

# SPERIMENTAZIONE DI UNA MACCHINA FRIGORIFERA FUNZIONANTE AD ARIA PER LA SURGELAZIONE DEI PRODOTTI I.Q.F.

**Andrew Gigiel, Giuliano Giuliani, Fabio Polonara and Christian Vitale**

*Andrew Gigiel CCC Consultants, Fariview Moorlynch Bridgwater Somerset TA7 9BY UK  
Telephone: +44 (0)1458 210123, Email: [a.gigiel@btinternet.com](mailto:a.gigiel@btinternet.com)  
Formerly: FRPERC University of Bristol Langford Bristol BS40 5DU UK*

*Fabio Polonara, Giuliano Giuliani and Christian Vitale, Dipartimento di Energetica Università Politecnica delle Marche 60100 Ancona, Italy Telephone: +39-0712204432, fax: +39-0712804239, Email: [f.polonara@univpm.it](mailto:f.polonara@univpm.it)*

## INTRODUZIONE

Nell'ambito della ricerca e della sperimentazione di nuove tecnologie da applicare nel campo dell'industria alimentare, questo lavoro ha come obiettivo lo studio di un prototipo di macchina frigorifera operante su un ciclo inverso ad aria. Tale macchina, accoppiata con un surgelatore rotante tipo chiuso (Rotofreezer), sarà destinata alla preparazione di prodotti surgelati I.Q.F. (Individually Quick Frozen).

L'utilizzo di una macchina frigorifera avente come fluido operativo l'aria non rappresenta una novità nel campo della refrigerazione anche se, fino ad oggi, le uniche applicazioni riguardavano esclusivamente gli impianti di condizionamento, in particolare quelli di treni ed aerei, i cui impianti richiedono dimensioni contenute, elevata sicurezza e ridotta manutenzione.

I crescenti investimenti, dettati soprattutto da ragioni di salvaguardia ambientale, operati su questo tipo di macchine, nonché l'evoluzione nei materiali e nella costruzione degli scambiatori di calore (in particolare quelli rigenerativi, fondamentali nel ciclo ad aria) e delle turbomacchine, hanno portato alla possibilità di raggiungere temperature di esercizio molto basse, anche inferiori a  $-80^{\circ}\text{C}$ , idonee alla surgelazione degli alimenti.

Lo scopo del presente lavoro è di caratterizzare la macchina frigorifera per poterne valutare le sue prestazioni e le sue potenzialità in un più ampio contesto come l'industria alimentare.

## 1. LA MACCHINA FRIGORIFERA AIRS 50

Il sistema frigorifero ad aria, oltre ad essere estremamente sicuro, si pone, anche dal punto di vista economico, come una buona alternativa agli impianti di surgelazione tradizionali utilizzati in ambito commerciale. L'aria, infatti, non solo garantisce l'assoluta sicurezza del processo, in quanto non modifica le proprietà organolettiche dei cibi, ma soprattutto costituisce un refrigerante molto più economico rispetto a quelli utilizzati nella surgelazione criogenica (azoto liquido e  $\text{CO}_2$ ), quindi non influisce in maniera significativa sul prezzo finale del prodotto.

In figura 1 è riportata la macchina installata presso il laboratorio di tecnica del freddo nel Dipartimento di Energetica dell'Università Politecnica delle Marche.



**Figura 1** – AIRS 50

La macchina frigorifera AIRS 50 (acronimo di Air Cycle Refrigerant System) costruita dall'azienda giapponese Earthship Co, funziona con un ciclo di Brayton-Joule inverso ad aria a doppia compressione, con refrigerazione intermedia e rigenerazione interna. I componenti principali sono:

- Compressore di 1° stadio
- Primo scambiatore
- Compressore 2° stadio
- Secondo scambiatore
- Rigeneratore lato alta pressione
- Organo di espansione (turbina)
- Trappola per il ghiaccio (ice capture)
- Utilizzatore
- Rigeneratore lato bassa pressione

La macchina è dotata di una valvola di bypass: quando il bypass è aperto, l'aria circola solo nel circuito della macchina e non nel rotofreezer. Questo permette alla macchina di rimanere sempre a basse temperature (intorno ai  $-75^{\circ}\text{C}$ ) e nello stesso tempo permette di poter ispezionare il rotofreezer con un rapido ritorno alle normali condizioni di funzionamento. In figura 2 è riportato lo schema della macchina AIRS, mentre in figura 3 il relativo ciclo su un piano T-s.

Con i valori delle entalpie riportati nella tabella 1 è possibile calcolare il COP termodinamico del ciclo:

$$\text{COP}_t = \frac{h_8 - h_7}{h_2 - h_1} = 0.718$$

Il COP reale è decisamente più basso considerando che viene sviluppata una potenza frigorifera di circa 15 kW a fronte di un assorbimento di 28 kW elettrici.

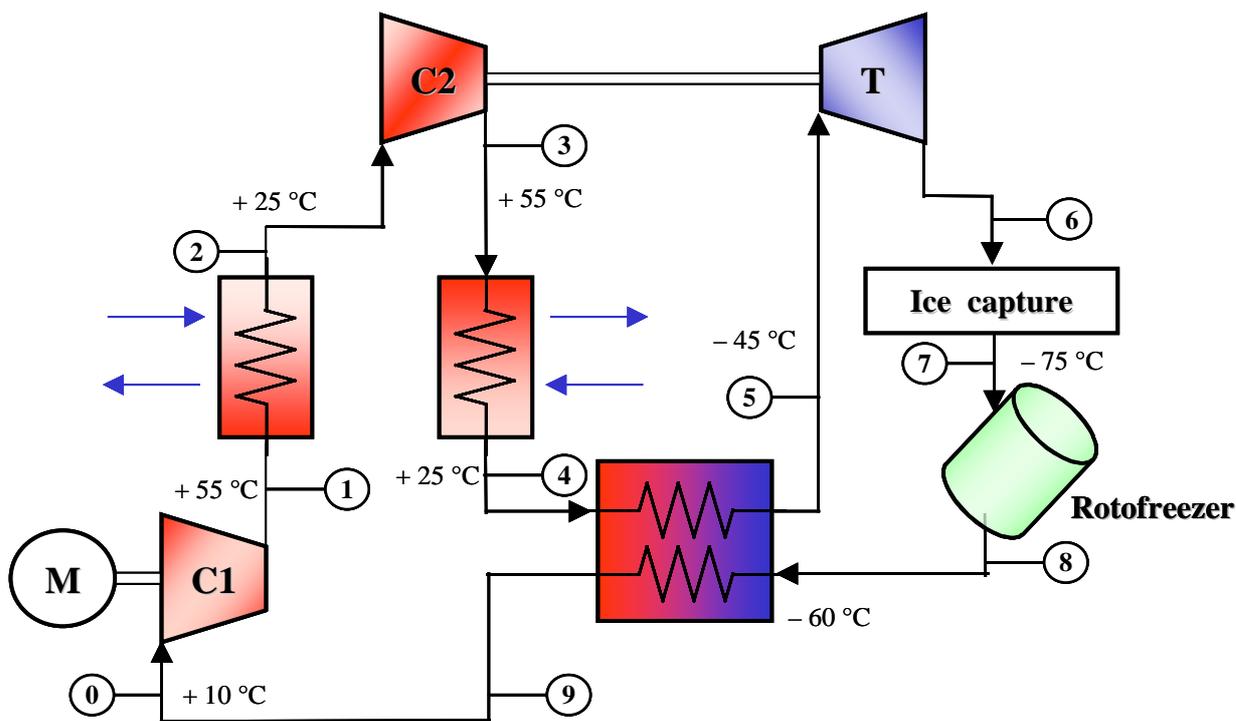


Figura 2 – Schema della macchina AIRS

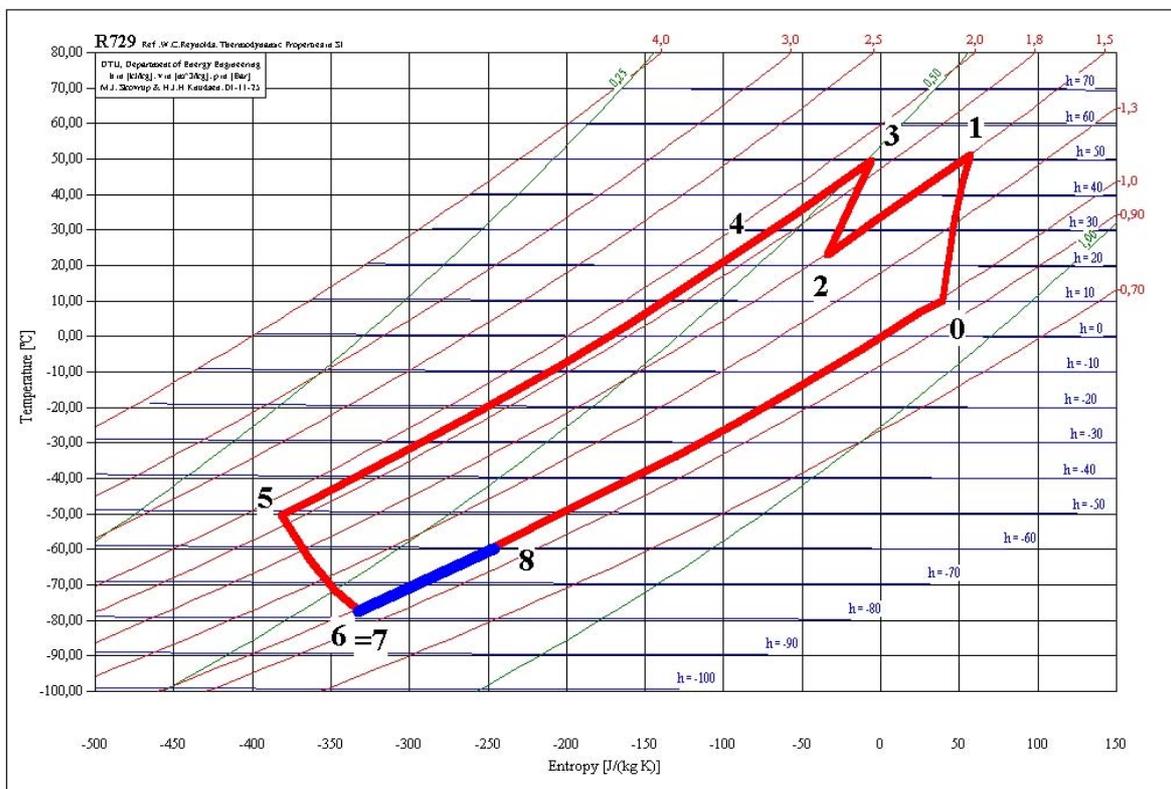


Figura 3 – Diagramma T-s del ciclo

Punti del ciclo	Temperatura [°C]	Pressione [MPa]	Entalpia [kJ kg <sup>-1</sup> ]	Entropia [J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
1	30	0.1	532.20	3961.46
2	65	0.14	567.48	3975.02
3	40	0.14	542.21	3897.39
4	70	0.18	572.47	3917.52
5	40	0.18	542.13	3825.00
6	-25	0.18	476.46	3589.92
7	-55	0.1	446.36	3629.52
8	-30	0.1	471.68	3739.00

Tabella 1 – Stati di riferimento del ciclo di figura 2

## 2. VALUTAZIONI PRELIMINARI

Sono state effettuate misure di pressione e temperatura in ciascuno dei punti mostrati in figura 1. A circa 3 m dalla mandata della macchina, dove il flusso con buona approssimazione può ritenersi privo di moti turbolenti, è stato inserito un venturimetro a boccaglio per poter misurare la portata di aria. Questo parametro è uno dei più importanti in quanto permette di monitorare l'afflusso di aria nel rotofreezer. In figura 4 è riportato l'andamento della portata di refrigerante in funzione della temperatura.

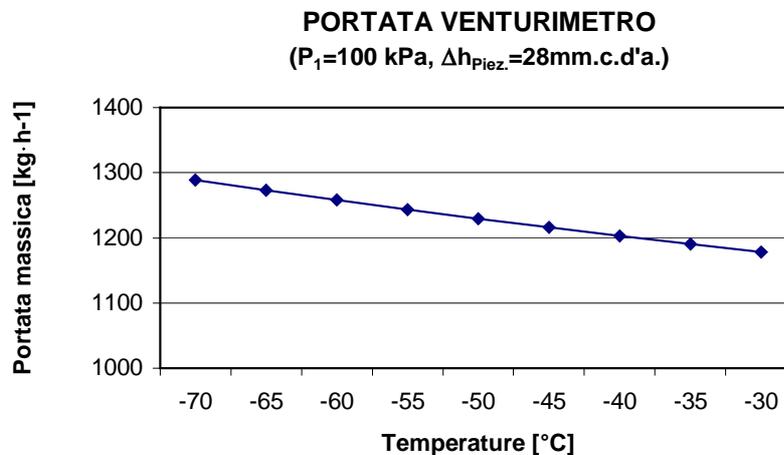


Figura 4 – Andamento della portata di aria al variare della temperatura

Inoltre, sono state misurate le temperature all'ingresso e all'uscita del rotofreezer; gli andamenti sono riportati nella figura 5.

Si è reso necessario valutare le rientrate termiche attraverso il circuito di collegamento e nel rotofreezer poiché le stesse costituiscono un carico termico aggiuntivo che l'aria deve asportare (figura 6).

La determinazione dei carichi termici è stata effettuata ipotizzando costante la temperatura dell'aria all'interno dei condotti a  $-80^{\circ}\text{C}$ , la temperatura dell'ambiente esterno pari a  $23^{\circ}\text{C}$  e trascurabili le variazioni di sezione dei tubi. In tabella 2 e tabella 3 vengono valutati i carichi termici di tutti i tratti soggetti a rientrate termiche e i carichi termici per i vari elementi. Il totale delle rientrate termiche considerate è circa pari a 2.34 kW.

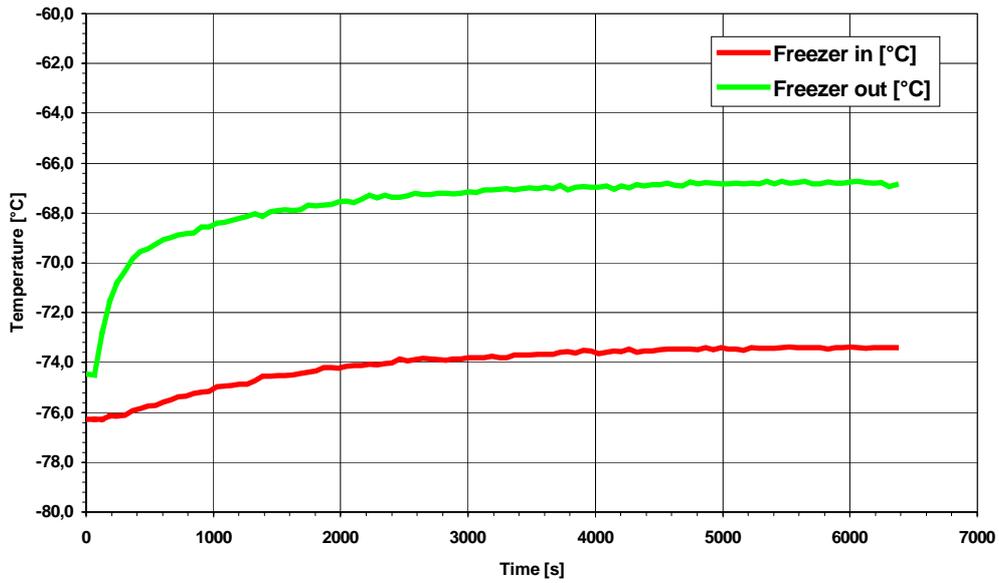


Figura 5 – Andamento delle temperature all'ingresso e all'uscita del rotofreezer

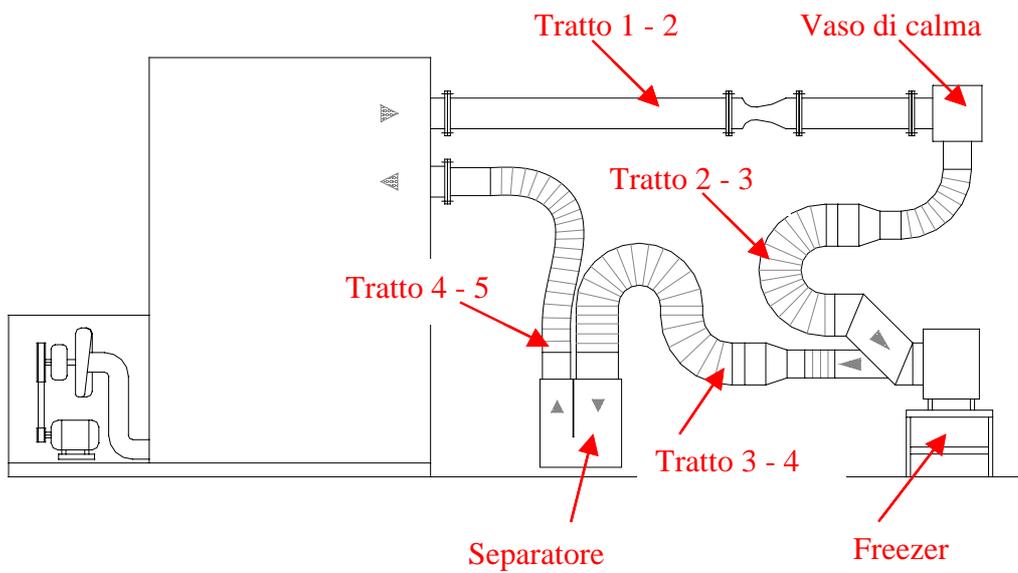


Figura 6 – Tratti soggetti a rientrate termiche

Tratto	Lung.[mm]	R <sub>I</sub> [mm]	R <sub>E</sub> [mm]	T <sub>I</sub> [°C]	T <sub>E</sub> [°C]	Rientrate [kW]
1 - 2	3460	109	160	-75	23	0.222027986
2 - 3	3560	100	132	-75	23	0.315825232
Freezer	410	275	275	-75	23	0.695953879
3 - 4	2700	125	157	-75	23	0.291759005
4 - 5	3300	100	132	-75	23	0.292759344

Tabella 2 – Carichi termici nei condotti

Elemento	Lung. [mm]	Lato	T <sub>I</sub> [°C]	T <sub>E</sub> [°C]	Rientri [kW]
Vaso di calma	500	64	-75	23	0.082023115
Separatore	680	32	-75	23	0.320891906

Tabella 3 – Carichi termici nei vari elementi considerati

### 3. PROVE EFFETTUATE

#### 3.1 Prove senza carichi termici

I valori della riduzione di temperatura della macchina sono riportati in figura 7. La temperatura più bassa è stata raggiunta all'uscita della turbina; qui infatti, la temperatura è passata da quella ambiente a  $-82^{\circ}\text{C}$  in 2.6 h.

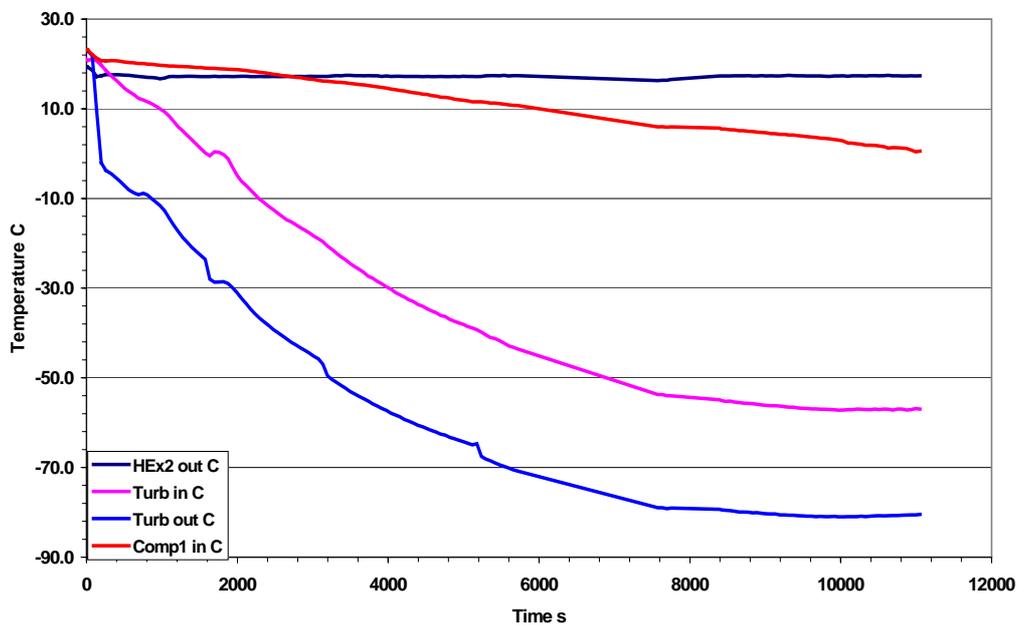


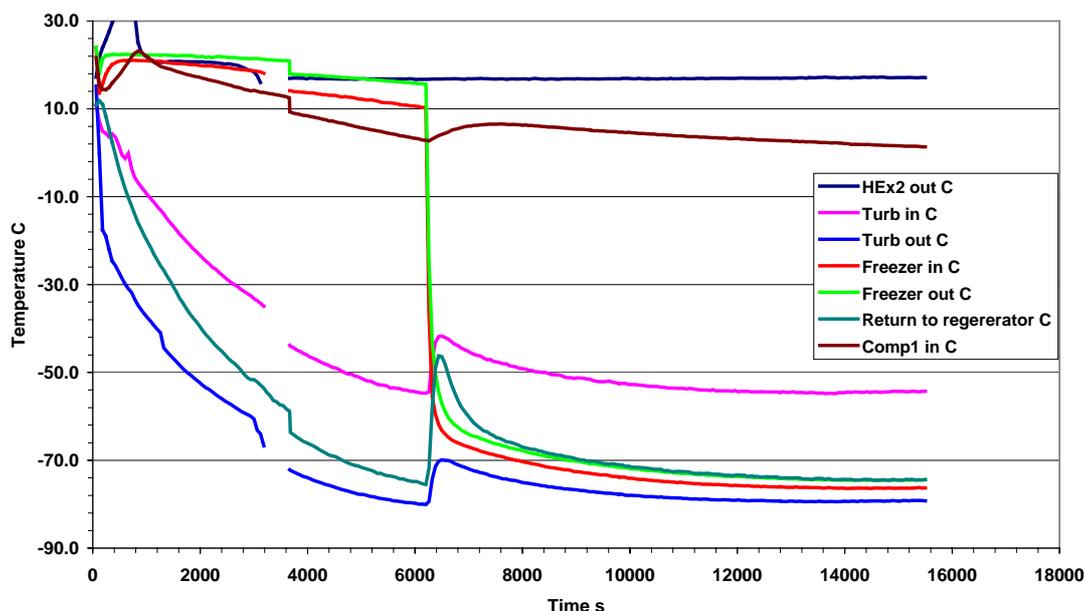
Figura 7 – Valori di riduzione di temperatura della macchina

Il rapporto di compressione per la maggior parte della prova si è mantenuto ad un valore di 1.8 con un massimo di 1.84 dopo 1.2 h.

La figura 8 mostra l'andamento delle temperature mentre si raggiungevano le condizioni stazionarie all'uscita della macchina (di circa  $-80^{\circ}\text{C}$ ) con il bypass aperto, ovvero, l'aria circolava solo nel circuito della macchina e non nel rotofreezer. Dopo 1.7 h (6200 s), è stato chiuso il bypass per permettere all'aria di circolare attraverso il rotofreezer; in questo modo la temperatura dell'aria è aumentata in conseguenza dei carichi dovuti al rotofreezer caldo e ai condotti della macchina che man mano venivano rimossi. Da questo punto in poi, la temperatura dell'aria cominciava nuovamente a diminuire fino a riportarsi ad un valore stazionario in 4 h (14400 s) dalla partenza della macchina.

#### 3.2 Prove con carico sensibile

La macchina è stata portata dalla temperatura ambiente fino alla temperatura di uscita dell'ice capture, di circa  $-80^{\circ}\text{C}$ . Questa temperatura è quella che ci si è prefissata in quanto è la condizione ideale per la surgelazione dei prodotti congelati velocemente (I.Q.F.). A questo punto il bypass è stato chiuso così da far circolare l'aria dentro il rotofreezer.



**Figura 8** Andamento delle temperature durante la prova senza carichi termici

Per simulare un carico termico sono state inserite quattro resistenze elettriche nel rotofreezer ciascuna del valore di circa 1 kW; quindi, il valore del carico termico richiesto veniva variato tra 0 e 4 kW. Considerando le condizioni peggiori, sono state accese le quattro resistenze per dare un carico sensibile, mentre si aspettava che le temperature si stabilizzassero. La variazione di temperatura in ogni punto è risultata minore di  $0.2^{\circ}\text{C}$  per ora. Il carico termico simulato all'interno del rotofreezer è dato dal calore prodotto per effetto Joule dalle resistenze, ovvero:  $P_e = V \times I$  [kW]. Tutte le misure sono state registrate a intervalli di 1 min.

### 3.3 Prove con carico latente e sensibile

Al fine di poter simulare un carico termico reale, bisognava considerare sia un carico sensibile che un carico latente. Per tal motivo, è stato collegato al rotofreezer un piccolo generatore di vapore. In un primo momento il sistema venne portato dalla temperatura ambiente fino alla temperatura stazionaria richiesta senza nessun carico. A questo punto, le quattro resistenze e il generatore di vapore furono messi in funzione per dare il carico termico richiesto. In tabella 4 si riportano i valori scaturiti da una prova:

PROVA	$P_e$ [kW]	Carico termico totale [kW]	$T_6$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_7$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_8$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	$T_9$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
c.d.c.	0.00	2.34	-79.1	-76.3	-74.4	-70.2
c.d.c. + 2R	2.01	4.35	-76.1	-73.6	-66.9	-62.2
c.d.c. + 3R	2.83	5.17	-70.7	-67.5	-58	-53
c.d.c. + 4R	3.96	6.30	-68.9	-66.2	-55.1	-50

**Tabella 4** Carichi termici riscontrati

dove: c.d.c. = carico termico del circuito a vuoto

$P_e$  = potenza elettrica dissipata

$T_6$  = temperatura all'uscita della turbina

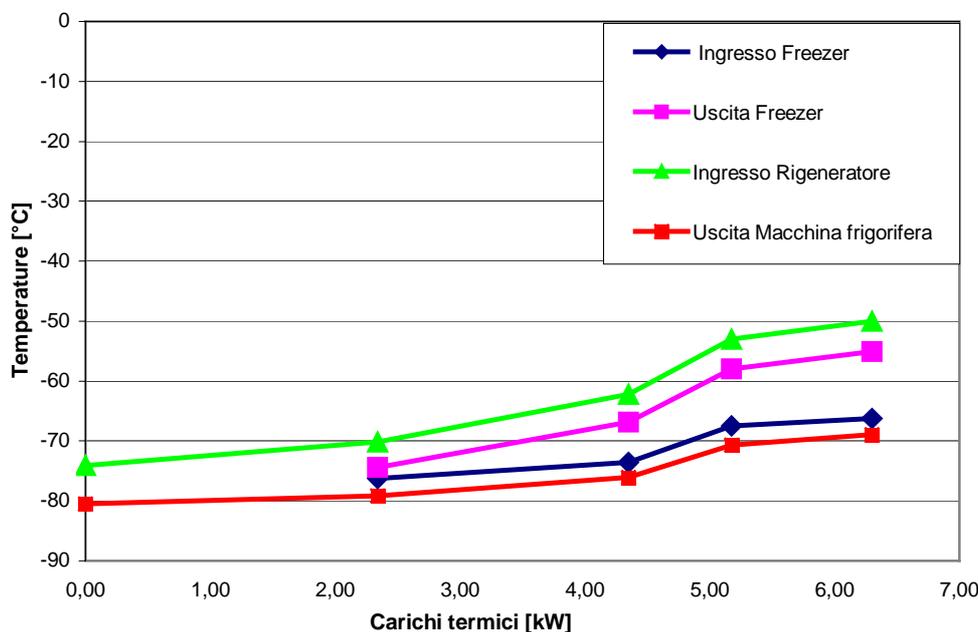
$T_7$  = temperatura all'ingresso del rotofreezer

$T_8$  = temperatura all'uscita del rotofreezer

$T_9$  = temperatura all'uscita del rigeneratore lato bassa pressione

I valori di temperatura acquisiti dal sistema di misura, rappresentano le condizioni di stazionarietà della prova, ovvero, rappresentano i valori di equilibrio delle temperature a cui si stabilizza il processo tra il calore sviluppato dalle resistenze e quello asportato dall'aria.

Nella figura 9 sono riportati gli andamenti delle temperature di equilibrio al variare della potenza elettrica dissipata nel rotofreezer



**Figura 9** Andamento delle temperature al variare dei carichi

## 4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro costituisce un primo passo verso lo sviluppo di un nuovo impianto di surgelazione, funzionante con aria in luogo dei tradizionali fluidi refrigeranti. Un ruolo certamente importante nel futuro degli impianti a ciclo ad aria sarà dato dall'opinione pubblica ed in generale dal crescente bisogno di utilizzare tecnologie a basso impatto ambientale, ed innocue nei confronti degli esseri viventi.

In relazione all'elevata affidabilità ed alla bassa manutenzione richiesta, i cicli ad aria hanno trovato, fino ad oggi, una larga applicazione nel settore della climatizzazione aeronautica e ferroviaria. Il congelamento ultrarapido di prodotti alimentari può rappresentare una nuova frontiera verso un settore che offre interessanti prospettive.

L'evoluzione delle abitudini alimentari dei consumatori con il conseguente aumento della richiesta di cibi pronti o surgelati, potrebbe costituire un fattore determinante per indirizzare maggiori investimenti nel campo della surgelazione con cicli ad aria, tanto più che questo tipo di surgelazione offre una sicurezza assoluta per il mantenimento delle proprietà organolettiche e nutritive dei prodotti.

I test effettuati hanno dimostrato (riuscendo a raggiungere temperature di  $-80^{\circ}\text{C}$  in meno di 2.6 h) le ottime potenzialità dell'impianto in virtù dei costi di surgelazione molto contenuti; l'ulteriore fase dello sviluppo riguarderà l'ottimizzazione del rotofreezer allo scopo di incrementarne la capacità produttiva.

Si è portati a pensare che i sistemi operanti con ciclo ad aria costituiscono l'inizio di una nuova tecnologia di surgelazione, che necessita di un'ulteriore serie di sperimentazioni per eliminare definitivamente le perplessità che fino ad oggi ne hanno scoraggiato l'utilizzo.