



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in ingegneria meccanica

PROGETTAZIONE DI UN INNOVATIVO PRODUTTORE DI GHIACCIO SOLARE

DESIGNING OF AN INNOVATIVE SOLAR ICE MAKER

Relatore:

Ing. Sebastiano Tomassetti

Tesi di Laurea di:

Marino Di Giampaolo

A.A. 2023 / 2024

Sommario

1. INTRODUZIONE	3
2. FUNZIONAMENTO DI UNA MACCHINA FRIGORIFERA	4
2.1. CICLO DI FUNZIONAMENTO STANDARD A COMPRESSIONE	5
2.2. CICLO DI FUNZIONAMENTO AD ASSORBIMENTO	8
3. SVILUPPO NEL TEMPO DI SOLAR ICE MAKER E CENNI STORICI	11
3.1. PRIMI UTILIZZI E TEORIZZAZIONE DEL FUNZIONAMENTO	11
3.2. SVILUPPO E CAMPI DI APPLICAZIONE, STAND ALONE ICE MAKER	12
4. SVILUPPO DI UN SISTEMA ICE MAKER FINALIZZATO AL RAFFRESCAMENTO DELL'ACQUA	22
4.1. PARTI GENERICHE CHE COMPONGONO IL SISTEMA	26
4.2. APPROFONDIMENTO SULLE TAVOLE DI REALIZZAZIONE	29
4.2.1. PROGETTAZIONE DELLE PARTI CHE COMPONGONO IL COLLETTORE SOLARE	34
4.3. REALIZZAZIONE DELLA MACCHINA	36
5. CONCLUSIONI	38

1. INTRODUZIONE

Nel presente lavoro di tesi verrà descritto il funzionamento di un Solar Ice Maker, ossia una particolare macchina frigorifera che sfrutta l'energia solare per il suo funzionamento, insieme alla sua progettazione e realizzazione. Questo dispositivo sfrutta un ciclo frigorifero ad assorbimento alimentato da energia solare, eliminando la necessità di elettricità e riducendo l'impatto ambientale grazie all'assenza di emissioni e alla bassa manutenzione. Nello specifico, l'attività svolta ha riguardato la progettazione meccanica delle parti che compongono il collettore solare piano, della realizzazione dei progetti CAD dei primi prototipi e dei rendering.

Per comprendere meglio il funzionamento, dapprima verrà descritto teoricamente il ciclo frigorifero ad assorbimento utilizzato dal Solar Ice Maker, evidenziando i principi termodinamici e i suoi componenti principali. Successivamente, verrà analizzata la letteratura per identificare i primi casi applicativi di tale sistema e come esso si sia evoluto sino ad oggi, includendo le sfide tecniche superate e le innovazioni implementate nel tempo.

Infine, verrà esposto quanto realizzato nella presente attività, dettagliando il processo di progettazione del collettore solare, i criteri adottati per ottimizzare le performance termiche, i materiali scelti per garantire sostenibilità ed efficienza, ed il processo di produzione del collettore solare, evidenziando i test eseguiti e le prestazioni ottenute rispetto agli obiettivi iniziali. Infine, verranno discusse le potenziali applicazioni future del Solar Ice Maker e le opportunità di miglioramento per la produzione su larga scala.

2. FUNZIONAMENTO DI UNA MACCHINA FRIGORIFERA

“Refrigeration is the process of removing heat from an enclosed volume or from a substance, to elsewhere for the primary purpose of lowering the temperature of the enclosed space or substance and then maintaining that lower temperature.”

[Lawrence, J.N., 2003, Refrigeration fundamentals throughout history: Methods Used to Obtain Colder Temperatures, and Principles Governing Them, A literature Seminar, The University of Alabama]

Una macchina frigorifera è un dispositivo progettato per trasferire calore da un ambiente a temperatura più bassa a uno a temperatura più alta, contrastando il flusso naturale del calore che tende a spostarsi da aree più calde a quelle più fredde. Questo processo è alla base del funzionamento di apparecchi come frigoriferi, congelatori e condizionatori d'aria, dove l'obiettivo principale è quello di raffreddare uno spazio o mantenere una temperatura inferiore rispetto all'ambiente circostante.

Il funzionamento di una macchina frigorifera si basa su un ciclo termodinamico, generalmente il ciclo di compressione del vapore o il ciclo ad assorbimento, a seconda del tipo di macchina. Nel ciclo di compressione del vapore, un refrigerante viene compresso e poi espanso, assorbendo calore dall'ambiente interno (come un frigorifero) e rilasciandolo all'esterno. Nel caso di sistemi ad assorbimento, come nel Solar Ice Maker in esame, il processo utilizza una fonte di calore esterna, come l'energia solare, per facilitare il trasferimento del calore senza necessità di componenti elettrici attivi come i compressori.

Questi dispositivi sono essenziali in molte applicazioni quotidiane e industriali, non solo per la conservazione degli alimenti, ma anche per la climatizzazione degli ambienti e per il mantenimento delle condizioni necessarie per processi industriali o la conservazione di medicinali, come nel caso delle campagne di vaccinazione. In sintesi, le macchine frigorifere rappresentano una tecnologia chiave per il controllo termico in diverse applicazioni, migliorando il comfort, la sicurezza alimentare e l'efficienza industriale.

2.1. CICLO DI FUNZIONAMENTO STANDARD A COMPRESSIONE

In Figura 1 sono illustrati i componenti fondamentali necessari per il funzionamento di un ciclo frigorifero basato sulla compressione e l'espansione di un fluido refrigerante. Questo ciclo è tipicamente costituito da un compressore, un condensatore, un dispositivo di espansione e un evaporatore, che lavorano in sinergia per trasferire calore da un ambiente più freddo a uno più caldo, garantendo il raffreddamento desiderato.

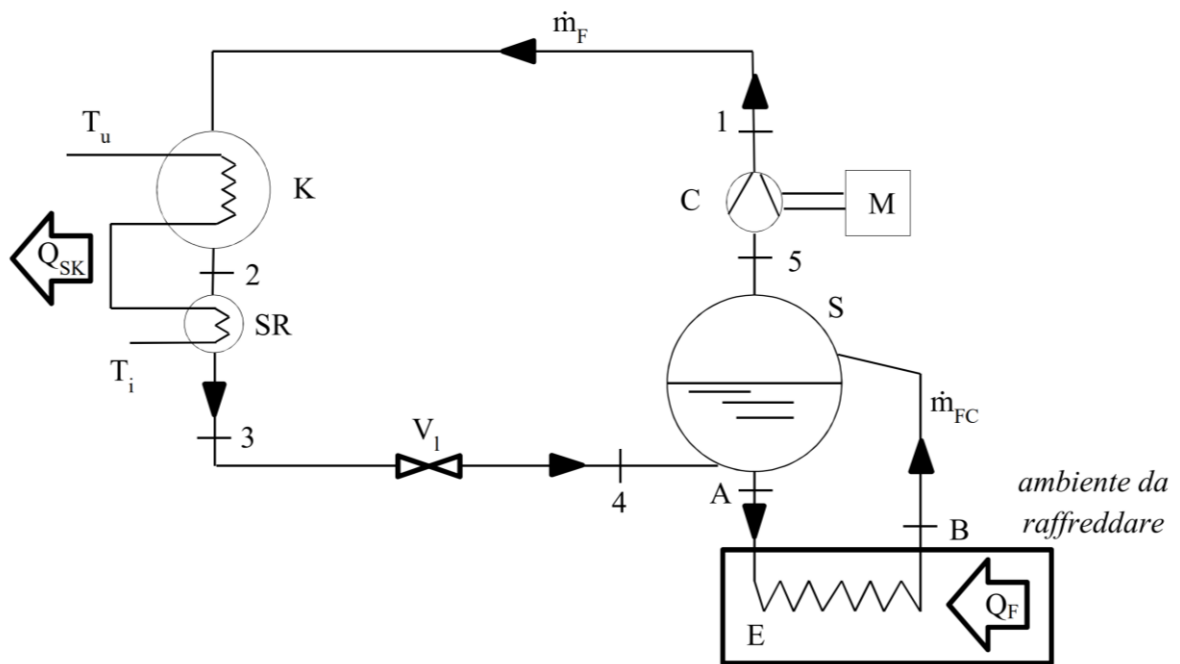


Figura 1. Ciclo termodinamico convenzionale di compressione ed espansione del fluido refrigerante [1]

Di seguito è riportata una spiegazione semplice di come funziona un ciclo frigorifero basato sulla compressione e l'espansione di un fluido refrigerante:

- Compressore: Il ciclo inizia con il compressore, che comprime il fluido refrigerante allo stato gassoso, aumentandone la pressione e la temperatura. Questo processo trasforma il fluido a bassa pressione in uno a maggiore pressione.

- Condensatore: Il fluido compresso e riscaldato passa attraverso il condensatore, dove cede il suo calore all'ambiente esterno (come avviene nella parte posteriore di un frigorifero). Durante questa fase, il fluido nella fase vapore si raffredda e si condensa, trasformandosi in un liquido ad alta pressione.
- Valvola di espansione: Successivamente, il liquido ad alta pressione attraversa una valvola di espansione, dove subisce un'improvvisa riduzione di pressione e temperatura. Questo cambiamento fa sì che il liquido inizi ad evaporare parzialmente.
- Evaporatore: Il fluido refrigerante a bassa pressione entra nell'evaporatore, dove assorbe calore dall'ambiente interno (come all'interno del frigorifero) per completare il processo di evaporazione, tornando allo stato gassoso. Questo assorbimento di calore raffredda l'ambiente interno.

Ciclo continuo: Il gas refrigerante, ora a bassa pressione, viene ricondotto al compressore e il ciclo si ripete.

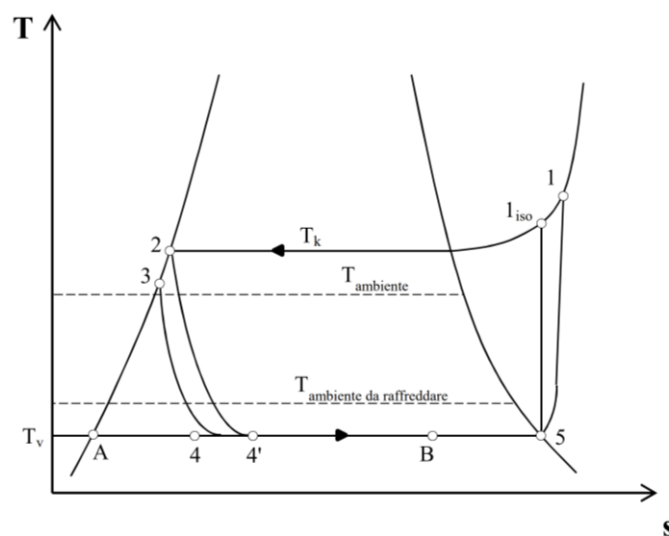


Figura 2. Diagramma entalpico del ciclo frigorifero a compressione [2]

In sintesi, una macchina frigorifera utilizza un ciclo continuo a compressione di vapore per trasferire calore da un ambiente interno più freddo a uno esterno più caldo. Questo processo permette di mantenere l'ambiente interno alla temperatura desiderata, assicurando il raffreddamento necessario per diverse applicazioni, come la conservazione degli alimenti o la climatizzazione degli spazi.

Il ciclo che ne consegue risulta come in Figura 2.

2.2. CICLO DI FUNZIONAMENTO AD ASSORBIMENTO

A differenza dei sistemi frigoriferi a compressione di vapore, dove il raffreddamento è ottenuto tramite la trasformazione della potenza meccanica fornita da un compressore, nei sistemi frigoriferi ad assorbimento la generazione del freddo avviene utilizzando direttamente una fonte di potenza termica, come l'energia solare, il gas naturale o il calore di scarto industriale. Questo tipo di impianto sfrutta un ciclo ad assorbimento, basato sulla combinazione di un refrigerante e un assorbente (solitamente una soluzione liquida), per trasferire calore da un ambiente interno più freddo a uno esterno più caldo.

Nel ciclo ad assorbimento, il refrigerante viene prima vaporizzato nell'evaporatore, sottraendo calore dall'ambiente interno e producendo l'effetto di raffreddamento desiderato. Successivamente, il refrigerante in forma di vapore viene assorbito da un assorbente, formando una soluzione ricca ad una pressione più alta. Questa soluzione viene quindi riscaldata in un generatore, dove il calore fornito dalla fonte termica separa il refrigerante dall'assorbente. Il refrigerante in forma di vapore passa poi attraverso un condensatore, dove si raffredda e si condensa in liquido, rilasciando calore all'ambiente esterno. Infine, il liquido refrigerante passa attraverso una valvola di espansione, riducendo la sua pressione e temperatura, per poi rientrare nell'evaporatore e completare il ciclo.

Questo sistema offre vantaggi significativi, tra cui l'eliminazione della necessità di un compressore meccanico, minore consumo di elettricità, riduzione delle emissioni di gas serra rispetto ad il ciclo a compressione standard meccanica e la possibilità di utilizzare fonti di energia rinnovabile o di scarto.

Sotto, in Figura 3, viene riportato un layout tipico di un impianto frigorifero ad assorbimento, che illustra i componenti principali del sistema e il flusso del refrigerante attraverso il ciclo di assorbimento.

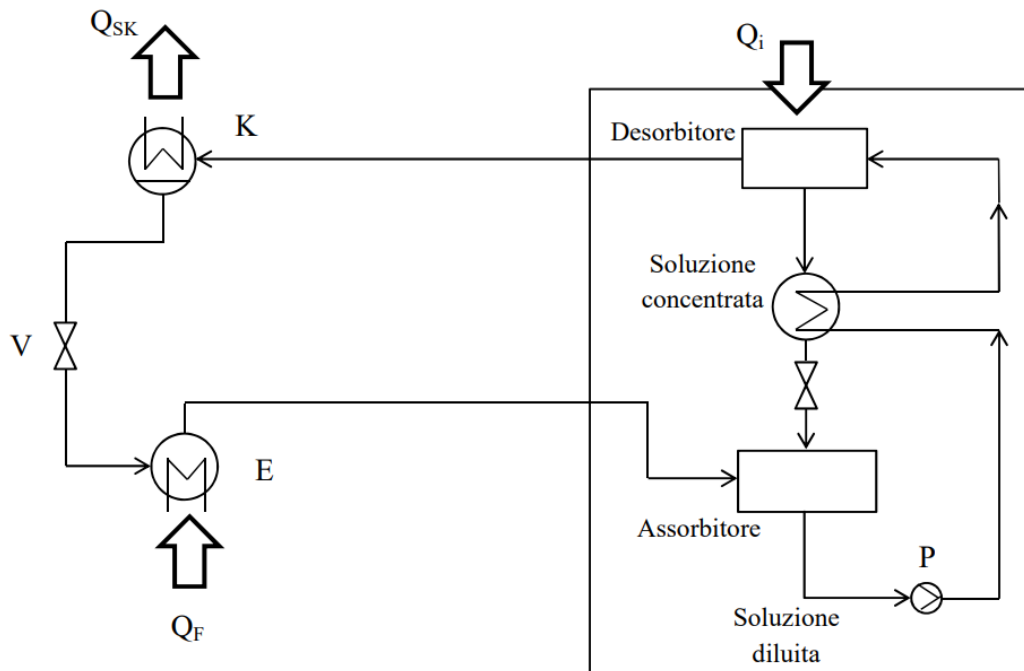


Figura 3 Layout tipo di un impianto frigorifero ad assorbimento [3]

Di seguito è riportata una spiegazione schematica del funzionamento di un sistema frigorifero ad assorbimento:

- **Generatore:** invece di utilizzare un compressore come nei sistemi tradizionali, il sistema ad assorbimento impiega un generatore che riscalda una miscela composta da un refrigerante (solitamente ammoniaca) e un assorbente (di solito acqua). Il calore necessario per questo processo può provenire da diverse fonti, come il gas naturale, bruciatori a gas, calore di scarto industriale o energia solare.
- **Separazione:** nel generatore, il calore applicato provoca l'evaporazione del refrigerante (ammoniaca) dalla miscela, separandola dall'assorbente (acqua). A questo punto, l'ammoniaca, ora in forma di vapore ad alta pressione, continua il suo percorso attraverso il ciclo.
- **Condensatore:** il vapore di ammoniaca viene inviato al condensatore, dove cede calore all'ambiente esterno e si raffredda, condensandosi in un liquido. Questo rilascio di calore permette al vapore di trasformarsi completamente in forma liquida ad alta pressione.
- **Evaporatore:** successivamente, il liquido di ammoniaca passa attraverso una valvola di espansione e entra nell'evaporatore. In questa fase, l'ammoniaca si espande e assorbe calore dall'ambiente interno del frigorifero o del sistema da raffreddare, trasformandosi nuovamente in vapore. Questo assorbimento di calore produce l'effetto di raffreddamento desiderato nell'ambiente interno.

- Assorbitore: il vapore di ammoniaca viene poi riassorbito dall'acqua nell'assorbitore, riformando la miscela originale. Questa soluzione ricca viene quindi pompata nuovamente al generatore, chiudendo il ciclo e permettendo il ripetersi continuo del processo.

In sintesi, la macchina frigorifera ad assorbimento utilizza un ciclo di riscaldamento, separazione, condensazione, evaporazione e riassorbimento di un refrigerante per trasferire calore dall'interno all'esterno, mantenendo l'ambiente interno freddo. Questo sistema opera principalmente sfruttando il calore invece dell'energia elettrica, rendendolo particolarmente utile in contesti dove l'elettricità non è facilmente disponibile o dove si desidera ridurre il consumo energetico e le emissioni di CO₂ rispetto ad un ciclo frigorifero standard a compressione di vapore, alimentato da energia elettrica prelevata dalla rete elettrica. I sistemi ad assorbimento sono ideali per applicazioni che sfruttano fonti di energia rinnovabile o di recupero, rendendoli una soluzione efficiente e sostenibile per la refrigerazione e il condizionamento degli ambienti.

3. SVILUPPO NEL TEMPO DI SOLAR ICE MAKER E CENNI STORICI

3.1. PRIMI UTILIZZI E TEORIZZAZIONE DEL FUNZIONAMENTO

A titolo puramente esplicativo, viene presentata la descrizione della tecnologia presentata nell'articolo scientifico di Pons e Guilleminot [4]. Da notare la data di pubblicazione del medesimo articolo, ossia 01 Novembre 1986.

Le pompe di calore puramente termiche possono essere concepite con coppie adsorbente/assorbente solido, ad esempio per scopi di refrigerazione. Poiché ogni ciclo consiste in due periodi, cioè riscaldamento/desorbimento/condensazione e raffreddamento/adsorbimento/evaporazione, questa modalità di funzionamento è ben adatta all'energia solare. Dopo gli esperimenti con la coppia Zeolite/Acqua, è stato progettato un "fabbricatore di ghiaccio" a energia solare con la coppia Carbone attivo/Metanolo ed è stato costruito un prototipo a Orsay. I collettori solari (6 m²) contengono complessivamente 130 kg di carbone attivo, i condensatori sono raffreddati ad aria e l'evaporatore ha una produzione netta di 30-35 kg di ghiaccio per giorno di sole. Il ghiaccio viene facilmente rimosso e, in linea di principio, la macchina potrebbe essere azionata automaticamente. Il C.O.P. solare netto è di 0,12, il che rende questa macchina uno dei produttori di ghiaccio solari più efficienti. [4]

3.2. SVILUPPO E CAMPI DI APPLICAZIONE, STAND ALONE ICE MAKER

Il progetto presentato nel presente lavoro si inserisce all'interno di un esperimento svolto presso Messina da Solar Energy in collaborazione con la GreenTech. Prima di entrare nel merito del lavoro effettivamente svolto, verrà descritto l'esperimento presentato in [5] in modo tale da contestualizzare quanto riportato di seguito.

I produttori di ghiaccio ad adsorbimento solare possono essere cruciali per mantenere la catena del freddo nei paesi in via di sviluppo, facilitando la conservazione dei vaccini. Tuttavia, è necessaria un'ulteriore ottimizzazione del loro design. Un nuovo prototipo, sviluppato con Carbone Attivo/Metanolo, è stato testato tra febbraio e marzo 2013. Questo prototipo, con dimensioni di 1,7 x 1,5 x 0,95 m e un collettore solare di 1,2 m², è in grado di produrre fino a 5 kg di ghiaccio con un coefficiente di prestazione solare (COP) di circa 0,08, mantenendo il ghiaccio per l'intera giornata successiva.

L'immunizzazione è essenziale per lo sviluppo economico e la riduzione della povertà nei paesi in via di sviluppo. L'UNICEF, tramite l'Alleanza Globale per i Vaccini e l'Immunizzazione (GAVI), lavora per aumentare l'accesso alle vaccinazioni nei paesi poveri, salvando vite e migliorando la salute pubblica. La difficoltà principale è mantenere i vaccini tra 2 °C e 8 °C, evitando sbalzi di temperatura. La produzione di ghiaccio può aiutare a conservare i vaccini in contenitori isolati, aumentando il numero di dosi disponibili e riducendo la mortalità. Tuttavia, nei paesi con reti elettriche poco sviluppate, i sistemi di refrigerazione tradizionali devono essere alimentati da motori a combustione interna, causando problemi di fornitura e manutenzione del carburante [5].

Nonostante la situazione descritta, la maggior parte dei paesi in via di sviluppo beneficia di un'alta radiazione solare. Queste caratteristiche rendono tali paesi particolarmente promettenti per il raffreddamento solare ad adsorbimento. Oggi i sistemi di raffreddamento ad assorbimento sono stati ampiamente studiati e possono essere considerati un'alternativa valida ai tradizionali sistemi di compressione del vapore. Questi sistemi funzionano sulla base dell'adsorbimento reversibile del vapore (acqua, ammoniaca, metanolo) su un materiale poroso (zeolite, gel di silice, carbone attivo). Questa tecnologia è particolarmente interessante quando è disponibile una grande quantità di calore a bassa temperatura, come l'energia solare. Sono stati realizzati e testati con successo molti dispositivi di refrigerazione solare fuori rete in aree rurali dove la radiazione solare è abbondante, dimostrando la

fattibilità di questa tecnologia. Tuttavia, sono necessari ulteriori sviluppi e ottimizzazioni del design per realizzare unità compatte, economiche ed efficienti e renderle più attraenti sul mercato.

Con questo esperimento è stato realizzato un nuovo produttore di ghiaccio solare ad adsorbimento che utilizza la coppia di lavoro carbone attivo (adsorbente) e metanolo (adsorbato). Il prototipo è stato progettato sulla base dei risultati di un modello matematico sviluppato e ottimizzato in lavori precedenti. Questo studio rappresenta un seguito sperimentale di tale attività. Il prototipo è stato sviluppato per studiare l'influenza di diversi aspetti modificabili sulle prestazioni complessive:

- aree delle superfici di scambio termico;
- tipo di adsorbente;
- massa dell'adsorbente;
- dimensione delle particelle dell'adsorbente.

La versatilità del prototipo è il suo principale punto di forza e consente un'analisi complessiva di sensibilità utile per lo sviluppo di unità ottimizzate.

Andando nel dettaglio del funzionamento della macchina produttrice di ghiaccio ad assorbimento solare, segue una descrizione delle fasi operative.

Il produttore di ghiaccio solare ad adsorbimento funziona secondo uno schema operativo illustrato nella Fig. 4. Il macchinario opera con un ciclo intermittente di 24 ore e comprende i seguenti componenti principali:

- un collettore solare, in cui è integrato l'adsorbente (carbone attivo);
- un condensatore ad aria per la transizione di fase dell'adsorbato (metanolo);
- un evaporatore collocato all'interno di una scatola isolata che viene raffreddata.

Durante il giorno, l'energia solare ricevuta dal collettore permette il desorbimento del metanolo dal carbone attivo. Il vapore di metanolo viene condensato tramite il condensatore e poi fluisce nell'evaporatore. Durante questo processo, le valvole V1 e V0 indicate nello schema sono aperte, mentre la valvola V2 è chiusa. Durante la notte, le posizioni delle valvole V0, V1 e V2 vengono invertite. Di conseguenza, il carbone attivo adsorbe metanolo dall'evaporatore, dove viene prodotto l'effetto di raffreddamento utile. Se dell'acqua liquida è posizionata all'interno della scatola isolata, può essere trasformata in ghiaccio. Il calore di condensazione e di adsorbimento viene rilasciato all'ambiente durante il ciclo giorno/notte.

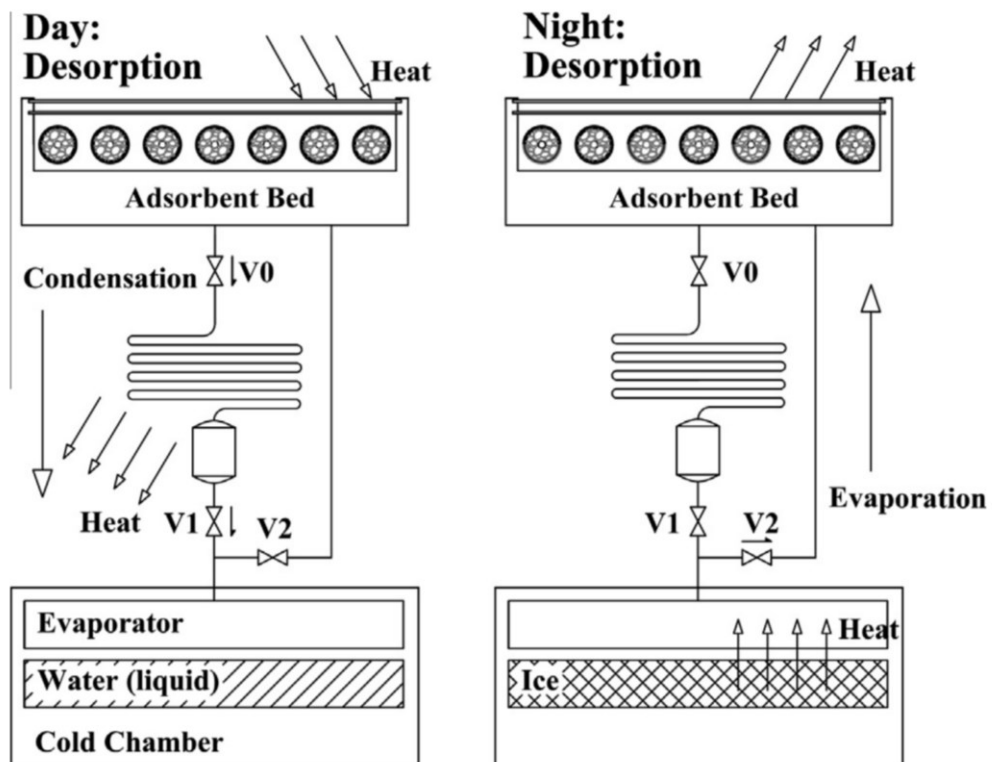


Figura 4 Schema operativo Solar Ice Maker [5]

In seguito allo studio delle fasi funzionali è stato realizzato il prototipo.

La parte più importante del sistema è il collettore assorbente, dove i gradienti di pressione, derivanti dalle condizioni termiche, guidano il trasferimento del vapore attraverso gli altri componenti. Il collettore assorbente è composto da un fascio di tubi, realizzato con 10 tubi, in cui sono caricati circa 20 kg di adsorbente. È stato selezionato carbone attivo SRD 1352/3 (origine: guscio di cocco, prodotto da Chemviron Carbons Ltd.), che lavora in coppia con il metanolo. La dimensione delle particelle varia tra 0,6 e 1,7 mm, valori che riducono le resistenze alla diffusione interparticellare, garantendo un adeguato trasporto di massa lungo la lunghezza del tubo. Il collettore solare è di tipo piano con un'area esposta di 1,2 m². Questo design offre il vantaggio di compattezza del componente e riduce le resistenze al trasferimento di calore dal collettore solare al carbone attivo. I tubi sono rivestiti con uno strato ad alta assorbenza e bassa emissività per massimizzare l'energia solare assorbita e ridurre le perdite di energia termica.

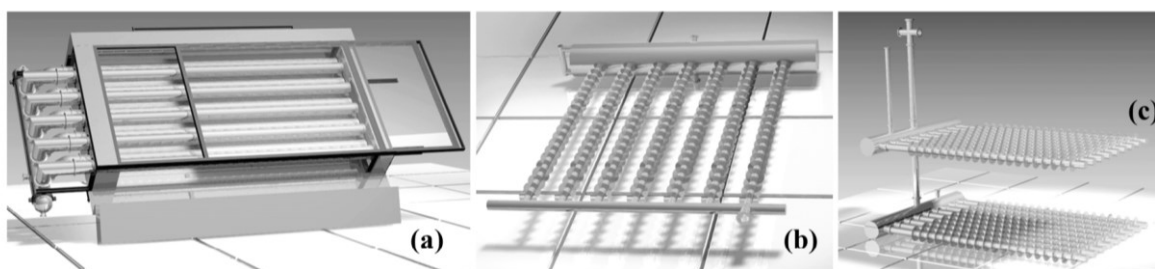


Figura 5 Collettore solare (a), Condensatore (b), Evaporatore (c) [5]

La Figura 5 mostra il sistema integrato "adsorber/solar collector", installato all'interno di un involucro metallico isolato. Questo sistema è dotato di persiane che possono essere aperte durante la fase di adsorbimento per permettere la dissipazione del calore di adsorbimento dal carbone attivo all'ambiente esterno. Inoltre, l'angolo di inclinazione dell'adsorber/solar collector può essere regolato per ottimizzarne l'efficienza in base alla latitudine e al periodo dell'anno. L'adsorber può essere parzialmente smontato per effettuare test con un numero variabile di tubi e massa di materiale, al fine di valutare la sensibilità di questi parametri sulle prestazioni della macchina. Inoltre, il design consente di riempire i tubi con materiali adsorbenti diversi per identificare il materiale più adatto per la produzione di ghiaccio, la sua dimensione ottimale delle particelle, ecc.

Il condensatore ad aria, progettato specificamente, è composto da sette tubi alettati collegati a un ricevitore cilindrico per la raccolta del metanolo condensato. Al termine della fase di desorbimento, il metanolo liquido raccolto nel ricevitore viene trasferito all'evaporatore tramite una valvola automatica. L'evaporatore è composto da diciotto tubi alettati organizzati su due livelli interconnessi, offrendo una grande superficie di scambio termico e un elevato tasso di trasferimento del calore. Tutti i tubi alettati convogliano il refrigerante a due collettori cilindrici, che possono essere parzialmente smontati per scopi di analisi della sensibilità. L'evaporatore è situato all'interno di una scatola altamente isolata dove l'effetto di raffreddamento si ottiene per convezione naturale e può essere aperto per inserire/rimuovere la sostanza da raffreddare (cibo, medicinali, acqua). Nei test presentati, l'acqua da ghiacciare è stata collocata in quattro contenitori, uno dei quali è dotato di una termocoppia per monitorare l'evoluzione della temperatura durante i test. Il materiale di costruzione scelto è l'acciaio inox AISI 304, selezionato per evitare problemi di corrosione con il metanolo usato come refrigerante.

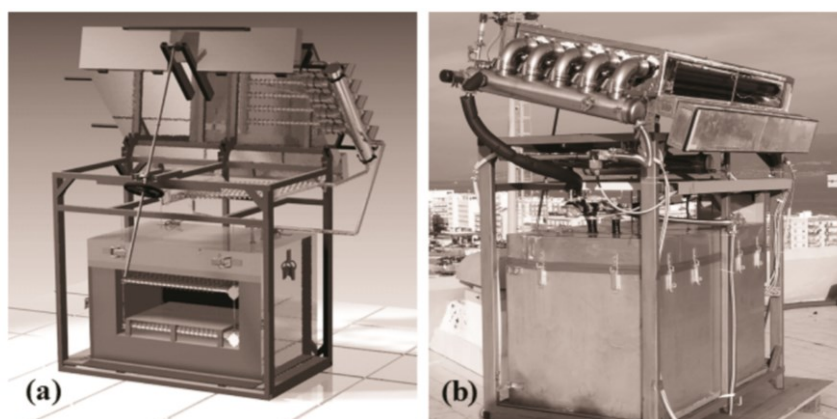


Figura 6 Rendering del Solar Ice Maker (a), Reale assemblato del Solar Ice Maker (b) [5]

La Figura 6 mostra una vista 3D del prototipo e dell'apparato reale dotato di dispositivi ausiliari. I tre principali componenti precedentemente descritti, montati su una struttura metallica adeguata, sono collegati tramite un sistema di tubazioni e una serie di valvole a vuoto. Il sistema è dotato di sensori di pressione (piezoresistivi) e di temperatura (termocoppie di tipo T, classe 1), con precisioni rispettive di ± 2 mbar e $\pm 0,5$ °C, che permettono di monitorare l'evoluzione del ciclo di ad/adsorbimento e le variabili operative più rilevanti. È installato anche un piranometro per misurare la radiazione globale, posizionato sullo stesso piano del collettore solare. Tutti i sensori e le valvole automatiche sono collegati a un sistema di acquisizione e controllo dei dati. Un software specifico, sviluppato in ambiente LabVIEW, consente il funzionamento automatico della macchina per il ghiaccio. Le dimensioni complessive della macchina sono circa 1,7 x 1,5 x 0,95 m, mentre il peso totale è di circa 500 kg. Le principali caratteristiche del prototipo sono riportate nella Tabella 1.

Solar Collector	
Exposed area	1.2 m ²
Selective surface:	SolMax Foil ($\alpha= 95-99\%$; $\varepsilon= 4-10\%$)
Tube bundle	5 tubes DN 60x1.73m + 5 tubes DN 60x1.63 m
Total Surface	3.7 m ²
Adsorbent material	SRD 1352/3 Chemviron Carbons Ltd
Adsorbent Mass	20 kg
Grain size	0.6-1.7 mm
Condenser	
	Air-cooled , 7 finned tubes DN 16, length 1 m Cylindrical receiver (DN100, 6.5 liters)
Total surface	4.08m ²
Evaporator	
	18 finned tubes DN 25, length 1 m in 2 interconnected levels
Total surface	18.45m ²
Insulated box	
Internal volume	1000 x 640 x 500 mm =0.32 m ³
External volume	1.3 m ³
Insulation material	Polyurethane foam

Tabella 1 Caratteristiche principali del Solar Ice Maker [5]

Il prototipo è installato sul tetto dell'edificio CNR-ITAE a Messina (38° 11' di latitudine N). Per massimizzare l'energia solare raccolta, il prototipo è orientato verso sud con un angolo di inclinazione di circa 38°. È stata eseguita una completa evacuazione dell'adsorbente per rimuovere aria e gas residui utilizzando una pompa a vuoto per 8 ore e riscaldando il carbonio in una giornata di sole fino a raggiungere una temperatura massima di circa 95°C. Sono stati caricati 7 litri di metanolo nel sistema, una quantità ottimale calcolata con il modello sviluppato. Questa quantità è sufficiente per produrre l'effetto di raffreddamento richiesto e mantenere un serbatoio costante di quasi 2 litri nell'evaporatore, utile per favorire il processo di evaporazione.

I test sul campo sono stati eseguiti in due giorni rappresentativi, rispettivamente l'11 febbraio 2013 (stagione invernale) e il 20 marzo 2013 (stagione primaverile). Le condizioni climatiche operative sono riportate nella Figura 7. L'energia solare fornita è abbastanza simile, sebbene il test di marzo registri una leggera maggiore nuvolosità. Le temperature ambientali variano tra una differenza minima di 0,3°C durante la notte e una differenza massima di 4,3°C durante il giorno. Queste caratteristiche dei giorni selezionati li rendono utili per confrontare l'influenza della temperatura di condensazione sulle prestazioni del sistema. La Tabella 2 riassume la programmazione delle fasi dei cicli termodinamici eseguiti.

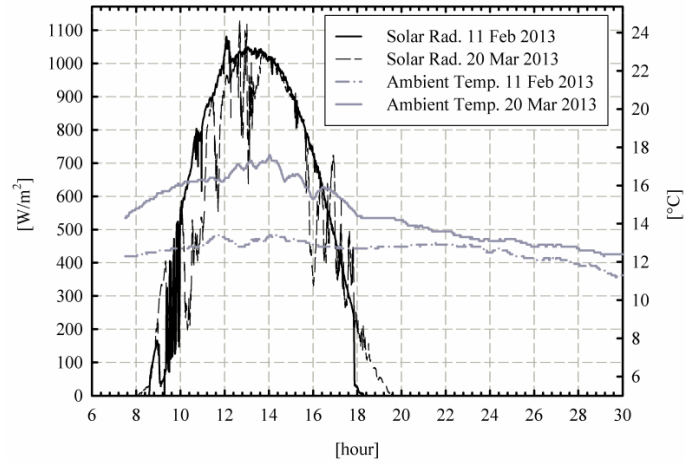


Figura 7 Condizioni climatiche durante la fase di test a Messina [5]

	Start time of the operational phase	Solar Radiation [W/m ²]
11 February 2013		
(Sunrise: 6:54; Sunset: 17:30)		
Isosteric heating	7:30 (+0:36 sunrise)	0
Desorption ¹ + cold box opening	9:30 (+2:36 sunrise)	145 (at 9:30); 1081 (Peak)
Isosteric Cooling + water substitution	18:30 (+1:00 sunset)	0
Adsorption ²	19:15(+1:45 sunset)	0
20 March 2013		
(Sunrise: 6:00; Sunset: 18:10)		
Isosteric heating	7:00 (+1:00 sunrise)	0
Desorption	9:30 (+3:30 sunrise)	225 (at 9:30); 1024 (Peak)
Cold box opening	10:40	430
Isosteric Cooling+ water substitution	18:40(+0:30 sunset)	80
Adsorption	20:00(+1:50 sunset)	0

¹ valve V1 open, V2 closed
² valve V1 closed, V2 open

Tabella 2 Performance rilevate del ciclo analizzato [5]

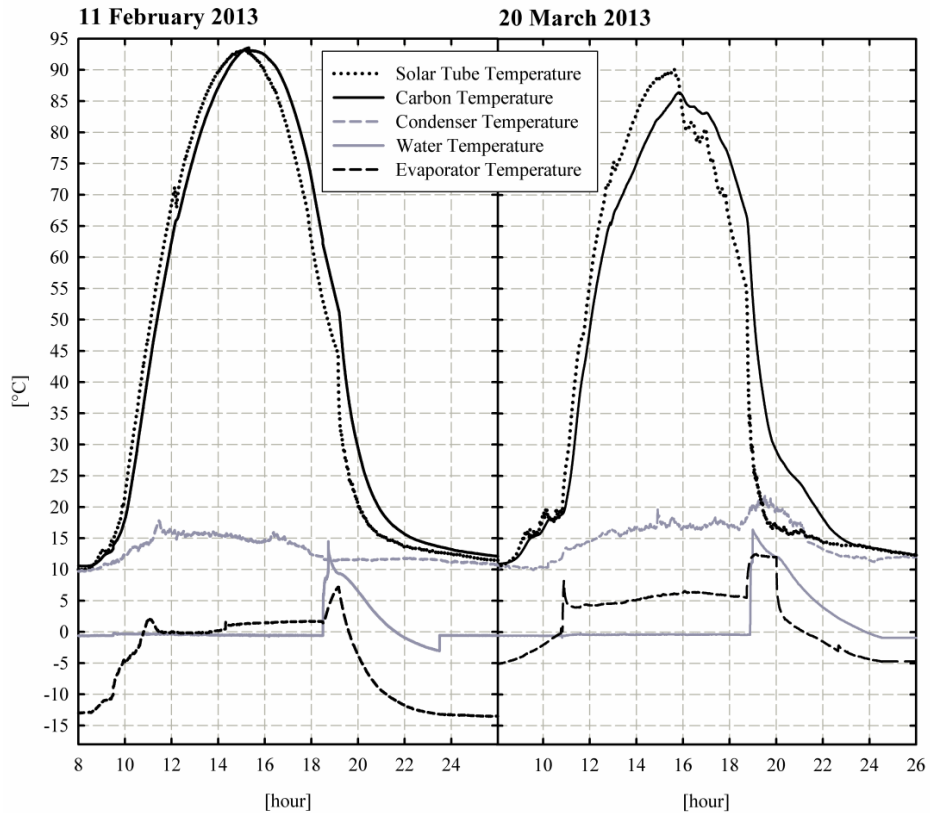


Figura 7 Andamento delle temperature durante la fase di test a Messina [5]

Durante il giorno, la radiazione solare viene catturata efficacemente, raggiungendo alte temperature sui granuli di adsorbente. Le temperature del carbonio raggiungono rispettivamente circa 93°C e 85°C nei test di febbraio e marzo, garantendo una sufficiente desorbimento del refrigerante. La differenza di temperatura tra i tubi e il carbonio riflette l'inerzia termica del collettore e l'efficienza del trasferimento di calore. Per raggiungere la temperatura massima dei tubi servono circa 6 ore, mentre un'ora è necessaria per il picco di temperatura del carbonio. Al termine della fase di riscaldamento, la scatola contenente il ghiaccio viene aperta per controllare la quantità di ghiaccio prodotto, che rimane costante intorno a 0°C grazie ad un buon isolamento termico della scatola e al calore latente di fusione alto del ghiaccio. Durante la notte, la temperatura esterna consente di raffreddare il collettore adsorbente, producendo un'efficace refrigerazione nella scatola. La temperatura dell'evaporatore scende a -13,6°C l'11 febbraio e a -5,3°C il 20 marzo, permettendo la produzione di ghiaccio. Sono stati prodotti e conservati rispettivamente 5 kg e 4,6 kg di

ghiaccio. Il Coefficiente di Prestazione Solare (COP) è stato di 0,08 l'11 febbraio e di 0,063 il 20 marzo.

$$COP_S = \frac{Q_e}{Q_t} = \frac{Q_{sw} + Q_L + Q_{si}}{Q_t} = \frac{m_w c_{pw} \Delta T_w + m_i \Delta L + m_i c_{pi} \Delta T_i}{A \int_0^t I(t) dt} \quad (1)$$

Il COP (Coefficiente di Prestazione) è il rapporto tra l'effetto di raffreddamento utile Q_e e l'energia solare giornaliera raccolta Q_t sulla superficie del collettore solare. Q_e include il calore sensibile e il calore latente di fusione dell'acqua. Le prestazioni complessive del prototipo sono riassunte nella Tabella 3.



Figura 8 Ghiaccio prodotto all'interno del serbatoio [5]

Day	11 February 2013	20 March 2013
Solar Radiation Energy [kJ]	28664	26961
COP_{solar}^1	0.08	0.063
Daily ice production [kg]	5	4.6
Maximal Carbon Temperature [°C]	93.0	86.4
Average Ambient Temperature ² [°C]	13.0	16.2
Minimal Evaporator Temperature [°C]	-12.4	-5.7

¹ COP_{solar} is calculated as reported in (Vasta et al., 2008)
² Considering only the diurnal period affecting the desorption phase

Tabella 3 Prestazioni del Solar Ice Maker [5]

I risultati mostrano che la performance del sistema dipende significativamente dalla quantità di radiazione solare captata e dalla temperatura ambientale diurna. Una diminuzione del 7% della radiazione solare, insieme a un aumento di 3°C della temperatura ambientale, comporta una riduzione del 20% delle prestazioni complessive del sistema. La radiazione solare influisce sulla temperatura massima dell'adsorbente, che è cruciale per la fase di desorbimento, mentre la temperatura ambientale diurna incide sulla velocità di condensazione del metanolo. Temperature ambientali più elevate o una riduzione delle temperature di desorbimento portano a un calo delle prestazioni del macchinario.

I primi test condotti nel campo evidenziano l'importanza di progettare il sistema in base alle condizioni climatiche locali per ottenere unità ad alte prestazioni. Condensatori ottimizzati sono necessari in climi con alte temperature diurne medie, mentre in aree con tempo parzialmente nuvoloso sono necessari collettori solari efficienti.

In questo esperimento è stato presentato un nuovo prototipo di produttore di ghiaccio solare a adsorbimento, utilizzando la coppia attivo carbonio/metanolo. Il prototipo è stato progettato e ottimizzato mediante un modello matematico. I test all'aperto effettuati al CNR-ITAE di Messina (~38° di latitudine N) dimostrano che il sistema, nella sua configurazione base, può produrre fino a 5 kg di ghiaccio al giorno con un COP solare di 0,08. Il ghiaccio prodotto è conservato per tutto il giorno successivo, confermando la possibilità di utilizzare questa tecnologia per la conservazione di vaccini o alimenti in aree remote. Inoltre, i test hanno confermato che la tecnologia è conforme ai requisiti delle principali organizzazioni umanitarie.

I risultati suggeriscono che è fondamentale prestare attenzione nella progettazione dei componenti della macchina in relazione alle condizioni climatiche operative. Le prestazioni diminuiscono quando la macchina opera a temperature diurne leggermente più elevate o con una minore radiazione solare. Le attività future riguarderanno un'analisi più approfondita per identificare i parametri di costruzione più rilevanti su cui concentrare gli sforzi di ottimizzazione. Sulla base di questo studio, sarà possibile sviluppare un nuovo prototipo più compatto e attraente per il mercato.

4. SVILUPPO DI UN SISTEMA ICE MAKER FINALIZZATO AL RAFFRESCAMENTO DELL'ACQUA

Di seguito sono riportati una serie di rendering che illustrano l'applicazione del sistema frigorifero ad assorbimento per lo sviluppo di una macchina innovativa, progettata per raffreddare l'acqua e distribuirla a una temperatura significativamente inferiore a quella ambientale. Questo progetto si propone di sfruttare i principi del ciclo ad assorbimento descritti in precedenza, adattandoli per l'uso in contesti dove l'acqua fresca è una risorsa limitata e preziosa.

L'obiettivo principale del progetto è la creazione di un sistema autonomo e sostenibile per il raffreddamento dell'acqua, ideale per l'uso in aree rurali, luoghi senza accesso stabile all'elettricità, o regioni caratterizzate da elevate temperature ambientali. Questo sistema potrebbe trovare applicazioni in vari contesti, tra cui la fornitura di acqua potabile refrigerata per le comunità, il raffreddamento di ambienti industriali, agricoli o anche nel settore turistico, migliorando il comfort e la qualità della vita delle persone.

Il progetto si basa sull'utilizzo di una fonte di calore sostenibile, come l'energia solare, per alimentare il ciclo di refrigerazione ad assorbimento. Questo approccio offre numerosi vantaggi, tra cui:

- **Autonomia Energetica:** Il sistema non richiede energia elettrica per il suo funzionamento, rendendolo perfetto per aree isolate o con accesso limitato alla rete elettrica.
- **Sostenibilità Ambientale:** Utilizzando fonti di energia rinnovabile, il sistema contribuisce alla riduzione delle emissioni di gas serra, promuovendo una tecnologia ecologica e in linea con le esigenze moderne di sostenibilità.

- **Costi Operativi Ridotti:** L'assenza di componenti meccanici complessi come i compressori riduce la manutenzione necessaria e i costi operativi, rendendo il sistema economico da gestire nel lungo periodo.
- **Versatilità d'Uso:** La macchina è progettata per essere utilizzata in diversi scenari, dai piccoli villaggi alle grandi strutture, grazie alla possibilità di modularità e scalabilità del design.

Nei rendering presentati in Figura 8,9,10,11 è possibile osservare diverse prospettive del sistema, evidenziando la struttura del pannello solare termico, il layout del circuito di assorbimento, e il design del serbatoio di raffreddamento dell'acqua. Ogni componente è stato progettato per massimizzare l'efficienza termica e minimizzare le perdite di calore, assicurando un raffreddamento efficace e un'erogazione costante di acqua fresca.

- **Collettore Solare Termico:** Progettato per catturare e concentrare la radiazione solare, convertendola in calore utilizzato per alimentare il generatore del ciclo di assorbimento. La struttura del pannello è ottimizzata per garantire un'elevata efficienza di raccolta solare anche in condizioni di irraggiamento non ottimali.
- **Ciclo di Refrigerazione:** Il ciclo di refrigerazione ad assorbimento è rappresentato con una particolare attenzione alla configurazione dei componenti chiave, come il generatore, l'assorbitore, il condensatore e l'evaporatore, evidenziando la disposizione che consente un trasferimento di calore efficace e una facile manutenzione.
- **Serbatoio di Raffreddamento:** Il serbatoio è progettato per mantenere l'acqua refrigerata a una temperatura costante, grazie a un isolamento termico avanzato che minimizza lo scambio di calore con l'ambiente esterno.

Per modellare il 3D cad è stato utilizzato come software SolidEdge in *figura 13* e per la renderizzazione Keyshot *figura 8,9,10,11*



Figura 8 Sistema a doppio serbatoio con quattro bocchette di uscita.

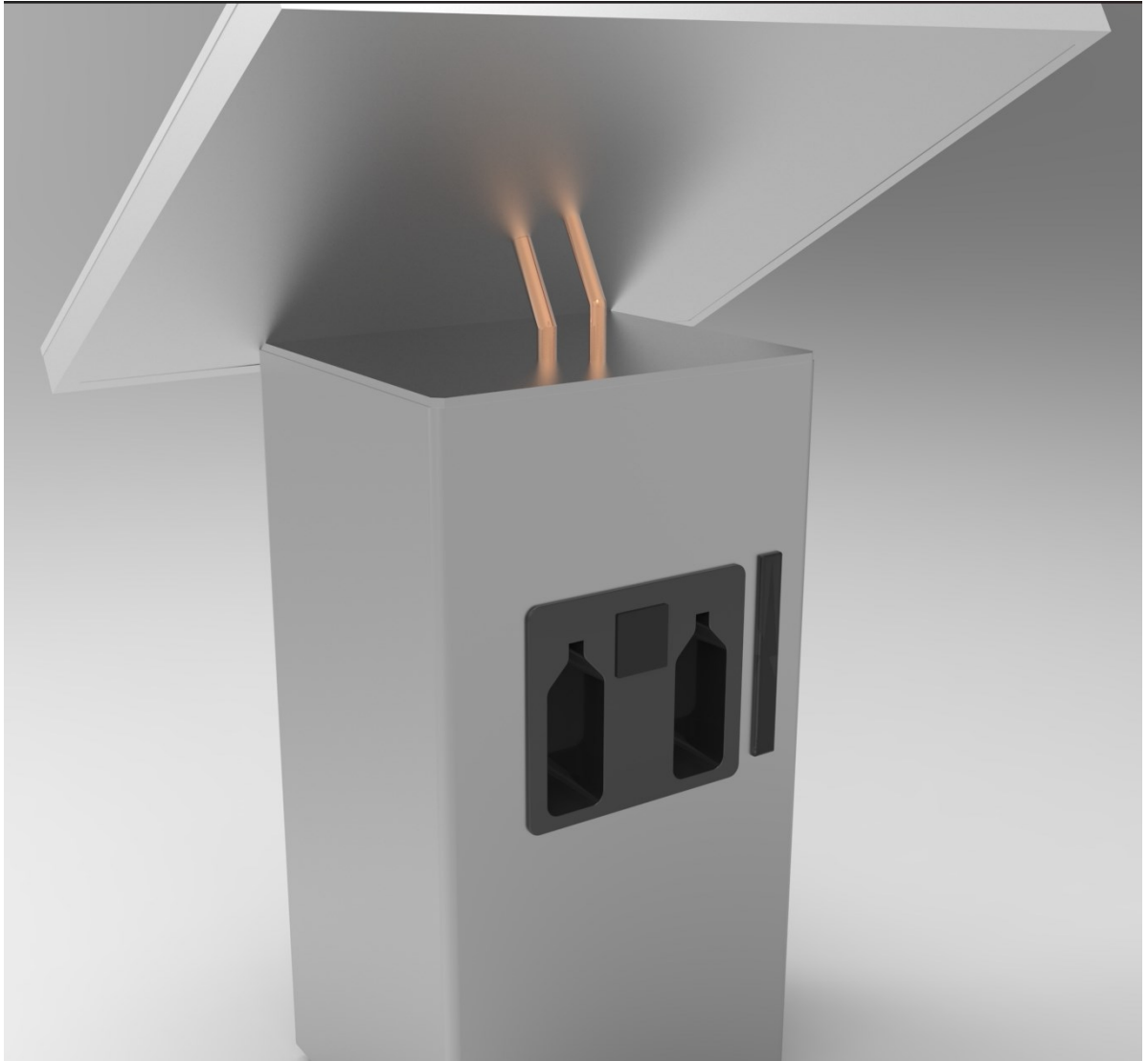


Figura 9 Sistema a singolo serbatoio con due bocchette di uscita.

4.1. PARTI GENERICHE CHE COMPONGONO IL SISTEMA

- un collettore solare
- un condensatore
- un evaporatore

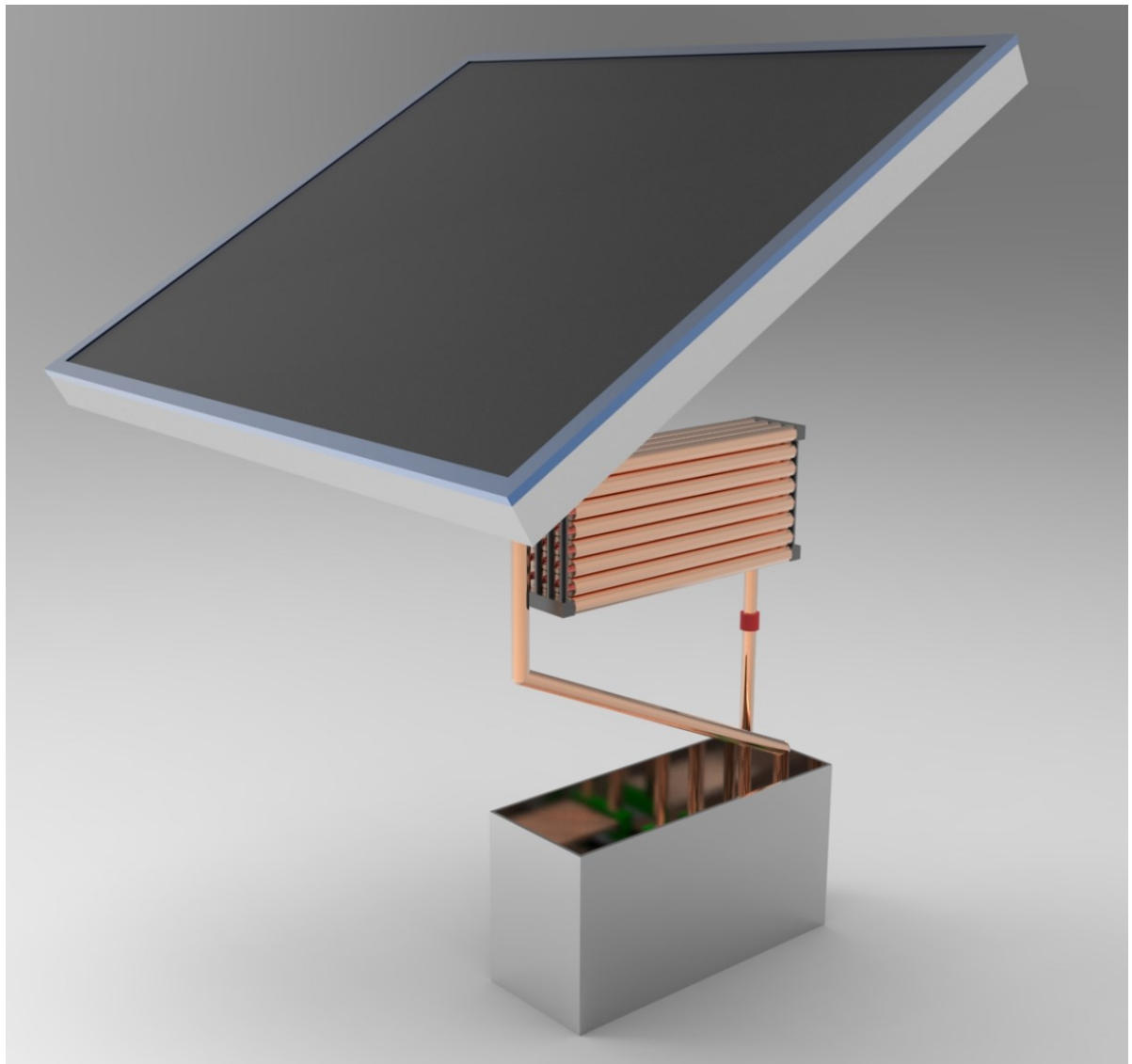


Figura 10 Rendering del complessivo Collettore-Condensatore-Evaporatore.



Figura 11 Rendering del Condensatore.

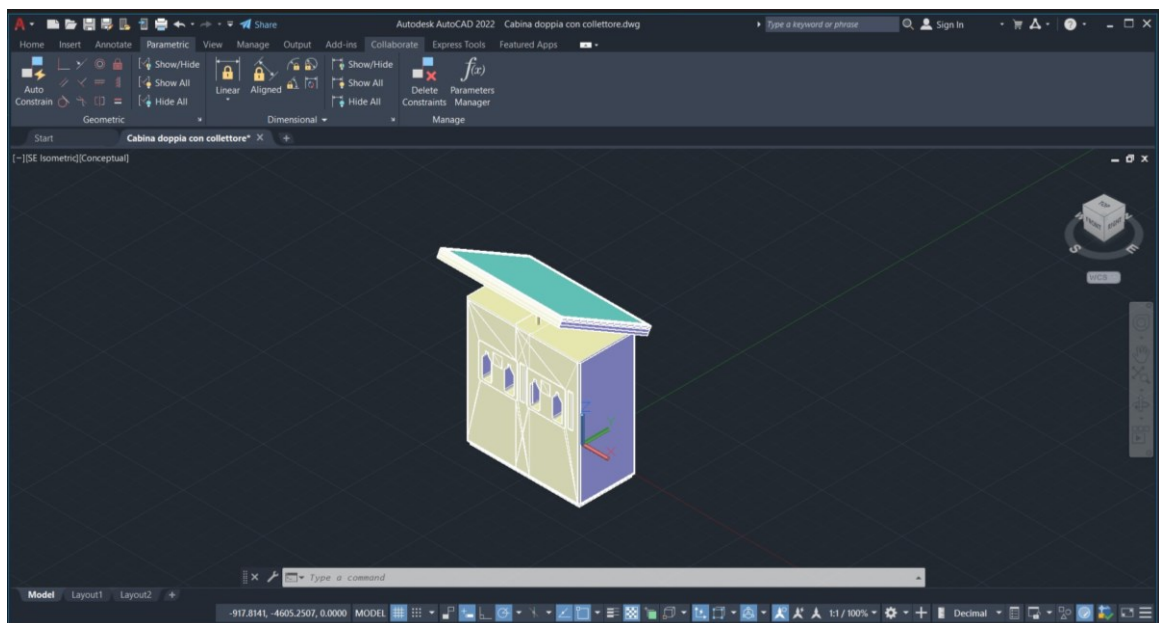


Figura 12 Assieme del Solar Ice Maker a due bocchette in Autocad.

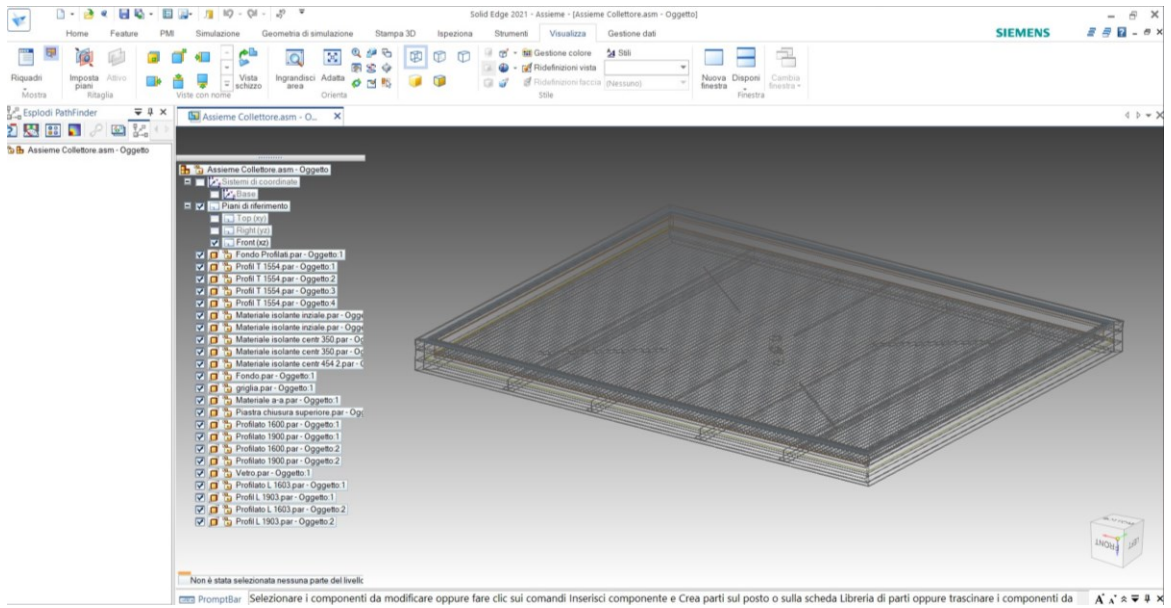
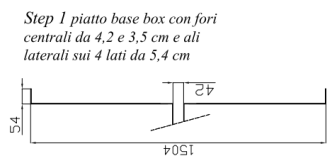
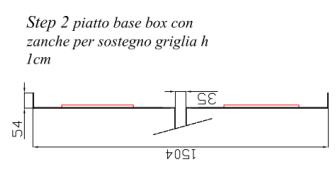
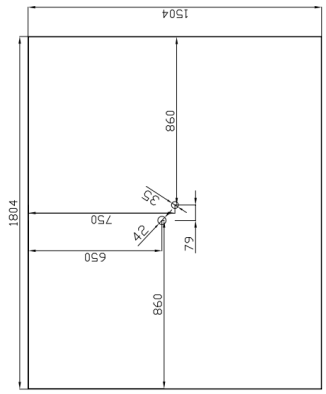


Figura 13 Asieme del collettore solare in SolidEdge



Cssone base box



Cssone base box

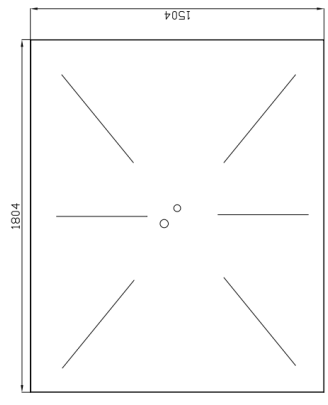
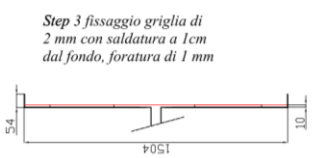
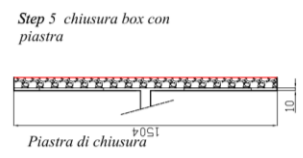
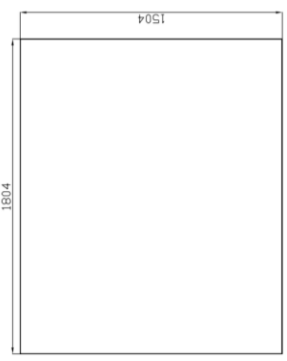
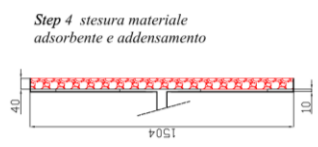
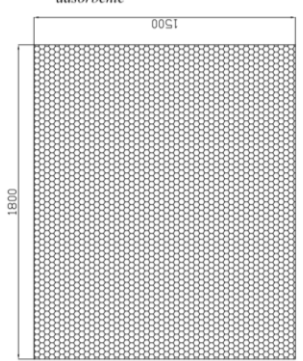


	Tavola n° 2
--	-----------------------

Figura 16 Tavola con fase 1 e 2 del Solar Ice Maker



Griglia sostegno materiale adsorbente



Piastra di chiusura

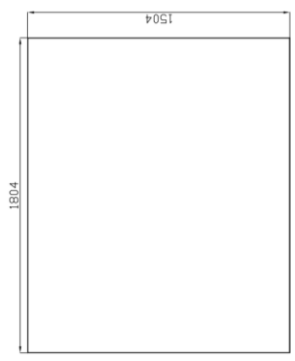
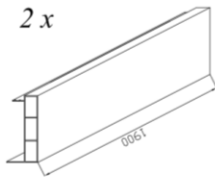
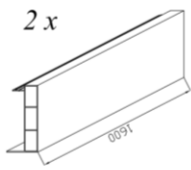


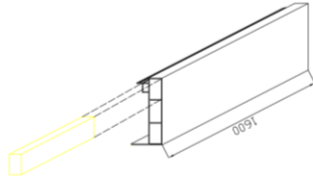
	Tavola n° 3
--	-----------------------

Figura 17 Tavola con fase 3,4 e 5 del Solar Ice Maker

Step 6 tagliare profilato di alluminio in 2 pezzi da 1,6 m e 2 pezzi da 1,9 m

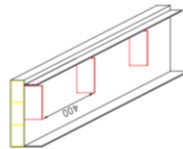


Step 7 inserire materiale isolante nei fori del profilato



Step 8 saldare lamelle rettangolari per posizionamento box ogni 40 cm (4 per lato)

Spessore 2mm



Step 9 saldare 2 profilati di alluminio uno lungo e uno corto insieme in modo da formare un'angolo da 90 gradi

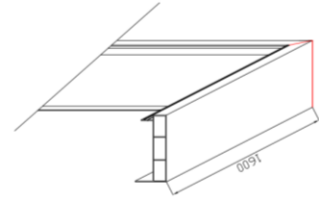


Figura 18 Tavola con fase 6,7,8 e 9 del Solar Ice Maker

Step 10 posizionare lastra in alluminio su base profilati con fori centrali



Step 11 inserire 4 profilati di alluminio a T alti 40 mm lunghi 1554 mm



Step 12 bis fissaggio profilati a T con piastra tramite saldatura a cordoni d'angolo di 50 mm

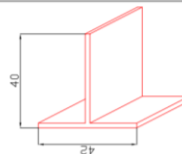
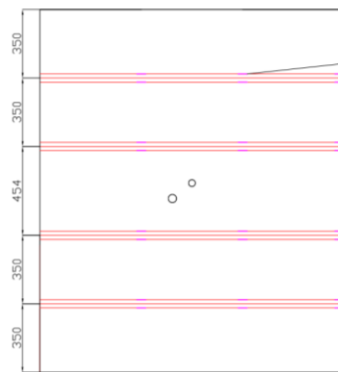
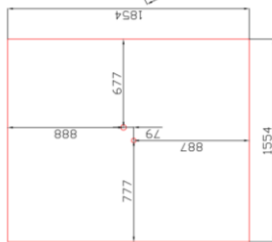
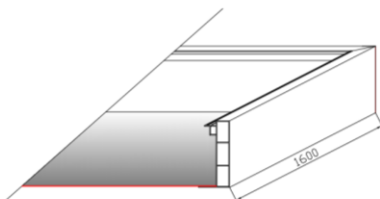
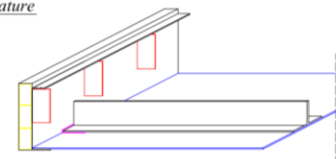


Figura 19 Tavola con fase 10, 11 e 12 del Solar Ice Maker

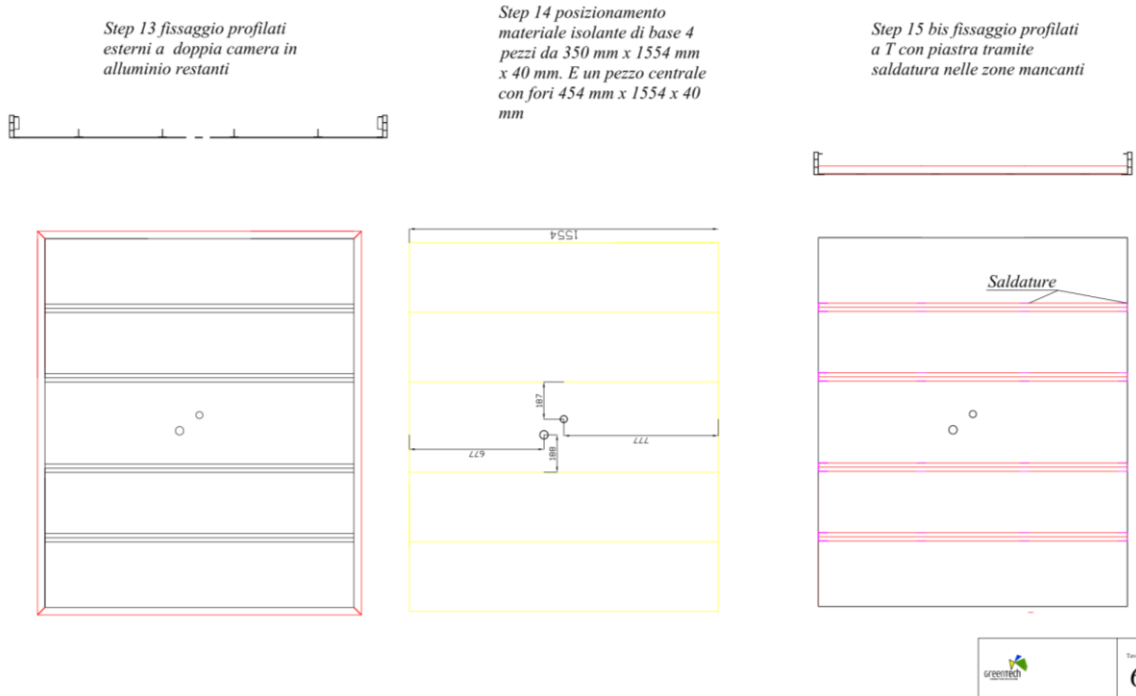


Figura 20 Tavola con fase 13, 14 e 15 del Solar Ice Maker

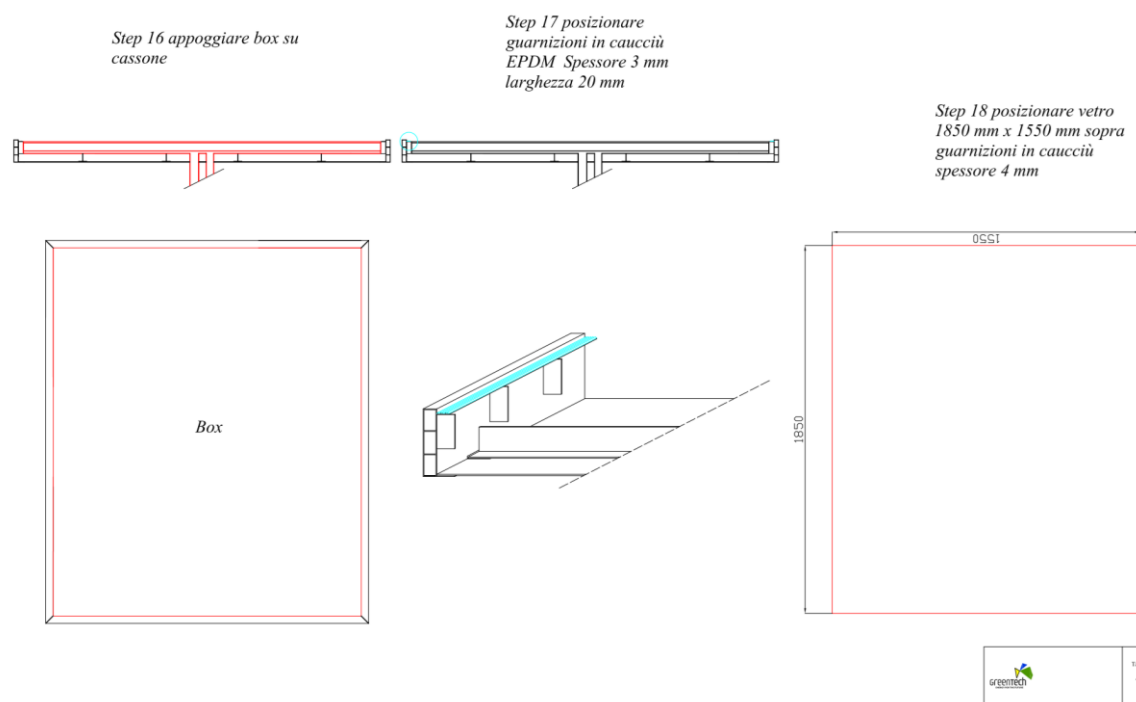
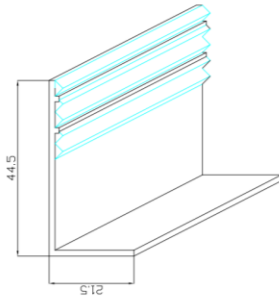
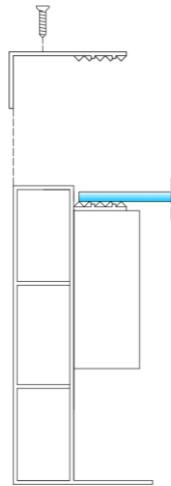


Figura 21 Tavola con fase 16, 17 e 18 del Solar Ice MakeR

Step 19 posizionare guarnizioni in caucciù EPDM Spessore 3 mm larghezza 20 mm su profilati ad L



Step 20 fissaggio vetro con profilato ad L. 21.5mm x 44.5 mm S= 1.5 mm



Step 7 posizionare vetro 1850 mm x 1550 mm sopra guarnizioni in caucciù spessore 4 mm

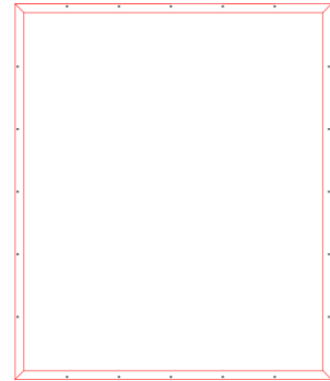


Figura 22 Tavola con fase 19,20 e 21 del Solar Ice Maker

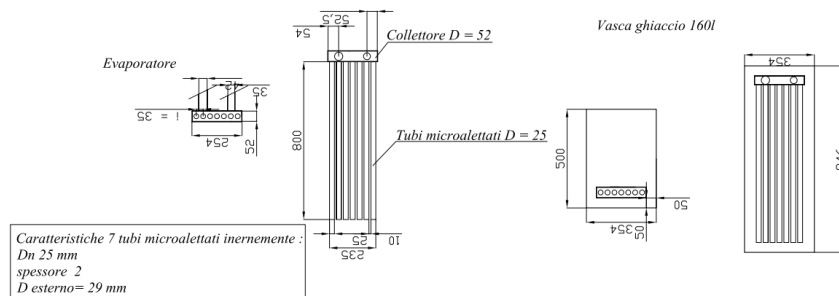
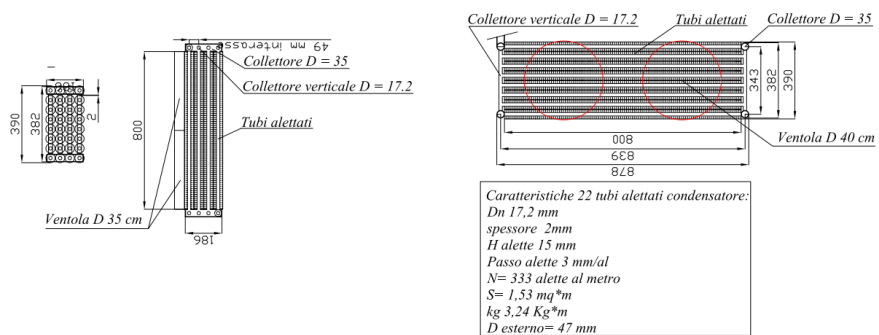


Figura 23 Tavola con dettaglio condensatore e evaporatore del Solar Ice Maker

4.2.1. PROGETTAZIONE DELLE PARTI CHE COMPONGONO IL COLLETTORE SOLARE

Direttamente nelle tavole sopra illustrate possiamo trovare i passi per il corretto assemblaggio del collettore solare in figura 14, qui rapidamente riportati:

1. Piatto base box con fori centrali in figura 16
2. Piatto base box con aggiunta anche per sostegno griglia in figura 16
3. Fissaggio griglia con saldatura sollevata dal fondo in figura 17
4. Stesura materia adsorbente e addensamento in figura 17
5. Chiusura box con piastra in figura 17
6. Tagliare profilato alluminio per perimetro in figura 18
7. Inserire materiale isolante nei fori del profilato in figura 18
8. Saldare lamelle rettangolari per posizionamento box in figura 18
9. Saldare i due profilati di alluminio sull'angolo in figura 18
10. Posizionare lastra in alluminio su base profilati con fori centrati in figura 19
11. Inserire 4 profilati in alluminio a T in figura 19
12. Fissaggio profilati a T tramite saldatura in figura 19
13. Fissaggio profilati esterni a doppia camera rimanenti in figura 20
14. Posizionamento materiale isolante di base in figura 20
15. Fissaggio profilati a T tramite saldatura in figura 20
16. Appoggiare box su cassone in figura 21
17. Posizionare guarnizioni in figura 21
18. Posizionare vetro spessore 4mm in figura 21
19. Posizionare guarnizioni in figura 22
20. Fissaggio vetro con profilato in figura 22

Concluso il montaggio all'interno del piping verrà riversato una miscela di metanolo.

Nelle Figura 24 è raffigurata una foto del collettore utilizzato per la costruzione prima del montaggio.



Figura 24 Collettore solare utilizzato in fase di realizzazione

Nelle Figura 25 è raffigurata una foto della parte frontale della macchina realizzata, ovvero l'interfaccia operatore finale realizzata sagomata appositamente per apporre le bottiglie di plastica da riempire e tutti i pulsanti appositi.



Figura 25 Pannello frontale interfaccia utente

4.3. REALIZZAZIONE DEL MACCHINA

Oltre ai componenti principali del sistema, quali il collettore solare, il condensatore e l'evaporatore, è stata prevista l'integrazione dei seguenti accessori per migliorare ulteriormente le prestazioni e la funzionalità del sistema.

Pannello Solare per Ricarica della Batteria Tampone, finalità:

- **Alimentazione del Circuito di Controllo e Regolazione della Temperatura:** Il pannello solare fornisce energia alla batteria tampone, che a sua volta alimenta il circuito elettronico responsabile del monitoraggio e della regolazione della temperatura all'interno del sistema.
- **Alimentazione della Pompa e delle Elettrovalvole per l'Erogazione dell'Acqua:** La batteria tampone alimenta anche la pompa e le elettrovalvole che gestiscono l'erogazione dell'acqua. Ciò assicura un flusso continuo e controllato del fluido refrigerato verso le bocchette di uscita, migliorando l'efficienza e la precisione nella distribuzione dell'acqua.
- **Alimentazione della Ventola per lo Scambio Termico dell'Evaporatore:** Il pannello solare fornisce energia alla ventola installata nell'evaporatore, che aumenta l'efficienza dello scambio termico. La ventola migliora la circolazione dell'aria attorno all'evaporatore, accelerando il processo di raffreddamento e ottimizzando le prestazioni complessive del sistema.

L'aggiunta di questi accessori non solo arricchisce la funzionalità del sistema, ma offre anche numerosi vantaggi:

- **Autonomia Energetica:** Il pannello solare e la batteria tampone garantiscono che il sistema possa operare in modo autonomo anche durante le ore non di sole o in condizioni di luce ridotta, migliorando la resilienza e l'affidabilità complessiva.

- **Controllo Accurato:** L'alimentazione del circuito di controllo e regolazione della temperatura consente una gestione precisa delle condizioni interne, assicurando che il sistema risponda rapidamente alle variazioni di temperatura e mantenendo l'efficienza ottimale.
- **Efficienza dell'Erogazione:** La pompa e le elettrovalvole alimentate garantiscono un'erogazione fluida e controllata dell'acqua, evitando interruzioni e garantendo una distribuzione uniforme del fluido refrigerato.
- **Miglioramento dello Scambio Termico:** L'installazione della ventola aumenta l'efficienza dello scambio termico nell'evaporatore, riducendo i tempi di raffreddamento e migliorando la capacità del sistema di mantenere temperature basse.

5. CONCLUSIONI

La ricerca presentata nel presente lavoro di tesi ha avuto come obiettivo l'applicazione di un concetto consolidato, adattandolo a una soluzione pratica e di grande utilità.

Il risultato è una macchina frigorifera che sfrutta l'energia solare, la quale, completamente indipendente dalla rete elettrica, offre un servizio di raffrescamento a costo "zero".

Questo sistema presenta una serie di vantaggi significativi:

- Indipendenza dall'energia elettrica: Funziona autonomamente grazie all'energia solare, eliminando la dipendenza dalle reti elettriche tradizionali.
- Costi di esercizio nulli: Non richiede carburanti né elettricità, riducendo i costi operativi a zero.
- Emissioni inquinanti nulle: Utilizza materiali eco-compatibili e non emette sostanze nocive.
- Manutenzione nulla: Il design senza parti in movimento riduce la necessità di interventi di manutenzione.
- Materiali utilizzati non inquinanti: Non impiega ammoniaca o altri refrigeranti dannosi per l'ambiente.
- Estrema facilità d'uso: Il sistema è intuitivo e semplice da gestire.
- Accumulo termico e non elettrico: Consente di accumulare energia termica in modo efficiente.

Il progetto Solar Ice Maker nasce dalla necessità di affrontare la mancanza di accesso all'energia elettrica in molte regioni del mondo, in particolare in Africa, dove milioni di persone vivono senza i servizi energetici essenziali. [6] Questa macchina frigorifera solare rappresenta una risposta concreta per la conservazione di vaccini e alimenti, utilizzando esclusivamente energia solare.

Il progetto non si limita a risolvere una necessità immediata, ma si propone anche come esempio di integrazione della tecnologia a basso impatto ambientale nelle comunità locali.

I prossimi passi includono:

- Validazione Sperimentale: Testare il prototipo in condizioni reali per confermare la sua efficacia e affidabilità.
- Ottimizzazione: Migliorare i materiali e le configurazioni per aumentare l'efficienza energetica e le prestazioni del sistema.
- Collaborazioni: Esplorare opportunità con enti pubblici e privati per una produzione su larga scala e una distribuzione capillare.

In conclusione, il sistema descritto non è solo una soluzione innovativa e sostenibile per la refrigerazione e il raffreddamento dell'acqua, ma dimostra anche come l'integrazione di tecnologie avanzate e fonti di energia rinnovabile possa offrire risposte pratiche e rispettose dell'ambiente.

In molti paesi del mondo, soprattutto in quelli in cui lo sviluppo per le fonti energetiche non ha raggiunto ancora una vasta diffusione territoriale, stanno approfondendo, sviluppando e ottimizzando questa tecnologia.[6]

I rendering presentati offrono una visione dettagliata del progetto, evidenziando le sue potenzialità nel fornire una risposta concreta alle sfide del raffrescamento in contesti difficili, e rappresentano un passo significativo verso un futuro più sostenibile e accessibile per tutti.

BIBLIOGRAFIA

[1]

Ciclo termodinamico convenzionale di compressione ed espansione del fluido refrigerante

“G.Negri Di Montenegro et al., 2009”

[2]

Diagramma entalpico del ciclo frigorifero a compressione

“G. Negri Di Montenegro et al., 2009

[3]

Layout tipo di un impianto frigorifero ad assorbimento

“G. Negri Di Montenegro et al, 2009”

[4]

Design of an Experimental Solar-Powered, Solid-Adsorption Ice Maker

“M. Pons, J. J. Guilleminot”

"<https://doi.org/10.1115/1.3268115>" \t "_blank"

[5]

A stand-alone solar adsorption refrigerator for humanitarian aid

“Santori, G.; Brandani, S.; Santamaria, S.; Sapienza, A.; Freni, A., 2014”

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X1300529X>

[6]

Dimensioning of a Solar Adsorption-Powered Cooling Bed for Generating Relief Cooling.

“Alhialy, Nibal Fadel, International Journal of Heat & Technology, 2024”

<https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A16%3A10865024/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Agcd%3A178202622&crl=c>