

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

4.1 Fase preliminare 2

4.2 Definizione valori e creazione strutture dati 2

5 Calcoli ingegneristici 3

5.1 Approssimazione polinomiale variabili termofisiche 3

5.2 Definizione dettagli scambiatore di calore e calcoli preliminari 3

5.3 Trasferimento di calore 3

5.4 Metodo epsilon-NTU 3

5.5 Metodo numeri adimensionali 3

5.6 Convezione naturale esterna 3

6 Conclusioni 3

7 Formule 3

7.1 Formule analisi dati 3

7.1.1 Scelta miglior intervallo dati con condizioni stazionarie 3

7.2 Formule calcoli ingegneristici 3

7.2.1 Trasferimento di calore 3

7.2.2 Metodo epsilon-NTU 4

7.2.3 Metodo numeri adimensionali 4

7.2.4 Convezione naturale esterna 5

8 Tabelle 5

9 Immagini e grafici 6

Riferimenti bibliografici 8

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 identificare 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

4.1 Fase preliminare

Per prima cosa, dopo aver auto-inizializzato l'ambiente, il codice esegue delle operazioni preliminari prima di procedere con l'analisi dati vera e propria. In sequenza, il file contenente le misure sperimentali, viene caricato e rielaborato dal software, creando un file CSV appositamente formattato ([file-DAT](#), [file-CSV](#)). Quest'ultimo, a sua volta convertito in un database, viene utilizzato come sorgente dati da cui attingere, al fine di estrapolare informazioni per compiere operazioni di filtraggio e di calcolo. Il programma, identifica quindi in maniera autonoma le diverse misure all'interno del database, ripulendo anche dati corrispondenti ad "altre operazioni", per poi mostrare il tutto graficamente evidenziando le finestre dati corrispondenti alle misure stesse [Fig. 1].

4.2 Definizione valori e creazione strutture dati

Conclusa questa fase preliminare, vengono automaticamente richiamate le istruzioni di analisi dati vera e propria. Tali istruzioni hanno come scopo principale, quello di ottenere i valori numerici delle diverse variabili misurate, per ogni misura: temperature e portate volumetriche. Il tutto, cercando di ricavare valori numerici significativi, per poter successivamente svolgere i calcoli ingegneristici richiesti. In particolare essendo le equazioni utilizzate, valide sotto condizioni di stazionarietà, il software sceglie intervalli dati che soddisfino al meglio tali requisiti. Nello specifico, ciò avviene mediante l'implementazione informatica dell'equazione [Eq. 7.1.1.1], utilizzata per identificare gli intervalli dati, da cui ricavare il valore medio delle variabili rilevate sperimentalmente. Anche in questo caso, le operazioni vengono rappresentate graficamente, come mostrato ad esempio per la prima misura [Fig. 2], in cui viene evidenziato l'intervallo selezionato. Vengono quindi creati in maniera autonoma, degli oggetti informatici di tipo "misura", i quali ne conterranno tutte le informazioni. In fase di creazione della lista di oggetti "misura", ne viene auto-determinata la tipologia (equi-corrente o contro-corrente) in base al testo di descrizione, e vengono popolate le variabili corrispondenti ai valori delle misure, riportati anche nella tabella dedicata [Tab. 1]. Questi oggetti, hanno inoltre lo scopo di contenere tutti i risultati dei calcoli ingegneristici raggruppati per misura, in modo da poter essere facilmente richiamati nelle formule di calcolo e poter essere stampati a video o esportati su file, in maniera rapida e ordinata.

5 Calcoli ingegneristici

5.1 Approssimazione polinomiale variabili termofisiche

Al fine di ottenere risultati il più possibile veritieri, anche le variabili termofisiche dei materiali/fluidi costituenti o interagenti con l'apparato di scambio termico, sono state approssimate polinomialmente in funzione della temperatura. I dati di partenza utilizzati per approssimare l'andamento delle diverse proprietà con la temperatura, derivano da diverse fonti ufficiali ed affidabili. Nel dettaglio, i dati riguardanti i fluidi: aria ed acqua, sono stati forniti dal docente sottoforma di tabelle (pdf), poi trascritte in file CSV ed importate sottoforma di database. Procedura analoga, anche per i materiali costituenti lo scambiatore: acciaio inox AISI-316 (tubi interni) e vetro borosilicato (pyrex, tubo esterno), i cui dati sono però derivanti da fonti online. Di seguito, sono riportate nel dettaglio, le fonti dati utilizzate:

- **proprietà aria a pressione atmosferica:** prima tabella all'interno del file pdf ([file-PDF](#), [file-CSV](#)).
- **proprietà acqua:** seconda tabella all'interno del file pdf ([file-PDF](#), [file-CSV](#)).
- **proprietà AISI-316:** fonte <http://www.inductor-jmag.ru/files/content/a129160.pdf> pagina 28 pdf, Table 4 (pagina 21 file) ([file-PDF](#), [file-CSV](#)).
- **proprietà vetro pyrex:** fonte <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/RPT/nbsreport7836.pdf> pagina 39 pdf, Table 6 (pagina 16 file) ([file-PDF](#), [file-CSV](#)).

5.2 Definizione dettagli scambiatore di calore e calcoli preliminari

XSAHxsjhsavxsgavsxgh

5.3 Trasferimento di calore

XSAHxsjhsavxsgavsxgh

5.4 Metodo epsilon-NTU

XSAHxsjhsavxsgavsxgh

5.5 Metodo numeri adimensionali

XSAHxsjhsavxsgavsxgh

5.6 Convezione naturale esterna

XSAHxsjhsavxsgavsxgh

6 Conclusioni

XSAHxsjhsavxsgavsxgh

7 Formule

7.1 Formule analisi dati

7.1.1 Scelta miglior intervallo dati con condizioni stazionarie

$$I_{m,condiz.staz.} = \{I_m(s_{min}) : s_{min} = \min_{\forall I_m \in m} s_{I_m}\}$$

con $s_{I_m} = \frac{1}{k_m} \sum_{j=1}^{k_m} s_j$ ed $s_j = \sqrt[2]{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$ (Eq. 7.1.1.1)

7.2 Formule calcoli ingegneristici

7.2.1 Trasferimento di calore

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$Nu_{t,turb} = \frac{(k_{attr}(Re)/2)(Re - 1000)Pr(T)}{1 + 12.7(k_{attr}(Re)/2)^{1/2}(Pr(T)^{2/3} - 1)} \quad (\text{Eq. 7.2.3.7})$$

con $k_{attr}(Re) = (1.58 \log_e(Re) - 3.28)^{-2}$

$$\Leftrightarrow \quad 300 < Re < 5 * 10^6 \quad 0.5 \leq Pr(T) \leq 2000$$

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

$$\Leftrightarrow \quad 2000 < Re < 1 * 10^6$$

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

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

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

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

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

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

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

7.2.4 Convezione naturale esterna

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

$$Ra = GrPr(T) \quad (\text{Eq. 7.2.4.2})$$

$$Nu_{adim} = \left[Nu_0^{1/2} + Ra^{1/6} \left(\frac{f_4(Pr(T))}{300} \right)^{1/6} \right]^2$$

(Eq. 7.2.4.3)

$$\text{con} \quad f_4(Pr(T)) = \left[1 + \left(\frac{0.5}{Pr(T)} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}$$

e $Nu_0 = 0.68 \quad \Leftrightarrow \quad Ra < 1 * 10^9$

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 _{fl.caldo} [kW]	-6.02	-6.41	-4.14	-3.96
Q _{fl.freddo} [kW]	5.70	5.84	3.59	3.43
ΔQ _{fl.caldo-fl.freddo} [kW]	-0.32	-0.56	-0.55	-0.53
Q̄ [kW]	5.86	6.12	3.86	3.70

Tab. 2: Valori rilevanti ottenuti mediante i calcoli ingegneristici effettuati (potenze termiche scambiate)

Dati/misure	Equi-corrente 1	Contro-corrente 1	Contro-corrente 2	Equi-corrente 1
ΔT _{m.l.} [°C]	25.68	25.28	21.45	22.05
U _{int} [$\frac{kW}{m^2K}$]	2.6718	2.8354	2.1081	1.9629
U _{ext} [$\frac{kW}{m^2K}$]	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. 3: Valori rilevanti ottenuti mediante i calcoli ingegneristici effettuati (metodo ε-NTU)

Dati/misure	Equi-corrente 1	Contro-corrente 1	Contro-corrente 2	Equi-corrente 1
Re _{int}	8475	8567	8892	9013
h _{int} [$\frac{W}{m^2K}$]	4303.85	4346.33	4458.61	4505.98
λ _{AlSi-316} [$\frac{W}{mK}$]	13.5644	13.5675	13.6197	13.6218
h _{ext} [$\frac{W}{m^2K}$]	2650.21	2633.57	1466.46	1450.12
U _{int,adim} [$\frac{kW}{m^2K}$]	1.6666	1.6677	1.1971	1.1917
U _{ext,adim} [$\frac{kW}{m^2K}$]	1.3333	1.3341	0.9577	0.9533
Q _{adim} [kW]	3.81	3.77	2.43	2.46

Tab. 4: Valori rilevanti ottenuti mediante i calcoli ingegneristici effettuati (metodo numeri adimensionali)

Dati/misure	Equi-corrente 1	Contro-corrente 1	Contro-corrente 2	Equi-corrente 1
Gr_{ext}	338032689	26692070	70486373	68353765
Ra_{ext}	24114245	19041327	50282878	48761539
$\lambda_{pyrex} [\frac{W}{mK}]$	1.1318	1.1320	1.1343	1.1342
$Q_{perso, vetro} [W]$	3.14	2.32	-7.79	-7.49

Tab. 5: Valori rilevanti ottenuti mediante i calcoli ingegneristici effettuati (analisi convezione naturale)

Dati/misure	Equi-corrente 1	Contro-corrente 1	Contro-corrente 2	Equi-corrente 1
$Q_{perso} [\%]$	5.4	8.8	13.3	13.4
$Q_{perso, vetro} [\%]$	1.0	0.4	1.4	1.4
$\Delta Calc(Q) [\%]$	35.0	38.4	37.2	33.5

Tab. 6: Valori percentuali calcolati

9 Immagini e grafici

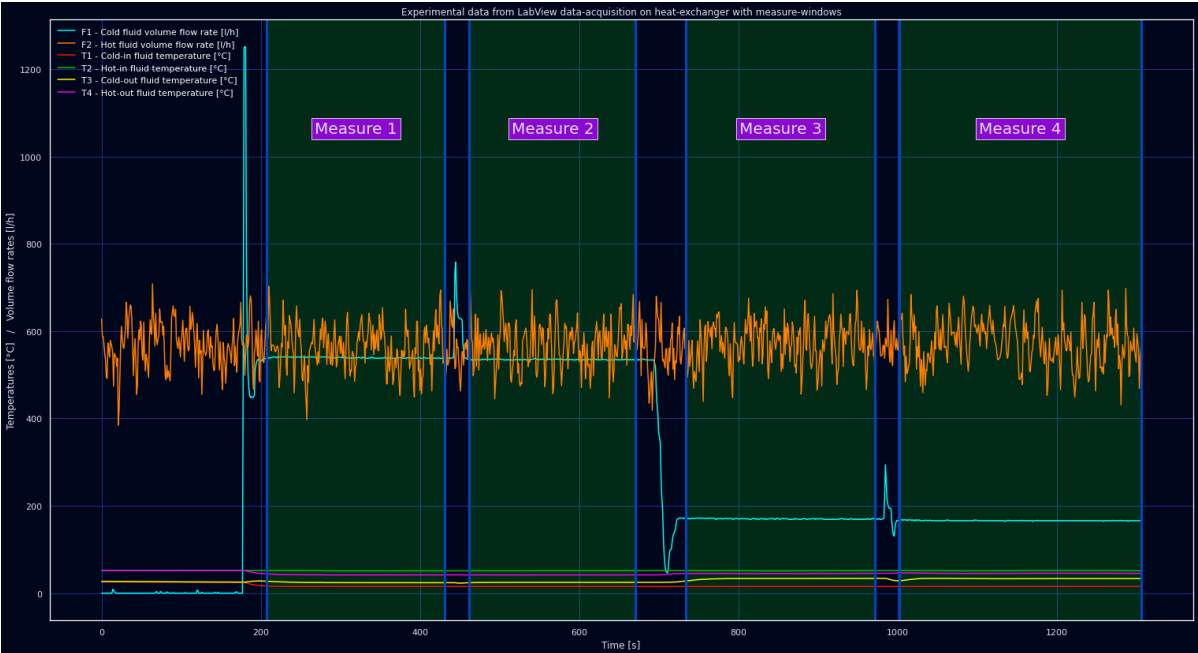


Fig. 1: Dati sperimentali analizzati dallo scambiatore di calore e rilevamento delle diverse misure

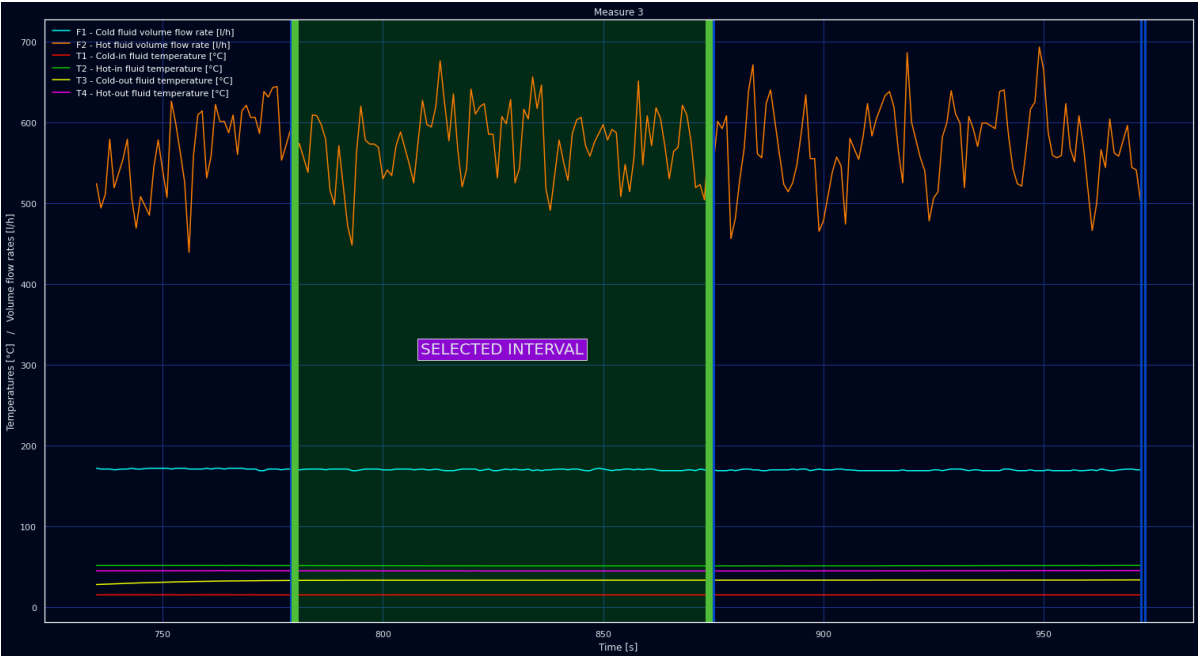


Fig. 2: Scelta del miglior intervallo dati durante la terza misura (ricerca condizioni stazionarie)

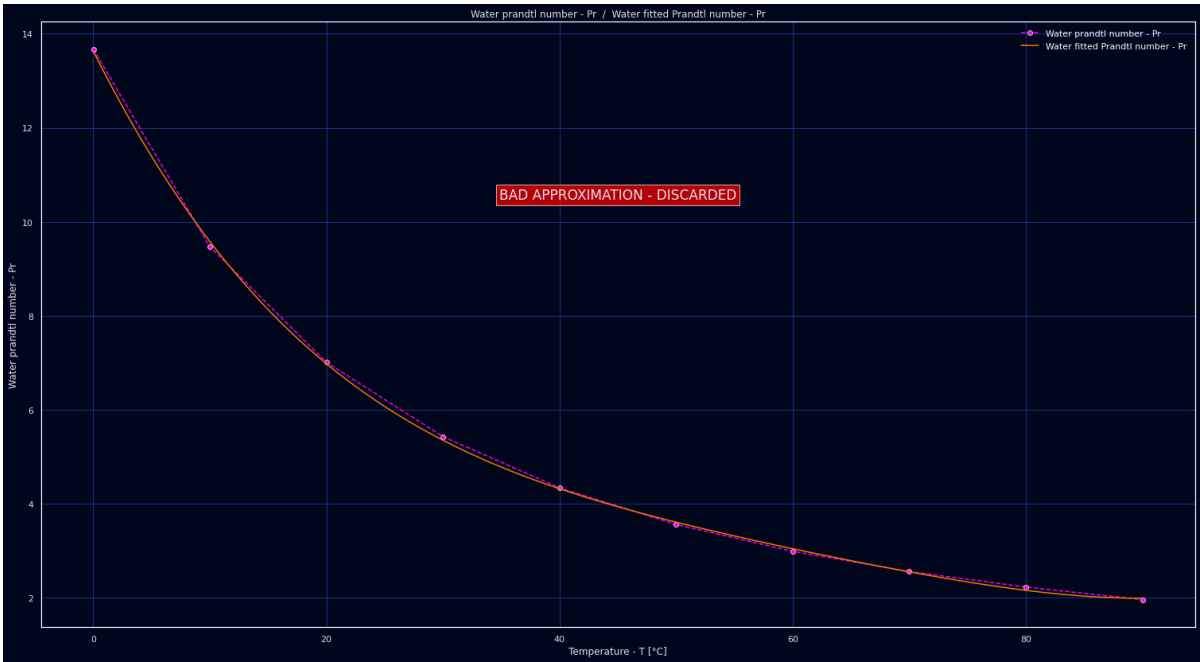


Fig. 3: *Fitting polinomiale numero di Prandtl acqua (scartato per approssimazione insoddisfacente)*

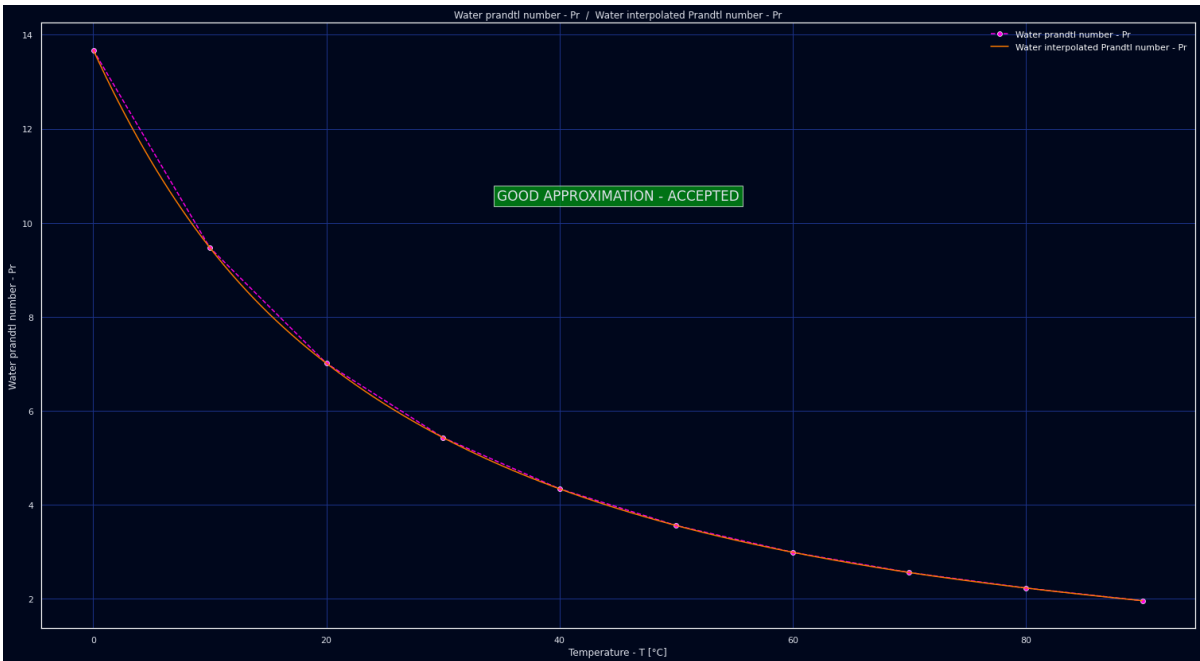


Fig. 4: *Interpolazione polinomiale numero di Prandtl acqua (accettata, buona approssimazione)*

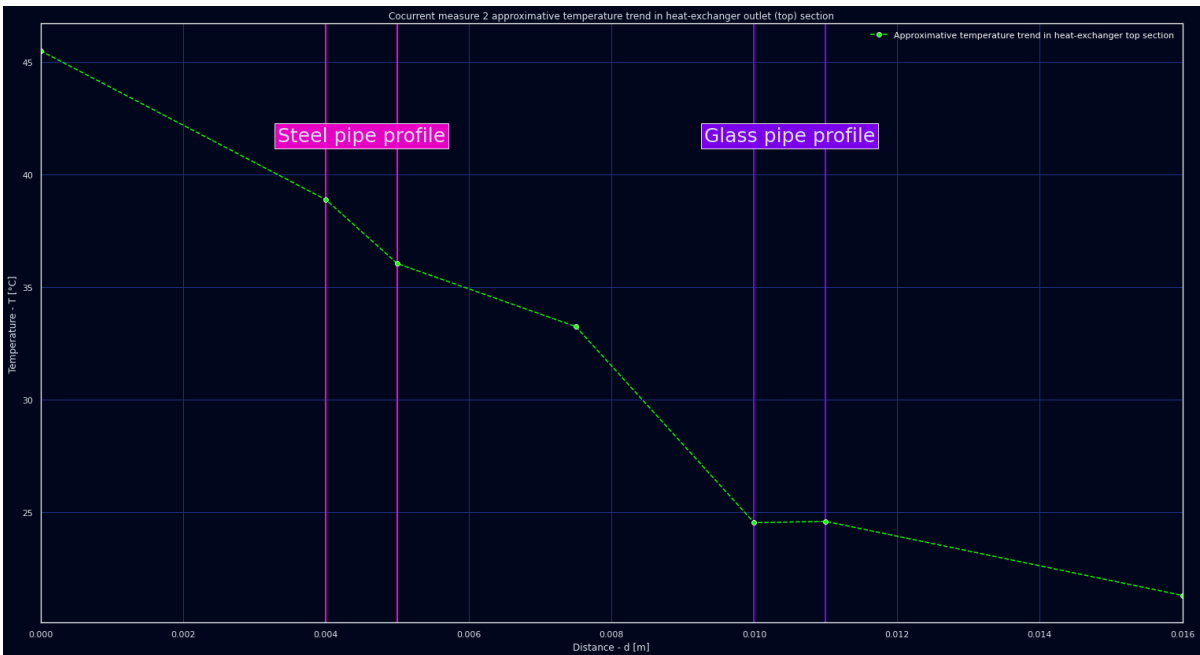


Fig. 5: *Alcune temperature nella parte superiore dello scambiatore durante la seconda misura in equi-corrente*

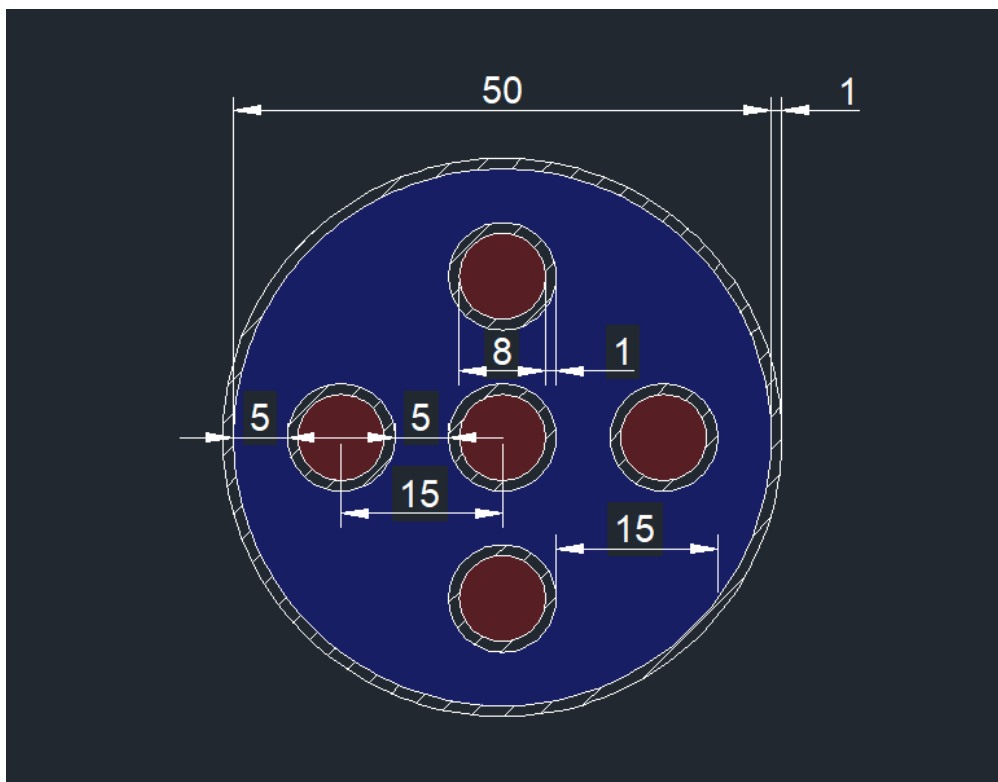


Fig. 6: *Dimensioni scambiatore di calore utilizzate per calcolo dei diametri equivalenti (creata da autocad)*

Riferimenti bibliografici

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