

by James M. Calm, P.E., Membro anziano ASHRAE e
Piotr A. Domanski, Ph.D., Membro AHSRAE

REFRIGERANTI STATO DELLA SOSTITUZIONE

LA GRADUALE ELIMINAZIONE DELL'R-22 È IL PROSSIMO PASSO NELLA TRANSIZIONE VERSO REFRIGERANTI PIÙ RISPETTOSI DELL'AMBIENTE. SI TRATTA DEL REFRIGERANTE PIÙ AMPIAMENTE USATO NEGLI STATI UNITI E NEL MONDO INTERO. LA GAMMA DELLE SUE APPLICAZIONI NEGLI IMPIANTI RESIDENZIALI, COMMERCIALI, INDUSTRIALI E NEI TRASPORTI REFRIGERATI È PIÙ AMPIA DI QUELLA DI OGNI ALTRO REFRIGERANTE E COPRE CAPACITÀ DI RAFFREDDAMENTO CHE VANNO DA 2 KW A 33 MW (DA 1/2 A 9.500 TONNELLATE). I SOSTITUTI SPECIFICI DIPENDONO DALLE APPLICAZIONI

Dalla sua identificazione iniziale nel 1928 e dalla sua commercializzazione nel 1936, l'R-22 è stato applicato in impianti che vanno dai più piccoli climatizzatori da finestra ai più grandi refrigeratori e pompe di calore, compresi quelli destinati al raffreddamento e al riscaldamento urbano. Le singole apparecchiature che usano questo versatile refrigerante hanno capacità di raffreddamento che vanno da 2 kW a 33 MW (da 1/2 a 9.500 tonnellate). L'R-22 è usato in apparecchiature con compressori a pistone rotante, compressori alternativi a pistone, compressori *scroll*, com-

pressori a vite, compressori centrifughi e, in via sperimentale, nelle apparecchiature con cicli ad assorbimento. Nessun altro fluido refrigerante ha sviluppato una gamma così ampia di potenzialità commerciali e di applicazioni.

In fase di graduale eliminazione

Tuttavia, l'R-22 appartiene a una classe di prodotti chimici, gli idroclorofluorocarburi (HCFC), che sono in fase di graduale eliminazione per motivi di protezione dell'ambiente sulla base di un accordo internazionale, il *Protocollo di Montreal sulle sostanze che impoveriscono lo strato di ozono* (UNEP 1997, 2003a). Le misure di controllo del Protocollo si riferiscono al «consumo», definito come la produzione più le importazioni meno le esportazioni e i quantitativi legalmente distrutti. Il protocollo non limita l'uso futuro dei prodotti chimici una volta che siano stati prodotti o importati, in particolare il fluido refrigerante che è già in uso, riciclato, o immagazzinato prima delle date di eliminazione. Nemmeno pone limiti all'uso dei prodotti chimici come materie prime (intermedie per la produzione di altri prodotti chimici).

La tabella 1 riporta le date di eliminazione relative alla produzione e all'importazione di R-22 conformemente al Protocollo di Montreal e le date stabilite in Canada e negli USA. Le date indicate sono relative alla completa eliminazione, anche se debbono essere applicati passi intermedi di congelamento o di riduzione complessiva. Alcuni paesi – molti specialmente in Europa – hanno accelerato il programma.

A causa della precedente e attuale diffusione del suo uso, una grande quantità di apparecchiature progettate per l'R-22 resteranno in funzione per decenni, molto tempo dopo la sospensione della produzione di R-22. Le fonti principali per la manutenzione di queste apparecchiature saranno costituite dalle limitate riserve di produzione previste per tale scopo, dalle riserve immagazzinate prima del termine della produzione, e dalle quantità recuperate dalle apparecchiature convertite o ritirate. Saranno anche disponibili alternative di conversione delle apparecchiature a fluidi refrigeranti di sostituzione, alcuni dei quali sono stati sviluppati specificamente per semplificare la conversione in eser-

DELL'R-22

cizio (non previsti per uso originale). Un piccolo numero di paesi, ancora specialmente in Europa, hanno adottato limitazioni più severe. Essi proibiscono già l'uso dell'R-22 e/o la manutenzione degli impianti che lo usano, o si preparano a farlo, a partire da date specificate sulla base del tipo e della dimensione degli impianti. Il Protocollo di Montreal permette invece ai paesi in via di sviluppo (più specificamente quelli indicati nell'Articolo 5(1) sulla base dei loro livelli di uso delle sostanze sotto controllo) di continuare il «consumo» (produzione più importazioni meno esportazioni e distruzione) fino al 2040.

	Nuovi impianti	Impianti esistenti
Protocollo di Montreal		
Paesi sviluppati	2020 ^a	2030
Paesi Articolo 5(1)	2040 ^a	2040
USA ^b e Canada	2010	2020

Tabella 1 - Eliminazione graduale della produzione di R-22 (al 1 gennaio dell'anno indicato)

Note

^a Il Protocollo impone riduzioni graduali (solo un congelamento nel 2015 per i paesi indicati nell'Articolo 5(1)) per il consumo complessivo di HCFC, ma permette ai singoli paesi di determinare come soddisfare a tali limitazioni sulla base della ripartizione tra le singole sostanze (pesate in base ai rispettivi potenziali di impoverimento dell'ozono, ODP) e il relativo utilizzo.

^b In conformità ai Clean Air Act Amendments (CAAA) del 1990 e ai regolamenti attuativi contenuti in 40 CFR 82.

Tali date hanno effetto sulla produzione e l'importazione di R-22, non sulla continuazione del funzionamento degli impianti che usano R-22 esistente o riciclato.

Alternative di sostituzione dell'R-22

Non c'è un fluido refrigerante costituito di un solo composto che rimpiazza direttamente l'R-22, ma i produttori hanno messo in commercio almeno otto miscele refrigeranti destinate alla manutenzione degli impianti esistenti (previa appropriata conversione) e diverse altre miscele destinate ai nuovi impianti. Tali numeri aumentano a più di venti per le conversioni e più di dieci per i nuovi impianti se si prende in considerazione l'R-502 (una miscela contenente R-22 molto usata per la refrigerazione commerciale a bassa temperatura). Tali miscele sono sintetizzate nella tabella 2. La trat-

tazione sotto riportata prende in considerazione diversi refrigeranti a composto singolo che sostituiscono l'uso dell'R-22, ma con differenze nelle modalità di applicazione.

	Impianti esistenti (possono richiedere conversione)				Nuovi impianti	
R-22	R-407C	R-411A	R-417A	R-419A	R-407C	R-407E
	R-421A	R-421B			R-410A	
					idrocarburi (HC)	R-410B
R-502	R-402A	R-402B	R-40A	R-403B	R-404A	R-407A
	R-404A	R-407A	R-407B	R-408A	R-507A	R-509A
	R-409	R-411B	R-422A	R-507A	idrocarburi (HC)	

Tabella 2 - Miscele per la sostituzione dell'R-22

Sono in uso molti altri refrigeranti – prevalentemente miscele –, ma la loro quota di mercato complessiva è molto piccola. La tabella riporta solo quelle miscele che hanno ottenuto denominazioni standard.

A complemento della ricerca e dello sviluppo di grande portata svolti dai singoli produttori di prodotti chimici e costruttori di apparecchiature, dalle università e da altre organizzazioni di ricerca e da laboratori che agivano per conto dei governi, l'industria della climatizzazione e della refrigerazione si organizzò per compiere uno sforzo comune e rendere più rapida un'ampia valutazione di alternative all'R-22. Questo programma internazionale era noto come «Programma di valutazione dei refrigeranti alternativi all'R-22» (R-22 Alternative Refrigerants Evaluation Program (AREP)). Comprende una controparte giapponese denominata «JAREP». L'obiettivo del programma di prove dell'inizio degli anni 90 era di eliminare duplicazione di lavoro e spreco di risorse limitate nella valutazione delle alternative di sostituzione. Partecipavano trentanove società in Europa, Giappone e Nord America. Esse condivisero risultati analitici e sperimentali da prove calorimetriche e test sulle apparecchiature, relativi a progetti di uso immediato (conversioni minime) e a progetti ottimizzati.

AREP esaminò 14 possibili refrigeranti scelti come potenziali sostituti dell'R-22. Tra i candidati vi erano R-134a; R-32/125 (60.0/40.0); R-32/134a (20.0/80.0), (25.0/75.0), (30.0/70.0), e (40.0/60.0); R-32/227ea (35.0/65.0); R-

125/143a (45.0/55.0); R-32/125/134a (10.0/70.0/20.0) [R-407B], (24.0/16.0/60.0), e (30.0/10.0/60.0); e R-32/125/290/134a (20.0/55.0/5.0/20.0). Vi erano anche R-290 (propano) e R-717 (ammoniaca), anche se le prove effettive di questi due refrigeranti furono limitate. Tra gli altri candidati vi erano quattro sostituti per l'R-502, e precisamente R-125/143a (45.0/55.0), R-32/125/134a (20.0/40.0/40.0) [R-407A]; R-125/143a/134a (10.0/45.0/45.0), e R-125/143a/134a (44.0/52.0/4.0) [R-404A].

Sulla base dei risultati, la maggior parte dei costruttori di piccoli compressori e di apparecchiature autonome conversero sulla miscela binaria R-32/125, più tardi riformulata come R-32/125 (50.0/50.0) [R-410A], per massimizzare le prestazioni ed evitare l'infiammabilità. Questa miscela quasi azeotropica opera a pressioni di condensazione significativamente più elevate – circa del 60% più elevate dell'R-22 per impianti raffreddati ad aria – ma offre la promessa di ridotte dimensioni delle apparecchiature.

Una miscela ternaria, R-32/125/134a, si è imposta come candidato per la manutenzione, grazie all'uso di differenti rapporti tra i componenti formulati per avvicinarsi alle proprietà pressione-temperatura dell'R-22 e dell'R-502. L'R-32/125/134a (30.0/10.0/60.0) ha suscitato grande interesse come alternativa a breve termine e per l'uso futuro come fluido per la manutenzione. I produttori hanno in seguito rivisto la formulazione come R-32/125/134a (23.0/25.0/52.0) [R-407C] per ridurre la potenziale infiammabilità mediante frazionamento.

L'impegno dell'AREP era relativo a una valutazione esente da considerazioni di concorrenza. I singoli produttori hanno sviluppato approcci in concorrenza tra loro alla progettazione e all'ottimizzazione di apparecchiature effettive. Minor (2004) riassume un'ampia revisione della letteratura disponibile sulle prove e le modifiche richieste dalle apparecchiature reali. Queste comprendevano modifiche ai compressori, agli scambiatori di calore e ai dispositivi di controllo, oltre ai lubrificanti (vedere la trattazione più avanti). La maggior parte delle relazioni citate dimostrava un'efficienza energetica equivalente o migliorata per

l'R-410A rispetto all'R-22, e precisamente aumenti dall'1% al 7% per il raffreddamento e diminuzioni dal 3% fino ad aumenti del 7% per il riscaldamento.

Mentre l'infrastruttura di manutenzione e la diffusione di alcuni compressori e dispositivi di controllo per gli impianti residenziali e gli impianti commerciali leggeri in pratica richiedevano scelte uniformi, c'era meno concordanza per gli impianti di maggior dimensione. L'R-134a è la sostituzione di più vasto uso nei refrigeratori con compressori a vite (175-1500 kW, 50-450 tonnellate), raffreddati sia ad acqua sia ad aria. Tra le altre alternative l'R-410A e, in misura limitata soprattutto in Europa, l'R-717 (ammoniaca) e l'R-1270 (propilene). L'iniziale interesse nell'R-407C e, ma meno diffuso, nell'R-404A per velocizzare l'ingresso nel mercato, si sta esaurendo.

Un nuovo prodotto, che usa anch'esso l'R-134a, permette con un compressore centrifugo molto compatto, azionato mediante invertitore, di sostituire compressori alternativi a pistone e compressori a vite così da ottenere efficienze drasticamente migliori a pari capacità. L'interesse continua a essere alto, specialmente in Europa, per l'R-407C nei refrigeratori ad acqua. Benché l'efficienza sia in generale più bassa di quella dell'R-22 fino al 7% per le soluzioni tradizionali, vengono presi in considerazione due sviluppi. L'uso di uno scambiatore di calore aspirato-liquido può rendere possibili guadagni di efficienza del 2%. Miglioramenti più significativi sono possibili sfruttando l'elevato *glide* di temperatura dell'R-407C (la differenza tra le temperature di evaporazione e di condensazione) che va da 4 °C a 5 °C (da 7°F a 9°F). Un miglioramento fino al 5% può essere ottenuto usando scambiatori di calore in controcorrente per avvicinarsi a un ciclo termodinamico di Lorenz (che sfrutta il *glide* di temperatura per ridurre l'innalzamento netto di temperatura grazie all'uso di evaporatori e condensatori in controcorrente).

Proprietà ambientali

Mentre la decisione di eliminare gradualmente l'R-22 è basata sul suo potenziale di impoverimento dell'ozono stra-

Refrigerante	Persistenza		
	nell'atmosfera		
	(anni)	ODP	GWP
(100anni)			
R-22	12.0	0.034	1780
R-123			
R-134a	14.0	~ 0.0	1320
R-407C	a	~ 0.0	1700
R-407E	a	~ 0.0	1400
R-410A	a	~ 0.0	2000
R-32	4.9	~ 0.0	543
R-32/600 (95.0/5.0)	a	~ 0.0	520
R-32/600a (90.0/10.0)	a	~ 0.0	490
R-290 (propano)	b	0.0	~ 20
R-717 (ammoniaca)	b	0.0	< 1
R-744 (biossido di carbonio)	> 50	0.0	(1
R-1270 (propilene)	b	0.0	~ 20

Tabella 3 - Proprietà ambientali dell'R-22 e dei suoi sostituti

^a La persistenza nell'atmosfera non è indicata per le miscele perché i componenti si separano nell'atmosfera.

^b Sconosciuto.

Basata su Calm e Hourahan (2001), IPCC (2001), e WMO (2003)

tosferico, quando si esaminano le alternative bisogna considerare in aggiunta altri dati relativi all'ambiente. La tabella 3 mette a confronto la persistenza nell'atmosfera (τ_{atm}), il potenziale di impoverimento dell'ozono (ODP), e il potenziale di riscaldamento globale (Global Warming Potential, GWP) per l'R-22 rispetto ad alcune alternative.

τ_{atm} indica la permanenza media del refrigerante rilasciato nell'atmosfera fino a quando si decompone, reagisce con altre sostanze chimiche, viene lavato via dalla pioggia, o viene diversamente rimosso.

Poiché indica il tempo medio di permanenza nell'atmosfera, è suggestivo del potenziale di accumulo. Lunga permanenza nell'atmosfera implica potenziale di lento recupero da problemi ambientali, sia quelli già conosciuti sia quelli che potrebbero essere individuati nel futuro. Pertanto, è desiderabile breve permanenza nell'atmosfera.

I valori indicati per la permanenza dei refrigeranti sono permanenze atmosferiche composite. Le permanenze possono anche essere indicate separatamente per la troposfera (l'atmosfera inferiore in cui viviamo), la stratosfera

(il successivo strato in cui l'impoverimento di ozono è oggetto di preoccupazione), e gli strati più elevati, perché i meccanismi di rimozione primaria cambiano fra gli strati. Il potenziale di impoverimento dell'ozono (ODP) è un indicatore normalizzato, relativo all'R-11, della capacità dei refrigeranti (e di altre sostanze chimiche) di distruggere le molecole dell'ozono stratosferico. I dati indicati sono valori di modello adottati a seguito di valutazione scientifica internazionale. I valori di ODP indicati per le miscele sono valori medi pesati rispetto alla massa.

Sia i valori di ODP sia di GWP sono calcolati a partire dai valori τ_{atm} , da proprietà chimiche misurate, e da altri dati atmosferici. Per un refrigerante ideale i valori di τ_{atm} , ODP, e GWP devono essere quanto più bassi possibile, ma tali obiettivi devono essere valutati insieme a criteri di prestazioni, sicurezza, e stabilità chimica e termica nell'utilizzo. Calm e Hourahan (2001) trattano tali parametri, altri modi per determinare i valori di ODP, e la loro significatività.

Efficienze comparate

Le efficienze comparate dei refrigeranti dipendono fondamentalmente da cinque fattori:

Proprietà termodinamiche:

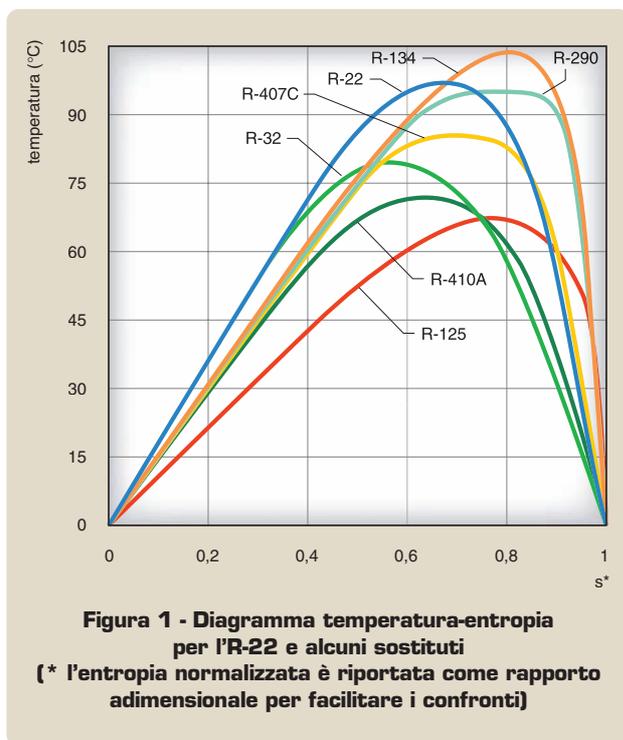
1. Di quanto il ciclo frigorifero si svolge sotto il punto critico (che influenza il rapporto a pressione costante tra calore latente di evaporazione e calore specifico del liquido).
2. Le pendenze delle curve di vapore saturo e di liquido saturo, che determinano gli effetti comparati di surriscaldamento, sottoraffreddamento ed espansione. Le pendenze sono grandemente influenzate dal calore specifico molare.

Proprietà di trasporto:

3. Conduttività termica e viscosità, che influenzano il trasferimento di calore e l'attrito del fluido.

Applicazione:

4. Il trasferimento di calore influenzato dal glide di temperatura del refrigerante e dalla configurazione dello scambiatore di calore.
5. Ottimizzazione del ciclo per il fluido specifico con controllo del surriscaldamento, del sottoraffreddamento, della realizza-



zione in più stadi con economizzatori, e l'inclusione di dispositivi quali gli scambiatori di calore liquido/vapore.

La figura 1 presenta la relazione temperatura-entropia per l'R-22 e alcuni sostituti per facilitare la valutazione qualitativa dell'impatto delle proprietà termodinamiche sul coefficiente di prestazione (coefficient of performance, COP).

La figura riporta l'entropia come quantità adimensionale normalizzandola all'ampiezza della curva a due fasi (cioè, liquido saturo = 0 e vapore saturo = 1). Notare che la temperatura del punto critico, alla sommità della regione a due fasi, è più elevata per l'R-134a rispetto all'R-22.

Così la temperatura critica è più bassa per l'R-410A e anche per l'R-125, un componente (50% in massa) della miscela R-410A. Per le stesse temperature di evaporazione e di condensazione, un ciclo che usa l'R-134a opera più lontano dal suo punto critico rispetto all'R-22 e molto più lontano rispetto all'R-410A e all'R-125.

La figura 2 raffigura uno schematico ciclo a compressione di vapore (frigorifero) su un diagramma semplificato temperatura-entropia (T-S). L'effetto frigorifero per unità di portata in massa è uguale all'area compresa sotto la linea

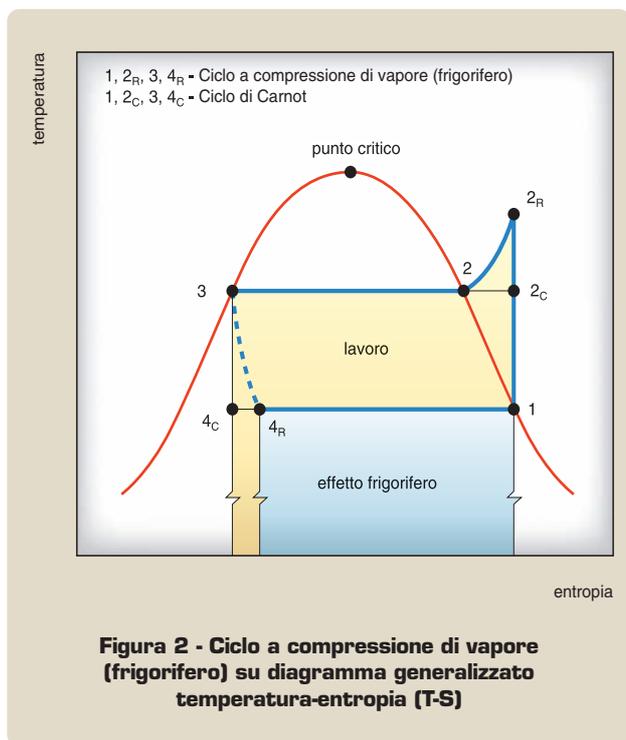
di evaporazione, mentre il lavoro necessario per eseguire il ciclo è rappresentato dall'area compresa sotto le linee di condensazione e di desurriscaldamento meno l'area che rappresenta l'effetto frigorifero. Facendo riferimento al ciclo di Carnot, le irreversibilità indotte dall'espansione mediante strozzatura riducono l'effetto frigorifero dell'area compresa sotto la linea 4C-4R; questa area rappresenta anche il lavoro aggiuntivo richiesto a causa della strozzatura (lavoro di espansione perso). Il lavoro aggiuntivo richiesto a causa del corno del vapore surriscaldato è rappresentato dall'area 2-2C-2R. Le irreversibilità indotte dalla strozzatura e dal corno del vapore surriscaldato sono influenzate dalla pendenza delle linee di saturazione.

Tali perdite sono maggiori vicino al punto critico, dove le linee di saturazione diventano gradualmente più appiattite per chiudere la curva a due fasi.

L'R-410A ha una temperatura critica inferiore a R-22, e per questo motivo le irreversibilità indotte dal corno del vapore surriscaldato e dalla strozzatura sono maggiori per l'R-410A rispetto all'R-22. Dei due componenti dell'R-410A, l'R-32 offre efficienza termodinamica superiore all'R-125 per le condizioni che interessano, mentre il componente R-125 controbilancia la limitata infiammabilità dell'R-32. Il componente R-125 aumenta anche il potenziale di riscaldamento globale (GWP) della miscela.

In conformità, altre miscele dell'R-32 possono presentare interesse. Due esempi, R-32/600 (95.0/5.0) e R-32/600a (90.0/10.0) sono inclusi per confronto nelle tabelle 3 e 4. Queste miscele azeotropiche di R-32 con n-butano e isobutano, rispettivamente, offrono vantaggi di efficienza (Yoshida et al., 1999) e potrebbero essere usate con oli lubrificanti minerali. Entrambe le miscele, tuttavia, sono alquanto infiammabili. Le simulazioni termodinamiche offrono intuizioni sulle efficienze ottenibili con cicli teorici, escludendo gli impatti delle proprietà di trasporto, la personalizzazione del ciclo, e gli effetti dei lubrificanti.

Le tabelle 4 e 5 forniscono efficienze di raffreddamento calcolate per alcuni sostituti dell'R-22 in climatizzatori autonomi e in refrigeratori raffreddati ad acqua con cicli



semplici (stadio singolo e nessuna personalizzazione per le proprietà individuali di specifici refrigeranti). Le tabelle indicano valori sia del coefficiente di prestazione (COP) sia della potenza specifica (l'inverso dell'efficienza), l'ultimo dei quali è più usato nella trattazione dei refrigeratori.

Refrigeranti con trasferimento di calore inferiore possono non fornire la stessa prestazione di quelli con trasferimento di calore superiore nonostante il vantaggio termodinamico, ma la progettazione può compensare questa differenza. Allo stesso modo, miscele con elevato glide di temperatura, come l'R-407C, possono non raggiungere la prestazione indicata con scambiatori di calore a flusso incrociato (aria o, meno frequentemente, acqua con movimento perpendicolare al flusso del refrigerante), ma possono superarla con scambiatori di calore in controcorrente.

Alcuni sostituti, come l'R-134a nei refrigeratori, offrono efficienze superiori all'R-22. Per altri, i costruttori hanno migliorato il progetto delle apparecchiature per compensare le perdite di efficienza teoriche. Domanski (1995) e Calm e Didion (1997) esaminano alcune delle implicazioni e degli interventi per compensare minore efficienza teori-

ca. Domanski e Payne (2002) indicano che l'R-410A soffre di una diminuzione di efficienza relativa in confronto all'R-22 ad alte temperature di condensazione, benché le sue prestazioni possano essere confrontabili con quelle dell'R-22 in condizioni di funzionamento tipiche.

Spatz e Yana Motta (2003) trattano le condizioni di abbassamento di pressione e di scambio di calore che portano miglioramenti di efficienza. Yoshida et al. (1999) presentano modi interessanti per ottenere efficienze più elevate usando miscele azeotropiche o quasi azeotropiche di R-32 con idrocarburi ed eventualmente rendere possibile un ritorno a lubrificanti a base di olio minerale, benché tali miscele siano infiammabili.

Esistono molte dichiarazioni contrastanti relative all'efficienza del biossido di carbonio (R-744, CO₂). Una ragione è che la maggior parte delle applicazioni richiedono un ciclo a compressione di vapore transcritico invece di uno convenzionale. Questo venerando refrigerante offre un potenziale significativo in alcune applicazioni. Un esempio è nello stadio inferiore dei sistemi di refrigerazione industriale in cascata, ma più frequentemente sostituisce l'ammoniaca in tale uso. Brown et al. (2002) offrono una valutazione dettagliata per applicazioni residenziali che fanno uso di modelli di ciclo a compressione di vapore sia convenzionali sia transcritici. La loro conclusione è che il biossido di carbonio produce un'efficienza significativamente inferiore quando si usano scambiatori di calore equivalenti. Questo suggerisce che le migliori proprietà di trasporto e il variamente dichiarato miglioramento nell'efficienza isoentropica del compressore non compensano lo svantaggio termodinamico. Questo svantaggio sarà anche più pronunciato per livelli di efficienza significativamente superiori a quelli comunemente scelti oggi.

Le prestazioni degli idrocarburi sono illustrate dalle efficienze indicate per il propano (R-290) in tabella 4 e per il propilene (R-1270) in tabella 5 messe a confronto con i vantaggi relativi alle proprietà ambientali indicati in tabella 3. Il loro limite fondamentale non è nelle prestazioni, ma nella sicurezza, come si vedrà nel seguito.

Condizioni	Ciclo ideale ^{a,b}			Condizioni tipiche ^{b,c}		
	(°C)	(%)	(°F)	(°C)	(%)	(°F)
temperatura media di evaporazione	10,0		50,0	10,0		50,0
surriscaldamento ^d	0,0		0,0	5,0		9,0
temperatura media di condensazione	35,0		95,0	46,1		115,0
sottoraffreddamento ^d	0,0		0,0	5,0		9,0
efficienza isoentropica compressore		100			70	
efficienza motore		100			90	
controllo e altro uso di potenza		0			0	

Refrigerante	COP		Potenza specifica	
	(kW/kW)	(kW/ton)	(kW/kW)	(kW/ton)
R-22	9,85	0,36	4,06	0,87
R-32 ^e	9,55	0,37	3,84	0,92
R-134a	9,86	0,36	4,13	0,85
R-290 (propano) ^e	9,68	0,36	4,05	0,87
R-407C	9,60	0,37	3,97	0,89
R-407E	9,67	0,36	4,00	0,88
R-410A	9,29	0,38	3,77	0,93
R-32/600 (95.0/5.0) ^e	9,54	0,37	3,85	0,91
R-32/600a (90.0/10.0) ^e	9,43	0,37	3,81	0,92

Tabella 4 - Efficienze comparate dei refrigeranti per climatizzatori autonomi

^a Le condizioni sono quelle relative alla condizione «A» dei valori nominali standard per climatizzatori autonomi e pompe di calore (ARI, 2003). I valori nominali standard specificano solo le temperature dell'aria all'ingresso all'interno (26,7°C, 80,0°F) e all'esterno (35,0°C, 95,0°F), ma la temperatura di evaporazione è in pratica vincolata a 10°C (50,0°F) per ottenere la deumidificazione.

^b I calcoli sono stati eseguiti con CYCLE_D 3.0 (Domanski et al., 2003)

^c Le condizioni si approssimano a quelle che normalmente si incontrano sul lato frigorifero del ciclo. Le efficienze «tipiche» indicate possono essere superate ottimizzando il sottoraffreddamento e il surriscaldamento, impiegando stadi multipli, o ricorrendo a modifiche di ciclo similari. Parimenti, progetti inadeguati possono condurre a prestazioni inferiori.

^d Surriscaldamento e sottoraffreddamento tipici variano con il refrigerante; il livello indicato è una scelta rappresentativa per i confronti.

^e Infiammabile

L'importanza dell'efficienza è sottolineata per due ragioni. La prima è che l'affrontare il cambiamento globale del clima richiederà significativi miglioramenti nelle prestazioni per ridurre le emissioni di gas serra legate all'energia. La seconda è che il minimo livello di efficienza imposto per le apparecchiature autonome – le maggiori utilizzatrici di R-22 – negli Stati Uniti aumenterà del 30% durante la transizione dall'R-22 nelle nuove apparecchiature.

Kul et al. (Kul 2004) riassumono valutazioni delle prestazioni per un gruppo di idrofluoroeteri (HFE) comprendenti miscele di HFE con HFC, proposte come alternativa all'R-22. La loro conclusione è che i coefficienti di prestazione (COP) calcolati erano tra l'80% e il 90% di quelli dell'R-

22. Essi hanno identificato l'R-E125 (CHF2OCF3) e le sue miscele ternarie con R-32 e R-134a o R-152a come i candidati più promettenti, ma anch'essi con coefficienti di prestazione solo dal 90% al 93% di quelli dell'R-22.

Considerazioni relative alla sicurezza

I refrigeranti fluorochimici erano stati introdotti per migliorare la sicurezza. Con l'eliminazione graduale di alcuni refrigeranti fondamentali, compreso l'R-22, alcuni dei proponenti sono a favore del ritorno a quelli che sono chiamati «refrigeranti naturali».

Essi comprendono l'ammoniaca, il biossido di carbonio, e gli idrocarburi. L'ammoniaca (R-717) presenta un interesse

Condizioni	Ciclo ideale ^{a,b}			Condizioni tipiche ^{b,c}		
	(°C)	(%)	(°F)	(°C)	(%)	(°F)
temperatura media di evaporazione	6,7		44,0	5,0		41,0
surriscaldamento ^d	0,0		0,0	1,0		1,8
temperatura media di condensazione	29,4		85,0	35,1		95,0
sottoraffreddamento ^d	0,0		0,0	5,0		9,0
efficienza isoentropica compressore		100			80	
efficienza motore		100			95	
controllo e altro uso di potenza		0			0	

Refrigerante	COP		Potenza specifica	
	(kW/kW)	(kW/ton)	(kW/kW)	(kW/ton)
R-22	10,92	0,32	6,17	0,57
R-32 ^e	10,64	0,33	5,97	0,59
R-123	11,42	0,31	6,52	0,54
R-134a	10,93	0,32	6,24	0,56
R-407C	10,69	0,33	6,09	0,58
R-410A	10,42	0,34	5,90	0,60
R-717 (ammoniaca) ^e	11,21	0,31	6,24	0,56
R-1270 (propilene) ^e	10,72	0,33	6,10	0,58

Tabella 5 - Efficienze comparate dei refrigeranti per refrigeratori raffreddati ad acqua

^a Le condizioni sono quelle relative a valori nominali standard per refrigeratori raffreddati ad acqua (ARI, 1998).

^b I calcoli sono stati eseguiti con CYCLE_D 3.0 (Domanski et al., 2003)

^c Le condizioni si approssimano a quelle che normalmente si incontrano sul lato frigorifero del ciclo. Le efficienze «tipiche» indicate possono essere superate ottimizzando il sottoraffreddamento e il surriscaldamento, impiegando stadi multipli, o ricorrendo a modifiche di ciclo simili. Parimenti, progetti inadeguati possono condurre a prestazioni inferiori.

^d Surriscaldamento e sottoraffreddamento tipici variano con il refrigerante; il livello indicato è una scelta rappresentativa per i confronti.

^e Infiammabile

significativo per la sua efficienza, come è indicato in tabella 5, e ha anche un costo basso. È il refrigerante più ampiamente usato nel trattamento degli alimenti e delle bevande e nei magazzini frigoriferi, ma la preoccupazione sulla tossicità (e specialmente sull'azione corrosiva sulla pelle) e sull'infiammabilità ne hanno frenato l'uso nel campo dei sistemi domestici. Il biossido di carbonio (R-744) è stato uno dei primi refrigeranti ed è ancora usato nei sistemi industriali. Tuttavia opera a pressioni molto più elevate dell'R-22 e richiede cicli transcritici, perché le temperature di condensazione convenzionali sono superiori alla sua temperatura critica. Gli idrocarburi, specialmente etano (R-170), propano (R-290), n-butano (R-600), isobutano (R-600a), etilene (R-1150), e propilene (R-1270), offrono buona efficienza e proprietà simili ad alcuni prodotti fluorochimici. Hanno costi discretamente bassi e sono

considerati accettabili dal punto di vista ambientale, ma sono altamente infiammabili e presentano significative preoccupazioni di sicurezza. Il loro uso richiede grande attenzione ai fattori della sicurezza.

Il livello di accettazione in Europa è più elevato per gli idrocarburi, sia nei piccoli sistemi (per esempio per sostituire l'R-12 nei frigoriferi domestici e negli impianti commerciali di raffreddamento delle bevande) sia nei grandi impianti isolati. L'uso dell'ammoniaca e del propilene è accettato nei refrigeratori raffreddati ad acqua situati in sale macchine protette, ma la dimensione complessiva del mercato è relativamente piccola. Considerazioni di responsabilità e normative di sicurezza frenano l'interesse nel loro uso in Nord America e nei paesi sviluppati dell'Asia. Lo Standard 15 dell'ASHRAE limita la quantità di refrigeranti infiammabili che possono essere usati nei grandi impianti.

Gruppo apparecchiatura	Applicazioni tipiche	Principali sostituti
climatizzatori da finestra	residenziale	R410A
climatizzatori e pompe di calore (aria-aria) autonomi monoblocco, e a impianto split	residenziale, commerciale leggero	R410A
climatizzatori split autonomi, pompe di calore geotermiche e ad acqua, multisplit	commerciale, istituzionale	R-410A
multisplit autonomi di grandi dimensioni	residenziale, commerciale, istituzionale	R410A R407C
refrigeratori raffreddati ad aria	commerciale, istituzionale	R-134a R410A
raffreddati ad acqua	impianti centralizzati	R134a R410A R123
refrigerazione commerciale	impianti centralizzati	R123 R134a
refrigerazione industriale	commerciale	R134a R404A R410A R507A
refrigerazione veicoli	industriale	R134a ammoniac
	trasporti	R134a

Tabella 6 - Principali sostituti dell'R22 per tipo di apparecchiatura

I costruttori si sono concentrati soprattutto sui refrigeranti classificati nello Standard 34 dell'ASHRAE come A1 (a bassa tossicità e che non manifestano propagazione di fiamma sulla base delle prove prescritte), in particolare per gli impianti residenziali e i piccoli impianti commerciali.

Compatibilità dei materiali

La modifica più significativa legata all'introduzione di sostituti dell'R-22 è relativa alla scelta del lubrificante. Mentre i sistemi a R-22 generalmente usavano oli minerali naftenici con additivi, gli idrofluorocarburi alternativi (HFC) richiedono lubrificanti sintetici perché la miscibilità assicuri il ritorno del lubrificante al compressore o ai compressori. I principali nuovi lubrificanti sono una gamma di polioliesteri (POE) di viscosità adeguata.¹

Per scopi speciali sono anche disponibili le alternative alchilbenzene (AB) e polivinilene (PVE).

Benché ampiamente usati con l'R-134a nei climatizzatori mobili e nella refrigerazione su mezzi di trasporto, i lubrificanti a base di glicole polialchilene (PAG) non sono diffusi negli impianti fissi.

¹ Al momento della stesura di quest'articolo esisteva una diffusa carenza di polioliesteri. Uno stabilimento che produceva una quota importante della fornitura mondiale di un acido usato nella produzione dei POE era stato chiuso a causa di problemi di sicurezza non legati all'acido. Questa chiusura inattesa ha provocato perturbazioni nella produzione che possono richiedere un anno per la loro soluzione.

La scelta del lubrificante è complessa e gli utenti dovrebbero seguire le raccomandazioni del costruttore dell'apparecchiatura o, nella progettazione degli impianti, del costruttore del compressore. Le prescrizioni di gestione che raccomandano di tenere l'umidità e altri contaminanti lontani dai circuiti di refrigerazione sono molto più restrittive per la maggior parte dei lubrificanti sintetici.

Le conversioni di aggiornamento tecnologico da R-22 ai suoi sostituti generalmente richiedono procedure speciali per la rimozione del lubrificante. Diversi produttori di refrigeranti offrono alternative all'R-22 specificamente formulate per rendere possibili conversioni del refrigerante senza cambiare il lubrificante.

Dal momento che l'R-22 è facilmente disponibile attualmente e lo sarà per il futuro prevedibile, la maggior parte degli utenti non richiederanno conversioni di refrigerante per le apparecchiature a R-22 esistenti, anche quelle prodotte negli anni futuri, per la loro normale durata, avendo cura di evitare e di riparare le perdite.

Altri problemi di compatibilità dei materiali sono complicati. L'industria dell'aria condizionata e della refrigerazione ha condotto un ampio studio pluriennale conosciuto come *Programma di ricerca sulla compatibilità dei materiali e sui lubrificanti* (Material Compatibility and Lubricant Research Program, MCLR) per valutare la compatibilità delle alternative con i materiali usati nella costruzione dei circuiti refrigeranti. I fornitori di apparecchiature e componenti insieme ai produttori di refrigeranti e di lubrificanti hanno con-

dotto ampi studi aggiuntivi per qualificare i materiali adatti alle sostituzioni. I problemi di compatibilità sono in generale risolti per i sostituti dell'R-22, ma i progettisti di componenti e di attrezzature devono essere attenti a scegliere materiali adatti.

L'ammoniaca è un sostituto particolare dell'R-22. Le apparecchiature usate sono alquanto diverse perché gli impianti ad ammoniaca sono tipicamente progettati per lubrificanti non miscibili. Mentre l'ammoniaca in sé è compatibile con il rame, questo non è vero quando è presente umidità. La conseguenza è che l'ammoniaca in generale non è usata con i metalli rameosi per gli scambiatori di calore, gli avvolgimenti di motori, o le tubazioni. La conversione di apparecchiature da R-22 ad ammoniaca non è normalmente fattibile. I refrigeranti a idrocarburi sono generalmente compatibili con i materiali usati negli impianti progettati per R-22 e spesso possono usare gli stessi lubrificanti o lubrificanti simili. Tuttavia la loro sostituzione richiede particolare attenzione ai problemi della sicurezza, e considerazioni specifiche per le singole applicazioni.

I principali sostituti dell'R-22

Il principale sostituto nei climatizzatori autonomi e nelle pompe di calore – il maggiore uso come refrigerante dell'R-22 – è l'R-410A, anche se la sostituzione non è diretta perché le differenze tra questi due refrigeranti suggeriscono progetti diversi. La maggior parte dei maggiori costruttori di apparecchiature offrono già prodotti R-410A per le dimensioni comuni. Circa il 10% dei prodotti autonomi usa R-410A, ma questa quota è probabile superi l'80% negli Stati Uniti entro la fine del 2007 e si avvicini al 100% entro la fine del 2009. L'R-410A è anche il principale sostituto per i climatizzatori da finestra riprogettati, i climatizzatori split autonomi, le pompe di calore geotermiche e quelle ad acqua, e i piccoli refrigeratori. Le alternative cambiano con l'aumento della dimensione delle apparecchiature, in particolare per i refrigeratori che usano compressori a vite. L'R-134a prende il posto di refrigerante più usato in questi refrigeratori di media dimensione, benché alcuni costruttori

usino l'R-410A e altri refrigeranti. L'R-134a opera a basse pressioni, mentre l'R-410A opera ad alte pressioni, quindi i progetti delle apparecchiature sono di nuovo diversi. I costruttori hanno pressoché abbandonato l'uso dell'R-22 nei refrigeratori di grandissima dimensione che usano compressori centrifughi. Questo sposta la scelta verso progetti che usano l'R-123 e l'R-134a, essendo attualmente l'R-123 più generalmente accettato. È anch'esso candidato all'eliminazione graduale dalla produzione quale HCFC, ma a date più avanzate rispetto all'R-22 a causa del suo inferiore potenziale di impoverimento dell'ozono (ODP) e grazie al riconoscimento di importanti benefici aggiuntivi (Calm e Didion 1997, Calm 2000, UNEP 2003b).

La tabella 6 riassume i principali sostituti dell'R-22 per tipo di apparecchiatura e applicazione.

L'attuale produzione di R-22 è inferiore alle quote di produzione assegnate. Penuria significativa di R-22 è improbabile grazie alla riserva di produzione stabilita per la manutenzione, alla possibilità di costituire scorte per l'uso futuro, all'esistenza di fluidi alternativi per la manutenzione, e al grande potenziale di recupero dell'R-22 in uso. Una eventuale scarsità per futuri fabbisogni di manutenzione porterebbe a maggiori prezzi e, a sua volta, a sostituzioni accelerate, al passaggio a fluidi di manutenzione alternativi, e a un maggiore recupero, per cui non ci si devono attendere importanti situazioni di penuria.

Conclusioni

Tutte le indicazioni puntano a un ordinato passaggio ai sostituti dell'R-22. Benché non sia stato identificato alcun refrigerante a singolo composto quale alternativa adatta alla maggior parte delle applicazioni, le miscele offrono tuttavia buone alternative. L'industria della climatizzazione e della refrigerazione ha sviluppato apparecchiature che mantengono

Nota

Alcuni dei refrigeranti o specifici processi produttivi o loro applicazioni sono protetti da brevetti di proprietà di altre parti; la citazione in questo documento non implica che la produzione o l'uso siano privi di vincoli.

REFERENZE

- ARI. 1998. *Standard for Water Chilling Packages Using the Vapor-Compression Cycle* (Standard 550/590-1998). Arlington, VA: Air-Conditioning and Refrigeration Institute.
- ARI. 2003. *Standard for Unitary Air-Conditioning And Air-Source Heat Pump Equipment* (Standard 210/240-2003). Arlington, VA: Air-Conditioning and Refrigeration Institute.
- Brown, J. S., Y. Kim, and P. A. Domanski. 2002. «Evaluation of Carbon Dioxide as R-22 Substitute for Residential Air Conditioning.» *ASHRAE Transactions* 108(2).
- Calm, J. M., and D. A. Didion. 1997. «Trade-Offs in Refrigerant Selections: Past, Present, and Future.» *Refrigerants for the 21st Century* (proceedings of the ASHRAE/NIST Refrigerants Conference, Gaithersburg, MD, 6-7 October 1997) 6-19. Atlanta, GA: ASHRAE.
- Calm, J. M. 2000. «Options and Outlook for Chiller Refrigerants.» *Proceedings of the Earth Technologies Forum* pp. 239-248. Arlington, VA: Alliance for Responsible Atmospheric Policy.
- Calm, J. M., and G. C. Hourahan. 2001. «Refrigerant Data Summary.» *Engineered Systems* 18(11):74-88.
- Domanski, P. A., 1995. «Minimizing Throttling Losses in the Refrigeration Cycle.» *Proceedings of the International Congress of Refrigeration* pp. 766-773. Paris, France: International Institute of Refrigeration.
- Domanski, P. A., D. A. Didion, and J. S. W. Chi. 2003. *CYCLE_D: NIST Vapor-Compression Design Program* (version 3.0), Standard reference database 49. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology (NIST).
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis — Contribution of Working Group I to the IPCC Third Assessment Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) of the World Meteorological Organization (WMO) and the United Nations Environment Programme (UNEP). Edited by J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Kul I., D. D. DesMarteau, and A. L. Beyerslein. 2004. «Coefficient of performance of fluorinated ether and fluorinated ether mixtures.» paper 4711, *ASHRAE Transactions* 110(2)
- Minor, B. H. 2004. «R410A and R407C Design and Performance – A Literature Review.» *Proceedings of the Earth Technologies Forum*. Arlington, VA: Alliance for Responsible Atmospheric Policy.
- Payne, W. V., and Domanski, P.A. 2002. «A Comparison of an R22 and an R410A Air Conditioner Operating at High Ambient Temperatures.» *Proceedings of the 9th International Refrigeration Conference at Purdue*, paper R2-1. West Lafayette, IN: Purdue University.
- Spatz, M. W., and S. F. Yana Motta. 2003. «An Evaluation of Options for Replacing HCFC-22 in Commercial Refrigeration Systems.» *Proceedings of the International Congress of Refrigeration paper ICRO510*. Paris, France: International Institute of Refrigeration.
- WMO. 2003. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002*, report 47. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO) Global Ozone and Research Monitoring Project. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme (UNEP). Washington, DC, USA: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Washington, DC, USA: National Aeronautics and Space Administration (NASA) Office of Earth Science. Brussels, Belgium: European Commission, Research Directorate General. Chaired by A-L. N. Ajavon, D. L. Albritton, G. Mégie, and R. T. Watson.
- UNEP. 1987 with subsequent amendments. *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme (UNEP).
- UNEP. 2003a. *Handbook for the International Treaties for the Protection of the Ozone Layer* (sixth edition). Nairobi, Kenya: UNEP Ozone Secretariat
- UNEP. 2003b. *2003 Report of the Refrigeration, Air-Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee – 2002 Assessment*, United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya, January 2003
- Yoshida Y., M. Funakura, N. Okaza, and M. Matsuo. 1999. «Residential Use Air Conditioner for Advanced COP: Acceptability of HFC-32/Hydrocarbon Mixtures.» *Heat Pumps - a Benefit for the Environment* (proceedings of the Sixth IEA Heat Pump Conference). Frankfurt am Main, Germany: WVEW-Verlag.

gono o aumentano la loro efficienza con i fluidi di sostituzione. I favorevoli risultati ottenuti con i primi prodotti e l'esperienza fatta con la precedente eliminazione dei cloro-fluorocarburi (CFC) suggeriscono che l'eliminazione graduale dell'R-22 sarà gestibile e stimolerà significative inno-

vazioni tecnologiche. E analogamente all'esperienza dell'eliminazione dei CFC, non ci si aspettano significative situazioni di scarsità per i futuri fabbisogni di manutenzione dell'R-22 nonostante il termine della sua produzione. ■

Sugli autori

James M. Calm, P.E., è consulente di ingegneria a Great Falls, Va, USA. E-mail: jmc@JamesMCalm.com

Piotr A. Domanski, Ph.D., dirige il HVAC&R Equipment Performance Group del National Institute of Standards and Technology a Gaithersburg, Md, USA. E-mail: piotr.domanski@nist.gov