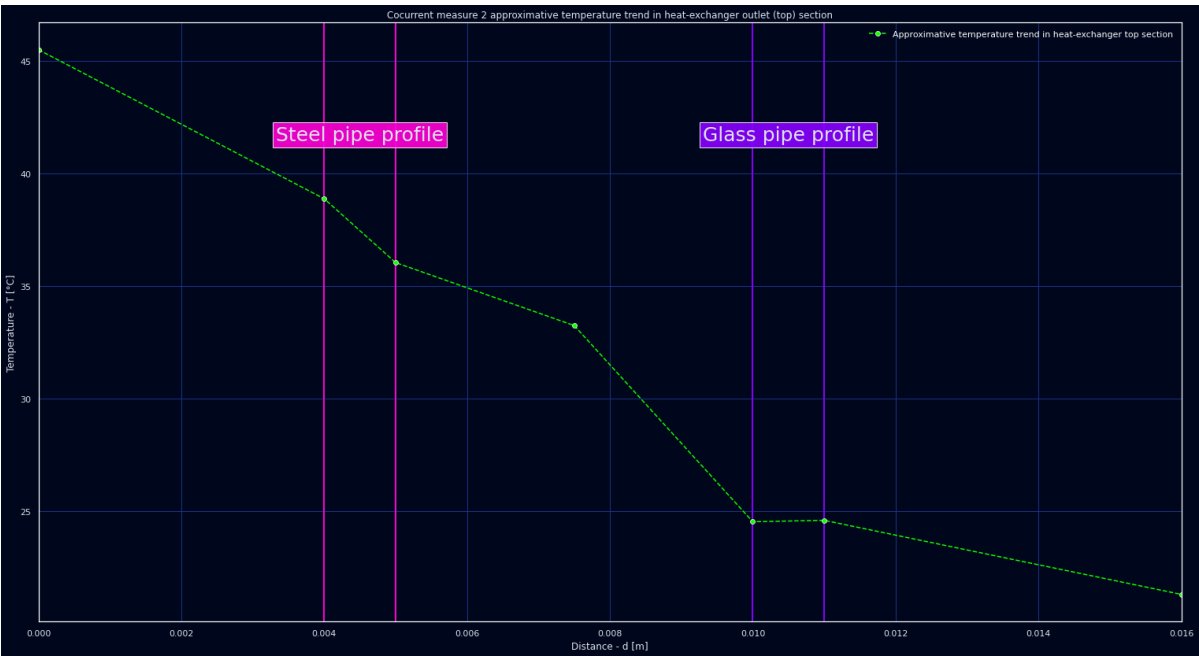


Fig. 5: *Alcune temperature nella parte superiore dello scambiatore durante la seconda misura in equi-corrente*

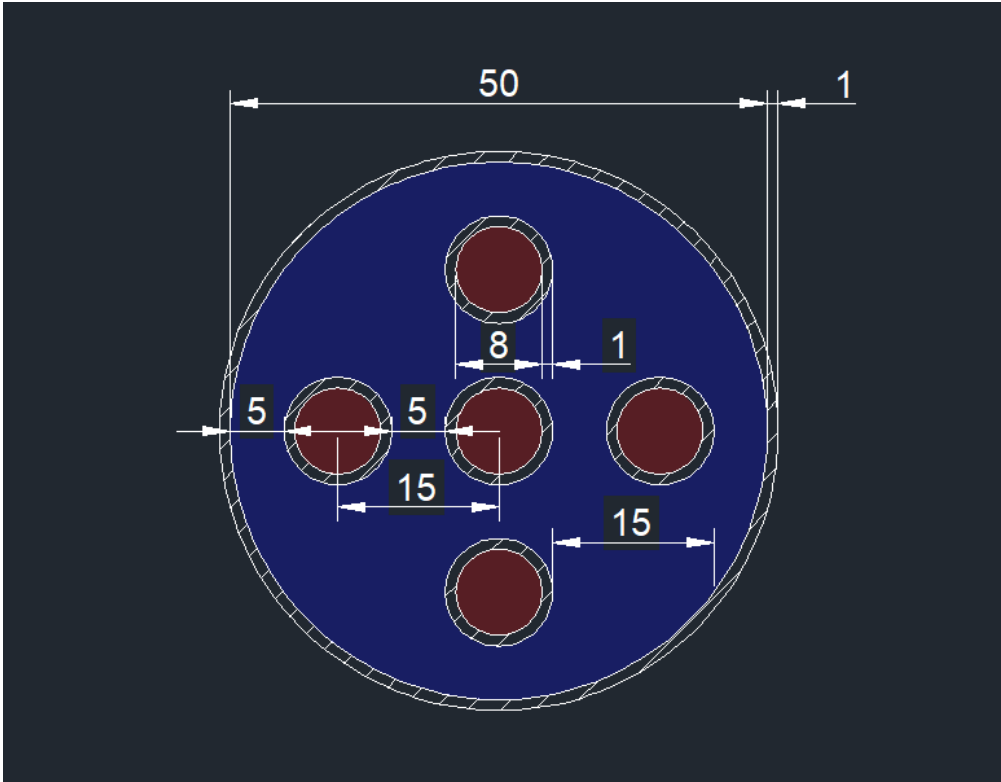


Fig. 6: *Dimensioni scambiatore di calore utilizzate per calcolo dei diametri equivalenti (creata da autocad)*