

## Lezione del 10 e 17-11-2025 Termodinamica Applicata

### CALCOLI ELEMENTARI DI IMPIANTO FRIGORIFERO BASE A COMPRESSIONE DI VAPORE

Un impianto frigorifero deve garantire le seguenti condizioni di lavoro nominali

- Temperatura ambiente esterno  $T_0 = 20^\circ\text{C}$
- Temperatura media della cella frigorifera:  $T_{\text{cella}} = -10^\circ\text{C}$
- flusso termico nominale all'evaporatore  $\dot{Q}_{\text{cella}} = \dot{Q}_2 = 800\text{W}$

Per il calcolo di dettaglio di un ciclo frigo base a compressione di vapore (fluido R134a):

- Sono note le prestazioni dei componenti (scambiatori di calore, compressore) in grado di garantire le seguenti condizioni operative semplificate:
  - salto di temperatura all'evaporatore (elemento refrigerante nella cella frigorifera):  $\Delta T_{\text{cella}} = 8^\circ\text{C}$
  - salto di temperatura al condensatore (elemento di scarico flusso termico all'ambiente)  $\Delta T_{\text{cond}} = 10^\circ\text{C}$
  - rendimento isoentropico del compressore:  $\eta_c = 0,65$
- In alternativa ai dati prestazionali a) per gli scambiatori di calore sono note le caratteristiche di scambio termico:
  - Scambio termico all'evaporatore (elemento refrigerante nella cella):  $(KA)_{\text{cella}} = 90\text{W/K}$
  - Scambio termico al condensatore (elemento di scambio flusso termico all'ambiente) :  $(KA)_{\text{cond}} = 120\text{W/K}$

#### PARTE 0

Stimare le prestazioni dell'impianto assumendo un valore ragionevole del rendimento di secondo principio per l'impianto stesso nelle condizioni nominali assegnate.

$$\xi = \eta_{II} = \frac{COP_F}{COP_{F,\max}} = \frac{\dot{Q}_2 / \dot{L}}{\frac{T_{\text{cella}}}{T_0 - T_{\text{cella}}}} = 0.25$$

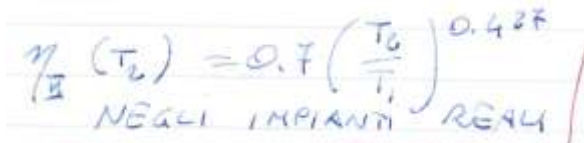
$$COP_F = \dot{Q}_2 / \dot{L} = 0.25 \square \frac{T_{\text{cella}}}{T_0 - T_{\text{cella}}} = 2.2$$

$$\dot{L} = \dot{Q}_2 / COP_F = 800\text{W} / 2.2 = 365\text{W}$$

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{L} = 1165\text{W}$$

La potenza meccanica è assorbita ed il flusso al condensatore è ceduto.

Utilizzando formula empirica suggerita da Bejan e riferita alle temperature effettive al condensatore ed all'evaporatore (rispettivamente  $30^\circ\text{C}$  e  $-18^\circ\text{C}$ ) :


$$\eta_{II}(T_2) = 0.7 \left( \frac{T_0}{T_1} \right)^{0.428}$$

NEGLI IMPIANTI REALI

si otterrebbe un rendimento di secondo principio (del solo ciclo interno) 0.65. Questo valore andrebbe poi decurtato degli effetti di scambio termico, che nella pratica corrente ha un impatto simile agli attriti interni al ciclo, portando il valore di rendimento di secondo principio atteso a circa 0.325 (si dimezza). Verificare mediante calcolo di dettaglio quale dei due risultati (0.25 contro 0.325) in questo caso è più attendibile.

## PARTE 1

Confrontare il coefficiente di prestazione massimo di un ciclo di Carnot operante in modo ideale tra gli stessi limiti di temperatura e lo stesso flusso termico all'evaporatore di un impianto frigorifero a compressione di vapore operante con **fluido refrigerante R134a** nelle **condizioni base di riferimento** (uscita dall'evaporatore vapore saturo secco, uscita dal condensatore liquido saturo) con semplice espansione adiabatica (valvola di laminazione) e compressione adiabatica.

Calcolare infine **la produzione di entropia in ogni singolo componente**  $\dot{S}_{gen,i}$  dell'impianto e la somma complessiva, cui è abbinata una perdita di lavoro utile dovuto alle irreversibilità.

$$\dot{L}_{lost} = T_0 \cdot \dot{S}_{gen,tot}$$
$$\dot{S}_{gen,tot} = \sum_i \dot{S}_{gen,i}$$

**Calcolare il COP<sub>F</sub> dell'impianto ed il rendimento di II principio della macchina.**

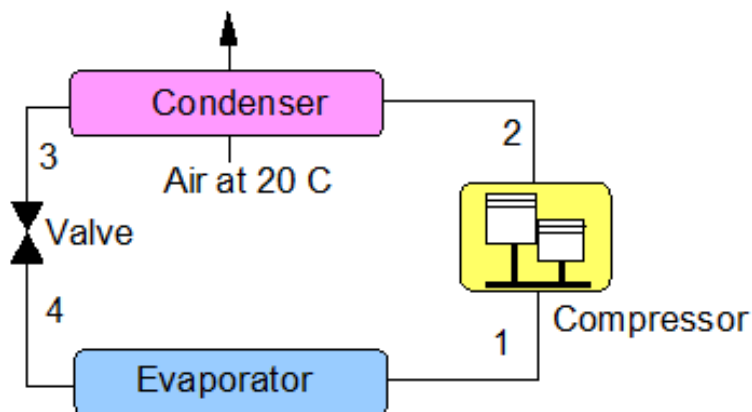
Sono note le prestazioni dei componenti (scambiatori di calore, compressore) in grado di garantire le seguenti condizioni operative semplificate:

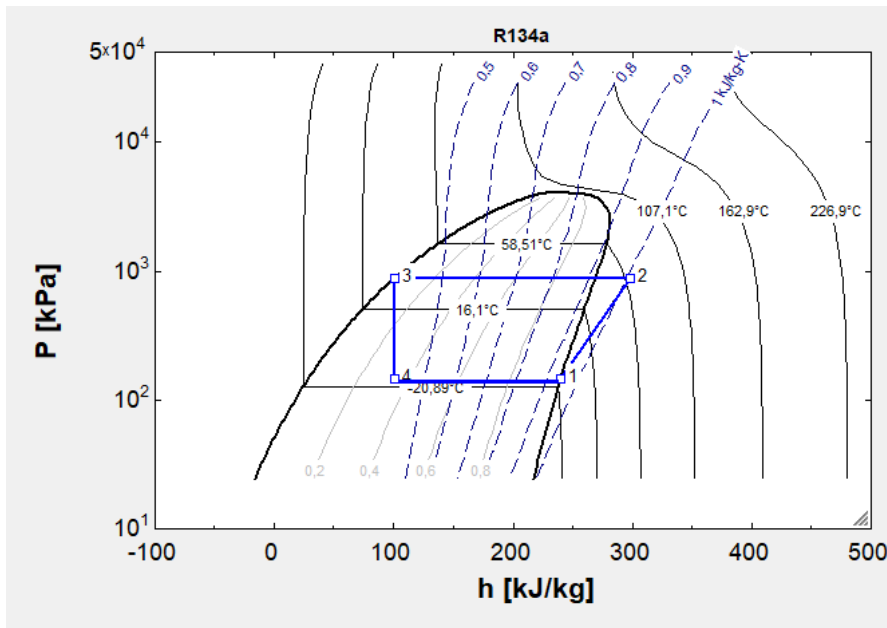
salto di temperatura all'evaporatore (elemento refrigerante nella cella frigorifera):  $\Delta T_{cella} = 8^\circ\text{C}$

salto di temperatura al condensatore (elemento di scarico flusso termico all'ambiente)  $\Delta T_{cond} = 10^\circ\text{C}$

rendimento isoentropico del compressore:  $\eta_c = 0,65$

Soluzione: Si può utilizzare il software MiniRefprop applicando le equazioni standard di conservazione dell'energia e dell'entropia, accoppiati al concetto di rendimento isoentropico. I risultati ottenuti sono in termini specifici (per unità di massa di fluido circolante nell'impianto). Vedi file excel.





## PARTE 2

### Attività di analisi di scambio termico e di secondo principio della termodinamica

Ripetere le valutazioni precedenti, assumendo che i dati assegnati relativi alle prestazioni dei componenti si riferiscano ad un flusso termico nominale all'evaporatore  $\dot{Q}_{cella} = \dot{Q}_2 = 800W$  e calcolando le prestazioni dell'impianto in condizioni off-design, **a parità di rendimento isoentropico del compressore** e per uguali capacità di scambio termico di evaporatore e condensatore (cioè **a parità di "KA"**), nel caso in cui la condizioni operative fossero le seguenti:

$$T_0 = 32^\circ C$$

$$T_{cella} = -10^\circ C$$

Effettuare i calcoli per condizioni di funzionamento reale della macchina frigorifera con flusso termico entrante dall'ambiente nella cella frigo

$$\dot{Q}_0 = \dot{Q}_2 = KA_{cella}(T_{amb} - T_{cella})$$

$$KA_{cella} = 26.6 \frac{W}{K} \text{ (assegnato)}$$

(suggerimento: dalle condizioni di funzionamento nominale è possibile dedurre le prestazioni degli

scambiatori di calore evaporatore e condensatore  $KA_2 = KA_{ev} \frac{\dot{Q}_2}{\Delta T_{cella}} = \frac{800[W]}{8[^\circ C]} = 100 \frac{W}{K}$  .....  $KA_1 =$

$$KA_{cond} = \frac{\dot{Q}_1}{\Delta T_{cond}} = \frac{1100[W]}{10[^\circ C]} = 110 \frac{W}{K}$$

Calcolare infine **la produzione di entropia in ogni singolo componente** i dell'impianto  $\dot{S}_{gen,i}$  e la somma complessiva, cui è abbinata una perdita di lavoro utile dovuto alle irreversibilità.

$$\dot{L}_{lost} = T_0 \cdot \dot{S}_{gen,tot}$$

$$\dot{S}_{gen,tot} = \sum_i \dot{S}_{gen,i}$$

Confrontare il lavoro perduto nelle condizioni nominali con quelle off-design e la relativa % di distribuzione delle perdite nei 4 componenti base dell'impianto.

**Produrre infine una relazione di calcolo** contenente i termini del problema progettuale e di analisi, le ipotesi di lavoro semplificative effettuate ed il metodo di calcolo utilizzato.

Trarre le necessarie conclusioni dai risultati numerici conseguiti ed effettuare considerazioni sulle possibilità di miglioramento dell'impianto.

La relazione dovrà contenere almeno i seguenti elementi:

- 1 – Pagina di frontespizio (università, corso, docente, nomi del gruppo di lavoro, data, A.A., revisione, etc.)
- 2 – Premessa/sommario con enunciato del problema e descrizione degli argomenti affrontati
- 3- Descrizione dell'impianto ed impostazioni dei calcoli
- 4 – metodologia risolutiva e strumenti di calcolo utilizzati
- 5 – Risultati ottenuti con diagrammi e tabelle illustrative (almeno piano p-h e tabelle dei punti termodinamici). Riportare almeno KA degli scambiatori e potenze di tutti i componenti
- 6 – Discussione, confronto dei casi esaminati e conclusioni

#### TABELLA DATI PER GRUPPI DI LAVORO

Dati generali (supposti costanti):  $\eta_{AC}=0.65$

GRUPPO n.	DATI NOMINALI						
	T0 (°C)	Tcella (°C)	Q2 (W)	Condensatore Dt (K)	evaporatore, Dt (K)	(KA) (W/K) evaporatore	(KA) (W/K) condensatore
0 (Aula)	20	-10	800	10	8	100	120
1	25	-10	1000	15	10	100	120
2	20	-15	500	15	10	50	60
3	32	5	200	15	10	20	24
4	32	-15	800	15	15	53	64
5	25	-10	1500	20	15	100	120
6	32	5	600	12	10	60	72
7	20	-10	1500	15	15	100	120
8	20	-10	1500	15	15	100	120
9	10	-20	200	8	15	13	16
10	38	-20	500	5	5	100	120