

VALUTAZIONI ENERGETICHE ED ECONOMICHE RELATIVE ALL'UTILIZZO DI UN SISTEMA DI REFRIGERAZIONE AD ASSORBIMENTO ALIMENTATO DA COLLETTORI PARABOLICI

M. Beccali, B. Di Pietra, P. Finocchiaro, A. Messineo, D. Panno

Dipartimento di Ricerche Energetiche ed Ambientali – Università degli Studi di Palermo
Via delle Scienze, Ed. 9 – 90128 Palermo

SOMMARIO

L'obiettivo di questa memoria consiste nella valutazione delle prestazioni energetiche ed economiche di un sistema di refrigerazione ad assorbimento che impiega collettori parabolici solari, confrontandone le prestazioni con un sistema frigorifero convenzionale a compressione di vapore. Il caso analizzato è quello di uno stabilimento industriale, ubicato in Sicilia, che si occupa di conservazione, lavorazione e commercializzazione di prodotti ittici freschi e congelati.

Le prestazioni, sia dell'impianto convenzionale ad espansione diretta di ammoniaca che di quello alternativo di "solar cooling", sono state studiate mediante tecniche di analisi energetica basate su simulazioni orarie condotte, in regime dinamico, con il software "Trnsys". L'analisi economica dimostra l'efficacia di alcune ipotesi di incentivazione basate su un contributo a fondo perduto sui costi totali di installazione del sistema, con intensità e modalità simili a quelli oggi concessi agli impianti solari termici per la produzione di acqua calda sanitaria.

INTRODUZIONE

L'Italia vive oggi un contesto energetico caratterizzato sempre più da interdipendenza e incertezza, con inevitabili ripercussioni sia sui costi che sugli approvvigionamenti. Al fine di contrastare tali effetti occorre, indubbiamente, fornire più flessibilità al sistema degli approvvigionamenti e modificare, al contempo, il mix delle fonti a cui attingere.

È auspicabile, in tal senso, implementare un uso razionale dell'energia soprattutto nel settore dell'industria, da sempre maggiormente energivoro. Per tali ragioni, la crescente consapevolezza in tema di energia e la necessità di sfruttare, per quanto possibile, fonti di energia rinnovabili, rendono oggi di maggiore interesse la tecnica della refrigerazione solare finora confinata prettamente ad applicazioni pilota.

Lo studio in esame è riferito ad uno stabilimento industriale per la conservazione, la lavorazione e la commercializzazione di prodotti ittici freschi e congelati ubicato a Mazara del Vallo (TP) [1]. Il capannone industriale è costituito da tre corpi di fabbrica giuntati ad unica elevazione fuori terra, aventi una elevazione massima di 12,40 m ed una superficie coperta di 3.160 m². Il prodotto ittico arriva in azienda già congelato ad una temperatura di -18°C e viene immagazzinato nella prima cella frigo (prodotto ittico da lavorare) dove viene raffreddato ulteriormente a -25°C entro 3 ore, con un piano di carico pari a 60 t a settimana. Dopo la lavorazione il prodotto viene immagazzinato a -18°C in una seconda cella (stoccaggio prodotto finito) per raffreddarlo nuovamente a -25°C con un piano di carico di 9 t al giorno. Le due celle refrigerate presentano una cubatura utile rispettivamente pari a 5.442 m³ e 4.114 m³ con una trasmittanza termica dell'involucro pari a 0,114 W/m²K.

Il calcolo delle frigorifiche necessarie al raffreddamento del prodotto ittico nelle due celle è stato effettuato con la seguente relazione:

$$R = c_1 \cdot (T_m - T_c) \cdot G \quad (1)$$

Da cui si ricava:

- R = 1.532 MJ per la cella "prodotto ittico da lavorare"
- R = 227 MJ per la cella "prodotto ittico finito"

Tale carico rappresenta un carico interno da smaltire entro tre ore con una potenza di picco di circa 100 kW.

Attualmente la refrigerazione è effettuata tramite un sistema ad espansione diretta a compressore di vapore di ammoniaca con COP nominale pari a 1,64 (-30°C/+35°C) ed accoppiato a due aerorefrigeranti installati all'interno delle due celle di stoccaggio. Il calore sottratto all'aria delle celle viene dissipato all'esterno tramite un condensatore evaporativo. Nella Tabella 1 sono riportati i dati caratteristici del gruppo refrigerante esistente.

Tabella 1: Caratteristiche sistema convenzionale

Potenza frigorifera	159,4 kW
Potenza assorbita	97,1 kW
COP nominale	1,64
Portata acqua alla torre evaporativa	22.736 kg/h
Portata aria refrigerata	57.384 kg/h

SISTEMA DI SOLAR COOLING CON ASSORBITORE NH₃-H₂O

La proposta esaminata in questa memoria, è la sostituzione del gruppo refrigerante a compressione di vapore con un sistema costituito da una macchina frigorifera ad assorbimento NH₃-H₂O alimentata da un sistema di collettori solari parabolici e da una caldaia a gas ausiliaria. Completano l'impianto un accumulo termico contenente acqua pressurizzata ad un pressione massima di 15 bar e una torre evaporativa impiegata per lo smaltimento del calore rigettato dalla macchina frigorifera. Lo schema impiantistico è quello riportato in Figura 1 [2].

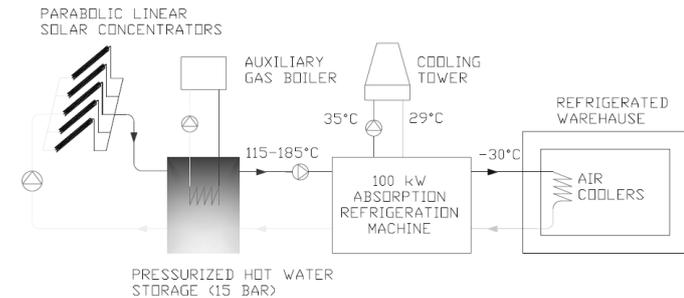


Figura 1: Schema impiantistico per la soluzione proposta

La macchina frigorifera è un assorbitore a singolo effetto in grado di raggiungere temperature di evaporazione fino a -30 °C utilizzando l'ammoniaca come refrigerante e acqua calda surriscaldata come fluido termovettore. Per raggiungere una temperatura d'evaporazione di -30°C è necessario alimentare il gruppo frigorifero con acqua calda surriscaldata ad una temperatura minima che deve essere selezionata in funzione della temperatura di produzione del freddo e dell'acqua del circuito di raffreddamento. Il grafico di Figura 2, mostra le temperature minime dell'acqua surriscaldata in funzione dei parametri sopra menzionati.

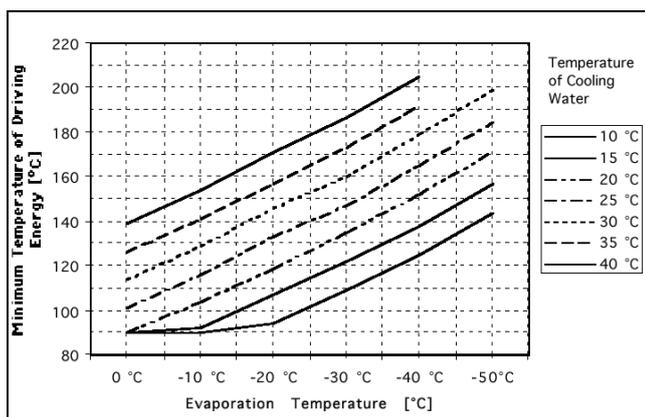


Figura 2: Temperatura minima acqua surriscaldata [fonte: Stork-Colibri b.v.]

Il valore del COP dipende fortemente dalla temperatura di evaporazione e da quella dell'acqua di raffreddamento come mostro in Figura 3.

Ovviamente, l'efficienza della macchina è direttamente

proporzionale alla temperatura d'evaporazione ed inversamente proporzionale alla temperatura dell'acqua di raffreddamento.

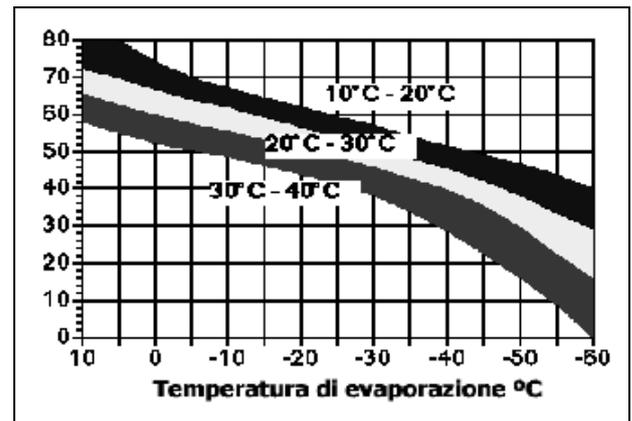


Figura 3: COP (%) in funzione della temperatura del fluido frigorifero e dell'acqua di raffreddamento [fonte: Stork-Colibri b.v.]

In condizioni di esercizio l'assorbitore lavora con acqua pressurizzata a 170°C e un COP pari a 0,45 (temperatura evaporatore -30°C, temperatura di raffreddamento 35°C).

La produzione del calore ad alta temperatura è effettuata tramite il riscaldamento del fluido termovettore con collettori solari parabolici a concentrazione (PTC) capaci di concentrare la radiazione solare diretta in un tubo posizionato lungo il fuoco della parabola dove scorre il fluido termovettore che può raggiungere una temperatura massima di 190°. Il singolo elemento del collettore solare è lungo circa 6 m e largo 1,3 m con rapporto di concentrazione pari a 28, chiuso nella parte superiore con un vetro per la riduzione delle perdite per conduzione verso l'ambiente esterno.

I collettori sono orientati con asse Nord Sud disposti su file parallele inclinate sull'asse maggiore con angolo di inclinazione pari a 40°. Ciascuna fila è corredata da un sistema di puntamento per seguire il sole nel suo spostamento orario. Il rendimento del collettore solare piano (Y) è dato dalla seguente espressione:

$$Y = 0,733 - 0,238 \cdot X - 0,0013 \cdot X^2 \cdot I \quad (2)$$

Dove x è il rapporto tra la temperatura media di ingresso e uscita dal collettore solare meno la temperatura ambiente e la radiazione diretta incidente sul piano dei collettori [3].

SIMULAZIONE DEL SISTEMA

I modelli matematici dei singoli componenti che costituiscono l'impianto convenzionale e l'impianto di solar cooling sono stati sviluppati con l'ausilio del tool TRNSYS 16. Il carico frigorifero è stato calcolato simulando il piano di carico settimanale della cella di stoccaggio (dalle 7:00 alle 10:00 di ogni lunedì), il piano di carico giornaliero della cella "prodotto finito" (dalle 10:00 alle 13:00 per 5 giorni a settimana) e le dispersioni termiche degli involucri per un intero anno solare con un time step di 0,5 ore.

Le condizioni meteorologiche del sito sono state ricavate utilizzando i dati orari di radiazione, temperatura e umidità

dell'anno tipo fornito da Meteororm per la Provincia di Trapani, presente nella libreria di TRNSYS (Trapani.tm2).

Il type 56 di TRNSYS 16 con il supporto di TRNBUILD è stato utilizzato per costruire il modello delle due celle frigo e calcolare il relativo carico termico sensibile e latente associato alla refrigerazione del pesce da -18 °C a -25 °C e ai ricambi d'aria durante la fasi di carico e scarico.

Per la simulazione dei collettori solari a concentrazione è stato utilizzando il Type 536 della libreria TESS di TRNSYS. Nel calcolo dell'efficienza del collettore solare si tiene conto anche della variabilità del coefficiente IAM (Incident Angle Modifier) in funzione dall'angolo di incidenza della radiazione con la superficie trasparente posta nella parte superiore del collettore. In Figura 4 è riportata una sezione trasversale del collettore solare simulato.

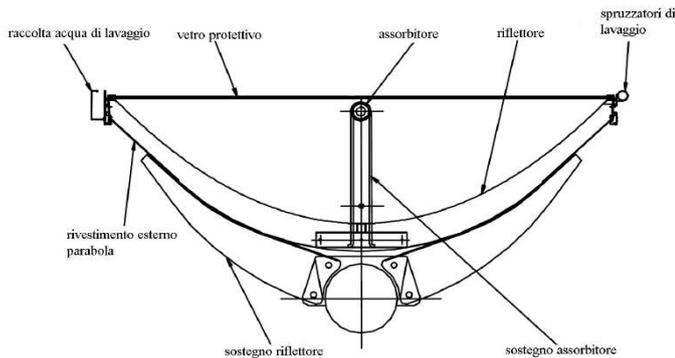


Figura 4: Tipologia di collettore solare parabolico considerata

Il gruppo frigo ad assorbimento è stato modellato utilizzando il Type 107 della libreria TESS adattandola ad un modello commerciale secondo le curve di Figura 2 e Figura 3. Per descrivere come varia la performance del sistema in termini energetici ed economici sono state condotte simulazioni orarie con diverse dimensioni dell'area dei collettori solari (da 426 m² a 960 m²) e del volume specifico del serbatoio di accumulo (da 20 l/m² a 80 l/m²).

ANALISI ENERGETICO – AMBIENTALE

Si riportano di seguito gli indici utilizzati per verificare i benefici energetico-ambientali generati dal sistema frigorifero ad assorbimento rispetto al sistema convenzionale:

- $$\text{Frazione Solare} = \frac{Q_{coll}}{Q_{coll} + Q_{aux}} \quad (3)$$
- Energia primaria: l'energia primaria consumata dal sistema frigorifero
- Emissioni di CO₂ equivalenti: tonnellate anno di CO₂ emesse dal sistema frigorifero convenzionale e ad assorbimento

La Figura 5 mostra l'andamento della frazione solare al variare del volume dell'accumulo e della superficie dei collettori.

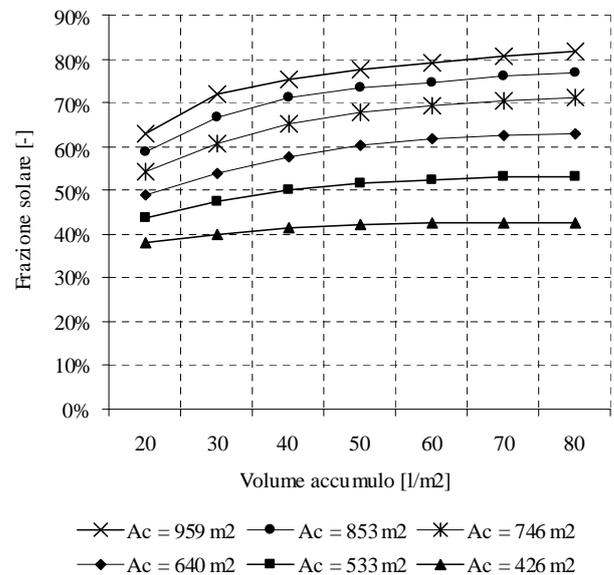


Figura 5: Andamento della frazione solare per differenti volume dell'accumulo termico al variare della superficie dei collettori solari

La frazione solare varia in un range compreso tra il 38% per una superficie di collettori pari a 426 m² e un volume specifico di accumulo di 20 l/m² a un massimo di 82% per una superficie di 959 m² e un volume specifico di accumulo di 80 l/m². In Figura 5 si nota come le frazioni solari maggiori siano evidentemente ottenute per elevati valori del volume specifico di accumulo e della superficie dei collettori.

Il consumo annuale di energia primaria del sistema frigorifero convenzionale ammonta a circa 996 MWh/anno (337 MWh di energia elettrica) mentre i consumi relativi al sistema frigorifero ad assorbimento variano da un minimo di 350 MWh ad un massimo di 800 MWh per frazioni solari rispettivamente di 82% e 38% (Figura 6).

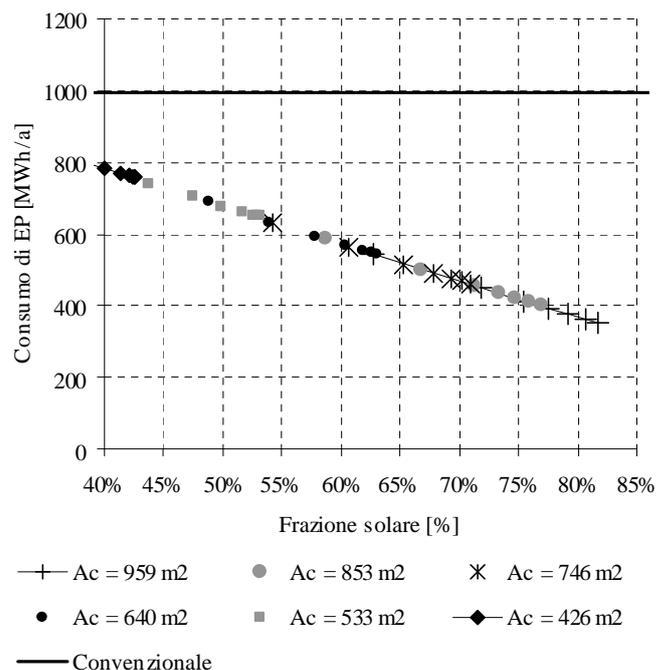


Figura 6: Consumo di energia primaria in funzione della frazione solare

In termini di analisi ambientale, le emissioni di CO₂ equivalenti del sistema frigorifero attualmente impiegato ammontano a circa 182 t/anno, mentre per il sistema frigo ad assorbimento si riducono di 13% e 63% per frazioni solari rispettivamente di 82% e 38%. In Figura 7 è riportato l'andamento della frazione solare e del risparmio di EP al variare della superficie specifica dei collettori solari per un valore di accumulo specifico pari a 40 l/m².

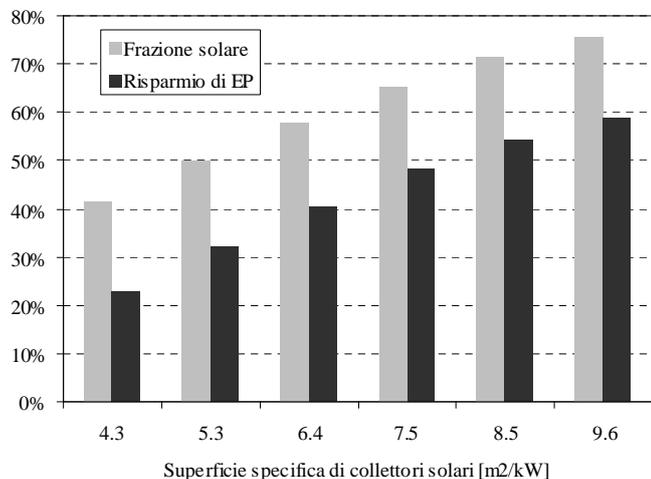


Figura 7: Andamento della frazione solare e del risparmio di EP al variare della superficie specifica dei collettori solari per un valore di accumulo specifico pari a 40 l/m²

Poiché la temperatura del circuito solare non deve mai superare il valore massimo di 190 °C al quale è associata una pressione di saturazione di circa 15 bar, deve essere adottata una logica di controllo del sistema di puntamento dei collettori solari che, spostando il fuoco della parabola fuori dal tubo assorbitore, ne limiti la temperatura in uscita, qualsiasi sia la radiazione solare incidente. In conseguenza di ciò, ogni qualvolta la temperatura dei collettori raggiunge i 190°C, non tutta l'energia solare disponibile sul piano del collettore può essere sfruttata. A titolo di esempio in Figura 7 si riporta l'andamento dell'energia solare non utilizzabile per la configurazione con area dei collettori pari a 746 m² risultante dalle simulazioni annuali svolte. Si noti come l'aliquota di energia persa diminuisca all'aumentare del volume specifico del serbatoio di accumulo.

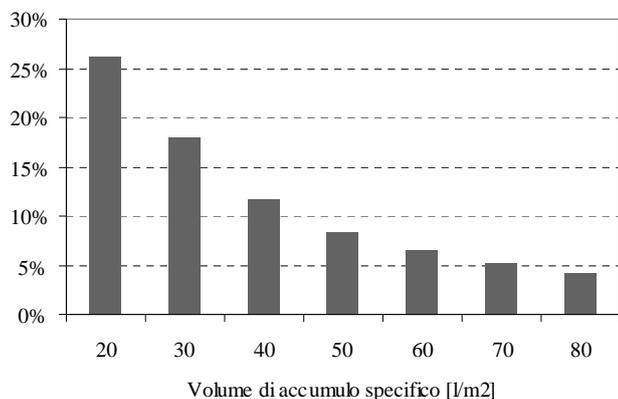


Figura 8: Percentuale di energia solare non utilizzabile al variare del volume specifico di accumulo

ANALISI ECONOMICA

L'analisi economica dell'investimento ha richiesto la stima dei costi dei singoli componenti che costituiscono l'impianto di solar-cooling e di quello convenzionale. I dati di costi provengono in parte dai costruttori dei singoli componenti considerati ed in parte da stime effettuate sulla base di dati di mercato disponibili.

Il costo totale di investimento risulta fortemente dipendente dall'area dei collettori solari e dal volume dell'accumulo termico, variando da un valore minimo di 290 k€ a un massimo di 520 k€. Nelle Tabelle 2 e 3 sono riportati i costi di installazione relativi al sistema convenzionale e al sistema di solar cooling.

Tabella 2: Costi di installazione relativi al sistema convenzionale di riferimento

	Costo Unitario [€/kW]	Costo €
Gruppo frigo ad NH ₃ (100 kW)	500	60.000
Torre evaporativa	30	6.000
Piping		15.000
Serbatoio stoccaggio NH ₃ liquida	3.000	15.000
Installazione		19.200
Totale		115.200

Tabella 3: Costi di installazione relativi al sistema di solar cooling

	Prezzo Unitario [€/m ²]	Costo €
Collettori a concentrazione	400	
Serbatoio di accumulo	2.000	
Macchina ad assorbimento	2.000	200.000
Caldaia ausiliaria		10.000
Torre evaporativa	25	7.500
Pipino		30.000
Totale ¹		247.500
Installazione (calcolato sul totale)	20%	
Incentivo (calcolato sul totale)	40%	

I costi totali di investimento dell'impianto convenzionale ammontano a circa 115 k€, ricavati da un valore medio di mercato. In Figura 9 sono riportati i costi totali di investimento per le diverse configurazioni considerate, al variare della superficie dei collettori e del volume specifico di accumulo.

Gli indici economici dell'investimento relativo all'impianto ad assorbimento sono stati valutati considerando gli extra costi rispetto al sistema tradizionale, i benefici economici derivanti da un finanziamento pubblico del 40% sul totale dei costi di installazione e dai Titoli di Efficienza Energetica stimati a 77,04 €/Tep.

Gli attuali costi energetici del sistema di riferimento ammontano a 49,7 k€, relativi all'acquisto di energia elettrica per alimentare il sistema frigo a compressione di vapore.

Per valutare i costi di gestione annui è stato stimato il costo del gas naturale ad un valore pari a 0,40 €/m³ e il costo

¹ La cifra indicata si riferisce al costo di installazione del sistema di solar cooling escluso il costo dei collettori e quello del serbatoio di accumulo

dell'energia elettrica pari a 0,13 €/kWh con un incremento annuo del 3%. Inoltre è stato assunto un rendimento del mix elettrico nazionale pari a 0,37 con fattore di emissione pari a 137,22 gr CO₂/MJ e di 55,28 gr CO₂/MJ per la caldaia a gas.. Per la stima del VAN è stata assunta inoltre una vita utile dell'impianto pari a 20 anni.

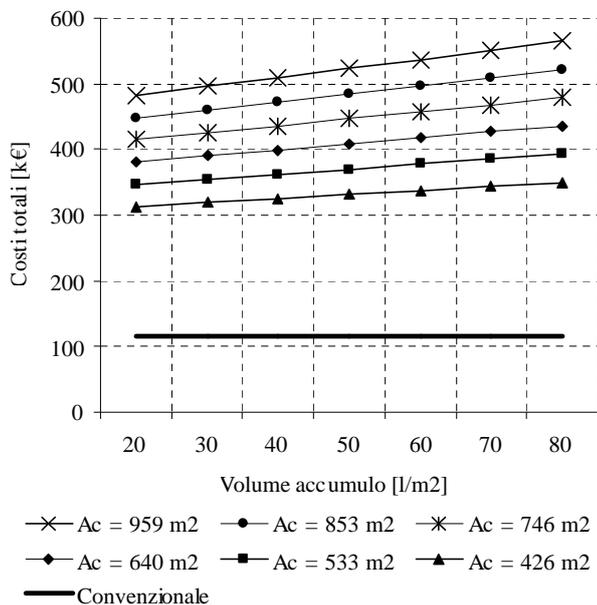


Figura 9: Costo totale di installazione del sistema di solar cooling e di quello convenzionale

I ricavi derivanti dal funzionamento dell'impianto di solar-cooling sono costituiti dai risparmi ottenibili sul consumo di energia elettrica e di gas utilizzando al fonte solare e dalla commercializzazione dei Titoli di Efficienza Energetica.

La differenza tra i ricavi e i costi di gestione annui, valutati in un orizzonte temporale di 20 anni, ha consentito di determinare il Payback Time (in forma semplice) ed il VAN ai 20 anni, mostrati in Figura 10 e Figura 11 per le diverse dimensioni dell'accumulo termico e dell'area dei collettori solari considerate.

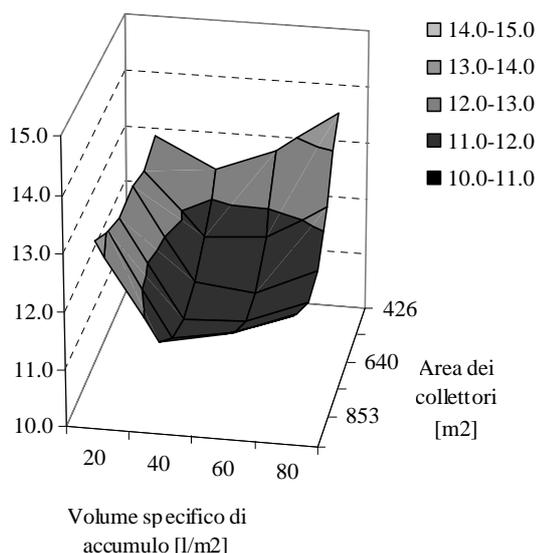


Figura 10: Payback time in funzione della superficie del collettore solare e del volume dell'accumulo termico

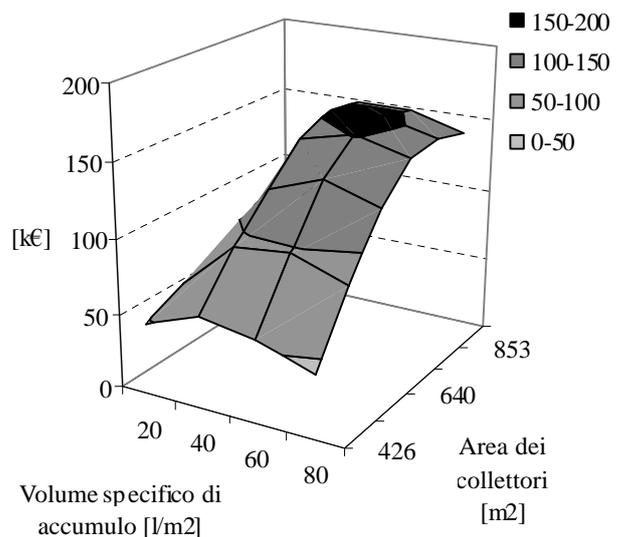


Figura 11: VAN ai 20 anni in funzione della superficie del collettore solare e del volume dell'accumulo termico

Il minimo Payback time è pari a circa 11 anni e si ottiene per un'area del collettore solare pari a 746 m² ed un accumulo termico con volume di 40 l/m².

La redditività dell'investimento in termini di VAN aumenta all'aumentare dell'area dei collettori (Figura 11); i benefici economici presentano comunque una soglia di saturazione a 150 k€ corrispondente ad una superficie di circa 850 m².

CONCLUSIONI

Lo studio mostra come l'utilizzo di un sistema ad assorbimento accoppiato ad un campo di collettori solari a concentrazione consenta la produzione di energia frigorifera a -30°C con una notevole riduzione nel consumo di energia primaria e dei costi annui di gestione rispetto ad un sistema convenzionale.

In particolare, al variare della taglia del sistema di solar cooling, è possibile ottenere un risparmio annuo di energia primaria variabile da 20% a 65% in funzione della configurazione impiantistica scelta.

D'altra parte, risultano ancora poco vantaggiosi i risultati economici relativi all'investimento per il sistema di solar cooling.

L'introduzione di aiuti finanziari assegnati in conto capitale per abbattere i costi di installazione potrebbero rendere maggiormente competitivo l'investimento ed aiutare a diffondere una tecnologia capace di ridurre gli impatti ambientali delle filiere aziendali siciliane.

NOMENCLATURA

EP	Energia Primaria
COP	Coefficient of Performance
I	Radiazione solare diretta [W/m ²]
G	Peso del prodotto da raffreddare: 800 kg
c ₁	Calore specifico del prodotto prima del

congelamento: 0,86 kcal/kg °C
 T_m Temperatura di carico della merce: 18°C
 T_c Temperatura della cella: -25°C
 Q_{coll} Calore prodotto dal collettore solare; [kJ]
 Q_{aux} Calore prodotto dallo scambiatore ausiliario; [kJ]

pump; 61st ATI National Congress –International Session “Solar Heating and Cooling”, Perugia 09-2006.

SUMMARY

Solar cooling is hardly used for industrial refrigeration processes up to today. Although there is little research and experience with cooling applications, apart from air-conditioning, a large potential exists for applying solar thermal technology for industrial refrigeration.

The aim of the study is the energy and economic assessment of using solar cooling for industrial refrigeration in a fish processing factory located in Sicily. The base case is an existing plant with ammonia vapour compression machine. The use of an absorption refrigeration plant powered by parabolic solar collectors is considered as an alternative solution. The energy assessment of the considered system is carried out through hourly simulations for different collector surface and heat storage volume. In order to estimate the best configuration of the solar refrigeration system in term of energy and economic performances, a sensitivity analysis is performed.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Antonella Genna, Tesi di Laurea: Studio per l'applicazione di tecnologie solari per la produzione di freddo nell'industria di trasformazione dei prodotti ittici. Università di Palermo Dipartimento di Energetica, 2006
- [2] Beccali M., Di Pietra B., Finocchiaro P., Messineo A., Panno D.: Energy and economic assessment of a solar absorption refrigeration plant in a fish processing factory: a case study in Sicily; 2nd International Conference Solar Air-Conditioning October 18th/19th, 2007, Tarragona, Spain
- [3] M. Citterio, G. Corallo, G. Guj, A. Vangelista, B. Di Pietra: Solar air-conditioning with high temperature solar collectors and water ammonia absorption heat