

Software di simulazione per il settore refrigerazione

Alberto Monici
ETS Sistemi Industriali Srl

Sommario

La ricerca delle perdite ha avuto un notevole impulso a livello industriale grazie all'uso di sistemi computerizzati di controllo e gestione del risultato della singola prova. L'attività normativa ha creato il comune linguaggio tra la ricerca e i vari settori industriali. Nell'industria della refrigerazione, l'utilizzo di unità di misura e di procedure di calcolo legate alla peculiarità applicativa del settore ha portato alla definizione storica di perdite in termini di grammi/anno del fluido refrigerante. Oggigiorno, l'utilizzo dell'elio come gas tracciante per la prova di tenuta (diverso dai fluidi refrigeranti che andranno poi a "caricare" il circuito) e le diverse condizioni operative e di test, devono essere considerate per la corretta conversione da perdita di gas refrigerante e valore certificante di perdita ad elio. Il software realizzato consente sia di definire tali valori in fase di specifica, che di essere integrato nel sistema di controllo automatico in linea.

Alberto Monici
ETS Sistemi Industriali Srl
Via Mauro Macchi 72
20124 Milano
e.mail: a.monici@etssistemi.it

Introduzione

L'attività normativa ha creato il comune linguaggio tra i vari settori industriali ed i vari paesi.

Un utile ausilio all'operatore di PND viene dato dalle varie norme e codici. In esse egli trova le giuste formule, procedimenti, indicazioni che lo guidano alla stesura di una appropriata procedura di collaudo, interpretazione dei risultati ed emissione di certificato.

La rivoluzione informatica ha permesso di ottimizzare i processi di verifica, controllo e simulazione in tutte le attività industriali. Un notevole impulso è stato dato anche alle Prove Non Distruttive, sia in termini di risultati attesi, tramite simulazioni sempre più realistiche, sia per il controllo del processo di certificazione del manufatto, sempre più automatizzato e validante.

L'interpretazione dei risultati è però ancora prerogativa del tecnico specializzato, il quale calibra il sistema con dei riferimenti ben precisi, verifica il manufatto con l'ausilio degli strumenti o degli impianti di collaudo e in definitiva si assume l'onere e l'onore dell'esito della sessione di prova.

In particolari industrie o settori, la nomenclatura, l'uso di unità di misura etc. non seguono spesso le indicazioni normative adottate dai vari paesi, soprattutto per ragioni storiche o di comodità d'uso. Basta pensare che ancora oggi pochi usano il Pascal (Pa) per misurare la pressione, preferendo unità più consone alla applicazione.

L'industria della refrigerazione è ben nota per l'utilizzo di unità di misura e di procedure di calcolo legate storicamente al processo di carica del fluido refrigerante. Se la carica è espressa in peso è spontaneo esprimere in peso anche la perdita di carica.

Oggigiorno, l'utilizzo dell'elio come gas tracciante per la prova di tenuta (diverso dai fluidi refrigeranti che andranno poi a "caricare" il circuito) e le differenze tra le condizioni operative e le condizioni di test, devono essere considerate per la corretta valutazione della perdita in elio e conversione in termini di perdita del fluido refrigerante.

Il software realizzato permette la corretta simulazione delle conversioni, può essere integrato in software di gestione del ciclo automatico di collaudo ed è di ausilio non solo a chi gestisce il Collaudo, ma anche al progettista del manufatto

Dalla Perdita di Massa al concetto di flusso di perdita

Come tutti i software di simulazione, quello da noi realizzato è un "acceleratore" di idee e di calcoli. Alla base del risultato c'è comunque la corretta comprensione dei fenomeni fisici che portano agli algoritmi di calcolo.

Se nell'industria della refrigerazione si è sempre parlato di perdita di massa del refrigerante (grammi/anno) e se nel settore delle prove non distruttive si è definito il flusso di perdita ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$), è bene iniziare a correlare le due grandezze.

Il flusso di perdita Q è direttamente legato alla perdita di massa R , alla temperatura ed alle caratteristiche chimico-fisiche del refrigerante. In generale, il legame tra perdita in peso e perdita in flusso è dato da

$$Q_r = f(R \cdot T / M) = (R / M) \cdot (T / 273) \cdot 0,0007$$

Ove:

R è la perdita in in peso della carica nel tempo

T è la temperatura

M è la massa molare del refrigerante.

Da quanto sopra riportato si deduce che ogni qualvolta che si parla di perdita in termini di peso si deve specificare il fluido refrigerante per il quale il manufatto è stato verificato. Storicamente si è parlato sempre di R12 (frasi del tipo: il frigorifero perde 2 grammi/anno di R12 sono ben noti a chi è del settore), ma la indicazione relativa alla massa molare permette di comprendere che, al di là della conversione in termini di flusso di perdita, occorre stabilire il tipo di gas refrigerante: Un sistema certificato ad 1 grammo/anno di R12 perde un valore diverso in caso di R134A!

La prima cosa che fa il software sarà pertanto convertire il flusso di gas refrigerante la perdita espressa in grammi/anno, note le condizioni di temperatura e la massa molecolare del gas refrigerante.

Esempio 1:

Una perdita di $R = 5$ gr/anno di Gas refrigerante R134A a 20°C equivale ad un flusso di perdita di $Q_r = 3,74 \cdot 10^{-5}$ atm cc/s = $3,74 \cdot 10^{-6}$ Pa \cdot m 3 /s.

Dal flusso di perdita di gas refrigerante alla perdita equivalente ad elio

La ricerca nel settore dei gas refrigeranti ha avuto notevole impulso negli ultimi anni, sia per ragioni di mercato che di adozione di misure a salvaguardia dell'ambiente sempre più stringenti. Sono stati sviluppati nuovi gas refrigeranti con caratteristiche molto differenti tra di loro. D'altro canto anche la ricerca delle perdite ha superato in questi anni lo scoglio di settore di nicchia destinato ad ambiti di ricerca e si è evoluta come utile strumento in

mano all'industria per garantire il rispetto dei requisiti e direttive e la qualità del proprio prodotto.

La ricerca delle perdite ad elio, basata sull'adozione di uno spettrometro di massa e del gas elio come tracciante della perdita ha permesso di aumentare la qualità del manufatto. L'elio viene usato nel settore delle prove non distruttive per la ricerca delle perdite in quanto risulta:

- Inerte
- Non tossico
- Si diffonde attraverso le perdite molto facilmente
- La sua presenza in ambiente è relativamente poca (qualche ppm), abbassando così il valore di rumore di fondo.
- Si disperde facilmente in atmosfera senza danni ambientali

Anche nell'industria della refrigerazione l'adozione della tecnica di ricerca delle perdite ad elio, scissa dalla tipologia di carica di refrigerante e con la possibilità di automatizzazione e certificazione del processo di test che lo spettrometro di massa ad elio consente, ha fatto notevoli sviluppi.

Le particolarità dell'elio, sopra menzionate, unite alla sensibilità che con tale gas e con i moderni spettrometri di massa si riesce a raggiungere (intorno ai 10^{-6} std cc/s a pressione ambiente e intorno a 10^{-9} std cc/s con test in vuoto) ha fatto sì che la tecnica di test di perdita con gas tracciante elio sia quella oggi maggiormente in vigore in situazioni in cui altre tecniche risultano poco validanti o ove il valore di perdita è talmente basso da non poterle applicare.

Ma quali fenomeni e caratteristiche chimico-fisiche occorre considerare per poter convertire una perdita espressa in grammi/anno o nel suo equivalente flusso di perdita in std cc/s o $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ in flusso di perdita ad elio misurata dallo spettrometro di massa?

Il legame matematico che ci si aspetta è una relazione tra il flusso di gas refrigerante e il flusso di gas elio.

I parametri di cui occorre tener conto sono sicuramente quelli identificativi dei due gas (quindi masse molari), dei loro differenti comportamenti in flusso (quindi viscosità e condizioni di flusso), delle condizioni di test durante la prova ad elio e di quella specificata per la perdita di gas refrigerante (pressione, diversa concentrazione, etc.).

Per tener conto del tipo di flusso e della viscosità, occorre conoscere il tipo di test che si desidera eseguire.

I test possibili sono distinguibili in due grosse famiglie: a) Test con spettrometro di massa funzionante in modalità "sniffer", in cui un annusatore aspira dall'ambiente i gas che essa contiene e rileva e misura solo il gas elio. B) Test con spettrometro di massa funzionante in modalità "vacuum" in cui esso è direttamente collegato tramite un test-port alla camera in vuoto in cui è posizionato il manufatto da controllare, dopo averlo pressurizzato con il gas tracciante.

Le due modalità di test comportano fenomeni fisici differenti, legati al fatto che in modalità sniffer il flusso è di tipo laminare, mentre in modalità vacuum può essere sia laminare che molecolare o intermedio tra i due.

Conversione per la Modalità Sniffer a pressione atmosferica

Le condizioni di flusso laminare sono valide in un intervallo abbastanza esteso di valori di perdita, dipendendo dalla pressione di test, dalle condizioni geometriche della perdita (diametro medio del foro e spessore della parete) e dalla viscosità del gas.

A parità di temperatura pertanto si ha una relazione del tipo sotto riportato:

$$Q = f(D^4, (P_1^2 - P_2^2), 1/L, 1/\mu)$$

Ove :

D è il diametro medio della perdita

P1 è la pressione assoluta su un lato del manufatto

P2 è la pressione assoluta sull'altro lato del manufatto

L è lo spessore della parete in cui è presente la perdita

μ è la viscosità del gas tracciante.

A titolo esemplificativo nella tabella sottostante vengono riportati alcuni valori di viscosità:

Gas	R11	R22	R134A	ARIA	ELIO
Viscosità (x 10E-10 Bar*s)	1,02	1,25	1,21	1,75	1,93

Tab.1 : Valori di viscosità a 20 °C e 1 bar di pressione

Dalla formulazione del flusso di perdita, avendo le viscosità dei due gas da confrontare e le pressioni durante il test, si può eseguire un semplice rapporto eliminando in questo modo il fattore geometrico δ (identico per le due condizioni) e legando il flusso di gas refrigerante Q_r con il flusso di elio Q_{He} :

$$Q_{He} = f(Q_r, \mu_r/\mu_{test}, P_{test}, P_{He}, P_{ref}) = Q_r * (\mu_r/\mu_{test}) * (P_{He}/P_{test}) * (P_{test}^2 - 1) / (P_{ref}^2 - 1)$$

Ove:

Q_{He} è il flusso di perdita ad elio

Q_r è il flusso di perdita con gas refrigerante

μ_r/μ_{test} è il rapporto tra la viscosità del gas refrigerante e quella del gas tracciante. E' indicato come μ_{test} per supportare anche la eventualità di utilizzo di una miscela di gas tracciante (esempio aria+elio), spesso usata per ridurre i costi o ridurre la sensibilità ove è eccessiva. Per il calcolo corretto di essa occorre tener conto della concentrazione tra i due gas componenti la miscela.

P_{test} è la pressione di test in caso di miscela di gas tracciante (che diventa P_{He} in caso di elio al 100% di concentrazione).

P_{He} è la pressione del gas tracciante elio

P_{ref} è la pressione di progetto.

Poiché il test di perdita non è detto che venga usato dal costruttore anche come test di stress meccanico, spesso il valore di pressurizzazione del componente durante la prova è diverso dal valore di progetto (esempio per motivi di sicurezza) e il costruttore ha necessità di ricalcolare la perdita ad elio data ad una definita pressione alla perdita alla pressione di esercizio.

Ritornando all'esempio riportato in precedenza,

Esempio 2:

Una perdita di $R = 5$ gr/anno di Gas refrigerante R134A a $20\text{ }^\circ\text{C}$ equivale ad un flusso di perdita di $Q_r = 3,74 \cdot 10^{-5}$ atm cc/s = $3,74 \cdot 10^{-6}$ Pa*m³/s. Se la pressione di esercizio è di 3 Bar relativi, vuol dire che tale perdita deve essere riferita a tale condizione.

Se le condizioni di test sono differenti:

$P_{\text{test}} = 10$ Bar

Miscela aria/elio al 30% di elio

Si ha:

$$\mu_{\text{test}} = (0,7 \cdot \mu_{\text{aria}}) + (0,3 \cdot \mu_{\text{He}})$$

Il valore equivalente di Q_{He} sarà $Q_{\text{He}} = 6,03 \cdot 10^{-5}$ std cc/sec.

Conversione per la Modalità vacuum

Nel caso in cui un lato della parete del manufatto sia in vuoto e di tale vuoto lo spettrometro di massa esamina il segnale di elio, mentre l'altro lato è in pressione, la valutazione della tipologia di flusso è importantissima, dipendendo essa dalle condizioni geometriche, dalla pressione di test e dalla viscosità del gas. In condizioni di flusso molecolare, il flusso di tipo laminare non c'è e viceversa. In condizioni di flusso intermedio sono presenti entrambe le componenti. La formulazione terrà allora conto della somma delle due componenti per valutare il flusso complessivo.

$$Q_{\text{He}} = Q_{\text{lam}} + Q_{\text{mol}} = f1 Q_r, \mu_r / \mu_{\text{test}}, P_{\text{test}}, P_{\text{He}}, P_{\text{ref}} + f2(D^3, L, P_{\text{test}}, P_{\text{He}}, M).$$

Il software di simulazione

Prendendo spunto da tutte le considerazioni precedenti, abbiamo messo a punto il software in ambiente Windows (© Microsoft) e realizzato con Visual Basic (© Microsoft). Abbiamo cercato di rendere il tutto abbastanza immediato dal punto di vista grafico e in grado di guidare l'operatore al risultato finale, in maniera da fargli comprendere eventuali anomalie. La versione di simulazione è completa in tutte le sue parti, ma il cuore è una funzione in grado di essere implementata sui sistemi di collaudo automatico e di interfacciarsi con il programma di gestione del collaudo stesso.

Nelle Figure 1,2 e 3 sono riportate alcune simulazioni.

Dalla analisi delle due simulazioni di Figura 1 e Figura 2 si trae che con il metodo in vuoto (ove possibile applicarlo dipendendo da una analisi dei costi e degli ammortamenti sul singolo pezzo e dalle dimensioni del pezzo stesso), si può avere un risparmio notevole del gas tracciante elio. Infatti poiché il segnale di rumore di fondo di elio in vuoto (a circa 10^{-2} mbar assoluti è di circa $1 \cdot 10^{-9}$ std cc/s) mentre a pressione atmosferica è intorno a $3-5 \cdot 10^{-6}$ std cc/s, per poter scartare i pezzi in base alla soglia definita in gr/anno di gas refrigerante in Figura 1 basterebbe una miscela al 5 % di elio o anche meno. Il vantaggio (Vedi Figura 3) in questo caso sarebbe anche un notevole salto tra il rumore di fondo e il valore di scarto.

In campo industriale i sistemi che integrano la simulazione sopra riportata in maniera automatica durante l'acquisizione trovano largo impiego sia nei sistemi automatici di Leak Detection che in semplici acquisitori di segnale e riconversione del dato. In Figura 4 viene mostrato un sistema ditale tipo con semplice acquisizione di pressione e segnale di elio e, previo opportuna taratura, segnalazione a video dei valori di perdita sia in forma numerica che grafica ed archiviazione dei risultati per singola commessa. Il software realizzato tiene

conto del tipo di gas in esercizio, percentuale di elio, etc. in maniera da mostrare il valore di perdita reale ricalcolato.

<p>Dati di Riferimento</p> <p>GAS <input type="text" value="R134A"/></p> <p>Valore perdita (gr/y) <input type="text" value="5"/></p> <p>Pressione (Bar rel) <input type="text" value="3"/></p> <p>Temperatura (°C) <input type="text" value="20"/></p> <p>Spessore (cm) <input type="text" value="0,1"/></p> <p><input type="button" value="Conferma"/></p>	<p>Dati di Archivio GAS</p> <p>Massa Molecolare (gr) 102,00</p> <p>Viscosità dinamica (10-10 Bar*s) 1,38</p>	<p>Flusso equivalente di gas</p> <p>3,74e-05</p> <p>mBar l/ s</p>
	<p>Dati di test</p> <p>Concentrazione He (%) <input type="text" value="30"/></p> <p>Pressione (mBar abs) <input type="text" value="10000"/></p> <p>Tipo di Test</p> <p><input type="button" value="Test"/></p> <p><input type="radio"/> In Vuoto <input checked="" type="radio"/> Sniffer</p>	
	<p>PERDITA EQUIVALENTE AD ELIO</p> <p>6,86e-05</p> <p>mBar l/ s</p>	

Figura 1 – Simulazione con i dati degli esempi indicati nel testo.

<p>Dati di Riferimento</p> <p>GAS R134A</p> <p>Valore perdita (gr/y) 5</p> <p>Pressione (Bar rel) 3</p> <p>Temperatura (°C) 20</p> <p>Spessore (cm) 0.1</p> <p>Conferma</p>	<p>Dati di Archivio GAS</p> <p>Massa Molecolare (gr) 102,00</p> <p>Viscosità dinamica (10-10 Bar*s) 1,38</p> <p>Dati di test</p> <p>Concentrazione He (%) 30</p> <p>Pressione (mBar abs) 10000</p> <p>Tipo di Test</p> <p>Test</p> <p><input checked="" type="radio"/> In Vuoto <input type="radio"/> Sniffer</p>	<p>Flusso equivalente di gas</p> <p>3,74e-05</p> <p>mBar l/ s</p>
	<p>PERDITA EQUIVALENTE AD ELIO</p> <p>8,23e-05</p> <p>mBar l/ s</p>	

Figura 2 – Simulazione con i dati di Figura 1 ma con metodo in vuoto.

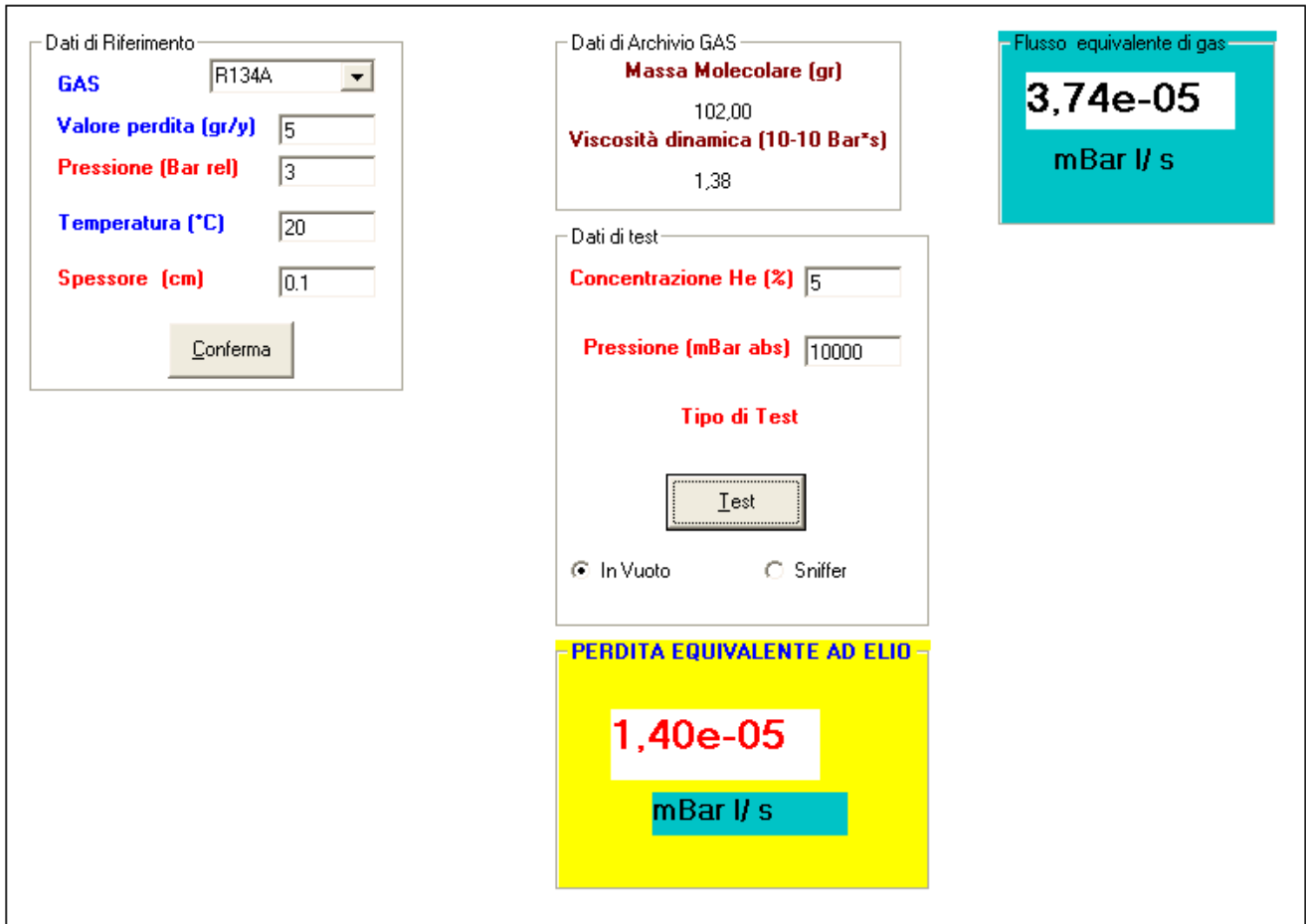


Figura 3 – Simulazione con i dati di Figura 1 ma con metodo in vuoto e He ridotto al 5%.



Figura 4 – Sistema di Acquisizione con grafico degli andamenti del segnale di elio e con calcolo dei valori di perdita già integrato.