

***Università degli studi di Firenze***

***Facoltà di Ingegneria***

Corso di Laurea Magistrale in

**Ingegneria per la Tutela dell’Ambiente e del Territorio**

Anno Accademico 2010/2011

**Corso di Termodinamica e Termoeconomia**

**per gli Impianti di Potenza**

**Procedura di calcolo che implementa**

**il metodo della Pinch Analysis su Excel**

**Docente:** Giampaolo Manfrida

**Studente:** Luigi Russo

Pinch Analysis

La Pinch Analysis é un metodo di ottimizzazione di reti complesse di scambiatori in situazioni nelle quali si presentano carichi termici e carichi di raffreddamento a diversi livelli di temperatura. L’obiettivo della Pinch Analysis é quello di minimizzare le interazioni con l’esterno: il calore fornito al sistema ad alta temperatura e il calore sottratto al sistema La Pinch Analysis si introduce come un metodo grafico, basato sull’impiego dei diagrammi Temperatura (ordinata) – Entalpia e per la sua applicazione nella forma semplificata richiede alcune assunzioni:

1. si adotta una configurazione in controcorrente per gli scambiatori di calore;
2. l’entalpia dipende unicamente dalla temperatura;
3. si trascurano le dispersioni di calore all’esterno;
4. si trascurano le variazioni di energia cinetica e potenziale;
5. il calore specifico di ogni corrente si mantiene costante.

Pinch Analysis in Excel

In questo elaborato è descritta una procedura, con la quale eseguire la Pinch Analysis di un set di flussi caldi e freddi di un dato processo tecnologico, implementata seguendo l’approccio teorico del metodo grafico. La procedura, sviluppata con il programma Excel, è in grado di gestire un massimo 12 correnti, 6 calde e 6 fredde ed è organizzata su tre fogli di lavoro: p\_a\_IN\_OUT , p\_a\_DATI e p\_a\_PROCEDURA.

p\_a\_DATI

Questo foglio presenta una “libreria” di gruppi di dati (EX-i) nelle cui celle sono deniti i seguenti parametri:

* cp : calore specifico
* m : portata massica
* T\_i : temperatura in ingresso
* T\_u : temperatura in uscita

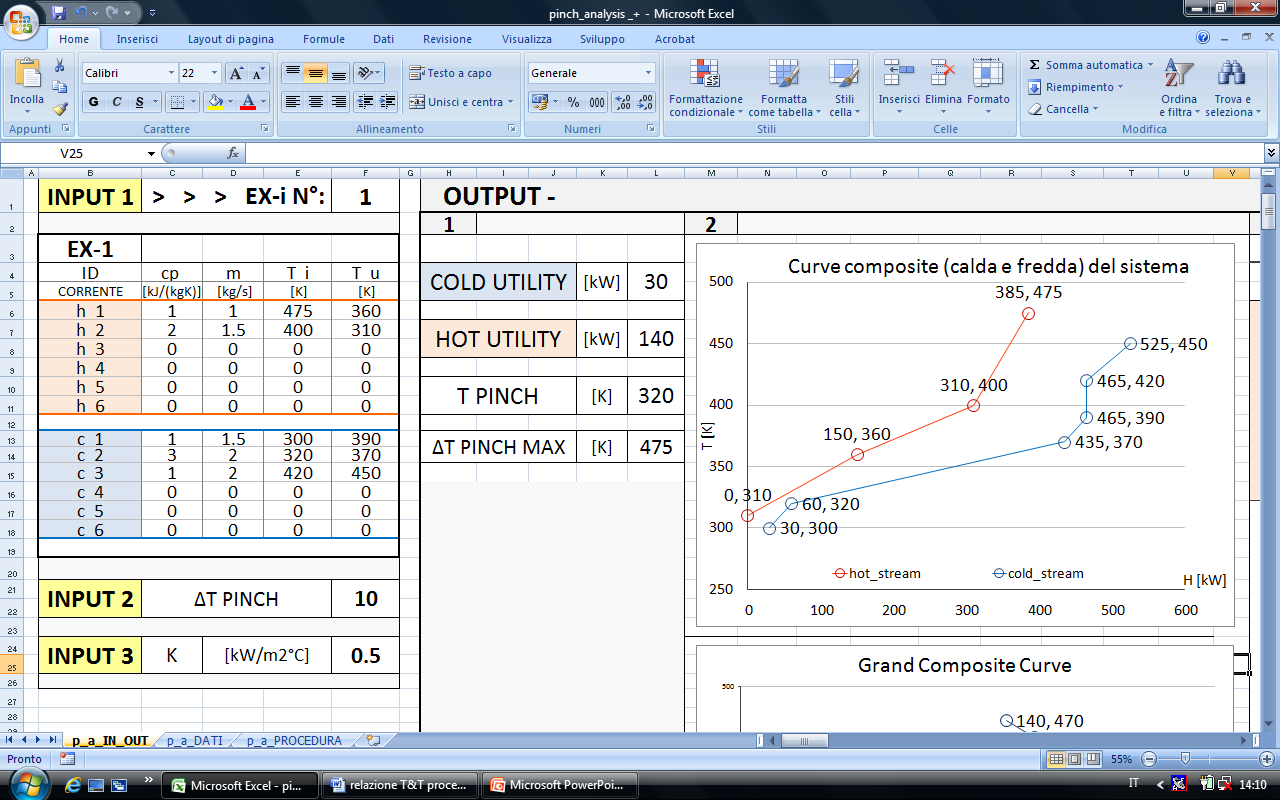
da poter utilizzare nella procedura proposta semplicemente inserendo nell’INPUT 1 del foglio p\_a\_IN\_OUT I gruppi di dati proposti sono stati ripresi da esempi presenti nelle dispense del corso Termodinamica e Termoeconomia per gli Impianti di Potenza e dai compiti d’esame dello stesso corso.

Nella maschera che individua le celle relative

p\_a\_IN\_OUT

In questo foglio sono presenti i riquadri:

* INPUT in cui si inserisce
  + il numero del set di dati (EX-i:1,2,3,…) da voler valutare. Le celle della maschera presente nella sezione input verranno aggiornate con i valori dei dati richiamati.
  + La differenzadi temperatura al pinch point
  + Il valore del coefficiente globale d scambio termico



*Tabella\_1 Set di dati in ingresso al foglio di calcolo.*

* OUTPUT - in cui si visualizza una lista sintetica dei risultati sia numerici che grafici più rappresentativi ottenuti implementando la procedura proposta utilizzando i dati della sezione INPUT. In particolare gli output sono:

1 - HOT UTILITY : calore fornito al sistema ad alta temperatura ;

- COLD UTILITY : calore sottratto al sistema ;

- T PINCH : temperatura al pinch della curva composita delle correnti fredde ;

- ∆T PINCH MAX : massima differenza di temperatura raggiungibile dalle due curve composite in condizioni di accoppiamento;

- COPT: Capacità termiche raccomandabili per le utenze esterne (utenze Qhu, Qcu);

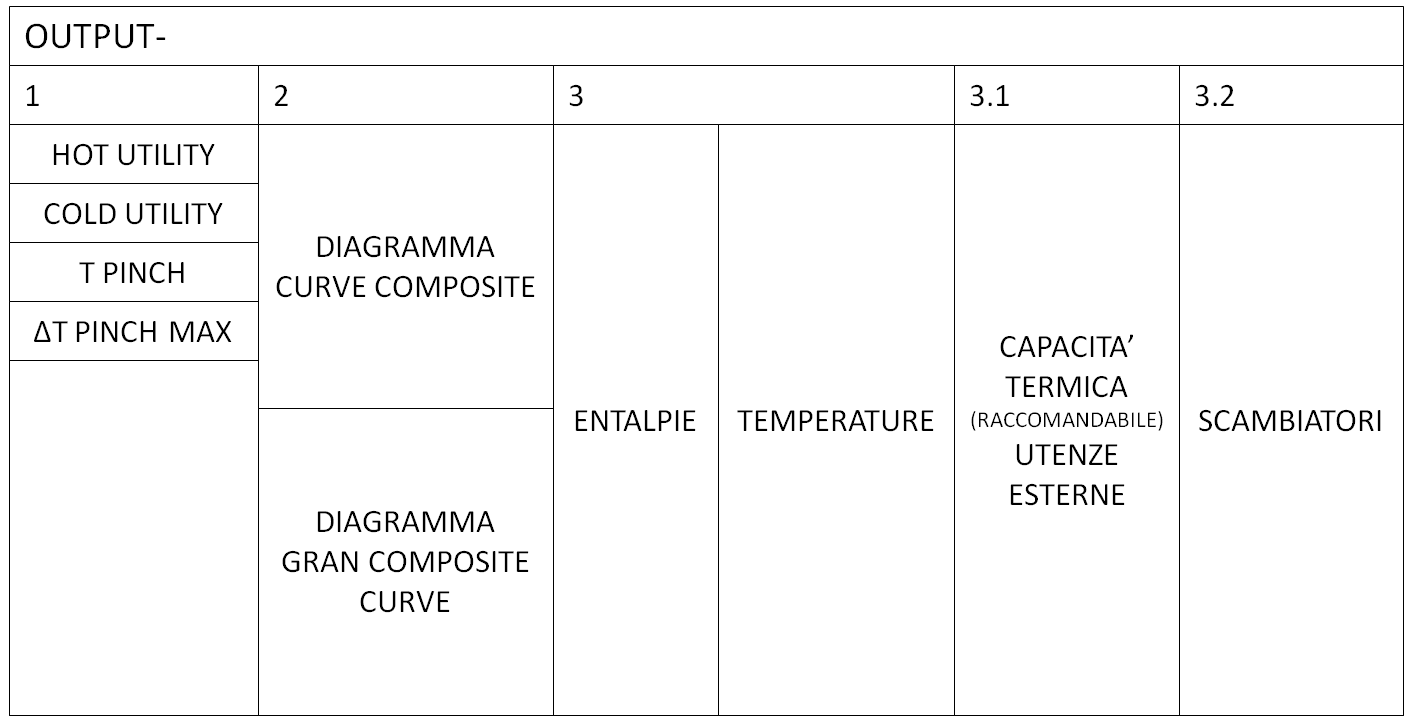
2 - Diagramma Temperatura-Entalpia delle curve composite del sistema;

- Grand Composite Curve;

3 - schema dei flussi termici e degli intervalli di temperatura;

3.1 - schema delle capacità termiche raccomandabili per le utenze esterne;

3.2 - schema degli scambiatori rigenerativi utilizzabili nella zona di scambio termico.



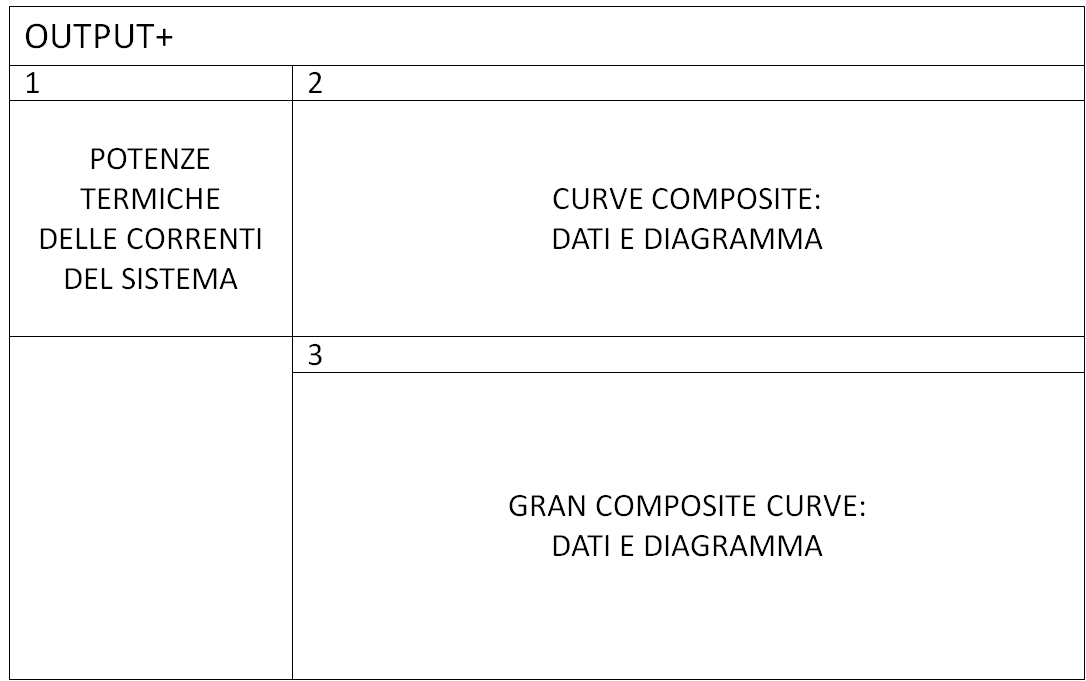
*Schema\_1 OUTPUT-: Quadro sintetico di un gruppo di risultati rappresentativi ottenuti dalla procedura.*

* OUTPUT + in cui vengono rappresentati in maniera più dettagliata alcuni dei risultati forniti dalla procedura, come le tabelle dei valori numerici dei parametri rappresentati sui diagrammi. In particolare quelli riportati qui di seguito:

1. Flussi termici relativi alle correnti termiche di input;

2. Curve composite del sistema e valori dei parametri caratteristici ricavati con la procedura numerica;

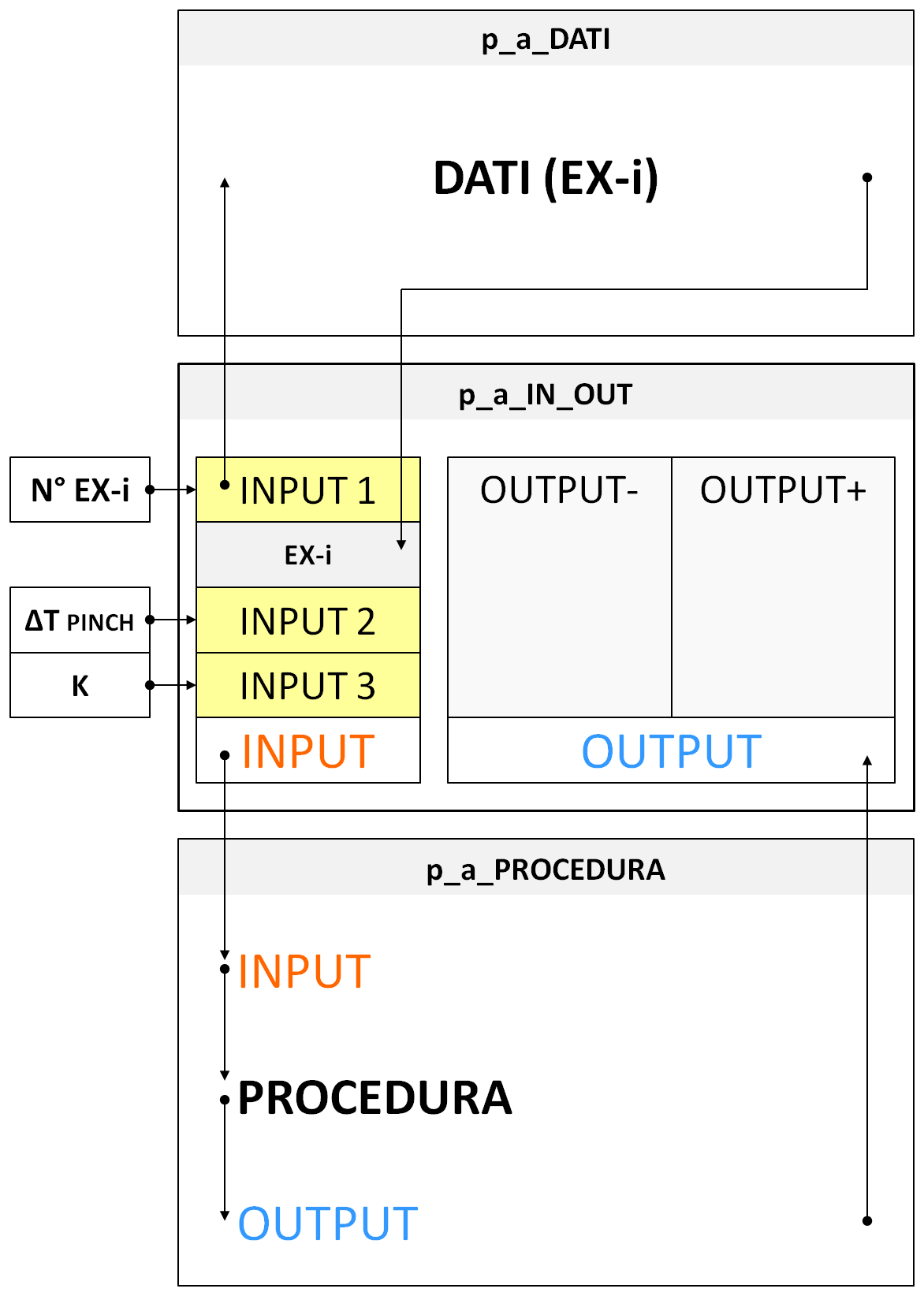
3. Gran Composite Curve e valori delle variabili di riferimento.



*Schema\_2 OUTPUT+: Quadro sintetico dei parametri calcolati per la realizzazione dei diagrammi della Pinch Analysis.*

p\_a\_PROCEDURA

In questo foglio è implementata la procedura di calcolo che utilizza come dati in ingresso quelli inseriti nelle celle di INPUT del foglio p\_a\_IN\_OUT e allo stesso foglio restituisce i valori dei parametri incogniti organicamente rappresentati nella sezione OUTPUT del foglio di lavoro.



*Schema\_3 Diagramma del percorso procedurale, dagli input agli output, presente nel foglio di calcolo.*

La procedura percorre gli step descritti qui di seguito.

STEP\_1 – Flussi termici del sistema

Vengono calcolati per ogni corrente i seguenti parametri:

* capacità termica ;
* entalpia in ingresso H\_in, in uscita H\_out e i relativi flussi termici ∆H;

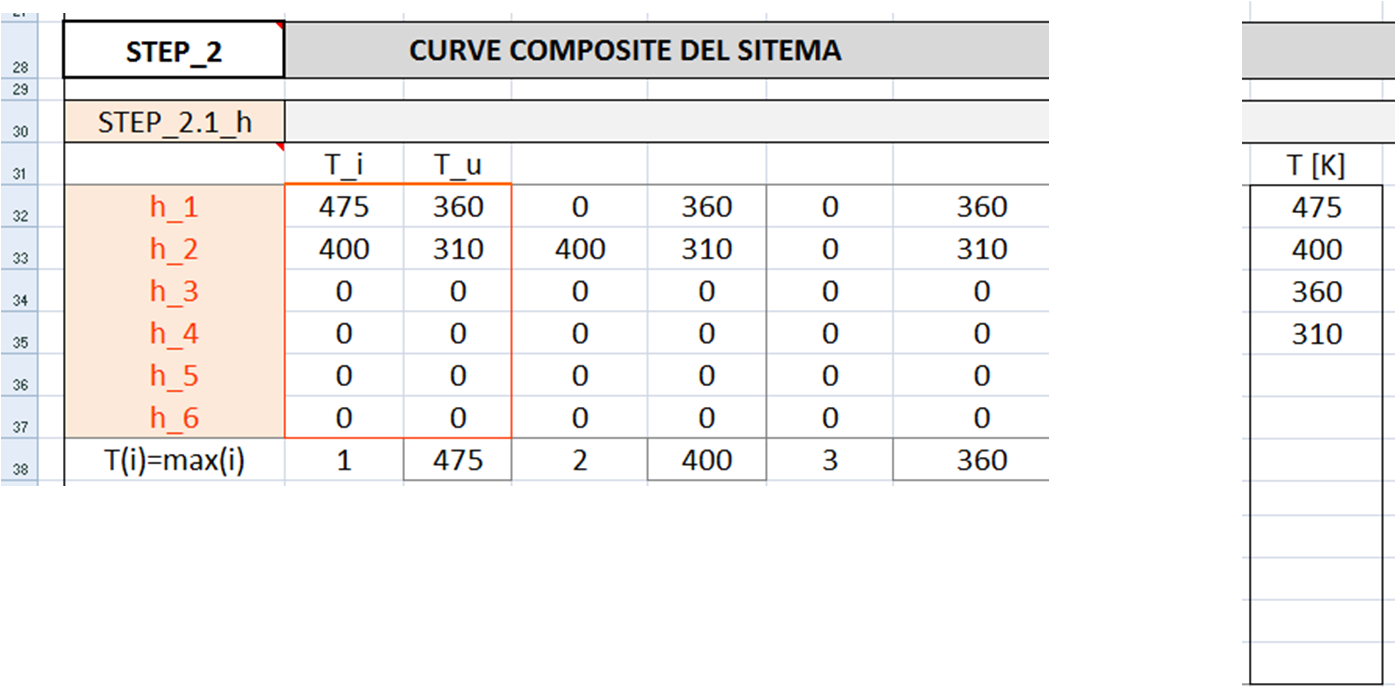
Quindi vengono rappresentate graficamente con dei segmenti temperatura-entalpia le correnti, queste tutte traslate di un opportuno ∆H.

STEP\_2 – Curve composite

In questo punto si definisce il diagramma relativo alle due curve composite del sistema procedendo in maniera sequenziale:

* si organizzano i valori di temperatura delle rispettive correnti calde e fredde in ordine decrescente. Questa operazione viene effettuata secondo i seguenti passi:
* viene individuato il valore numerico max(1) che rappresenta il massimo del gruppo di dati iniziale (dati1) formato da n valori;
* il valore max1 viene collocato nella prima riga del vettore delle temperature ordinate che si vuole costruire ed escluso dal successivo gruppo di dati (dati2);
* il gruppo dati2 è composto da n-1 valori diversi da zero, tutti quelli di dati1 meno max1;
* viene quindi individuato il valore massimo max(2) del gruppo di dati dati2;
* il valore max2 viene collocato nella seconda riga del vettore delle temperature ordinate ed escluso dal successivo gruppo di dati (dati3);

Iterando questo procedimento n volte (con n=1,…,12) si organizzano in ordine decrescente all’interno di un vettore tutti i valori iniziali delle temperature.



max(2)

max(1)

max(1)

n=1

max(2)

n=2

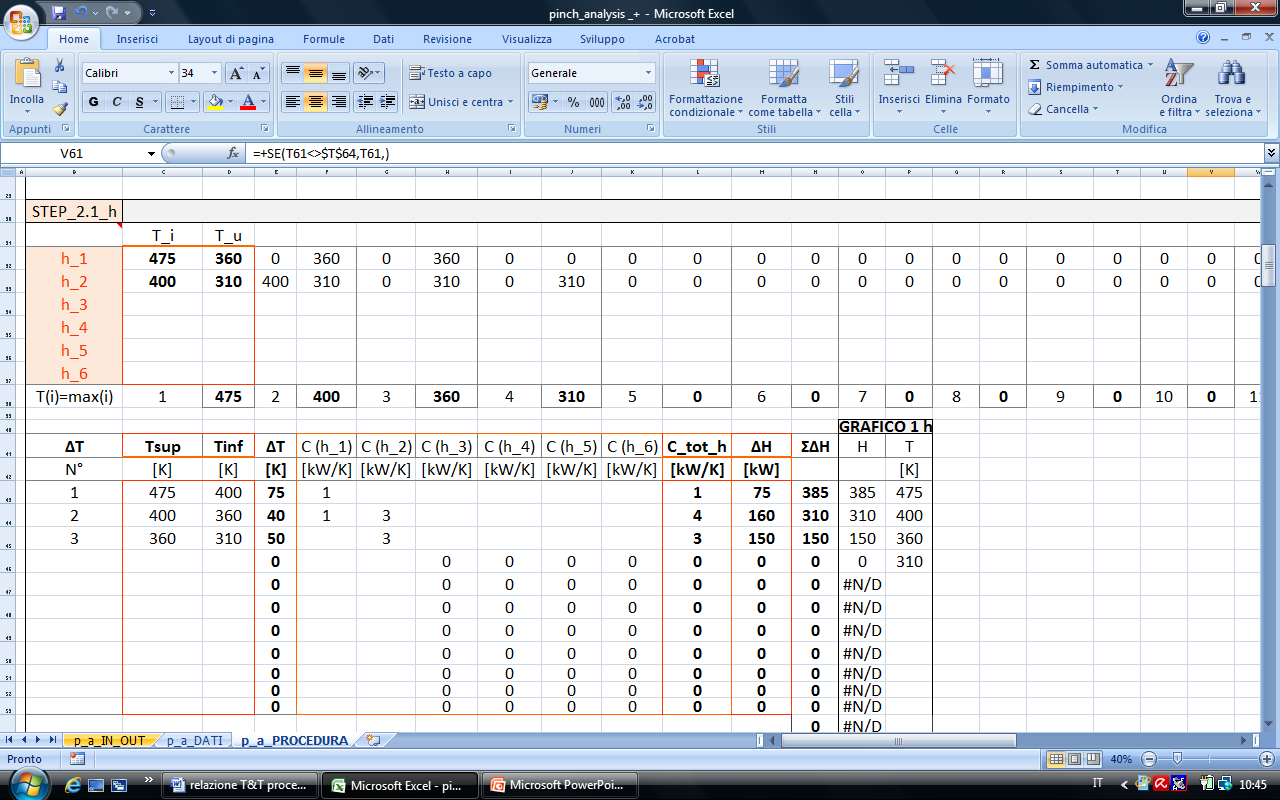
n=3

max(3)

max(3)

*Schema\_4 Organizzazione in ordine decrescenti dei dati .*

* rispetto ad ogni intervallo di temperatura individuato:
  + viene valutata la presenza o meno di ognuna delle i-esime correnti calde (o fredde) e vengono riportate, e tra loro sommate, le capacità termiche associate alle correnti presenti nello specifico intervallo di temperatura;
  + viene calcolata la quantità e i valori cumulativi partendo dall’ultimo intervallo.
  + In fine viene realizzata la curva composita delle correnti calde associando ad ogni valore il valore di temperatura corrispondente, in modo da poter visualizzare sul grafico gli intervalli ∆H-T.



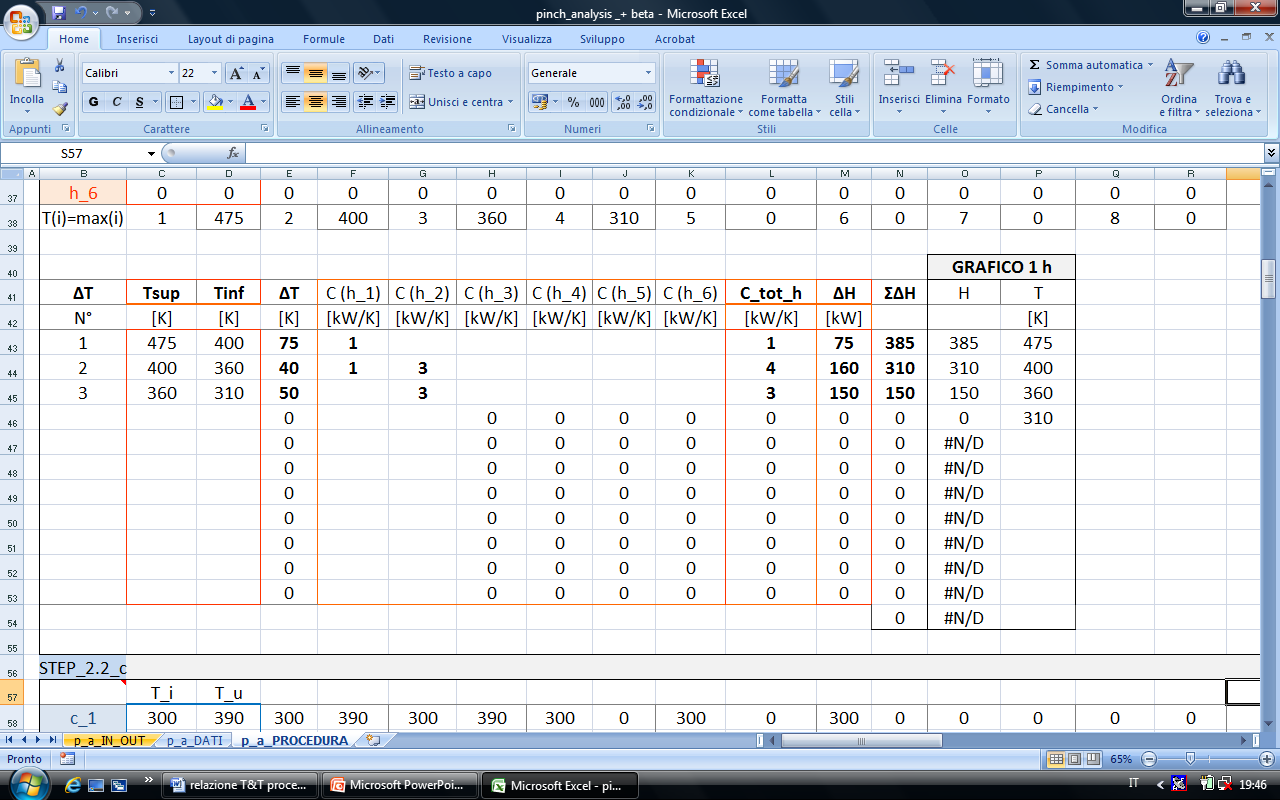
**N=1**

**i:1,…,6**

**SE Tsup1<=T\_i(i) E Tinf1>=T\_u(i)**

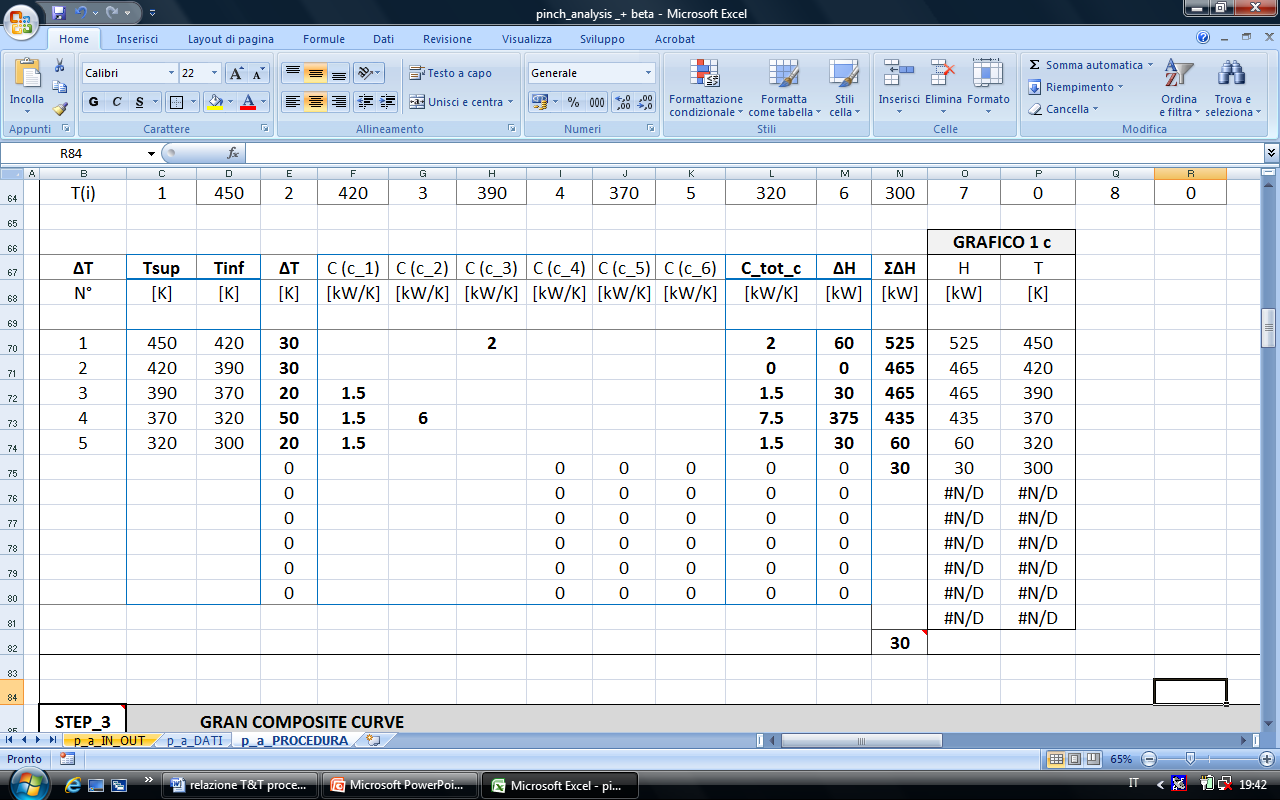
**SCRIVI C(i)**

*Tabella\_2 Costruzione numerica dei valori delle capacità termiche totali delle correnti nell’intervallo di temperatura*



*Tabella\_3 Costruzione numerica dei dati rappresentativi della curva composita delle correnti calde.*

La curva composita delle correnti fredde viene realizzata seguendo gli stessi passaggi descritti in precedenza e traslata rispetto all’asse delle ascisse del valore della Cold Utility. Quest’ultima viene calcolata con la procedura illustrata successivamente.



Qcu

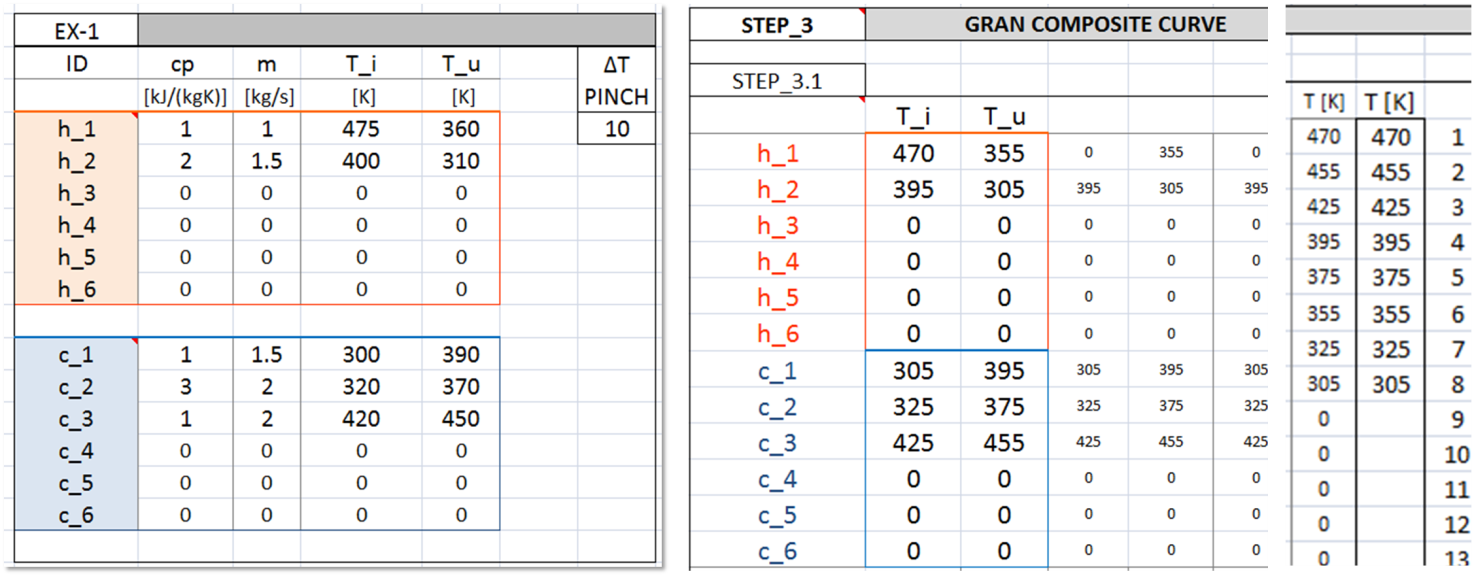
*Tabella\_4 Costruzione numerica dei dati rappresentativi della curva composita delle correnti fredde.*

*Grafico\_1 Curve composite del sistema*

STEP\_3 Hot Utility, Cold Utility e Grand Composite Curve

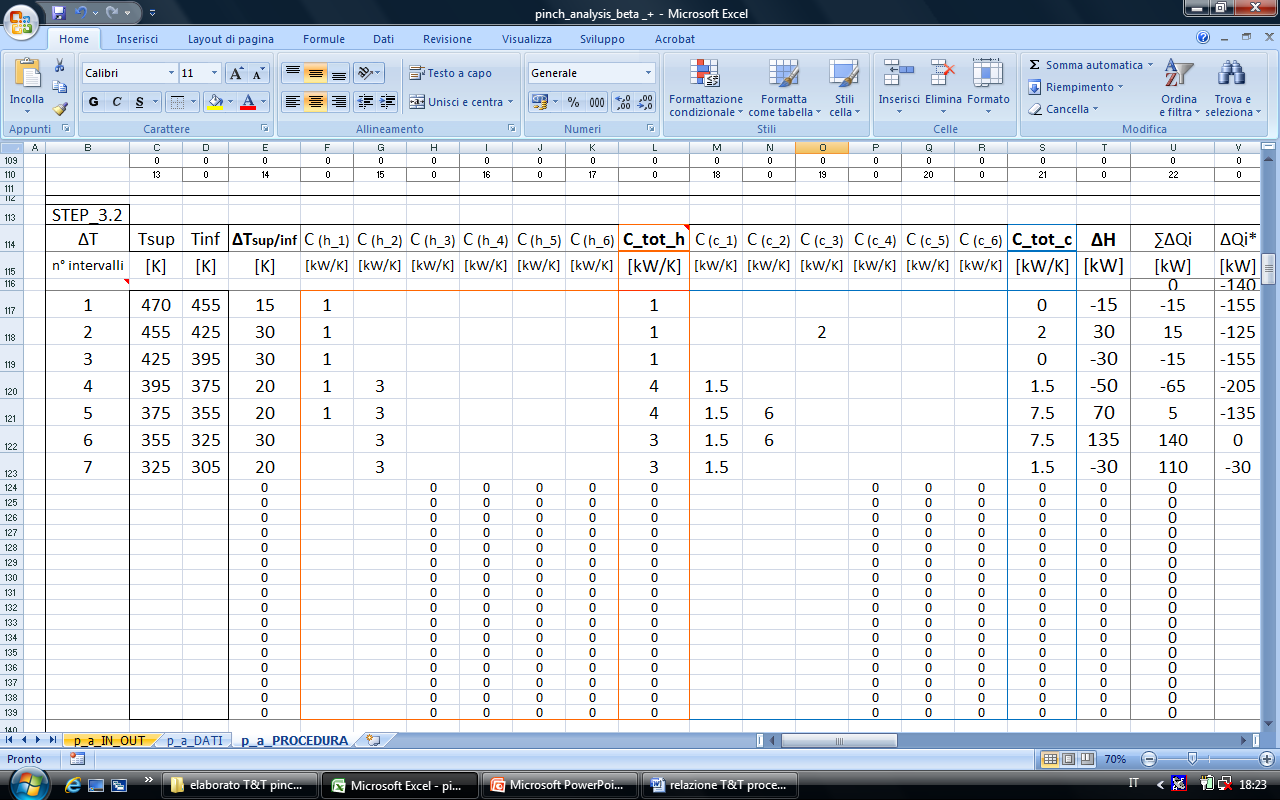
Per il calcolo del calore scambiato dal sistema con l’esterno si è utilizzata la seguente procedura numerica:

* Si riducono tutte le temperature dei flussi caldi di e si aumentano tutte le temperature dei flussi freddi della stessa quantità;
* Vengono organizzati i valori di temperatura modificati delle correnti calde e fredde in ordine decrescente in modo da identificare gli intervalli da considerare.



*Schema\_5 Valori delle temperature in ingresso, temperature modificate e organizzazione decrescente dei loro valori*

* rispetto ad ogni intervallo di temperatura :
  + viene valutata la presenza o meno di ognuna delle correnti calde (o fredde) e vengono riportate, e tra loro sommate, le capacità termiche di quelle presenti;
  + viene calcolata la quantità per cui un valore indica che esiste un eccesso di energia disponibile da parte delle correnti calde nello specifico intervallo e un valore indica che esiste un difetto di energia disponibile da parte delle correnti calde;



*Tabella\_5 Associazione tra le correnti presenti nel sistema in ingresso e le rispettive capacità termiche e costruzione numerica del valore degli scambi termici.*

* + successivamente viene calcolato il valore cumulativo dello scambio termico al termine dell’intervallo i-esimo con la formula:

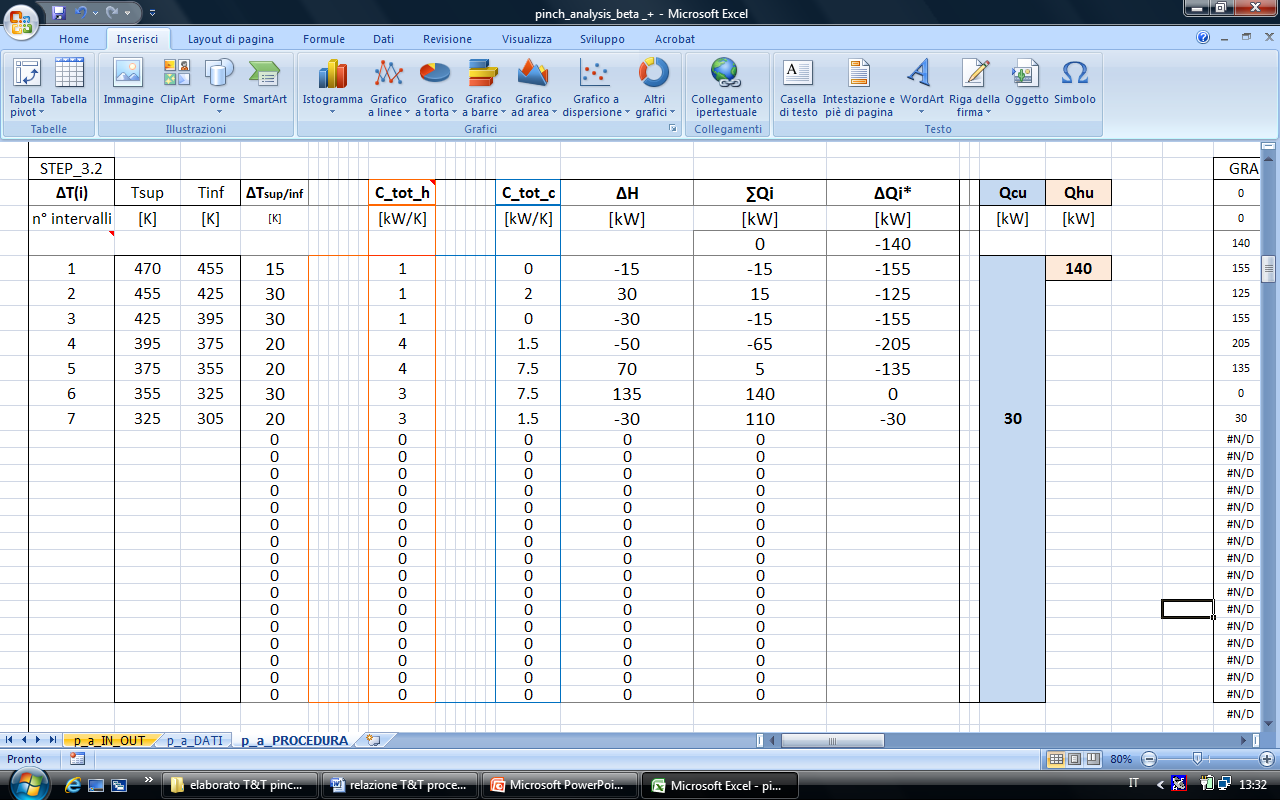
Il valore positivo più elevato (140 nell’esempio) indica il valore del minimo carico termico per l’utenza calda;

* + si calcola un valore corretto dello scambio termico cumulativo con la formula:

Il valore inferiore (Tinf) dell’intervallo di temperatura per il quale =0 viene chiamato temperatura media del pinch (325 K nel caso presente)

Le temperature reali delle correnti calde e fredde sono ottenute rispettivamente aggiungendo o sottraendo .

L’ultimo valore del vettore identifica la .

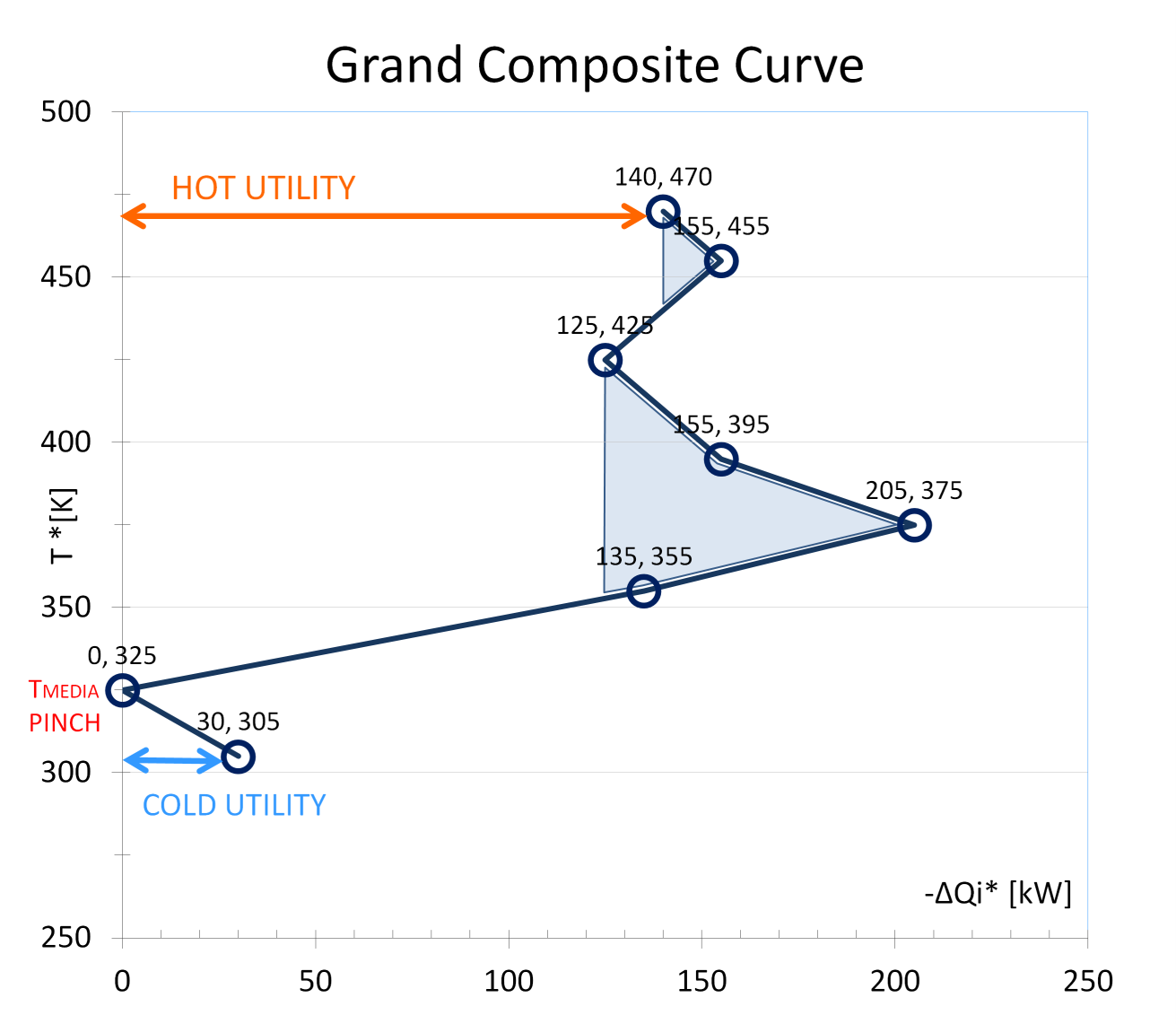


**MAX**

*Schema\_6 Calcolo della Qhu e della Qcu*

* In fine viene realizzata la Gran Composite Curve (GCC) in modo da poter dare una rappresentazione grafica ai risultati ottenuti nella tabella precedente.

La GCC viene costruita riportando in ascissa i valori di ed in ordinata le temperature (in tabella le Tsup/Tinf, cioè, le T reali sfalsate di ) corrispondenti.

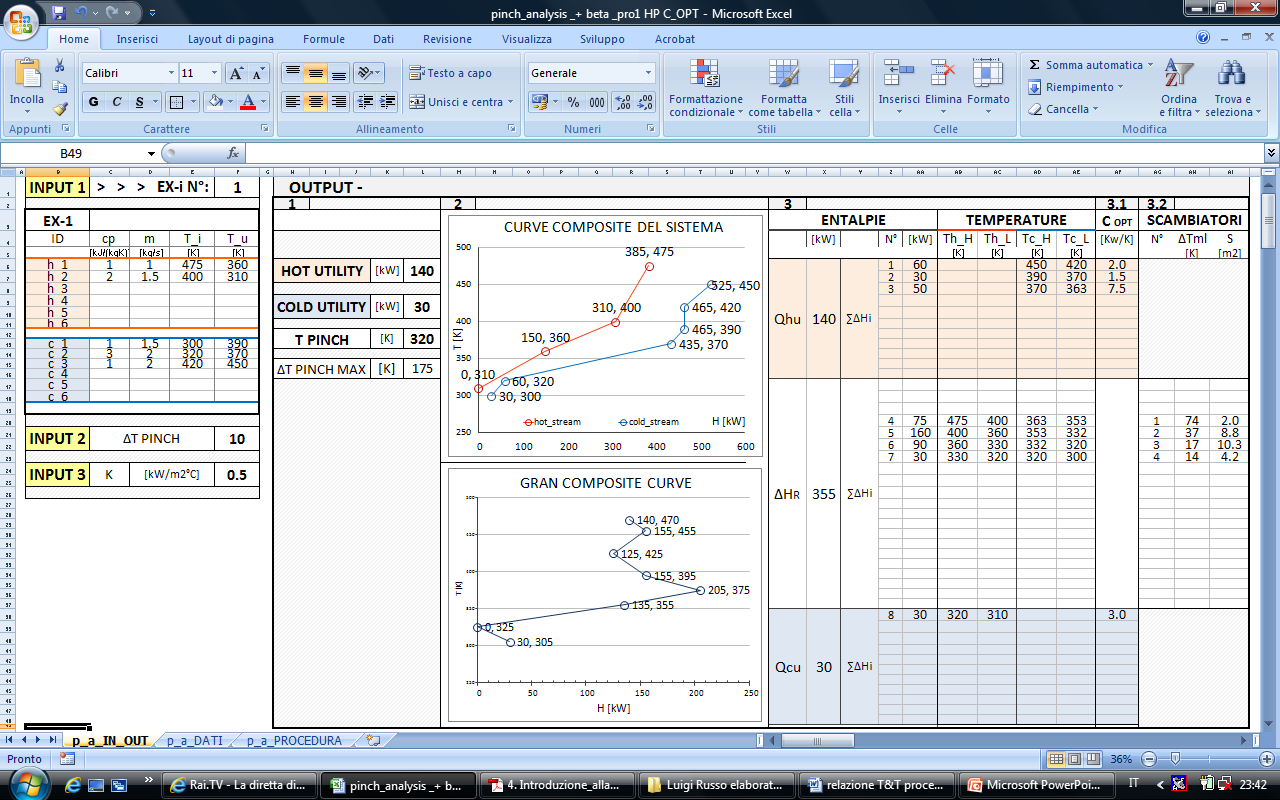


*Grafico\_2 Gran Composite Curve*

La curva così costruita rappresenta sull’ascissa l’eccesso o il difetto di energia su ciascun intervallo di temperatura di riferimento.

STEP: 4 e 5

In conclusione al presente elaborato si riportano le valutazioni fatte negli step 4 e 5 del foglio p\_a\_PROCEDURE nel quale si è cercato di implementare una procedura che calcolasse un set di dati caratteristici e che li restituisse in forma tabellare, cioè, organizzati in maniera schematica e grafica per una loro facile consultazione.



*Tabella\_6 Tabella contenente le informazioni relative agli intervalli ∆H presenti rappresentati in funzione della Qhu, della Qcu e della zona rigenerativa del sistema.*

Il procedimento di calcolo fornisce:

* la , la e lo scambio termico rigenerativo totale
* Il numero di intervalli complessivi presenti nel sistema considerando le curve composite sovrapposte;
* Il valore di ogni intervallo di scambio termico ;
* gli intervalli di temperatura caratteristici del sistema;
* COPT : valore delle capacità termiche raccomandabili per le utenze esterne;
* un dimensionamento di primo tentativo della superficie (m2) degli scambiatori utilizzabili nella zona di scambio termico interna al sistema secondo la formula:

con:

= potenza termica scambiata nell’intervallo di temperatura di riferimento [kW];

= coefficiente globale di scambio termico [kW/(m2°C)] (input della procedura);

= ∆T media logaritmica = [K].

**Qcu**

**Qhu**

**∆HR**

**∆H\_i**

**1**

**2**

**3**

**4**

**5**

**6**

**7**

**8**

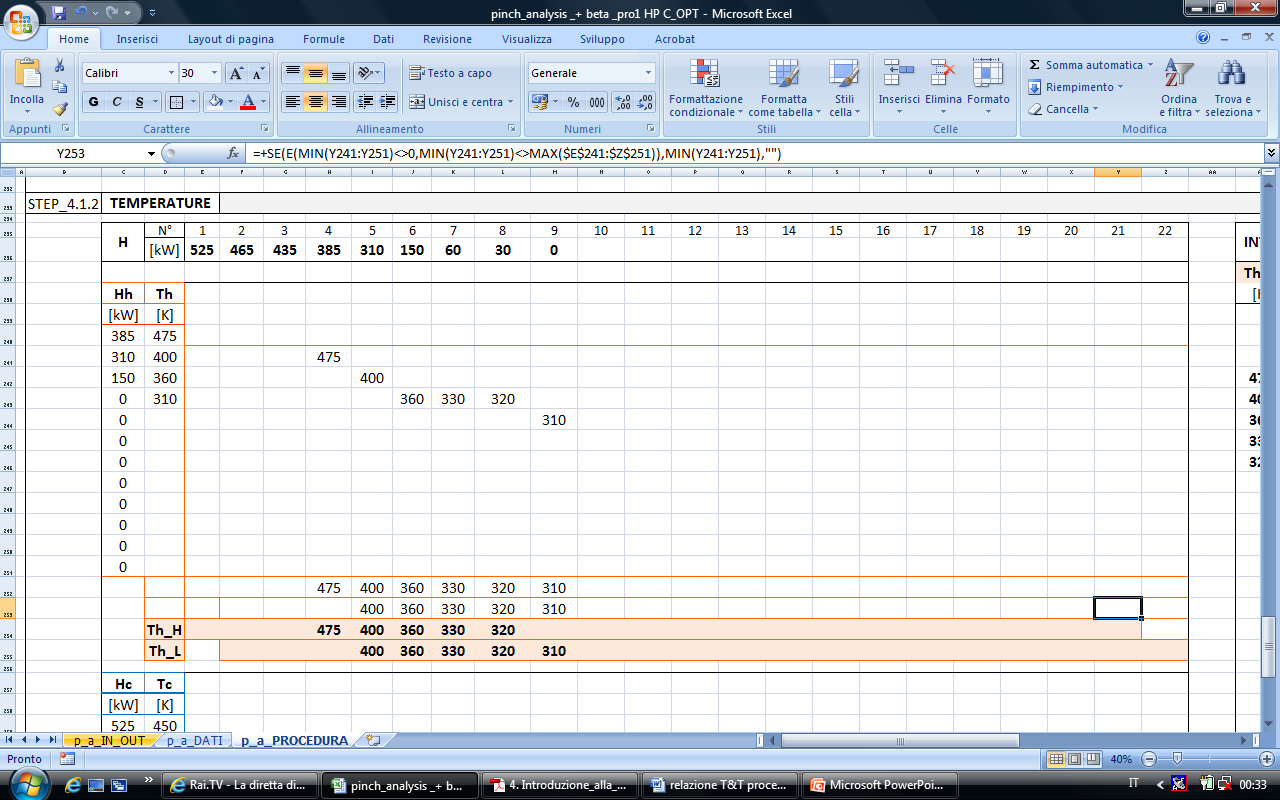
*Grafico\_3 Intervalli ∆H generati dalla sovrapposizione delle due curve composite e valore del carico termico Qhu, di raffreddamento Qcu e dello scambio termico nella zona rigenerativa del sistema.*

Al fine di definire gli intervalli di temperatura caratteristici del sistema relativi alle due curve composite, viene utilizzato un metodo, per il calcolo dei singoli valori di temperature, che poggia sull’idea che tali valori incogniti possono essere considerati come coordinate y dei punti appartenenti ai segmenti di rette che compongono le due curve composite.

Nel grafico qui di seguito si da una semplificata ricostruzione dell’approccio teorico seguito.

**X=**

**X>X**



**=**

**X-X(N)**

**X(N+1)-X(N)**

**Y-Y(N)**

**Y(N+1)-Y(N)**

EQUAZIONE RETTA: **R(N - N+1)**

**Y1**

**R(3-4)**

**Y2**

**Y3**

**Y4**

**X3>X>X4**

**X,Y** COPPIE DI VALORI H – T DELLE CURVA COMPOSITE DELLE CORRENTI CALDE

**X**: VALORI H RELATIVI ALLE DUE CURVE COMPOSITE

**1**

**2**

**3**

**4**

**Y**

**=X4**

**=X3**

**=X2**

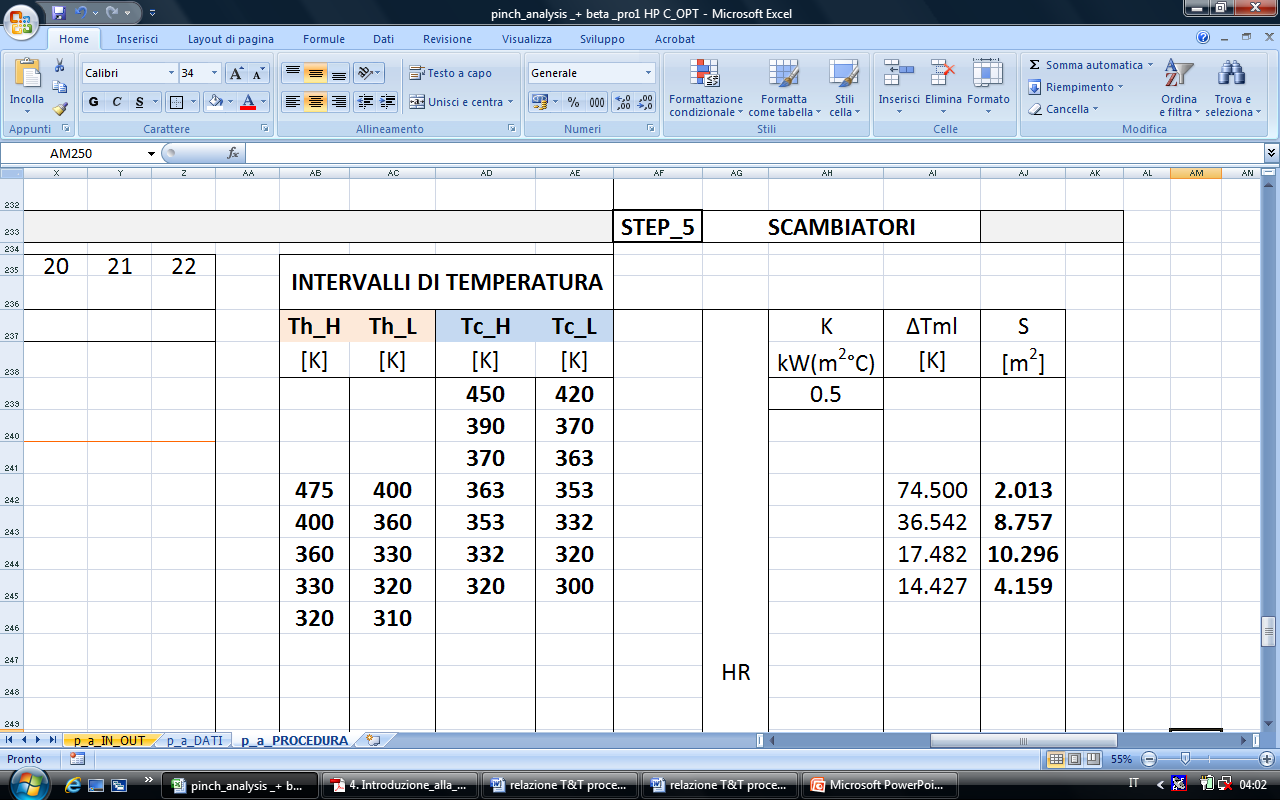
**=X1**

**Y**

**X**

**N:**

*Schema\_7 Rappresentazione semplificata di una parte dei passaggi più significativi del metodo utilizzato per calcolare gli intervalli di temperatura associati agli intervalli degli scambi termici complessivi delle due curve composite.*



*Tabella\_7 Intervalli di temperatura ottenuti attraverso la procedura dello step 4.1.2 del foglio di calcolo*

Dai risultati prodotti nel foglio procedura agli STEP 4 e 5 e riportati in maniera organica nella sezione OUTPUT- del foglio p\_a\_IN\_OUT, si possono leggere anche le informazioni relative alle possibili utenze esterne interessate dagli scambi termicI Qhu e Qcu.

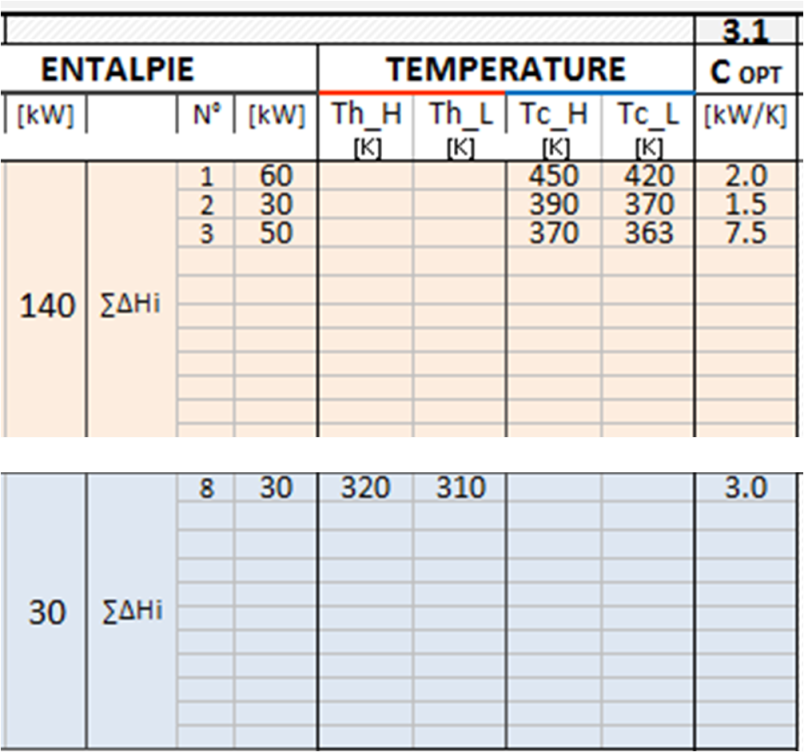
In particolare rispetto ai dati dell’esempio utilizzato in questo elaborato risulta che:

* la Qhu, pari a 140 kW, serve a riscaldare le correnti fredde in specifici intervalli di temperatura:
  + 60 kW tra i 450 e i 420 K;
  + 30 kW tra 390 e 370 K;
  + 50 kW tra 370 3 363 K.

Al riguarda come rappresentato in tabella è raccomandabile utilizzare dei sistemi esterni che presentino capacità termiche [kW/K];

* allo scambio termico Qcu pari a 30 kW, corrisponde una escursione di temperatura pari a 10°C quindi è raccomandabile utilizzare un flusso esterno con capacità termica pari a

3 [kW/k].



*Tabella\_8Parametri relativi agli scambi termici del sistema con l’esterno: potenze scambiate, intervalli di temperatura relativi e capacità termiche raccomandabili per le utenze esterne.*