

Fluidi refrigeranti a ridotto effetto serra per sostituire R404A nei trasporti

Il Regolamento F-Gas sta spingendo a trovare nuovi fluidi refrigeranti a ridotto effetto serra. I risultati di una ricerca che ha previsto l'uso di R452A in un gruppo frigorifero installato su un camion frigo dedicato al trasporto refrigerato

*di S. Mancin, G. Righetti**

LE NORMATIVE INTERNAZIONALI, quali il Regolamento F-Gas in Europa, e il progressivo aumento del costo degli HFC rendono sempre più pressante la richiesta di sostituirli a ridotto effetto serra. Tale processo di progressiva riduzione è già in corso da qualche anno nel settore dei trasporti refrigerati e le esperienze maturate possono essere facilmente estese a settori diversi della refrigerazione.

Alcune aziende produttrici di sistemi frigoriferi per camion già dal 2015 stanno proponendo R452A come sostituto di drop-in di R404A, ma purtroppo questa è una soluzione adottabile solo fino al 2022, secondo l'attuale Regolamento F-Gas.

Serve quindi una approfondita ricerca per individuare soluzioni a basso effetto serra di lungo termine. In tal senso, vengono qui riportati i principali risultati di una ricerca condotta presso l'Università di Padova.

L'impatto ambientale della refrigerazione

Per molti alimenti la refrigerazione è un aspetto fondamentale in ogni fase del processo di lavorazione, distribuzione e conservazione.

L'impatto ambientale dovuto alla refrigerazione è molto elevato: si stima che circa il 3% delle emissioni globali di CO₂ equivalente siano dovute alla refrigerazione di derrate alimentari, di cui circa l'11% sia da attribuirsi alla refrigerazione durante il trasporto (Wakeland et al., 2012; Garnett 2007).

In un report di un'azienda inglese produttrice di trasporti refrigerati, ripreso dal sito internet dell'IIR [1], è evidenziato come l'aumento demografico e il cambiamento delle abitudini alimentari abbiano avuto un forte impatto sul trasporto refrigerato. Si stima che entro il 2025 i veicoli refrigerati circolanti sulle nostre strade, che nel 2013 erano stimati tra i 3 e i 4 milioni, possano raggiungere i 15,5 milioni. Tale crescita è dovuta tra l'altro all'aumento della tendenza a consumare cibi fuori stagione e all'importanza crescente dei mercati emergenti, in termini sia di importazioni sia di esportazioni, rispettivamente +12% e +6% annui per il solo mercato italiano. Ogni singolo gruppo di refrigerazione alimentato da un convenzionale motore diesel causa l'emissione di NOx fino a 6 volte e la produzione di particolato fino a 29 volte maggiore rispetto a un moderno camion diesel Euro6: 15,5

milioni di veicoli significano fino a 740 milioni di tonnellate di CO₂ equivalente ogni anno per le sole unità di refrigerazione ed emissioni di particolato paragonabili a quelle di 450 milioni di camion diesel Euro6.

Inoltre, è bene notare che l'impronta di carbonio di un qualsiasi trasporto refrigerato, ossia il suo impatto sulle emissioni di CO₂ equivalente nell'intero arco della sua vita, dalla produzione allo smaltimento, comprende una quota di emissioni diretta, dovuta all'utilizzo e alle eventuali perdite di fluido frigorifero, e una indiretta, formata dalle quote di energia spese durante il suo ciclo di vita (Wu et al., 2013).

Attualmente la maggior parte delle unità installate su trasporti refrigerati utilizza come fluido frigorifero R404A, che ha un indice GWP di 3943, ben superiore ai limiti imposti dal Regolamento F-gas [1],

che prevede che a partire dall'1 gennaio 2020 nei sistemi refrigerati commerciali non potranno più essere impiegati refrigeranti con un GWP superiore a 2500, valore che scenderà a 150 dall'1 gennaio 2022.

Alcune tra le principali aziende produttrici di sistemi frigoriferi per camion già dal 2015 stanno proponendo R452A come sostituto di drop-in di R404A, ma purtroppo R452A può essere considerato una soluzione solo fino al 2022, per cui è necessario trovare nuovi refrigeranti alternativi al fluido ad alto effetto serra R404A

per ridurre la quota di emissioni dirette collegate al singolo refrigerante e per aumentare l'efficienza di funzionamento dell'intero sistema.

Sostituti di R404A di lungo periodo

Per identificare i fluidi più promettenti è stato definito un ciclo termodinamico di riferimento che fosse rappresentativo delle tipiche condizioni operative del trasporto refrigerato (Zilio, 2015); si tratta di un ciclo base a compressione di vapore, che lavora con valori della temperatura di evaporazione, T_{evap} , pari a $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, mantenendo costante la temperatura di condensazione, T_{cond} , pari a $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Il surriscaldamento del gas all'evaporatore e il sottoraffreddamento del liquido al

condensatore sono stati trascurati. Il compressore è stato caratterizzato dal suo rendimento isentropico, considerato costante e pari a 70% per $T_{evap} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a 60% per $T_{evap} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sono stati pre-selezionati 21 fluidi puri e 45 miscele, che sono stati successivamente confrontati con R404A, scelto come riferimento per la selezione dei suoi possibili sostituti di medio e lungo periodo. In particolare, i fluidi puri sono:

- 6 HFC: R32, R134a, R152a, R125, R161;
- 9 HFO: R1234yf, R1234ze(E), R1216, R1233zd(E), R1243zf, R1225ye(E), R1225ze(Z), R1225zc, R1234ye(E);
- 6 Fluidi naturali:
 - 4 Idrocarburi: R290, R600a, R1270, DME;
 - Anidride carbonica (R744), Ammoniaca (R717).

Le miscele sono quelle predefinite dal programma RefProp v9.1 del NIST [3], utilizzato anche per calcolare le proprietà termofisiche dei refrigeranti nelle condizioni di lavoro del ciclo simulato. Tra queste miscele predefinite, risulta particolarmente interessante R452A, recentemente proposta come fluido alternativo al R404A fino al 2022 poiché presenta un GWP minore di 2500 e proprietà termofisiche simili a quelle del fluido tradizionale.

Le simulazioni termodinamiche hanno inoltre coinvolto 140 miscele binarie definite utilizzando i 21 fluidi puri precedentemente presentati, variando la composizione molare di ciascun componente tra 0,05 e 0,95 e utilizzando le regole di miscelazione predefinite del programma Refprop v9.1.

Il calcolo del GWP delle miscele binarie così ottenute è stato condotto seguendo la procedura definita all'Allegato IV del Regolamento F-Gas [2], considerando la media pesata sulla frazione di massa di ciascun componente. In Tabella 1 sono riassunte le condizioni operative simulate. In particolare, sono stati calcolati i valori del coefficiente di effetto utile, COP, definito come rapporto fra l'effetto frigorifero e il lavoro di compressione, l'effetto frigorifero volumetrico, VCC, definito come prodotto fra l'effetto frigorifero e la densità del vapore saturo alla temperatura di evaporazione, e la temperatura di scarico, T_{dis} , del gas compresso dal compressore. I risultati ottenuti alle due temperature di evaporazione simulate per il fluido di riferimento R404A sono riportati in Tabella 2.

I valori elencati in Tabella 3 hanno permesso la definizione di alcuni criteri per l'identificazione dei possibili fluidi alternativi al R404A di medio e lungo periodo, sintetizzati in Tabella 4. Il primo filtro riguarda la prestazione globale del refrigerante: il fluido alternativo deve presentare un COP maggiore o almeno uguale a quello ottenuto per R404A. Il secondo e il terzo criterio prendono in considerazione la possibilità di utilizzare lo stesso compressore già montato nelle macchine frigorifere: il fluido alternativo deve avere un effetto frigorifero volumetrico simile ($\pm 10\%$) a quello del R404A e una temperatura di scarico del gas inferiore al limite superiore di $120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tra i 21 fluidi puri e le 45 miscele predefinite,

Tabella 1 – Condizioni operative simulate

T_{evap} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{cond} [$^{\circ}\text{C}$]	ΔT_{sub} [K]	ΔT_{sup} [K]	η_{is} [-]
-5	55	0	0	0,7
-30	55	0	0	0,6

Tabella 2 – Prestazione del fluido di riferimento R404A

T_{evap} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{cond} [$^{\circ}\text{C}$]	COP [-]	VCC [kJ m^{-3}]	T_{dis} [$^{\circ}\text{C}$]
-5	55	1,76	1987,1	69,6
-30	55	0,76	666,7	88,1

Tabella 3 – Criteri di selezione dei fluidi alternativi a R404A

Criterio	$T_{evap} = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{evap} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$
GWP	<2500 (Soluzione di medio termine) <150 (Soluzione di lungo termine)	<2500 (Soluzione di medio termine) <150 (Soluzione di lungo termine)
COP	$\geq 1,76$	$\geq 0,76$
VCC [kJ m^{-3}]	$1788 < \text{VCC} < 2186$	$600 < \text{VCC} < 733$
T_{dis} [$^{\circ}\text{C}$]	<120	<120

Tabella 4 – Prestazioni dei fluidi alternativi selezionati

Fluido	Composizione della miscela (Frazione di massa) [%]	GWP [$\text{kg}_{eq}\text{CO}_2$]	COP [-]	VCC [kJ m^{-3}]	T_{dis} [$^{\circ}\text{C}$]
$T_{evap} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$					
R290	-	3,3	0,98	727,6	100,2
R438A	R32/R1234ze(E)/R134a/R600/R601a (9/44/45/2/1)	706	0,80	708,1	105,5
R452A	R32/125/1234yf (11/59/39)	2141	0,76	621,8	96,9
R511A	R290/dme (95/5)	3	0,99	732,8	101,1



SUBSTITUTES OF HFCs IN REFRIGERATED TRANSPORT

The International Regulation, such as the recent European Union F-Gas regulation 517/2014, and the continuous increasing of the cost of HFCs are pushing the demand of alternative eco-friendly refrigerants. The truck refrigeration systems have been coping with this reduction process for a few years so far and the gained knowledge and experience can be easily transferred to other refrigeration fields. Since 2015, some refrigerant manufacturers have been proposing the R452A as possible drop-in substitute of R404A, but unfortunately, according to F-gas regulation, this solution will be allowed to be used till 2022. In this scenario, a dedicated research activity to identify possible long-term substitutes of HFCs is surely needed. This paper presents the main results achieved by the University of Padova.

Keywords: F-Gas regulation, refrigerated transport, R404A

solamente 9 hanno superato la selezione a $T_{\text{evap}} = -5^\circ\text{C}$ e di questi solamente 4 quella a $T_{\text{evap}} = -30^\circ\text{C}$, come mostrato in Tabella 4 dove, per brevità, sono presentati solo i risultati nelle condizioni più gravose con $T_{\text{evap}} = -30^\circ\text{C}$.

Dall'analisi dei risultati di Tabella 4 si può notare come siano già presenti due soluzioni molto interessanti, una di medio periodo, R452A, e una di lungo periodo, R290. In particolare, R452A è stato recentemente proposto come fluido alternativo a R404A perché presenta caratteristiche termodinamiche che lo rendono direttamente utilizzabile negli attuali sistemi refrigerati e il suo GWP risulta inferiore alla soglia prevista all'1 gennaio 2022 per cui può essere considerato una soluzione di medio periodo. Il propano, R290, mostra prestazioni interessanti che lo candidano come sostituto di lungo periodo, purché si individuino opportune soluzioni tecnologiche adatte a mitigare il rischio connesso alla sua infiammabilità.

Tra le 140 miscele binarie definite sulla base dei 21 fluidi puri pre-selezionati, sono state individuate diverse soluzioni di lungo periodo per la sostituzione di R404A. I risultati delle simulazioni sono riportati in Tabella 5. Le miscele più interessanti sono quelle che combinano il propano e un HFO, fluidi di ultima generazione a bassissimo GWP; tra essi le miscele R290/R1234yf, R290/R1234ze(E) e R290/R1216 mostrano ottime prestazioni.

Le soluzioni a lungo termine ($\text{GWP} < 150$) individuate necessitano tutte di una riprogettazione parziale, talvolta totale, dei componenti delle attuali macchine frigorifere per la refrigerazione commerciale e industriale. ■

* Simone Mancin e Giulia Righetti, Università degli Studi di Padova

Tabella 5 – Prestazioni delle miscele binarie

Fluido	Composizione della miscela (Frazione di massa) [%]	GWP [kg _{eq} CO ₂]	COP [-]	VCC [kJ m ⁻³]	T _{dis} [°C]
T_{evap} = -30 °C					
HFC/altro refrigerante					
R161/R600a	66/34	9	1,08	663,9	117,6
R161/R1216	37/63	5,1	2,17	1819,9	86,8
HC/altro refrigerante					
R1270/R600a	63/37	1,4	1,12	691,3	106,7
R1270/R1216	22/78	1,4	0,86	727,2	119,2
R290/DME (R511A)	95/5	3	0,99	732,8	101,1
R290/R600a	87/13	3,3	1,08	684,0	94,2
R290/HFO					
R290/R1234yf	88/12	3	0,96	714,2	97,8
R290/R1234ze(E)	88/12	3	0,97	717,0	99,3
R290/R1216	85/15	3	0,92	697,8	92,2
R290/R1233zd(E)	87/13	3	1,05	721,8	109,9
R290/R1243zf	58/42	3	1,08	683,5	116,0
R290/R1225ye(E)	75/25	3	1,10	726,9	118,0
R290/R1225ye(Z)	75/25	3	1,09	725,3	115,7
R290/R1225zc	75/25	3	1,08	724,5	114,7
R290/R1234ye(E)	78/22	3	1,08	721,0	110,9
R290/R1234yf	88/12	3	0,96	714,2	97,8
R290/R1234ze(E)	88/12	3	0,97	717,0	99,3
R290/R1216	85/15	3	0,92	697,8	92,2
R290/R1233zd(E)	87/13	3	1,05	721,8	109,9
R290/R1243zf	58/42	3	1,08	683,5	116,0

BIBLIOGRAFIA

- Garnett T. 2007. Food Refrigeration: What Is The Contribution To Greenhouse Gas Emissions And How Might Emissions Be Reduced? Working paper of the Food Climate Research Network Centre for Environmental Strategy University of Surrey, April 2007.
- Tassou S.A., De Lille G., Ge Y.T. 2009. Food transport refrigeration – Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport. Applied Thermal Engineering, 29, 1467–1477.
- Wakeland W., Cholette S., Venkat K. 2011. Green Technologies. In: Food Production and Processing, Ch. 9, 211–236. Berlin: Springer.

- Wu X., Hu S., Mo S. 2003. Carbon footprint model for evaluating the global warming impact of food transport refrigeration systems. Journal of Cleaner Production, 54, 115–124.
- Zilio C., Mancin S., Brown J.S., Longo G.A. 2015. New Refrigerant Options for R404A Replacement in Truck Refrigeration Systems. Proceedings of ICR2015, 16–22 August 2015, Yokohama.

WEBGRAFIA

- www.iifir.org
- <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&from=EN>
- www.nist.gov/srd/refprop

R452A COME SOLUZIONE DI BREVE/MEDIO PERIODO: UN CASO DI STUDIO

Vista la necessità di individuare un sostituto di medio termine per R404A che possa essere facilmente ed economicamente utilizzato direttamente nelle attuali macchine frigorifere, si è deciso di prendere in considerazione R452A, che ha caratteristiche termodinamiche e termofisiche molto vicine a R404A, per cui può essere impiegato direttamente, senza apportare alcuna modifica, nelle macchine frigorifere dedicate ai trasporti refrigerati. R452A è stato testato in un gruppo frigorifero installato su un camion frigo dedicato al trasporto refrigerato di derrate con un valore di temperatura pari a 4 °C equipaggiato con un gruppo frigo TS300 di potenza frigorifera nominale pari a 6 kW, mostrato in Figura 1.

I test sono stati condotti durante il periodo estivo e hanno riguardato le due fasi tipiche del funzionamento del sistema: quella di raffreddamento del cargo a partire dalla temperatura ambiente e quella relativa alle 24 ore. Le prestazioni energetiche dei due fluidi sono state confrontate individuando due giornate tipo che presentassero condizioni ambientali simili, in modo da garantire l'attendibilità dei risultati. Il container refrigerato è rimasto parcheggiato per tutto il periodo di analisi ed è stato sempre alimentato elettricamente.

Le Figure 2 e 3 mostrano i risultati sperimentali ottenuti. In particolare, la Figura 2

mostra il confronto tra la potenza elettrica assorbita dal gruppo frigorifero che utilizza R452A, misurata durante la fase di raffreddamento del cargo dalla temperatura di circa 35 °C fino alla temperatura di operatività impostata di 4 °C, e quella assorbita nella stessa operazione utilizzando R404A.

Dall'analisi del grafico si può notare che la fase di raffreddamento, nel caso in cui si utilizzi R452A, è più breve e il consumo elettrico finale è di circa 6,4% minore rispetto al caso in cui è utilizzato il fluido tradizionale; il consumo elettrico infatti passa da 3,99 kWh nel caso del R404A a 3,75 kWh nel caso del suo sostituto di medio termine R452A.



Figura 1 – Foto del cargo refrigerato equipaggiato con l'unità frigorifera utilizzata

La Figura 3 mostra il confronto tra il consumo elettrico del gruppo frigorifero operante con i due fluidi frigoriferi sulle 24 ore; sono state considerate due giornate tipo che presentavano simili andamenti della temperatura ambiente, pari in media giornaliera a 30,9 °C, con picchi di temperatura ambiente superiore a 36 °C. Dall'analisi dei dati riportati si può notare come il comportamento della macchina frigorifera sia pressoché lo stesso; infatti, il consumo elettrico giornaliero della macchina

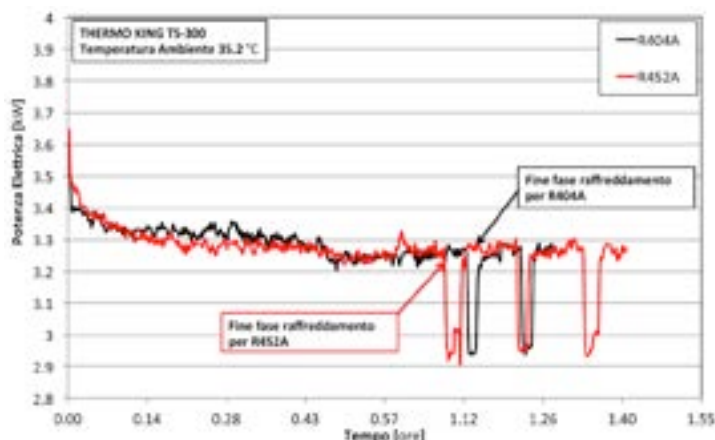


Figura 2 – Potenza elettrica assorbita dal gruppo frigo durante il test di raffreddamento del cargo

operante con R452A è pari a 80,1 kWh che risulta circa dell'1% inferiore rispetto a quello misurato nel caso di R404A, pari a 81,0 kWh.

I risultati sperimentali mostrano che il fluido R452A, recentemente proposto come sostituto di medio termine del fluido R404A, presenta una compatibilità totale con i gruppi frigoriferi attualmente in uso e delle prestazioni energetiche simili, talvolta migliori, rispetto al fluido tradizionale.

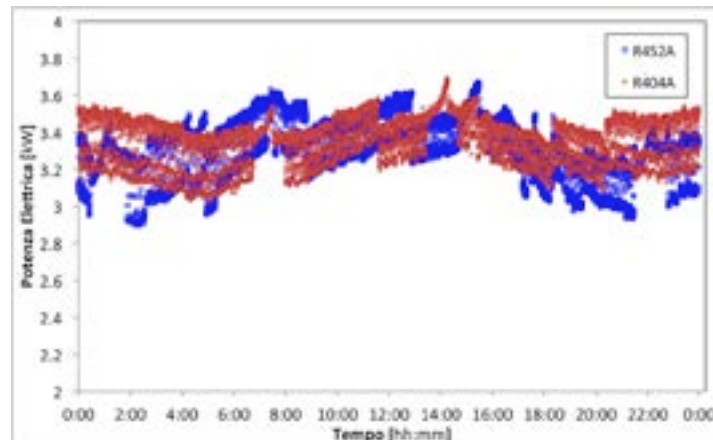


Figura 3 – Potenza elettrica assorbita dal gruppo frigo durante il test su 24 h

Istituto Internazionale del Freddo e AiCARR: una sinergia consolidata per promuovere un futuro sostenibile

L'IIF/IIR è una Organizzazione intergovernativa cui partecipano i 60 Paesi più industrializzati ed è unanimamente riconosciuta come la più alta e autorevole voce in campo scientifico e tecnico in un settore, quello della refrigerazione, delle pompe di calore e delle macchine per il condizionamento dell'aria, ad alto valore economico, sociale e tecnologico. L'impatto economico e sociale della refrigerazione sulla filiera alimentare e del condizionamento dell'aria sul comfort delle persone negli spazi abitati sono fatti così noti e consolidati da non dover essere ulteriormente sottolineati. La contribuzione italiana all'Istituto Internazionale del Freddo (Institute International du Froid/International Institute of Refrigeration, IIF/IIR) risale al 1920, anno della sua costituzione a Parigi e non si è mai arrestata, salvo negli anni di guerra. L'Italia, oltre a essere stato uno dei Paesi fondatori dell'IIF/IIR, è sempre stato uno dei Paesi che ha maggiormente contribuito all'attività dell'Istituto, sia in termini economici che, soprattutto, in termini scientifici e tecnologici. Il sistema produttivo del settore, che crea una fetta importante del PIL, sente come prioritaria la presenza italiana nell'IIF/IIR in quanto è cosciente che la spinta culturale che l'Istituto è capace di creare costituisce una leva indispensabile per il trasferimento tecnologico e l'innovazione di cui l'industria si nutre per crescere e mantenersi competitiva a livello globale.

L'IIF/IIR esercita da tempo un'autorevole azione propositiva nei consessi internazionali, gestiti dalle Nazioni Unite, che si occupano di problematiche ambientali come l'assottigliamento della fascia di ozono stratosferica e il riscaldamento climatico. Questo è un tema particolarmente sentito dall'industria nazionale che necessita di un canale affidabile di informazione e formazione sulle misure di tipo ambientale e di sicurezza da adottare per non correre il rischio di perdere opportunità di crescita nel mercato globale. Fin dalla sua fondazione, AiCARR è attiva nell'ambito dell'IIR ed è attualmente membro Corporate, cosa che le permette di avere accesso a un canale di formazione e informazione di vitale importanza per favorire la leadership del tessuto produttivo italiano del settore in ambito globale, con le evidenti ricadute positive sui propri soci, sia produttori, progettisti e professionisti dell'ambito della climatizzazione o della refrigerazione. Molti dei rappresentanti italiani nominati dal governo italiano presso l'IIF-IIR sono soci AiCARR: attraverso tale rappresentanza AiCARR ha quindi la possibilità di partecipare e influenzare lo spazio culturale nel quale transitano l'innovazione e lo sviluppo del settore, sia quelli portati dall'industria e dalla ricerca italiana nel mondo sia quelli elaborati all'esterno e che potrebbero essere utilmente sfruttati in Italia.

IIR da sempre patrocina le conferenze e i seminari di AiCARR nel settore del freddo, a

livello sia nazionale che internazionale. Inoltre, AiCARR beneficia di alcuni strumenti concreti accessibili ai membri corporate come:

- nel sito di IIR (www.iifir.org) è disponibile un motore di ricerca, Fridoc, che rappresenta la più completa banca dati di pubblicazioni su riviste, sia scientifiche che di taglio più tecnologico, e di memorie presentate nei convegni;
- nel sito è disponibile, in Italiano, il Dizionario Internazionale del Freddo con diverse migliaia di termini specialistici che possono essere tradotti in nove lingue, tra cui arabo, cinese, giapponese e russo;
- dal sito è possibile scaricare gratuitamente centinaia di articoli in versione originale dagli atti dei numerosi convegni organizzati ogni anno da IIR. Tali convegni rappresentano indiscutibilmente a livello internazionale gli eventi di assoluta eccellenza per la discussione e l'aggiornamento sui più recenti sviluppi nel campo tecnologico e di ricerca nel settore del freddo e delle pompe di calore;
- dal sito è possibile scaricare gratuitamente centinaia di articoli pubblicati su International Journal of Refrigeration, la più importante rivista scientifica del settore;
- IIR rende disponibili ai soci, con cadenza quasi mensile, delle newsletters che riportano le principali novità a livello internazionale nei settori del freddo e delle pompe di calore nel campo della ricerca e della innovazione tecnologica, provenienti dagli istituti di ricerca e dalle aziende leader del settore;
- periodicamente IIR pubblica delle "note" che affrontano in veste di breve monografia e in maniera rigorosa alcune tra le principali tematiche che riguardano il trasferimento tecnologico della ricerca condotta nel campo del freddo a livello mondiale;
- accesso alla Expertise directory che consente di ricercare e contattare via mail gli esperti della rete internazionale IIR che comprende più di 500 membri delle diverse Commissioni. Questa directory abilita alla ricerca di esperti in più di 120 campi nel settore del freddo in sessanta diverse nazioni;
- accesso alla Laboratory Directory, che contiene informazioni su circa 300 laboratori in 55 nazioni. Vengono fornite utili informazioni sulle attività svolte da ciascun laboratorio e i contatti;
- accesso ai report dei lavori delle 10 commissioni e dei numerosi Working Groups, le cui attività coprono praticamente tutti i settori del freddo dalla criogenia al condizionamento dell'aria, alle pompe di calore, all'impatto ambientale delle diverse tecnologie.

Fabio Polonara, Università Politecnica delle Marche – Socio AiCARR – Delegato nazionale per l'Italia presso l'IIR/IIF