



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Modello per il tracciamento automatico di reti di scambiatori di calore

RELATORI

Prof. Vittorio Verda

Prof. Elisa Guelpa

CANDIDATO

Andrea Bava

Anno accademico 2018/2019

*A chi ha curato la terra,
chi ha protetto il germoglio,
chi lo ha fatto crescere.
Io tengo la corteccia,
a voi lascio i frutti.*

Ringraziamenti

Un giorno di tanti anni fa, qualcuno, non ricordo bene chi a dire il vero, mi spiegò delle cose interessanti sulla tartaruga *caretta caretta*. Mi dissero che le uova venivano depositate in spiaggia, sottoterra, e dopo circa due mesi, all'improvviso, si schiudevano quasi tutte contemporaneamente. Dopodichè, i piccoli impiegavano, chi un paio di giorni, chi una settimana a raggiungere l'acqua, sempre che non incontrassero sfortunatamente per loro, un predatore pronto ad approfittare della loro debolezza. A quel punto stupito chiesi: "come mai c'è tanta differenza? Voglio dire, nascono tutti insieme, non dovrebbero raggiungere l'acqua contemporaneamente?". A dire il vero, maledico ancora oggi la mia distrazione e la mia memoria perché non ricordo più la risposta, anche se, la cosa che mi stupì ancor di più fu il fatto che esse ricordino perfettamente per tutta la vita il luogo dove sono nate per poterci ritornare da adulte dopo aver vagato miglia e miglia nei mari e negli oceani.

Mi piace pensare di essere un po' come una di quelle tartarughe che anni fa raggiunse il mare per ultima, partendo con molte difficoltà e che ogni anno ritorna su quella spiaggia, dove tutto è partito, per non dimenticare mai quanta strada ha fatto, ed ogni volta, specchiandosi nell'acqua, si ritrova con la corazza più spessa. A differenza delle tartarughe, nel mio "mare", ci sono state molte persone in questi ultimi anni, da cui ho potuto trarre molti insegnamenti (anche se a loro non l'ho mai detto).

Grazie ai miei genitori per avermi insegnato i veri valori della vita, solide basi a cui non rinuncerò mai.

Grazie a Silvia per avermi insegnato l'importanza di credere in sé stessi e per essere stata la mia corazza quando ero senza difese. Sei e continuerai a lungo ad essere per me un esempio.

Grazie agli amici di una vita per avermi insegnato che ci si può ritrovare senza mai perdersi.

Grazie agli amici conosciuti in questi anni al poli per avermi insegnato quanto è importante imparare con il sorriso e quanto importante sia l'aiuto reciproco, soprattutto se sono loro le tartarughe più veloci. Un grazie particolare va ad Adri per avermi insegnato l'importanza di cambiare kebabbaro ogni tanto.

Grazie a tutte le persone che, negli anni, mi hanno dedicato anche solo un secondo del loro tempo per qualsiasi ragione, non vi dimentico.

Infine, grazie ai miei relatori Vittorio Verda ed Elisa Guelpa, per aver creduto in me e per essere stati sempre disponibili ed avermi lasciato la massima libertà nello svolgimento della tesi, con una costante supervisione.

Sommario

RINGRAZIAMENTI	3
SOMMARIO	4
INTRODUZIONE	6
CAPITOLO 1 – GENERALITA’ SULLA PINCH ANALYSIS	9
1.1 DEFINIZIONE E AMBITI APPLICATIVI	10
1.2 VINCOLI E ASPETTI FONDAMENTALI DELL’ANALISI	11
1.3 INSERIMENTO IN TABELLA DEI DATI UTILI	12
1.4 DETERMINAZIONE DEL FABBISOGNO MINIMO E DEL PINCH POINT	13
1.5 TRACCIAMENTO DELLA RETE DI SCAMBIATORI DI CALORE	21
CAPITOLO 2 – IL MODELLO CREATO IN MATLAB	30
2.1 CALCOLO DEL FABBISOGNO MINIMO	31
2.1.1 Inserimento dei dati	32
2.1.2 Temperature fittizie ed inserimento nella matrice di calcolo	33
2.1.3 Fabbisogni minimi e pinch point	37
2.2 DIVISIONE IMPIANTO IN SOPRA E SOTTO PINCH POINT	40
2.2.1 Inserimento in matrice dei flussi divisi	41
2.2.2 Controllo della numerosità dei fluidi	45
2.3 TRACCIAMENTO DELLA RETE SOPRA AL PINCH POINT	46
2.3.1 Costruzione matrice delle possibilità	46
2.3.2 Creazione matrice con gli indici delle possibili combinazioni	48
2.3.3 Tracciamento della rete	54
2.4 TRACCIAMENTO DELLA RETE SOTTO AL PINCH POINT	66
2.4.1 Costruzione matrice delle possibilità	66
2.4.2 Creazione matrice con gli indici delle possibili combinazioni	67
2.4.3 Tracciamento della rete	69
2.5 MATRICI DEI RISULTATI DEFINITIVI	76
2.6 RAPPRESENTAZIONE GRAFICA	79

CAPITOLO 3 – ESEMPI APPLICATIVI	86
3.1 ESEMPIO A	87
3.2 ESEMPIO B	92
3.3 ESEMPIO C	95
3.4 ESEMPIO D	99
3.5 ESEMPIO E	103
3.6 ESEMPIO F	108
CAPITOLO 4 – CONCLUSIONI	114
BIBLIOGRAFIA	117

Introduzione

La civiltà umana, nel corso dei millenni, è stata naturalmente portata ad ampliare i propri orizzonti. Inizialmente le popolazioni si spostavano in cerca di cibo, viaggiando continuamente per poter sopravvivere. Successivamente qualcuno ha iniziato a chiedersi come poter rimanere nello stesso posto per non dover ricostruire da capo la propria vita continuamente, così nacque l'agricoltura. Con il tempo l'uomo iniziò a farsi sempre più domande e di qualsiasi genere. È proprio da queste domande che nacquero le più importanti discipline: matematica, astronomia, fisica, filosofia, medicina per citare le più note. Queste costituirono la solida base da cui si svilupparono numerose altre attività ed è da queste che siamo arrivati fino ai giorni nostri, anzi, per essere più precisi, all'inizio del secolo scorso.

È ben noto come il Novecento sia stato uno dei secoli più bui della storia dell'umanità, non solo per il verificarsi delle due guerre mondiali, ma anche dal punto di vista del concetto di sviluppo. Qualsiasi attività scientifica fu finalizzata al solo scopo di produrre un "qualcosa" utilizzabile in ambito militare e quindi con l'obiettivo di distruggere. Tutto ciò è incredibile se pensiamo che il concetto stesso di sviluppo è molto più legato al concetto di creazione che al concetto di distruzione ed è proprio l'avvicinarsi di due mondi in antitesi che può portare all'avvenire di situazioni tragiche.

Dopo la metà del Novecento lo sviluppo, inteso in senso buono, ripartì, ma questa volta ad una velocità incredibilmente superiore rispetto al passato, quasi a voler recuperare il tempo perso e d'improvviso ci si ritrovò tra le mani un potenziale difficilmente gestibile e forse, solo oggi iniziamo a renderci conto di quanto questo sia stato gestito malamente e di quanto il concetto di sviluppo, in quanto a priorità, sia stato sostituito poco a poco da quello di sostenibilità.

Per quanto riguarda il settore energetico, in particolare, ci si è ritrovati di fronte ad uno spreco incredibile di risorse prodotte che venivano solo parzialmente utilizzate con delle conseguenze negative dal punto di vista ambientale e dal punto di vista economico. Pertanto, si sono sviluppate negli ultimi anni alcune tecniche per cercare di utilizzare al meglio le risorse energetiche a nostra disposizione.

Questo lavoro è strettamente legato a questa tematica, in particolare al concetto di ottimizzazione che consiste nella determinazione del massimo o del minimo di una funzione obiettivo agendo sul valore di una o più variabili indipendenti [1].

In questo caso la funzione obiettivo è di natura termodinamica e consiste nella minimizzazione del fabbisogno di energia dall'esterno in impianti industriali in cui sono presenti fluidi di lavoro che necessitano di riscaldamento o raffreddamento.

In particolare, l'obiettivo di questo lavoro, consiste nel creare un modello, tramite programmazione in MatLab, in grado di tracciare per un elevato numero di impianti, la rete di scambiatori di calore che consenta di ottenere il massimo recupero termico dai fluidi caldi presenti nell'impianto stesso cedendo il calore ai fluidi freddi che necessitano di riscaldamento.

Il programma, innanzitutto, dovrà permettere di calcolare il minimo fabbisogno in termini di "caldo" e di "freddo" di cui necessita l'impianto in esame, fornendo all'utente i risultati

tramite un istogramma e tramite linea di comando. Dopodiché, alla fine dell'analisi, fornirà un grafico in cui verrà rappresentata la configurazione della rete di scambiatori di calore con annesse temperature dei fluidi e flussi scambiati, che consente di ottenere questi fabbisogni minimi calcolati in precedenza.

In aggiunta verranno anche riportati i riscaldatori ed i raffreddatori che rappresentano il quantitativo di calore e di freddo da fornire tramite vettori energetici esterni all'impianto. L'obiettivo sarà quello di rendere il programma il più generale possibile, cercando di comprendere un numero elevato di casi. Per valutare questo aspetto, alla fine della scrittura del codice, si sono presi in considerazione un elevato numero di impianti in cui può essere effettuato un recupero termico.

La tecnica utilizzata in questo modello è denominata "pinch analysis". È molto utilizzata in questo ambito, in quanto consente di valutare la miglior configurazione della rete di scambiatori di calore per il recupero termico ed è utilizzabile per un elevato numero di casi studio.

Nel seguito si andranno ad analizzare gli aspetti teorici relativi all'analisi e successivamente si andranno a descrivere le varie sezioni del programma per poi arrivare all'esaminare i risultati trovati prendendo in considerazione alcuni esempi pratici.

Capitolo 1

Generalità sulla teoria della pinch analysis

1.1 Definizione e ambiti applicativi

In ambito industriale, vi sono determinati processi che per ragioni di produzione necessitano la fornitura di calore e/o freddo, in altri termini è necessario scaldare e/o raffreddare determinati fluidi all'interno dell'impianto. La soluzione più immediata consiste nel soddisfare questo fabbisogno attraverso dei vettori energetici derivanti da risorse esterne all'impianto, ad esempio utilizzando un combustibile come il gas naturale per riscaldare i fluidi che devono essere portati ad una temperatura maggiore rispetto a quella di ingresso nell'impianto, oppure utilizzando energia elettrica per alimentare un ciclo frigorifero in modo da raffreddare i fluidi che devono uscire ad una temperatura inferiore rispetto a quella di ingresso.

Questo tipo di soluzione è possibile, ma poco conveniente da diversi punti di vista. In primo luogo è necessario utilizzare risorse energetiche di pregio che quindi comportano un costo non indifferente in impianti industriali di grossa taglia e in secondo luogo l'utilizzo di fonti fossili contribuirebbe all'aumento della produzione di anidride carbonica e di altri componenti chimici dannosi per l'atmosfera e quindi per l'uomo.

È possibile ridurre il quantitativo di combustibile fornito dall'esterno, in molti casi, accoppiando attraverso degli scambiatori di calore i fluidi di processo che devono essere raffreddati con quelli che devono essere riscaldati con il duplice obiettivo di ridurre al minimo possibile il fabbisogno energetico da risorse esterne e di evitare che una fonte di calore ancora utilizzabile possa essere dispersa in ambiente e quindi sprecata.

La pinch analysis è una tecnica impiegata per trovare la configurazione della rete di scambiatori di calore ottimale, cioè con l'obiettivo di ottenere il minimo fabbisogno di energia dall'esterno [1]. In realtà, questa è solamente una delle funzioni obiettivo che può essere considerata, esistono altri obiettivi che possono essere perseguiti di carattere tecnico-economico che variano da caso a caso.

In questo lavoro verrà trattato il caso riguardante la minimizzazione del fabbisogno energetico dall'esterno che è uno dei casi di maggior rilevanza nella pratica.

Questo tipo di tecnica per il recupero di energia è utilizzabile in molti contesti industriali come ad esempio in centrali termoelettriche, impianti per la produzione di generi alimentari, impianti per la produzione di sostanze chimiche e impianti per la raffinazione [1]. Questo ampio range di casistiche è testimone di come ci siano molti e diversi fattori da considerare dipendentemente da impianto ad impianto e questo dimostra come sia estremamente complicata una generalizzazione totale del problema. In ogni caso esistono poche regole fondamentali di carattere tecnico e termodinamico che devono essere rispettate per ogni tipo di impianto ed è su queste che ci si è basati nella stesura del programma in oggetto.

1.2 Vincoli e aspetti fondamentali dell'analisi

1) Caratterizzazione dei fluidi

Un aspetto fondamentale dell'analisi è quello di caratterizzare completamente i fluidi coinvolti in termini di composizione chimica, portata in massa, temperatura alla quale vengono resi disponibili e temperatura alla quale devono essere portati. È necessario quindi identificare i componenti del sistema, cioè le parti dell'impianto in cui i fluidi vengono utilizzati esclusivamente per lo svolgimento del processo produttivo mentre si escludono quelli per cui lo scopo è unicamente far avvenire una variazione di temperatura, come ad esempio gli scambiatori di calore [1]. Nel processo di sintesi della rete di scambiatori di calore, le condizioni di funzionamento non vengono modificate, ciò significa che le temperature in ingresso ed uscita e le portate in massa sono fissate [1]. I fluidi che richiedono calore, cioè che devono essere portati ad una temperatura superiore rispetto a quella di ingresso vengono denominati fluidi freddi, mentre quelli che devono essere raffreddati, quindi portati ad una temperatura inferiore vengono detti fluidi caldi.

2) Differenza minima di temperatura tra fluidi caldi e freddi.

Come stabilito dal secondo principio della termodinamica, i fluidi caldi devono essere sempre ad una temperatura superiore rispetto ai fluidi freddi per permettere che ci sia lo scambio termico [1]. Pertanto è necessario definire una differenza di temperatura minima tra fluidi caldi e freddi accoppiati dallo stesso scambiatore ed è necessario che questa sia sempre mantenuta [1]. Questo per una motivazione di tipo tecnico-economico. Considerando il flusso termico scambiato in uno scambiatore di calore:

$$\Phi = A \cdot U \cdot \Delta T_{mlog}$$

Supponendo invariante il coefficiente di scambio termico U , una riduzione della differenza di temperatura comporta l'aumento dell'area di scambio termico determinando un conseguente aumento del costo dello scambiatore.

La differenza minima di temperatura va ponderata attentamente: l'utilizzo di un ΔT troppo basso comporterebbe un alto costo di investimento degli scambiatori di calore, mentre uno troppo elevato determinerebbe un peggior utilizzo della risorsa energetica [1].

Normalmente la scelta della differenza di temperatura ottimale viene di fatto basata sull'esperienza a seconda del tipo di impianto in analisi. Inoltre, questa scelta può essere notevolmente condizionata dal mercato dell'energia: se i costi dei vettori energetici, al momento dell'analisi, risultano elevati, può essere conveniente risparmiare sui costi operativi e quindi ridurre la differenza di temperatura il più possibile. Potrebbe essere utile effettuare un'analisi parametrica valutando diversi valori di ΔT scegliendo poi quello ritenuto più adatto.

3) Approssimazione dei processi di scambio termico

I meccanismi di scambio termico vengono sempre approssimati considerando i processi isobari e coinvolgenti calore sensibile a c_p costante.

Secondo queste ipotesi il flusso scambiato può essere scritto come:

$$\Phi = G \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Questo può portare a delle limitazioni nel caso in cui nell'analisi di impianti reali ci fossero processi coinvolgenti calore latente e processi in cui il calore specifico dipendesse fortemente dalla temperatura [1]. Nel primo caso, per risolvere il problema è possibile considerare una differenza di temperatura sufficientemente piccola con il quale calcolare il calore specifico:

$$c^* = \frac{\Delta h}{\Delta T}$$

È importante sottolineare che la variazione di temperatura dovrà essere positiva nel caso di condensazione e negativa nel caso di evaporazione.

Per quanto riguarda il secondo caso, per risolvere il problema è possibile suddividere l'intervallo di temperatura in esame in diversi intervalli più piccoli considerando un calore specifico medio ed in questo modo andare a calcolare il flusso scambiato:

$$\Phi = G \cdot \sum c_{p_i} \cdot \Delta T_i$$

Con queste due soluzioni è di fatto possibile tutti i casi di interesse pratico.

1.3 Inserimento in tabella dei dati utili

Per procedere con i calcoli per arrivare alla determinazione del minimo fabbisogno è utile inserire i dati necessari in una tabella in cui si specificherà:

- Il numero del fluido
- Il tipo di fluido
- La temperatura in ingresso del fluido
- La temperatura in uscita del fluido
- La capacità termica del fluido

Un esempio di tabella con dati è riportato di seguito.

N° flusso	Tipo di fluido	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	G _c [kW/K]
1	Caldo	425	115	14
2	Caldo	305	15	8
3	Freddo	55	205	28
4	Freddo	5	405	7.6

Grazie a questi dati sarà possibile calcolare il flusso termico reso disponibile dai fluidi caldi e quello di cui necessitano i fluidi freddi in modo da calcolare le opportunità di recupero termico attraverso l'accoppiamento di questi. La formula utilizzata per calcolare il flusso è quella riportata nel paragrafo precedente.

1.4 Determinazione del fabbisogno minimo e del pinch point

Il fabbisogno minimo è quello che si ottiene massimizzando il recupero termico tra i fluidi dell'impianto rispettando il vincolo fissato della differenza minima di temperatura [1]. È possibile calcolare questo fabbisogno antecedentemente al tracciamento della rete di scambiatori di calore utilizzando principalmente due metodologie, una grafica ed una algebrica.

- Metodo grafico

Per l'applicazione del metodo grafico è necessario utilizzare, come dice il nome stesso, dei grafici riportanti in ascissa il flusso termico scambiato, solitamente in kW, ed in ordinata la temperatura, solitamente in gradi Celsius.

Il primo step è quello di tracciare su questi grafici, separatamente per i fluidi caldi e per i fluidi freddi, per ogni intervallo di temperatura, il flusso reso disponibile oppure richiesto. I flussi termici vengono disposti in sequenza, quindi l'i-esimo fluido avrà come ascissa iniziale la somma dei flussi richiesti dai precedenti i-1 fluidi.

Questi, saranno la base di partenza per poi andare a costruire le curve composite.

Il grafico seguente è stato ottenuto con i dati presenti nella tabella precedente.

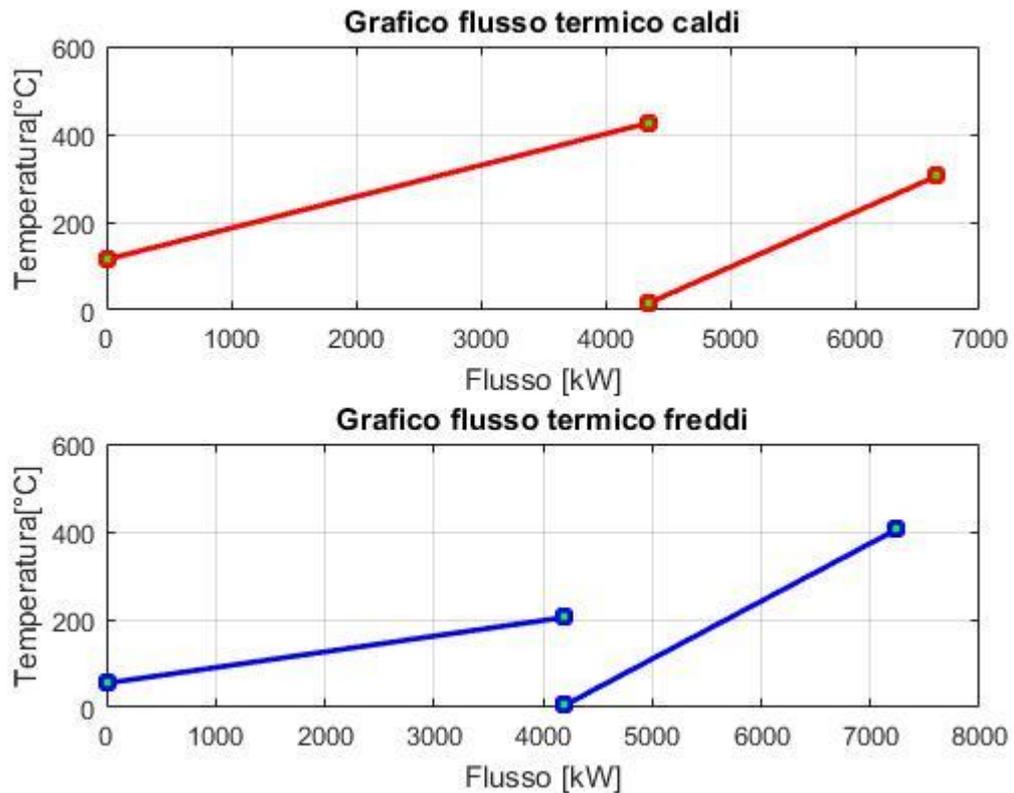


Figura 1 - Step 1 del metodo grafico

La pendenza delle curve è associata al prodotto portata per calore specifico.

$$\Phi = Gc \cdot \Delta T$$

Da cui:

$$\frac{\Delta T}{\Phi} = \frac{1}{Gc}$$

Quindi possiamo comprendere come la pendenza sia tanto più elevata quanto più è bassa la capacità termica del fluido.

Allo stesso modo, anche le curve composite sono ottenute separatamente per i fluidi caldi e per i fluidi freddi. Le curve composite, sono le curve che si otterrebbero se, per ciascun intervallo di temperatura, si miscelassero tutti i fluidi presenti [1]. Questo è pari al considerare un unico fluido caldo o un unico fluido freddo per ogni intervallo di temperatura equivalenti dal punto di vista energetico per fabbisogno e variazione di temperatura a quelli presenti nel sistema [1]. Per la costruzione, si procede, per ciascun intervallo di temperatura determinando il flusso termico complessivamente scambiato [1].

Per quanto riguarda i fluidi freddi, considerando un generico intervallo di temperatura j che vada da T_j a T_{j+1} il flusso termico richiesto da tutti i fluidi presenti è pari a [1]:

$$\Phi_{F,j} = \sum_{i=1}^{n_{freddi}} Gc_i \cdot (T_{j+1} - T_j)$$

nella quale il n_{freddi} è il numero di fluidi freddi presenti nell'intervallo j .

Per quanto riguarda i fluidi caldi, analogamente il flusso termico reso disponibile è pari a:

$$\Phi_{C,j} = \sum_{i=1}^{n_{caldi}} Gc_i \cdot (T_{j+1} - T_j)$$

nella quale n_{caldi} è il numero di fluidi caldi presenti nell'intervallo j .

A questo punto, applicando le suddette formule, le curve composite risultanti risulteranno essere le seguenti.

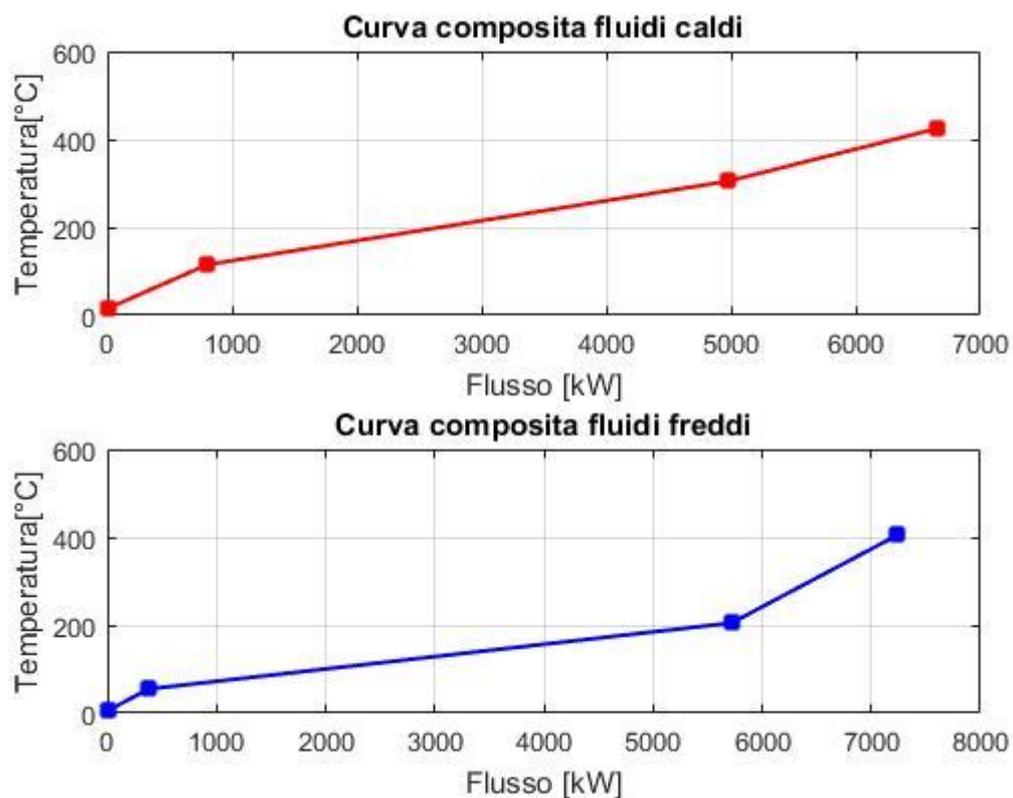


Figura 2 -Step 2 metodo grafico - curve composite

Lo step successivo consiste nel riportare le due curve sullo stesso diagramma, facendole partire dall'ascissa a flusso nullo, allo scopo di simulare lo scambio termico tra questi due fluidi ideali.

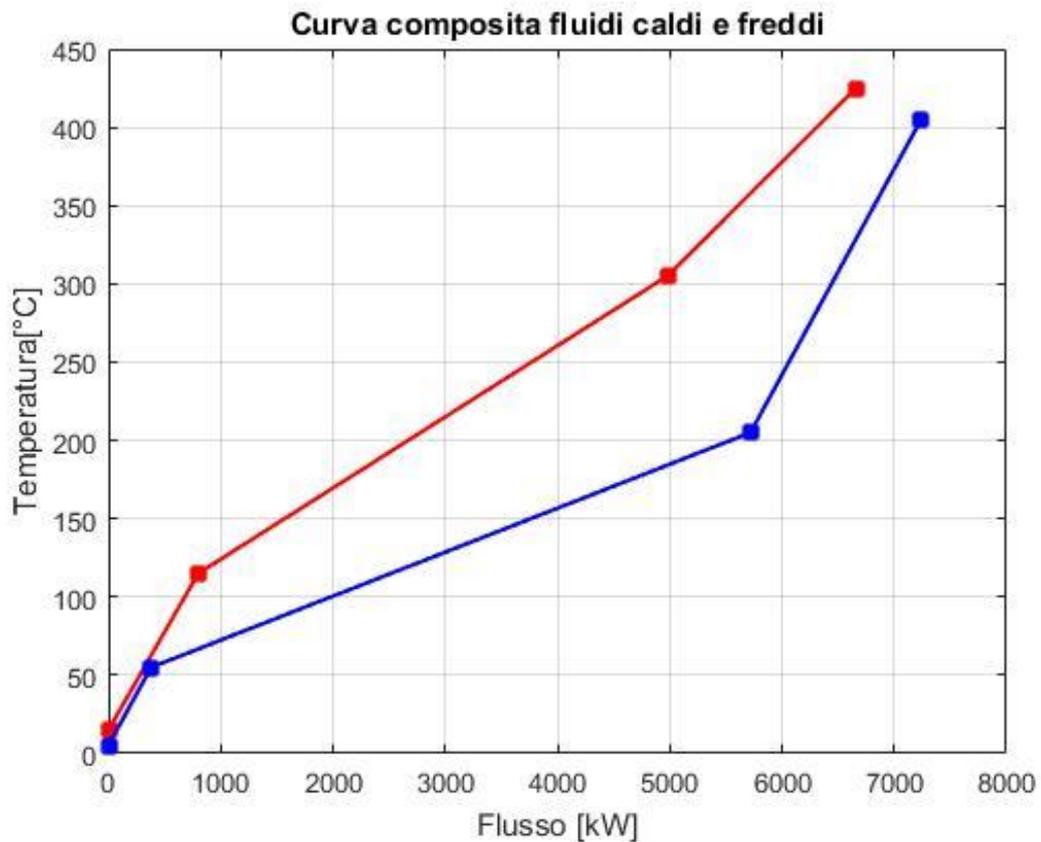


Figura 3 - Rappresentazione curve composite nello stesso grafico

Ovviamente per fare in modo che avvenga lo scambio termico tra fluido caldo e fluido freddo, la curva composta dei caldi dovrà essere in ogni punto superiore a quella dei freddi e solitamente, a differenza di questo specifico caso preso in considerazione, non avviene. Pertanto è necessario traslare la curva composta del fluido freddo orizzontalmente fino a quando non si troverà completamente sotto a quella dei fluidi caldi. All'inizio dell'analisi, è stato posto l'ulteriore vincolo della differenza di temperatura minima, pertanto è necessario traslare ulteriormente la curva dei freddi fintanto che nel punto più vicino alla curva dei caldi non si sarà raggiunto il ΔT minimo.

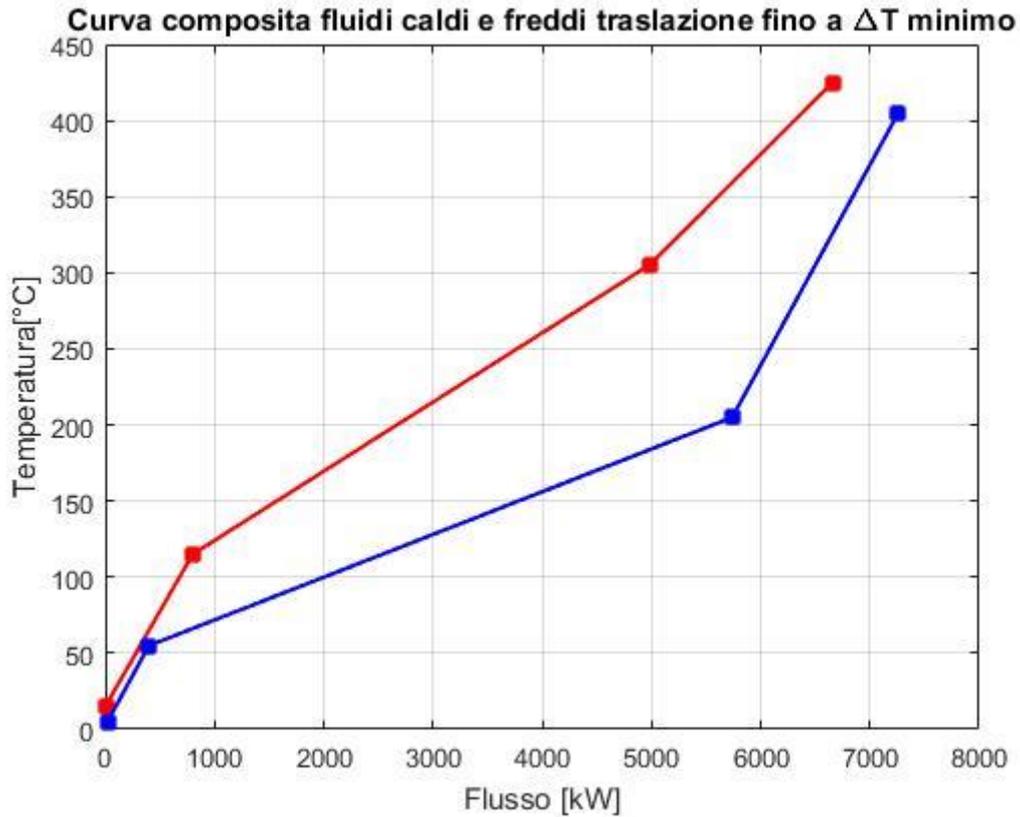


Figura 4 - Curve composite con traslazione della curva composta dei freddi

In questo caso la differenza è minima rispetto alla precedente, ma la curva composta dei freddi è stata traslata quanto basta per rispettare il vincolo di differenza minima di temperatura imposto. Per apprezzare meglio la traslazione viene riportato un ingrandimento della zona tra la parte iniziale delle curve ed il punto in cui si ha la massima vicinanza tra le due curve.

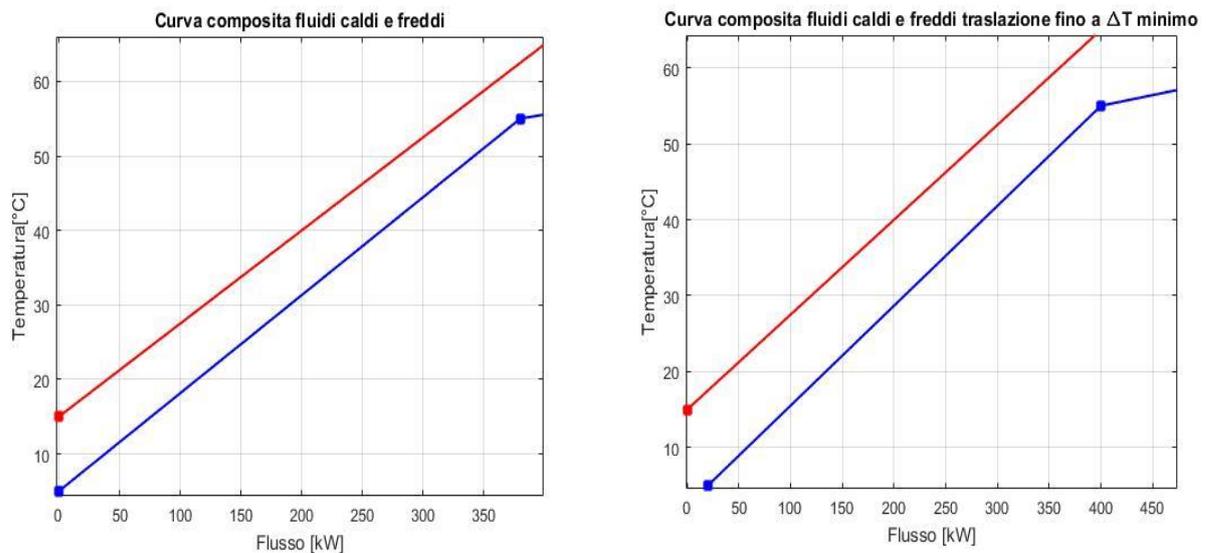


Figura 5 - Ingrandimento curve composite nel pinch point

Con riferimento alla figura 4, è possibile individuare tre intervalli di ascisse. Un primo tratto, più apprezzabile nella figura 5, nel quale sono presenti esclusivamente fluidi caldi (da 0 a 20 kW), un tratto centrale nel quale sono presenti entrambi i fluidi ed un tratto finale in cui sono presenti unicamente fluidi freddi.

Concentrandosi unicamente sul tratto centrale, dove sono presenti entrambi i fluidi, sarà possibile il trasferimento del flusso termico reso disponibile dai fluidi. Il flusso termico assorbito sarà pari a quello ceduto. Quindi la lunghezza delle linee sulle ascisse, con riferimento al tratto centrale, sarà pari al flusso termico recuperato internamente all'impianto.

Nel tratto a destra, dove è presente solo il fluido freddo, si avrà necessità di calore che non potrà essere fornito dai fluidi caldi, in quanto non presenti in questa parte del diagramma. Pertanto questo calore dovrà essere fornito dall'esterno e corrisponderà al fabbisogno minimo di calore.

Analogamente, nel tratto a sinistra, dove è presente solo il fluido caldo, avrò necessità di raffreddamento che non potrà essere fornito dai fluidi freddi in quanto non presenti. Pertanto questo fabbisogno di freddo dovrà essere fornito tramite risorse esterne e corrisponderà al fabbisogno minimo di freddo del sistema.

Il punto più importante del diagramma è quello in cui le due curve hanno la minima differenza di temperatura. Questo punto prende il nome di pinch point.

Durante il tracciamento della rete di scambiatori, questo costituirà il punto più critico in quanto le temperature dei fluidi da accoppiare sono le più vicine. Un errore nei collegamenti effettuati in questa fase, pregiudicherà il corretto collegamento dei successivi scambiatori.

- Metodo analitico

Il metodo analitico è quello più utilizzato nella pratica, in quanto più agevole e veloce rispetto al metodo grafico.

Il primo passo è quello di associare alle temperature in ingresso e in uscita di ogni fluido delle temperature fittizie che verranno indicate con T^* . Queste temperature vengono calcolate distinguendo tra fluidi caldi e fluidi freddi come segue.

$$T^* = T_{reale} - \frac{1}{2} \Delta T_{min} \quad \text{per i fluidi caldi}$$

$$T^* = T_{reale} + \frac{1}{2} \Delta T_{min} \quad \text{per i fluidi freddi}$$

Queste temperature fittizie vengono poi ordinate in una tabella in ordine decrescente e si considera per ogni intervallo di temperatura fittizia i fluidi presenti, cioè vengono considerate le differenti capacità termiche dei fluidi all'interno di ogni intervallo con segno positivo se il fluido è caldo o con segno negativo se il fluido è freddo. Per ogni intervallo vengono sommate algebricamente queste capacità e successivamente viene calcolato il flusso termico per ogni intervallo.

$$\Phi_j = \left(\sum_{j=1}^{n \text{ caldi}} Gc_j - \sum_{j=1}^{n \text{ freddi}} Gc_j \right) \cdot (T_i^* - T_{i+1}^*)$$

Valori positivi del flusso, indicano che in quel determinato intervallo di temperatura c'è un surplus di potenza termica che potrà sicuramente essere impiegato nell'intervallo successivo in quanto si troverà sicuramente a temperatura superiore. Valori negativi del flusso, indicano invece un deficit di potenza termica in quel determinato intervallo, pertanto in questo caso è possibile utilizzare il surplus derivante da flussi positivi in intervalli precedenti oppure utilizzare una risorsa esterna [1].

A questo punto viene introdotto il concetto di cumulata, vengono cioè sommati, partendo dal primo intervallo di temperatura, tutti i flussi calcolati. Grazie alla cumulata è possibile tenere in considerazione i surplus e i deficit di calore relativi a tutti gli intervalli di temperatura.

$$\Phi_{j+1} = \Phi_j + \Phi_{h,j}$$

Fino a quando i valori presenti nella cumulata saranno positivi, il sistema di recupero termico sarà realizzabile senza l'introduzione di vettori energetici dall'esterno. Quindi in questo caso, ciascun intervallo utilizzerà risorse disponibili all'interno dell'intervallo stesso ed eventualmente risorse rese disponibili da intervalli precedenti [1].

Nel caso in cui la cumulata diventasse negativa, la disponibilità di flusso termico resa disponibile dagli intervalli precedenti non sarà sufficiente a soddisfare i fabbisogni termici [1].

Per rendere il recupero termico effettivamente realizzabile, è necessario che tutti i valori della cumulata siano positivi. Sarà quindi necessario fornire dall'esterno un quantitativo di calore pari in modulo al valore minimo negativo della cumulata. A questo punto verrà ricalcolata la cumulata mettendo però come valore iniziale il flusso termico da fornire esternamente. Il valore del flusso termico da aggiungere sarà il fabbisogno minimo di calore, mentre l'ultimo valore della nuova cumulata sarà il fabbisogno di freddo che bisognerà fornire dall'esterno.

ΔT fittizie[°C]	$\sum Gc$ [kW/K]	Φ [kW]	Φ_{cum} [kW]	Φ_{cum_f} [kW]
-	-	-	0	600
420 - 410	14	140	140	740
410 - 300	6.4	704	844	1444
300 - 210	14.4	1296	2140	2740
210 - 110	-13.6	-1360	780	1380
110 - 60	-27.6	-1380	-600	0
60 - 10	0.4	20	-580	20

Si può osservare che tutti i valori di flusso, nella cumulata finale, sono diventati positivi, tranne il penultimo valore che è nullo. Il punto in cui si verifica l'azzeramento della cumulata è il pinch point.

Attraverso queste due metodologie è possibile, come si è visto, arrivare all'identificazione della temperatura di pinch point. Questa particolare temperatura rappresenta il punto dell'impianto in cui operando il recupero termico, si ottiene la minima differenza di temperatura tra fluidi caldi e fluidi freddi, corrispondente alla minima differenza di temperatura imposta all'inizio dell'analisi. È senza dubbio il punto più delicato dell'impianto dal punto di vista del recupero termico.

Questa particolare temperatura permette di dividere l'impianto in due porzioni dette rispettivamente "sopra pinch point" e "sotto pinch point". Nella prima porzione, i fluidi caldi ed i fluidi freddi sono a temperatura superiore rispetto a quella del pinch point ed il fabbisogno dei fluidi freddi è in surplus rispetto a quello reso dai caldi, mentre nella parte sotto al pinch point i fluidi sono a temperatura inferiore rispetto a quella del pinch point ed il fabbisogno dei fluidi caldi è in surplus rispetto a quello reso dai fluidi freddi. La differenza tra i flussi termici, sempre considerando le due zone separatamente, equivale al minimo fabbisogno di calore sopra al pinch point e di freddo sotto al pinch point.

Pertanto si può dire che nella parte dell'impianto al disotto del pinch point il sistema si comporta complessivamente come un serbatoio termico e l'unico meccanismo di scambio termico con l'esterno è rappresentato dalla cessione di calore da parte dei fluidi caldi, quindi, l'obiettivo è rappresentato dallo scaldare completamente i fluidi freddi presenti esclusivamente con il recupero termico.

Nella parte dell'impianto posta superiormente al pinch point, il sistema si comporta come un pozzo termico e l'unico meccanismo di scambio con l'esterno è costituito dal calore ricevuto, quindi è necessario che i fluidi caldi vengano scaricati completamente cedendo tutto il calore a disposizione a quelli freddi.

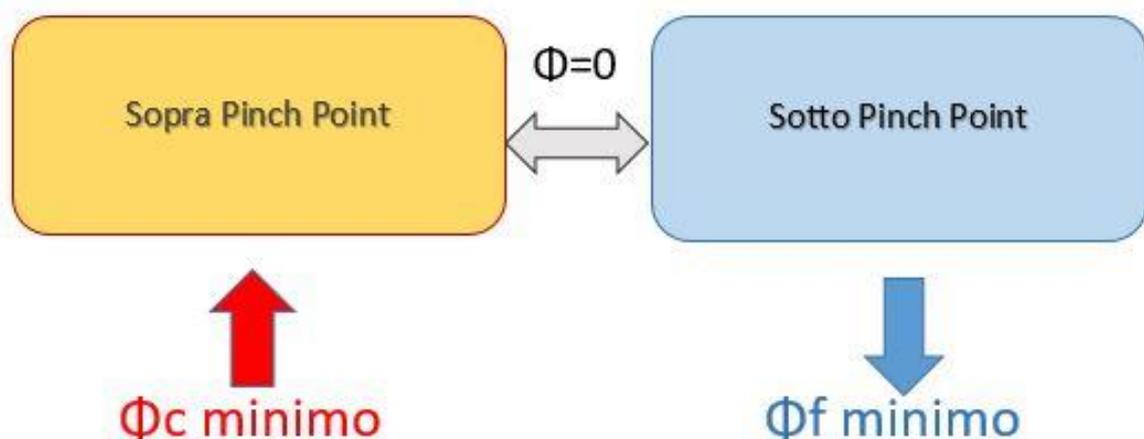


Figura 6 - Schema flussi sopra e sotto al pinch point

È importante sottolineare come le due zone siano energeticamente indipendenti, cioè non avviene alcun trasferimento di calore da una zona all'altra.

Da quanto è stato detto si possono ricavare alcune semplici regole, ma fondamentali, da seguire per il corretto tracciamento della rete di scambiatori di calore [1]:

- Non trasferire calore attraverso il pinch point
- Non riscaldare dall'esterno fluidi freddi al di sotto del pinch point
- Non raffreddare dall'esterno fluidi caldi al di sopra del pinch point

Ovviamente è necessario comprendere quanto possa convenire il recupero termico, perciò è importante conoscere non solo il fabbisogno minimo da fornire tramite vettori energetici esterni, ma anche il fabbisogno massimo di calore e freddo di cui necessita l'impianto. Il fabbisogno massimo è calcolabile semplicemente sommando separatamente i flussi termici richiesti per riscaldare i fluidi freddi e per raffreddare i fluidi caldi. Se la differenza tra i fabbisogni massimi e minimi è notevole allora converrà studiare una configurazione di scambiatori di calore, contrariamente, se la differenza è minima non converrà investire nella realizzazione di un sistema per il recupero termico.

Andiamo ora ad analizzare le due metodologie applicabili per il calcolo del fabbisogno minimo di energia dall'esterno.

1.5 Tracciamento della rete di scambiatori di calore

- Rappresentazione simbolica

Per effettuare gli accoppiamenti è bene introdurre la rappresentazione simbolica utilizzata nella pinch analysis [1]. Questa rappresentazione è molto utile, in quanto permette di indicare i vari collegamenti tra i fluidi, le temperature in uscita e in ingresso da ogni scambiatore ed i flussi di calore scambiati tra i due fluidi.

Ad ogni fluido viene assegnato un indice inserito in un quadrato posto all'ingresso del fluido, per poterlo distinguere, ed è orientato da sinistra verso destra nel caso di fluido caldo oppure da destra a sinistra nel caso di fluido freddo.

In ognuno di questi segmenti orientati viene poi rappresentata la temperatura in ingresso ed in uscita dal sistema.

Lo scambiatore è rappresentato tramite un segmento che collega i due fluidi in analisi e normalmente viene chiamato tramite una lettera.

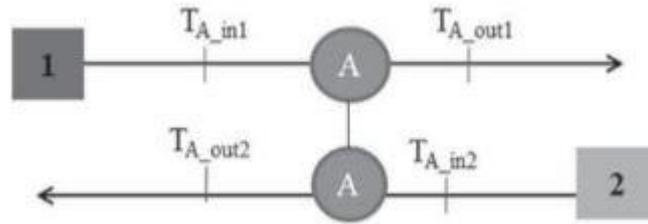


Figura 7 - Rappresentazione del collegamento tra due fluidi [1]

Oltre agli scambiatori di calore, gli altri due elementi che compaiono sono il riscaldatore, che rappresenta l'immissione dall'esterno di calore ed il raffreddatore, che rappresenta l'immissione dall'esterno di freddo.

La nomenclatura utilizzata è C nel caso di raffreddatore (cooler) oppure H nel caso di riscaldatore (heater).

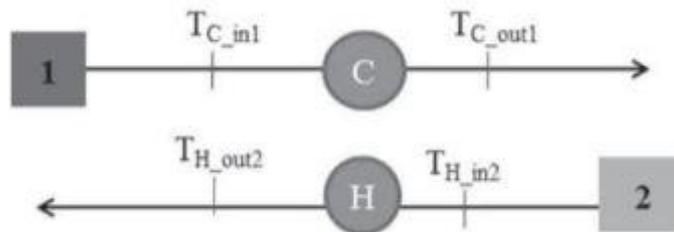


Figura 8 - Rappresentazione di raffreddatore e riscaldatore [1]

Come detto in precedenza, il pinch point divide il sistema in due zone energeticamente indipendenti. Quindi anche durante il tracciamento della rete di scambiatori è bene riportare una separazione simbolica per visualizzare che le due parti sono effettivamente indipendenti, in modo tale da rendere più evidente l'errato collegamento tra le due parti.

Nella figura seguente viene riportato un esempio di collegamento corretto (a) e un esempio di collegamento scorretto (b).

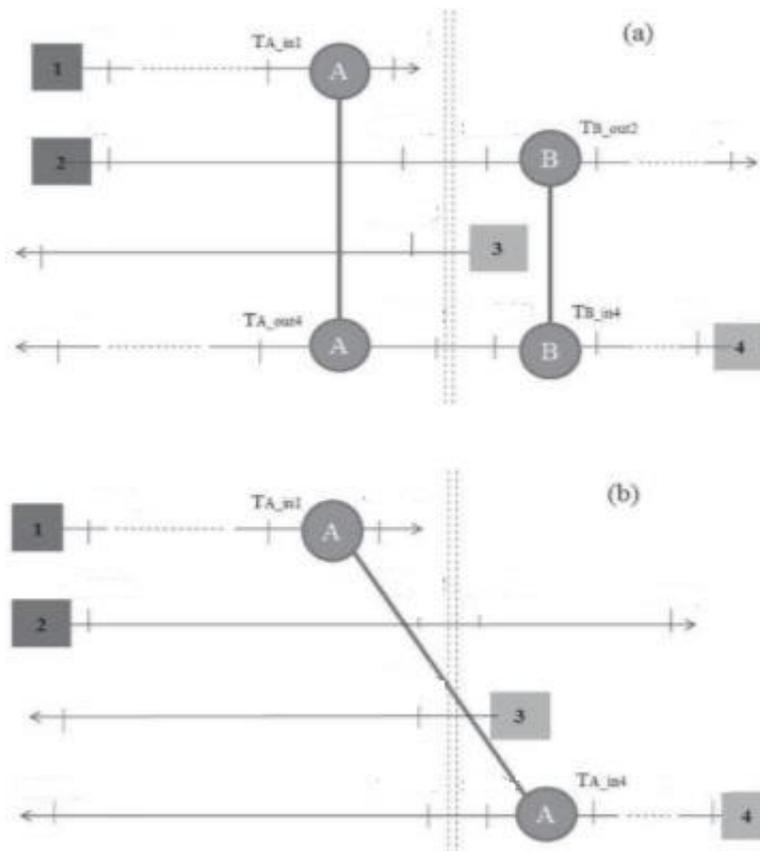


Figura 9 - Esempi di corretto(a) e non corretto(b) collegamento [1]

Il tracciamento della rete inizia dal pinch point, grazie al fatto che il vincolo sulle temperature risulta più stringente [1].

- Scelta degli accoppiamenti sopra al pinch point

Al di sopra del pinch point, il raffreddamento dei fluidi caldi deve essere operato in modo completo esclusivamente attraverso lo scambio termico con i fluidi freddi [1]. Perciò non è consentito operare il raffreddamento attraverso uno scambio con l'esterno. Normalmente conviene iniziare dai fluidi presenti al pinch point per due ragioni:

- I fluidi caldi devono essere sfruttati completamente
- Sopra al pinch point, il calore reso dai fluidi caldi è complessivamente inferiore al fabbisogno dei fluidi freddi, quindi questi offrono maggiori alternative di accoppiamenti

Per ogni scambiatore, è utile provare a sfruttare in modo completo tutto il fluido caldo per cercare di utilizzare il minor numero possibile di scambiatori stessi e per avere quindi una rete meno complicata dal punto di vista impiantistico [1].

La divisione dell'impianto in due parti data dal pinch point permette di formulare due nuove ed importanti regole da tenere in considerazione nel tracciamento della rete di

scambiatori a fabbisogno minimo, in particolare per quanto riguarda i collegamenti da effettuare al pinch point.

Al di sopra del pinch point le due regole da tenere in considerazione sono:

$$N \text{ fluidi caldi} \leq N \text{ fluidi freddi}$$

$$Gc \text{ caldi} \leq Gc \text{ freddi}$$

Quindi la prima verifica da effettuare è quella riguardante la numerosità dei fluidi al pinch point. Il numero di fluidi freddi deve essere maggiore o uguale al numero dei fluidi caldi. Se questo vincolo non fosse rispettato si dovrà procedere con la divisione di uno o più flussi freddi. Il secondo vincolo riguarda la capacità termica dei flussi. Sarà possibile collegare esclusivamente un fluido caldo con capacità termica inferiore rispetto a quella del corrispondente fluido freddo. Queste regole sono da rispettare obbligatoriamente nei collegamenti al pinch point, mentre per i collegamenti successivi potrà essere violata [1]. Si analizzerà ora in dettaglio la regola delle capacità termiche.

Immaginando di effettuare un collegamento al pinch point di un fluido caldo con un fluido freddo violando il vincolo delle capacità termiche scaturiranno alcune problematiche. Si proverà innanzitutto a scaricare tutto il fluido caldo, dalla temperatura in ingresso fino al pinch point ed il flusso risultante sarà dato dalla formula seguente.

$$\Phi = Gc_{caldo} \cdot (T_{caldo_{in}} - T_{caldo_{out}})$$

A questo punto potrà essere calcolata la temperatura in uscita dallo scambiatore del fluido freddo.

$$T_{freddo_{out}} = T_{freddo_{in}} + \frac{\Phi}{Gc_{freddo}}$$

Violando il vincolo delle capacità, la differenza di temperatura sul lato caldo dello scambiatore non rispetterebbe il vincolo del ΔT minimo fissato, pertanto non sarà fattibile. È quindi importante esaminare come variano le temperature sul lato caldo dello scambiatore. Nel caso l'accoppiamento venisse effettuato tra due fluidi per il quale il prodotto portata per calore specifico del caldo risulti superiore a quello del freddo, le due temperature (quella in ingresso allo scambiatore del fluido caldo e quella in uscita dallo scambiatore del fluido freddo) tendono ad avvicinarsi, infatti [1]:

$$\Phi = Gc_{caldo} \cdot \Delta T_{caldo} = Gc_{freddo} \cdot \Delta T_{freddo}$$

Da cui:

$$\frac{G_{caldato}}{G_{freddo}} = \frac{\Delta T_{freddo}}{\Delta T_{caldato}} > 1$$

Da questa considerazione, si può capire come la temperatura del fluido freddo aumenti maggiormente rispetto a quella del fluido caldo. È possibile inoltre visualizzare graficamente quanto descritto.

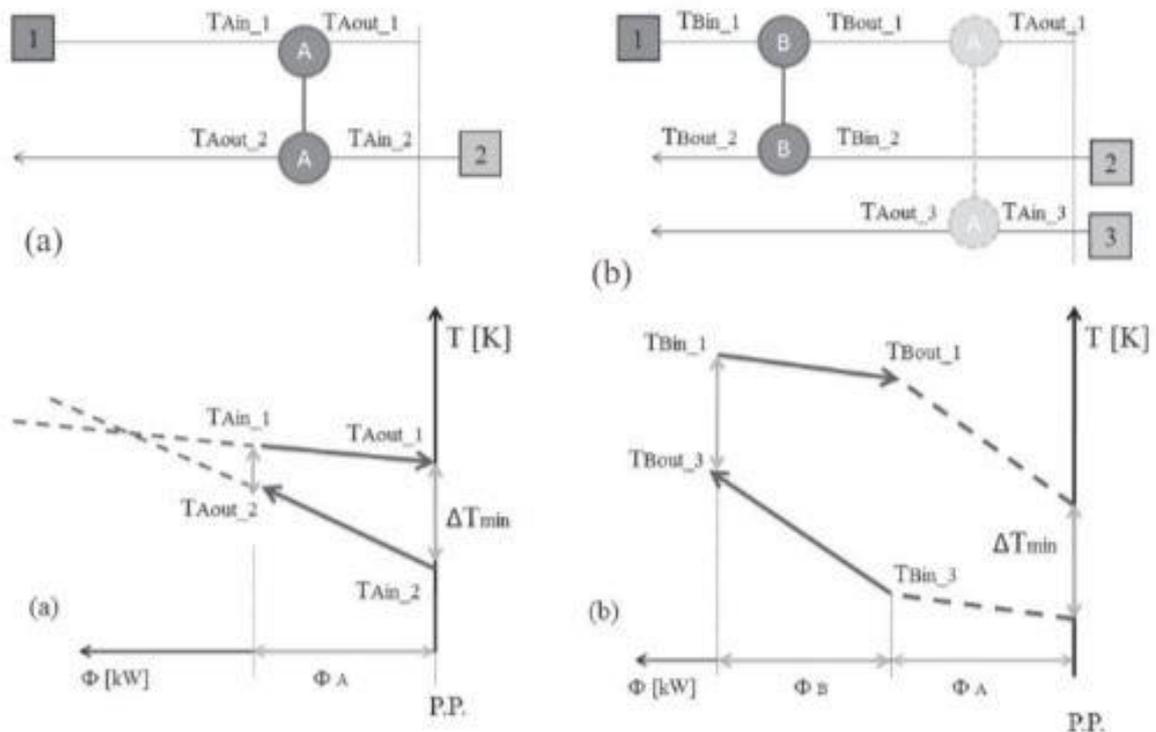


Figura 10 - Caso con $G_c \text{ caldo} > G_c \text{ freddo}$ (a). Caso con $G_c \text{ caldo} < G_c \text{ freddo}$ (b) [1]

Osservando la figura 10(a) si può vedere come andando dal pinch point verso sinistra, le due curve tendono ad avvicinarsi poiché il coefficiente angolare della curva appartenente ai fluidi caldi è minore di quella appartenente ai fluidi freddi. Quindi, poiché al pinch point si ha già la differenza di temperatura minima, un avvicinamento delle curve porterebbe alla violazione del vincolo. Pertanto questo spiega il motivo per cui al pinch point la regola delle capacità termiche va rispettata rigorosamente. Infatti, come è possibile vedere dalla figura 10(b), nel caso in cui la capacità termica del caldo fosse minore a quella del freddo, le due curve tenderebbero a divergere e quindi il ΔT tenderebbe ad aumentare. Questo spiega anche il perché tale regola deve essere necessariamente rispettata al pinch point, mentre può anche essere violata lontano da esso dato che nel caso in cui la differenza di temperatura all'ingresso dello scambiatore fosse maggiore rispetto a quella minima imposta, un avvicinamento delle due rette non porterebbe necessariamente ad una violazione del vincolo purché lo scambio termico sia limitato in modo opportuno.

Una volta effettuati i collegamenti al pinch point si procederà con i successivi, fino, come detto, a scaricare completamente i fluidi caldi senza l'ausilio di raffreddatori. Per utilizzare il minor numero possibile di scambiatori, per ogni collegamento, si proverà a scaricare completamente il fluido caldo in una sola volta. Quindi come fatto precedentemente si calcolerà il flusso scambiato e si troverà la temperatura in uscita dallo scambiatore del fluido freddo. Nel caso in cui questa temperatura superasse quella a cui il fluido freddo deve essere portato, sarà necessario limitare il flusso che, quindi, dovrà essere ricalcolato utilizzando le temperature estreme del fluido freddo e da questo si andrà poi a calcolare la temperatura in ingresso allo scambiatore per il fluido caldo.

$$\Phi = Gc_{freddo} \cdot (T_{freddo_{out}} - T_{freddo_{in}})$$

$$T_{caldo_{in}} = T_{caldo_{out}} + \frac{\Phi}{Gc_{caldo}}$$

In alcuni casi, potrà verificarsi un'altra problematica nell'accoppiamento. Infatti, sfruttando le considerazioni esplicitate in precedenza, sfruttando completamente il fluido caldo o scaldando completamente il fluido freddo, in determinate occasioni, non sarà più possibile effettuare dei collegamenti, in quanto in ogni caso verrebbe violato il vincolo della differenza di temperatura minima. È bene quindi analizzare, a valle di ciascun accoppiamento proposto, che non si ottengano temperature tali da impedire dei collegamenti che sono invece obbligatori al fine di raggiungere gli obiettivi preposti per ottenere la configurazione a fabbisogno minimo. Qualora si verifici questa problematica sarà necessario limitare il flusso termico scambiato nell'accoppiamento dando origine ad un pinch point di configurazione. Questa pratica, consiste nel raffreddare il fluido caldo e riscaldare il fluido freddo fino a quando non verrà raggiunta la differenza di temperatura minima tra temperatura in ingresso allo scambiatore del fluido caldo e temperatura in uscita dallo scambiatore del fluido freddo [1].

A questo punto, esauriti completamente i fluidi caldi al di sopra del pinch point, nel caso in cui siano rimasti dei fluidi freddi che necessitino di ulteriore riscaldamento per poter raggiungere la temperatura di uscita voluta, sarà d'obbligo inserire dei riscaldatori collegati al fluido in esame che forniscano il flusso necessario per riscaldare completamente il fluido freddo.

$$\Phi_H = Gc_{freddo} \cdot (T_{freddo_{out}} - T_{freddo_{out,scamb}})$$

Nel caso in cui la sommatoria dei flussi corrispondesse al fabbisogno minimo di caldo calcolato in precedenza con il metodo grafico o il metodo analitico, vorrà dire che la configurazione trovata è corretta e si potrà procedere con il tracciamento della rete al di sotto del pinch point.

- Scelta degli accoppiamenti sotto al pinch point

Al di sotto del pinch point, deve essere operato il completo riscaldamento dei fluidi esclusivamente attraverso lo scambio termico con i fluidi caldi e mai mediante riscaldatori esterni. Anche in questo caso conviene iniziare dal pinch point per due ragioni:

- I fluidi freddi devono essere riscaldati completamente
- Sotto al pinch point, il calore reso dai fluidi caldi è complessivamente superiore al fabbisogno dei fluidi freddi, quindi i caldi offrono maggiori alternative di accoppiamenti.

La logica per gli accoppiamenti seguita in questo caso, è quella di cercare di riscaldare completamente i fluidi freddi in una sola volta, quindi attraverso un solo collegamento utilizzando i fluidi caldi a disposizione.

Al di sotto del pinch point valgono le condizioni opposte rispetto a sopra il pinch point [1]:

$$N_{\text{fluidi caldi}} \geq N_{\text{fluidi freddi}}$$

$$G_c \text{ caldi} \geq G_c \text{ freddi}$$

Come nel caso precedente, nel caso non fossero rispettati questi vincoli occorrerà dividere i flussi in modo opportuno per procedere in modo corretto con la costruzione della rete di scambiatori di calore.

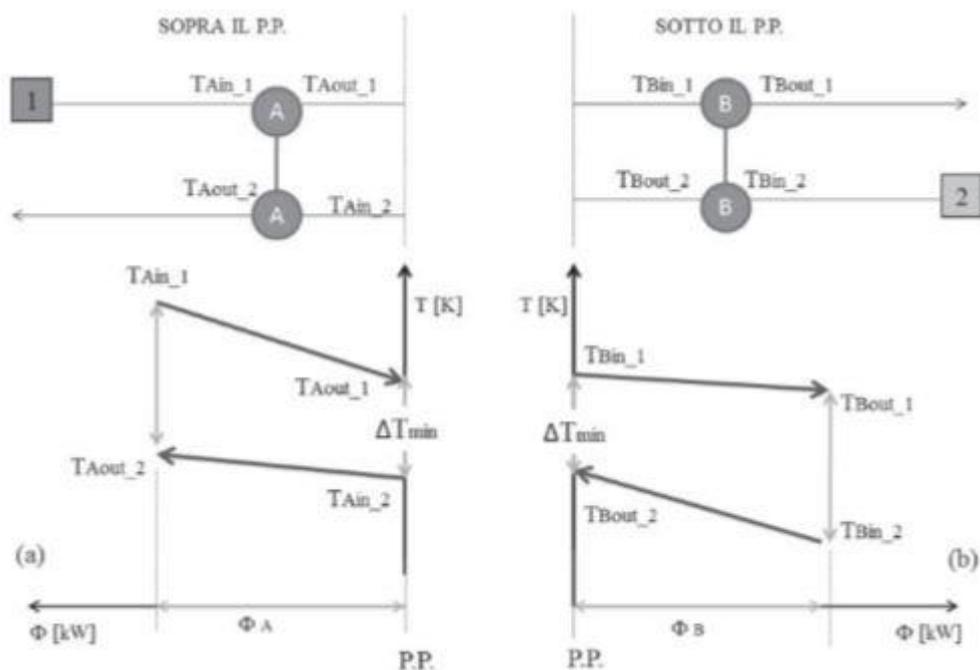


Figura 11 - Caso con $G_c \text{ caldo} < G_c \text{ freddo}$ (a). Caso con $G_c \text{ caldo} > G_c \text{ freddo}$ (b) [1]

È importante sottolineare come queste regole debbano essere rispettate rigorosamente al pinch point, successivamente non sarà necessario tenerne conto.

Al pinch point, è il lato sinistro dello scambiatore, in questo caso, che risulta vincolato alla minima differenza di temperatura. Muovendosi verso destra, è necessario che la pendenza della retta dei fluidi caldi, sia inferiore rispetto alla retta dei due fluidi freddi affinché divergano.

Nel caso convergessero, la differenza di temperatura minima verrebbe violata e quindi il collegamento non sarebbe possibile, secondo lo stesso principio esposto per la parte di impianto sopra al pinch point.

Il primo tentativo sarà quello di provare a scaldare completamente il fluido freddo utilizzando il fluido caldo.

$$\Phi = Gc_{freddo} \cdot (T_{freddo_{out}} - T_{freddo_{in}})$$

$$T_{caldo_{out}} = T_{caldo_{in}} - \frac{\Phi}{Gc_{caldo}}$$

Nel caso in cui la temperatura del caldo in uscita superasse quella voluta per le necessità dell'impianto, si procederà cercando di sfruttare il caldo per riscaldare in parte il fluido freddo.

$$\Phi = Gc_{caldo} \cdot (T_{caldo_{in}} - T_{caldo_{out}})$$

$$T_{freddo_{in}} = T_{freddo_{out}} - \frac{\Phi}{Gc_{freddo}}$$

Allo stesso modo, effettuati i collegamenti al pinch point, si procederà con i successivi collegamenti, nel caso in cui ci fossero ancora dei fluidi freddi da riscaldare completamente. Il criterio utilizzato sarà sempre quello di cercare di riscaldare il fluido freddo con un solo collegamento. Se non fosse possibile si procederà con lo scaricare completamente il caldo riscaldando parzialmente il freddo e se anche questa possibilità violasse determinati vincoli, si procederà effettuando un pinch point di configurazione come spiegato per la parte sopra al pinch point, andando a riscaldare il fluido freddo e a raffreddare quello caldo fino a quando non si è raggiunta la differenza minima di temperatura tra l'ingresso del fluido caldo nello scambiatore e l'uscita del fluido freddo dallo scambiatore.

Dopo aver scaldato completamente i fluidi freddi esclusivamente attraverso lo scambio termico con i fluidi caldi, nel caso in cui ci fossero ancora dei fluidi caldi da raffreddare per

portarli alla temperatura di uscita voluta, dovrà essere fornito del calore esternamente attraverso un raffreddatore.

$$\Phi_c = G_{caldo} \cdot (T_{caldo_{out}} - T_{fcaldo_{out,scamb}})$$

La sommatoria di tutti i flussi forniti dall'esterno per raffreddare i fluidi caldi dovrà essere pari al fabbisogno di freddo calcolato in precedenza con il metodo grafico o con il metodo analitico. In questo caso la rete di scambiatori a minimo fabbisogno dall'esterno sarà completa e corretta.

Capitolo 2

Il modello creato in MatLab

2.1 Calcolo del fabbisogno minimo

La prima parte del programma ha l'obiettivo di calcolare il fabbisogno minimo di calore e di freddo da fornire tramite vettori energetici esterni. Si partirà con l'inserimento dei dati nel programma da parte dell'utente e si terminerà con la visualizzazione tramite linea di comando e tramite istogramma dei fabbisogni minimi e della temperatura di pinch point del fluido caldo e del fluido freddo. Di seguito viene riportato il diagramma di flusso che rappresenta i passaggi logici dei calcoli di questa sezione da parte del programma.

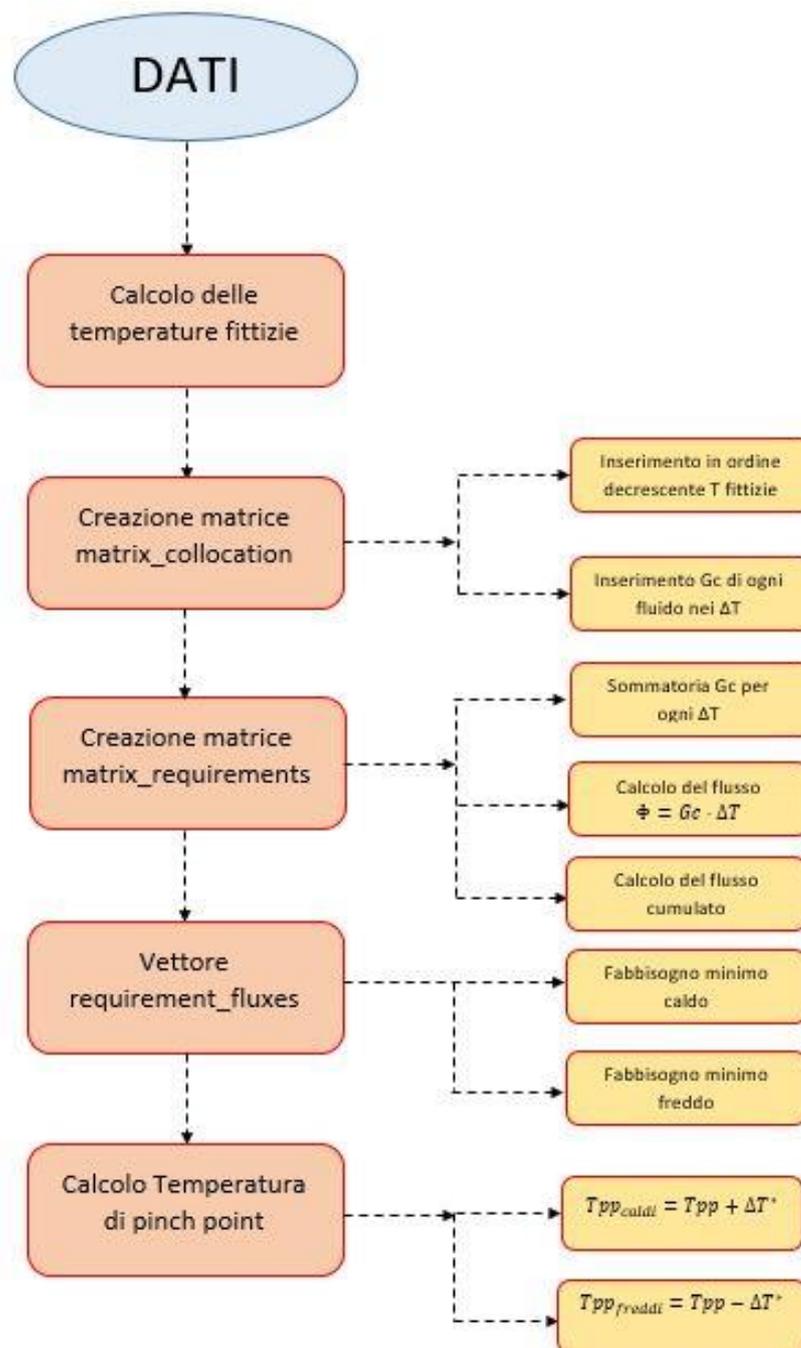


Figura 12 - Diagramma di flusso fabbisogno minimo

2.1.1 Inserimento dei dati

Nella prima parte del programma avviene l'inserimento dei dati necessari per ottenere la soluzione. Per ogni fluido i dati richiesti sono:

- Capacità termica [kW/K]
- Temperatura di ingresso del fluido [°C]
- Temperatura di uscita del fluido [°C]

L'inserimento dei dati può avvenire in due modi, a seconda delle preferenze dell'utente. La prima modalità è attraverso linea di comando, inserendo in ordine la capacità termica, la temperatura di ingresso e la temperatura di uscita per tutti i fluidi. Automaticamente il programma salverà i dati in una matrice in cui ogni riga corrisponderà ad un fluido e nella prima colonna si avranno le capacità termiche, nella seconda le temperature di ingresso e nella terza le temperature di uscita.

```
fluids(1,:)=[14 425 115];  
fluids(2,:)=[8 305 15];  
fluids(3,:)=[28 55 205];  
fluids(4,:)=[7.6 5 405];  
  
n_fluids=length(fluids(:,1));  
dT=10;
```

Figura 13 - Inserimento dati direttamente in matrice

La seconda modalità consiste nel creare direttamente la matrice seguendo l'ordine dei dati descritto in precedenza senza passare attraverso linea di comando.

La matrice dei dati è chiamata *fluids*.

Un altro dato che dovrà essere inserito successivamente dall'utente sarà la differenza di temperatura minima scelta, nella variabile *dT*.

Il programma inoltre calcolerà automaticamente il numero dei fluidi inseriti attraverso la variabile *n_fluids*, nel secondo caso, mentre nel caso di inserimento dei dati da linea di comando il numero di fluidi dovrà essere inserito precedentemente all'inserimento dei dati.

```

Command Window

Insert the number of fluids:
4
Insert the Gc of the fluid:
2.4
Insert the inlet temperature:
540
Insert the outlet temperature:
fx 20|

```

Figura 14 - Inserimento dati da linea di comando

Alla fine dell'inserimento la matrice *fluids* risulterà essere:

	1	2	3	4	5
1	14	425	115	420	110
2	8	305	15	300	10
3	28	55	205	60	210
4	7.6000	5	405	10	410

Figura 15 - Matrice fluids dopo l'inserimento dei dati

2.1.2 Temperature fittizie e inserimento nella matrice di calcolo

Per il calcolo del fabbisogno minimo è stato preso in considerazione il metodo algebrico per la sua più semplice applicabilità all'interno di un programma di calcolo [1]. Il primo passo consiste nel determinare delle temperature fittizie per ogni temperatura di ingresso e di uscita dei fluidi. Queste temperature fittizie vengono calcolate distinguendo tra fluidi caldi e fluidi freddi come segue:

$$T^* = T_{reale} - \frac{1}{2} \Delta T_{min} \quad \text{per i fluidi caldi}$$

$$T^* = T_{reale} + \frac{1}{2} \Delta T_{min} \quad \text{per i fluidi freddi}$$

Queste temperature, sono state poste nelle due colonne successive della matrice dei dati *fluids*, pertanto, alla fine, la matrice si ritroverà ad avere cinque colonne, tre di inserimento dati e altre due contenenti le temperature fittizie in ingresso ed in uscita di ogni fluido. A questo punto è necessario porre in ordine decrescente queste temperature fittizie che successivamente verranno inserite nella prima colonna di una matrice utilizzata per i calcoli chiamata *matrix_collocation*. Per effettuare questa operazione è stato creato un *ciclo for* e non è stata utilizzata la funzione della libreria di MatLab *sort*, perché è necessario tenere in considerazione il fatto che, nel caso di occorrenza di temperature fittizie uguali, solamente una dovrà essere utilizzata e le altre cancellate.

```

78     %% Matrice delle temperature fittizie
79 -   T_fittizie_dummy=[fluids(:,4);fluids(:,5)];
80 -   i=1;
81 -   for j=1:length(T_fittizie_dummy)
82 -       [Tmax,ind_Tmax]=max(T_fittizie_dummy);
83 -       if j>1 && matrix_collocation(i-1,1)==Tmax
84 -           T_fittizie_dummy(ind_Tmax)=-10000;
85 -       else
86 -           matrix_collocation(i,1)=Tmax;
87 -           T_fittizie_dummy(ind_Tmax)=-10000;
88 -           i=i+1;
89 -       end
90 -   end
91 -   clear T_fittizie_dummy Tmax ind_Tmax

```

Figura 16 - Creazione vettore delle temperature fittizie

Nelle successive colonne di questa matrice, per ogni fluido, vengono inserite le capacità termiche nei rispettivi intervalli di temperatura. Per effettuare questa operazione, si va a verificare, per ogni temperatura fittizia, se questa sia compresa tra le temperature fittizie in ingresso e uscita del fluido *i*. Nel caso fosse compresa, il programma andrà ad immettere nella matrice *matrix_collocation* la rispettiva capacità del fluido, in caso contrario il valore sarà nullo.

È necessario porre in risalto il fatto che, in caso di fluidi caldi, la verifica dei limiti è effettuata considerando la temperatura fittizia strettamente maggiore del limite inferiore, quindi della temperatura di uscita fittizia, mentre nel caso di fluidi freddi la temperatura fittizia deve essere strettamente maggiore della temperatura in ingresso. La motivazione è dovuta al fatto che, includendo anche queste due temperature, risulterebbe un intervallo più ampio del reale e quindi si otterrebbe un risultato non corretto. Nella figura sottostante è possibile vedere la parte di programma che effettua questa operazione di collocamento delle capacità in ogni intervallo.

```

92     %% Aggiungo alla matrix_collocation il valore dei vari Gc nei rispettivi intervalli
93
94 -   for j=1:n_fluids
95 -       for i=1:length(matrix_collocation(:,1))
96 -           if fluids(j,2)>fluids(j,3)
97 -               if matrix_collocation(i,1)<=fluids(j,4) && matrix_collocation(i,1)>fluids(j,5)
98 -                   matrix_collocation(i,j+1)=fluids(j,1);
99 -               else
100 -                   matrix_collocation(i,j+1)=0;
101 -               end
102 -           else
103 -               if matrix_collocation(i,1)>fluids(j,4) && matrix_collocation(i,1)<=fluids(j,5)
104 -                   matrix_collocation(i,j+1)=fluids(j,1);
105 -               else
106 -                   matrix_collocation(i,j+1)=0;
107 -               end
108 -           end
109 -       end
110 -   end
111

```

Figura 17 - Inserimento delle capacità termiche in ogni intervallo

Alla fine di questo processo, la matrice *matrix_collocation*, risulterà avere nella prima colonna le temperature fittizie ordinate, mentre dalla seconda colonna in poi, per ogni fluido, comparirà la capacità termica del fluido stesso negli intervalli di temperatura interessati come già citato, mentre nelle altre righe comparirà un valore nullo.

	1	2	3	4	5
1	420	14	0	0	0
2	410	14	0	0	7.6000
3	300	14	8	0	7.6000
4	210	14	8	28	7.6000
5	110	0	8	28	7.6000
6	60	0	8	0	7.6000
7	10	0	0	0	0

Figura 18 - Matrice *matrix_collocation*

Fatto ciò, in una seconda matrice chiamata *matrix_requirements*, in cui vengono inserite le varie capacità termiche per ogni intervallo, cambiando però il segno della stessa se appartenente ad un fluido freddo, verranno calcolati i flussi termici.

Questo servirà poiché, nella colonna adiacente, verrà effettuata la sommatoria di tutte le capacità per ogni intervallo di temperatura. Il passo successivo sarà quello di calcolare il flusso termico associato ad ogni intervallo di temperatura fittizia moltiplicando le varie differenze di temperatura per la rispettiva capacità termica, ed ovviamente se questa fosse negativa il risultato sarà l'ottenimento di un flusso negativo, in caso contrario sarà positivo.

$$\Phi_j = \left(\sum_{j=1}^{n \text{ caldi}} Gc_j - \sum_{j=1}^{n \text{ freddi}} Gc_j \right) \cdot (T_i^* - T_{i+1}^*)$$

Nell'ultima colonna verrà inserita la cumulata dei flussi, quindi per ogni riga andrò a sommare il flusso ottenuto.

```

124 %Somma dei Gc
125 %Calcolo flussi termici
126 %Calcolo flussi cumulati
127 - for i=1:length(matrix_requirements(:,1))
128     %somma o sottrazione del Gc ad ogni intervallo
129 -     matrix_requirements(i,j+1)=sum(matrix_requirements(i,:));
130 -     matrix_requirements(i,j+2)=matrix_requirements(i,j+1)...
131         .*(matrix_collocation(i,1)-matrix_collocation(i+1));
132 -     fluxes=matrix_requirements(:,j+2);
133 -     matrix_requirements(i,j+3)=sum(fluxes);
134 - end
135 - clear fluxes

```

Figura 19 - Calcolo dei singoli flussi e cumulata

Fino a quando i valori della cumulata si mantengono positivi, il sistema di recupero termico senza fornitura dall'esterno è realizzabile, cioè ciascun intervallo utilizza il corrispondente flusso termico che il sistema è in grado di fornire. Quando la cumulata diventa negativa, la disponibilità dei flussi termici messa a disposizione si esaurisce cioè il sistema non è più in grado di soddisfare il fabbisogno.

Un esempio di risultato finale della matrice è visibile nella figura seguente:

	1	2	3	4	5	6	7
1	14	0	0	0	14	140	140
2	14	0	0	-7.6000	6.4000	704	844
3	14	8	0	-7.6000	14.4000	1296	2140
4	14	8	-28	-7.6000	-13.6000	-1360	780
5	0	8	-28	-7.6000	-27.6000	-1380	-600
6	0	8	0	-7.6000	0.4000	20.0000	-580

Figura 20 - Esempio di matrice di calcolo del fabbisogno

In questo caso la cumulata diventa negativa dopo il quarto intervallo. Per rendere il recupero termico realizzabile, è necessario che i flussi presenti nella cumulata siano tutti positivi. Per risolvere questo problema è necessario fornire dall'esterno una quantità di energia pari al valore minimo ottenuto nella cumulata, in questo specifico caso 600 kW. Questo quindi risulterà essere il fabbisogno minimo di calore da fornire al sistema.

2.1.3 Fabbisogni minimi e pinch point

A questo punto, risulterà molto semplice trovare il fabbisogno minimo di calore, il fabbisogno minimo di freddo e successivamente il pinch point.

Viene creato un vettore chiamato *requirement_fluxes*, in cui si andrà ad inserire nella prima colonna il valore negativo minimo tra i flussi trovati in precedenza. Questo, cambiato di segno, risulterà essere il fabbisogno minimo di calore che bisognerà fornire dall'esterno. Proseguendo, nelle colonne successive, verranno sommati uno alla volta i valori dei flussi per ogni intervallo di temperatura con il loro segno e non in valore assoluto.

$$\Phi_{i+1} = \Phi_i + \Phi_{h,i}$$

```

137     %vettore finale dei fabbisogni
138 -     requirement_fluxes_dummy(1)=-min(matrix_requirements(:,j+3));
139 -     for i=1:length(matrix_requirements(:,1))
140 -         requirement_fluxes_dummy(i+1)=requirement_fluxes_dummy(i)+...
141             matrix_requirements(i,n_fluids+2);
142 -         requirement_fluxes=round(requirement_fluxes_dummy,1);
143 -         if requirement_fluxes(i)==0
144 -             ind_pinch=i;
145 -         end
146 -     end
147 -     clear requirement_fluxes_dummy

```

Figura 21 - Creazione vettore dei flussi

Così facendo si troveranno due valori importanti: il valore corrispondente all'ultima colonna sarà quello che rappresenterà il fabbisogno minimo di freddo da fornire dall'esterno, mentre in un'altra colonna otterrò un valore nullo che rappresenterà proprio il pinch point, come è osservabile dall'esempio seguente.

Variables - requirement_fluxes							
requirement_fluxes							
1x7 double							
	1	2	3	4	5	6	7
1	600	740	1444	2740	1380	0	20

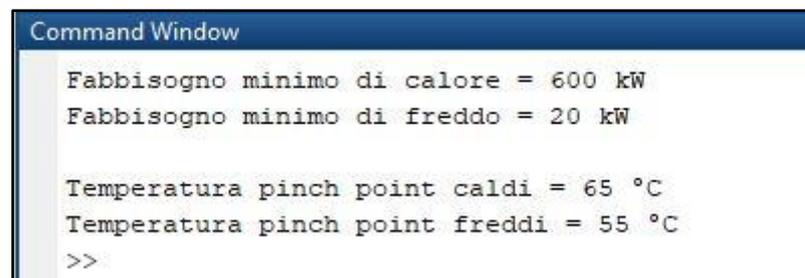
Figura 22 - Vettore dei flussi

In questo caso, il fabbisogno di calore dall'esterno sarà 600 kW, corrispondente alla prima colonna, mentre il fabbisogno minimo di freddo dall'esterno sarà 20 kW, corrispondente all'ultima colonna. Come si può notare, nella casella corrispondente alla colonna numero sei, è stato ottenuto un valore nullo. Questo sta a significare che la temperatura fittizia corrispondente alla riga sei nella matrice *matrix_collocation* sarà la temperatura fittizia di pinch point da cui si potrà ricavare la temperatura reale di pinch point per i fluidi caldi e per i fluidi freddi, questa volta facendo l'esatto opposto di quanto fatto precedentemente per il calcolo delle temperature fittizie.

$$T_{reale,pp} = T^* + \frac{1}{2}\Delta T_{min} \quad \text{per i fluidi caldi}$$

$$T_{reale,pp} = T^* - \frac{1}{2}\Delta T_{min} \quad \text{per i fluidi freddi}$$

Automaticamente, il programma visualizzerà in output i due fabbisogni e la temperatura di pinch point per i fluidi caldi e per quelli freddi. A questo punto la procedura analitica per il calcolo del fabbisogno sarà terminata.



```

Command Window
Fabbisogno minimo di calore = 600 kW
Fabbisogno minimo di freddo = 20 kW

Temperatura pinch point caldi = 65 °C
Temperatura pinch point freddi = 55 °C
>>
  
```

Figura 23 - Finestra di output dei risultati trovati

Inoltre, il programma fornirà un istogramma con la rappresentazione grafica dei fabbisogni minimi di calore e di freddo che dovranno essere forniti al sistema dall'esterno. Questo permetterà all'utente di visualizzare in modo rapido le quantità di calore e freddo messe in gioco. In questo specifico caso preso in esame, la quantità di calore da fornire dall'esterno è molto superiore rispetto a quella di freddo, ma possono esserci casi in cui avviene l'esatto opposto o altri casi in cui le due quantità hanno lo stesso ordine di grandezza. Quindi esistono possibilità differenti a seconda dell'impianto in analisi.

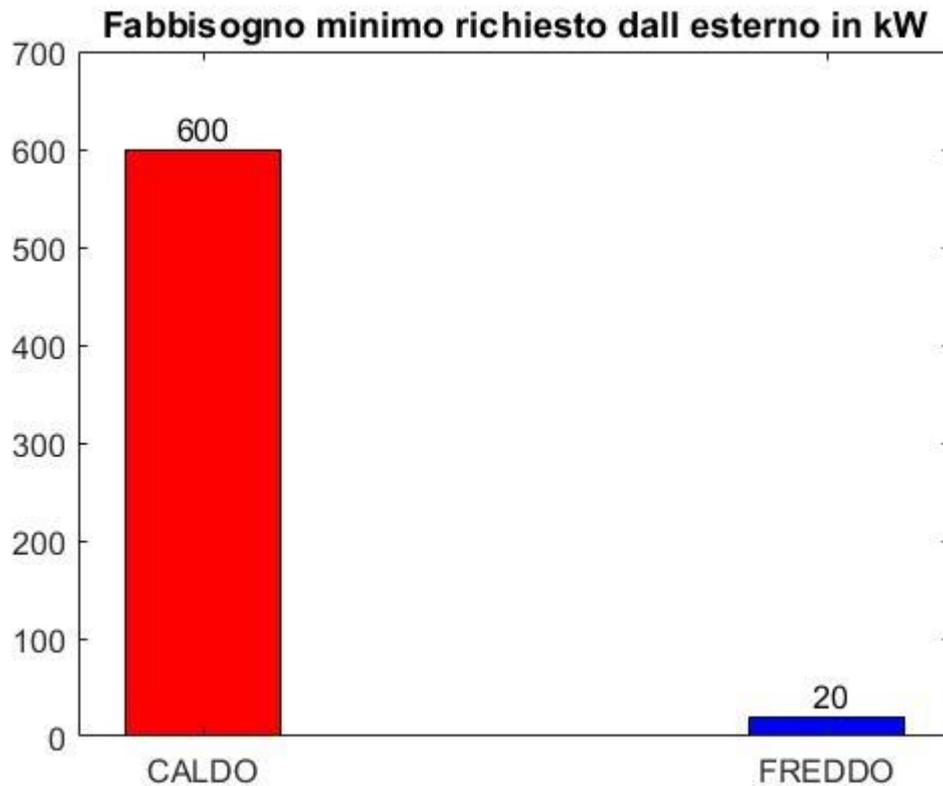


Figura 24 - Istogramma dei fabbisogni minimi e massimi

In aggiunta, verranno visualizzati i diagrammi inerenti al metodo grafico, per visualizzare l'andamento delle curve composite del fluido caldo e del fluido freddo, singolarmente e collettivamente. Di seguito non vengono riportate per questo esempio, in quanto già riportate nel capitolo precedente (paragrafo 1.4) per la descrizione del metodo grafico.

2.2 Divisione impianto in “sopra pinch point” - “sotto pinch point”

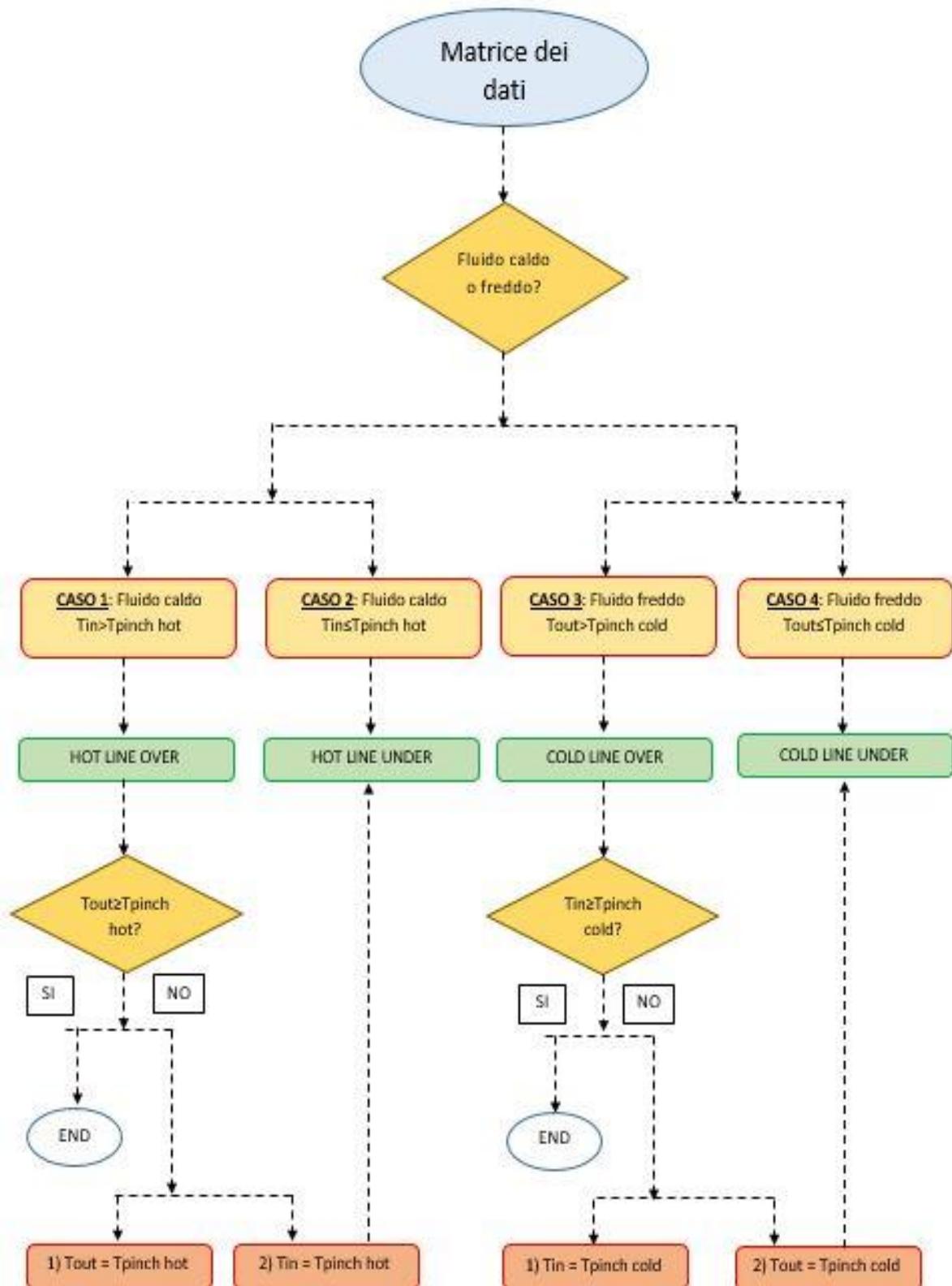


Figura 25 - Diagramma di flusso divisione impianto sopra e sotto pinch point

2.2.1 Inserimento in matrice dei flussi divisi

Come spiegato nei precedenti paragrafi, la divisione dell'impianto in "sopra pinch point" e "sotto pinch point", permette di considerare le due parti dell'impianto in modo separato al fine di raggiungere la configurazione a minimo fabbisogno di energia dall'esterno.

A tal scopo, anche il programma dovrà effettuare questa divisione in modo da non considerare collegamenti tra una zona e l'altra e dell'impianto.

Innanzitutto, vengono creati quattro contatori per contare i fluidi caldi sopra al pinch point, i fluidi caldi sotto al pinch point, i fluidi freddi sopra al pinch point e i fluidi freddi sotto al pinch point.

```
349     %Conta numero fluidi caldi e freddi sopra e sotto il pinch point
350
351 -   hot_over=0;%contatore fluidi caldi sopra PP
352 -   cold_over=0;%contatore fluidi freddi sopra PP
353 -   hot_under=0;%contatore fluidi caldi sotto PP
354 -   cold_under=0;%contatore fluidi freddi sotto PP
```

Figura 26 - Contatori fluidi caldi e freddi

A questo punto attraverso un ciclo *for*, avverrà il collocamento dei vari flussi divisi in quattro differenti matrici a seconda delle temperature dei fluidi stessi. Le quattro matrici sono:

- *Hot_line_over*: matrice dei fluidi caldi sopra al pinch point
- *Hot_line_under*: matrice dei fluidi caldi sotto al pinch point
- *Cold_line_over*: matrice dei fluidi freddi sopra al pinch point
- *Cold_line_under*: matrice dei fluidi freddi sotto al pinch point

Per ogni flusso inserito nei dati si verificherà se si tratta di un fluido caldo oppure di un fluido freddo, andando a comparare la temperatura di ingresso e quella di uscita del fluido stesso. Nel caso in cui la temperatura di ingresso fosse maggiore di quella di uscita si tratterà di fluido caldo, viceversa si tratterà di fluido freddo.

Innanzitutto, all'interno del ciclo *for*, si andrà a verificare se il fluido caldo o il fluido freddo preso in considerazione si trovi sopra al pinch point. Quindi, nel caso di fluido caldo viene verificato se la temperatura di ingresso sia maggiore della temperatura di pinch point, mentre nel caso di fluido freddo, contrariamente, viene verificato se sia la temperatura di uscita ad essere maggiore di quella di pinch point.

In caso di esito positivo, i dati del fluido preso in esame saranno rispettivamente inseriti nella matrice *hot_line_over* nel caso di fluido caldo oppure *cold_line_over* nel caso di fluido freddo. A questo punto viene verificato se nel caso dei fluidi caldi, la temperatura di uscita sia minore a quella del pinch point ed in caso di risposta affermativa, nella matrice contenente i dati del fluido caldo sopra al pinch point, viene imposta come temperatura d'uscita la temperatura di pinch point dei caldi. Analogamente per i fluidi freddi, viene verificato se la temperatura di ingresso sia minore di quella di pinch point ed in caso di risposta affermativa, viene imposta come temperatura d'ingresso nella matrice dei fluidi freddi sopra al pinch point quella di pinch point dei freddi.

Successivamente, sempre all'interno del ciclo *for*, viene verificato se il fluido si trova al di sotto del pinch point. Quindi nel caso di fluido caldo, viene verificato se la temperatura d'uscita sia inferiore a quella di pinch point dei caldi. In caso di risposta affermativa, i dati del fluido vengono inseriti nella matrice *hot_line_under*. Viene inoltre verificato se la temperatura d'ingresso sia minore di quella di pinch point ed in caso di risposta positiva, il valore di ingresso del fluido viene modificato ponendolo uguale alla temperatura di pinch point dei caldi. Analogamente, nel caso di fluido freddo, viene verificato se la temperatura d'ingresso sia minore rispetto a quella di pinch point. In caso di risposta affermativa vengono inseriti i dati del fluido nella matrice *cold_line_under* ed inoltre viene verificato se la temperatura di uscita sia maggiore rispetto a quella di pinch. In caso di esito positivo si procederà con il modificare la temperatura di uscita per porla uguale a quella di pinch point dei fluidi freddi.

```

361      %DIVISIONE FLUSSI SOPRA E SOTTO PINCH POINT
362 -   for i=1:n_fluids
363 -       if fluids(i,2)>fluids(i,3) && fluids(i,2)>T_pinch_hot
364 -           hot_over=hot_over+1;
365 -           hot_line_over(hot_over,2:4)=fluids(i,1:3);
366 -           hot_line_over(hot_over,1)=i;
367 -           if hot_line_over(hot_over,4)<T_pinch_hot
368 -               hot_line_over(hot_over,4)=T_pinch_hot;
369 -           end
370 -       elseif fluids(i,2)<fluids(i,3) && fluids(i,3)>T_pinch_cold
371 -           cold_over=cold_over+1;
372 -           cold_line_over(cold_over,2:4)=fluids(i,1:3);
373 -           cold_line_over(cold_over,1)=i;
374 -           if cold_line_over(cold_over,3)<T_pinch_cold
375 -               cold_line_over(cold_over,3)=T_pinch_cold;
376 -           end
377 -       end

```

Figura 27 - Inserimento dei dati nelle matrici dei fluidi sopra al pinch point

Come si può vedere, nelle matrici appena create, i dati vengono inseriti nelle colonne 2, 3 e 4, mentre nella prima colonna viene inserito l'indice del fluido.

```

378 -     if fluids(i,2)>fluids(i,3) && fluids(i,3)<T_pinch_hot
379 -         hot_under=hot_under+1;
380 -         hot_line_under(hot_under,2:4)=fluids(i,1:3);
381 -         hot_line_under(hot_under,1)=i;
382 -         if hot_line_under(hot_under,3)>T_pinch_hot
383 -             hot_line_under(hot_under,3)=T_pinch_hot;
384 -         end
385 -     elseif fluids(i,2)<fluids(i,3) && fluids(i,2)<T_pinch_cold
386 -         cold_under=cold_under+1;
387 -         cold_line_under(cold_under,2:4)=fluids(i,1:3);
388 -         cold_line_under(cold_under,1)=i;
389 -         if cold_line_under(cold_under,4)>T_pinch_cold
390 -             cold_line_under(cold_under,4)=T_pinch_cold;
391 -         end
392 -     end
393 - end

```

Figura 28 - Inserimento dati nelle matrici dei fluidi sotto al pinch point

Nell'esempio preso in considerazione, le matrici risultanti vengono riportate di seguito.

	1	2	3	4
1	1	14	425	115
2	2	8	305	65

Figura 29 - Matrice dei fluidi caldi sopra al pinch point

	1	2	3	4
1	3	28	55	205
2	4	7.6000	55	405

Figura 30 - Matrice dei fluidi freddi sopra al pinch point

È possibile notare come nella matrice dei fluidi caldi sopra al pinch point, per quanto riguarda il fluido numero due, la temperatura di uscita risulti pari a quella del pinch point, nonostante la reale temperatura di uscita sia inferiore. Quindi, come spiegato in precedenza, la divisione è andata a buon fine. Stessa cosa vale per il fluido 4 nella matrice dei fluidi freddi sopra al pinch point.

Variables - hot_line_under				
hot_line_under				
1x4 double				
	1	2	3	4
1	2	8	65	15

Figura 31 - Matrice dei fluidi caldi sotto al pinch point

Variables - cold_line_under				
cold_line_under				
1x4 double				
	1	2	3	4
1	4	7.6000	5	55

Figura 32 - Matrice dei fluidi freddi sotto al pinch point

È possibile inoltre constatare come il fluido numero due ed il fluido numero quattro siano gli unici, in questo specifico esempio, ad essere presenti sia sopra che sotto al pinch point. Successivamente, tramite l'ausilio del *ciclo for*, vengono salvati gli indici corrispondenti ai fluidi caldi e ai fluidi freddi presenti al pinch point, verificando per i primi se la temperatura di uscita presente nella matrice *hot_line_over* sia pari a quella di pinch point dei caldi, per i secondi se la temperatura di ingresso nella matrice *cold_line_over* sia pari a quella di pinch point dei freddi. Tutto ciò ovviamente si riferisce alla parte al di sopra del pinch point.

```

394     %Trovo gli indici dei flussi che si trovano al pinch point che mi
395     %serviranno per trovare il primo collegamento al PP
396     if exist('hot_line_over','var')
397         j=1;
398         for i=1:length(hot_line_over(:,1))
399             if hot_line_over(i,4)==T_pinch_hot
400                 hot_pinch(j,1)=i;%indici dei fluidi caldi presenti al PP
401                 j=j+1;
402             end
403         end
404     end
405     j=1;
406     if exist('cold_line_over','var')
407         for i=1:length(cold_line_over(:,1))
408             if cold_line_over(i,3)==T_pinch_cold
409                 cold_pinch(j,1)=i;%indici fluidi freddi presenti al PP
410                 j=j+1;
411             end
412         end
413     end

```

Figura 33 - Ciclo per trovare gli Indici dei fluidi presenti al pinch point

Ovviamente, i due cicli vengono eseguiti previa verifica dell'esistenza delle due matrici a cui si fa riferimento. Infatti, in alcuni casi, è possibile che sopra al pinch point non vi siano fluidi e quindi, in questo caso il programma non sarebbe in grado di risolvere il problema. In questo caso, sfruttando la funzione della libreria di MatLab *exist*, si tiene conto di questa evenienza.

Gli indici dei fluidi presenti al pinch point, vengono salvati nei vettori colonna *hot_pinch* e *cold_pinch*, ed in questo specifico caso risultano essere il fluido numero due dei caldi e tutti i fluidi freddi.

2.2.2 Controllo della numerosità dei fluidi

A questo punto del programma, dopo la divisione dei flussi, verrà effettuato il controllo della numerosità dei fluidi al pinch point, come descritto nel capitolo precedente. Nel caso in cui non venissero rispettate le regole di numerosità (si ricorda che nella parte sopra al pinch point devono essere presenti, strettamente al pinch point un numero di fluidi caldi minore rispetto ai fluidi freddi, mentre sotto al pinch point vale la regola contraria) il programma si fermerà e manderà un avviso all'utente del mancato rispetto della regola ed avviserà di procedere con la divisione di uno o più flussi. A questo punto l'utente dividerà, come meglio crede, i fluidi considerati e dovrà poi inserirli nei dati, come se fossero fluidi separati.

Se i fluidi saranno stati separati correttamente, il programma dovrebbe dare una configurazione corretta all'utente. Questa operazione di controllo verrà effettuata grazie all'ausilio di contatori che valuteranno quanti fluidi caldi e freddi sono presenti al pinch point.

```
if control_hot_over>control_cold_over
    disp('La numerosità dei fluidi sopra al pinch point non viene rispettata');
    disp('Procedere con la divisione di uno o più flussi freddi');
    return;
end
if control_cold_under>control_hot_under
    disp('La numerosità dei fluidi sotto al pinch point non viene rispettata');
    disp('procedere con la divisione di uno o più flussi caldi');
    return;
end
```

Figura 34 - Controllo numerosità dei fluidi

2.3 Tracciamento della rete sopra al pinch point

Dopo aver diviso l'impianto, come illustrato nel paragrafo precedente, è possibile iniziare ad effettuare i collegamenti per trovare la configurazione. Come raccomandato nella pratica, anche nel programma vengono trattate separatamente le due parti dell'impianto e si è scelto di iniziare dalla parte sopra al pinch point per poi analizzare successivamente quella sotto al pinch point.

2.3.1 Costruzione matrice delle possibilità

Come riportato nel Capitolo 1, per il tracciamento della rete è necessario partire dai collegamenti da effettuare al pinch point. Sarà quindi necessario verificare quali siano i collegamenti possibili che rispettino la regola delle capacità termiche. Si ricorda che rigorosamente al pinch point, nella parte superiore ad esso, la capacità termica dei fluidi freddi deve essere superiore a quella dei caldi. Pertanto, viene costruita una matrice per verificare innanzitutto quali siano i collegamenti tra fluidi caldi e fluidi freddi fattibili al pinch point.

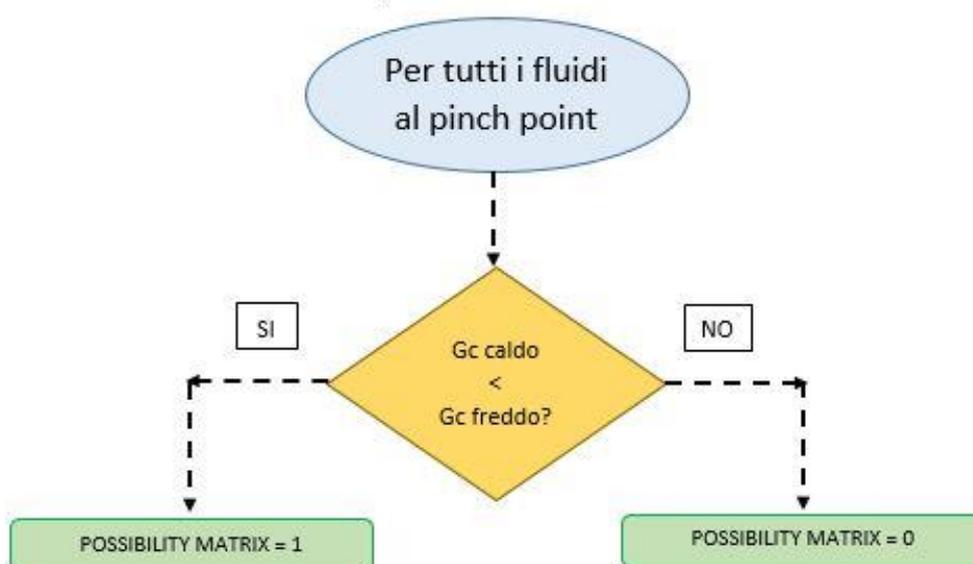


Figura 35 - Diagramma per creazione matrice delle possibilità

Nella prima colonna della *possibility_matrix_over*, verranno inseriti gli indici dei fluidi caldi presenti al pinch point, mentre nella prima riga verranno inseriti gli indici dei fluidi freddi presenti al pinch point. Nel primo elemento della matrice, corrispondente alla riga numero uno e alla colonna numero uno, apparirà uno zero che ovviamente non andrà considerato, in quanto elemento necessario per creare la scrittura tabellare e permettere di associare un valore a tutti gli incroci tra fluidi caldi e freddi.

```

414     %%Trovo la matrice delle possibilità: matrice che mi da come risultato 1 se
415     %%il collegamento tra fluido freddo e caldo è possibile
416     if exist('hot_line_over','var')
417     for i=1:length(hot_pinch(:,1))
418         possibility_matrix_over(i+1,1)=hot_line_over(hot_pinch(i,1),1);
419     for j=1:length(cold_pinch(:,1))
420         possibility_matrix_over(1,j+1)=cold_line_over(cold_pinch(j,1),1);
421         if hot_line_over(hot_pinch(i),2)<= cold_line_over(cold_pinch(j),2)
422             possibility_matrix_over(i+1,j+1)=1;
423         end
424     end
425 end

```

Figura 36 - Ciclo per la creazione della matrice possibility_matrix_over

Ovviamente, anche in questo caso, il tutto è svolto presupponendo l'esistenza di almeno una linea calda sopra al pinch point, altrimenti non avrebbe senso effettuare i collegamenti. Perciò, tutto il processo descritto in seguito sarà all'interno di un *if*, in cui anche in questo caso, se non ci fossero fluidi caldi oltre il pinch point, si passerebbe allo step successivo.

In questo specifico esempio, la matrice delle possibilità presenterà come fluido caldo solamente il numero due, mentre avrà nella prima riga entrambi i fluidi freddi.

	1	2	3
1	0	3	4
2	2	1	0

Figura 37 - Possibility_matrix_over

In questo caso, la matrice è molto semplice e come si può notare, l'unico collegamento possibile al pinch point è tra il fluido caldo numero due ed il fluido freddo numero tre. Si vedrà poi nel seguito, per casi più complessi, come le combinazioni possibili saranno molteplici.

2.3.2 Creazione matrice con gli indici delle possibili combinazioni

Il passo successivo alla creazione della matrice delle possibilità è la creazione di un'altra matrice in cui compaiono tutte le combinazioni possibili dei fluidi freddi chiamata *combination_cold_pinch_over*. In altri termini, viene creato un vettore con gli indici dei fluidi caldi che devono necessariamente essere collegati al pinch point e poi viene creata una matrice con un numero di colonne pari al numero dei fluidi caldi che devono essere collegati al pinch point e numero di righe pari a tutte le permutazioni possibili dei fluidi freddi derivanti dalla matrice delle possibilità. In questo modo, successivamente, all'interno di un ciclo, si potranno associare i fluidi caldi del vettore alla corrispondente colonna della matrice dei fluidi freddi e questo verrà effettuato per ogni riga della matrice in modo tale da considerare tutte le possibili combinazioni consentite.

In primo luogo, avviene la creazione di una matrice chiamata *index*, in cui vengono inseriti, per ogni riga della *possibility_matrix_over*, gli indici corrispondenti ai fluidi freddi che sono risultati idonei al collegamento. Quindi, la riga uno corrisponderà al primo fluido caldo presente nella matrice delle possibilità e per ogni colonna della riga numero uno verrà inserito l'indice del fluido freddo idoneo ad essere collegato con quello specifico fluido caldo. Questa operazione viene ripetuta per tutti i fluidi caldi collegabili al pinch point, quindi per tutte le righe della *possibility_matrix_over*.

```
425 %Creo matrice con gli indici delle possibili combinazioni
426 - for i=1:length(possibility_matrix_over(:,1))-1
427 -     r=0;
428 -     for j=1:length(possibility_matrix_over(1,:))-1
429 -         if possibility_matrix_over(i+1,j+1)==1
430 -             r=r+1;
431 -             index(i,r)=possibility_matrix_over(1,j+1);
432 -         end
433 -     end
434 - end
```

Figura 38 - Creazione matrice index

La matrice creata, avrà una lunghezza, rispettivamente al numero delle colonne, pari al numero di uno, presenti nella matrice delle possibilità, nella riga con più collegamenti possibili. Nelle altre righe della matrice *index*, alla fine, se il numero di fluidi freddi collegabili ai successivi fluidi caldi fosse inferiore, appariranno dei valori nulli.

Questo sarà il primo step seguito dal programma. Il passo successivo consisterà nel svolgere azioni diverse a seconda di quanto contenuto nella matrice appena creata.

Il programma distinguerà essenzialmente tre casi.

- 1) Il primo caso, il più semplice ed immediato, avviene quando è possibile un solo collegamento al pinch point, quindi quando sono presenti esclusivamente un fluido caldo ed un fluido freddo che rispettano i vincoli considerati. In questo caso, la matrice *index* conterrà come unico valore l'indice del fluido freddo collegabile al pinch point. Il caso in esempio rientra in questo ambito.
- 2) Il secondo caso, avviene quando al pinch point è presente un solo fluido caldo, che quindi deve essere necessariamente collegato, ma sono presenti più fluidi freddi al pinch point che rispettano il vincolo delle capacità, perciò vi saranno più possibilità di collegamento. In questo caso, la matrice *index* sarà un vettore riga, ed essendo presente un solo fluido caldo per valutare successivamente tutti i possibili collegamenti, l'operazione che svolge il programma consiste nel trasformare il vettore riga in un vettore colonna tramite il comando *transpose*.

```
444      %Se c'è solo un collegamento: CASO 1
445 -      if length(index(1,:)) == 1
446 -          combination_matrix = index;
447 -          combination_cold_pinch_over = index;
448      %Se ci sono più collegamenti possibili: CASO 2
449 -      elseif length(hot_pinch) == 1 && (length(index(1,:))) > 1
450 -          combination_matrix = transpose(index);
451 -          combination_cold_pinch_over = transpose(index);
452 -      else
453          %CASO 3
```

Figura 39 - Creazione matrice *combination_cold_pinch_over*. Caso 1 e caso 2

- 3) Il terzo caso è il più complesso e avviene quando al pinch point sono presenti più fluidi caldi e freddi collegabili, quindi quando esistono più combinazioni possibili. In questa evenienza, il programma seguirà un algoritmo creato appositamente per considerare tutte le scelte possibili. Per la spiegazione dell'algoritmo, ci si avvarrà dell'ausilio di un esempio indipendente da quello preso in considerazione per poter essere i più esplicativi possibile.

Si immagini di avere una matrice delle possibilità di questo tipo:

/	4	5	6	7
1	1	0	0	1
2	1	0	1	0
3	0	1	0	1

Come detto in precedenza, nella prima colonna sono presenti i fluidi caldi da collegare al pinch point, in questo caso i fluidi uno, due e tre, mentre nella prima riga, sono presenti i fluidi freddi con cui è possibile collegare i fluidi caldi. I collegamenti possibili sono contraddistinti dal numero uno, mentre nel caso in cui il collegamento non fosse fattibile comparirà uno zero. Per esempio, il fluido caldo numero uno sarà collegabile con il fluido freddo numero quattro oppure con il fluido freddo numero sette.

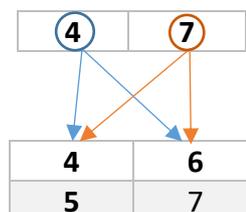
A questo punto verrà creata la *matrice index* contenente per ogni fluido caldo gli indici dei rispettivi fluidi freddi collegabili.

4	7
4	6
5	7

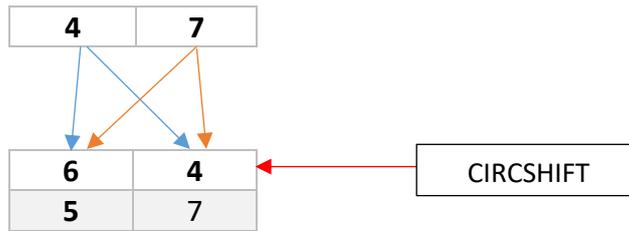
Quindi, ad esempio per il fluido caldo numero uno, corrispondente alla prima riga, sarà possibile il collegamento con quattro o con sette, per il fluido caldo due, corrispondente alla seconda riga saranno possibili i collegamenti con quattro o con sei e così via.

Il passo successivo sarà quello di costruire la matrice con tutte le possibili permutazioni dei fluidi freddi. Per fare ciò si utilizzeranno le due funzioni della libreria MatLab *combvec* e *circshift*.

La funzione *combvec* permette di trovare le possibili permutazioni tra gli elementi di un vettore rispetto agli elementi di un altro vettore oppure tra gli elementi di un vettore rispetto agli elementi di una matrice. Nel caso in esame, per ogni riga, vengono valutate le possibili combinazioni tra la riga stessa considerata e la restante matrice. Dunque, all'interno del *ciclo for*, viene prelevata la riga in esame che prenderà il nome di *a1* e tramite la funzione *combvec* si otterranno le possibili permutazioni rispetto al resto della matrice e si andranno a collocare nella matrice *combination_matrix*.



Si saranno trovate, dunque, quattro combinazioni differenti. A questo punto, viene utilizzata la funzione *circshift* per tener conto delle altre combinazioni. Questa funzione permette di spostare in modo circolare gli elementi di una riga. Quindi, tenendo sempre separato il primo vettore, per ogni riga, si andranno a spostare gli indici fino a quando non saranno tornati nella posizione iniziale. Anche in questo caso, le nuove combinazioni ottenute, si andranno ad aggiungere alle precedenti già salvate nella matrice *matrix_combination*.



La stessa cosa verrà fatta per le righe successive.

```

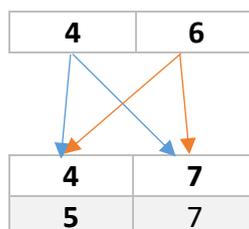
453 %CASO 3
454
455 - for i=1:length(index_fix(:,1))
456 -     al=index(i,:);
457 -     index(i,:)=[];
458 -     c=1;
459 -     aa=r;
460 -     while c<=length(index(:,1))
461 -         b=0;
462 -         while b<length(index_fix(1,:))-1
463 -             b=b+1;
464 -             permutations=combvec(al,index);
465 -             j=length(permutations(1,:))-1;
466 -             combination_matrix(:,r:r+j)=permutations;
467 -             index(c,:)=circshift(index(c,:),1);
468 -             r=length(combination_matrix(1,:))+1;
469 -         end
470 -         c=c+1;
471 -     end

```

Figura 40 - Creazione combination_matrix

Questa operazione verrà ripetuta, dopo aver finito tutti i collegamenti per la prima riga, salvando come vettore la seconda riga ed andandolo a combinare con le altre righe della matrice come appena mostrato.

In questo caso, però, sorge un problema: escludendo dalla matrice la riga salvata come vettore, non vi è più corrispondenza della riga con l'indice del flusso caldo corrispondente.



Dunque, la prima riga della nuova combinazione, nella realtà deve essere associata al fluido caldo numero due, quindi dovrà essere ristabilito questo ordine prima del

salvataggio del nuovo collegamento. Questo viene eseguito tramite un ciclo *while*, in cui si riportano le varie righe nella riga corrispondente al fluido caldo collegabile. Questa operazione verrà eseguita fino al termine delle righe della matrice *index*.

```

473 - %per riportare le righe al loro posto
474 - if i>1
475 -     s=1;
476 -     while s<i
477 -         row_dummy=combination_matrix(s,aa:end);
478 -         combination_matrix(s,aa:end)=combination_matrix(s+1,aa:end);
479 -         combination_matrix(s+1,aa:end)=row_dummy;
480 -         s=s+1;
481 -     end
482 - end
483 - index=index_fix;
484 -
485 - end

```

Figura 41 - Spostamento righe successive alla prima

L'ultimo step di questa parte, consiste nell'escludere da *combination_matrix* appena creata tutte quelle combinazioni che non sono permesse.

Dunque, verranno escluse:

- Combinazioni che si ripetono.
- Combinazioni nelle quali sono presenti dei valori nulli: infatti nella matrice *index* potrebbero comparire degli zero negli slot che servono per completare la matrice e dunque non sono collegamenti reali.
- Combinazioni in cui vi sono nella stessa colonna valori che si ripetono: in questo caso vorrebbe dire collegare due o più fluidi caldi con lo stesso fluido freddo e ciò non è ammesso al pinch point.

La nuova matrice in cui sono presenti tutte le combinazioni possibili ammesse prenderà il nome di *combination_cold_pinch_over*. Da notare è il fatto che la matrice, rispetto a quella prima delle esclusioni, è stata trasposta in modo tale da avere per ogni riga le possibili combinazioni.

4	6	7
4	6	5
7	4	5
7	6	5

```

486 -         s=1;
487 -         for i=1:length(combination_matrix(1,:))
488 -             j=0;
489 -             flag=0;
490 -             while j<length(combination_matrix(:,1)) && flag==0
491 -                 j=j+1;
492 -                 if combination_matrix(j,i)==0
493 -                     flag=1;
494 -                 end
495 -             end
496 -             if flag==0
497 -                 cold_combination_dummy(:,s)=combination_matrix(:,i);
498 -                 s=s+1;
499 -             end
500 -         end

```

Figura 42 - Eliminazione delle colonne contenenti dei valori nulli

```

501 -         cold_combination_dummy2=transpose(cold_combination_dummy);
502 -         cold_combination_dummy3=unique(cold_combination_dummy2,'rows');
503 -         s=1;
504 -         for i=1:length(cold_combination_dummy3(:,1))
505 -             j=1;
506 -             flag=0;
507 -             while j<length(cold_combination_dummy3(1,:)) && flag==0
508 -                 j=j+1;
509 -                 for t=1:j-1
510 -                     if cold_combination_dummy3(i,j)==cold_combination_dummy3(i,t)
511 -                         flag=1;
512 -                     end
513 -                 end
514 -             end
515 -             if flag==0
516 -                 combination_cold_pinch_over(s,:)=cold_combination_dummy3(i,:);
517 -                 s=s+1;
518 -             end
519 -         end
520 -     end
521 -     clear cold_combination_dummy cold_combination_dummy2 cold_combination_dummy3
522 -     clear c s r b aa al index index_fix row_dummy permutations combination_matrix
523 -
524 -     combination_hot_pinch_over(1,:)=possibility_matrix_over(2:end,1);

```

Figura 43 - Eliminazione colonne uguali e colonne con valori ripetuti

Verrà inoltre creato il vettore dei fluidi caldi da collegare al pinch point.

1	2	3
---	---	---

2.3.3 Tracciamento della rete

Trovati tutti gli indici dei fluidi freddi al pinch point, è possibile procedere con il tracciamento della rete al di sopra del pinch point. Si vedrà di seguito il criterio utilizzato per il collegamento dei fluidi al pinch point.

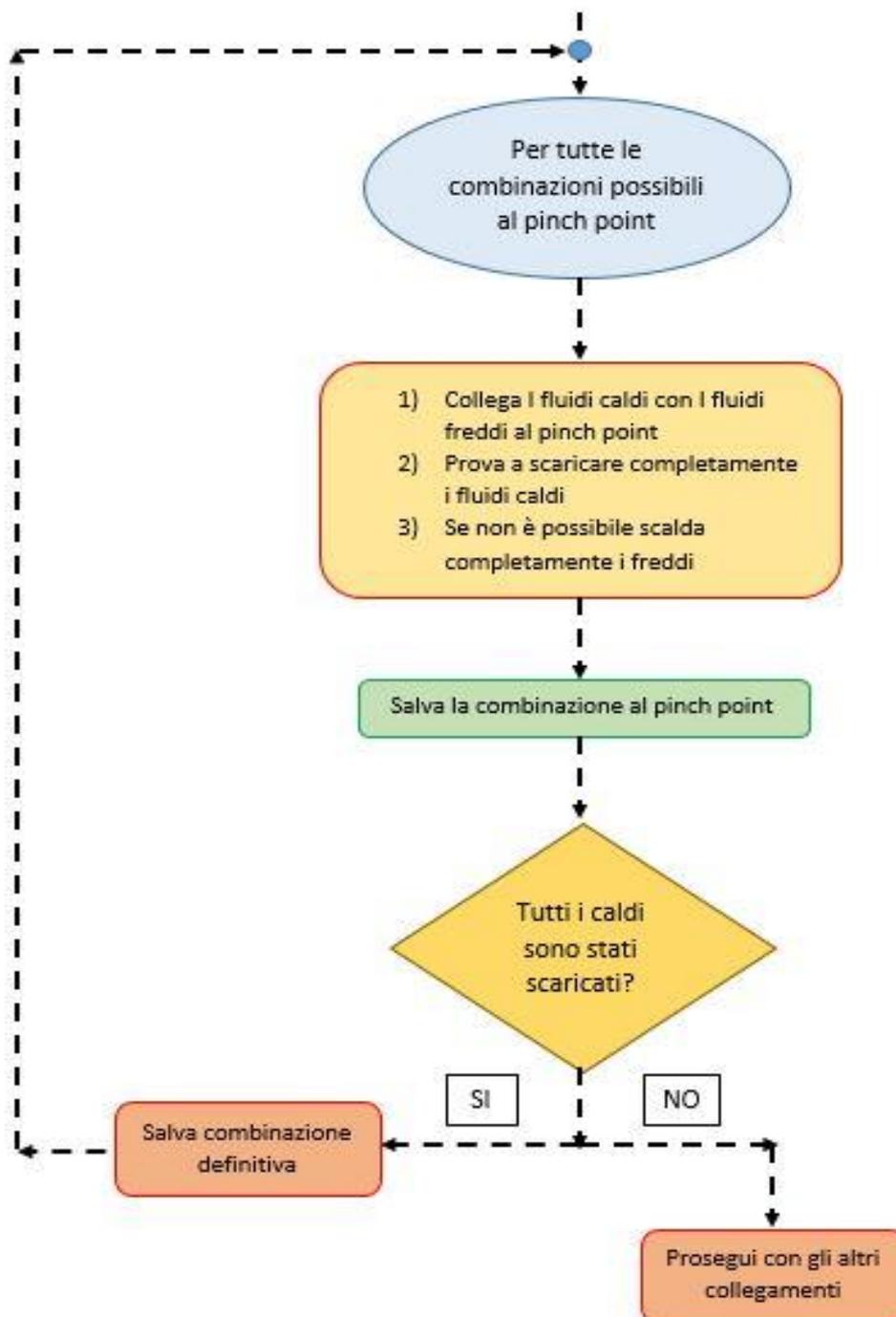


Figura 44 - Diagramma per i collegamenti da effettuare al pinch point

Per prima cosa, si andranno a collegare i fluidi caldi al pinch point con i fluidi freddi corrispondenti, nella prima riga della matrice *combination_cold_pinch_over*. Per ogni fluido, si verificherà innanzitutto se è possibile scaricare completamente il fluido caldo, senza superare la temperatura a cui deve uscire il fluido freddo dall'impianto, in caso contrario si procederà scaldando completamente il fluido freddo e scaricando parzialmente il fluido caldo.

Quindi, innanzitutto, viene calcolato il flusso che verrebbe scambiato scaricando completamente tutto il fluido caldo, salvandolo nella variabile *phi_dummy* e la conseguente temperatura di uscita che ci sarebbe dal lato fluido freddo salvandola nella variabile *Tout_dummy*. Con un *if*, viene stabilito se la temperatura di uscita supera quella convenuta per il fluido freddo e contemporaneamente se viene rispettato il ΔT minimo tra ingresso allo scambiatore del fluido caldo e uscita allo scambiatore del fluido freddo. Se tutti questi vincoli vengono rispettati allora si procede con il collegamento. Vengono salvate le temperature di uscita dallo scambiatore nella matrice *Tout* che cambierà lunghezza dopo ogni collegamento. La prima colonna corrisponderà allo scambiatore numero uno, quindi al primo collegamento, mentre nelle righe corrispondenti ai fluidi coinvolti nello scambio termico appariranno le rispettive temperature di uscita. Nelle altre righe appariranno dei valori nulli. La stessa cosa viene effettuata per le temperature in ingresso allo scambiatore, salvando il tutto nella matrice *Tin*.

La matrice *heat_exchanger*, rappresenta i collegamenti effettuati, quindi, considerando anche in questo caso le colonne corrispondenti al numero di scambiatore e le righe corrispondenti all'indice dei fluidi, compariranno degli uno nelle righe corrispondenti ai flussi collegati e in tutte le altre righe compariranno dei valori nulli. Vengono inoltre create delle copie della matrice per dividere l'impianto in sopra e sotto pinch point chiamate *hot_line_over_dummy* e *cold_line_over_dummy* in cui si andranno a modificare le temperature di uscita e ingresso del fluido in modo tale da utilizzare successivamente queste matrici per sfruttare il flusso rimasto, nel caso non fosse stato sfruttato completamente.

Vengono creati anche dei vettori chiamati *exhaust_hot_fluid* e *exhaust_cold_fluid*, in cui inizialmente ci sono tanti zeri quanti il numero dei fluidi caldi e freddi rispettivamente. Nel momento in cui un fluido caldo venisse utilizzato completamente, la riga corrispondente all'indice del fluido caldo verrebbe modificata immettendo un uno al posto dello zero. Analogamente per i fluidi freddi, nel momento in cui un fluido freddo venisse completamente riscaldato, si immetterebbe un uno al posto dello zero.

A questo punto il contatore per gli scambiatori di calore viene aumentato e si può procedere con il successivo collegamento.

```

%%%Provo a scaricare tutto il caldo
phi_dummy=(hot_line_over_dummy(index_hot(j),3)-hot_line_over_dummy(index_hot(j),4))...
    *hot_line_over_dummy(index_hot(j),2);
Tout_dummy=cold_line_over_dummy(index_cold(j),3)+...
    (phi_dummy/cold_line_over_dummy(index_cold(j),2));

```

Figura 45 - Calcolo flusso e temperatura in uscita per scaricare tutto il fluido caldo

```

%Condizioni rispettate
if (hot_line_over_dummy(index_hot(j),3)-Tout_dummy)>=dT && ...
    Tout_dummy<=cold_line_over_dummy(index_cold(j),4)
    Tout(cold_line_over_dummy(index_cold(1,j)),z)=Tout_dummy;
    Tout(hot_line_over_dummy(index_hot(1,j)),z)=hot_line_over_dummy(index_hot(j),4);
    Tin(cold_line_over_dummy(index_cold(1,j)),z)=cold_line_over_dummy(index_cold(j),3);
    Tin(hot_line_over_dummy(index_hot(1,j)),z)=hot_line_over_dummy(index_hot(j),3);
    phi(1,z)=phi_dummy;
    heat_exchanger((combination_hot_pinch_over(1,j)),z)=1;
    heat_exchanger((combination_cold_pinch_over(i,j)),z)=1;
    exhaust_hot_fluid(index_hot(j),1)=1;
    cold_line_over_dummy(index_cold(j),3)=cold_line_over_dummy(index_cold(j),4);

    if Tout_dummy==cold_line_over_dummy(index_cold(j),4)
        exhaust_cold_fluid(index_cold(j),1)=1;
    else
        cold_line_over_dummy(index_cold(j),3)=Tout_dummy;
    end
    z=z+1;

```

Figura 46 - Operazioni nel caso le condizioni per scaricare completamente il caldo fossero rispettate

```

else
    phi_dummy=(cold_line_over_dummy(index_cold(j),4)-cold_line_over_dummy(index_cold(j),3))...
        *cold_line_over_dummy(index_cold(j),2);
    Tin_dummy=hot_line_over_dummy(index_hot(j),4)+(phi_dummy/hot_line_over_dummy(index_hot(j),2));
    if (Tin_dummy-cold_line_over_dummy(index_cold(j),4))>=dT
        Tout(cold_line_over_dummy(index_cold(1,j)),z)=cold_line_over_dummy(index_cold(j),4);
        Tout(hot_line_over_dummy(index_hot(1,j)),z)=hot_line_over_dummy(index_hot(j),4);
        Tin(cold_line_over_dummy(index_cold(1,j)),z)=cold_line_over_dummy(index_cold(j),3);
        Tin(hot_line_over_dummy(index_hot(1,j)),z)=Tin_dummy;
        phi(1,z)=phi_dummy;
        heat_exchanger((combination_hot_pinch_over(1,j)),z)=1;
        heat_exchanger((combination_cold_pinch_over(i,j)),z)=1;
        exhaust_cold_fluid(index_cold(j),1)=1;
        hot_line_over_dummy(index_hot(j),4)=Tin_dummy;
        cold_line_over_dummy(index_cold(j),3)=cold_line_over_dummy(index_cold(j),4);

        z=z+1;
    end

```

Figura 47 - Operazioni nel caso le condizioni per scaricare completamente il fluido caldo non fossero rispettate

Successivamente si andrà ad analizzare la parte di programma per i successivi collegamenti.

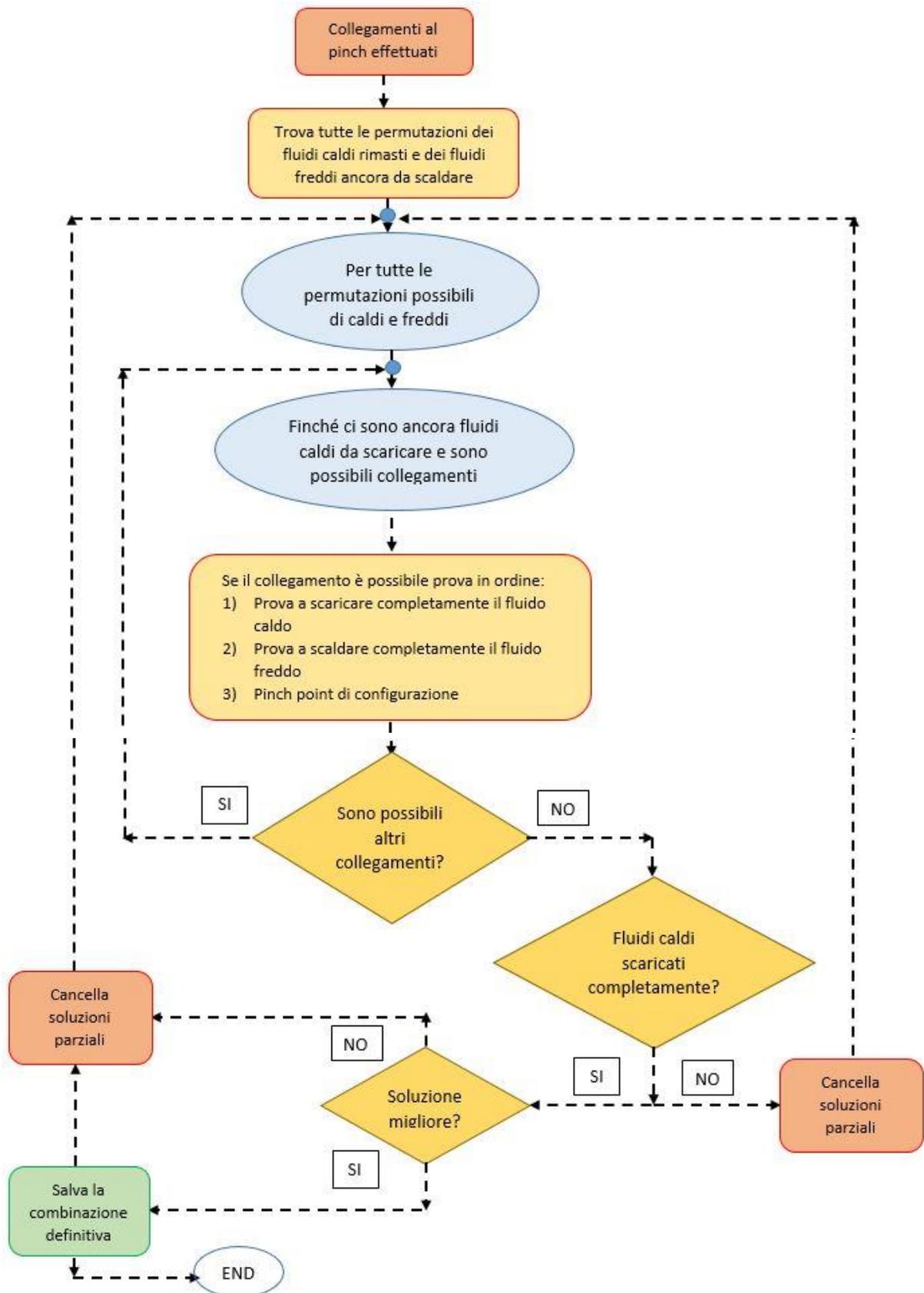


Figura 48 - Diagramma collegamenti successivi al pinch point

A questo punto viene verificato, tramite il vettore *exhaust_hot_fluid*, se tutti i fluidi caldi siano già stati scaricati completamente con i collegamenti effettuati al pinch point. Quindi, nel caso il vettore contenesse tutti uno, i collegamenti e di conseguenza tutti i risultati trovati, verranno salvati nelle matrici dei risultati definitivi e si procederà, nel caso siano presenti, con gli altri possibili collegamenti al pinch point, previa reinizializzazione delle matrici dei risultati parziali.

Nel caso in cui i fluidi caldi non venissero scaricati completamente con i collegamenti al pinch point, si procederà con l'effettuare i successivi collegamenti secondo le regole esplicitate nel capitolo precedente.

Per provare varie combinazioni di collegamenti, vengono salvate in due matrici distinte le permutazioni possibili tra i fluidi caldi rimasti e le permutazioni possibili tra i fluidi freddi rimasti. Questa operazione viene effettuata utilizzando la funzione della libreria Matlab *perms*, che consente proprio di trovare tutte le combinazioni possibili tra numeri in un determinato vettore. Nel caso in esame, i numeri corrispondono agli indici dei fluidi caldi e agli indici dei fluidi freddi rimasti. Verranno così create due matrici che prendono il nome rispettivamente di *permutation_cold* per le varie combinazioni tra fluidi freddi e *permutation_hot* per le varie combinazioni tra fluidi caldi.

Il criterio stabilito nel programma consiste nell'esaminare la prima riga della matrice *permutation_hot* e provare il collegamento tra il primo fluido di questa matrice con il primo fluido nella prima riga della matrice *permutation_cold*. Nel caso fosse possibile, come fatto precedentemente per i collegamenti al pinch point, il programma proverà a scaricare completamente il fluido caldo per utilizzare il numero minore di scambiatori possibile. Se questo provocasse il mancato rispetto delle regole sulle temperature, il programma proverà a scaldare completamente il freddo scaricando solo parzialmente il fluido caldo. Nell'eventualità in cui anche in questo caso non si rispettassero i vincoli legati alla temperatura, si procederà con l'effettuare il collegamento attraverso un pinch point di configurazione.

Per effettuare questa operazione, viene considerata l'ultima temperatura in uscita dal fluido caldo presente nella matrice *hot_line_over_dummy* e viene aumentata di 0.1°C. Si calcola poi il flusso scambiato utilizzando questo ΔT e si va a calcolare la corrispondente temperatura di uscita dallo scambiatore dal fluido freddo. Questa iterazione continuerà fintanto che la differenza di temperatura tra il fluido caldo in ingresso ed il fluido freddo in uscita non sia superiore al ΔT minimo consentito. Quando verrà raggiunto il valore limite, il ciclo terminerà e sarà effettuato il collegamento con l'ultimo flusso trovato e si andranno a salvare inoltre le varie temperature in ingresso e uscita come descritto per i passaggi precedenti.

Dopo ogni collegamento, il programma controllerà se i fluidi caldi sono stati scaricati completamente e nel caso di esito negativo, se siano ancora possibili altri collegamenti secondo il criterio che verrà esposto in seguito.

```

s=1;
for k=1:length(exhaust_hot_fluid)
    if exhaust_hot_fluid(k,1)==0
        hot_vector(1,s)=hot_line_over_dummy(k,1);
        ind_hot_vector(1,s)=k;
        s=s+1;
    end
end
s=1;
for k=1:length(exhaust_cold_fluid)
    if exhaust_cold_fluid(k,1)==0
        cold_vector(1,s)=cold_line_over_dummy(k,1);
        ind_cold_vector(1,s)=k;
        s=s+1;
    end
end
permutation_hot=perms(hot_vector);
permutation_cold=perms(cold_vector);
ind_perm_hot=perms(ind_hot_vector);
ind_perm_cold=perms(ind_cold_vector);

```

Figura 49 - Creazione delle matrici *permutation_hot* e *permutation_cold*

Di seguito viene riportata esclusivamente la parte di programma relativa al pinch point di configurazione, in quanto il raffreddamento totale dei fluidi caldi e il riscaldamento dei fluidi freddi è analoga alla parte di programma utilizzata per i collegamenti al pinch point come riportato in Figura 45 e Figura 46.

```

%PP di configurazione
dT_dummy=hot_line_over_dummy(ind_perm_hot(k,s),4)-cold_line_over_dummy(ind_perm_cold(h,g),3);
T_hot_dummy=hot_line_over_dummy(ind_perm_hot(k,s),4);
while dT_dummy>dT
    T_hot_dummy=T_hot_dummy+0.1;
    phi_dummy=(T_hot_dummy-hot_line_over_dummy(ind_perm_hot(k,s),4))...
        *hot_line_over_dummy(ind_perm_hot(k,s),2);
    T_cold_dummy=cold_line_over_dummy(ind_perm_cold(h,g),3)+...
        (phi_dummy/cold_line_over_dummy(ind_perm_cold(h,g),2));
    dT_dummy=T_hot_dummy-T_cold_dummy;
end

```

Figura 50 - Calcolo del flusso per il pinch point di configurazione

A questo punto, come detto, dopo ogni collegamento viene effettuato un test per capire se fossero possibili ulteriori collegamenti. Il criterio generale è quello di andare a vedere se, effettuando un successivo collegamento, venisse violata la regola della differenza minima di temperatura. Nel caso in cui non ci siano più le condizioni per poter aggiungere altri scambiatori e quindi scaricare completamente i fluidi caldi, viene impostato un puntatore in modo tale da uscire dal ciclo ed evitare un *loop* infinito che quindi non darebbe soluzione.

Per fare questa operazione è stato utilizzato l'ausilio di tre contatori, chiamati rispettivamente *count1*, *count2* e *count3*. Il primo contatore conta il numero di fluidi freddi che devono ancora essere completamente scaldati, quindi quanti zero sono rimasti nel vettore *exhaust_cold_fluid*. Il secondo contatore è inserito all'interno di due *cicli for* annidati in cui vengono esaminati tutti i possibili collegamenti ancora rimasti. Nel caso in cui la differenza di temperatura tra fluido caldo e fluido freddo fosse minore di quella minima consentita, il contatore viene aumentato di una unità. Per valutare le temperature in ingresso ed in uscita vengono utilizzate anche in questo caso le matrici *hot_line_over_dummy* e *cold_line_over_dummy*, che contengono i dati dei fluidi sopra al pinch point rispettivamente per i fluidi caldi e per i fluidi freddi.

Nel caso in cui, dopo aver esaminato tutti i possibili collegamenti per un fluido caldo con i fluidi freddi rimanenti, il contatore numero due fosse uguale al contatore numero uno, in un altro contatore, il numero tre, che questa volta sarà un vettore, verrà salvato il numero uno. Se i primi due contatori fossero diversi, verrà salvato il numero zero. Questa operazione viene effettuata per tutti i fluidi caldi rimasti. Al termine del ciclo, il vettore contatore numero tre viene confrontato con il numero di fluidi caldi ancora da scaricare. Se contiene tutte cifre pari ad uno in numero uguale al numero di fluidi caldi da scaricare, allora vorrà dire che nessun collegamento ulteriore è fattibile, pertanto il puntatore *exit* viene impostato pari ad uno e questo sarà il segnale che i collegamenti dopo il pinch salvati dovranno essere cancellati e si ripartirà con la successiva permutazione di fluidi freddi o di fluidi caldi. Nel caso contrario allora si proseguirà con il successivo collegamento utilizzando sempre lo stesso criterio.

Per ogni combinazione tentata, anche se non andata a buon fine, viene aumentato un contatore chiamato *a_searched_combination_over*, per permettere all'utente di visualizzare alla fine di tutto il processo quante combinazioni al di sopra del pinch point sono state provate dal programma. Successivamente si vedrà, che un altro contatore è stato creato per andare a valutare tutte le combinazioni favorevoli tentate, di cui si andrà a salvare solo la migliore, cioè quella che utilizza il minor numero di scambiatori per provvedere agli scambi termici.

```

ff=1;
count1=length(exhaust_cold_fluid(:,1))-sum(exhaust_cold_fluid(:,1));
count3=0;
for x=1:length(hot_line_over_dummy(:,1))
    if exhaust_hot_fluid(x,1)==0
        count2=0;
        for y=1:length(cold_line_over_dummy(:,1))
            if (hot_line_over_dummy(x,4)-cold_line_over_dummy(y,3)<dT...
                && exhaust_cold_fluid(y,1)==0
                count2=count2+1;
            end
        end
        if count2==count1
            count3(1,ff)=1;
            ff=ff+1;
        else
            count3(1,ff)=0;
            ff=ff+1;
        end
    end
end
if count3==ones(1,length(exhaust_hot_fluid(:,1))-sum(exhaust_hot_fluid(:,1)))
    exit=1;
    a_searched_combination_over=a_searched_combination_over+1;
end

```

Figura 51 - Valutazione della possibilità di effettuare altri collegamenti rispettando i vincoli

Effettuato questo controllo, si saprà che non è più possibile compiere altri collegamenti, quindi si dovrà effettuare un secondo controllo per stabilire se si è trovata una configurazione possibile, quindi si dovrà stabilire se i fluidi caldi siano stati scaricati completamente. Per questo controllo viene confrontato il vettore *exhaust_hot_fluid* con un altro vettore chiamato *end_vector*. Questo è un vettore che ha lunghezza pari ad *exhaust_hot_fluid* contenente tutti valori unitari. Se i due vettori sono uguali, significa che i fluidi caldi sopra al pinch point sono stati scaricati in modo completo quindi si sarà trovata una configurazione. Pertanto verrà incrementato il contatore *a_finded_combination_over*, che conta il numero di combinazioni positive trovate.

A questo punto, dovrà essere valutato se questa combinazione sia migliore rispetto a quella salvata in precedenza. Nel caso in cui fosse la prima combinazione positiva trovata, allora essa verrà salvata automaticamente nelle matrici dei risultati a seguito dei collegamenti già salvati precedentemente al pinch point e successivamente verranno cancellati i valori nelle matrici dei risultati parziali per poter valutare le altre possibili combinazioni se ce ne fossero. Nel caso in cui non fosse la prima, allora verrà valutato se il numero delle colonne della matrice dei risultati parziali, corrispondente al numero degli scambiatori, sia minore rispetto al numero di colonne della matrice dei risultati definitivi. In caso di esito positivo, si cancelleranno le colonne dei collegamenti successivi al pinch point nella matrice dei risultati definitivi e si sostituiranno con gli ultimi trovati.

In caso negativo, nulla verrà salvato e si procederà con il cancellare le colonne nelle matrici dei risultati parziali e si procederà con il verificare altre possibili combinazioni date dalle diverse permutazioni di fluidi trovate in precedenza. Verranno inoltre ripristinate le matrici dei fluidi sopra e sotto al pinch point *hot_line_over_dummy* e *cold_line_over_dummy*, in modo da poter ritornare ad avere le temperature valutate dopo i collegamenti al pinch point.

```

if isequal(end_vector,exhaust_hot_fluid) == 1
    a_searched_combination_over=a_searched_combination_over+1;
    a_finded_combination_over=a_finded_combination_over+1;
    count_configuration=count_configuration+1;
    if count_configuration>1
        if length(heat_exchanger(1,:))<length(heat_exchanger_def(1,:))
            clear Tout_def Tin_def phi_def heat_exchanger_def
            clear hot_line_over_def cold_line_over_def
            Tout_def=Tout;
            Tin_def=Tin;
            phi_def=phi;
            heat_exchanger_def=heat_exchanger;
            cold_line_over_dummy_def=cold_line_over_dummy;
            hot_line_over_dummy_def=hot_line_over_dummy;
        end
    end

```

Figura 52 - Combinazione positiva trovata migliore rispetto a quella salvata in precedenza

```

        else
            Tout_def=Tout;
            Tin_def=Tin;
            phi_def=phi;
            heat_exchanger_def=heat_exchanger;
            cold_line_over_dummy_def=cold_line_over_dummy;
            hot_line_over_dummy_def=hot_line_over_dummy;
        end
    end
    heat_exchanger(:,z_pinch:end)=[];
    phi(z_pinch:end)=[];
    Tout(:,z_pinch:end)=[];
    Tin(:,z_pinch:end)=[];
    cold_line_over_dummy=cold_line_pinch;
    hot_line_over_dummy=hot_line_pinch;
    exhaust_hot_fluid=exhaust_hot_pinch;
    exhaust_cold_fluid=exhaust_cold_pinch;
    z=z_pinch;
end

```

Figura 53 - Combinazione positiva trovata ma peggiore rispetto a quella già salvata

Sommariamente, è possibile rappresentare tutto il processo di collegamenti sopra al pinch point attraverso il seguente diagramma di flusso.

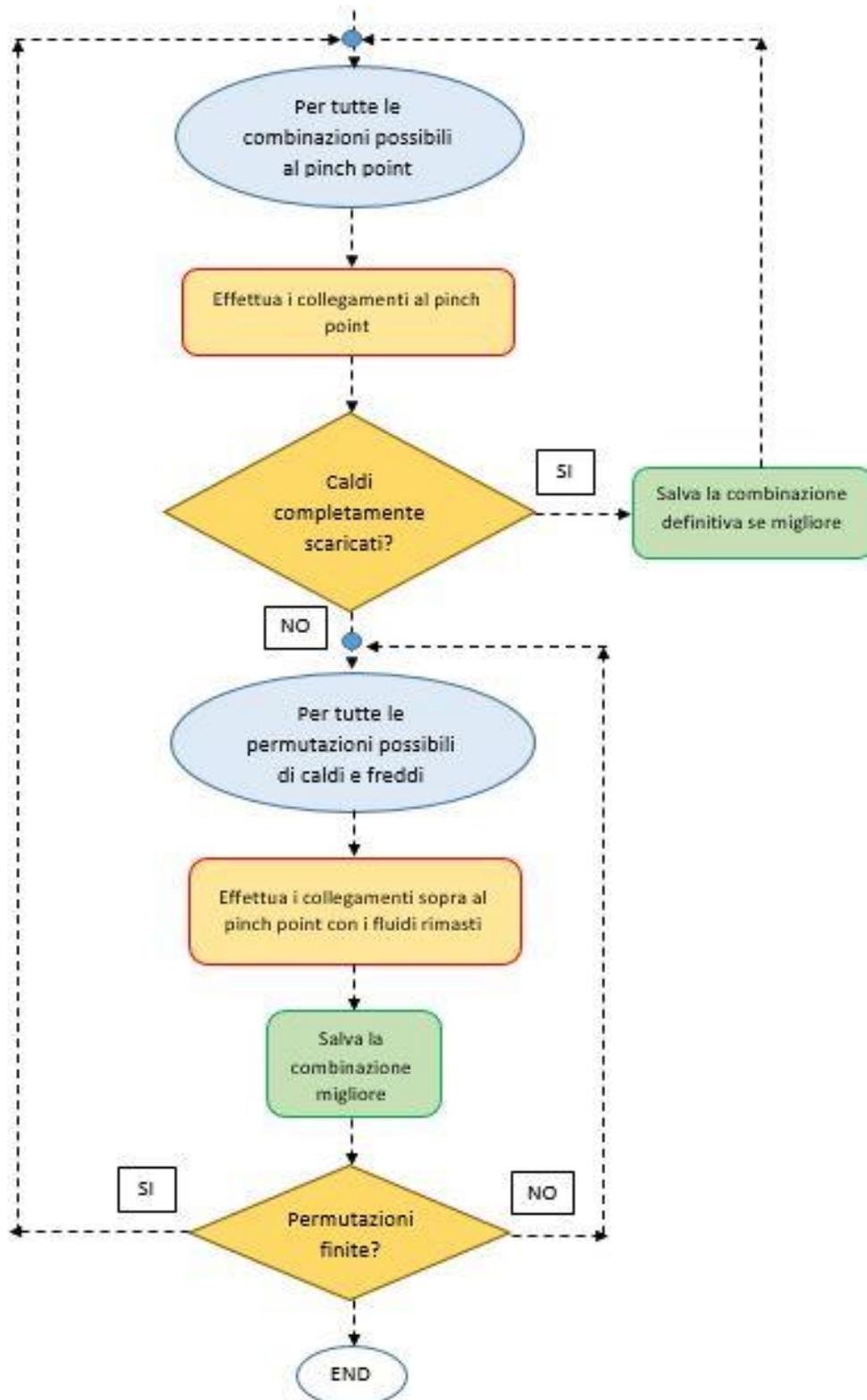


Figura 54 - Diagramma di flusso sintetico generale collegamenti sopra al pinch point

Avendo la configurazione definitiva dei collegamenti effettuati sopra al pinch point, si potrà procedere con il verificare quanti e quali fluidi freddi dovranno ancora essere scaldati per arrivare alla temperatura finale voluta.

Anche in questo caso verrà fatta questa verifica tramite l'ausilio della matrice *cold_line_over_dummy*. Nel caso in cui le temperature di ingresso e uscita in questa matrice, alla fine del tracciamento siano uguali, ciò significherebbe che il fluido freddo è stato scaldato completamente. In caso contrario, con temperature differenti, il fluido freddo non sarà stato scaldato completamente, quindi verranno inseriti dei riscaldatori in quella linea per arrivare alla temperatura finale voluta.

Verrà creata una matrice chiamata *heater_flux*, in cui appariranno nella prima colonna gli indici corrispondenti ai fluidi freddi e nella seconda colonna il flusso da fornire esternamente tramite riscaldatori. Ovviamente, come verifica del corretto tracciamento della rete, la somma di questi flussi dovrà corrispondere al fabbisogno di calore calcolato nella prima parte del programma.

```

%Ora vado a trovare i fluidi freddi che necessitano di heater e salvo il
%flusso corrispondente
heater_flux=zeros(length(cold_line_over_dummy_def(:,1:2)));
for j=1:length(cold_line_over_dummy_def(:,1))
    heater_flux(j,1)=cold_line_over_dummy_def(j,1);
end

for j=1:length(cold_line_over_dummy_def(:,1))
    if cold_line_over_dummy_def(j,3) ~= cold_line_over_dummy_def(j,4)
        heater_flux(j,2)=(cold_line_over_dummy_def(j,4)-cold_line_over_dummy_def(j,3))...
            *cold_line_over_dummy_def(j,2);
    end
end
z_over=length(heat_exchanger_def(1,:));

```

Figura 55 - Creazione matrice *heater_flux* per salvare i flussi di calore da fornire esternamente

	1	2
1	3	0
2	4	600.0000

Figura 56 - Matrice *heater_flux*

2.4 Tracciamento della rete sotto al pinch point

A questo punto, verrà effettuato il tracciamento della rete sotto al pinch point in maniera assolutamente analoga per quanto fatto sopra al pinch point. Pertanto, ci si soffermerà meno in merito ai passaggi effettuati rispetto a quanto fatto per il tracciamento sopra al pinch point e verranno esplicate soprattutto le differenze rispetto alla parte precedente di programma.

2.4.1 Costruzione matrice delle possibilità

Per la costruzione della matrice delle possibilità si seguirà lo stesso criterio per la parte sopra al pinch point, ma questa volta considerando che per ogni fluido freddo presente al pinch point, deve essere effettuato un collegamento con un fluido caldo anch'esso al pinch point. La regola da seguire in questo caso, perché il collegamento sia possibile è che la capacità termica del fluido caldo sia maggiore di quella del fluido freddo, esattamente il contrario di quanto avveniva per la parte sopra al pinch point.

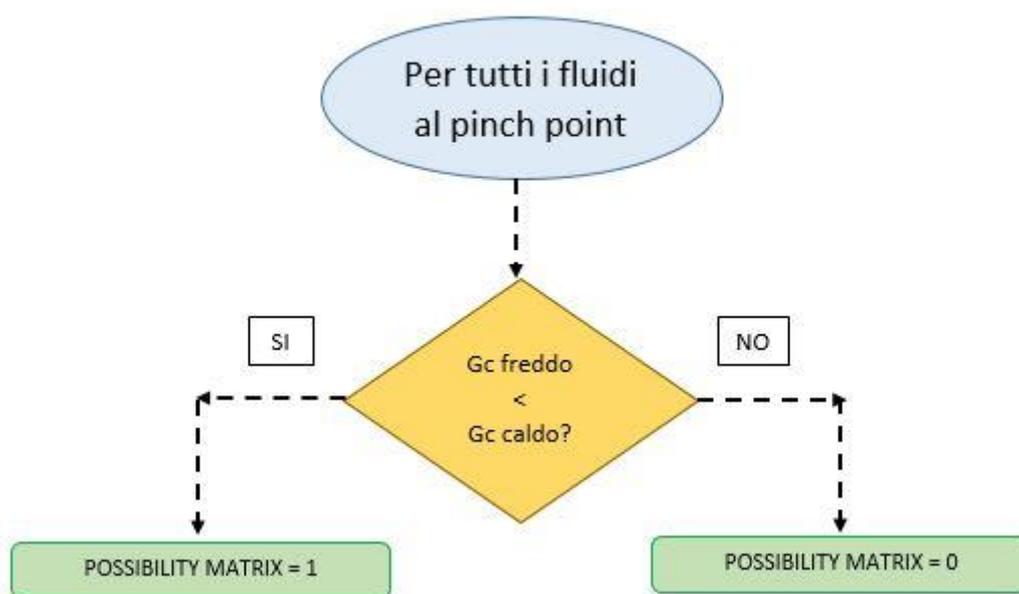


Figura 57 - Criterio per la creazione della matrice delle possibilità sotto al pinch point

Quindi, nella prima colonna della matrice *possibility_matrix_under*, verranno inseriti gli indici dei fluidi caldi presenti al pinch point, mentre nella prima riga, verranno inseriti gli indici dei fluidi freddi anch'essi presenti al pinch point. Comparirà il numero uno in corrispondenza dei collegamenti fattibili, zero in caso in cui il collegamento non sia fattibile.

```

944     %%Trovo la matrice delle possibilità: matrice che mi da come risultato 1 se
945     %%il collegamento tra fluido freddo e caldo è possibile
946     if exist('cold_line_under','var')
947         for i=1:length(cold_pinch(:,1))
948             possibility_matrix_under(i+1,1)=cold_line_under(cold_pinch(i,1),1);
949             for j=1:length(hot_pinch(:,1))
950                 possibility_matrix_under(1,j+1)=hot_line_under(hot_pinch(j,1),1);
951                 if hot_line_under(hot_pinch(j),2)>= cold_line_under(cold_pinch(i),2)
952                     possibility_matrix_under(i+1,j+1)=1;
953                 end
954             end
955         end

```

Figura 58 - Creazione matrice *possibility_matrix_under*

	1	2	3
1	0	2	
2	4	1	

Figura 59 - Matrice *possibility_matrix_under*

Anche in questo caso, la matrice risultante è molto semplice e risulta un solo collegamento fattibile tra il fluido numero quattro ed il fluido numero due.

2.4.2 Creazione matrice con gli indici delle possibili combinazioni

Come fatto precedentemente, avviene la creazione della matrice *combination_hot_pinch_under*, in cui, mediante un algoritmo si andrà a creare una matrice di tutte le permutazioni possibili tra i fluidi caldi ed in cui le colonne corrisponderanno al numero dei fluidi freddi che dovranno essere collegati al pinch point. Anche in questo caso avverrà la modifica della matrice *index*, creata per la parte sopra al pinch point, in cui verranno inseriti tutti gli indici dei fluidi caldi presenti al pinch point, dopodichè utilizzando sempre lo stesso ragionamento si andranno a creare tutte le possibili permutazioni e successivamente verranno cancellate quelle in cui vi è un valore nullo, quelle che si ripetono e quelle in cui nella stessa colonna presentano il ripetersi di uno o più indici. In questo modo rimarranno solo le combinazioni fattibili che andranno ad essere collegate con i fluidi freddi presenti in un vettore chiamato *combination_cold_pinch_under*.

```

%Creo matrice con gli indici delle possibili combinazioni
for i=1:length(possibility_matrix_under(:,1))-1
    r=0;
    for j=1:length(possibility_matrix_under(1,:))-1
        if possibility_matrix_under(i+1,j+1)==1
            r=r+1;
            index(i,r)=possibility_matrix_under(1,j+1);
        end
    end
end
end
end

```

Figura 60 - Creazione matrice index

Il programma distinguerà nuovamente tre casi a seconda delle dimensioni della matrice *index*, come spiegato nel paragrafo corrispondente per il caso sopra al pinch point. Solo nel caso in cui la matrice creata avesse più righe, il programma andrà ad effettuare tutta la parte successiva per trovare le differenti permutazioni, altrimenti salterà tutta questa parte per procedere direttamente con i collegamenti.

```

for i=1:length(index_fix(:,1))
    al=index(i,:);
    index(i,:)=[];
    c=1;
    aa=r;
    while c<=length(index(:,1))
        b=0;
        while b<length(index_fix(1,:))-1
            b=b+1;
            permutations=combvec(al,index);
            j=length(permutations(1,:))-1;
            combination_matrix(:,r:r+j)=permutations;
            index(c,:)=circshift(index(c,:),1);
            r=length(combination_matrix(1,:))+1;
        end
        c=c+1;
    end
end
end

```

Figura 61 - Ricerca di tutte le possibili permutazioni

Le parti di programma in cui si effettuano le eliminazioni delle colonne non volute e le traslazioni delle righe non vengono riportate, in quanto esattamente identiche a quanto riportato nella parte analoga a quella appena descritta nel precedente paragrafo. In ogni caso si rimanda all'appendice finale alla fine dello scritto, in cui viene riportato lo script completo del programma.

2.4.3 Tracciamento della rete

A questo punto, si procederà con il tracciamento completo della rete sotto al pinch point, considerando dapprima i collegamenti al pinch point e poi quelli successivi.

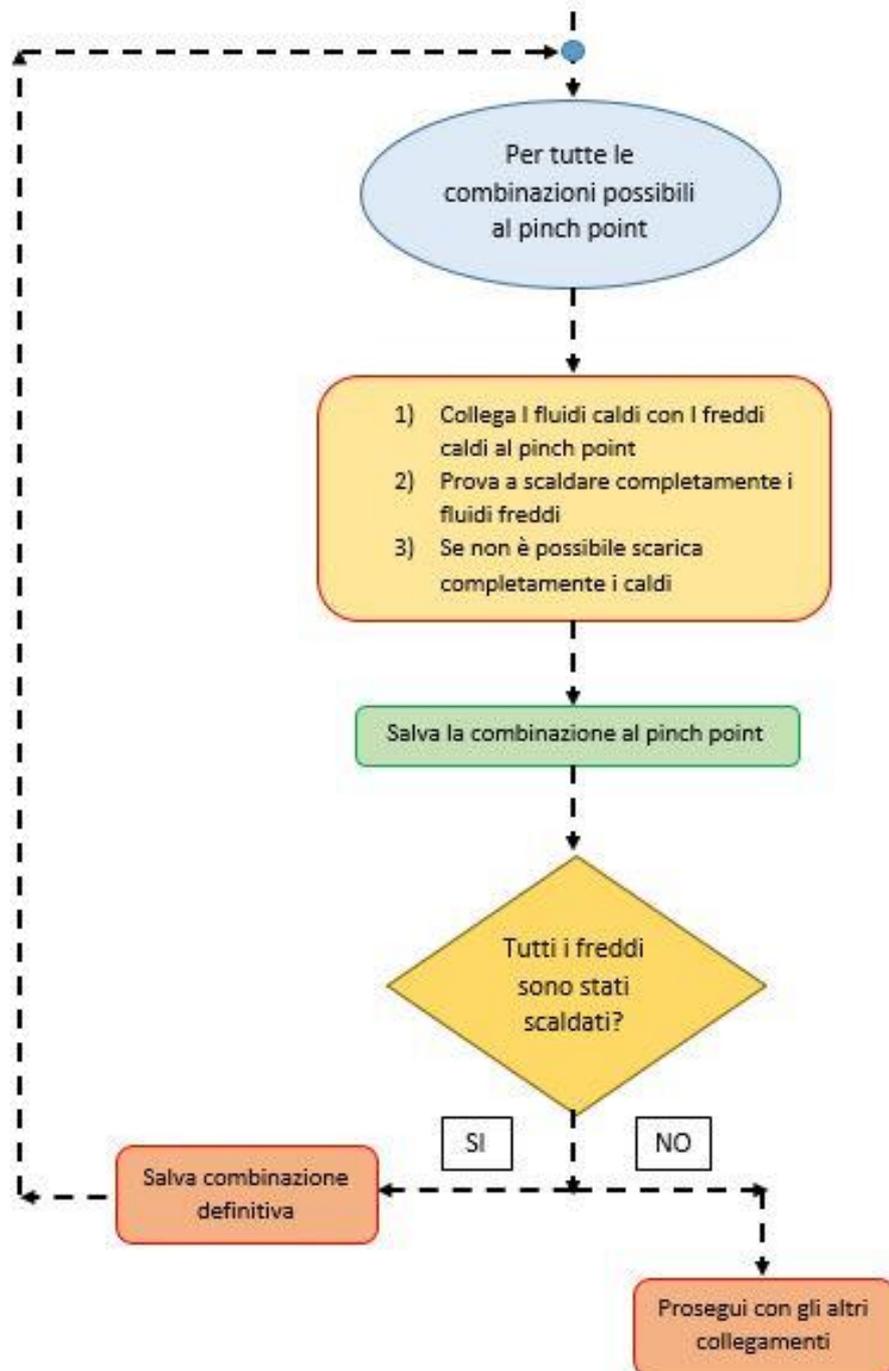


Figura 62 - Diagramma per i collegamenti al pinch point

Si può notare come il ragionamento utilizzato sia lo stesso, ma cambiano le condizioni rispetto alla parte sopra al pinch point. In questo caso, l'obiettivo è scaldare tutti i fluidi freddi esclusivamente mediante lo scambio termico con gli altri fluidi caldi, senza l'utilizzo di fonti di calore esterne all'impianto. Pertanto, in primo luogo, per utilizzare il minor numero possibile di scambiatori, si procederà provando a scaldare tutto il fluido caldo in un'unica volta, utilizzando parte del fluido caldo a disposizione. Verrà pertanto calcolato il flusso ed inserito nella variabile *phi_dummy*, utilizzando come differenza di temperatura quella relativa al fluido freddo e moltiplicandola per la capacità termica del fluido freddo stesso. Verrà successivamente calcolata la temperatura in uscita dal fluido caldo inserendola nella variabile *Tout_dummy* e verrà fatta la verifica di rispetto dei limiti tecnici e termodinamici. Nel caso in cui si superasse la temperatura a cui il freddo deve arrivare (al pinch point sarà la temperatura di pinch point), si procederà con l'utilizzare completamente il fluido caldo scaldando parzialmente il freddo. Si calcolerà quindi il nuovo flusso utilizzando il ΔT completo a disposizione del fluido caldo e la capacità termica del fluido caldo stesso e si calcolerà la temperatura in uscita dallo scambiatore relativa al fluido freddo. Questa operazione verrà effettuata per tutti i fluidi freddi presenti al pinch point per cui dovrà essere trovato un collegamento.

Nel caso in cui tutti i fluidi freddi siano stati scaldati, si salverà la soluzione definitiva nella matrice dei risultati e si procederà con l'effettuare gli altri collegamenti possibili, dati dalle altre permutazioni presenti nella *matrice combination_hot_pinch_under*. Si ricorda che le matrici dei risultati vengono chiamate *heat_exchanger*, *Tout_def*, *Tin_def* e saranno poi quelle utilizzate per la rappresentazione grafica. Ovviamente, queste matrici conterranno già i risultati definitivi trovati per la parte sopra al pinch point e non andranno eliminati. Pertanto si procederà con l'aggiungere i nuovi dati trovati nelle colonne successive di queste matrici e nel caso se ne trovassero di migliori si elimineranno esclusivamente le colonne dei risultati corrispondenti alla parte sotto al pinch point senza intaccare quelle già trovate in precedenza.

I valori modificati andranno inseriti nelle matrici *hot_line_under_dummy* e *cold_line_under_dummy* e, per tener conto dei fluidi caldi scaricati completamente e dei fluidi freddi scaldati completamente, anche in questo caso, verranno utilizzati i vettori *exhaust_hot_fluid* ed *exhaust_cold_fluid* ed in questo caso, quello sicuramente più rilevante sarà quello riguardante i fluidi freddi considerando che il vincolo è rivolto a quest'ultimi. Si terrà conto del numero di scambiatori aggiunti andando a modificare il contatore dei scambiatori chiamato *z*.

Nel caso, invece, in cui vi siano ancora dei fluidi freddi da scaldare completamente, si procederà con l'effettuare gli altri collegamenti successivi al pinch point, fino a quando non verranno portati a completo riscaldamento i fluidi freddi.

```

%%%Provo a scaldare tutto il freddo
phi_dummy=(cold_line_under_dummy(index_cold(j),4)-cold_line_under_dummy(index_cold(j),3))...
    *cold_line_under_dummy(index_cold(j),2);
Tout_dummy=hot_line_under_dummy(index_hot(j),3)-(phi_dummy/hot_line_under_dummy(index_hot(j),2));

```

Figura 63 - Flusso e temperatura di uscita provando a scaldare tutto il freddo

```

%Condizioni rispettate
if (Tout_dummy-cold_line_under_dummy(index_cold(j),3))>=dT...
    && Tout_dummy>=hot_line_under_dummy(index_hot(j),4)
    Tout(hot_line_under_dummy(index_hot(1,j)),z)=Tout_dummy;
    Tout(cold_line_under_dummy(index_cold(1,j)),z)=cold_line_under_dummy(index_cold(j),4);
    Tin(hot_line_under_dummy(index_hot(1,j)),z)=hot_line_under_dummy(index_hot(j),3);
    Tin(cold_line_under_dummy(index_cold(1,j)),z)=cold_line_under_dummy(index_cold(j),3);
    phi(1,z)=phi_dummy;
    heat_exchanger((combination_hot_pinch_under(1,j)),z)=1;
    heat_exchanger((combination_cold_pinch_under(i,j)),z)=1;
    exhaust_cold_fluid(index_cold(j),1)=1;
    cold_line_under_dummy(index_cold(j),3)=cold_line_under_dummy(index_cold(j),4);

    if Tout_dummy==hot_line_under_dummy(index_hot(j),4)
        exhaust_hot_fluid(index_hot(j),1)=1;
    else
        hot_line_under_dummy(index_hot(j),3)=Tout_dummy;
    end
    z=z+1;

```

Figura 64 - Condizioni rispettate - Scaldo tutto il freddo

```

else
    %provo a scaricare tutto il caldo
    phi_dummy=(hot_line_under_dummy(index_hot(j),3)-hot_line_under_dummy(index_hot(j),4))...
        *hot_line_under_dummy(index_hot(j),2);
    Tin_dummy=cold_line_under_dummy(index_cold(j),4)...
        -(phi_dummy/cold_line_under_dummy(index_cold(j),2));
    if (hot_line_under_dummy(index_hot(j),4)-Tin_dummy)>=dT
        Tout(hot_line_under_dummy(index_hot(1,j)),z)=hot_line_under_dummy(index_hot(j),4);
        Tout(cold_line_under_dummy(index_cold(1,j)),z)=cold_line_under_dummy(index_cold(j),4);
        Tin(hot_line_under_dummy(index_hot(1,j)),z)=hot_line_under_dummy(index_hot(j),3);
        Tin(cold_line_under_dummy(index_cold(1,j)),z)=Tin_dummy;
        phi(1,z)=phi_dummy;
        heat_exchanger((combination_hot_pinch_under(1,j)),z)=1;
        heat_exchanger((combination_cold_pinch_under(i,j)),z)=1;
        exhaust_hot_fluid(index_hot(j),1)=1;
        cold_line_under_dummy(index_cold(j),4)=Tin_dummy;
        hot_line_under_dummy(index_hot(j),3)=hot_line_under_dummy(index_hot(j),4);

        z=z+1;
    end

```

Figura 65 - Condizioni non rispettate - Scarico tutto il caldo

Successivamente, si procederà con i collegamenti oltre il pinch point se necessari.

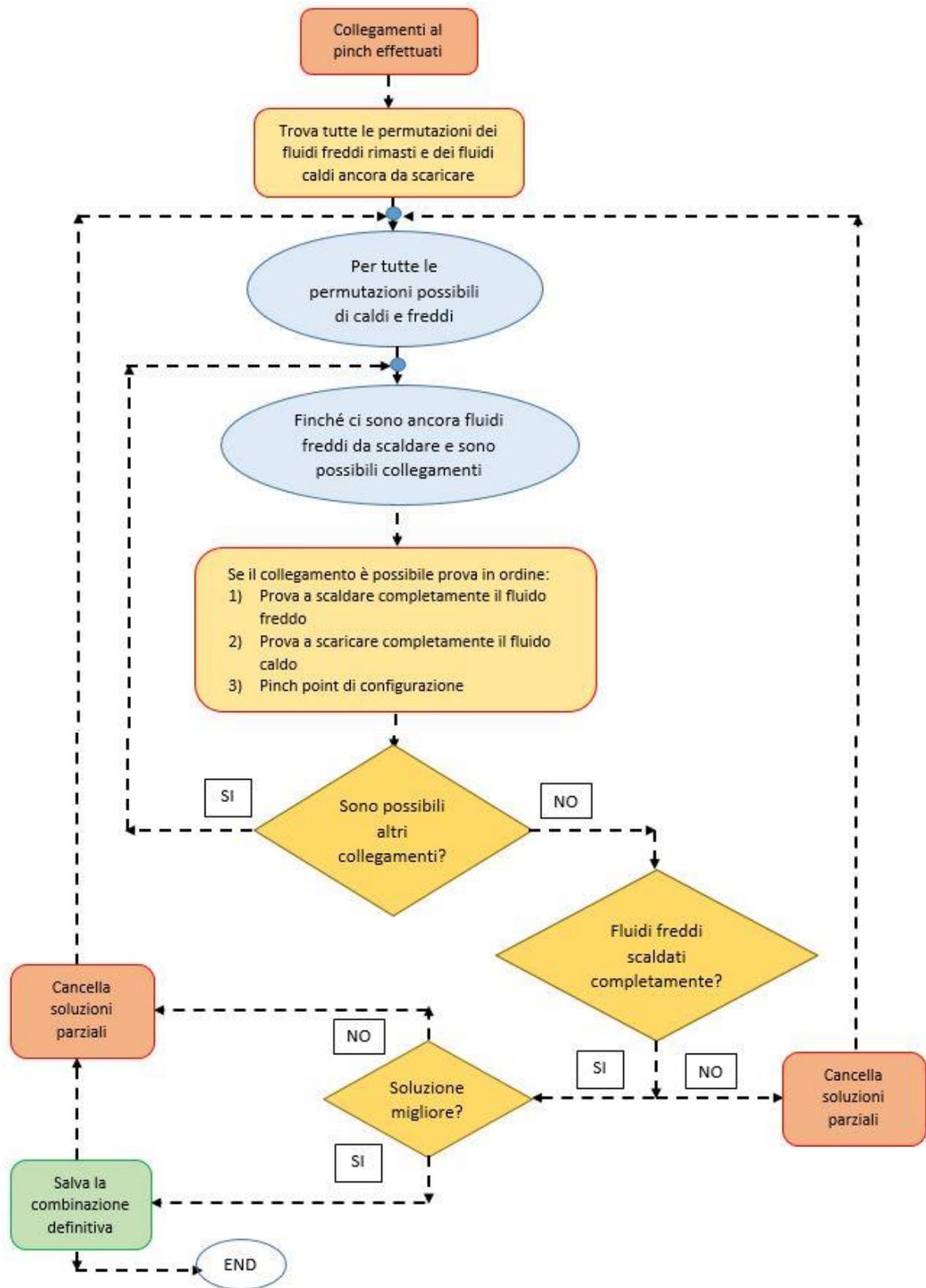


Figura 66 - Diagramma per i collegamenti successivi al pinch point

Nel caso in cui ci fossero ancora collegamenti da effettuare, per prima cosa, grazie alla funzione *perms* di *MatLab*, si andranno a trovare tutte le possibili permutazioni dei fluidi caldi e dei fluidi freddi rimasti. Questa verifica potrà essere effettuata tramite i vettori *exhaust_hot_fluid* ed *exhaust_cold_fluid*.

A questo punto, per tutte le permutazioni trovate, il programma effettuerà i collegamenti partendo dalla prima riga delle permutazioni dei fluidi caldi e dalla prima riga delle permutazioni dei fluidi freddi.

A questo proposito, il ciclo più esterno sarà costituito dai fluidi freddi e non dai fluidi caldi come nel caso sopra al pinch point, come esplicitato nella parte precedente. In questo caso il criterio, come per i collegamenti al pinch point, sarà quello di provare a scaldare in modo completo i fluidi freddi. Nel caso non fosse possibile, a causa del mancato rispetto dei limiti, si procederà con il raffreddamento totale dei fluidi caldi, scaldando parzialmente il fluido freddo. Nel caso in cui, anche questa seconda opzione non fosse fattibile, si procederà con l'effettuare un pinch point di configurazione.

Secondo lo stesso algoritmo descritto nel paragrafo precedente, si procederà con la verifica della possibilità di effettuare altri accoppiamenti. Anche in questo caso, ci si avvarrà di tre contatori *count1*, *count2* e *count3* e si andrà a verificare se, per ogni collegamento rimasto, almeno in un caso, sia rispettata la minima differenza di temperatura nell'ipotesi di un successivo collegamento. Se risulteranno possibili, allora verrà effettuato il collegamento successivo, in caso contrario il ciclo si interromperà e si procederà con la permutazione di fluidi successiva.

Se si è trovata una configurazione, essa verrà salvata nelle colonne successive ai collegamenti definitivi già effettuati nelle matrici dei risultati, altrimenti, i risultati parziali trovati verranno eliminati per poter calcolare la configurazione parziale successiva. Alla fine del processo, verrà salvata la combinazione di collegamenti trovata che garantisce il minor numero di scambiatori trovati. Pertanto, alla fine di questo processo si avranno tutti i risultati definitivi salvati nelle matrici dei risultati. Per poter considerare la combinazione esatta, è necessario che tutti i fluidi freddi presenti sotto al pinch point siano stati raffreddati completamente, altrimenti la combinazione non sarà considerata corretta.

Durante lo svolgimento dei calcoli, le variabili che andranno ad essere coinvolte saranno quelle nominate in precedenza. Per calcolare i vari flussi disponibili, si utilizzerà la variabile *phi_dummy*, per calcolare le temperature di ingresso e di uscita dagli scambiatori verranno utilizzate rispettivamente le variabili *Tin_dummy* e *Tout_dummy*, mentre per tener conto dei fluidi in gioco rimasti verranno modificate le matrici *cold_line_under_dummy* e *hot_line_under_dummy* ed i vettori *exhaust_hot_fluid* ed *exhaust_cold_fluid*.

Anche in questo caso, non viene riportato il codice, perché il criterio utilizzato è lo stesso di quello sopra al pinch point. In ogni caso, si rimanda all'appendice al termine dello scritto in cui è presente tutto lo script del programma per chiarezza. Si può riportare anche in questo caso un diagramma sintetico che riassume in modo chiaro i vari macropassaggi effettuati nella realizzazione di questa parte del programma.

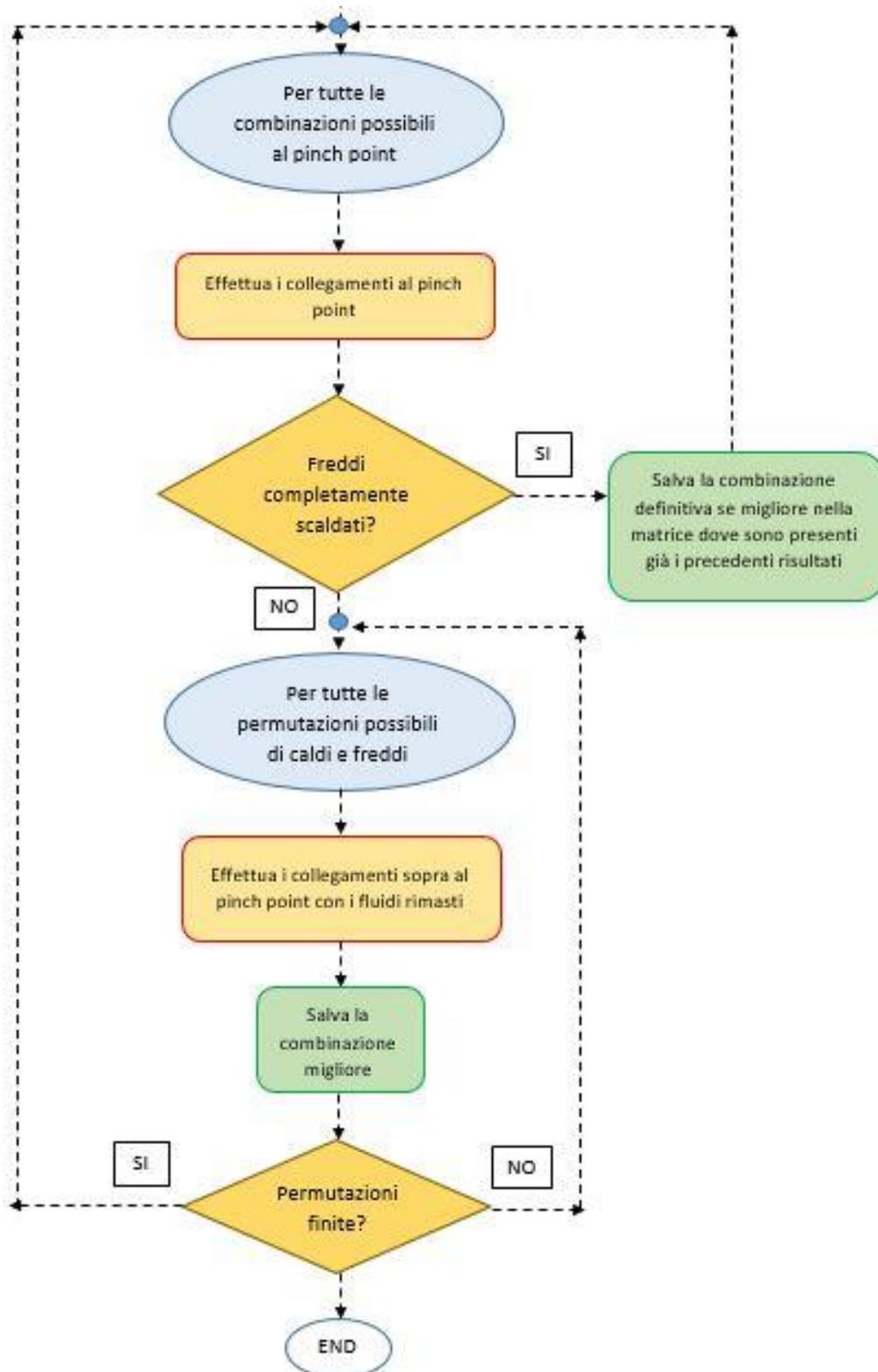


Figura 67 - Diagramma sintetico per tutti i passaggi sotto al pinch point

Effettuati tutti i collegamenti sotto al pinch point, si procederà con il valutare la presenza di eventuali flussi caldi non raffreddati completamente fino alla temperatura richiesta. In questo caso ci si potrà avvalere dell'ausilio di raffreddatori, che rappresenteranno l'inserimento di freddo tramite un vettore energetico esterno all'impianto. Grazie alla matrice *hot_line_under_def* e al vettore *exhaust_hot_fluid*, il programma verificherà quali tra tutti i fluidi caldi dovranno essere raffreddati, cioè tutti quei fluidi la cui temperatura di ingresso sarà diversa da quella di uscita dall'impianto, e procederà con il calcolo del flusso di freddo necessario per quel determinato fluido. I risultati verranno inseriti nella matrice *cooler_flux* in cui nella prima colonna compariranno gli indici dei fluidi caldi presenti e nella seconda compariranno i corrispondenti flussi di freddo necessari. Ovviamente la somma di questi flussi dovrà corrispondere al fabbisogno di freddo calcolato nella prima parte del programma.

```

for j=1:length(hot_line_under_dummy_def(:,1))
    cooler_flux(j,1)=hot_line_under_dummy_def(j,1);
end

for j=1:length(hot_line_under_dummy_def(:,1))
    if hot_line_under_dummy_def(j,3) ~= hot_line_under_dummy_def(j,4)
        cooler_flux(j,2)=(hot_line_under_dummy_def(j,3)-hot_line_under_dummy_def(j,4))...
            *hot_line_under_dummy_def(j,2);
    end
end
end

```

Figura 68 - Calcolo dei flussi di freddo necessari da fornire esternamente

Variables - cooler_flux	
cooler_flux	
1x2 double	
1	20

Figura 69 - Matrice cooler_flux

In questo caso, essendo l'esempio considerato molto semplice, risulterà che l'unico fluido caldo in cui bisognerà fornire del freddo attraverso una risorsa energetica esterna sarà il numero due. Il flusso richiesto risulta pari a 20 kW corrispondente al minimo fabbisogno di freddo calcolato nella prima parte del programma.

2.5 Matrici dei risultati definitivi

Dopo aver effettuato tutti i passaggi descritti in precedenza, se tutto è andato a buon fine, si avranno a disposizione diverse matrici contenenti i risultati trovati. Queste, verranno utilizzate dal programma per provvedere una rappresentazione grafica della rete, ma in ogni caso è necessario analizzarle per comprendere la bontà dei risultati ottenuti.

1) Matrice *heat_exchanger_def*

Questa matrice, viene utilizzata per visualizzare tutti i collegamenti effettuati tra fluidi caldi e fluidi freddi. Il criterio utilizzato per il salvataggio dei risultati è quello di considerare ogni colonna corrispondente ad uno scambiatore e ogni riga corrispondente ad un fluido. Quindi vi saranno tante colonne quante il numero di scambiatori utilizzati e tante righe quante il numero di fluidi presenti nell'impianto. Ogni colonna sarà composta da valori nulli per tutte le righe, tranne quelle messe in collegamento dallo scambiatore in cui comparirà il valore uno.

	1	2	3	4	5
1	0	1	1	1	0
2	1	0	0	0	1
3	1	0	1	0	0
4	0	1	0	1	1

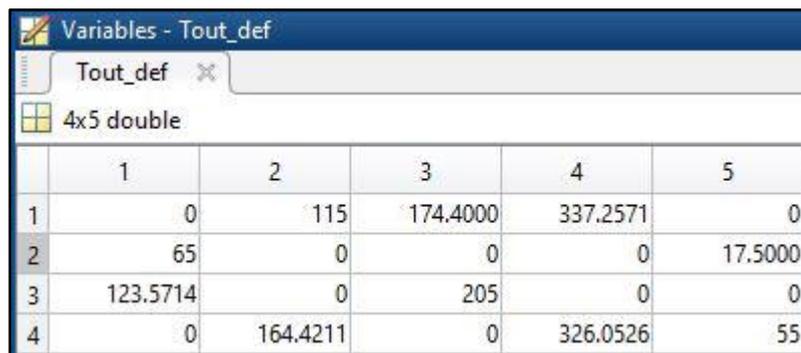
Figura 70 - Matrice *heat_exchanger_def*

Come si può vedere dall'immagine, in questo specifico esempio, sono presenti quattro fluidi, quindi vi sono quattro righe e il programma ha dato come risultato il collegamento dei diversi fluidi attraverso cinque scambiatori di calore. Il primo, ad esempio, collegherà il fluido caldo numero due con il fluido freddo numero tre e così via. In questa matrice, non si potrà distinguere quali collegamenti siano stati eseguiti sopra al pinch point e quali sotto, ma nella rappresentazione grafica si potrà comprendere meglio questo aspetto.

Ovviamente, per ogni colonna compariranno esclusivamente due righe in cui verrà visualizzato il valore unitario. Diversamente significherebbe che uno scambiatore collegherebbe più di due fluidi e ciò non è realisticamente possibile. Solo due fluidi di cui uno caldo ed uno freddo potranno essere messi in comunicazione dallo scambiatore di calore. Bisogna sottolineare il fatto che in questa matrice non compaiono i fluidi collegati a risorse esterne, quindi collegati a riscaldatori e a raffreddatori, in quanto, come detto nei precedenti capitoli, questi valori verranno inseriti in altre apposite matrici di cui si parlerà in seguito, per evitare che l'utente possa confondersi e quindi pensare erroneamente che il programma abbia dato un risultato non corretto.

2) Matrice *Tout_def*

Questa matrice, viene utilizzata per salvare tutte le temperature di uscita da ogni scambiatore presente nella rete. Il criterio utilizzato è sempre lo stesso: le colonne rappresentano gli scambiatori utilizzati, mentre le righe corrisponderanno agli indici dei fluidi presenti nell'impianto. Ogni colonna presenterà al suo interno dei valori nulli tranne nelle righe corrispondenti agli indici dei due fluidi messi in comunicazione in cui sono presenti le rispettive temperature di uscita.



	1	2	3	4	5
1	0	115	174.4000	337.2571	0
2	65	0	0	0	17.5000
3	123.5714	0	205	0	0
4	0	164.4211	0	326.0526	55

Figura 71 - Matrice *Tout_def*

Come si può osservare, nelle righe corrispondenti al collegamento compaiono dei valori corrispondenti alle temperature, fornite in gradi centigradi, in uscita dallo scambiatore considerato. Ovviamente, per ogni scambiatore, le righe messe in gioco saranno le medesime in cui compaiono i numeri uno nella matrice *heat_exchanger_def*. Inoltre, è possibile notare come in determinati casi, la temperatura di uscita possa corrispondere alla temperatura di uscita del fluido dall'impianto oppure alla temperatura di pinch point del fluido caldo o del fluido freddo. Questo avviene per i collegamenti in cui un fluido caldo viene scaricato completamente o viceversa un fluido freddo viene scaldato completamente. Nei casi in cui questo non avvenisse, la temperatura di uscita corrisponderà alla variabile utilizzata per il calcolo *Tout_dummy* e quindi questo significherà che il fluido caldo o il fluido freddo considerato saranno ancora disponibili per ulteriori collegamenti.

3) Matrice *Tin_def*

Questa matrice, viene utilizzata per il salvataggio delle temperature in ingresso allo scambiatore dei fluidi caldi e dei fluidi freddi. Nuovamente, secondo lo stesso criterio utilizzato per tutte le matrici dei risultati, le colonne corrisponderanno agli scambiatori e i fluidi alle righe della matrice e per ogni fluido messo in comunicazione da quello specifico scambiatore verranno rappresentate le temperature in gradi centigradi, mentre in tutte le altre righe saranno presenti dei valori nulli.

	1	2	3	4	5
1	0	174.4000	337.2571	425	0
2	305	0	0	0	65
3	55	0	123.5714	0	0
4	0	55	0	164.4211	5

Figura 72 - Matrice Tin_def

Come è possibile osservare, anche in questo caso, le righe coinvolte nell'inserimento delle rispettive temperature, dovranno corrispondere alle righe in cui è presente il numero uno nella matrice $heat_exchanger_def$.

Pertanto, in questo modo, è possibile aver chiaro per ogni fluido e per ogni scambiatore coinvolto le temperature risultanti dallo scambio termico grazie a queste tre matrici. A titolo di esempio, è possibile visualizzare le temperature ed i fluidi coinvolti nello scambiatore numero uno. I fluidi messi in comunicazione sono il numero due ed il numero tre. Per quanto riguarda il fluido caldo, il numero due, la temperatura in ingresso allo scambiatore risulterà essere di 305 °C, mentre il fluido uscirà a 65° C corrispondente alla temperatura di pinch point dei fluidi caldi. Per quanto riguarda il fluido freddo, il numero tre, la temperatura in ingresso allo scambiatore risulterà essere di 55°C, mentre quella in uscita sarà pari a 123.57°C.

4) Vettore phi_def

Questo vettore, viene utilizzato per il salvataggio dei flussi scambiati nei vari scambiatori di calore. Anche in questo caso le colonne corrisponderanno ai vari scambiatori. Ovviamente, sarà presente solo una riga in quanto già sono stati forniti i fluidi messi in comunicazione e nell'unica riga presente sarà salvato il flusso di calore messo in gioco. Si ricorda che viene rappresentato il flusso per ogni scambiatore senza considerare i flussi scambiati con parti esterne all'impianto come specificato in precedenza.

	1	2	3	4	5
1	1920	831.6000	2280	1.2284e+03	380

Figura 73 - Vettore phi_def

L'unità di misura utilizzata per i flussi scambiati è quella dei kW. Quindi, ad esempio nel primo scambiatore, vengono utilizzati dal fluido freddo 1920 kW messi a disposizione dal fluido caldo.

5) Matrici *hot_line_over_dummy_def*, *cold_line_over_dummy_def*,
hot_line_under_dummy_def, *cold_line_under_dummy_def*

Queste matrici sono una copia della matrice dei dati, ma rappresentano le temperature finali ed iniziali del fluido alla fine del processo, effettuati tutti i collegamenti. Pertanto un fluido che presenterà la stessa temperatura di ingresso e di uscita dall'impianto sarà stato consumato completamente perché nessun ΔT è presente. Quando le due temperature saranno diverse, significherà che quella differenza di temperatura dovrà essere consumata attraverso lo scambio termico con una risorsa esterna.

6) Matrici *heater_flux* e *cooler_flux*

Queste matrici vengono utilizzate per il salvataggio dei flussi da fornire tramite risorse esterne. Nella prima colonna vengono rappresentati gli indici dei flussi. Nella matrice *heater_flux*, vengono rappresentati gli indici dei fluidi freddi, mentre, nella matrice *cooler_flux* vengono rappresentati gli indici dei fluidi caldi. Nella seconda colonna, vengono salvati i flussi, sempre in kW, scambiati da quel determinato fluido con le risorse esterne. Nella prima matrice per ogni fluido vi sarà il fabbisogno di calore da fornire dall'esterno, nella seconda matrice il fabbisogno di caldo. Nel caso in cui un fluido caldo sia stato scaricato completamente o un fluido freddo sia stato scaldato completamente non vi sarà bisogno di utilizzare un vettore energetico esterno, pertanto, in corrispondenza di quel fluido vi sarà un valore nullo. La creazione di queste due matrici avviene per evitare che l'utente possa confondersi considerando il flusso scambiato con l'esterno un flusso scambiato internamente. Essendo questa una parte cruciale nell'analisi si è preferito dividere le soluzioni in matrici differenti.

Non vengono riportate le tabelle ricavate dallo script di MatLab, in quanto già inserite nei paragrafi precedenti nella descrizione della creazione delle stesse.

Queste matrici dei risultati, verranno utilizzate per la rappresentazione grafica della rete di scambiatori di calore in modo da rendere molto più veloce e semplice la visualizzazione da parte dell'utente dei fluidi presenti e dei flussi messi in comunicazione dagli scambiatori.

2.6 Rappresentazione grafica

Trovati tutti i risultati necessari, si procederà alla rappresentazione grafica della rete secondo le regole esplicitate nel Capitolo 1 relativo alla teoria della pinch analysis. Per prima cosa vengono tracciate le linee che rappresentano i fluidi dell'impianto. Per favorire la visualizzazione da parte dell'utente, si è scelto di utilizzare per i fluidi caldi il colore rosso e per i fluidi freddi il colore blu.

A questo punto del programma, si saprà già con certezza di quanti scambiatori necessita l'impianto, perciò, si potrà calcolare la lunghezza di queste linee al fine di poter contenere tutti gli scambiatori.

Il primo passo è quello di verificare se vi siano più scambiatori al di sopra o al di sotto del pinch point. Si prenderà il numero di scambiatori maggiore tra le due zone. Ad esempio se fosse maggiore il numero di scambiatori sopra al pinch point, si utilizzerà quel quantitativo per tracciare la rete. Si salverà nella variabile *length_line* il valore della lunghezza massima della linea rappresentante il fluido, calcolata come il numero di scambiatori moltiplicato per cinque con un'aggiunta di 5 moltiplicato per due. In questo modo, per la rappresentazione dello scambiatore e delle relative temperature d'ingresso e uscita, si avrà uno spazio normalizzato nel grafico pari a cinque unità più l'eventuale spazio, anch'esso di cinque unità per la rappresentazione dei riscaldatori e raffreddatori.

```
%GRAFICO FLUSSI

figure(6);
if z_over >= (length(heat_exchanger_def(1,:))-z_over)
    length_line=2*(5*z_over+5);
else
    length_line=2*(5*(length(heat_exchanger_def(1,:))-z_over)+5);
end
```

Figura 74 - Scelta lunghezza linea fluidi

A questo punto verrà calcolata l'effettiva lunghezza che dovrà avere il fluido. Infatti vi sono molte possibilità a seconda che il fluido sia caldo o freddo e a seconda della temperatura di ingresso e uscita dall'impianto. Quindi il grafico verrà diviso in due parti da una linea tratteggiata nera per distinguere la parte sopra e la parte sotto al pinch point e successivamente per ogni fluido si calcolerà la lunghezza della linea ed il posizionamento. Si esamineranno le varie possibilità all'interno del ciclo *for*.

1) Fluidi caldi

- Nel caso in cui la temperatura d'ingresso sia superiore a quella di pinch point e quella di uscita sia inferiore a quella di pinch point significherà che il fluido sarà presente sia sopra che sotto al pinch point, pertanto dovrà essere rappresentato interamente nelle due parti del grafico. Verrà dunque impostato l'inizio della linea all'estremità di sinistra

e la parte finale all'estremità di destra utilizzando sempre la variabile *length_line* trovata in precedenza.

- Nel caso in cui la temperatura d'ingresso sia uguale a quella di pinch point la linea dovrà essere fatta partire dal pinch point e si troverà solo nella parte destra del grafico.
- Nel caso in cui la temperatura di ingresso sia inferiore a quella di pinch point, la linea dovrà partire da sotto al pinch point, quindi si troverà solo nella parte destra del grafico.
- Nell'ultimo caso, il fluido si troverà totalmente sopra al pinch point, quindi la linea dovrà trovarsi nella parte sinistra del grafico.

2) Fluidi freddi

- Nel caso in cui la temperatura di uscita sia maggiore della temperatura di pinch point e la temperatura di ingresso sia minore di quella di pinch point, la linea dovrà occupare entrambe le parti del grafico e quindi l'inizio sarà dal punto zero e la fine sarà data dalla variabile *length_line*.
- Nel caso in cui la temperatura di ingresso sia uguale a quella di pinch point, la linea dovrà partire esattamente dalla metà del grafico, occupando completamente la parte sinistra.
- Nel caso in cui la temperatura di ingresso sia maggiore di quella di pinch point la linea dovrà trovarsi nella parte sinistra del grafico ma questa volta distaccata dal pinch point.
- In ultimo rimane il caso in cui la linea si trova nella parte destra del grafico quindi sia la temperatura d'ingresso che quella di uscita sono inferiori a quella di pinch point.

Alla fine di ogni iterazione, verrà rappresentata la linea in rosso o blu a seconda del tipo di fluido, utilizzando le due variabili create per inizio e fine linea e utilizzando la variabile del ciclo *i* per tener conto del numero del fluido che si sta rappresentando. Dopodichè, verrà rappresentata la linea come se fosse una freccia, quindi all'estremità di uscita del fluido, tramite il comando *MarkerSize* ed il simbolo rappresentante il minore. All'estremità opposta, all'inizio di ogni fluido, verrà rappresentato un rettangolo dentro cui inserire il numero corrispondente all'indice del fluido, grazie alla funzione *text* di MatLab. Inoltre, all'inizio e alla fine della linea, verranno inserite, sempre tramite la funzione *text*, i valori della temperatura di ingresso e di uscita del fluido dall'impianto segnalati, anche in questo caso, da un *Marker* nero.

Verranno anche impostati i limiti del grafico a sinistra e a destra per evitare che le linee risultino troppo esterne.

```

for i=1:n_fluids
    if fluids(i,2)>fluids(i,3)
        hold on
        if fluids(i,3)<T_pinch_hot && fluids(i,2)>T_pinch_hot
            r=length_line;
            s=0;
        elseif fluids(i,2)==T_pinch_hot
            r=length_line;
            s=(length_line/2)-0.5;
        elseif fluids(i,2)<T_pinch_hot
            r=length_line;
            s=(length_line/2)+2.5;
        else
            s=0;
            r=(length_line/2)-0.5;
        end
    end
end

```

Figura 75 - Possibilità di rappresentazione fluidi caldi

```

plot([s r],[i i],'r-');
plot(r,i,'r>','MarkerFaceColor','r');
plot([s-2.5 s],[i-0.25 i-0.25],'k-');
plot([s s],[i-0.25 i+0.25],'k-');
plot([s s-2.5],[i+0.25 i+0.25],'k-');
plot([s-2.5 s-2.5],[i+0.25 i-0.25],'k-');
text(s-1.5,i,num2str(i),'FontSize',11);
plot(s+0.75,i,'k+');
text(s+0.75,i+0.1,num2str(fluids(i,2)),'vert','bottom','horiz','center','FontSize',7);
plot(r-0.75,i,'k+');
text(r-0.75,i+0.1,num2str(fluids(i,3)),'vert','bottom','horiz','center','FontSize',7);

```

Figura 76 - Plot della linea e delle temperature di ingresso e uscita fluidi caldi

```

else
    if fluids(i,3)>T_pinch_cold && fluids(i,2)<T_pinch_cold
        s=length_line;
        r=0;
    elseif fluids(i,2)==T_pinch_cold
        s=length_line/2;
        r=0;
    elseif fluids(i,2)>T_pinch_cold
        r=0;
        s=(length_line/2)-2.5;
    else
        s=length_line;
        r=(length_line/2)+0.5;
    end
end

```

Figura 77 - Possibilità di rappresentazione fluidi freddi

```

    hold on
    plot([r s],[i i],'b');
    plot(r,i,'b<','MarkerFaceColor','b');
    plot([s+2.5 s],[i-0.25 i-0.25],'k-');
    plot([s+2.5 s+2.5],[i-0.25 i+0.25],'k-');
    plot([s+2.5 s],[i+0.25 i+0.25],'k-');
    plot([s s],[i+0.25 i-0.25],'k-');
    text(s+1,i,num2str(i),'FontSize',11);
    plot(s-0.85,i,'k+');
    text(s-0.85,i+0.1,num2str(fluids(i,2)),'vert','bottom','horiz','center','FontSize',7);
    plot(r+0.75,i,'k+');
    text(r+0.75,i+0.1,num2str(fluids(i,3)),'vert','bottom','horiz','center','FontSize',7);

end
plot([length_line/2 length_line/2],[0.5 i+0.5],'k--');
hold on
end
ylim([0 i+1]);
xlim([-5 length_line+5]);
box on

```

Figura 78 - Plot della linea e delle temperature di ingresso e uscita fluidi freddi

A questo punto avverrà l'inserimento nella rete degli scambiatori di calore. Per fare ciò viene utilizzata la matrice *heat_exchanger_def* contenente i fluidi messi in comunicazione dai vari scambiatori di calore. Si partirà con il rappresentare gli scambiatori sopra al pinch point. Verrà eseguito un ciclo in cui verranno salvati, per ogni scambiatore, gli indici dei due fluidi collegati cioè quelli in cui è presente il numero uno nella matrice. A questo punto, ad una distanza predeterminata si rappresenterà lo scambiatore tramite una linea nera in cui alle estremità verrà posto un *Marker* a forma di cerchio con interno bianco. Le distanze tra uno scambiatore ed un altro saranno impostate ogni quattro unità grazie all'utilizzo della variabile *g*. Sopra ad ogni scambiatore, sempre grazie alla funzione *text*, sarà rappresentato il valore del flusso scambiato in kW contenuto nel vettore *phi_def*.

A questo punto potranno essere rappresentate, sempre grazie alla funzione *text*, le temperature in uscita ed ingresso allo scambiatore per entrambi i fluidi coinvolti, grazie alle matrici dei risultati *Tout_def* e *Tin_def*, ma con un accorgimento. Un algoritmo, verificherà se le temperature che dovranno essere rappresentate saranno uguali a quelle già scritte precedentemente, in modo tale da riportare effettivamente quelle utili, senza evitare ripetizioni. La stessa cosa verrà poi effettuata per i fluidi al di sotto del pinch point, facendo quindi partire il contatore delle distanze degli scambiatori dal pinch point ed andando a collegare gli scambiatori verso destra. Le temperature vengono rappresentate ad una distanza di una unità dallo scambiatore in tonalità più chiara e di grandezza inferiore rispetto ai flussi scambiati in modo tale da evitare confusione. Anche in questo caso, verranno segnalate da un *Marker* a forma cruciforme posto sulla linea di rappresentazione.

```

g=0;
t=0;
for i=1:length(heat_exchanger_def(1,:))
    h=1;
    if i<=z_over
        if i==1
            g=g+5;
        else
            g=g+4;
        end
    end

    for j=1:length(heat_exchanger_def(:,1))
        if heat_exchanger_def(j,i)==1
            ind(h)=j;
            h=h+1;
        end
    end
    hold on
    plot([(length_line/2)-g (length_line/2)-g],[ind(1) ind(2)],...
        'k-o','MarkerSize',12,'LineWidth',1.4,'MarkerFaceColor','w');
    text((length_line/2)-g,ind(2)+0.2,num2str(round(phi_def(i),1)),...
        'vert','bottom','horiz','center','FontSize',7);
end

```

Figura 79 - Inserimento scambiatori sopra al pinch point

```

for m=1:length(hot_line_over(:,1))
    if ind(1)==hot_line_over(m,1)
        if hot_line_over(m,3) ~= Tin_def(ind(1),i)
            plot((length_line/2)-g-2,ind(1),'k+');
            text((length_line/2)-g-2,ind(1)+0.1,...
                num2str(round(Tin_def(ind(1),i),1)),...
                'vert','bottom','horiz','center','FontSize',6.5,'Color',...
                [0.3 0.3 0.3]);
        end
    end
end
for m=1:length(cold_line_over(:,1))
    if ind(2)==cold_line_over(m,1)
        if cold_line_over(m,4) ~= Tout_def(ind(2),i)
            plot((length_line/2)-g-2,ind(2),'k+');
            text((length_line/2)-g-2,ind(2)+0.1,num2str(round(Tout_def(ind(2),i),1))...
                , 'vert','bottom','horiz','center','FontSize',6.5,'Color',[0.3 0.3 0.3]);
        end
    end
end
end

```

Figura 80 - Inserimento temperature evitando ripetizioni

Dopo l'inserimento degli scambiatori, verranno inseriti i riscaldatori ed i raffreddatori. La rappresentazione avviene tramite un cerchio di grandezza maggiore rispetto a quello utilizzato per gli scambiatori, l'interno verrà riempito con un colore grigio, per favorirne la distinzione rispetto agli scambiatori di calore. Sempre grazie alla funzione *text*, al di sopra del cerchio, verrà scritto il valore corrispondente al flusso scambiato con l'esterno per quel specifico fluido considerato in rosso se si tratta di fabbisogno di calore e in blu se si tratta di fabbisogno di freddo. Per la rappresentazione, si utilizzano i dati salvati nelle matrici *heater_flux* e *cooler_flux*. Anche in questo caso verrà impostata una distanza di quattro unità dall'ultimo scambiatore rappresentato in entrambe le parti.

```

g=g+4;
for i=1:length(heater_flux(:,1))
    if heater_flux(i,2) ~= 0
        plot((length_line/2)-g,cold_line_over_dummy_def(i,1),'ko','MarkerSize',...
            18,'LineWidth',1.4,'MarkerFaceColor',[0.9 0.9 0.9]);
        text((length_line/2)-g,heater_flux(i,1)+0.25,num2str(round(heater_flux(i,2),1))...
            ,'vert','bottom','horiz','center','FontSize',8,'Color','r');
    end
end
t=t+4;
for i=1:length(cooler_flux(:,1))
    if cooler_flux(i,2) ~= 0
        plot((length_line/2)+t,hot_line_under_dummy_def(i,1),'ko','MarkerSize',...
            18,'LineWidth',1.4,'MarkerFaceColor',[0.9 0.9 0.9]);
        text((length_line/2)+t,cooler_flux(i,1)+0.25,num2str(round(cooler_flux(i,2),1))...
            ,'vert','bottom','horiz','center','FontSize',8,'Color','b');
    end
end
end

```

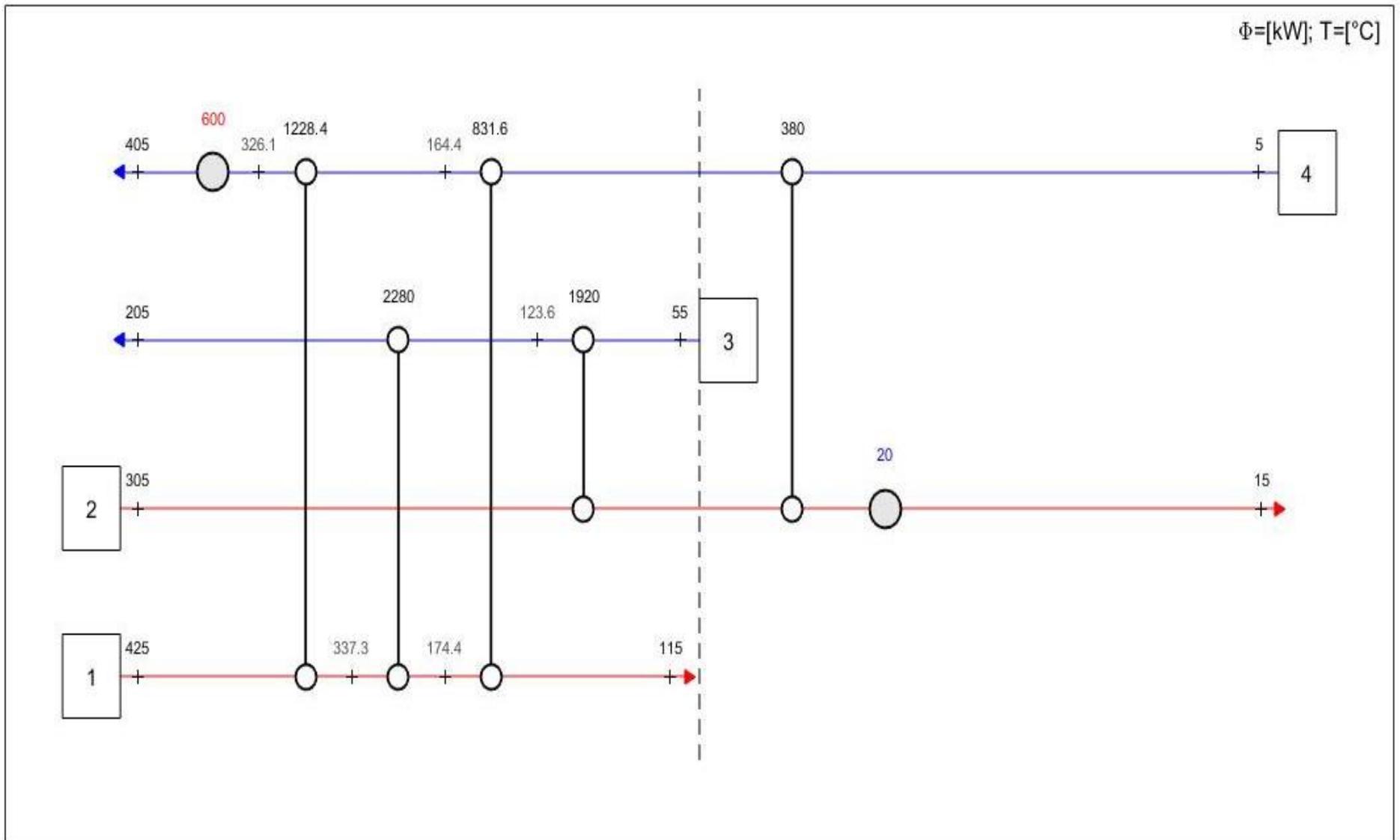
Figura 81 - Inserimento raffreddatori e riscaldatori nella rete

In ultimo, vengono eliminati gli assi in quanto non rappresentativi e non utili al fine della comprensione del grafico. Infatti, rappresentano esclusivamente le unità utilizzate per distanziare i vari scambiatori di calore e per rappresentare nelle corrette posizioni le linee che rappresentano i fluidi.

Per chiarezza, vengono inseriti in alto a destra le unità di misura utilizzate per i flussi e per le temperature, rispettivamente kilowatt e gradi centigradi.

Alla fine di tutto il processo verranno poi eliminate tutte quelle variabili utilizzate nei calcoli e inutili ai fini della comprensione dei risultati.

Vediamo come si presenterà il grafico per l'esempio utilizzato per descrivere i vari passaggi.



Capitolo 3

Esempi applicativi

In questa sezione, verranno presi in considerazione alcuni esempi per dimostrare l'efficacia del programma realizzato visualizzando il numero di fluidi considerati ed i dati necessari e, successivamente, i risultati ottenuti. Verranno infine valutati anche impianti reali, con relativa descrizione dell'impianto al fine di dimostrare la validità della pinch analysis in più campi di applicazione.

3.1 Esempio A – Impianto SOFC-GT

In questo esempio [1], molto semplice sono presenti quattro fluidi. Questi fluidi fanno parte di un impianto denominato SOFC-GT costituito da una microturbina più una cella a combustibile, in particolare ad alta temperatura (solid oxide fuel cell) ed un reformer.

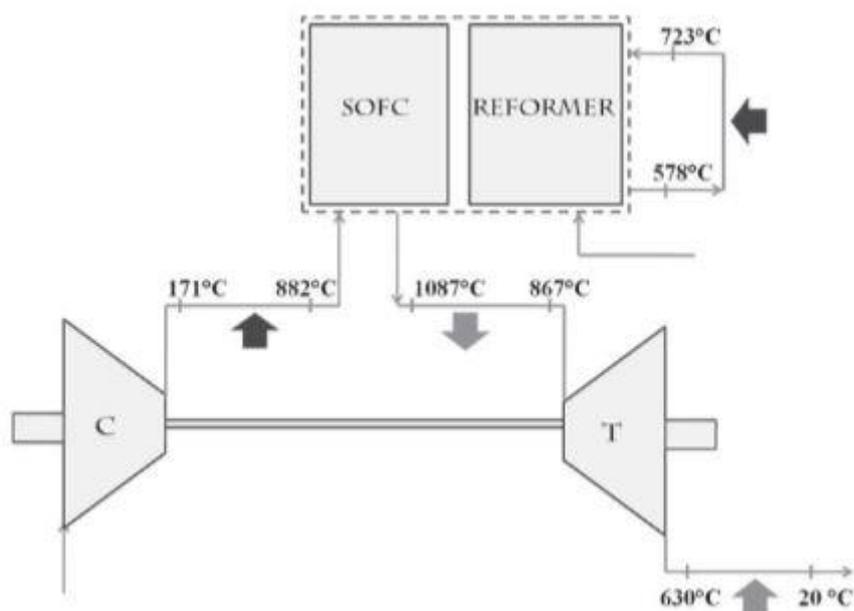


Figura 82 - Impianto SOFC-GT [1]

In questo impianto l'aria viene dapprima compressa all'interno del compressore ed invece di essere inviata ad un combustore come avverrebbe in un impianto tradizionale, viene inviata ad una cella combustibile ad ossidi solidi. In questa cella, avviene una reazione elettrochimica che produce potenza elettrica. Contemporaneamente, all'interno della cella, avviene la produzione di calore che deve essere espulso. Pertanto l'aria a 171°C deve essere scaldata fino ad 882°C per evitare shock termici all'interno della cella provocati dall'eventuale inserimento di aria troppo fredda in un ambiente prossimo agli ottocento gradi centigradi e dalla cella escono gas dopo la reazione alla temperatura di 1087°C. Questi gas dovranno essere raffreddati prima dell'inserimento in turbina e portati alla temperatura di 867°C. Lo stesso fluido, avvenuta l'espansione, dovrà poi essere ulteriormente raffreddato dalla temperatura di 630°C alla temperatura di 20°C, che sarebbe la temperatura ambiente, il limite di sfruttamento ineriore dei gas di scarico.

Inoltre, è presente un fluido intermedio necessario per fornire calore al reformer da 578°C a 723°C. In conclusione i due fluidi caldi saranno quello in uscita dalla SOFC ed in ingresso alla turbina e quello in uscita dalla turbina. In realtà sono lo stesso fluido, ma presi a due intervalli di temperatura diversi e quindi considerati separatamente.

I due fluidi freddi saranno quello in ingresso alla SOFC ed il fluido intermedio utilizzato nel reformer. Possiamo riassumere i fluidi presenti in una tabella che costituirà la partenza dell'analisi.

N° fluido	Tipo di fluido	T ingresso[°C]	T uscita[°C]	Gc [kW/K]
1	Caldo	1087	867	0.402
2	Caldo	630	20	0.402
3	Freddo	578	723	0.475
4	freddo	171	882	0.376

A questo punto è possibile procedere con l'analisi attraverso l'inserimento dei dati nel programma nell'ordine esposto nel capitolo precedente, quindi, capacità termica, temperatura in ingresso e temperatura in uscita.

La differenza minima di temperatura scelta per questo specifico caso è di 20°C. Pertanto la differenza di temperatura tra pinch point dei fluidi caldi e dei fluidi freddi dovrà essere pari a questa minima differenza di temperatura.

A questo punto, come primo step, il programma calcolerà il fabbisogno minimo di freddo e di caldo e la temperatura di pinch point.

```

Command Window

Fabbisogno minimo di calore = 8.190000e+01 kW
Fabbisogno minimo di freddo = 7.930000e+01 kW

Temperatura pinch point caldi = 598 °C
Temperatura pinch point freddi = 578 °C
fx >> |

```

Figura 83 - Fabbisogni minimi e temperatura di pinch point

In questo caso, il fabbisogno minimo di calore da fornire dall'esterno e quello di freddo da fornire dall'esterno sono dello stesso ordine di grandezza e la temperatura di pinch point per i fluidi caldi risulterà essere di 598°C e quella dei fluidi freddi di 578°C. La differenza tra queste due temperature è pari alla differenza minima di temperatura impostata precedentemente come ci si aspettava.

A questo punto, verrà anche fornito l'istogramma dei fabbisogni minimi.

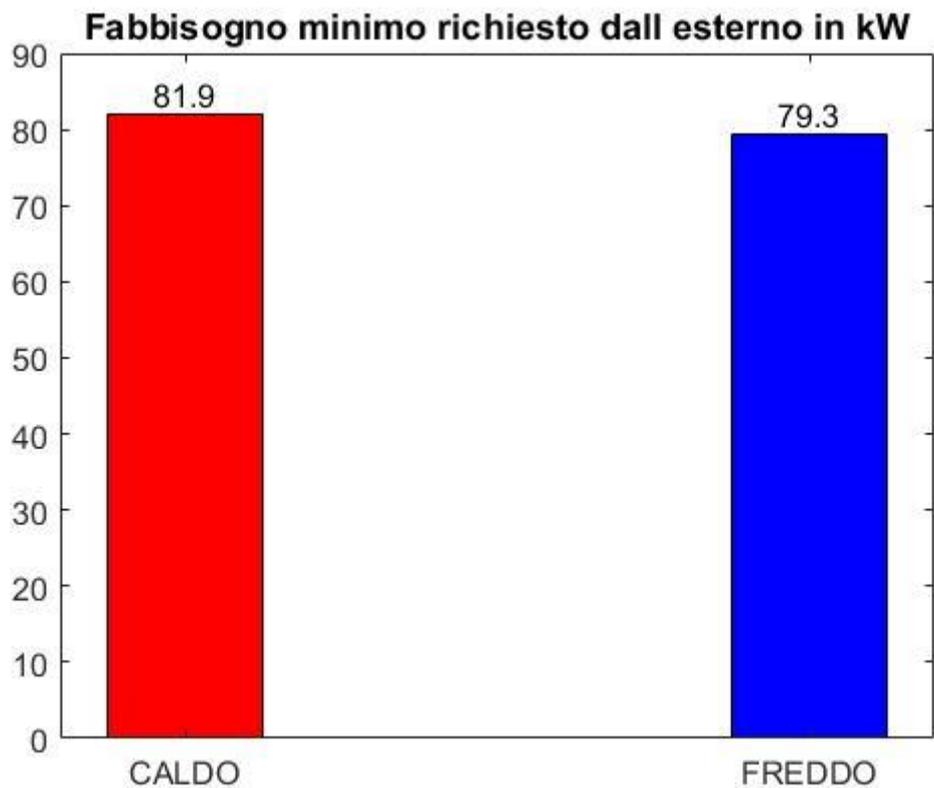


Figura 84 - Istogramma fabbisogni minimi

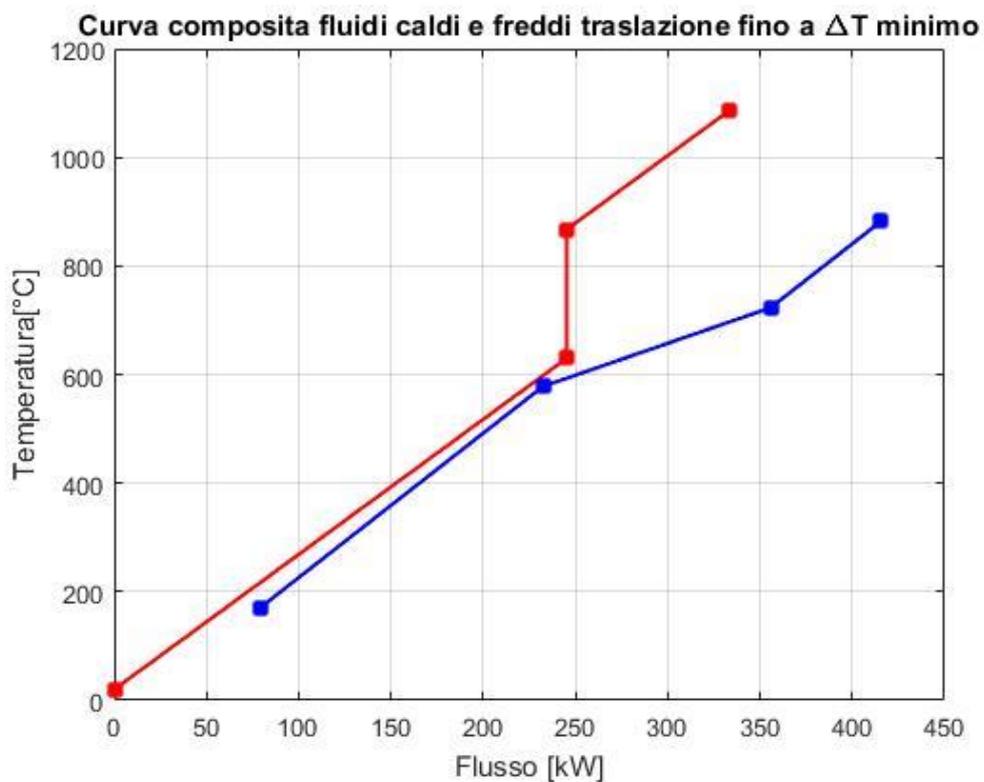


Figura 85 - Curve composite fluidi caldi e freddi

A questo punto, il programma procederà con la divisione dei fluidi sopra e sotto al pinch point e verranno effettuati tutti i passaggi descritti nel capitolo precedente al fine di ottenere il grafico finale visualizzando tutti gli accoppiamenti effettuati.

In questo caso, sopra al pinch point saranno presenti tutti e quattro i fluidi, mentre sotto al pinch point saranno presenti solo un fluido caldo ed un solo fluido freddo che quindi dovranno necessariamente essere collegati.

Partendo dai collegamenti sopra al pinch point e finendo con i collegamenti sotto al pinch point la matrice dei collegamenti risulterà essere la seguente.

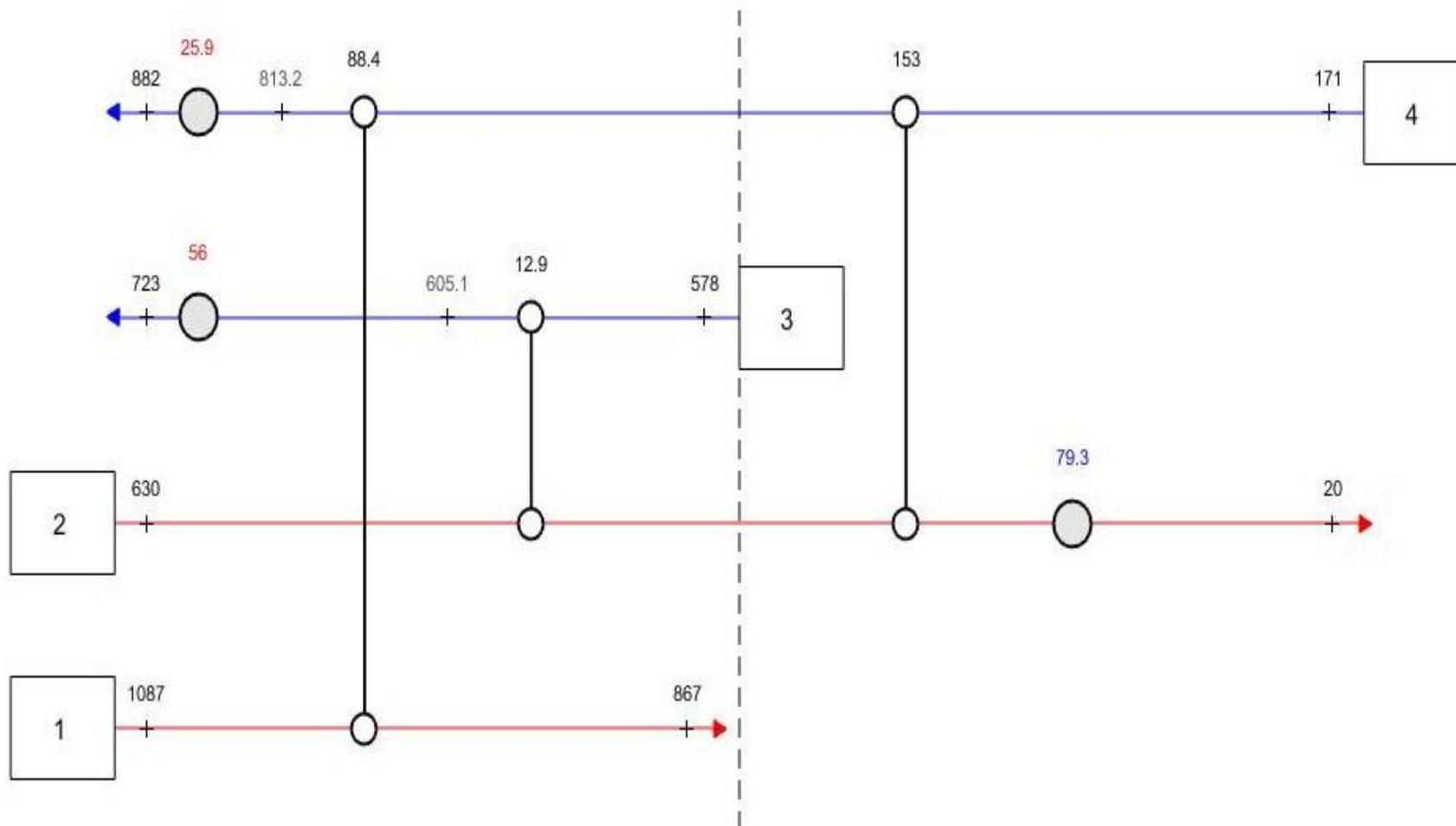
	1	2	3
1	0	1	0
2	1	0	1
3	1	0	0
4	0	1	1

Figura 86 - Matrice heat_exchanger_def

Essendo l'esercizio in esame relativamente semplice, sono presenti solo tre scambiatori di cui due sopra al pinch point e uno soltanto sotto al pinch point. Sopra al pinch point, come da regola, i fluidi caldi uno e due sono stati scaricati completamente ed utilizzati per riscaldare i fluidi freddi parzialmente. Entrambi i fluidi freddi sono stati dotati di un riscaldatore per permettere di raggiungere la temperatura voluta e la somma dei due, ovviamente, da come risultato il fabbisogno minimo di caldo necessario.

Per quanto riguarda la parte sotto al pinch point, l'unico fluido freddo presente è stato riscaldato completamente con l'ausilio del fluido caldo, mentre è stato inserito un raffreddatore per permettere allo stesso fluido caldo di raggiungere la temperatura ambiente voluta dopo l'uscita dalla turbina. Si può vedere nella pagina successiva, il grafico finale ottenuto per visualizzare i collegamenti e le varie temperature di ingresso e di uscita dall'impianto.

$\Phi=[\text{kW}]; T=[^{\circ}\text{C}]$

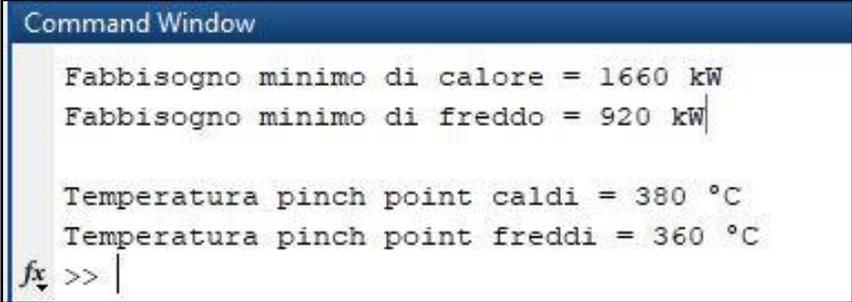


3.2 Esempio B

In questo esempio [1] viene preso in considerazione un altro caso in cui sono presenti quattro fluidi. La differenza minima di temperatura considerata è di 20°C, pertanto le temperature di pinch point dei fluidi caldi e freddi dovranno differire di questa differenza. Nella tabella successiva vengono mostrati i dati dell'esercizio.

N° Fluido	Tipo di fluido	T ingresso [°C]	T uscita [°C]	Gc [kW/K]
1	Caldo	850	630	8
2	Caldo	430	20	8
3	Freddo	80	700	7
4	freddo	360	520	9

A questo punto, il programma calcolerà i fabbisogni minimi e massimi e ritornerà il valore di questi e le temperature di pinch point.



```
Command Window

Fabbisogno minimo di calore = 1660 kW
Fabbisogno minimo di freddo = 920 kW

Temperatura pinch point caldi = 380 °C
Temperatura pinch point freddi = 360 °C
fx >> |
```

Figura 87 - Fabbisogni minimi e temperatura di pinch point

In questo caso, il fabbisogno minimo di calore è superiore a quello di freddo, pertanto sarà necessario provvedere più combustibile per fornire calore al sistema rispetto al fabbisogno di raffreddamento.

Di seguito verranno forniti i grafici del programma riguardanti il fabbisogno minimo.

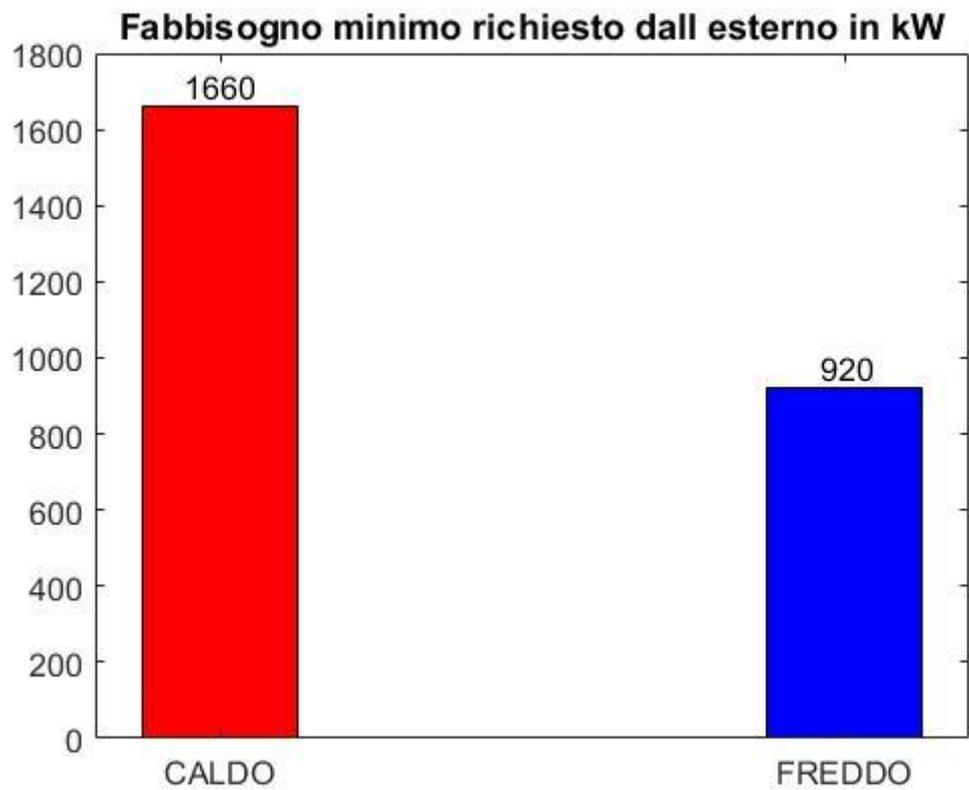


Figura 88 - Fabbisogni minimi di caldo e freddo

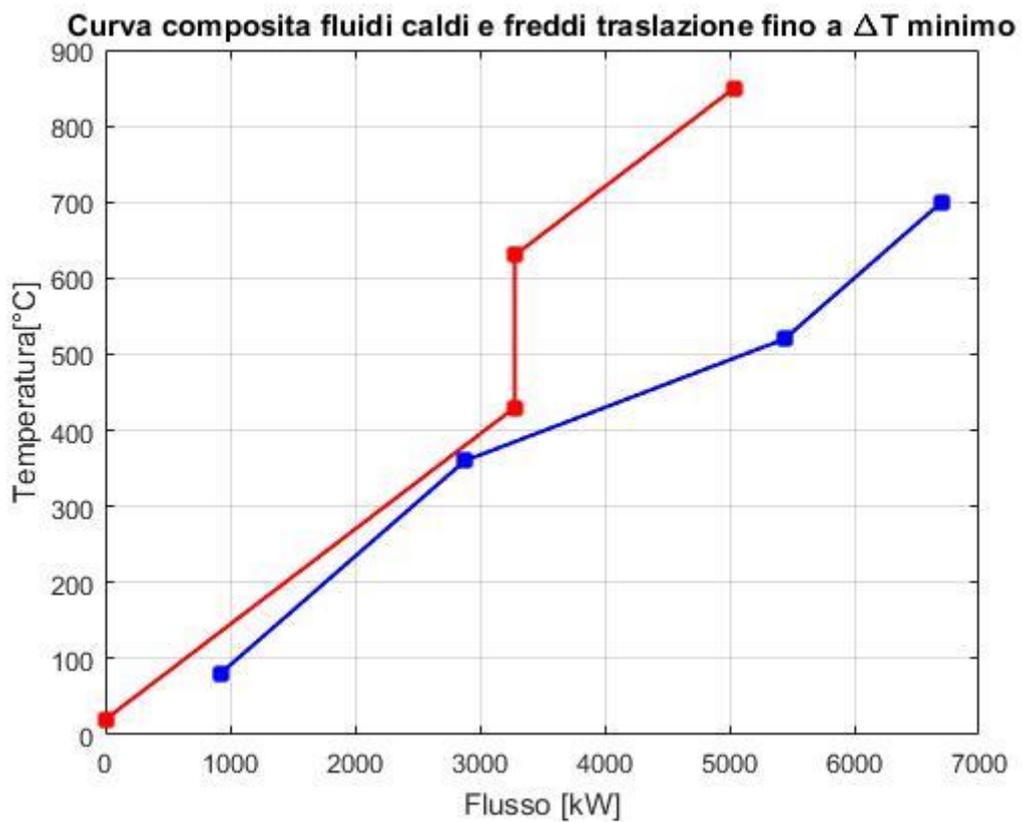
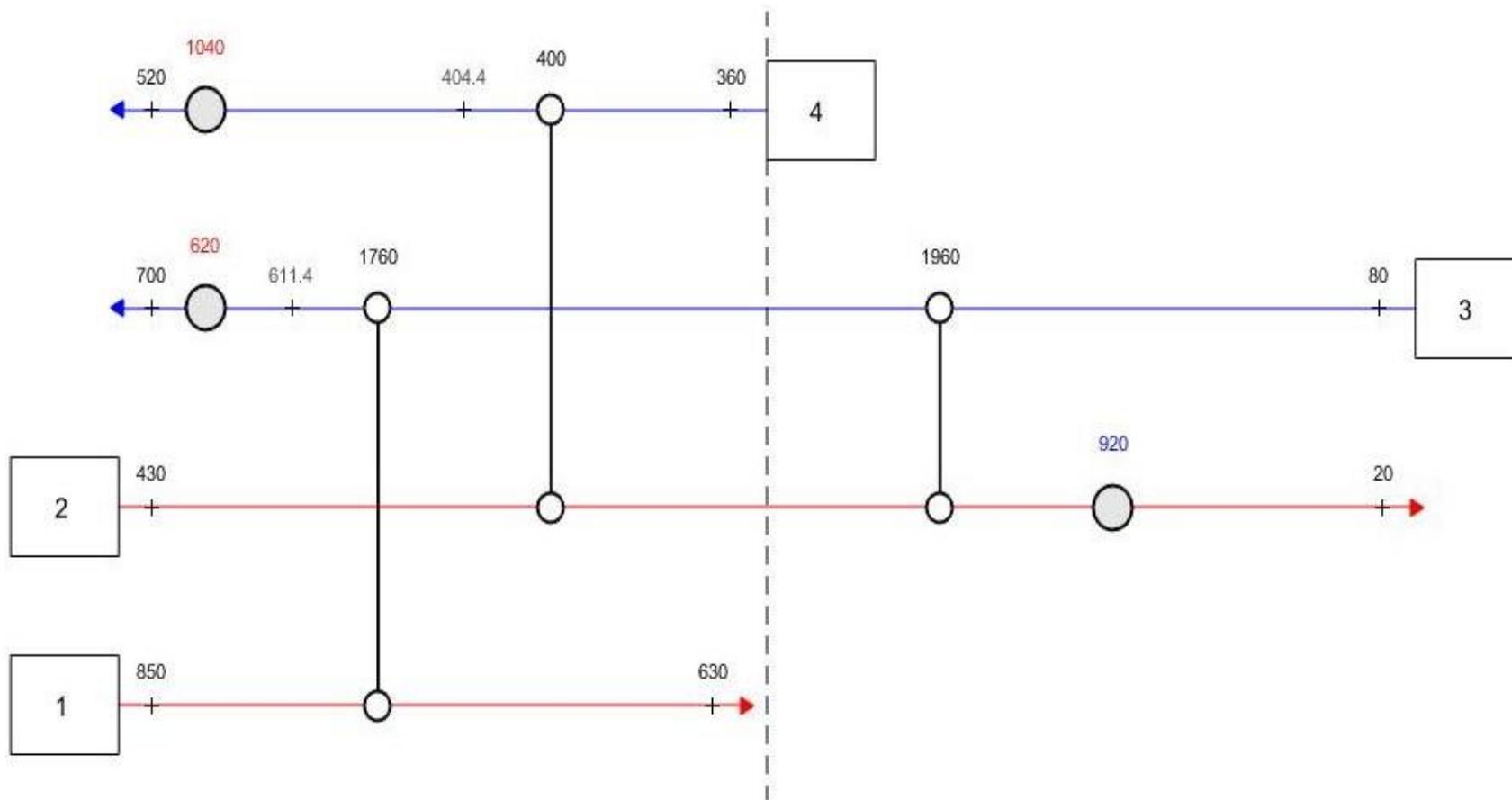


Figura 89 - Curve composte fluidi freddi e caldi

$\Phi=[\text{kW}]; T=[^{\circ}\text{C}]$



3.2 Esempio C

In questo esempio [1], viene preso in considerazione un impianto con quattro fluidi, ma in cui si rende necessaria la divisione di un fluido freddo per poter rispettare la regola di numerosità dei fluidi. Siccome il programma non prevede una divisione automatica dei flussi, dovrà essere l'utente ad impostare la divisione a seconda delle esigenze. In questo caso è stato deciso di dividere il fluido freddo con la capacità termica più elevata. Pertanto, la tabella dei dati contenente i relativi fluidi, in questo caso, conterrà cinque fluidi.

N° Fluido	Tipo di fluido	T ingresso [°C]	T uscita [°C]	Gc [kW/K]
1	Caldo	450	20	0.7
2	Caldo	100	5	1
3	Freddo	300	400	2
4	Freddo	10	90	1
5	Freddo	10	90	3

Come si può notare, il fluido quattro e cinque hanno la stessa temperatura di ingresso e di uscita essendo lo stesso fluido diviso. Nel primo caso la capacità sarà minore e nel secondo maggiore.

Per quanto riguarda il calcolo del fabbisogno e la temperatura di pinch point il programma ritorna i seguenti risultati.

```
Command Window
Fabbisogno minimo di calore = 139 kW
Fabbisogno minimo di freddo = 15 kW

Temperatura pinch point caldi = 20 °C
Temperatura pinch point freddi = 10 °C
fx >> |
```

Figura 90 - Fabbisogni minimi e temperatura di pinch point

In questo caso la differenza tra temperatura di pinch point dei fluidi caldi e dei fluidi freddi risulta pari a 10°C che sarà quindi la differenza minima di temperatura imposta all'inizio dell'analisi. Come per l'esempio precedente, viene riportato successivamente il grafico con le curve composite dei fluidi caldi e dei fluidi freddi e l'istogramma con i fabbisogni minimi da fornire esternamente.

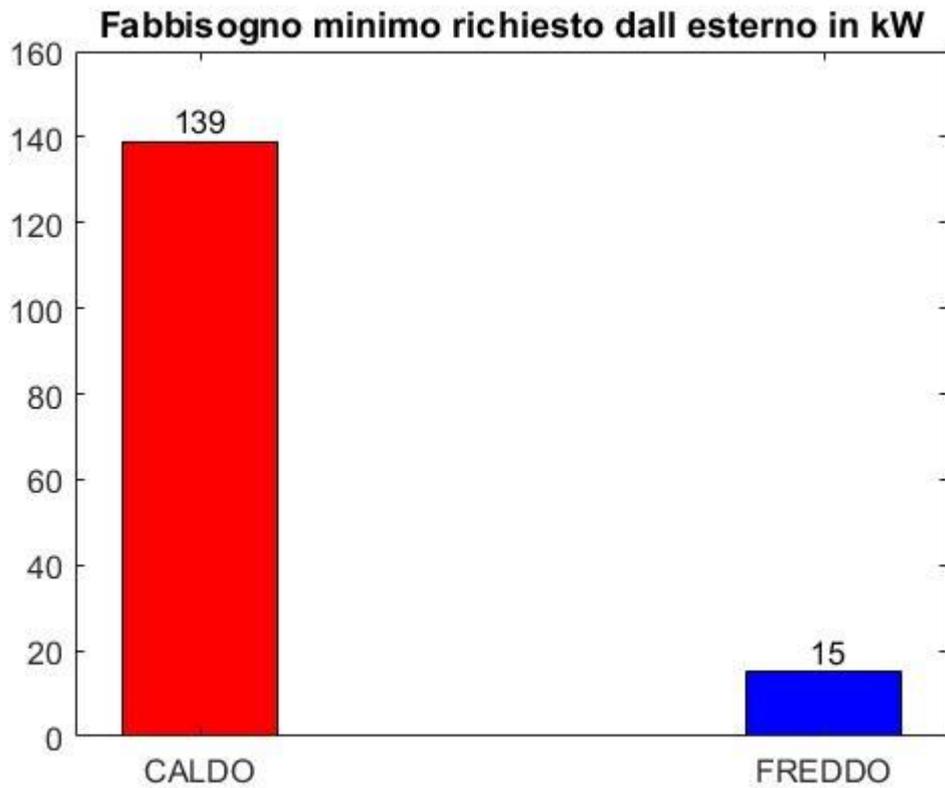


Figura 91 - Istogramma fabbisogni minimi

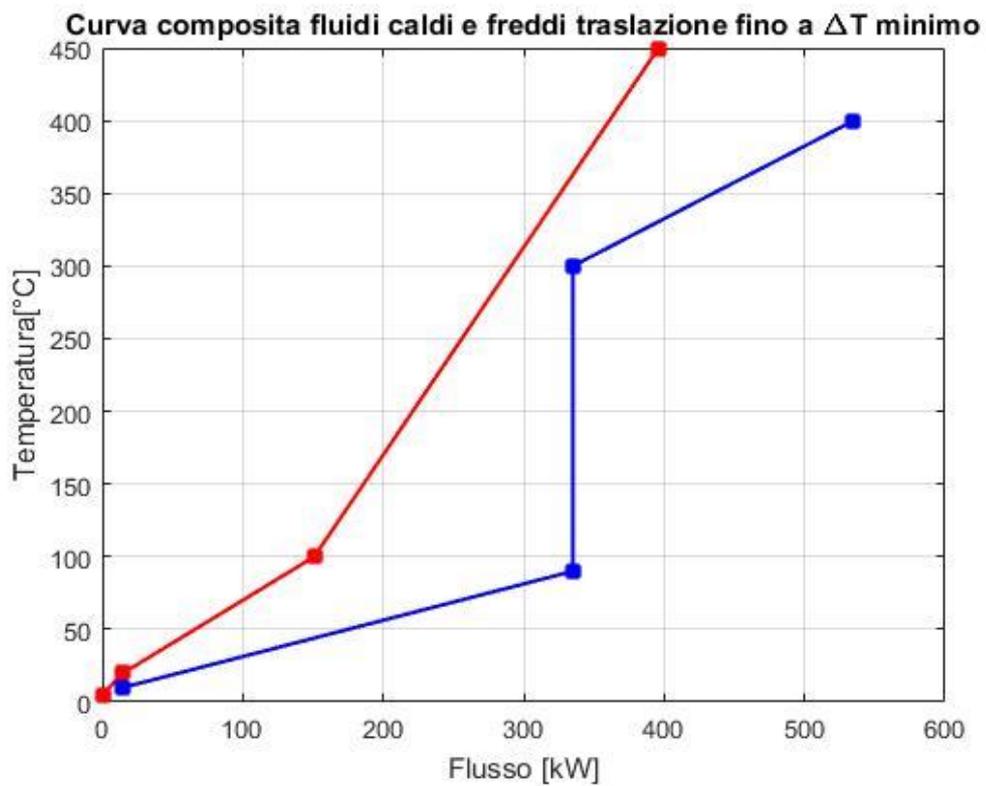


Figura 92 - Curve composite traslate fluidi caldi e freddi

In questo caso, la richiesta di calore dall'esterno è molto superiore rispetto alla richiesta di freddo. Ciò si può notare anche dal grafico delle curve composite: la richiesta di calore dall'esterno corrisponde alla differenza sull'asse delle ascisse tra il surplus della curva fredda rispetto alla curva calda sulla destra del grafico, mentre, la richiesta di freddo, corrisponde alla differenza tra le due curve sull'asse delle ascisse nella parte sinistra del grafico. Visivamente è chiaro anche da questo grafico come sia necessario fornire molto più calore rispetto al freddo dall'esterno.

La matrice dei risultati, ovvero la matrice dei collegamenti, viene riportata di seguito.

	1	2	3
1	1	0	1
2	0	1	0
3	0	0	1
4	0	1	0
5	1	0	0

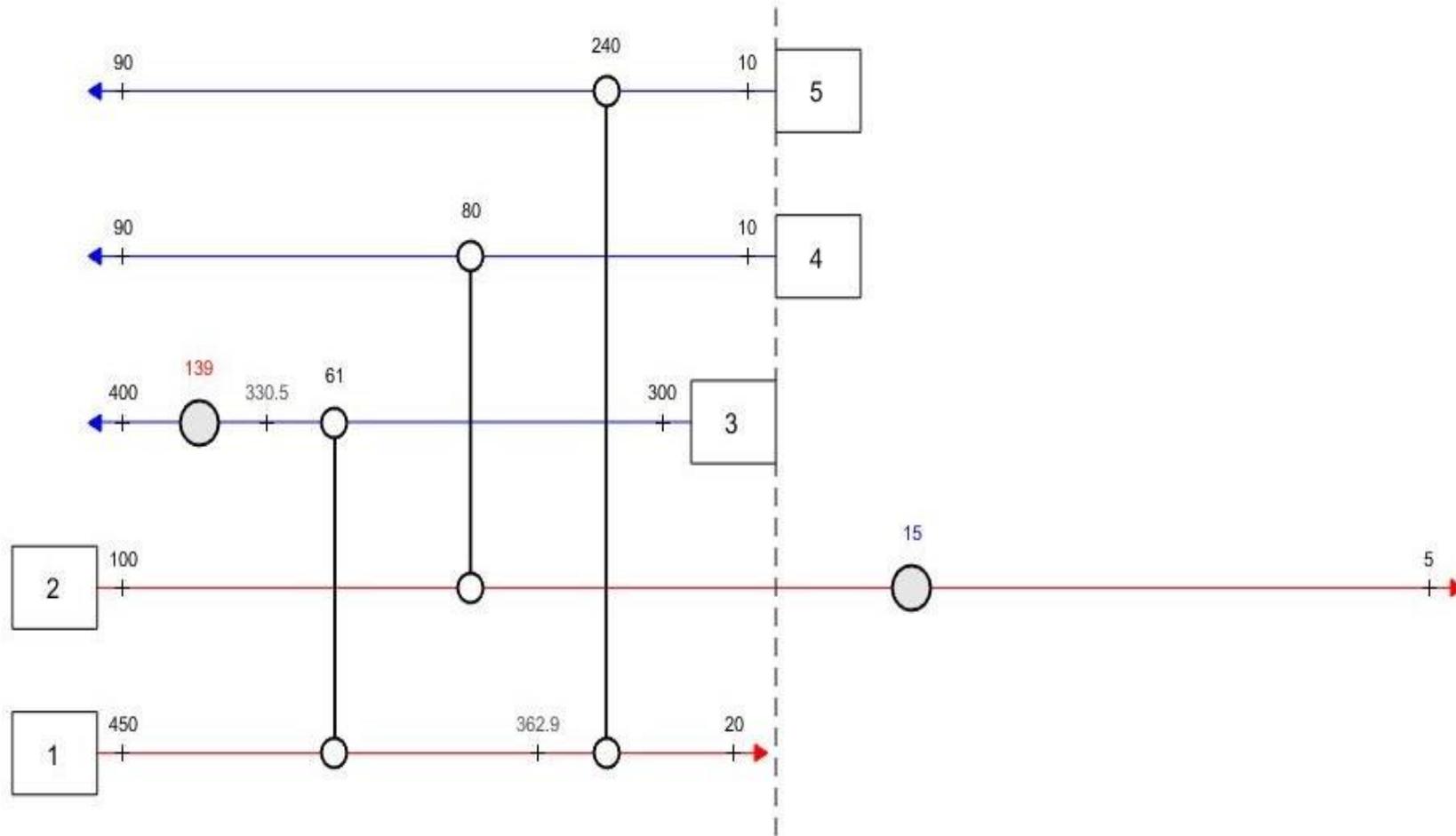
Figura 93 - Matrice degli accoppiamenti

Anche in questo esempio, come nel precedente, sono presenti tre scambiatori, ma questa volta tutti e tre sono utili al di sopra del pinch point, mentre al di sotto non sono presenti accoppiamenti, in quanto solamente un fluido caldo è presente. Sopra al pinch point, tutti i fluidi caldi sono stati utilizzati e, per quanto riguarda i fluidi freddi, solamente uno ha bisogno di un riscaldatore che denota il calore fornito esternamente all'impianto.

Ovviamente, il programma rappresenterà nel grafico il fluido quattro come se fosse rappresentato da due fluidi separati ed indipendenti, ma l'utente dovrà ricordare che in questo caso rappresentano lo stesso fluido diviso per rispettare le regole di applicazione della pinch analysis.

A questo punto possiamo visualizzare il grafico dei collegamenti riportato nella pagina seguente.

$\Phi=[kW]$; $T=[^{\circ}C]$

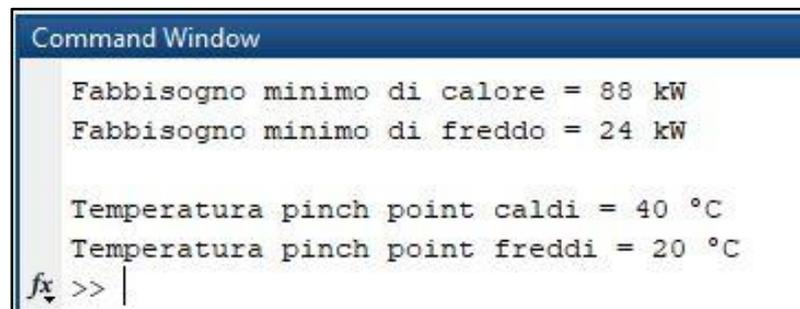


3.3 Esempio D

Andiamo a considerare in questo caso [1] un esempio più complesso con otto fluidi presenti di cui tre caldi e cinque freddi con l'obiettivo di trovare una configurazione di scambiatori di calore.

N° fluido	Tipo di fluido	T ingresso [°C]	T uscita [°C]	Gc [kW/K]
1	Caldo	300	100	0.8
2	Caldo	500	20	0.4
3	Caldo	80	20	0.8
4	Freddo	20	150	0.8
5	Freddo	20	150	0.4
6	Freddo	150	400	0.8
7	Freddo	150	400	0.4
8	Freddo	20	40	0.4

Anche in questo esempio sono stati divisi due fluidi freddi, per cui originariamente i fluidi erano sei ma con le divisioni effettuate sono diventati otto. Possiamo vedere i risultati ottenuti per quanto riguarda il fabbisogno.



```
Command Window
Fabbisogno minimo di calore = 88 kW
Fabbisogno minimo di freddo = 24 kW

Temperatura pinch point caldi = 40 °C
Temperatura pinch point freddi = 20 °C
fx >> |
```

Figura 94 - Fabbisogni minimi e temperatura di pinch point

Per questo esempio, la differenza minima di temperatura scelta dall'utente è di 20° C ed infatti le due temperature di pinch point differiscono proprio di questa differenza minima. Per quanto riguarda i fabbisogni minimi, in questo caso sono dello stesso ordine di grandezza ma quello di calore è superiore di 64 kW.

Possiamo anche osservare nella pagina seguente i diagrammi ottenuti per visualizzare meglio il fabbisogno minimo e le curve composite ottenute.

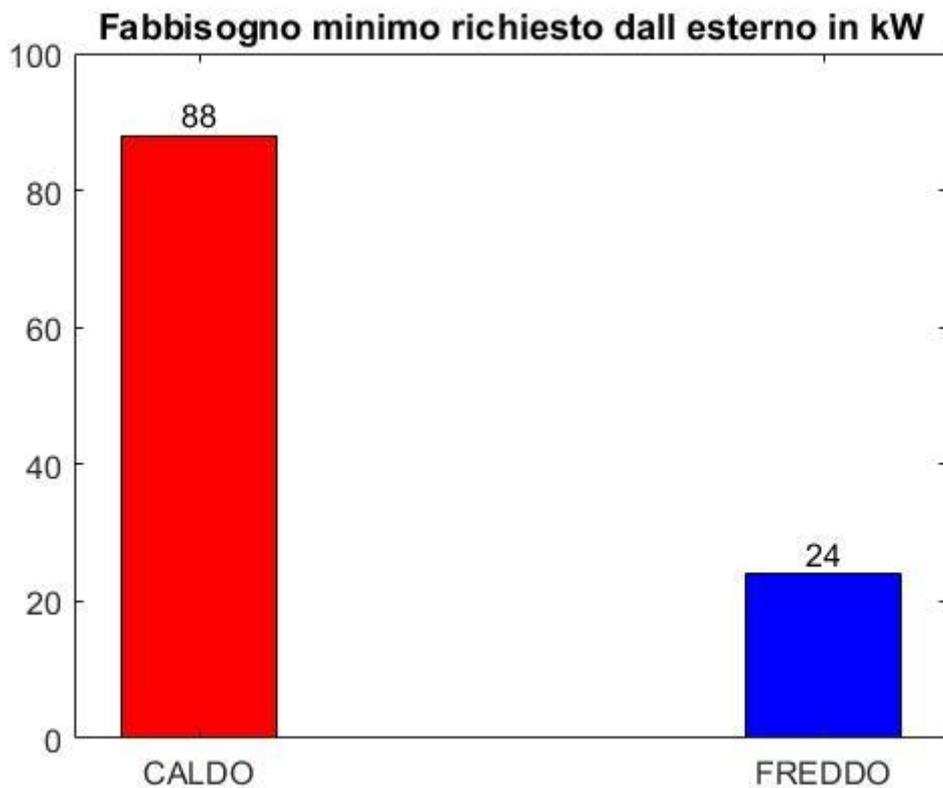


Figura 95 - Fabbisogni minimi di caldo e freddo

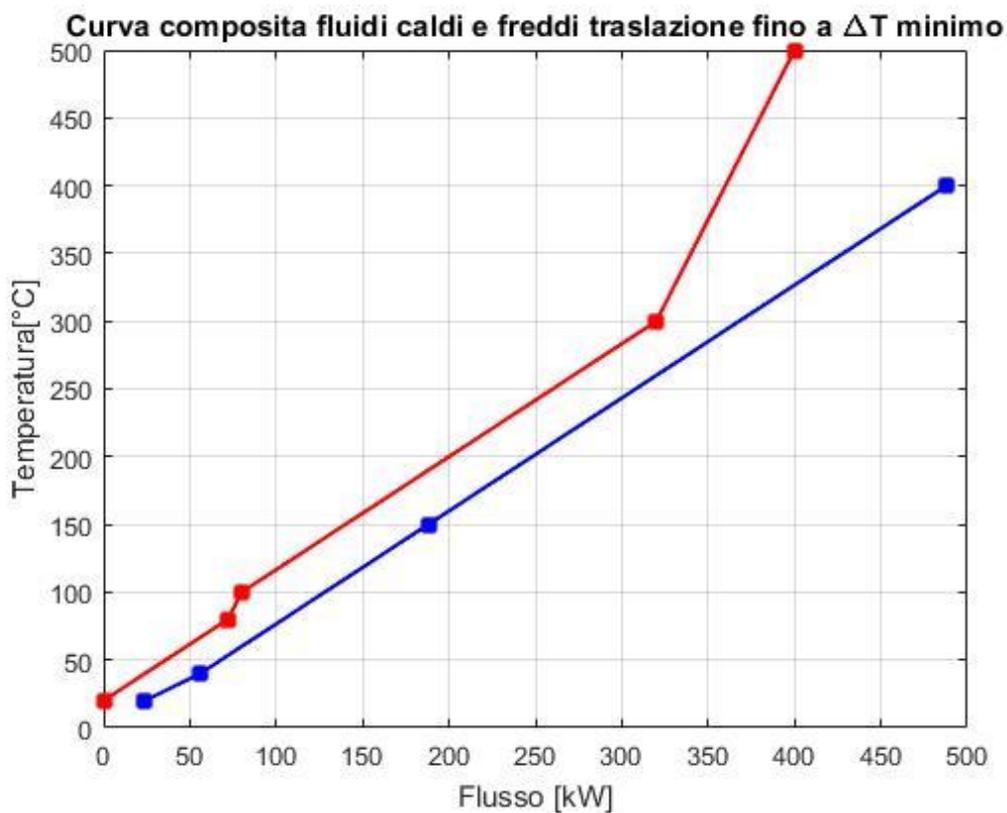


Figura 96 - Curve composite dei fluidi caldi e freddi

In questo caso, essendo il numero di fluidi elevato, è possibile che anche il numero di scambiatori utilizzati sia elevato, come poi si vedrà. In particolare, tutti gli scambiatori saranno al di sopra del pinch point, in quanto al di sotto del pinch point sono presenti solo fluidi caldi quindi non sono possibili accoppiamenti.

Possiamo visualizzare di seguito la matrice dei risultati trovati che rappresenta gli accoppiamenti effettuati.

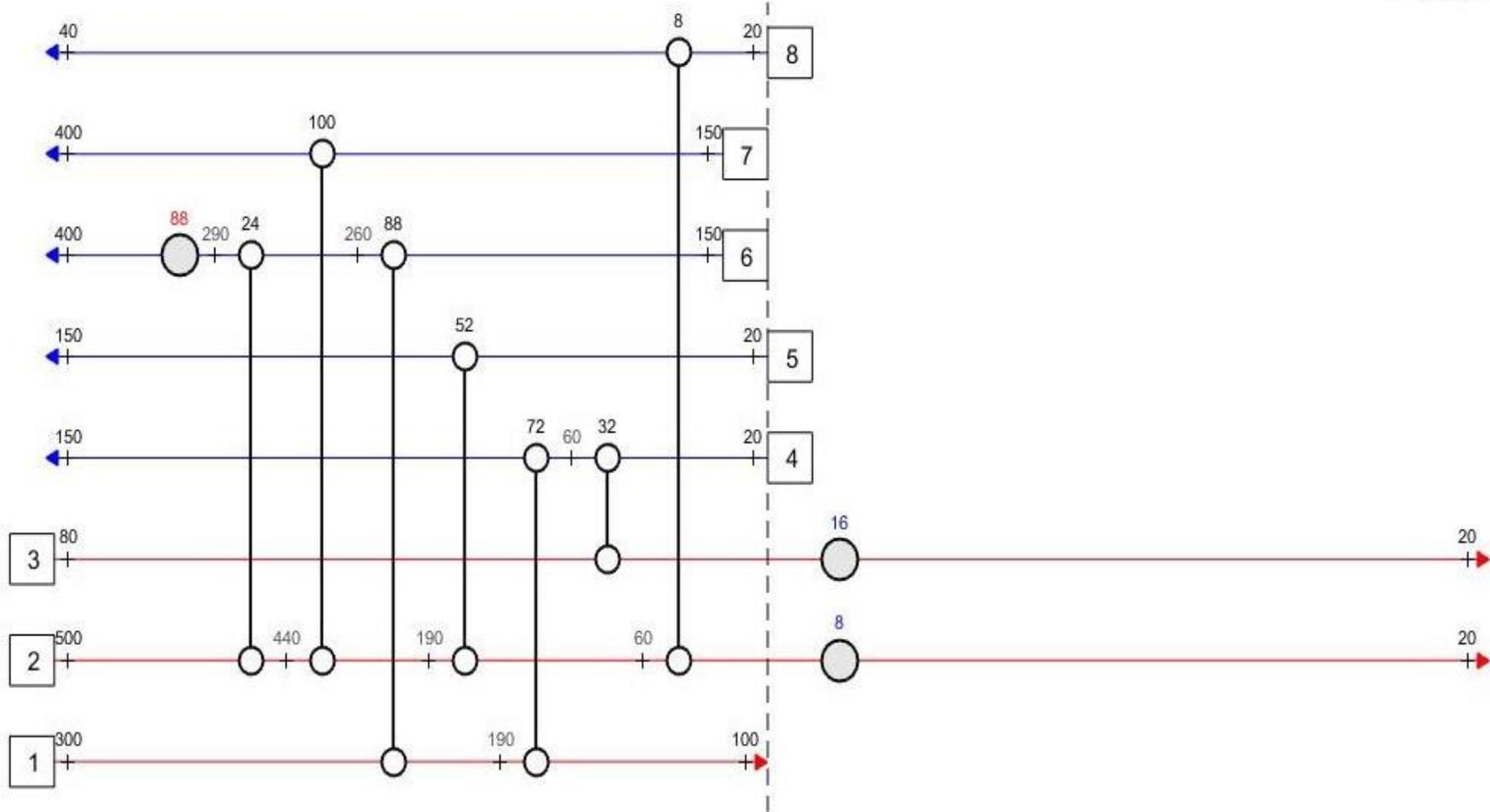
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0	1	0	1	0	0
2	1	0	0	1	0	1	1
3	0	1	0	0	0	0	0
4	0	1	1	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0	0
6	0	0	0	0	1	0	1
7	0	0	0	0	0	1	0
8	1	0	0	0	0	0	0

Figura 97 - Matrice degli accoppiamenti effettuati

In questo caso, la matrice è molto più corposa rispetto agli altri esempi finora presi in considerazione. Addirittura, sopra al pinch point vengono effettuati sette accoppiamenti, quindi vengono inseriti sette scambiatori di calore. Si vedrà che, per quanto riguarda i riscaldatori, ne verrà inserito solamente uno al di sopra del pinch point, tutti gli altri fluidi freddi vengono riscaldati completamente ed ovviamente, tutti i caldi vengono scaricati completamente secondo il rispetto delle regole. Per quanto riguarda la parte sotto al pinch point, vengono inseriti due raffreddatori, uno per ognuno dei due fluidi caldi rimasti da raffreddare, in quanto non è possibile accoppiarli con altri fluidi freddi.

Si provvederà nella pagina successiva a fornire il grafico per visualizzare i collegamenti effettuati in cui compariranno tra uno scambiatore e l'altro le temperature intermedie raggiunte dai vari fluidi durante lo scambio termico. Proprio in esempi più complicati come questo è importante visualizzare questi step intermedi per comprendere i flussi di calore messi in gioco tra i vari accoppiamenti.

$\Phi=[\text{kW}]; T=[^{\circ}\text{C}]$



3.4 Esempio E

In questo esempio [2], si prenderà in considerazione un impianto industriale per la produzione della birra. Lo scopo sarà quello di trovare una configurazione di scambiatori di calore a fabbisogno minimo di energia dall'esterno. È possibile visualizzare una rappresentazione schematica dell'impianto con i vari fluidi messi in gioco.

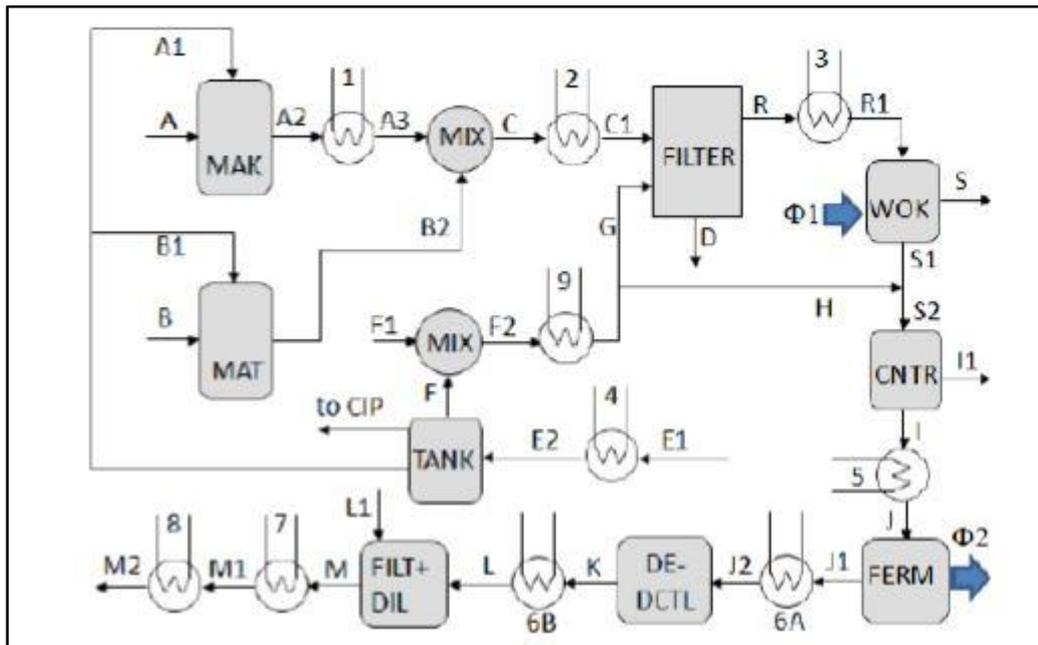


Figura 98 - Schema impianto per la produzione della birra [2]

Il flusso A è costituito da malto e mais miscelati con acqua (rispettivamente 16.2%, 17.9% e 65.9% per una portata totale di 1.63 kg/s), che nel serbatoio MAK è portato dalla temperatura di ingresso di 15 °C alla temperatura di 48 °C, attraverso iniezione di una portata di acqua (A1) alla temperatura di 80 °C. Nello scambiatore 1, tale flusso è portato alla temperatura di 102 °C (A3) [2].

Nel serbatoio MAT, il flusso B, costituito da malto e acqua (rispettivamente 54.8% e 45.2% per una portata totale di 4.26 kg/s), è portato dalla temperatura di ingresso di 15 °C alla temperatura di 48°, attraverso iniezione di una portata di acqua (B1) alla temperatura di 80 °C. I flussi A3 e B2 sono miscelati (C) e successivamente riscaldati nello scambiatore di calore 2 fino alla temperatura di 75 °C (C1). Nel filtro a compressione avviene l'aggiunta di una portata di 5.92 kg/s acqua alla temperatura di 80 °C (G) e l'eliminazione di una frazione di malto, D (0.76 kg/s). Il flusso in uscita dal filtro (R) è riportato alla temperatura di 102 °C attraverso lo scambiatore di calore 3 [2].

Nel successivo processo (WOK) è aggiunto il luppolo ed è perso circa il 10% dell'acqua (S). Il flusso termico richiesto per l'evaporazione dell'acqua Φ_1 è circa 3314 kW. Il flusso in uscita (S1) è miscelato con una portata di 1.39 kg/s di acqua alla temperatura di 80 °C (H) e quindi centrifugato per l'eliminazione di parte delle proteine, circa 0.2 % del peso totale. La portata di acqua a 80 °C, è ottenuta per riscaldamento nello scambiatore 4 che provvede

anche al riscaldamento dell'acqua richiesta per il processo di pulizia delle bottiglie (CIP), circa 8.32 kg/s. La portata F è raffreddata attraverso diluizione con acqua fresca e quindi nuovamente riscaldata a 80 °C. Il flusso in uscita dalla centrifugazione (I) è raffreddato fino alla temperatura di 10 °C (J) e poi sottoposto a un processo di fermentazione. Tale processo è esotermico; il mantenimento della temperatura di 10 °C richiede che sia asportato un flusso termico di circa 55 kW. La portata in uscita (J1) è raffreddata alla temperatura di 6 °C per la rimozione di diacetile e quindi raffreddata alla temperatura di 1 °C (L) per la filtrazione e la diluizione con 3.94 kg/s di acqua (L1). Il ciclo produttivo termina con la pastorizzazione, che avviene a 70 °C (M1), e quindi con il raffreddamento fino a 5°C per la distribuzione (M2) [2].

Nell'impianto sono presenti complessivamente 12 processi in cui i flussi di massa richiedono riscaldamento o raffreddamento. Questo numero può essere ridotto a 11 considerando che i flussi 6A e 6B possono essere considerati un unico flusso, dal momento che le proprietà non cambiano (né la portata né il calore specifico) e che la temperatura iniziale di 6B coincide con la temperatura finale di 6° [2].

Pertanto i fluidi considerati, possono essere riassunti nella seguente tabella.

N° Fluido	Tipo di fluido	T ingresso [°C]	T uscita [°C]	Gc [kW/K]
1	Freddo	48.0	102.0	11.2
2	Freddo	64.9	75.0	35.7
3	Freddo	77.0	102.0	59.1
4	Freddo	15.0	80.0	70.4
5	Caldo	99.8	10.0	58.8
6	Caldo	10.0	1.0	58.8
7	Freddo	4.1	70.0	75.3
8	Caldo	70.0	5.0	75.3
9	Freddo	52.3	80.0	30.5
10	Freddo	102.0	102.1	33137.1
11	Caldo	10.0	9.9	550.0

Per il calcolo dei fabbisogni minimi, è possibile visualizzare i risultati forniti dal programma.

```

Command Window

Fabbisogno minimo di calore = 7.532500e+03 kW
Fabbisogno minimo di freddo = 2.148700e+03 kW

Temperatura pinch point caldi = 25 °C
Temperatura pinch point freddi = 15 °C
fx >> |

```

Figura 99 - Fabbisogni minimi e temperatura di pinch point

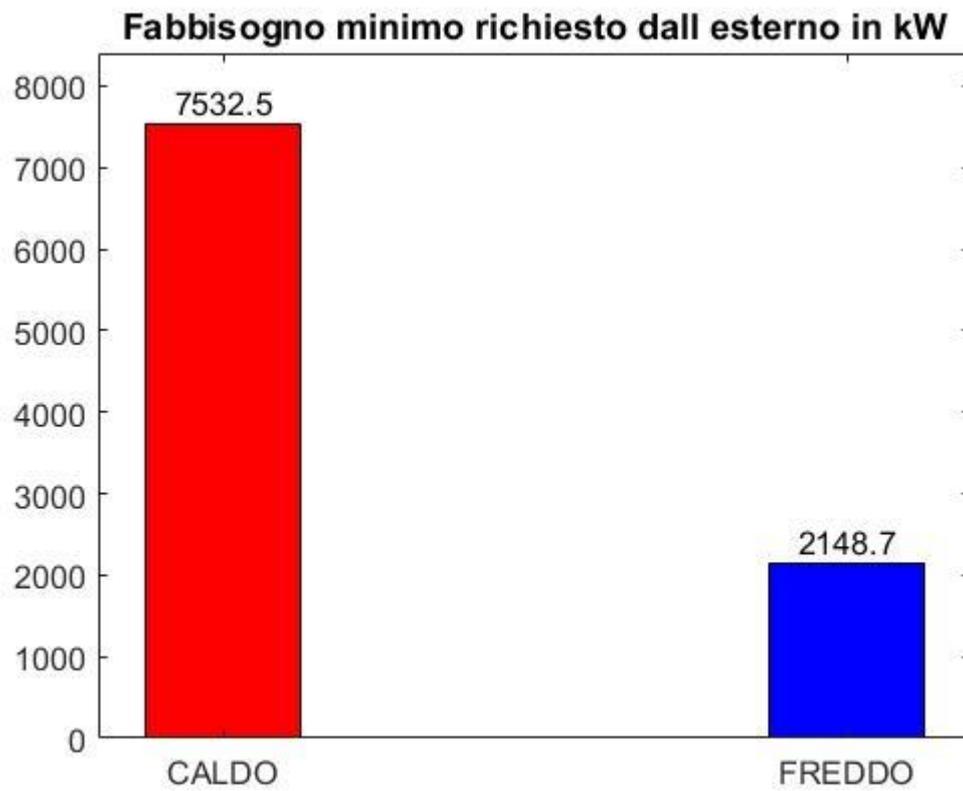


Figura 100 - Fabbisogni minimi richiesti dall'esterno

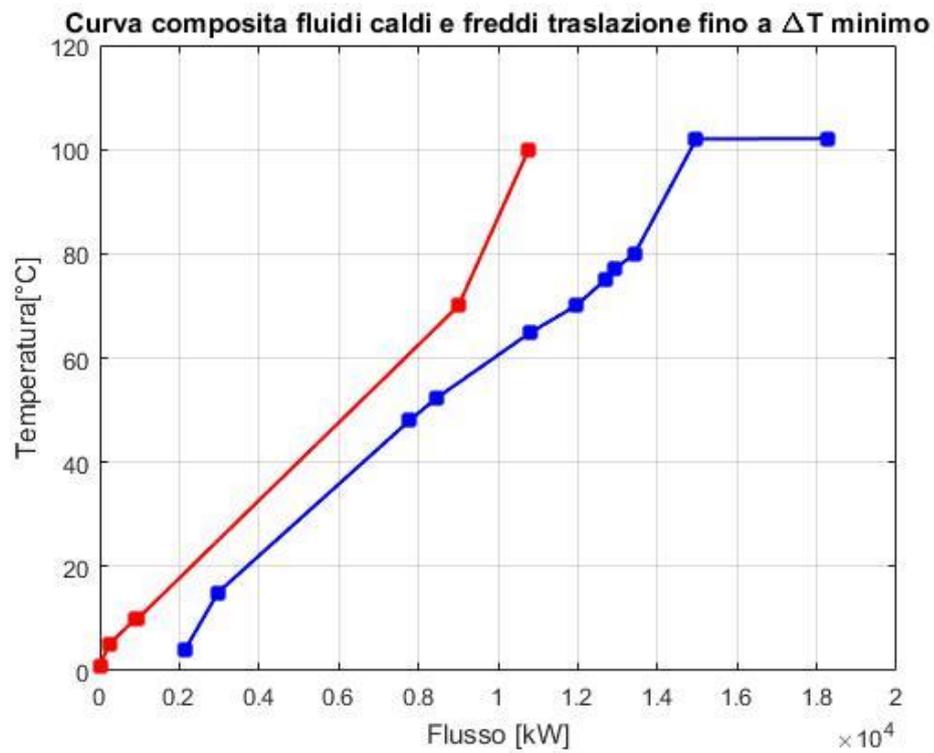


Figura 101 - Curve composte fluidi caldo e freddo

In questo caso, la differenza minima di temperatura impostata dall'utente è pari a 10° C, come si può vedere dalla temperatura di pinch point trovata per i fluidi caldi e per i fluidi freddi. Le quantità di energia dall'esterno richieste, in questo esempio, sono molto elevate ed in particolare quella di calore risulta molto più elevata rispetto a quella di freddo. Nonostante l'elevato numero di fluidi coinvolti, gli scambiatori utilizzati per questo tipo di impianto sono solamente tre, due sopra al pinch point e uno sotto al pinch point. Tutti gli altri fluidi dovranno essere dotati di riscaldatore o raffreddatore e questo spiega l'elevato quantitativo di calore e freddo richiesto dall'esterno.

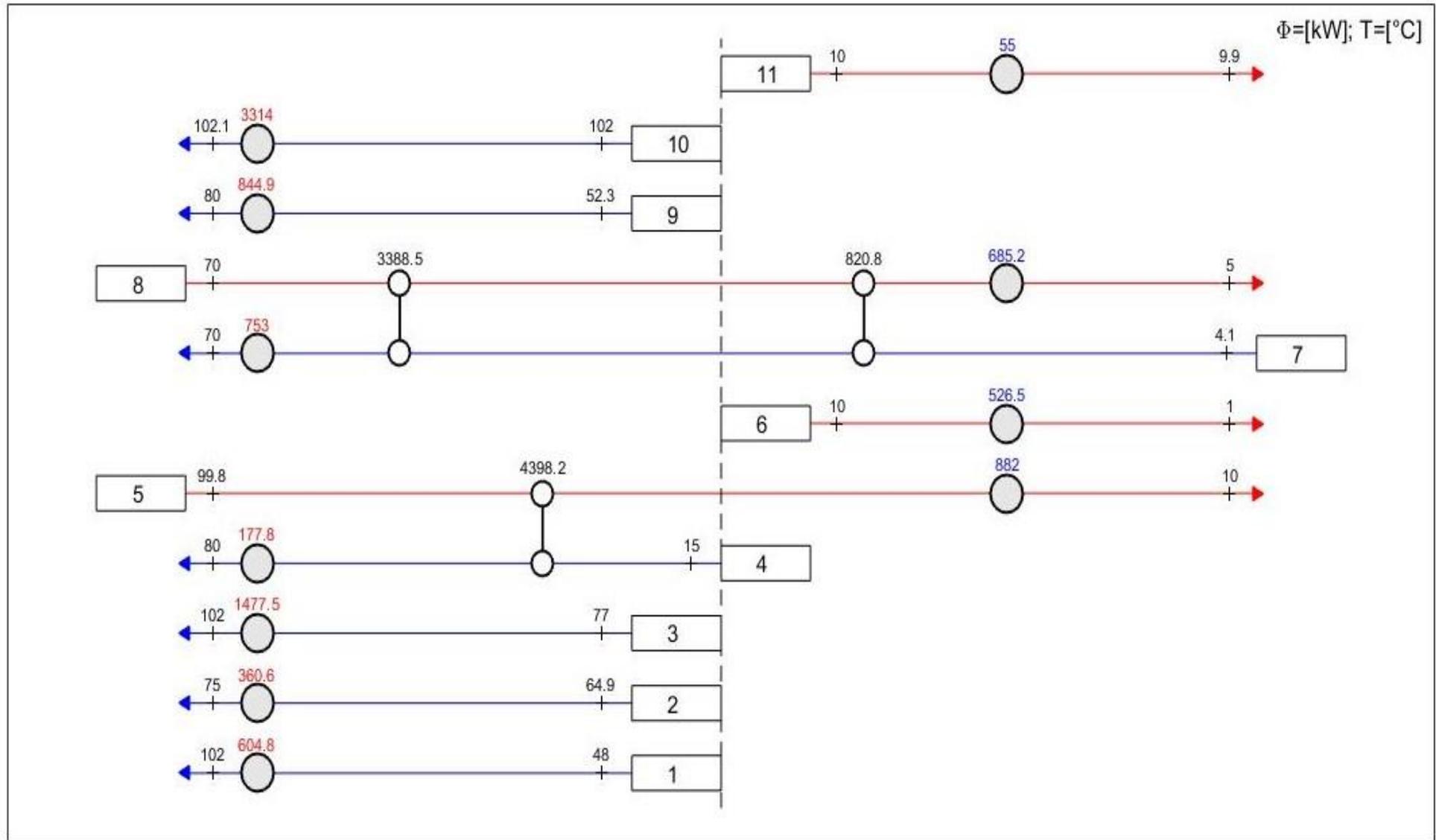
La matrice dei risultati degli accoppiamenti risulta la seguente.

	1	2	3
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	1	0	0
5	1	0	0
6	0	0	0
7	0	1	1
8	0	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0

Figura 102 - Matrice degli accoppiamenti

I primi due scambiatori corrispondono ai due collegamenti sopra al pinch point e l'ultimo corrisponde all'ultimo collegamento sotto al pinch point. La particolarità di questo esercizio consiste nel fatto che tutti i collegamenti sono stati effettuati esattamente al pinch point e non successivamente. Infatti sopra al pinch point, i fluidi caldi presenti vengono scaricati completamente senza andare oltre al pinch point e sopra al pinch point quelli freddi vengono scaricati direttamente al pinch point.

Vediamo il grafico dei collegamenti nella pagina seguente.



3.5 Esempio F

In questo esempio [3], viene presa in considerazione la rete di scambiatori di calore tracciata nell'unità di distillazione nella raffineria di Al-Basra in Iraq.

Le raffinerie sono impianti che richiedono un grande quantitativo di calore, quindi potrebbe essere una buona soluzione quella del recupero termico per utilizzare meno combustibile fossile e quindi evitare emissioni di anidride carbonica [3].

L'unità di distillazione è la sezione della raffineria in cui viene consumata più energia, infatti richiede circa il 40% della domanda di energia totale, per questo si è deciso di intervenire in questa parte dell'impianto applicando la pinch analysis.

L'unità di distillazione è costituita da più sezioni.

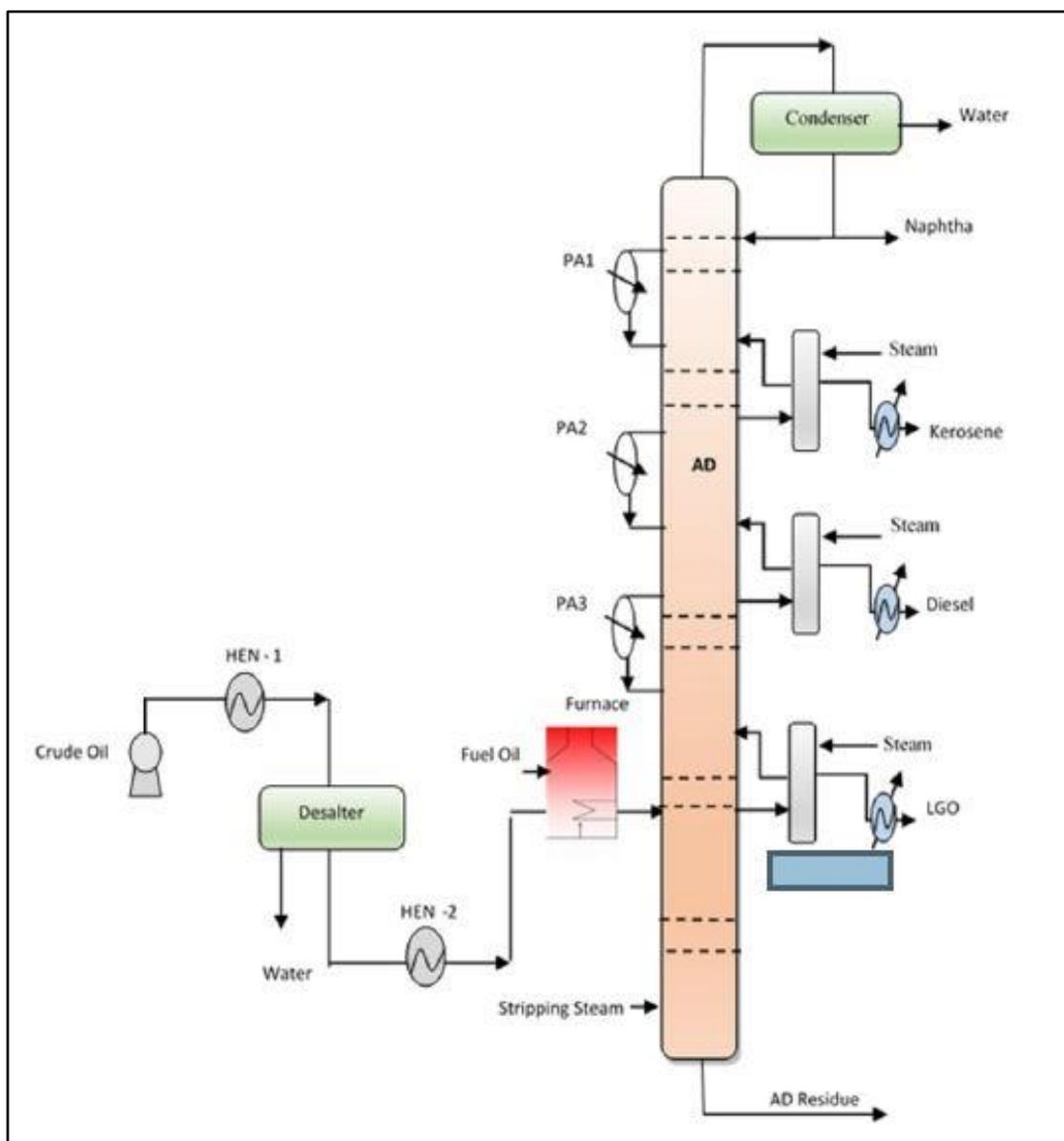


Figura 103 - Unità di distillazione della raffineria [3]

L'olio grezzo è inizialmente pompato da un serbatoio a 33°C fino al sito di produzione dove viene portato inizialmente alla temperatura di 148°C grazie all'ausilio di undici scambiatori di calore denominati nello schema HEN-1. L'olio grezzo, a questo punto, contiene al suo interno del sale che può essere dannoso e quindi va rimosso. Per effettuare questa operazione, viene inserita dell'acqua e viene aumentata la temperatura di circa 10°C fino a 158°C. Il grezzo desalinizzato viene poi inviato ad una seconda griglia di scambiatori di calore denominata HEN-2 contenente tredici scambiatori di calore per portare la temperatura fino a 210°C [3].

Questa temperatura però, risulta ancora abbastanza bassa per permettere la vaporizzazione dell'olio crudo nella colonna di distillazione, pertanto viene inviato ad una fornace dove viene portato alla temperatura di 342°C grazie all'inserimento di gas naturale come combustibile [3].

La rete di scambiatori tracciata dal programma servirà a diminuire la domanda di energia della fornace, quindi a diminuire il fabbisogno di gas naturale da fornire esternamente. Infatti l'elevata portata del greggio e l'elevata differenza di temperatura tra ingresso di questo nell'impianto ed uscita rendono la fornace una delle parti della raffineria più energivore [3]. A questo punto l'olio entra nella colonna di distillazione dove cinque frazioni vengono estratte: Nafta, Kerosene, Diesel, Gas leggeri e residui finali.

Ora possiamo vedere i fluidi coinvolti nell'analisi senza però considerare i gas leggeri che in questa analisi non vengono utilizzati.

N° Fluido	Tipo di fluido	T ingresso [°C]	T uscita [°C]	Gc [kW/K]
1- Nafta	Caldo	125	54	34.5
2- Kerosene	Caldo	190	45	23
3- Diesel	Caldo	102	75	25.5
4- Residuo	Caldo	330	100	163
5- Greggio desalinizzato	Freddo	153	210	253.7
6- Greggio da fornace	Freddo	210	342	289
7- Greggio da serbatoio	Freddo	33	148	18.6
8- Greggio da serbatoio	Freddo	33	148	25.4
9- Greggio da serbatoio	Freddo	33	148	68.85
10- Greggio da serbatoio	Freddo	33	148	106.15

Il processo comprende quindi quattro fluidi caldi e tre freddi. Di questi tre fluidi freddi, il greggio proveniente dal serbatoio, ai fini della pinch analysis viene suddiviso in quattro con valore della capacità termica diverso.

La differenza minima di temperatura impostata per l'analisi di questo processo è di 30°C. Si può pertanto procedere visualizzando i risultati riguardanti il fabbisogno minimo.

```
Command Window
Fabbisogno minimo di calore = 3.455540e+04 kW
Fabbisogno minimo di freddo = 7.245000e+02 kW

Temperatura pinch point caldi = 63 °C
Temperatura pinch point freddi = 33 °C
fx >> |
```

Figura 104 - Fabbisogni minimi e temperatura di pinch point

Come si può osservare, il fabbisogno di calore, in questo caso, è molto elevato addirittura due ordini di grandezza superiore rispetto al fabbisogno di freddo. Le due temperature di pinch point differiscono di 30°C corrispondente alla differenza di temperatura minima.

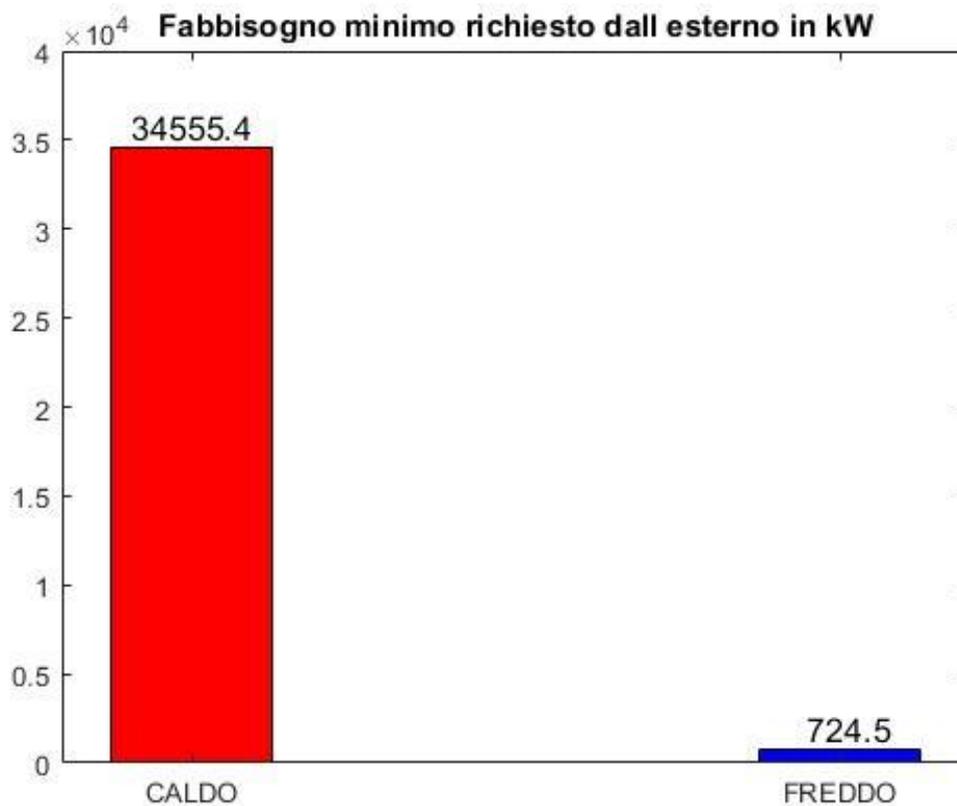


Figura 105 - Istogramma dei fabbisogni minimi

È inoltre possibile visualizzare le curve composite dei fluidi caldi e dei fluidi freddi per comprendere meglio come sia necessario fornire molto calore dall'esterno.

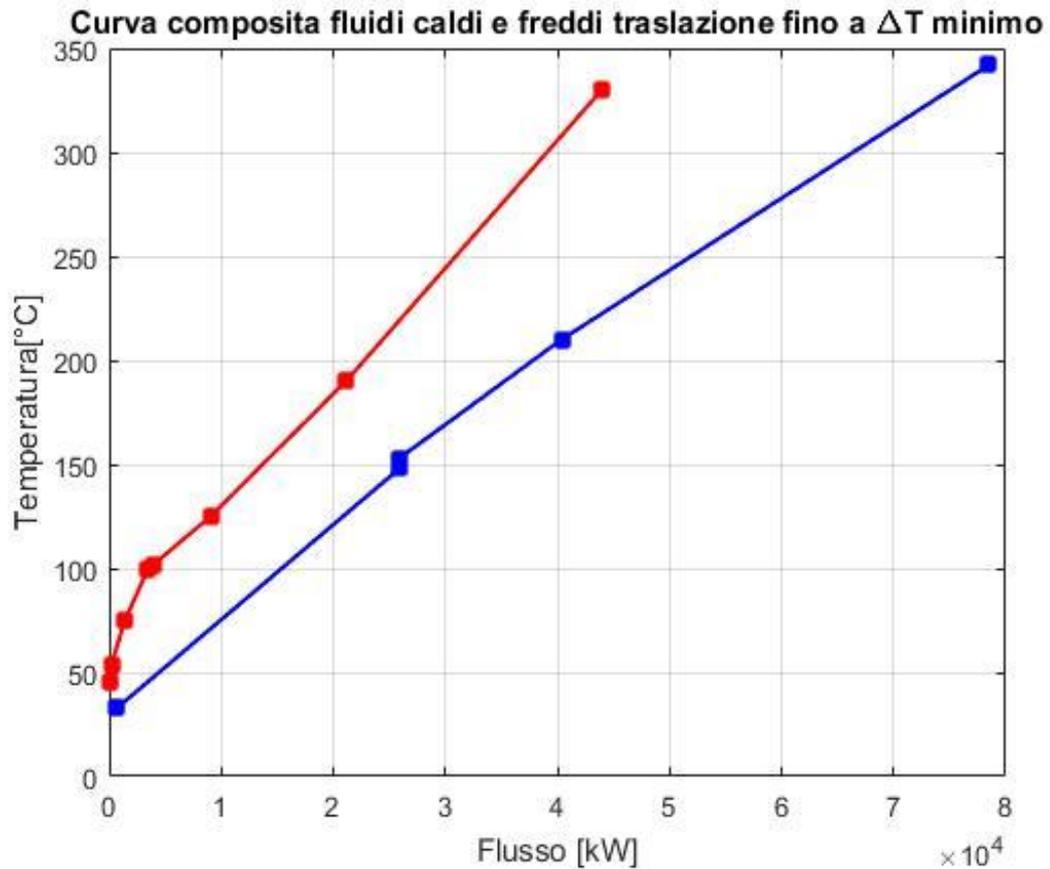


Figura 106 - Curve composite fluidi freddi e fluidi caldi

Tutti gli scambiatori vengono posizionati sopra al pinch point, mentre sotto al pinch point non sono effettuabili collegamenti in quanto sono presenti esclusivamente fluidi caldi. Questo è abbastanza prevedibile essendo la temperatura di pinch point relativamente bassa rispetto alle temperature messe in gioco durante il processo in analisi. Per questo motivo, praticamente tutti i fluidi verranno a trovarsi sopra al pinch point e solamente due si troveranno al di sotto.

Di seguito, viene riportata la matrice dei collegamenti ottenuta dai risultati definitivi del programma. Come detto, ogni collegamento è stato ottenuto al di sopra del pinch point, quindi, in questo caso, sono stati ottenuti sette collegamenti necessari per scaricare completamente i fluidi caldi e riscaldare totalmente alcuni fluidi freddi e parzialmente altri, dove poi verranno inseriti a seguito dei riscaldatori per portarli alla temperatura voluta per ragioni di processo.

Variables - heat_exchanger_def									
heat_exchanger_def									
10x7 double									
	1	2	3	4	5	6	7		
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	1	0	0	0	0	0	0	0
9	1	0	0	0	0	1	0	0	0
10	0	0	1	1	0	0	0	0	0

Figura 107 - Matrice dei collegamenti

Successivamente è possibile visualizzare il diagramma con i diversi accoppiamenti nell'unità di distillazione. Per riconoscere il tipo di fluido collegato si può ricorrere alla tabella precedente dove viene associato al numero di fluido il tipo di fluido. Vengono inoltre riportate le matrici contenenti il flusso di calore e di freddo forniti esternamente.

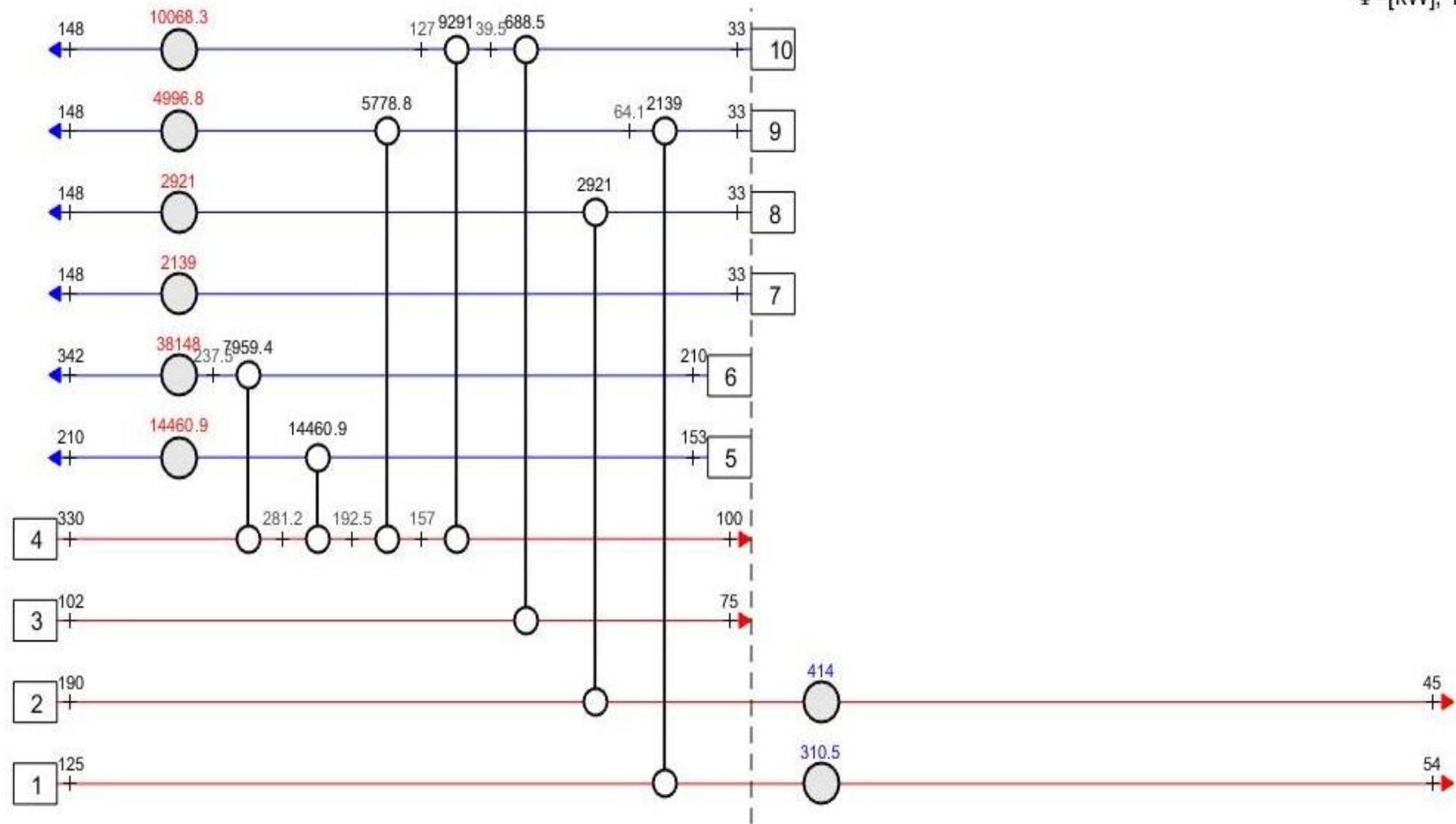
Variables - cooler_flux		
cooler_flux		
2x2 double		
	1	2
1	1	310.5000
2	2	414

Figura 108 - Matrice dei raffreddatori

Variables - heater_flux							
heater_flux							
6x6 double							
	1	2	3	4	5	6	
1	5	1.4461e+04	0	0	0	0	0
2	6	38148	0	0	0	0	0
3	7	2139	0	0	0	0	0
4	8	2921	0	0	0	0	0
5	9	4.9968e+03	0	0	0	0	0
6	10	1.0068e+04	0	0	0	0	0

Figura 109 - Matrice dei riscaldatori

$\Phi=[\text{kW}]; T=[^{\circ}\text{C}]$



Capitolo 4

Conclusioni

In molti impianti risulta essenziale un sistema per il recupero termico in modo da evitare l'inutile spreco di risorse energetiche. Si può valutare la convenienza dell'installazione di un sistema per il recupero termico, dal punto di vista termodinamico, confrontando i fabbisogni massimi, in termini di calore e freddo di cui necessita l'impianto, con quelli minimi da fornire esternamente. Se la differenza risulta consistente, allora si potrà pensare di progettare una rete di scambiatori di calore che provveda al recupero del calore dai fluidi caldi presenti nell'impianto per cederlo a quelli freddi.

In particolare, il recupero termico in impianti di processo attraverso reti di scambiatori di calore può risultare determinante ai fini ambientali ed economici.

Il modello creato ha il compito di provvedere al tracciamento della rete di scambiatori di calore per impianti di processo in cui si vuole effettuare il recupero termico. La prima parte del programma creato in MatLab permetterà di trovare il fabbisogno minimo di "caldo" e di "freddo" di cui necessita l'impianto e che dovrà essere fornito tramite risorse energetiche esterne, come ad esempio potrebbero essere il gas naturale nel caso della produzione di calore e l'energia elettrica nel caso della produzione di freddo. Effettuato questo passaggio, il programma provvederà ad una divisione dell'impianto in sopra pinch point e sotto pinch point in modo tale da effettuare il tracciamento della migliore rete di scambiatori di calore a fabbisogno minimo. Per migliore configurazione si intende quella che permetterà il raggiungimento degli obiettivi prefissati con il minor numero di scambiatori. Avendo trovato la configurazione ottimale, il programma procederà con il fornire un diagramma in cui l'utente potrà visualizzare i vari collegamenti tra i fluidi che comprenderà anche riscaldatori e raffreddatori da inserire nei fluidi in cui vi sia la necessità.

Il programma così creato avrà la capacità di trovare una configurazione della rete di scambiatori per un ampio range di casi analizzati. Esso comprenderà al suo interno casi anche molto differenti, come riportato negli esempi del capitolo precedente e sarà possibile valutare una configurazione anche nel caso in cui si rendesse necessaria la divisione di uno o più flussi, a patto che l'utente inserisca direttamente nel programma i fluidi avendo effettuato egli stesso la divisione. È bene dire che l'utente potrebbe riscontrare alcune problematiche nel caso in cui i fluidi abbiano delle capacità termiche con molti numeri decimali. In questo caso per un fattore legato alle tolleranze è possibile che non venga fornita una configurazione corretta.

Per quanto riguarda un possibile sviluppo futuro del programma, potrebbero essere considerate alcune migliorie per automatizzarlo ulteriormente, ad esempio inserendo una funzione che permetta la divisione automatica dei flussi nel modo più appropriato e visualizzando sul grafico questa divisione.

Il modello finale costituisce un punto d'arrivo per la risoluzione dei casi citati, ma potrebbe essere utilizzato, per sviluppi futuri, come la base da cui partire per la valutazione di altri obiettivi. Infatti, la rete di scambiatori a fabbisogno minimo costituisce il punto di partenza per il tracciamento di molte altre reti con diversa funzione obiettivo, come potrebbe essere la minimizzazione del numero di scambiatori di calore, qualora fosse possibile. Per il progettista potrebbe essere necessaria la comparazione di più reti per verificare quale sia la migliore considerando punti di vista differenti come ad esempio quello economico. Quindi, effettuando altri passaggi, sempre attraverso la pinch analysis, partendo dal

programma creato, si potrà andare a trovare una nuova rete con un numero minore di scambiatori ma con la necessità di provvedere ad un fabbisogno in termini di caldo e di freddo dall'esterno che non sarà più uguale a quello minimo.

Bibliografia

1. **Vittorio Verda, Elisa Guelpa.** *Metodi termodinamici per l'uso efficiente delle risorse energetiche.* Società editrice Esculapio, 2013.
2. **Vittorio Verda, Elisa Guelpa.** *Esercitazioni del corso Complementi di Energetica, Anno Accademico 2017-2018.*
3. **Adnan A. Ateeq, Farah A. Al-Salam, Mohammad A. Taher,** *Energy saving in atmospheric distillation unit by retrofit design of heat exchanger networks of Al-Basra Refinery, International Journal of Engineering research & technology, 2017*