



*Cambiamenti climatici: i ghiacciai si ritraggono, l'acqua diminuisce, i raggi solari intrappolati aumentano l'effetto serra*



# **SOSTITUZIONI A BASSO GWP PER L'R404A IN UN CONGELATORE COMMERCIALE**

**J. GERSTEL  
CHEMOURS DEUTSCHLAND GMBH**



## **SOSTITUZIONI A BASSO GWP PER L'R404A – TEST DI PRESTAZIONI IN UN CONGELATORE COMMERCIALE**

Joachim Gerstel

Chemours Deutschland GmbH, Technology and Regulatory Manager EMEA  
Neu-Isenburg, Germania, Tel. +49 6033 16627, [Joachim.Gerstel@chemours.com](mailto:Joachim.Gerstel@chemours.com)

### **Astratto**

L'R-404A è stato lo standard industriale come refrigerante HFC per la refrigerazione commerciale per piccoli e grandi. Tuttavia, a causa del suo elevato potenziale di riscaldamento globale (AR4 100 anni GWP = 3922), sono necessarie delle alternative all'R-404A a basso GWP. In particolare, il regolamento Europeo F-Gas adottato di recente richiede l'utilizzo di alternative a basso GWP.

Dei regolamenti sui limiti dei GWP elevati per gli HFC sono anche stati proposti in altre regioni. Per far fronte a questa necessità, sono state sviluppate rispettivamente due miscele di refrigeranti di idrofluoroolefine (HFO) con GWP <150 e <240 denominati Opteon™ XL20 (R-454C) e XL40 (R-454A). Entrambi sono una miscela di HFO-1234yf e HFC-32. HFO-1234yf è nella formulazione per ridurre drasticamente il GWP e HFC-32 è stato aggiunto per aumentare la capacità di raffreddamento e fornire prestazioni simili a quelle dell'R-404A. XL20 è stato sviluppato per piccoli sistemi ermeticamente sigillati sottoposti al divieto di fluidi con un GWP > 150 per la refrigerazione commerciale a partire dal 2022. XL40 offre prestazioni migliori con un GWP leggermente superiore, e rappresenta la soluzione ideale per sistemi più piccoli, non ermeticamente sigillati. Sebbene siano leggermente infiammabili, le piccole dimensioni di carica presenti nei sistemi autonomi sono in grado di accogliere refrigeranti con un certo grado di infiammabilità.

Questo documento presenta i risultati dei test sperimentali di XL20 e XL40 in un congelatore autonomo originariamente progettato per funzionare con l'R-404A. I parametri di prestazioni standard verranno misurati e confrontati prendendo l'R-404A come riferimento e includeranno i consumi energetici, le pressioni, le temperature e la portata massica.

### **Introduzione**

L'identificazione di alternative a basso GWP nella refrigerazione commerciale continua ad essere una necessità perché il principale refrigerante HFC attualmente utilizzato l'R-404A con un GWP 100 anni di 3922 (IPCC4), tra i più alti dei refrigeranti HFC. Sebbene siano state sviluppate alternative A1 non infiammabili come Opteon™ XP40 (R-449A) e Opteon™ XP44 (R-452A), è necessario disporre di opzioni con GWP inferiori per soddisfare le normative recentemente emanate nell'ambito del regolamento Europeo F-Gas 517/2014. Due nuovi refrigeranti sono stati sviluppati con prestazioni simili a quelle dell'R-404A, denominate Opteon™ XL20 e Opteon™ XL40.

Entrambi hanno ricevuto una classificazione di sicurezza di A2L e il nome provvisorio di R-454C e R-454A rispettivamente. Mentre Opteon™ XL20 (R-454C) è una miscela contenente 21,5 in peso % di R-32 e 78,5 in peso % di HFO-1234yf, Opteon™ XL40 (R-454A) è composto da 35 in peso % di R-32 e 65 in peso % di HFO-1234yf; Il contenuto più alto di R-32 consente di ottenere prestazioni migliori con Opteon™ XL40 ma porta a un leggero aumento del GWP, che ammonta a 238 (IPCC5). Opteon™ XL20 ha un GWP inferiore di 146 (IPCC5) che rimane al di sotto dell'importante soglia di 150 dei regolamenti

F-Gas ed Ecodesign. Siccome sono leggermente infiammabili, il loro utilizzo sarà probabilmente limitato ai sistemi diretti di carica di piccole e medie dimensioni. Le prestazioni di entrambi sono state valutate su un congelatore commerciale originariamente progettato per essere alimentato con l'R-404A. Sono state valutate anche la stabilità termica e la compatibilità dei materiali.

## Proprietà Termodinamiche e Prestazioni

Un confronto tra le proprietà termofisiche di Opteon™XL20 e Opteon™XL40 rispetto all'R-404A è riportato nella tabella 1. I punti di ebollizione sono molto simili al punto critico di circa 7-10 K superiore a R-404A. Pressioni di vapore e densità liquide sono leggermente inferiori, così come la densità di vapore che ridurrà i flussi di massa.

**Tabella 1:** Proprietà Termofisiche

	<b>R-404A</b>	<b>Opteon™ XL20 (R-454C)</b>	<b>Opteon™ XL40 (R-454A)</b>
Punto di ebollizione ° C	-47	-46	-48
Punto critico ° C	72	82	79
Pressione di vapore a 25 ° C in kPa	1254	1169	1342
Densità liquida a 25 ° C in kg / m3	1044	984	977
Densità di vapore a 25 ° C in kg / m3	65.3	44.3	47.7

Per valutare le prestazioni di raffreddamento termodinamiche, è stata eseguita la modellazione ciclica per XL20 contro R-404A in condizioni di refrigerazione a bassa temperatura: Temperatura dell'evaporatore = -35 ° C, Temperatura del condensatore = 40 ° C, Quantità subcool = 2 K, Superheat = 15 K e compressore Efficienza isentropica = 70%. I risultati sono riportati nella Tabella 2.

**Tabella 2:** Prestazioni del Ciclo Termodinamico

	Psuct bar.g	Pdisch bar.g	Tdisch °C	Tglide, Evap °C	CAP kW	CAP Rel à R- 404A	COP	COP Rel à R- 404A
<b>R-404A</b>	0.64	17.2	84	0.4	82.3	100%	1.252	100%
<b>Opteon™ XL20 (R- 454C)</b>	0.25	14.5	95	4.4	73.3	89%	1.362	109%
<b>Opteon™ XL40 (R- 454A)</b>	0.54	17.2	108	4.3	97.0	111%	1.372	110%

Opteon™ XL20 (R-454C) presenta pressioni e capacità leggermente più basse di R-404A perché è un refrigerante di pressione inferiore. Tuttavia, l'efficienza del ciclo termodinamico è superiore del 9% rispetto a quella R-404A. Opteon™ XL20 ha anche una moderata temperatura di glide. Tuttavia altri refrigeranti come R-407C, che sono stati utilizzati con successo per molti anni, hanno una glide di temperatura superiore a 5 K. Anche le temperature di scarico del compressore sono circa 11 K più elevate di R-404A, ma ben al di sotto delle temperature che possono richiedere iniezione di liquidi o vapore, di solito

superiore a circa 135 ° C. D'altra parte, Opteon™ XL40 offre un chiaro vantaggio sulle prestazioni. Esso presenta una maggiore capacità (+11%) e una migliore efficienza (+10%) rispetto a R-404A. La glide è nello stesso ordine di grandezza di Opteon™ XL20. Lo scarico di temperatura è più alto (+24 K) a causa della maggiore quantità di R-32, ma ancora al di sotto dei valori critici di molte tecnologie dei compressori.

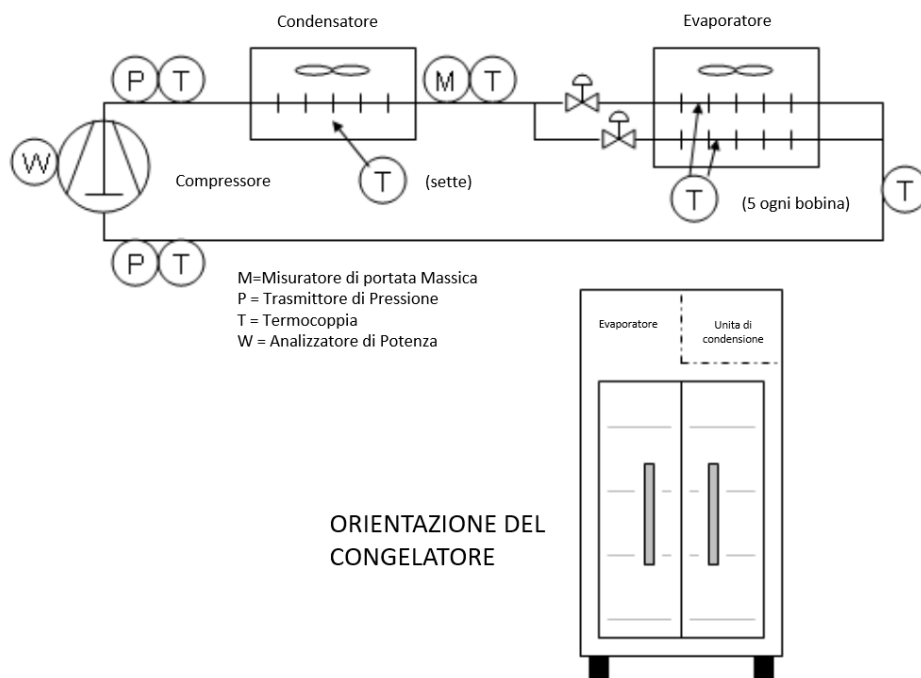
### Test con un Congelatore Commerciale



Al fine di misurare le prestazioni di XL20 in un sistema, è stato selezionato un congelatore commerciale, completamente equipaggiato e posizionato in una stanza a temperatura costante. Il congelatore era stato progettato originariamente per un'unità a doppia porta da 1,5 m3 per R-404A con una carica di refrigerante di 1,05 kg. Ha un compressore alternativo che utilizza un lubrificante da 32 centistokes di estere di poliolo (POE) di 1,15 kg. Il sistema è controllato con una valvola di espansione termica (TXV). Una foto dell'unità è mostrata in Figura 1.

**Figura 1:** Congelatore commerciale alimentato con R-404A utilizzato nei test sperimentali

Il congelatore è stato posizionato in una stanza a temperatura costante e completamente equipaggiato con temperature (T), pressioni (P), portata massica (M) e misura di energia (W) come mostrato in Figura 2.



**Figura 2:** Schema di strumentazione del congelatore

**Opteon™ XL20 (R-454C):** I test sono stati condotti a due condizioni ambientali 32° C e 21° C. Un primo test di riferimento è stato realizzato con R-404A. A ciascuna condizione, il surriscaldamento all'uscita dell'evaporatore è stato controllato regolando la TXV di 3-4 K.

La temperatura media interna dello scompartimento del freezer (media di quattro letture termocoppie) era sotto controllo a -17° C. Dopo il primo test, R404A è stato sostituito con XL20. È stata condotta un'ottimizzazione della carica per ottimizzare il consumo di energia. Una carica bassa è stata inizialmente introdotta nel sistema, dopodiché si è proceduto a misurare il surriscaldamento ed il consumo energetico. Un carica addizionale è stata aggiunta fino a che il consumo energetico è stato ridotto al minimo. La carica del refrigerante per XL20 è stata di 1 kg, circa il 5% in meno rispetto a R-404A. Una nuova carica dello stesso lubrificante POE è stata aggiunta al sistema per impedire la contaminazione incrociata dal test di base. Non sono state apportate altre modifiche al sistema tranne la regolazione del surriscaldamento dell'evaporatore con la TXV in modo da soddisfare le condizioni di surriscaldamento del R-404A, tenendo conto del glide di temperatura di XL20. Per XL20, la TXV è stata chiusa a circa 1 1/2 giri a causa della portata massica inferiore. I risultati sono riportati nella Tabella 3.

**Tabella 3:** Congelatore commerciale, risultati del test Opteon™ XL20 - unità SI

	<b>EC (kWhr/giorno)</b>	<b>EC Rel to R404A</b>	<b>M (kg/hr)</b>	<b>Psuct (bar.a)</b>	<b>Pdisch (bar.a)</b>	<b>CR</b>	<b>Tdisch (°C)</b>
<b>Ambiente T = 32°C</b>							
R404A	34.3	100%	43	2.2	20.7	9.4	96
XL20	34.8	101%	35	1.7	17.9	10.4	103
<b>Ambiente T = 21°C</b>							
R404A	23.7	100%	48	2.0	15.9	7.9	77
XL20	24.4	103%	33	1.7	13.5	8.2	82

Le pressioni di esercizio e la portata massica sono minori per XL20, come previsto dall'analisi termodinamica. Anche il rapporto di compressione di XL20 era simile a R-404A. XL20 mostra un consumo di energia superiore di circa il 1-3% per R-404A. Questo non era previsto in base al COP più alto osservato nell'analisi termodinamica. Tuttavia, l'analisi termodinamica non tiene conto delle altre variabili del sistema come le efficienze del compressore, le proprietà di trasferimento di calore, la caduta di pressione e altri fattori. Esiste l'opportunità di ottimizzazione un nuovo sistema progettato per l'utilizzo con le proprietà specifiche XL20. I risultati indicano inoltre che l'efficienza è migliorata a condizioni ambientali con temperature più alte. Anche se le temperature di scarico del compressore di XL20 erano leggermente superiori rispetto a R-404A, esse erano ancora all'interno di un intervallo che non dovrebbe richiedere l'iniezione di liquido. L'iniezione di liquido è solitamente necessaria a temperature di scarico superiori a circa 130° C.

**Opteon™ XL40 (R-454A):** I test sono stati effettuati in tre condizioni ambientali, a 32° C, 24° C e 21° C. È stato effettuato un primo test di riferimento con R-404A nelle tre condizioni ambientali. A ogni condizione, il surriscaldamento all'uscita dell'evaporatore è stato controllato regolando la TXV di 3-4 K. Il surriscaldamento dell'evaporatore è stato calcolato considerando la pressione di aspirazione e la lettura della temperatura all'uscita dell'evaporatore. La temperatura interna dello scomparto del congelatore è stata controllata a -17° C. Il compressore è stato mantenuto in ciclo per mantenere la temperatura decisa dello scomparto. Le temperature e le pressioni sono riportate come medie solo a compressore in funzione. Dopo il test, R404A è stato sostituito con XL40. In ogni prova, il sistema è stato svuotato per rimuovere il lubrificante e una nuova carica dello stesso tipo di

lubrificante POE è stata aggiunta al sistema. Non sono state apportate altre modifiche al sistema se non la regolazione del surriscaldamento dell'evaporatore grazie alla TXV (chiuso a un giro) in base alle condizioni di surriscaldamento del R-404A. I risultati dello stato stazionario sono mostrati nella tabella 4.

**Tabella 4:** Risultati di prova del congelatore Risultati Opteon™ XL40 - Unità SI

	<b>EC (kWhr/giorno)</b>	<b>EC Rel to R404A</b>	<b>M (kg/hr)</b>	<b>Psuct (bar.a)</b>	<b>Pdisch (bar.a)</b>	<b>CR</b>	<b>Tdisch (°C)</b>
<b>T Ambiente = 32°C</b>							
R404A	33,46	100%	44	2.1	20.3	10	90
XL40	30,81	92%	34	1.9	21.3	11	105
<b>T Ambiente = 24°C</b>							
R404A	25,11	100%	46	2.0	16.5	8	75
XL40	23,91	95%	35	1.8	17.3	9	91
<b>T Ambiente = 21°C</b>							
R404A	23,39	100%	48	2.0	15.6	8	70
XL40	22,62	97%	36	1.8	16.0	9	85

I risultati sperimentali nel congelatore commerciale usando XL40 presentano prestazioni simili a quelle dell'R-404A con un miglioramento dell'efficienza energetica in condizioni ambientali più elevate. XL40 ha consumato 8% di energia in meno con una temperatura ambientale di 32° C; A temperature più basse, XL40 ha inoltre dimostrato un'efficienza migliore del 3-5%. La portata massica era leggermente inferiore e la temperatura di scarico era leggermente superiore. Tuttavia, le temperature di scarico erano ancora abbastanza basse per non richiedere l'iniezione di liquido.

### **Stabilità Termica**

XL20 è stato valutato per la stabilità termica in tubi di vetro sigillati utilizzando ASHRAE Standard 97 con POE 32 centistoke come lubrificante. Poiché è composto dagli stessi elementi, questi risultati sono validi anche per Opteon™ XL40. I tubi di vetro sono stati caricati con acciaio al carbonio, rame e alluminio. Si è effettuato il vuoto per rimuovere l'aria, poi sono stati aggiunti il refrigerante e il lubrificante ai tubi e quindi congelati. In alcuni tubi, la contaminazione di aria (2000 ppm) è stata aggiunta al refrigerante e la contaminazione dell'umidità (500 ppm) è stata aggiunta all'olio. I tubi sono stati sigillati e invecchiati in un forno riscaldato a una temperatura di 175 °C per 14 giorni. I tubi sono stati visivamente ispezionati e analizzati dopo l'esposizione a ioni fluoruro utilizzando la cromatografia ionica. Alte concentrazioni di ioni di fluoruro indicherebbero la decomposizione del fluido. MDL (Limite minimo di rilevazione) indica che il livello di ioni di fluoruro è al di sotto del limite di rilevazione (MDL = 0,3 ppm). Come indicato nella Tabella 5, XL20 è stato ritenuto termicamente stabile dato che quantità trascurabili di ioni di fluoruro sono state generate, e il metallo e fluidi non mostravano cambiamenti visibili.

**Tabella 5: Risultati della stabilità termica**

Temp. Di invecchiamento (°C)	Aria (ppm)	Aqua (ppm)	Fluorione F-(ppm)	Ispezione visiva di cedole e fluidi
XL20	Niente	Niente	0.31	Nessun Cambiamento
XL20	Niente	500	0.51	Nessun Cambiamento
XL20	2000	Niente	MDL	Nessun Cambiamento
XL20	2000	500	MDL	Nessun Cambiamento

### Compatibilità di Plastiche ed Elastomeri

La compatibilità di Opteon™ XL20 – che si è dimostrata esemplare anche per Opteon™ XL40 - è stata valutata con una gamma di materie plastiche ed elastomeri comunemente utilizzati nell'industria della refrigerazione. Diversi campioni di materie plastiche ed elastomeri sono stati preparati e i loro pesi iniziali e dimensioni misurati. I tubi sono stati quindi posizionati in tubi di vetro sigillati che sono stati riempiti con refrigerante puro o una miscela 50/50 di lubrificante refrigerante e POE. I tubi sono stati riempiti e messi in un forno a 100 °C per due settimane. Dopo il riscaldamento, le plastiche sono state rimosse e misurate per verificare i cambiamenti nelle proprietà fisiche (peso, lunghezza e durezza) ventiquattro ore dopo la rimozione dai tubi. Il seguente sistema di valutazione è stato utilizzato per caratterizzare la compatibilità dei diversi campioni testati:

#### Valutazione

**0** </ = 10% aumento o perdita in peso e </ = 10% rigonfiamento lineare e </ = 10 cambi di durezza

**1** > 10% aumento o perdita in peso, o > 10% di rigonfiamento lineare o > 10 cambi di durezza

**2** > 10% aumento o perdita in peso e > 10% di rigonfiamento lineare e > 10 cambi di durezza

I risultati delle valutazioni delle materie plastiche sono riportati nella Tabella 6. Le prestazioni, molto simili sia per R-404A che XL20, indicano che ci sono molte materie plastiche ed elastomeri adatti per l'utilizzo con XL20. Nel complesso, le materie plastiche mostrano meno reattività dell'elastomero, un risultato comune dei test di compatibilità con il refrigerante. Va riconosciuto che questi dati riflettono la compatibilità nei test con tubi sigillati e che la compatibilità del refrigerante in sistemi reali può essere influenzata dalle reali condizioni operative, la natura del polimero utilizzato, la formulazione del compound dei polimeri, e dai processi di indurimento o vulcanizzazione utilizzati per creare il polimero. Gradi così specifici, additivi, ecc. possono variare e potenzialmente influenzare i risultati per diversi polimeri e altri materiali.



**Tabella 6:** Compatibilità di materie plastiche ed elastomeri per XL20 e R-404°

Materiali Testati	Valutazione R-404A	%Wt Cambiamento	% Lunghezza Cambiamento	Durezza Delta	Valutazione XL20	%Wt Cambiamento	% Lunghezza Cambiamento	Durezza Delta
Neoprene 1	0	3%	1%	1	0	2%	2%	3
epicloridrina	0	9%	3%	-9	0	9%	3%	-6
Gomma butilica	1	13%	4%	-8	1	13%	5%	-10
EPDM	0	7%	2%	-8	0	7%	3%	-9
fluorosilicone	1	6%	3%	-14	0	6%	3%	-8
HNBR	1	16%	5%	-6	1	16%	4%	-7
NBR	1	12%	4%	-10	1	11%	5%	-9
fluorocarbon e FKM	1	18%	10%	-12	1	19%	9%	-11
Neoprene 2	0	9%	4%	-6	0	9%	4%	-4
Viton A	1	17%	8%	-12	1	18%	9%	-10
Viton GF	0	10%	5%	-10	1	9%	4%	-13
poliestere	0	9%	3%	-3	0	9%	2%	-5
Resina nylon	0	-1%	1%	-1	0	0%	-1%	0
poliammide-immide	0	0%	0%	0	0	0%	0%	-1
Polifenilensolfuro	0	0%	0%	-2	0	0%	0%	0
PEEK	0	0%	0%	-1	0	0%	0%	0
Plastica in polimero nylon 6.6	0	-1%	0%	0	0	0%	0%	0
PTFE	0	2%	1%	-1	0	2%	2%	-3

## Conclusioni

Due nuovi refrigeranti a base di HFO, Opteon™ XL20 (R-454C) e XL40 (R-454A), sono stati sviluppati come potenziali sostituti a basso GWP per R-404A nella refrigerazione commerciale. XL20 ha un GWP di circa 146 che è del 96% inferiore rispetto a R-404A. Entrambi sono leggermente infiammabili (2L) e pertanto possono avere alcune limitazioni per l'utilizzo nei sistemi di carica del refrigerante più grandi come gli scaffali di supermercati. Tuttavia, sono adatti per i singoli sistemi a condensazione e per i refrigeratori e congelatori autonomi. Le prestazioni in uscita di entrambi sono state valutate in un congelatore commerciale originariamente progettato per R-404A. Le uniche modifiche apportate al sistema sono state un aggiustamento TXV. Nel complesso, il consumo di energia di Opteon™ XL20 è paragonabile a R-404A mentre si riduce con Opteon™ XL40. L'efficienza è migliorata in condizioni ambientali più elevate. Le compatibilità delle materie plastiche ed elastomeri sono simili a quelle di R-404A. L'uso di Opteon™ XL20 e XL40 può ridurre drasticamente l'impatto ambientale dei sistemi di refrigerazione aiutando nella transizione dall'R-404A grazie a un refrigerante con prestazioni e proprietà simili.

