

Il dimensionamento delle tubazioni di un circuito frigorifero - Parte I: principi generali e linee del liquido

I processi di sviluppo e dimensionamento di una macchina frigorifera sono comunemente focalizzati sui componenti principali della macchina, quali: compressore, condensatore, evaporatore e organo di laminazione. Talvolta il ruolo delle tubazioni di un impianto frigorifero è dimenticato o viene trascurato, tuttavia, può essere semplicemente dimostrato che un dimensionamento poco accorto delle linee di aspirazione, di mandata e del liquido possono portare a perdite di efficienza non trascurabili. Pertanto, un impianto frigorifero di successo dipende anche da un dimensionamento corretto delle linee.

Dato che questo argomento include molti aspetti interessanti, si provvederà a suddividerlo in tre parti: la prima introdurrà gli aspetti generali dell'argomento e poi presenterà i metodi di dimensionamento delle linee del liquido, la seconda parte presenterà le linee guida per la progettazione delle linee di aspirazione e mandata, mentre la terza sarà dedicata alla gestione dell'olio nei condotti.

Come regola generale, possiamo affermare che il corretto dimensionamento di una linea per una determinata portata di refrigerante è il giusto compromesso tra i costi iniziali, che crescono all'aumentare del diametro dei tubi, e i costi di esercizio che invece diminuiscono al crescere del diametro (perché diminuiscono le perdite di carico). Ci sono anche altre importanti considerazioni che sono direttamente legate al sistema di condotti, questo dovrebbe assicurare il ritorno dell'olio al compressore, evitare che eccessive quantità di olio vengano intrappolate in parti del sistema, prevenire che liquido o olio entrino nel compressore sia durante l'attività sia durante le soste. Ovviamente, il sistema di condotti dovrebbe assicurare la giusta alimentazione dell'evaporatore, linee pulite e asciutte.

Considerazioni circa: l'economicità, le perdite di carico, il rumore e il trascinamento dell'olio stabiliscono le velocità consigliate di dimensionamento dei condotti del refrigerante; queste sono riportate nella seguente tabella.

Linee	Velocità del refrigerante [m s⁻¹]
Linee di aspirazione	4.5 – 20
Linee di mandata	10 – 18
Linee del liquido	< 1.5

I limiti superiori sono legati a considerazioni di economicità, perdita di carico e rumore, mentre quelle inferiori, al trascinamento dell'olio e allo sporcamento. Un criterio energetico può essere considerato per il dimensionamento delle linee; la perdita di carico nei condotti di aspirazione e mandata riduce l'efficienza del sistema perché, al diminuire della pressione di saturazione, anche la temperatura di saturazione diminuisce. Infatti, le perdite di carico sono determinate come quella perdita di pressione associata ad una variazione della temperatura di saturazione del refrigerante. Per chiarire questo punto, appare interessante riportare gli effetti delle perdite di carico (diminuzione della temperatura di saturazione) sulla capacità di un impianto frigorifero ideale che operi tra 5 °C di evaporazione e 40 °C di condensazione. Tre fluidi sono confrontati: R134a, propano (R290) e ammoniaca. I confronti sono stati condotti considerando separatamente gli effetti delle linee di aspirazione e mandata, in termini di effetto frigorifero volumetrico e lavoro di compressione.

Perdita [K]	R134a		R290		R717	
	Effetto frigorifero volumetrico	Lavoro di compressione	Effetto frigorifero volumetrico	Lavoro di compressione	Effetto frigorifero volumetrico	Lavoro di compressione
Linea di aspirazione						
0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
1	96.3%	103.3%	96.8%	103.3%	96.5%	103.4%
2	92.7%	106.6%	93.7%	106.6%	93.2%	107.1%
Linea di mandata						
0	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
1	99.0%	102.5%	98.9%	102.5%	99.5%	102.8%
2	97.9%	105.0%	97.9%	105.0%	99.1%	105.7%
Circuito frigorifero ideale: condensazione isobara a 40 °C senza sottoraffreddamento, evaporazione isobara a 50 °C senza surriscaldamento e compressione isoentropica.						

I dati riportati in tabella permettono di evidenziare i differenti effetti delle perdite di carico delle linee di aspirazione e mandata; come era prevedibile, l'effetto frigorifero volumetrico è molto più penalizzato dalla perdita di carico in aspirazione perché sia l'effetto frigorifero che la densità del vapore all'ingresso diminuiscono. L'incremento del lavoro di compressione dovuto alle perdite di carico in aspirazione e mandata è simile per tutti i fluidi e dipende poco dalla linea coinvolta.

La linea del liquido che connette il condensatore all'organo di espansione necessita di differenti considerazioni; in questo caso, la perdita di carico non influenza l'efficienza energetica dell'impianto dato che lo scopo dell'organo di laminazione è quello di ridurre la pressione da quella di condensazione a quella di evaporazione. Il fenomeno che deve essere assolutamente evitato nelle linee del liquido è la formazione di vapore ("flashing") dovuto alla perdita di carico; in altre parole la diminuzione di pressione non dovrebbe essere così elevata da causare la formazione di vapore nella linea.

Da questa introduzione, appare chiaramente che il dimensionamento delle linee di aspirazione e mandata è diverso da quello delle linee del liquido; il primo è guidato da un criterio energetico mentre il secondo da considerazioni tecnologiche.

L'ASHRAE Handbook – Refrigeration (2006) suggerisce una procedura completa per il dimensionamento delle linee del refrigerante per differenti fluidi frigorigeni alogenati e ammoniaci. I prossimi paragrafi descriveranno la procedura suggerita per le linee del liquido.

Gli impianti frigoriferi sono normalmente dimensionati in modo che la perdita di carico nella linea del liquido non sia superiore a quella che corrisponde a 0.5 K – 1 K in variazione di temperatura di saturazione. Come descritto in ASHRAE Handbook (2006), il sottoraffreddamento del liquido è l'unico metodo per superare la perdita di carico nella linea del liquido per garantire che l'organo di laminazione sia alimentato da liquido. Se il sottoraffreddamento non è sufficiente, si forma vapore nella linea e l'efficienza del sistema diminuisce. Il sottoraffreddamento può essere ottenuto utilizzando una parte del condensatore come sottoraffreddatore; questo implica che parte del condensatore sarà allagata e opererà anche da ricevitore. Se si utilizza un ricevitore per controllare le fluttuazioni di carica durante l'attività, questo componente dovrebbe essere alimentato dal liquido saturo proveniente dal condensatore e, a sua volta, dovrebbe alimentare il sottoraffreddatore per raggiungere il grado di sottoraffreddamento previsto.

L'ASHRAE Handbook (2006) riporta diverse tabelle per dimensionare le linee del liquido in funzione della capacità del sistema, del refrigerante e del materiale dei tubi, per una fissata variazione di temperatura per unità di lunghezza pari a 0.02 K m⁻¹ nel caso di linee del liquido o per una velocità di 0.5 m s⁻¹ per i tronchetti di collegamento tra ricevitore e condensatore. La seguente figura illustra un esempio di tabella di

dimensionamento per R134a, tubi di rame; la terza colonna è dedicata alle linee del liquido, le altre si riferiscono alle linee di aspirazione e mandata.

Nominal Line OD, mm	Suction Lines ($\Delta t = 0.04$ K/m)					Discharge Lines ($\Delta t = 0.02$ K/m, $\Delta p = 538$ Pa/m)			Liquid Lines	
	Saturated Suction Temperature, °C					Saturated Suction Temperature, °C			See note a	
	-10	-5	0	5	10	-10	0	10	Velocity = 0.5 m/s	$\Delta t = 0.02$ K/m $\Delta p = 538$ Pa/m
	Corresponding Δp , Pa/m									
	318	368	425	487	555					
TYPE L COPPER LINE										
12	0.62	0.76	0.92	1.11	1.33	1.69	1.77	1.84	6.51	8.50
15	1.18	1.45	1.76	2.12	2.54	3.23	3.37	3.51	10.60	16.30
18	2.06	2.52	3.60	3.69	4.42	5.61	5.85	6.09	16.00	28.40
22	3.64	4.45	5.40	6.50	7.77	9.87	10.30	10.70	24.50	50.10
28	7.19	8.80	10.70	12.80	15.30	19.50	20.30	21.10	41.00	99.50
35	13.20	16.10	19.50	23.50	28.10	35.60	37.20	38.70	64.90	183.00
42	21.90	26.80	32.40	39.00	46.50	59.00	61.60	64.10	95.20	304.00
54	43.60	53.20	64.40	77.30	92.20	117.00	122.00	127.00	160.00	605.00
67	77.70	94.60	115.00	138.00	164.00	208.00	217.00	226.00	248.00	1080.00
79	120.00	147.00	177.00	213.00	253.00	321.00	335.00	349.00	346.00	1670.00
105	257.00	313.00	379.00	454.00	541.00	686.00	715.00	744.00	618.00	3580.00

Figura 1: Capacità frigorifera [kW] delle linee di aspirazione, mandata e del liquido per R134a (Impianto monostadio o stadio di alta). Dati calcolati alla temperatura di condensazione di 40 °C.

Infine, un'ulteriore considerazione deve essere fatta: le linee ascendenti comportano delle ulteriori perdite di carico che si sommano a quelle dovute all'attrito. La perdita dovuta ad una linea ascendente può essere quantificata in circa 11.3 kPa per metro. La totale perdita sarà data dalla somma delle perdite per attrito e quelle dovute ai tratti ascendenti.

La procedura di dimensionamento delle linee del liquido è la seguente: utilizzando la capacità dell'impianto e la tabella per il fluido considerato (si veda figura 1), si può determinare il diametro nominale del condotto. Successivamente, la lunghezza equivalente della linea tra il condensatore e l'organo di laminazione o fra ricevitore e sottoraffreddatore deve essere stimata. Questo valore è dato dalla somma della lunghezza delle linee e dalle lunghezze equivalenti dovute ai raccordi (gomiti, valvole, ecc.). Le lunghezze equivalenti dei raccordi sono elencate in tabelle speciali riportate in ASHRAE handbook (2006). La variazione di temperatura ΔT sarà:

$$\Delta T = L_e \cdot \left(\frac{\Delta T}{L}\right)_{Table} \cdot \left(\frac{P_0}{P_{0,Table}}\right)^{1.8}$$

dove $\left(\frac{\Delta T}{L}\right)_{Table}$ è la variazione di temperatura per unità di lunghezza, P_0 è la capacità frigorifera dell'impianto e $P_{0,Table}$ è la capacità frigorifera elencata nelle tabelle. Le tabelle si riferiscono alla temperatura di condensazione di 40°C, per altre temperature dei coefficienti di correzione devono essere considerati.

Se ci sono dei tratti ascendenti, delle addizionali perdite di carico devono essere considerate e la totale perdita di carico deve essere calcolata. Considerando la pressione di condensazione, è possibile quindi determinare la pressione all'ingresso dell'organo di laminazione e verificare se il sottoraffreddamento è sufficiente per evitare la formazione di vapore.

Il seguente esempio spiega l'utilizzo delle tabelle per il dimensionamento delle linee del liquido. Un impianto frigorifero a R134a che utilizza tubi in rame opera tra la temperatura di evaporazione di 5 °C e la temperatura di condensazione di 40 °C. La sua capacità frigorifera è 20 kW e le linee del liquido hanno una lunghezza equivalente di 50 m senza tratti ascendenti. Dimensionare i condotti del liquido.

Considerando la tabella riportata in Figura 1, ultima colonna, dato che la capacità frigorifera è 20 kW, i diametri nominali 15 mm ($P_{0,Table} = 16.30$ kW) o 18 mm ($P_{0,Table} = 28.40$ kW) possono essere considerati. Le variazioni di temperatura possono essere calcolate con l'equazione precedente:

$$\Delta T = L_e \cdot \left(\frac{\Delta T}{L}\right)_{Table} \cdot \left(\frac{P_0}{P_{0,Table}}\right)^{1.8} = 50 \cdot 0.02 \cdot \left(\frac{20}{16.3}\right)^{1.8} = 1.44 \text{ K}$$

$$\Delta T = L_e \cdot \left(\frac{\Delta T}{L}\right)_{Table} \cdot \left(\frac{P_0}{P_{0,Table}}\right)^{1.8} = 50 \cdot 0.02 \cdot \left(\frac{20}{28.4}\right)^{1.8} = 0.53 \text{ K}$$

con una tubazione da 15 mm, la variazione di temperatura è superiore a 1 K, quindi non accettabile; il giusto dimensionamento della linea del liquido si ha con un tubo di diametro nominale pari a 18 mm.

Se lo stesso sistema includesse anche un tratto ascendente di 4 m, la procedura di dimensionamento dovrebbe considerare la perdita di carico addizionale pari a:

$$\Delta p_r = 11.3 \cdot L = 11.3 \cdot 4 = 45.2 \text{ kPa} = 45200 \text{ Pa}$$

La perdita di carico per attrito è:

$$\Delta p_f = \left(\frac{\Delta p}{L}\right)_{Table} \cdot L = 538 \cdot 50 = 26900 \text{ Pa} = 26.90 \text{ kPa}$$

La totale perdita data dalla somma dei due contributi è:

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_r + \Delta p_f = 45.20 + 26.90 = 72.10 \text{ kPa} = 72100 \text{ Pa.}$$

La pressione di saturazione del R134a a 40 °C è 1016.6 kPa, quindi la pressione all'ingresso dell'organo di laminazione è: $P = P_{sat} - \Delta p_{tot} = 1016.6 - 72.10 = 944.5 \text{ kPa} = 944500 \text{ Pa}$. Questa pressione corrisponde ad una pressione di saturazione di 37.28 °C, questo significa che il refrigerante dovrebbe essere sottoraffreddato di almeno 2.72 K perché raggiunga la valvola di laminazione in condizioni di liquido saturo; comunque, 3-4 K di sottoraffreddamento sono preferibili e raccomandati.

Bibliografia

ASHRAE Handbook, Refrigeration, 2006.

Argomenti correlati

- *Il dimensionamento delle tubazioni di un circuito frigorifero - Parte II: linee di aspirazione e mandata*
- *Il dimensionamento delle tubazioni di un circuito frigorifero - Parte III: la gestione dell'olio*
- *La progettazione del più semplice e affidabile elemento di laminazione: il tubo capillare*

UNILAB SRL

Via Nino Bixio 6 - 35131 - PADOVA (ITALY)
 Ph. +39 49 8763311 - Fax +39 49 8750196
www.unilab.eu
info@unilab.eu
customer@unilab.eu