

Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria



Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile

DIISM – Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

**REALIZZAZIONE E TEST DI UN SISTEMA DI
ACCUMULO TERMICO A BASE DI ERITRITOLE PER
UN FORNO SOLARE A SCATOLA PORTATILE**

*“Manufacture and test of an erythritol-based thermal energy
storage for a portable solar box cooker”*

Candidata:

Jasmine Giampieri

Relatore della Tesi di Laurea:

Prof. Giovanni Di Nicola

Correlatore della Tesi di Laurea:

Ing. Gianluca Coccia, PhD

INTRODUZIONE	1
---------------------------	----------

CAPITOLO 1: STATO DELL'ARTE	2
--	----------

1.1	ENERGIE RINNOVABILI.....	2
1.1.1	IL TRAMONTO DELL'ERA DEI COMBUSTIBILI FOSSILI	2
1.1.2	PERCHE' ABBANDONARE LE FONTI D'ENERGIA NON RINNOVABILI.....	4
1.1.3	IL PROTOCOLLO DI KYOTO	6
1.2	ENERGIA SOLARE.....	7
1.3	CAMPI D'APPLICAZIONE DELL'ENERGIA SOLARE	9
1.4	TIPOLOGIE DI FORNO SOLARE.....	11
1.4.1	FORNO SOLARE A PANNELLI	12
1.4.2	FORNO SOLARE A SCATOLA	13
1.4.3	FORNO SOLARE PARABOLICO	14
1.4.4	FORNO SOLARE AD ACCUMULO TERMICO.....	14
1.4.5	FORNO SOLARE A CONCENTRAZIONE	15

CAPITOLO 2: PROGETTAZIONE DEL FORNO SOLARE A SCATOLA PORTATILE.....	1
--	----------

2.1	FASI DI LAVORAZIONE	2
2.1.1	REALIZZAZIONE DELLA CAMERA DI COTTURA E VERNICIATURA	2
2.1.2	REALIZZAZIONE DELLA SCATOLA ESTERNA.....	5
2.1.3	Isolamento con lana di vetro	7
2.1.4	Sistema di concentrazione dei raggi solari.....	9
2.2	VERNICE.....	11
2.3	VETRO E ISO 9050_2003	12
2.4	ALLUMINIO	14
2.5	ANALISI FUNZIONALE.....	15

CAPITOLO 3: MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE	16
--	-----------

3.1	CARATTERISTICHE DEI PCM	16
3.2	CLASSIFICAZIONE DEI PCM.....	17
3.2.1	CLASSIFICAZIONE IN BASE AL TIPO DI MATERIALE.....	17
3.2.1.1	PCM ORGANICI	18
3.2.1.2	PCM INORGANICI	20
3.2.2	CLASSIFICAZIONE IN BASE ALLA TEMPERATURA DI FUSIONE	22
3.3	INCREMENTO DELLE PRESTAZIONI NEI PCM	22
3.4	PCM UTILIZZATO: ERITRITOLO	25
3.5	PENTOLA CON DOPPIO FONDO	27
3.6	REALIZZAZIONE DELLA PENTOLA	28

CAPITOLO 4: SETUP SPERIMENTALE	31
---	-----------

**PROCEDURE SPERIMENTALI, BANCO DI PROVA E FLUIDI
UTILIZZATI 31**

4.1	PROCEDURE DI CALCOLO STANDARD INTERNAZIONALI.....	31
4.1.1	PROCEDURA PROPOSTA DA KHALIFA ET AL.	31
4.1.2	PROCEDURA PROPOSTA DA MULLICK.....	32
4.2	INSTALLAZIONE DEL BANCO DI PROVA.....	33
4.2.1	TERMOCOPPIE.....	33
4.2.1.1	PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO.....	33
4.2.1.2	AFFIDABILITÀ DELLE TERMOCOPPIE	35
4.2.1.3	TERMOCOPPIE UTILIZZATE: TIPO K E TIPO T.....	35
4.2.2	PIRELIOMETRO	36
4.2.2.1	STRUTTURA DEL PIRELIOMETRO.....	37
4.2.2.2	INSTALLAZIONE E MANUTENZIONE	37
4.2.3	COMPUTER E ACQUISITORE.....	37
4.3	FLUIDI UTILIZZATI DURANTE LE PROVE.....	39
4.3.1	ACQUA DISTILLATA	39
4.3.2	OLIO SILICONICO	39

CAPITOLO 5: TEST SPERIMENTALI 41

5.1	PROVE A CARICO.....	42
5.1.1	PROVE CON ACQUA	43
5.1.2	PROVE CON OLIO SILICONICO.....	50
5.2	RIEPILOGO.....	54
5.2.1	FASE DI RISCALDAMENTO	55
5.2.2	FASE DI RAFFREDDAMENTO.....	56
5.3	PROVE CON OLIO DI SILICONE E PCM.....	56
5.3.1	FASE DI RISCALDAMENTO	58
5.3.2	FASE DI RAFFREDDAMENTO.....	58
5.4	SINTESI E CONFRONTO DELLE PROVE CON E SENZA PCM	59

CAPITOLO 6: CONCLUSIONI..... 62

BIBLIOGRAFIA 64

RINGRAZIAMENTI 66

INDICE DELLE FIGURE

- Fig. 1 - Diagrammi delle percentuali delle attuali fonti di energia
- Fig. 2 - Grafico eurostat degli obiettivi raggiunti e da raggiungere dai membri UE nell'utilizzo di risorse rinnovabili come fonte di energia
- Fig. 3 - Wind turbines farm
- Fig. 4 - Adesioni al protocollo di Kyoto
- Fig. 5 - Radiazione solare che investe il pianeta Terra
- Fig. 6 - Distribuzione dell'energia solare
- Fig. 7 - Energia solare e risposta della Terra come radiazione reirradiata
- Fig. 8 - Tipologie di forno solare: (a) forno solare a pannelli; (b) forno solare parabolico; (c) forno solare a scatola
- Fig. 9 - Forno solare a pannelli
- Fig. 10 - Forno solare a scatola
- Fig. 11 - Forno solare parabolico
- Fig. 12 - Pentola con PCM nell'intercapedine
- Fig. 13 - Forno solare a concentrazione (Heliac Solar Cooker)
- Fig. 14 - Forno solare a scatola realizzato presso il DIISM
- Fig. 15 - Dimensioni forno a media efficienza
- Fig. 16 - Pezzo "N"
- Fig. 17 - Pezzo "M"
- Fig. 18 - Camera di cottura
- Fig. 19 - Pezzo "P" piegato e zavorrato
- Fig. 20 - Verniciatura camera di cottura e piano inclinabile
- Fig. 21 - Pezzi che formano il corpo esterno
- Fig. 22 - Posizione dei listelli di rinforzo
- Fig. 23 - Involucro esterno
- Fig. 24 - Scatola esterna con basamento
- Fig. 25 - Inserimento camera di cottura nell'involucro esterno
- Fig. 26 - Distanziatori e isolamento camera interna
- Fig. 27 - Riempimento fessure con materiale isolante
- Fig. 28 - Scatola forno verniciata
- Fig. 29 - Disegni pannelli riflettenti (specchi)
- Fig. 30 - Pannelli riflettenti
- Fig. 31 - Specchi montati
- Fig. 32 - Forno solare ultimato
- Fig. 33 - Diagramma assorbimento
- Fig. 34 - Diagramma emissività
- Fig. 35 - Struttura fogli di alluminio
- Fig. 36 - Riflettanza totale dell'alluminio
- Fig. 37 - Differenze di energia accumulata tra calore sensibile e calore latente
- Fig. 38 - Classificazione dei PCM in base al tipo di materiale
- Fig. 39 - (a) Unità di accumulo a calore latente con alette longitudinali interne, (b) unità di accumulo a calore latente con alette longitudinali esterne, (c) unità di accumulo a tubi coassiali con alette anulari
- Fig. 40 - Esempio di sistema con unità multiple di PCM con variazione di temperatura assiale
- Fig. 41 - Esempio di sistema con unità multiple di PCM senza variazione di temperatura assiale
- Fig. 42 - Esempio di PCM incapsulato
- Fig. 43 - Schiuma metallica a celle aperte
- Fig. 44 - Analisi con spettrometro ad infrarossi con trasformata di Fourier (FTIR) del campione di Eritritolo

Fig.45 - Analisi con DSC dei campioni di Eritritolo
Fig. 46 - Fase di assemblaggio delle pentole utilizzate.
Fig. 47 - Sistema di fissaggio delle pentole con tubicino in acciaio INOX per il passaggio delle termocoppie.
Fig. 48 - Tubicini in acciaio INOX saldati ai bulloni
Fig. 49 - Pentola verniciata
Fig. 50 - Pentola terminata
Fig. 51 - Variazione del calore specifico in funzione della temperatura
Fig. 52 - Variazione della conducibilità termica in funzione della temperatura
Fig. 53 - Esempio di allestimento banco di prova
Fig. 54 - Termocoppie collegate ad un acquisitore
Fig. 55 - Termocoppie tipo K a sinistra, tipo T a destra
Fig. 56 - Pireliometro
Fig. 57 - Tubo del pireliometro
Fig. 58 - Esempio della schermata del programma di acquisizione durante il test sperimentale (Software PicoLog)
Fig. 59 - Computer per la visualizzazione di dati
Fig. 60 - Variazione del calore specifico in funzione della temperatura
Fig. 61 - Variazione della conducibilità termica in funzione della temperatura
Fig. 62 - Forno solare durante la prova a carico
Fig. 63 - Dati rilevati e riportati in Excel (prova 06/12/2017)
Fig. 64 - Grafico delle rilevazioni (prova 06/12/2017)
Fig. 65 - Foglio elaborazione dati (prova 06/12/2017)
Fig. 66 - Dati rilevati e riportati in Excel (prova 01/06/2018)
Fig. 67 - Grafico delle rilevazioni (prova 01/06/2018)
Fig. 68 - Foglio elaborazione dati (prova 01/06/2018)
Fig. 69 - Dati rilevati e riportati in Excel (prova 01/06/2018)
Fig. 70 - Grafico delle rilevazioni (prova 20/06/2018)
Fig. 71 - Foglio elaborazione dati (prova 20/06/2018)
Fig.72 - Dati rilevati e riportati in Excel (prova 04/07/2018)
Fig. 73 - Grafico delle rilevazioni (prova 04/07/2018)
Fig. 74 - Foglio elaborazione dati (prova 20/06/2018)
Fig.75 - Dati rilevati e riportati in Excel (prova 11/06/2018)
Fig. 76 - Grafico delle rilevazioni (prova 11/06/2018)
Fig. 77 - Foglio elaborazione dati (prova 11/06/2018)
Fig.78 - Dati rilevati e riportati in Excel (prova 10/07/2018)
Fig. 79 - Grafico delle rilevazioni (prova 10/07/2018)
Fig. 80 - Foglio elaborazione dati (prova 10/07/2018)
Fig. 81 - Prove con PCM e olio silconico del 27/09/2018
Fig. 82 - Prove con PCM e olio silconico del 25/09/2018

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1 - Caratteristiche energetiche del vetro

Tab. 2 - Distribuzione spettrale della radiazione solare globale

Tab. 3 - Analisi funzionale del forno

Tab. 4 - Temperatura e calore latente di paraffine in base al numero di atomi di carbonio presenti nella catena

Tab. 5 - Elenco PCM non paraffini con relativa temperatura di fusione e calore latente di fusione

Tab. 6 - Elenco idrati con relativa temperatura di fusione e calore latente di fusione

Tab. 7 - Elenco di alcuni metalli utilizzati come PCM con relativa temperatura di fusione e calore latente di fusione

Tab. 8 - Intervalli di temperatura e relative applicazioni dei PCM

Tab. 9- Proprietà termo-fisiche dell'Eritritolo

Tab. 10 -Misure principali delle pentole

Tab. 11 - Riassunto della fase di riscaldamento

Tab. 12 - Riassunto della fase di raffreddamento

Tab. 13 - Risultati prove sperimentali con olio siliconico e PCM in fase di riscaldamento

Tab. 14 - Risultati prove sperimentali con olio siliconico e PCM in fase di raffreddamento

Tab. 15 - Tempi medi migliori e peggiori di riscaldamento dei test con olio di silicone e con olio di silicone e PCM

Tab. 16 - Tempi medi migliori e peggiori di raffreddamento dei test con olio di silicone e con olio di silicone e PCM

NOMENCLATURA

Lettere latine:

Aa	– Area apertura del forno (m ²)
am	– Frazione di materiale fuso (%)
cf	– Calore specifico del fluido (J/kg K)
Cp	– Capacità termica (J/K)
Cpl	– Calore specifico della sostanza liquida (J/kg K)
Cps	– Calore specifico della sostanza solida (J/kg K)
DNI	– Radiazione solare (W/m ²)
DNI _{av}	– Radiazione solare media (W/m ²)
DNI _{ref}	– Radiazione solare di riferimento (W/m ²)
F1	– Figura di merito
F2	– Figura di merito
g	– Fattore Solare (%)
m	– Massa della sostanza (kg)
mf	– Massa specifica del fluido (g/cm ³)
SC	– Coefficiente di shading
T	– Temperatura (°C)
T0	– Temperatura iniziale (°C)
T1	– Temperatura iniziale del fluido (°C)
T2	– Temperatura finale del fluido (°C)
Ta	– Temperatura dell'assorbitore (°C)
Tamb	– Temperatura ambiente (°C)
Tamb,av	– Temperatura ambiente media (°C)
tch	– Tempo di ebollizione caratteristico (s)
Tf	– Temperatura fluido (°C)
Tfin	– Temperatura finale della sostanza (°C)
Tg	– Temperatura del vetro (°C)
Tinix	– Temperatura iniziale della sostanza (°C)
Tm	– Temperatura di fusione del materiale (°C)
ts	– Tempo di ebollizione specifico (s)
UV	– Trasmissione dei raggi ultravioletti (%)

Lettere greche:

α_e	- Assorbimento energetico (%)
Δh_m	- Calore latente di fusione del materiale per unità di massa (J/kg)
Δt_h	- Intervallo di tempo (s)
$\Delta \lambda$	- Procedimento di integrazione
η_{av}	- Efficienza termica complessiva
λ	- Conducibilità termica (kcal/h·m·°C)
λ_0	- Conducibilità termica iniziale (kcal/h·m·°C)
λ_l	- Calore latente di fusione (W/m·K)
λ_s	- Calore latente di solidificazione (W/m·K)
$s \lambda$	- Distribuzione spettrale della radiazione solare (W/m ²)
V	- Viscosità (m ² /s)
$\rho_{0\lambda}$	- Riflettanza spettrale esterna del vetro
ρ_e	- Riflessione energetica (%)
ρ_l	- Densità dello stato liquido (g/cm)

- ρ_s - Densità dello stato solido (g/cm)
 τ_e - Trasmissione energetica diretta (%)
 $\tau(\lambda)$ - Trasmittanza spettrale del vetro

Acronimi:

- COP3 - Conferenza delle parti di Kyoto
CSP (Concentrated Solar Power)
DIISM - Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche
ECES - Energy Conservation through Energy Storage
HTF - Heat Transfer Fluid
IEA - Agenzia Internazionale per l'Energia
ISO - International Organization for Standardization
LHS - Latent Heat Storage
MDF - Medium Density Fibreboard
OMS - Organizzazione Mondiale della Sanità
PCM - Phase Change Materials
PVS - Paesi in via di sviluppo
TES - Thermal Energy Storage
US.E.I.A. - US Energy Information Administration
WCED - World Commission on Environment and Development
WMO - World Meteorological Organization

INTRODUZIONE

La radiazione solare è una fonte di energia variabile e lo sfasamento tra la disponibilità di tale fonte e la domanda interna di energia è una sfida fondamentale da affrontare al fine di trarne il massimo beneficio.

In tal senso l'intenzione primaria di questa tesi è quella di valutare le prestazioni di un forno solare a scatola portatile, in assenza di radiazione termica.

L'analisi dei dati ricavati dai test, condotti in 4 differenti condizioni sperimentali, in un sistema di accumulo termico a base di eritritolo, ha fatto emergere come quest'ultimo abbia influito nell'estensione del tempo medio di raffreddamento del carico utilizzato (olio o acqua).

In questo particolare periodo storico lo sviluppo sostenibile diviene paradigma di assoluta necessità per affrontare i grandi problemi ambientali che affliggono il mondo e la scarsità di risorse naturali.

Lo sfruttamento dell'energia solare, quale fonte pulita e rinnovabile, in ambito culinario, fornisce un concreto aiuto anche ai paesi in via di sviluppo contribuendo a ridurre l'uso di combustibili convenzionali, nocivi per il nostro pianeta. Inoltre, nota la facilità di assemblaggio, la praticità e l'utilità, questi forni hanno avuto una diffusione ad ampio raggio in aree povere, zone di guerra e campi profughi.

Nel primo capitolo si parlerà del concetto di energia e in particolare di quello di energia rinnovabile in relazione al periodo storico attuale.

Verrà introdotto il concetto di sviluppo sostenibile e posta attenzione alle fonti rinnovabili, in particolare l'energia solare; per approfondirne i campi di applicazione, verranno descritte le varie tipologie di forno solare presenti nella bibliografia.

Nel secondo capitolo verrà introdotto il forno solare in esame, descrivendo in particolare il prototipo di forno solare a scatola portatile, utilizzato per i test sperimentali, sviluppando le caratteristiche, dei materiali utilizzati, della costruzione e del principio di funzionamento.

Nel terzo capitolo si andranno ad esaminare le proprietà dei materiali a cambiamento di fase e nello specifico dell'eritritolo, per poi passare agli ultimi due capitoli dove si concentrerà l'attenzione sulle prove sperimentali effettuate in dipartimento, andando a spiegare come sono stati realizzati i test sperimentali, le varie fasi di lavoro e mostrando i risultati ottenuti.

Verranno quindi analizzati i dati raccolti dai test sperimentali effettuati con diversi tipi di fluido per poter sviluppare un confronto tra i vari risultati ottenuti.

Infine, nel sesto capitolo, sono riportate le conclusioni sul lavoro sperimentale che è stato svolto e i relativi possibili sviluppi futuri per quanto riguarda l'energia rinnovabile.

CAPITOLO 1: STATO DELL'ARTE

1.1 ENERGIE RINNOVABILI

Gli attuali sconvolgimenti degli ecosistemi e della biodiversità che governa l'essenza del nostro pianeta sono ad oggi per lo più causati dal forte impatto antropico che a sua volta è causa dei forti cambiamenti climatici presenti.

Il fenomeno dei gas serra ha raggiunto livelli senza precedenti che stanno mettendo a rischio tutti gli ecosistemi; il ritardo nell'agire su quelle che sono le scelte climatiche, metterà in pericolo tutto il pianeta e chi lo abita.

Sfruttare le nuove forme di energia rinnovabile limitando il consumo di carburante convenzionale con la prospettiva di produrre energia pulita ed ecosostenibile in grandi quantità eviterà il precipitare della situazione e che gli effetti del *climate-change* siano ancora più aggressivi.

1 Ma cosa si intende quando ci si riferisce ai termini “energia” ed “energia rinnovabile”?

L'energia è una grandezza termodinamica che viene spesso intesa come la capacità di un sistema fisico di compiere lavoro.

Le energie rinnovabili sono forme di energia generate da fonti che per loro natura intrinseca non sono esauribili rispetto all'arco di vita utile umana.

Si può pertanto affermare che tali fonti di energia risultino inesauribili in quanto dopo ogni ciclo di utilizzo si rigenerano.

Negli ultimi quaranta anni il consumo mondiale di energia è raddoppiato [1] ed è evidente che, in futuro, le problematiche relative alla limitata disponibilità delle risorse energetiche di origine fossile (petrolio e gas) e all'aumento dell'emissione dovute al loro utilizzo, assumeranno un rilievo sempre maggiore.

1.1.1 IL TRAMONTO DELL'ERA DEI COMBUSTIBILI FOSSILI

La crisi sanitaria mondiale causata dalla pandemia per Covid-19, ha evidenziato l'importanza dell'energia rinnovabile quale investimento economico più sicuro rispetto alle attuali fonti di energia di maggior consumo.

Gli esperti parlano di un tramonto dell'uso di combustibili fossili e di come in seguito alla pandemia, l'industria del carbone abbia subito un incisivo colpo tale da comprometterne la ripresa.

Il lock-down economico ha indotto i paesi a guardare all'uso delle fonti rinnovabili non più come ad una sola sfida ma anche come un'inevitabile necessità portando alla chiusura di centrali elettriche tradizionali e all'epilogo, dopo più di due secoli, dell'uso del carbone.

L'industria del carbone già prima della pandemia era sotto pressione per le iniziative riguardanti il disincentivare del suo utilizzo grazie al crescere dell'attivismo climatico e delle alternative verdi a basso costo.

La generazione di elettricità da gas, eolico e fotovoltaico, risulta meno onerosa rispetto a quella da carbone; questo e il calo della domanda di elettricità hanno condotto molte utility a tagliare la generazione da carbone.

Solo negli ultimi mesi, in Unione Europea le importazioni di carbone sono scese all'incirca di due terzi, minimo storico degli ultimi 30 anni.

L'US.E.I.A. (US Energy Information Administration), in un suo rapporto, ha supposto che già da quest'anno gli USA produrranno più elettricità da energie pulite rispetto al carbone.

Sempre negli States la produzione elettrica da carbone potrebbe ridursi ad appena il 10% tra 5 anni, in calo rispetto al 50% di dieci anni fa.

Secondo Rob Jackson, presidente del Global Carbon Project, la pandemia probabilmente confermerà che il carbone non raggiungerà mai più il picco globale visto nel 2013.

“Covid-19 ridurrà la produzione da carbone così tanto quest’anno che l’industria non si riprenderà più, anche con la costruzione di nuove centrali in India e altrove,” ha detto Jackson; *“Il crollo dei prezzi del gas naturale, l’energia fotovoltaica ed eolica a prezzi record e le preoccupazioni per il clima e la salute hanno tolto il terreno sotto i piedi del settore in modo permanente”* [1].

Tutte le nazioni, sia europee che non, come ad esempio l'India (il secondo più grande consumatore di carbone al mondo), sono state quindi incentivate ad un utilizzo alternativo a quello delle risorse di carbonio.

Questo ha portato al primo calo delle emissioni di carbonio su base annua in quattro decenni nel paese, ad una qualità dell’aria eccezionale ed a una crescente richiesta pubblica di più rinnovabili.

La Cina che ha il primato nel consumo di carbone, bruciandone il 50% dell'approvvigionamento mondiale, ed è il maggiore finanziatore mondiale dell'industria carbonifera in Oriente e in Africa, è l'unica eccezione alla regola tra le potenze mondiali che non ha contribuito ad un abbassamento del consumo di fonti energetiche dannoso a livello planetario.

Qualche anno fa sembrava che la Cina si stesse impegnando nella direzione di uno sviluppo energetico ecosostenibile e di fatto il consumo interno di carbone si era ridotto, ma con l'emergenza Covid-19 il primo pensiero è divenuto la ripartenza economica.

I governi provinciali stanno improntando ora il loro interesse su nuove centrali termiche nonostante quelle esistenti stiano operando a meno della metà della capacità, data la ridotta domanda di carbone.

“Covid-19 ha chiarito che la Cina e l’India hanno costruito più del necessario. Anche prima della crisi, avevano una sovraccapacità. Ora con una domanda inferiore, la situazione è molto ingarbugliata” [1], ha detto Carlos Fernández Alvarez, analista capo per il carbone presso l’Agenzia internazionale per l’energia (IEA).

Alvarez crede che sebbene il carbone sia stato colpito severamente durante la pandemia, ciò non è abbastanza per dichiarare estinta l'era del carbone, salvo che le politiche governative non siano prospettate ad investimento proficui nelle energie rinnovabili per uscire dalla recessione economica.

“Dobbiamo guardare a questo aspetto in modo strutturale. Se ci sarà di nuovo un’elevata domanda di energia in futuro, probabilmente sarà il carbone a prendere il sopravvento, perché è il fornitore marginale” [1], ha detto.

Anche se la speranza che il carbone sparisca per sempre sembra essere ancora un miraggio, Ted Nace, direttore del Global Energy Monitor, ritiene che gli equilibri siano cambiati in maniera irreversibile.

“Il carbone è sicuramente in recessione e questa pandemia accelererà la tendenza. La domanda dovrebbe tornare in parte il prossimo anno. Ma ci sono motivi molto validi per ritenere che non rimbalzerà,” [1] ha concluso.

Conseguenza di questo scenario è la ricerca di nuove tecnologie e metodologie per poter utilizzare al meglio le fonti energetiche rinnovabili.

Attualmente, la fornitura da risorse energetiche rinnovabili è pari a circa il 19% (Fig.1) [1] della domanda mondiale di energia totale ed è previsto un potenziale aumento per il futuro.

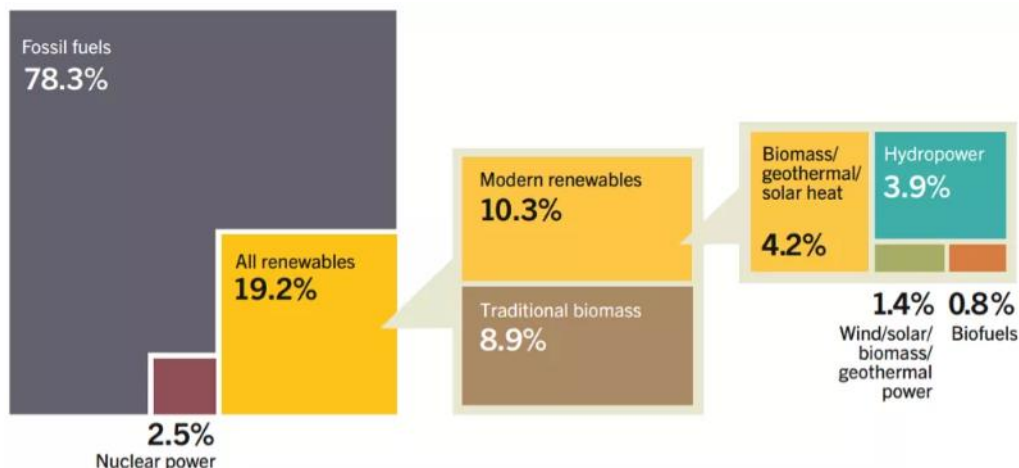


Fig 1– Diagrammi delle percentuali delle attuali fonti di energia (analisi di fine 2014)

1.1.2 PERCHE' ABBANDONARE LE FONTI D'ENERGIA NON RINNOVABILI

La domanda che sorge spontanea è: che cosa porta l'uomo a dover riflettere sulle fonti energetiche e a dover mettere in conto l'esigenza di nuove forme di energia a discapito di quelle tradizionalmente impiegate?

Sono molteplici le motivazioni che ci conducono ad uno sviluppo sostenibile e da decenni l'uomo si sta impegnando in questa direzione perseguendo soluzioni alternative ai combustibili fossili o altri materiali presenti sulla terra.

Nel concetto di energie non rinnovabili dobbiamo inserire anche il nucleare che di fatto è connesso all'utilizzo di sostanze chimiche presenti sul nostro pianeta in quantità limitate.

Da qui possiamo facilmente dedurre la prima motivazione di questa tendenza: i combustibili fossili sono destinati in futuro, prossimo o lontano che sia, ad esaurirsi.

Carbone, gas, petrolio come anche uranio, plutonio o altri materiali radioattivi prima o poi termineranno. Lo sfruttamento delle fonti di energia citate, hanno un grave impatto sul nostro pianeta a livello climatico ma anche sulla nostra salute e se non ci avvarremo repentinamente di nuove risorse energetiche, lo scenario che ci si prospetta sarà quello di un mondo in cui si diffonderanno malattie respiratorie e di altro genere tra la popolazione, correlate all'inquinamento atmosferico a cui difficilmente potremmo porre rimedio.

Studi scientifici e analisi satellitari hanno fatto emergere uno sbilancio energetico, dovuto al fatto che la terra assorbe dal sole una quantità di energia superiore rispetto a quella che rilascia, stimato in 0,85 watt per metro quadrato, che contribuisce al cosiddetto global warming (riscaldamento globale).

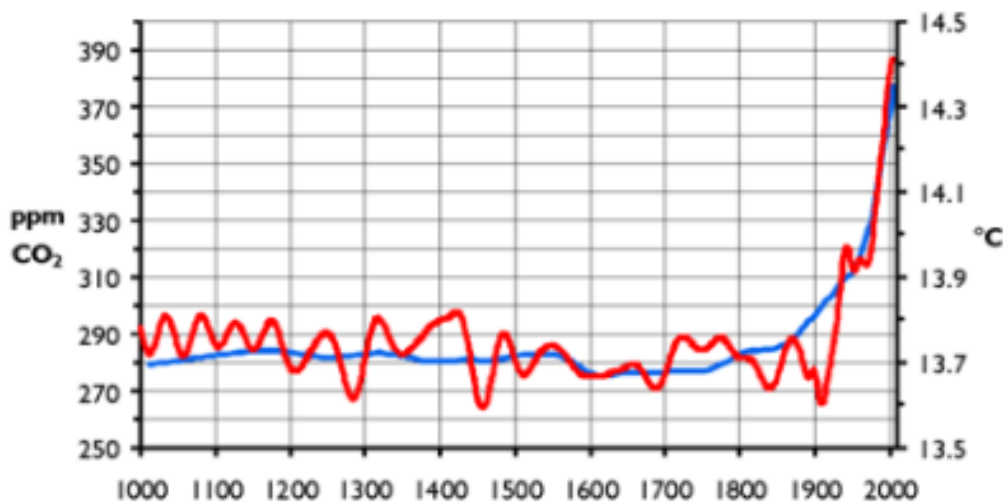


Fig.2 – Grafico dell'aumento della temperatura terrestre e CO₂ nel tempo [2]

L'effetto serra è un fenomeno naturale che permette il regolare sviluppo della vita. In assenza dei gas atmosferici, infatti, la temperatura media sulla terra calerebbe a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Con la rivoluzione industriale, però, nasce il problema dell'inquinamento atmosferico con tutti gli effetti collaterali che ha comportato: nell'ultimo secolo la temperatura media globale è aumentata tra $0,6$ e $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, il livello medio dei mari è cresciuto ed è aumentata la temperatura media del primo strato di acqua, inoltre quasi tutti i ghiacciai del mondo si ritirano in modo sensibile, mentre aumenta la desertificazione e sono ormai sempre più consueti i fenomeni atmosferici estremi.

Per questi motivi congiunti è fondamentale studiare tecnologie e metodi per ottenere energia pulita mediante fonti diverse da quelle canoniche.

Al fine di ottenere un grande quantitativo di energia pressoché illimitato e che non imbratti le meraviglie del creato, tra i primi metodi utilizzati possiamo annoverare l'energia idroelettrica di cui l'Italia è pioniera già dagli anni 60-70 del '900 quando furono edificate le prime centrali idroelettriche.

Si parla di trasformazione dell'energia potenziale gravitazionale posseduta da una certa massa d'acqua, ad una certa quota altimetrica, in energia cinetica sfruttando i corsi d'acqua oppure creando bacini artificiali chiusi da dighe; in tal caso ci si avvale di apposite turbine.



Fig.3 – *Wind turbines farm* [3]

Negli ultimi decenni hanno preso campo altre fonti di energia rinnovabili tra cui il solare fotovoltaico, l'eolico e le biomasse [3].

1.1.3 IL PROTOCOLLO DI KYOTO

Uno dei trattati più importanti stipulati per contrastare i problemi ambientali connessi al riscaldamento climatico che affliggono il nostro pianeta è sicuramente il Protocollo di Kyoto.

Il trattato climatico, di natura volontaria, è stato sottoscritto l'11 dicembre 1997 durante la Conferenza delle parti di Kyoto (la COP3) ma è entrato in vigore solo il 16 febbraio 2005 grazie alla ratifica del Protocollo da parte della Russia (che era avvenuta nel precedente Novembre 2004).

Affinché il trattato potesse entrare in vigore era indispensabile che venisse sottoscritto da almeno 55 nazioni, le quali nel complesso rispecchiassero almeno il 55% delle emissioni di gas serra totali di origine antropica: obiettivo che è stato ottenuto con la firma russa.

Gli Stati Uniti non aderirono al contratto affermando che le restrizioni di gas serra al 7% avrebbero compromesso l'economia statunitense, nonostante da essi derivino il 23,5% dei gas serra mondiali.

Si stima che un cittadino americano immetta ogni anno più di 20 tonnellate di CO₂ equivalente (una misura dell'insieme delle emissioni di gas serra), contro le 7,18 tonnellate di un italiano e le 1,68 tonnellate di un nigeriano.

I firmatari del contratto si sono impegnati ad attuare politiche industriali ed ambientali mediante il controllo e la diminuzione dei gas nocivi al pianeta al fine di ovviare l'avanzare di una situazione climatologica degenerativa.

Tutto ciò non è di certo privo di costi, infatti occorrono ingenti investimenti per lo sviluppo di tecnologie inerenti.

Come ogni contratto che si rispetti, sono previste delle sanzioni pecuniarie per coloro che contravvengano i propositi fissati, ma come sempre, si cercano e si trovano espedienti per divincolarsi dalle norme, coi cosiddetti meccanismi flessibili: facendo appello all'Emissions Trading (borsa delle emissioni) è possibile acquistare quote dai Paesi che sono in credito di CO₂, ossia che hanno emesso un quantitativo di anidride carbonica inferiore rispetto a quella pianificata.

Dal 2005 acquistare permessi di inquinamento costa 10-12 euro la tonnellata. In alternativa, per cercare di rimanere entro i parametri stabiliti dal trattato ed ottenere delle agevolazioni, i membri sono tenuti a realizzare opere migliorative in campo energetico ambientale in altre nazioni, come ad esempio interventi di forestazione.

Il nostro Paese si è impegnato a ridurre le emissioni del 6,5%, ma è in ritardo, addirittura nella definizione delle strategie da attuare, passaggio anch'esso obbligato.

Porre fine all'era degli idrocarburi è una sfida da giocare sulle energie rinnovabili, evitando il rilascio di anidride carbonica: dal solare termico e termodinamico al fotovoltaico, dall'eolico al geotermico.

Secondo molti studiosi e ricercatori il protocollo di Kyoto risulta essere un accordo che ha prodotto riguardevoli traguardi, necessari ma non sufficienti a mitigare in maniera positiva gli effetti del riscaldamento globale.

Gli stessi scienziati dell'IPCC ritengono che, per stabilizzare le concentrazioni dei gas serra ai livelli attuali, occorrerebbe ridurre le emissioni del 60-80%, inoltre anche raggiungendo obiettivi ancora più ambiziosi di quelli prospettati a Kyoto, l'eccesso di effetto serra continuerà a farsi sentire per i prossimi 200 anni.

E in tutto ciò, alcuni Paesi come la Cina l'India e il Brasile sono esenti da oneri, nonostante stiano avendo una crescita economica talmente veloce che presto potrebbero diventare i principali inquinatori [4].

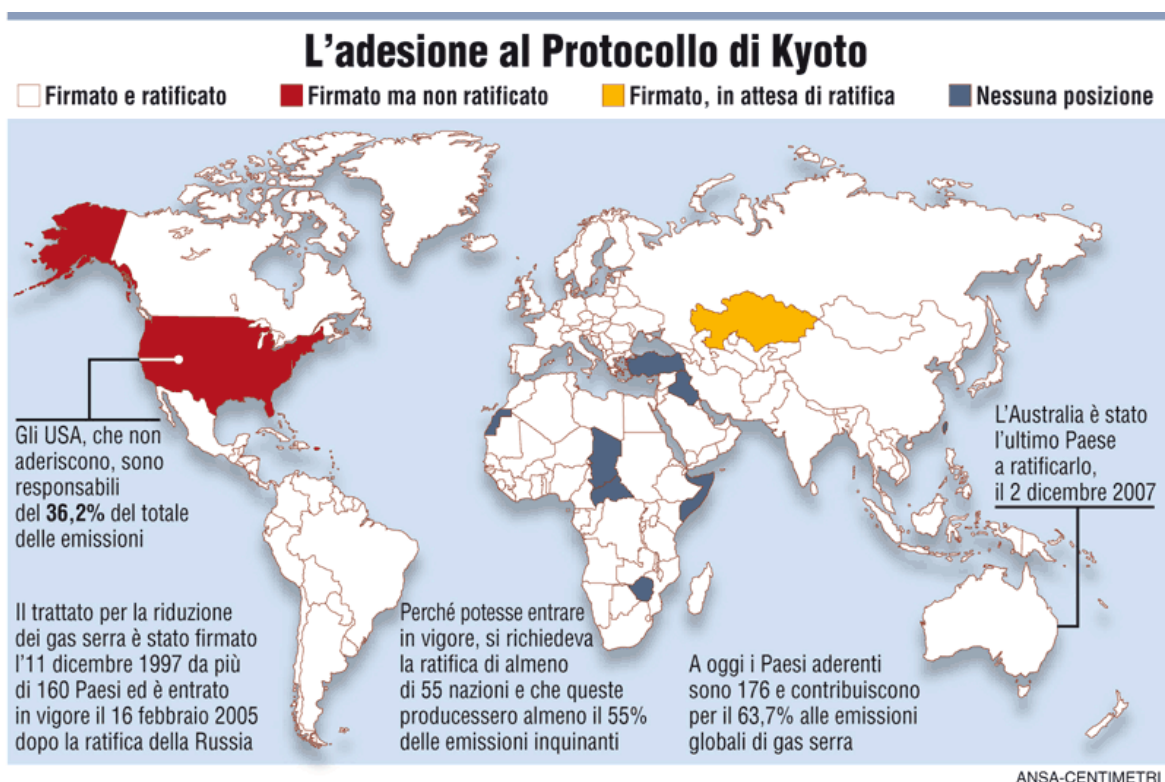


Fig.4 – Adesioni al protocollo di Kyoto [5]

1.2 ENERGIA SOLARE

L'energia solare è un concetto che abbiamo inseguito negli ultimi anni, se non altro per cercare di trovare un modo migliore per affrontare il problema dell'approvvigionamento energetico mondiale senza danneggiare l'ambiente. L'energia solare è il flusso di energia irraggiata dal Sole verso la Terra. La principale intensità della radiazione solare è di circa 3,67 kWh/m² giorno, che è sufficiente per fornire energia adeguata alle applicazioni solari termiche.

Il totale cumulativo dell'energia della radiazione solare è di circa 1311 kWh/m² anno [6]. Complessivamente il nostro pianeta è investito da 174 petawatt di radiazioni solari nell'alta atmosfera, tuttavia, soltanto una parte dei raggi solari giunge al suolo, una parte delle radiazioni elettromagnetiche è riflessa dall'atmosfera e dal campo magnetico terrestre, un'altra parte delle radiazioni, invece, è assorbita dall'atmosfera terrestre.

Per nostra fortuna i raggi solari sono in parte deviati riflessi o assorbiti dall'atmosfera terrestre altrimenti non ci sarebbe vita sul nostro pianeta.



Fig.5 – Radiazione solare che investe il pianeta Terra [7]

Nella figura che segue è possibile vedere la distribuzione dell'energia solare ed in particolare circa il 35% delle radiazioni solari vengono riflesse dalle nuvole, dall'atmosfera e dalla superficie terrestre; tale flusso prende il nome di *radiazione riflessa*. Un altro 14% delle radiazioni solari viene assorbito dai gas serra ed in questo caso si parla di *radiazione assorbita*.

Il passaggio delle radiazioni ultraviolette, altamente nocive, viene impedito da gas come l'ozono che svolgono una fondamentale funzione di filtro.

L'atmosfera terrestre oltre a divenire una barriera protettiva, riducendo la quantità della radiazione solare, devia il 20% dei raggi solari in più direzioni tramite il fenomeno della diffusione della luce.

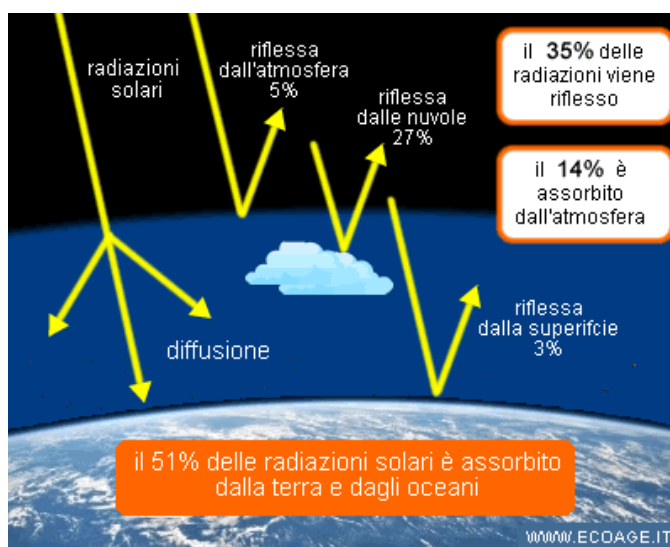


Fig. 6– Distribuzione dell'energia solare [7]

Quindi, l'atmosfera altera qualità e quantità dello spettro elettromagnetico.

La terra risulta pertanto essere un sistema dinamico aperto e l'energia, assorbita dalla terra (51%) o dall'atmosfera terrestre (14%), viene restituita come radiazione irradiata verso lo spazio esterno sotto forma di calore (raggi infrarossi).



Fig.7 – Energia solare e risposta della Terra come radiazione re-irradiata [7]

Questo sistema dinamico è in costante equilibrio [7].

Il problema principale di tutta questa energia che arriva sulla terra è che risulta poco concentrata, cioè, è una energia distribuita su tutta la superficie terrestre, e che quindi, per essere riconvertita in energia sfruttabile dall'uomo, ha bisogno di essere raccolta con impianti che occupano aree molto vaste.

Ciò, unito al fatto che al giorno d'oggi gli impianti a nostra disposizione hanno ancora basse efficienze e costi elevati, rende l'energia solare troppo costosa e quindi poco conveniente rispetto ad altri metodi di produzione di energia.

Un altro problema dell'energia solare è che, essendo una fonte che dipende dalle condizioni atmosferiche e dall'alternanza giorno-notte, ha bisogno di sistemi di accumulo, per far sì che il fabbisogno di energia venga soddisfatto durante tutto l'arco della giornata: questo richiede grandi investimenti nella ricerca di nuovi materiali e tecnologie.

1.3 CAMPI D'APPLICAZIONE DELL'ENERGIA SOLARE

L'energia solare può essere utilizzata mediante tre diverse tecniche di conversione:

1. La prima (sistema di conversione solare termico) adotta pannelli che sfruttano i raggi solari per scaldare un liquido con speciali caratteristiche, il quale, a sua volta, cede calore all'acqua contenuta in un serbatoio di accumulo.
2. Nella seconda (sistema di conversione solare termodinamico), i pannelli impiegati, denominati pannelli solari a concentrazione, utilizzano invece alcuni specchi parabolici per concentrare i raggi solari su un tubo in cui scorre un fluido termovettore, dal quale si ricava poi energia elettrica.
3. La terza tecnica (sistema di conversione solare fotovoltaico) si realizza mediante i pannelli fotovoltaici, in grado di convertire, sfruttando l'effetto fotoelettrico, l'energia solare direttamente in elettricità. Naturalmente, non tutti i siti sono idonei alla costruzione di impianti solari, che richiedono intensa e prolungata insolazione; le regioni più favorite sarebbero quindi le tropicali e, nelle zone temperate, le aree montuose. Occorre anche tenere conto che gli impianti solari hanno inevitabilmente

dei periodi di non produttività, oltre al fatto che richiedono estensioni molto grandi per i dispositivi di captazione. [8]

L'energia solare può essere opportunamente sfruttata, a seconda del fine, attraverso queste diverse tecnologie.

Tuttavia, oltre ai tanti vantaggi dovuti all'utilizzo delle fonti rinnovabili, ci sono anche degli aspetti negativi: il primo è l'impossibilità di avere un accumulo continuo, nel caso dell'energia solare, dovuto ai naturali cicli giorno-notte e delle stagioni, mentre il secondo aspetto è quello delle condizioni meteorologiche.

L'applicazione più diffusa dell'energia solare è quella dei pannelli solari.

Si tratta di un'applicazione utilizzata per produrre acqua calda, riscaldamento ed elettricità nelle abitazioni. Le modalità principali con cui si può effettuare questa conversione sono tre:

1) Solare fotovoltaico: I processi fotovoltaici avvengono grazie all'utilizzo di pannelli fotovoltaici, che utilizzano la luce solare e la trasformano in energia elettrica. I pannelli solari riescono a trarre energia anche dalla luce riflessa dai tetti delle case, dalla neve e dal ghiaccio, che prende il nome di albedo.

La corrente elettrica viene generata mediante la cella fotovoltaica, che costituisce il componente elementare del generatore, la quale converte la radiazione solare. Con questo tipo di dispositivo la produzione di energia è possibile solo con la presenza della radiazione solare che colpisce le celle fotovoltaiche. L'unità è costituita da una sottile fetta di materiale semiconduttore, generalmente silicio, il campo elettrico che si crea all'interno di tali strutture contrasta la diffusione delle cariche elettriche libere e fornisce alla cella la cosiddetta struttura "a diodo", in cui il passaggio della corrente, costituita da portatori di carica liberi, ad esempio gli elettroni, è ostacolato in una direzione e facilitato in quella contraria.

I pannelli solari sono prevalentemente realizzati con materiali di cui sono note le proprietà di conversione naturale della luce solare in energia elettrica. Questi materiali sono conosciuti in ambito scientifico con il nome di semiconduttori.

I semiconduttori vengono colpiti dalla luce solare e rilasciano degli elettroni i quali vengono incanalati attraverso il dispositivo fornendo così corrente elettrica.

In questo momento i dispositivi fotovoltaici sono oggetto di un costante sviluppo tecnologico in quanto non è possibile convertire i raggi UV e gli infrarossi dai suddetti dispositivi.

Questo fatto può essere problematico quando il sole è oscurato da nubi o mal tempo e in tal caso solo i raggi UV e infrarossi arrivano fino alla superficie terrestre.

2) Solare termico: l'energia proveniente dal sole viene catturata da dispositivi al fine del riscaldamento dell'acqua corrente in sostituzione ad esempio delle caldaie, alimentate tramite gas naturale.

L'elemento principe per la conversione energetica è questa volta il collettore solare.

Lo scopo del collettore solare è quello di riscaldare un fluido, che passa all'interno delle sue tubazioni, e non di convertire la radiazione in energia elettrica per cui anche la struttura si presenta in maniera differente rispetto ad un pannello solare.

Fondamentalmente un collettore è costituito da un fluido termovettore che passa all'interno dei tubi, mentre una copertura trasparente permette ai raggi solari di attraversarla, una piastra assorbente li cattura ed un isolante evita il surriscaldamento eccessivo delle componenti più delicate del collettore solare è importante che ci sia uno sviluppo di questi dispositivi di raffreddamento e riscaldamento poiché c'è l'assoluta necessità di sostituire la nostra dipendenza dai gas naturali e dai combustibili fossili.

Il problema riguarda in particolar modo gli impianti di condizionamento che utilizzano una quantità ingente di energia elettrica per raffreddare gli ambienti, e questa viene per lo più prodotta con combustibili fossili.

3) Solare termodinamico: Gli impianti solari a concentrazione, solitamente indicati come CSP (Concentrated Solar Power), sono una delle tecnologie più recenti per lo sfruttamento dell'energia solare. La tecnologia CSP non è ancora del tutto matura, ma ha il suo punto di forza nella possibilità di erogare energia elettrica in modo indipendente dalla risorsa.

Sono impianti che si basano su un ciclo termodinamico che sfrutta l'energia solare per produrre elettricità fornendo calore ad alta temperatura.

Il processo di conversione dell'energia solare avviene in maniera indiretta in contrapposizione alla trasformazione diretta dell'energia solare in elettricità degli impianti fotovoltaici.

Un impianto CSP si avvale di una serie di specchi, quali elementi principali dell'impianto, che dirigono tutta l'energia solare su un determinato punto allo scopo di far funzionare il sistema più efficacemente.

Gli impianti possono essere di tre tipi a seconda della tipologia di specchi di cui si servono: a concentrazione puntiforme che sfruttano uno specchio parabolicoide per incanalare tutti i raggi nel centro della parabola; a torre centrale che prevede il posizionamento di specchi a terra i quali indirizzano i raggi solari su un punto disposto sulla sommità di una torre apposita; ed a parabole lineari costituiti da tubi a parabola, privi in sostanza di copertura superiore, che riscaldano il fluido contenuto all'interno delle tubazioni.

L'energia accumulata dal fluido viene poi trasmessa alle turbine a vapore le quali fanno sì che l'energia elettrica possa essere prodotta e immagazzinata. Questa differenza i sistemi CSP rispetto agli altri tipi di dispositivi di sfruttamento dell'energia solare poiché il sistema di archiviazione di energia è molto più complesso e avanzato. Entro il 2020 si prevede che ci saranno oltre 5000 progetti di impianti a concentrazione in tutto il mondo, già in fase di esercizio o in fase di costruzione [9].

1.4 TIPOLOGIE DI FORNO SOLARE

Il periodo della rivoluzione industriale diede l'avvio ad uno studio più sistematico sull'impiego dell'energia solare e delle relative tecnologie di sfruttamento. Nicholas de Saussure (1740-1799) effettuò il primo esperimento sull'uso di un forno solare per la cottura del cibo.

Il dispositivo era costituito da una scatola di legno foderata di sughero nero mentre sulla parte superiore erano collocati tre strati di vetro. Quando il calore del sole penetrava nel contenitore, attraverso il vetro, veniva assorbito dalla superficie annerita fino ad una temperatura di 80 – 90 °C.

Lo scienziato inoltre dimostrò che questa temperatura era indipendente dall'altitudine a parità di esposizione: durante una spedizione sul Monte Bianco misurò infatti gli stessi valori rilevati al livello del mare.

L'astronomo John Herschel usò un dispositivo analogo per cucinare il cibo nella sua spedizione in Africa nel 1830, inaugurando una tecnica di cottura oggi detta *solar cooking*, un sistema ecologico ed efficiente che permette a molte popolazioni dei paesi in via di sviluppo (PVS) di poter cuocere i cibi senza l'uso di combustibili [10].

Il forno solare è uno strumento pensato e realizzato per poter accumulare nel tempo o concentrare in uno spazio definito l'energia emessa dal sole; rappresenta una tecnologia in grado di sfruttare le fonti di energia rinnovabili.

Un aspetto interessante di questo strumento è quello di poter essere impiegato sia in ambito privato e quindi per uso domestico, sia per progetti più ampi di produzione e distribuzione di energia.

Grazie al suo utilizzo è possibile raggiungere temperature piuttosto elevate che consentono la cottura dei cibi e il riscaldamento di fluidi.

Pertanto, è un dispositivo in grado di trasformare l'energia solare in energia termica, il forno solare rappresenta un nuovo modo semplice ed economico per produrre calore senza creare inquinamento in quanto non è necessario l'utilizzo di combustibili fossili per il funzionamento e la produzione di fumi è nulla. Inoltre, essendo uno strumento realizzabile con materiali di facile reperibilità che è possibile trovare in natura, i paesi tropicali, in cui l'avanzamento tecnologico risulta essere sottosviluppato,

potrebbero beneficiare di tale invenzione; proprio in queste zone l'energia solare è disponibile in quantità elevate.

Oltre al vantaggio di poter cucinare cibi in maniera sostenibile, economica e salutare, il forno solare è in grado di raggiungere la temperatura di ebollizione dell'acqua cosicché è possibile renderla sterile e quindi potabile ed è possibile ridurre la diffusione delle malattie.

Un altro utilizzo prevede lo sfruttamento del sistema in grande cioè per la produzione di elettricità. Questa tecnologia può essere equiparata a quella dei pannelli fotovoltaici.

L'energia solare raccolta dal sistema viene convertita in energia termica e subisce un ulteriore passaggio: si viene a creare energia cinetica grazie all'utilizzo di turbine che a loro volta producono energia elettrica.

Con l'avanzare delle ricerche e con l'obiettivo di migliorare le prestazioni si è arrivati alla costruzione di numerose tipologie di forno solare che lavorano quindi secondo meccanismi differenti.

I gruppi principali in cui possiamo classificare i forni sono i seguenti (esempio Fig.8):

forno solare a pannelli;

forno solare a scatola;

forno solare parabolico;

forno solare con accumulo termico;

forno solare a concentrazione.

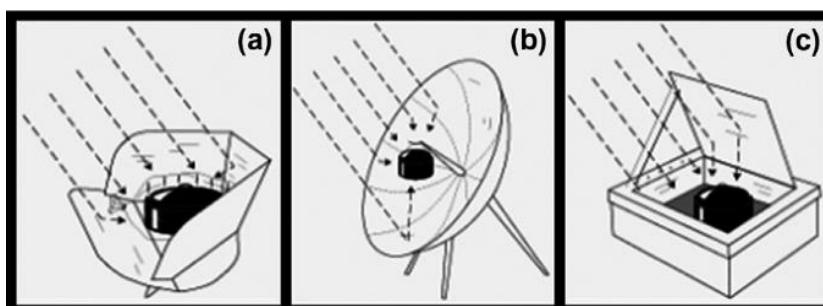


Fig.8 – *Tipologie di forno solare: (a) forno solare a pannelli; (b) forno solare parabolico; (c) forno solare a scatola [11]*

1.4.1 FORNO SOLARE A PANNELLI

La tipologia di forno a pannello è considerata quella più comune e di più semplice realizzazione sia per quanto riguarda la facilità di costruzione sia per quanto riguarda la spesa necessaria per l'acquisto dei materiali.

La concentrazione dei raggi non avviene in un singolo punto (il punto focale), ma avviene in un volume ristretto, dove i pannelli riflettenti di cui è composto il forno riescono a concentrare i raggi solari. In questo volume andrà poi inserita la pentola per la cottura.

Principio base è la concentrazione della luce dall'alto in un recipiente utilizzato per la cottura tramite delle superfici riflettenti.

Se da un lato questo tipo di cucina solare lascia a desiderare in quanto non raggiunge alte temperature ed è poco efficace in condizioni nuvolose, dall'altro risulta essere molto comodo per persone che vivono o viaggiano da sole poiché trasportabile e leggero.

Nel 1999 il prof. Roger Bernard [11] presentò il modello di forno solare mostrato in Fig. 9, che venne poi modificato dalla Solar Cookers International Network e rinominato Cookit.

Per produrre tale forno sono stati utilizzati solo cartone e pellicola, con il vantaggio di preservare i cibi senza bruciarli.



Fig. 9 – Forno solare a pannelli

1.4.2 FORNO SOLARE A SCATOLA

Tale tipologia di forno è molto compatta, semplice ed economica da realizzare. A differenza della tipologia a pannelli, questo forno è costituito da una scatola isolata al di sopra della quale è posizionato un vetro trasparente come copertura. Attraverso la superficie di vetro filtrano i raggi solari che vengono attirati all'interno della scatola grazie all'uso di un rivestimento interno in vernice nera in grado di massimizzare l'assorbimento della radiazione che viene poi trasformata in energia termica.

È grazie a questo meccanismo che si viene a creare un effetto serra necessario al riscaldamento dell'ambiente. La camera, costituita dalla scatola, è il posto in cui viene posizionata la pentola da riscaldare. Il cibo è quindi direttamente esposto ai raggi solari.



Fig. 10 – Forno solare a scatola

Questa tipologia di forno solare (Fig.10) impiega tempi abbastanza lunghi per raggiungere la massima temperatura che oscilla tra i 90 e i 120 °C.

Le prestazioni di questo forno non sono tra le più elevate; per ottenere buoni risultati lo strumento deve essere continuamente orientato verso il Sole in quanto è presente una continua dissipazione di calore attraverso il vetro, le pareti e il fondo scatola.

È possibile aumentare l'efficienza incrementando l'isolamento della scatola, ogni elemento che compone il forno ha grande rilevanza sulle prestazioni finali, oppure aggiungendo dei pannelli riflettenti tutti attorno al coperchio. In questo modo è possibile portare la temperatura ad un massimo di 220 °C [11].

1.4.3 FORNO SOLARE PARABOLICO

Il forno solare parabolico ha immediatamente catturato l'attenzione di molti studiosi in quanto è capace di raggiungere temperature molto elevate in tempi relativamente brevi consentendo una rapida cottura dei cibi. Non c'è la necessità di utilizzare recipienti di cottura speciali, ma è elevato il rischio di bruciare il cibo se non tenuto sotto controllo.

Un forno solare parabolico è costituito da un riflettore parabolico, una pentola di cottura situata nel punto focale del forno stesso e un supporto per sostenere il sistema di cottura come mostrato in Fig.11.



Fig. 11 – *Forno solare parabolico*

Quando i raggi solari vengono captati e concentrati grazie all'utilizzo di uno specchio parabolico, generano un'intensa quantità di calore nel fuoco della parabola.

L'energia solare viene captata dal collettore la cui superficie a specchio riflettente focalizza i raggi solari verso il tubo ricevitore posto lungo la linea focale e all'interno del quale circola un fluido termovettore che viene riscaldato fino a 300 °C.

È chiaro che questo tipo di forno abbia numerosi vantaggi dal punto di vista delle prestazioni, tuttavia l'utente deve prestare attenzione all'orientamento del forno per ottenere buoni risultati e inoltre è un tipo di soluzione più costosa rispetto alle tipologie di forno analizzate fino ad ora.

1.4.4 FORNO SOLARE AD ACCUMULO TERMICO

Il fabbisogno energetico della popolazione per la cottura viene in gran parte soddisfatto dall'utilizzo di combustibili fossili non commerciali ma il forno solare potrebbe costituire una valida alternativa. La limitazione di questo tipo di forni è dovuta al fatto che le loro prestazioni dipendano strettamente dalle condizioni meteorologiche e dai naturali cicli giorno-notte.

Tuttavia, è possibile risolvere il problema utilizzando dei forni ad accumulo termico così da poter cuocere anche nelle ore notturne o di scarso irraggiamento solare.

I sistemi di accumulo utilizzati possono essere di due tipi:

il primo esterno al forno, formato da collettori solari che rilasciano energia al forno come integrazione termica fornendo così un surplus di calore per incrementare la temperatura o fornire calore in assenza

di radiazione solare; oppure è possibile utilizzare una pompa di ricircolo che mette in movimento un fluido termovettore che varia in funzione del range di temperatura richiesto; il secondo metodo utilizza un sistema di accumulo posizionato all'interno della pentola di cottura, la pentola viene costruita appositamente per poter inserire in un'intercapedine al tra due pentole concentriche, all'interno della quale è presente un materiale a cambiamento di fase, il PCM (Phase Change Material) come mostrato in Fig.12.

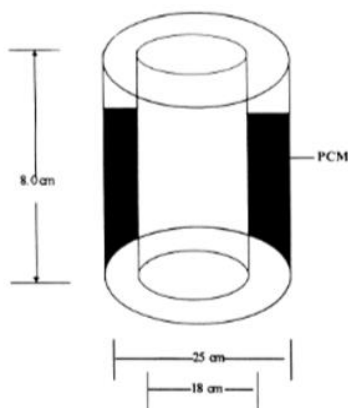


Fig. 12 – Pentola con PCM nell'intercapedine [12]

Il PCM posizionato nell'intercapedine si riscalda passando dalla fase solida a quella liquida, la temperatura di fusione dipende dalla tipologia e dalla miscela di PCM utilizzato. Durante il cambiamento di fase, il PCM immagazzina calore che verrà rilasciato sotto forma di calore latente quando avverrà il passaggio da liquido a solido in assenza di radiazione solare. Grazie a questa modalità di accumulo di calore è possibile effettuare la cottura dei cibi anche due ore dopo il tramonto per ovviare al problema dei cicli giorno-notte [10].

1.4.5 FORNO SOLARE A CONCENTRAZIONE

Il forno solare a concentrazione funziona grazie all'utilizzo di una speciale lente rettangolare attraverso la quale i raggi solari vengono concentrati in un unico punto focale verso una superficie a specchio, che a sua volta riflette i raggi concentrati su un piano di cottura.

La concentrazione dei raggi solari in un solo punto dà origine ad elevate temperature. Sfruttando la conversione dell'energia solare in energia termica sarà possibile cuocere o scaldare degli alimenti posizionati sull'apposito foro creato sul piano cottura. Se il sistema fisico alla base del forno solare è molto semplice, non altrettanto può dirsi dell'aspetto tecnologico.

Negli ultimi 40 anni la ricerca sta compiendo veri e propri passi da gigante per realizzare una tecnologia in grado di garantire efficacia di produzione ed efficienza nei costi.

I primi esperimenti importanti di applicazione tecnologica del forno solare risalgono agli anni '60-70. Ad esempio, la centrale di Odeillo nei Pirenei francesi [12]. Un esempio di forno solare a concentrazione è quello proposto dall'azienda danese Heliac riportato in Fig.13.

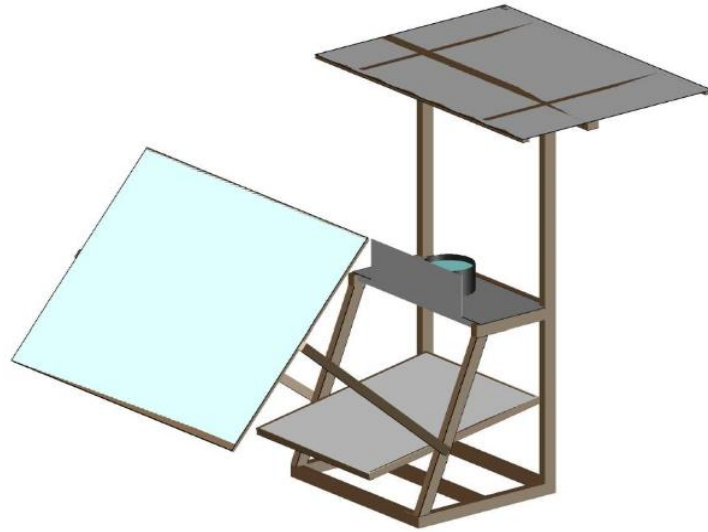


Fig. 13 – *Forno solare a concentrazione (Heliac ApS)* [13]

CAPITOLO 2: PROGETTAZIONE DEL FORNO SOLARE A SCATOLA PORTATILE

Il forno solare proposto, illustrato in fig.14, è un prototipo di forno a scatola a media efficienza costruito all'interno del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) della facoltà di Ingegneria, presso l'Università Politecnica delle Marche.

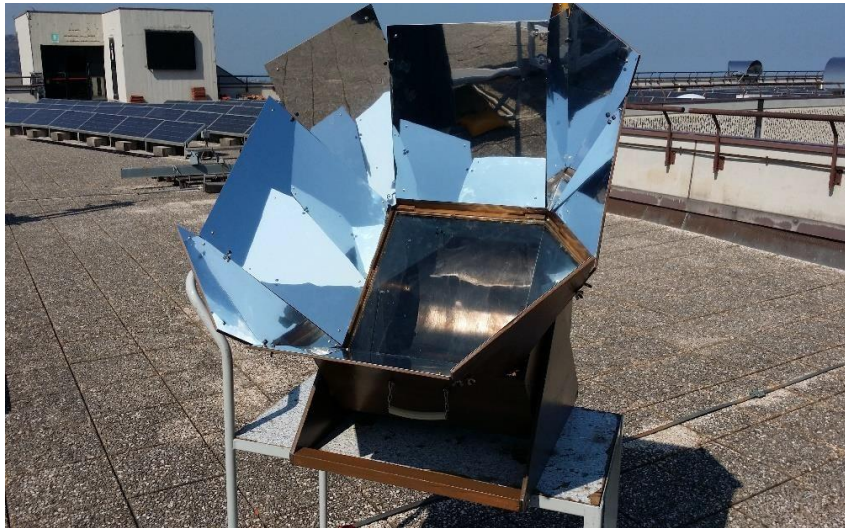


Fig. 14 - Forno solare a scatola realizzato presso il DIISM

Per la realizzazione sono stati seguiti i disegni e dettagli realizzativi del prototipo ideato dall'Ing. Gianni Crovatto [14], successivamente concretizzati dai colleghi Andrea Pio Concettini [15] e Alessandro Del Re [16] nell'anno accademico 2016/2017.

Il forno ha una altezza massima di 753 mm ed ha una massa di circa 20 kg. Al fine di migliorare le prestazioni e quindi ottimizzare l'utilizzo di tale forno, sono state progettate, e successivamente messe in atto, alcune modifiche utilizzando e studiando materiali più idonei allo scopo.

Le principali modifiche apportate al prototipo iniziale, sono la vernice con la quale è stato dipinto l'assorbitore, l'alluminio utilizzato per la realizzazione degli specchi di riflessione ed il vetro attraverso il quale passano i raggi solari.

Il forno studiato è composto da una scatola di legno contenente un telaio in acciaio zincato con funzione di camera di cottura. La scatola ha un coperchio in vetro sulla parte superiore, che permette di trasmettere le radiazioni solari alla camera di cottura.

Il vetro ed il coperchio possono essere facilmente rimossi per consentire l'inserimento del carico al fine della sperimentazione. La parte superiore della scatola è circondata da 8 specchi di richiamo che permettono un'ulteriore quantità di radiazione solare da riflettere e concentrare verso il coperchio e la camera di cottura.

A seguito della definizione dell'oggetto ed i requisiti che esso deve possedere si andranno a delineare le fasi principali di progettazione dello stesso.

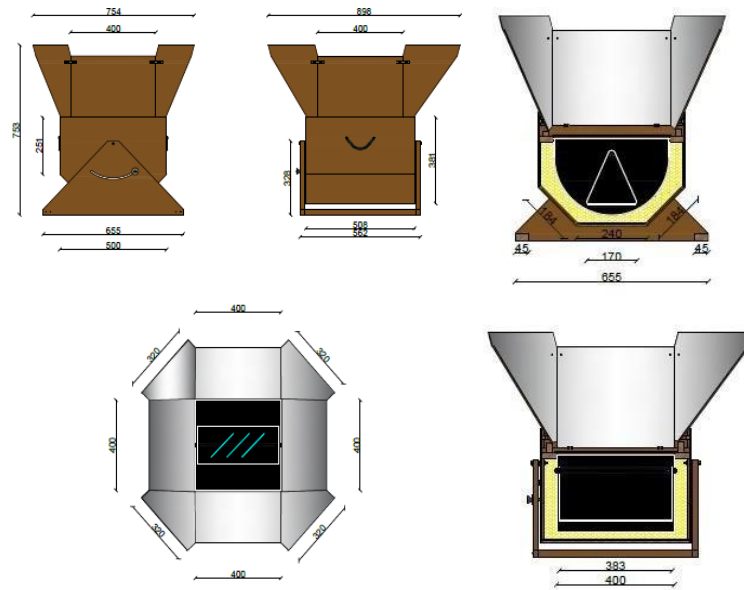


Fig. 15 - Dimensioni forno a media efficienza

2.1 FASI DI LAVORAZIONE

Il processo di produzione del fornello consisteva in 4 fasi consecutive, ovvero:

- 1) Realizzazione della camera di cottura e verniciatura
- 2) Realizzazione della scatola esterna
- 3) Isolamento con lana di vetro
- 4) Sistema di concentrazione dei raggi solari

2.1.1 REALIZZAZIONE DELLA CAMERA DI COTTURA E VERNICIATURA

In primo luogo, si è proceduto con il realizzare la camera di cottura, ovvero la parte centrale e più interna del forno solare, in cui sarà possibile cucinare ogni tipo di vivanda.

Da una lamiera di acciaio inox sono stati tagliati, piegati ed infine rivettati i vari pezzi a formare l'insieme.

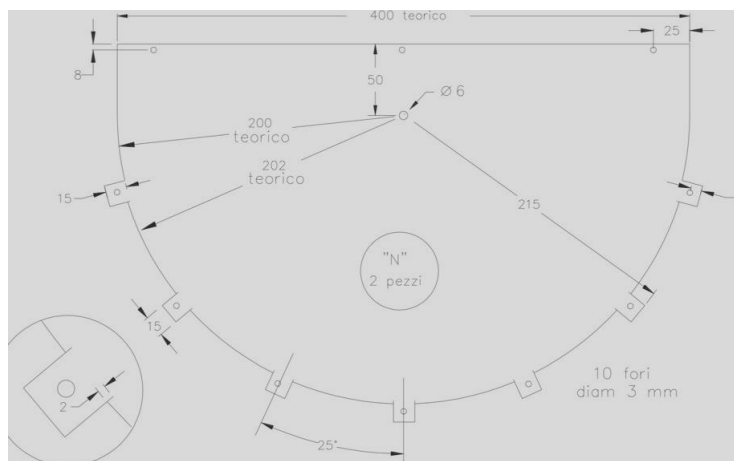


Fig. 16 - Pezzo "N"



Fig. 17 - Pezzo "M"

Tutti i pezzi in lamiera appena mostrati sono stati forati e piegati seguendo quanto descritto dalle precedenti immagini (fig. 16,17). Ultimate le operazioni di foratura e piegatura, si è proseguito unendo tutti i pezzi per formare la scatola interna, utilizzando viti e rivetti ed opportuni sigillanti ad alta temperatura, atossici come quelli utilizzati nei forni per alimenti.

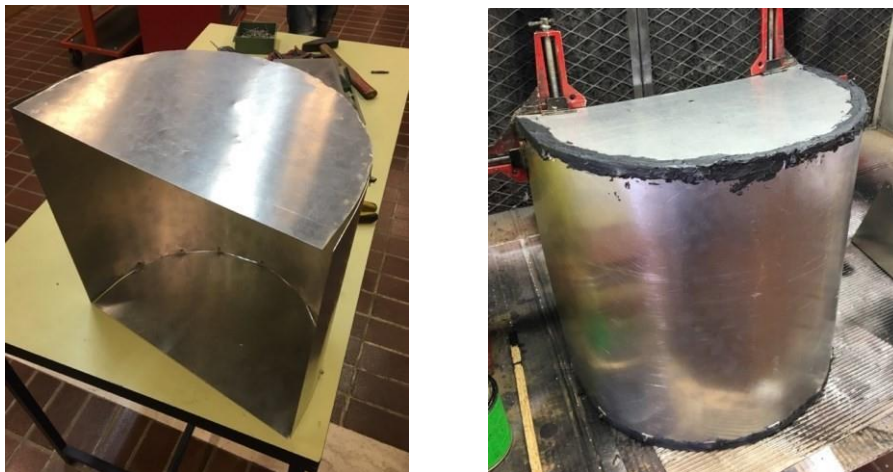


Fig. 18 - Camera di cottura

All'interno della camera di cottura viene posto un piano inclinabile, con lo scopo di sostegno alle teglie, ricavato da una lamiera di acciaio inox.

Il pezzo "P" (fig. 19) dovrà essere piegato con un'inclinazione di 90° lungo i lati di maggiore lunghezza e vi saranno praticati due fori e due perni che consentano l'oscillazione una volta posato all'interno della camera di cottura.



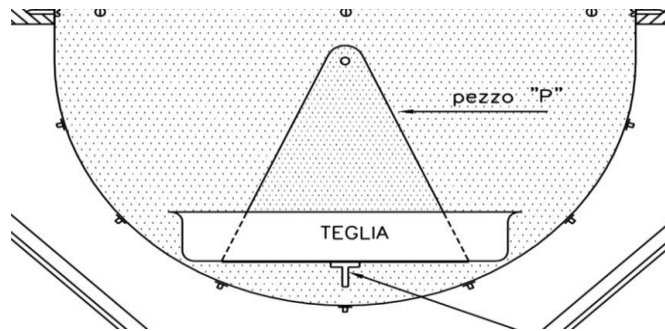


Fig. 19 - Pezzo "P" piegato e zavorrato

si procederà poi con il tinteggiare con una vernice nero opaca, selettiva, che ha una duplice funzione: assorbire il calore dei raggi solari e proteggere le parti metalliche dall'ossidazione.

Le superfici da verniciare saranno pulite con alcool e successivamente rese ruvide con carta vetrata.

Non è necessario scartavetrare e verniciare le superfici che saranno a contatto con l'isolante termico e la parte inferiore del piano inclinabile.

Vengono successivamente date due mani di vernice controllando che essa si depositi sui vari bordi.

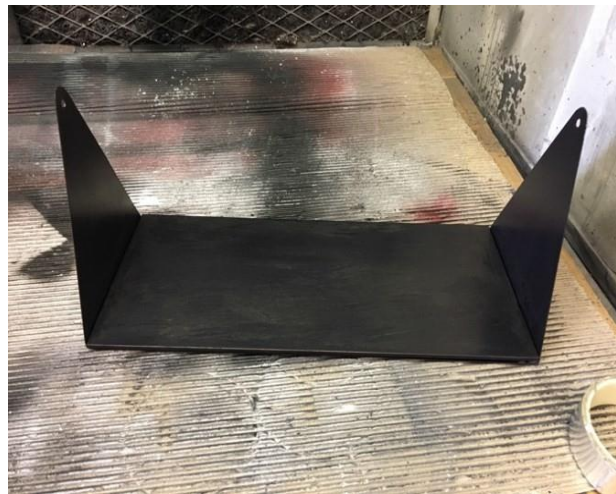
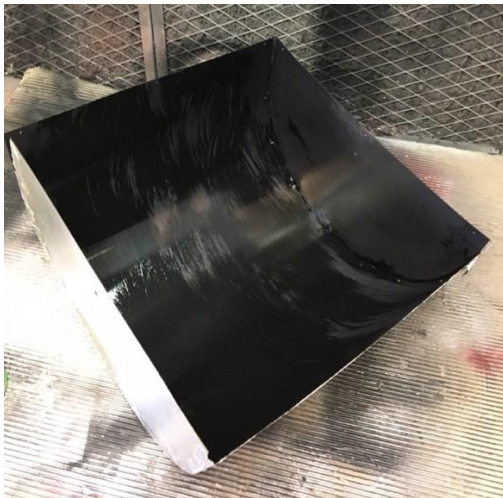


Fig. 20 - Verniciatura camera di cottura e piano inclinabile

2.1.2 REALIZZAZIONE DELLA SCATOLA ESTERNA

La costruzione della scatola esterna comincia ricavando da fogli di legno “MDF” due fiancate “A”, due fiancate “B”, due pannelli inferiori “C” ed un pannello inferiore “D”, procedendo la lavorazione con l'esecuzione di fori di differenti diametri.

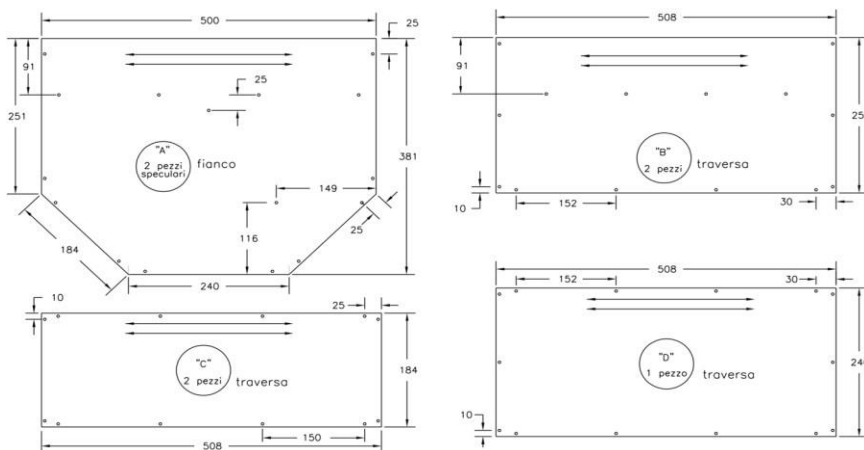


Fig. 21 - Pezzi che formano il corpo esterno

è prevista da progettazione, al fine del rafforzamento delle parti in compensato, la realizzazione di uno scheletro in listelli di abete, il quale una volta assemblato alle fiancate e alle traverse, rende il corpo del forno più stabile e resistente.

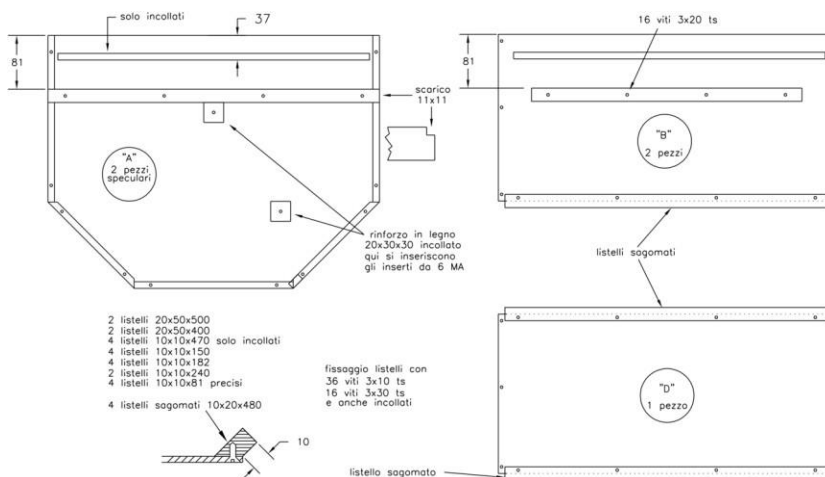


Fig. 22 - Posizione dei listelli di rinforzo

A questo punto vengono create delle impugnature in grado di trasportare e sostenere l'intera mole del forno solare.

Con dei pannelli in legno più robusti vengono realizzate le due parti che formano la base del forno e un sistema di bloccaggio della rotazione del forno.



Fig. 23 - *Involucro esterno*



Fig. 24 - *Scatola esterna con basamento*

La fase successiva prevede l'inserimento della camera di cottura all'interno della scatola esterna, posizionata all'incirca al centro mediante l'utilizzo di distanziali realizzati con listelli.



Fig. 25 - Inserimento camera di cottura nell'involucro esterno

2.1.3 ISOLAMENTO CON LANA DI VETRO

Una volta inserita e posizionata la camera di cottura in lamiera zincata all'interno del corpo del forno (utilizzando dei distanziatori di legno incollati ed avvitati sia alla parete esterna che alla parete interna), si procede con l'isolamento termico della camera interna.

Vengono quindi tagliati i pannelli isolanti, con un seghetto o un cutter, a forma quadrata o rettangolare e con dimensioni simili a quelle delle pareti della camera interna.

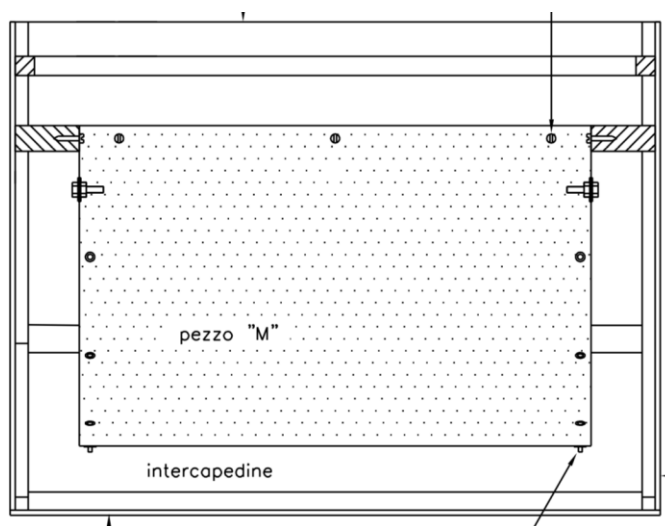


Fig. 26 - Distanziatori e isolamento camera interna

L'isolamento termico del forno solare è ultimato inserendo, nelle fessure appositamente create tra la camera di cottura e il box esterno in "MDF", strati e fiocchi di lana di vetro, procedendo infine, con la chiusura a completamento della scatola del forno.



Fig. 27 - Riempimento fessure con materiale isolante

è necessario assicurarsi che l'umidità svergoli i pannelli di legno e per questo è consigliabile verniciare tutte le parti esterne in "MDF".

Il passo antecedente tale operazione è quello di rifinire con la carta vetrata tutti gli spigoli, le giunture e gli ingobbamenti, ed eliminare eventuali tracce di colla le pareti esterne del nostro forno solare ed omogenee.

È consigliabile passare la vernice flatting più volte.



Fig. 28 - Scatola fornoverniciata

2.1.4 SISTEMA DI CONCENTRAZIONE DEI RAGGI SOLARI

Il sistema di concentrazione dei raggi solari è costituito da pannelli riflettenti sostenuti da un supporto in legno sul quale verranno incollati fogli di alluminio. Si tratta di 4 pannelli di forma quadrata attaccati al box mediante delle cerniere, che permettono di richiudere gli specchi sulla bocca del forno. Altri 4 pannelli di completamento, a forma di cuneo, vengono inseriti in modo alternato tra quelli di forma quadrata, tali da formare una parabola; i pannelli sono collegati tra loro tramite dei ganci.

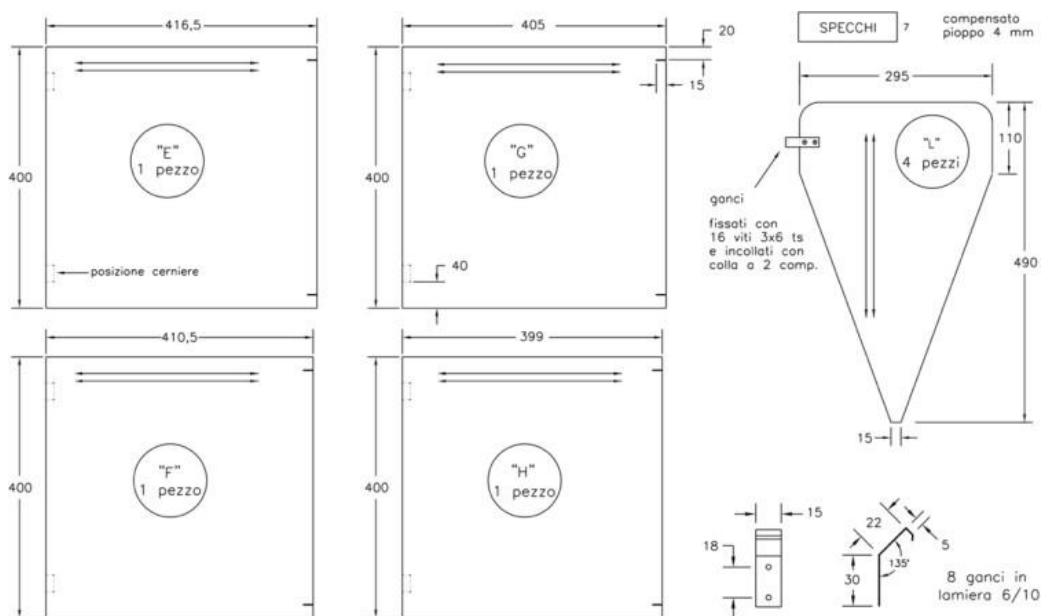


Fig. 29 - Disegni pannelli riflettenti (specchi)

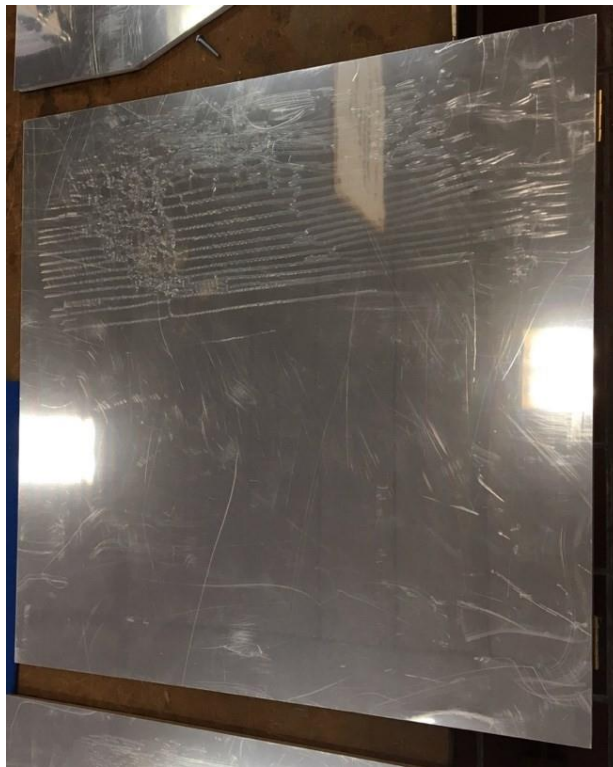


Fig. 30 - Pannelli riflettenti

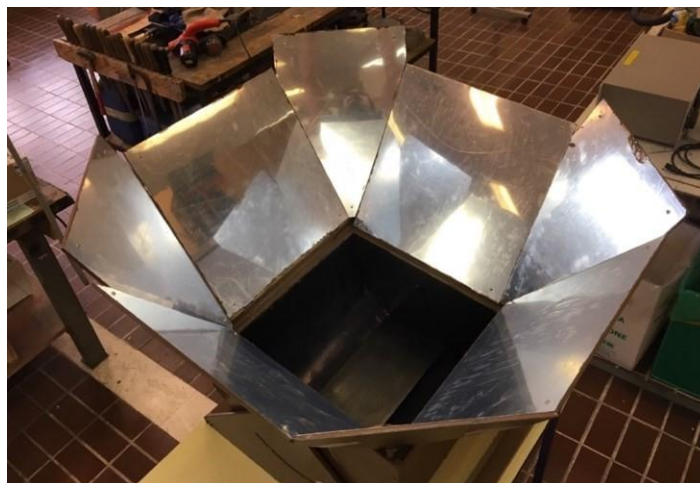


Fig. 31 - *Specchi montati*

Condizione imprescindibile ovviamente è una corretta inclinazione dei pannelli al fine di captare la radiazione solare in modo ottimale ed efficiente.



Fig. 32 - *Forno solare ultimato (Principali modifiche)*

È necessario far presente che lo scopo principale del lavoro è quello di perfezionare il forno, che di per sé è già stato costruito, aumentandone la potenza e l'efficienza attraverso l'utilizzo di materiali più specifici. Le principali novità che, per ora, lo differenziano da quello dell'Ing. Crovatto sono la vernice con la quale è stata dipinta la camera di cottura del forno, gli specchi e il vetro attraverso il quale passano i raggi solari.

Tali materiali sono specifici per applicazioni solari e le caratteristiche che elencheremo di seguito sono prese dalle relative schede tecniche.

2.2 VERNICE

La vernice da noi utilizzata è denominata SOLKOTE HI / SORB-II™ [17] ed è un rivestimento ottico specifico per applicazioni solari a differenza della comune vernice nera. La sua tolleranza alle alte temperature, la resistenza all'umidità e alla degradazione UV, fanno di questa vernice un materiale perfetto per il nostro forno solare.

Le sue caratteristiche ottiche sono:

l'emissività è compresa tra 0,20 e 0,49 a seconda dello spessore di vernice applicato, della superficie su cui è applicato, e delle modalità con cui la superficie è stata preparata alla tinteggiatura. Nella Fig.34 individuiamo un andamento medio dell'emissività;

l'assorbimento varierà da 0,88 a 0,94. Nella fig.33 vediamo un andamento medio dell'assorbimento.

Lo Spessore del film bagnato da 0,8 a 1,0 mil (0,020 a 0,025 millimetri) e l'accurata pulizia del substrato produrrà risultati ottimali in questo senso.

Termicamente L'intervallo di tolleranza va da -100 ° F a 1000 ° F + (-73 ° C a + 538 ° C).

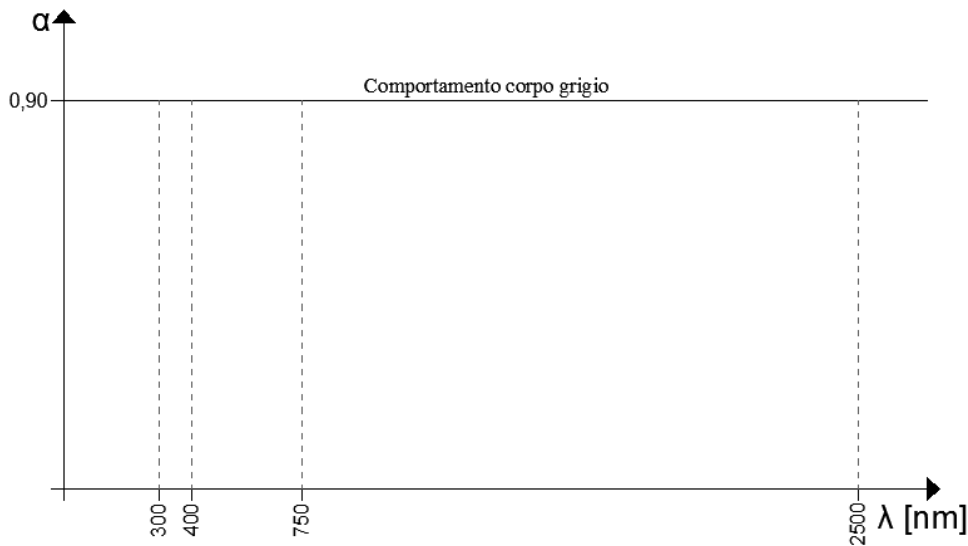


Fig.33 - Diagramma assorbimento

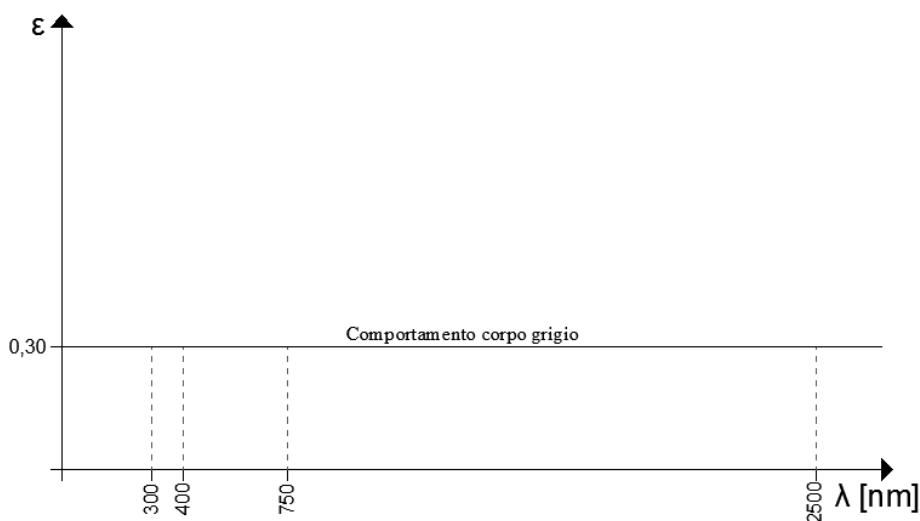


Fig.34 - Diagramma emissività

2.3 VETRO E ISO 9050_2003

Per quanto concerne il vetro, sono stati utilizzati due doppi vetri temprati dello spessore di 4 mm che offrono una trasmissione energetica pari al 90 % quindi di gran lunga superiore rispetto ad un vetro standard. Nella tabella seguente sono elencate le sue caratteristiche energetiche.

CARATTERISTICHE	EN 410	ISO 9050
Fattore solare - g (%)	91	91
Riflessione energetica - ρ_e (%)	8	8
Trasmissione energetica diretta - τ_e (%)	91	90
Assorbimento energetico - α_e (%)	1	2
Coefficiente di shading - SC	1,05	1,05
Trasmissione dei raggi ultravioletti - UV (%)	85	/
Selettività	1,01	1,01

Tab. 1 - Caratteristiche energetiche del vetro

La norma ISO 9050_2003 individua i tre principali aspetti energetici del vetro, ossia la trasmissione energetica, la riflessione e l'assorbimento, dandone una puntuale definizione e mostrando le formule di calcolo.

Trasmissione diretta solare

La trasmissione diretta solare τ_e della vetratura è calcolata con la seguente formula:

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=300}^{2500 \text{ nm}} \tau(\lambda) s\lambda \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300}^{2500 \text{ nm}} s\lambda \Delta\lambda} \quad (1)$$

Dove:

$s\lambda$ è la distribuzione spettrale relativa della radiazione solare

$\tau(\lambda)$ è la trasmittanza spettrale del vetro

$\Delta\lambda$ è il procedimento di integrazione, e i punti di dati devono essere scelti tra le lunghezze d'onda riportate nella tabella 2.

Riflettanza solare diretta

La riflessione solare diretta ρ_e della vetratura è calcolata con la seguente formula:

$$\rho_e = \frac{\sum_{\lambda=300}^{2500 \text{ nm}} \rho_0(\lambda) s\lambda \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300}^{2500 \text{ nm}} s\lambda \Delta\lambda} \quad (2)$$

Dove:

$s\lambda$ è la distribuzione spettrale relativa della radiazione solare

$\rho_0(\lambda)$ è la riflettanza spettrale esterna del vetro

$\Delta\lambda$ è il procedimento di integrazione, e i punti di dati devono essere scelti tra le lunghezze d'onda riportate nella tabella 2

Assorbimento solare diretto

L'assorbanza diretta solare α_e viene calcolata per differenza dalla seguente equazione:

$$\alpha_e + \rho_e + \tau_e = 1 \quad (3)$$

λ nm	$S_{\lambda}\Delta\lambda$	λ nm	$S_{\lambda}\Delta\lambda$
300	0	680	0,012 838
305	0,000 057	690	0,011 788
310	0,000 236	700	0,012 453
315	0,000 554	710	0,012 798
320	0,000 916	720	0,010 589
325	0,001 309	730	0,011 233
330	0,001 914	740	0,012 175
335	0,002 018	750	0,012 181
340	0,002 189	760	0,009 515
345	0,002 260	770	0,010 479
350	0,002 445	780	0,011 381
355	0,002 555	790	0,011 262
360	0,002 683	800	0,028 716
365	0,003 020	850	0,048 240
370	0,003 359	900	0,040 297
375	0,003 509	950	0,021 384
380	0,003 600	1 000	0,036 097
385	0,003 529	1 050	0,034 110
390	0,003 551	1 100	0,018 861
395	0,004 294	1 150	0,013 228
400	0,007 812	1 200	0,022 551
410	0,011 638	1 250	0,023 376
420	0,011 877	1 300	0,017 756
430	0,011 347	1 350	0,003 743
440	0,013 246	1 400	0,000 741
450	0,015 343	1 450	0,003 792
460	0,016 166	1 500	0,009 693
470	0,016 178	1 550	0,013 693
480	0,016 402	1 600	0,012 203
490	0,015 794	1 650	0,010 615
500	0,015 801	1 700	0,007 256
510	0,015 973	1 750	0,007 183
520	0,015 357	1 800	0,002 157
530	0,015 867	1 850	0,000 398
540	0,015 827	1 900	0,000 082
550	0,015 844	1 950	0,001 087
560	0,015 590	2 000	0,003 024
570	0,015 256	2 050	0,003 988
580	0,014 745	2 100	0,004 229
590	0,014 330	2 150	0,004 142
600	0,014 663	2 200	0,003 690
610	0,015 030	2 250	0,003 592
620	0,014 859	2 300	0,003 436
630	0,014 622	2 350	0,003 163
640	0,014526	2 400	0,002 233
650	0,014 445	2 450	0,001 202
660	0,014 313	2 500	0,000 475
670	0,014 023		

Normalized relative spectral distribution of global solar radiation (direct + diffuse) S_{λ} for air mass = 1.5, calculated from the values given in Table 1, column 5, of ISO 9845-1:1992, multiplied by the wavelength interval $\Delta\lambda$. The values in this table are calculated according to the trapezoidal rule.

Tab. 2 - Distribuzione spettrale della radiazione solare globale

2.4 ALLUMINIO

Al tradizionale alluminio se ne è preferito uno particolare composto da diversi strati i quali riescono a garantire il 9% della riflessione dei raggi solari.

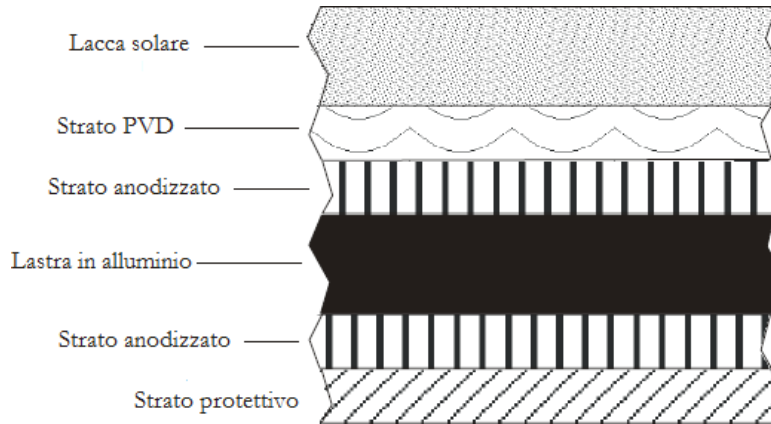


Fig. 35 - Struttura fogli di alluminio

Si riporta qui di seguito un grafico, tratto dalla scheda tecnica del materiale, che mette in relazione la riflettanza totale in percentuale con la lunghezza d'onda in nanometri. Emerge che non tutta la radiazione solare incidente sull'alluminio viene riflessa: infatti questa rappresenta il 94 %, mentre il restante 6 % della radiazione solare viene assorbito dallo specchio surriscaldandolo.

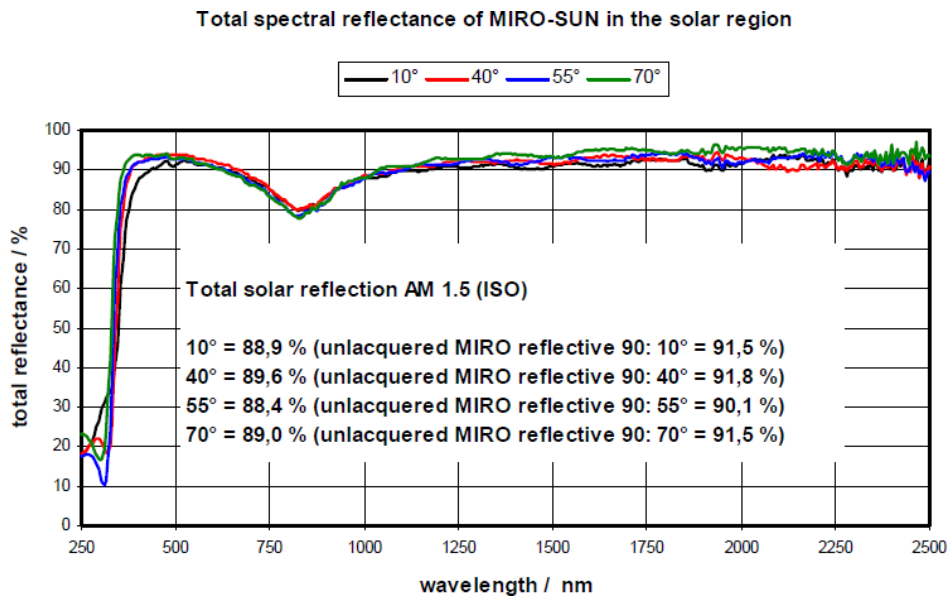


Fig. 36 - Riflettanza totale dell'alluminio

2.5 ANALISI FUNZIONALE

La praticità e la funzionalità sono due requisiti a cui non possiamo rinunciare e a tale scopo il dimensionamento del forno deve far sì che:

il trasporto e l'orientamento risultino agevoli

riesca a contenere la quantità di cibo normalmente cucinata

riesca ad accogliere la maggior parte dei tegami

Nello specifico possiamo vedere le sue caratteristiche tecniche nella tabella 3.

Massa	20,1 kg
Ingombro a terra con pannelli chiusi	0,37 m ²
Ingombro a terra con pannelli aperti	0,68 m ²
Diametro max apertura pannelli riflettenti	0,898 m
Vano forno	Lamiera in acciaio inox
Scatola esterna	Pannelli in legno "MDF"
Isolamento termico	Fibra di roccia e lana di vetro
Pannelli riflettenti	Alluminio su legno "MDF"

Tab. 3 - Analisi funzionale del forno

CAPITOLO 3: MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE

I materiali a cambiamento di fase (Phase Change Material, PCM) sono materiali che accumulano calore latente sfruttando la transizione di fase e riuscendo in tal modo, ad immagazzinare una grande quantità di energia mantenendo costante la propria temperatura.

Quando la temperatura dei PCM supera una determinata soglia (che varia a seconda del materiale utilizzato), essi si liquefanno e accumulano calore latente di liquefazione. Nel caso delle applicazioni solari, l'energia solare fornisce questo calore. Allo stesso modo, quando la temperatura si abbassa, il materiale inizia a solidificarsi e a cedere il calore accumulato: in tal caso si parla di calore latente di solidificazione.

In generale, il calore scambiato durante una trasformazione termodinamica può essere scomposto in calore sensibile e calore latente. Il calore sensibile può essere calcolato come prodotto della variazione di temperatura prodotta durante uno scambio termico e da un coefficiente di proporzionalità detto calore specifico. Il calore latente, invece, è la quantità di energia (sotto forma di calore) scambiata durante un passaggio di stato, la cui unità di misura nel SI è J/kg o J/mol [18]. A differenza del calore sensibile, lo scambio di energia sotto forma di calore latente avviene a temperatura costante. Infatti, secondo la teoria cinetica dei gas, durante la transizione di un sistema bifasico l'energia fornita (o assorbita) al sistema non incrementa (o decrementa) la temperatura del sistema stesso, ma agisce sulla forza dei legami intermolecolari [19]. L'accumulo di energia termica tramite PCM, sfruttando il calore latente, permette quindi di caricare e scaricare una grande quantità di energia da una piccola massa a calore costante [20]. Inoltre, questo tipo di sistemi, operando con piccole differenze di temperatura tra carico e scarico, presentano una maggiore efficienza energetica [21].

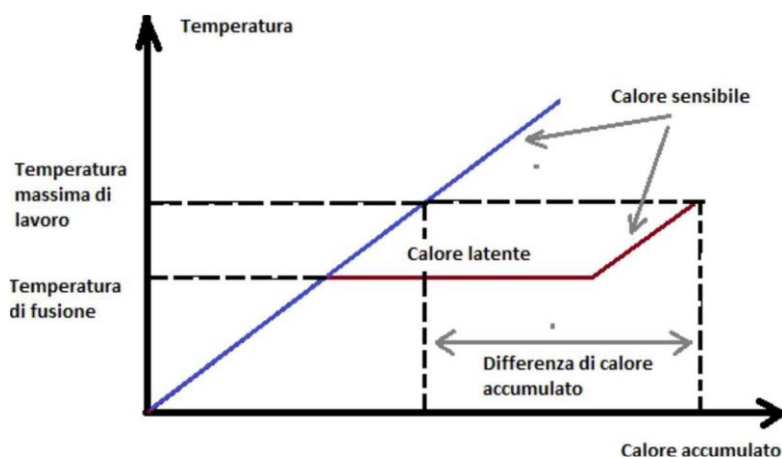


Fig. 37 - Differenze di energia accumulata tra calore sensibile e calore latente [21]

3.1 CARATTERISTICHE DEI PCM

Negli ultimi anni la ricerca su nuovi materiali a cambiamento di fase è aumentata notevolmente in quanto non sono solo oggetto di studio, per i sistemi di accumulo, bensì se ne studia anche l'applicazione in campo edile, sotto forma di pannelli, intonaci o isolanti.

In linea generale, la scelta di un materiale a cambiamento di fase dipende dall'ambito di utilizzo e dalle caratteristiche del sistema in cui viene inserito.

I PCM che vengono utilizzati nei sistemi di accumulo devono presentare alcune caratteristiche che li rendono prestanti ed efficienti:

- Temperatura di fusione compresa nel range operativo del sistema stesso, altrimenti non si riesce ad accumulare o cedere calore latente durante il passaggio di stato
- Distribuzione uniforme delle temperature, e quindi uniformità di fusione
- Essere chimicamente stabili
- Non essere tossici e corrosivi
- Costi contenuti

La difficoltà principale che riscontriamo è che questi materiali hanno una bassa conducibilità termica allo stato solido. Questa loro peculiarità rappresenta un limite allo sviluppo di sistemi di accumulo efficienti, poiché la bassa conducibilità influenza negativamente la densità di potenza e i tempi di carico/scarico. Al fine di ovviare a questo problema possiamo utilizzare il trasferimento di massa che si verifica in convezione (e quindi solo allo stato liquido), oppure aggiungere altre sostanze con un’alta conducibilità termica nel PCM puro [21]. Un altro aspetto importante di cui tenere conto nella scelta del PCM è il ciclo di vita del materiale che influenza in modo diretto il tempo di possibile utilizzo.

3.2 CLASSIFICAZIONE DEI PCM

I PCM possono essere classificati in base al tipo di materiale (che può essere organico, inorganico o eutettico) [22], oppure in base alla loro temperatura di fusione [21].

3.2.1 CLASSIFICAZIONE IN BASE AL TIPO DI MATERIALE

La classificazione secondo il tipo di materiale prevede la divisione dei PCM in organici, inorganici ed eutettici, come nel seguente schema in fig. 38

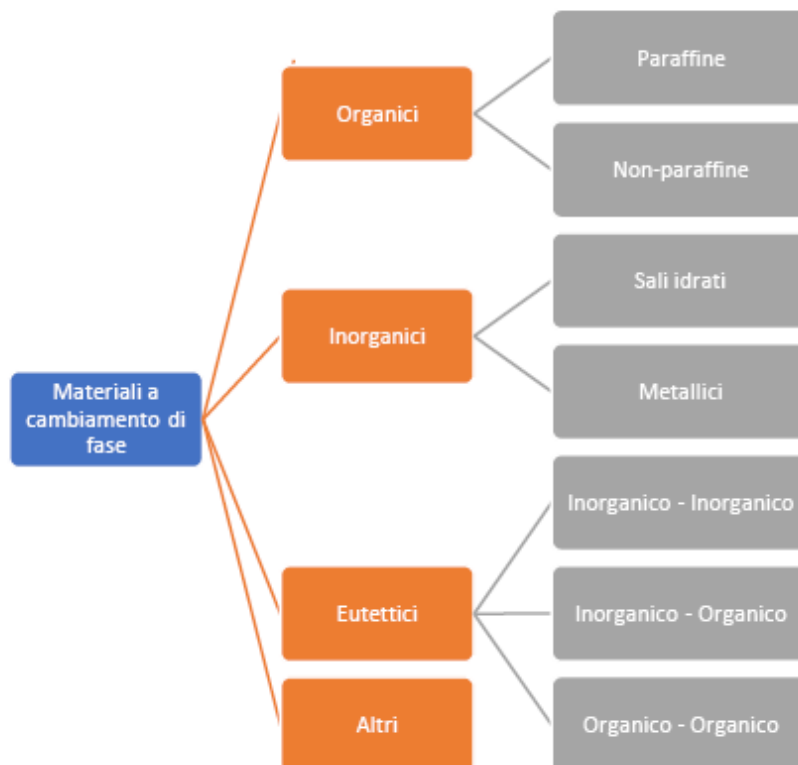


Fig. 38 - Classificazione dei PCM in base al tipo di materiale [22]

3.2.1.1 PCM ORGANICI

I materiali a cambiamento di fase organici fondono in modo congruente, non sono corrosivi e non soffrono il fenomeno della segregazione di fase durante la fusione; perciò possono far fronte a molti cicli di transizione, senza che vengano meno le loro proprietà di accumulo di calore latente. Inoltre, solidificando con un modesto o nullo sottoraffreddamento, la temperatura di fusione si mantiene più o meno costante. Essi, a loro volta, si distinguono in paraffine e non paraffine.

Paraffine:

Le paraffine (o cere paraffine) sono miscele di idrocarburi solidi, in prevalenza alcani, le cui molecole presentano catene contenenti dai 20 ai 40 atomi di carbonio [23]. Esse sono ricavate dal petrolio e sono insolubili in acqua e negli acidi mentre allo stato solido si presentano come masse cerose e biancastre.

La temperatura di fusione e il calore latente di questi materiali varia in modo direttamente proporzionale alla lunghezza della catena (Tab. 4) [24]. Esistono molteplici paraffine, ciascuna con differente temperatura di fusione e per questo trovare quella che più soddisfacentemente si adatta alla temperatura operativa del sistema di accumulo termico in uso, risulta essere più semplice. In commercio si possono trovare paraffine con diverso grado di purezza; tuttavia, a causa dei costi elevati della paraffina pura, solitamente vengono utilizzate versioni “technical grade”, ovvero con grado di purezza più basso. Le paraffine presentano una serie di qualità che le rendono interessanti per l'utilizzo nelle applicazioni termiche come PCM [25]:

Sono chimicamente inerti e stabili sotto i 500 °C

Non presentano segregazione né eccessivo sottoraffreddamento

Non sono corrosivi e tossici

Non degradano, e quindi sono adatte per applicazioni con numerosi cicli di passaggi di stato

Sono disponibili in un ampio range di temperature

Hanno, però, anche una serie di svantaggi:

Ciclo di condensazione-fusione molto lungo

Bassa conduttività termica

Incompatibilità con contenitori di plastica

Moderata infiammabilità

Alcune di queste problematiche possono essere risolte, ad esempio, mescolando la paraffina con materiali con una più alta conducibilità termica, e utilizzando materiali compatibili per i contenitori.

No. atomi di carbonio	Temperatura di fusione (°C)	Calore latente di fusione (kJ/kg)
14	5.5	228
15	10	205
16	16.7	237.1
17	21.7	213
18	28.0	244
19	32.0	222
20	36.7	246
21	40.2	200
22	44.0	249
23	47.5	232
24	50.6	255
25	49.4	238
26	56.3	256
27	58.8	236
28	61.6	253
29	63.4	240
30	65.4	251
31	68.0	242
32	69.5	170
33	73.9	268
34	75.9	269

Tab. 4 - Temperatura e calore latente di fusione di paraffine in base al numero di atomi di carbonio presenti nella catena [24]

Non paraffine:

Fanno parte delle non paraffine la maggior parte dei PCM oggi utilizzati, come acidi grassi, minerali di origine organica e altri materiali organici non paraffini. Ogni materiale appartenente a questo gruppo ha le sue specifiche caratteristiche (Tab. 5), in generale però presentano degli aspetti comuni quali:

- Elevata temperatura di fusione
- Elevata infiammabilità
- Bassa conducibilità termica
- Instabilità alle alte temperature
- Alta tossicità

Materiale	Temperatura di fusione (°C)	Calore latente di fusione (kJ/kg)	Materiale	Temperatura di fusione (°C)	Calore latente di fusione (kJ/kg)
Formic acid	7.8	247	O-Xylene dichloride	55.0	121
Caprylic acid	16.3	149	β-Chloroacetic acid	56.0	147
Glycerin	17.9	198.7	Chloroacetic acid	56	130
D-Lactic acid	26	184	Nitronaphthalene	56.7	103
Methyl palmitate	29	205	Trimyristin	33–57	201–213
Camphenilone	39	205	Heptadecanoic acid	60.6	189
Docosyl bromide	40	201	α-Chloroacetic acid	61.2	130
Caprylone	40	259	Beeswax	61.8	177
Phenol	41	120	Glycolic acid	63	109
Heptadecanone	41	201	p-Bromophenol	63.5	86
1-Cyclohexyl Octadecane	41	218	Azobenzene	67.1	121
4-Heptadecanone	41	197	Acrylic acid	68.0	115
p-Toluidine	43.3	167	Dinitrotoluene (2,4)	70.0	111
Cyanamide	44	209	Phenylacetic acid	76.7	102
Methyl eicosanoate	45	230	Thiosinamine	77.0	140
3-Heptadecanone	48	218	Bromocamphor	77	174
2-Heptadecanone	48	218	Durene	79.3	156
Hydrocinnamic acid	48.0	118	Benzylamine	78.0	174
Cetyl alcohol	49.3	141	Methyl bromobenzoate	81	126
α-Nephtylamine	50.0	93	Alpha naphthol	96	163
Camphene	50	238	Glutaric acid	97.5	156
O-Nitroaniline	50.0	93	p-Xylene dichloride	100	138.7
9-Heptadecanone	51	213	Catechol	104.3	207
Thymol	51.5	115	Quinone	115	171
Methyl behenate	52	234	Acetanilide	118.9	222
Diphenylamine	52.9	107	Succinic anhydride	119	204
p-Dichlorobenzene	53.1	121	Benzoic acid	121.7	142.8
Oxalate	54.3	178	Stilbene	124	167
Hypophosphoric acid	55	213	Benzamide	127.2	169.4

Tab. 5 - Elenco PCM non paraffini con relativa temperatura di fusione e calore latente di fusione [24]

3.2.1.2 PCM INORGANICI

I PCM inorganici furono i primi materiali ad essere esaminati approfonditamente per l'utilizzo in accumulatori termici, in quanto presentano un calore latente di fusione più elevato rispetto ai materiali organici. Tuttavia, le caratteristiche di questi materiali degradano nel tempo, e per questo sono incompatibili in applicazioni dove sono richiesti molti cicli di passaggi di stato.

Fanno parte dei materiali inorganici i sali idrati ed i materiali metallici.

Sali idrati:

I sali idrati sono leghe di sali inorganici e acqua che formano un solido cristallino. Le principali caratteristiche di questi materiali sono:

- Elevato calore latente per unità di volume
- Alta conducibilità termica
- Basse variazioni di volume
- Bassa o nulla tossicità
- Compatibilità con contenitori plastici
- Costo contenuto

Il processo di fusione è in realtà una disidratazione del sale che porta alla formazione di un sale idrato e acqua. Questa caratteristica causa, però, dei problemi di incongruenza nella fusione: infatti, ci sono dei fenomeni di segregazione di fase dovuta al fatto che l'acqua di cristallizzazione non è sufficiente per tutta la fase solida presente al momento della solidificazione; di conseguenza, per differenza di densità, il sale si dispone sul fondo del contenitore e, al successivo ciclo, la quantità di PCM disponibile sarà minore, di modo che le caratteristiche di accumulo termico del materiale diminuiscono. Per cercare di risolvere questa complicazione sono state sperimentate diverse sostanze che hanno permesso un aumento di viscosità del sale ma allo stesso tempo si è compromessa la velocità di cristallizzazione e di conducibilità termica.

Per di più, un'altra particolarità negativa dei sali idrati è la presenza del fenomeno di sottoraffreddamento causato da una bassa velocità di nucleazione.

Materiali	Temperatura di fusione (°C)	Calore latente di fusione (kJ/kg)	Materiali	Temperatura di fusione (°C)	Calore latente di fusione (kJ/kg)
K ₂ HPO ₄ ·6H ₂ O	14.0	109	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	47.0	153
FeBr ₃ ·6H ₂ O	21.0	105	Fe(NO ₃) ₂ ·9H ₂ O	47	155
Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25.5	148	Na ₂ SiO ₃ ·4H ₂ O	48	168
FeBr ₃ ·6H ₂ O	27.0	105	K ₂ HPO ₄ ·3H ₂ O	48	99
CaCl ₂ ·12H ₂ O	29.8	174	Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	48.5	210
LiNO ₃ ·2H ₂ O	30.0	296	MgSO ₄ ·7H ₂ O	48.5	202
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	189	Ca(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	51	104
Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O	32.0	267	Zn(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O	55	68
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32.4	241	FeCl ₃ ·2H ₂ O	56	90
KFe(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	33	173	Ni(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	57.0	169
CaBr ₂ ·6H ₂ O	34	138	MnCl ₂ ·4H ₂ O	58.0	151
LiBr ₂ ·2H ₂ O	34	124	MgCl ₂ ·4H ₂ O	58.0	178
Zn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	36.1	134	CH ₃ COONa·3H ₂ O	58.0	265
FeCl ₃ ·6H ₂ O	37.0	223	Fe(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	60.5	126
Mn(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	37.1	115	NaAl(SO ₄) ₂ ·10H ₂ O	61.0	181
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	40.0	279	NaOH·H ₂ O	64.3	273
CaSO ₄ ·7H ₂ O	40.7	170	Na ₃ PO ₄ ·12H ₂ O	65.0	190
KF·2H ₂ O	42	162	LiCH ₃ COO·2H ₂ O	70	150
MgI ₂ ·8H ₂ O	42	133	Al(NO ₃) ₂ ·9H ₂ O	72	155
CaI ₂ ·6H ₂ O	42	162	Ba(OH) ₂ ·8H ₂ O	78	265
K ₂ HPO ₄ ·7H ₂ O	45.0	145	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	89.9	167
Zn(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	45	110	KAl(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	91	184
Mg(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	47.0	142	MgCl ₂ ·6H ₂ O	117	167

Tab. 6 - Elenco idrati con relativa temperatura di fusione e calore latente di fusione [24]

Materiali metallici:

I materiali metallici sono poco diffusi a causa dell'elevato peso per unità di volume che rende più difficile il loro inserimento in sistemi di accumulo termico portatili o in settore edile. Le caratteristiche di questa categoria di materiali sono:

- Basso calore latente per unità di peso
- Elevato calore latente per unità di volume
- Elevata conducibilità termica
- Basso calore specifico
- Bassa temperatura di fusione

Materiali	Temperatura di fusione (°C)	Calore latente di fusione (kJ/kg)
Gallium-gallium antimony eutectic	29.8	—
Gallium	30.0	80.3
Cerrolow eutectic	58	90.9
Bi-Cd-In eutectic	61	25
Cerrobend eutectic	70	32.6
Bi-Pb-In eutectic	70	29
Bi-In eutectic	72	25
Bi-Pb-tin eutectic	96	—
Bi-Pb eutectic	125	—

Tab. 7 - Elenco di alcuni metalli utilizzati come PCM con relativa temperatura di fusione e calore latente di fusione [24]

3.2.2 CLASSIFICAZIONE IN BASE ALLA TEMPERATURA DI FUSIONE

Questo tipo di classificazione divide i materiali solamente in base alla loro temperatura di fusione, senza tener conto della loro tipologia. La divisione per range di temperatura risulta molto comoda nell'individuazione dei PCM, in quanto, a seconda dell'intervallo di riferimento, abbiamo diverse possibili applicazioni.

Viene di seguito riportato un esempio di classificazione per temperatura di fusione, con le relative applicazioni, proposto dal gruppo ENEA:

INTERVALLO DI TEMPERATURA	CLASSIFICAZIONE TERMICA	POSSIBILE APPLICAZIONE
< 120°C	Bassa temperatura	Solare termico senza concentrazione o con bassa concentrazione (pannelli piani).
120 - 200°C	Medio-bassa temperatura	Fornitura di calore di processo, generazione di potenza con cicli organici, climatizzazione ad alta efficienza, desalinizzazione. A queste temperature è possibile utilizzare come fluido termovettore anche acqua a bassa pressione
200 - 300 °C	Media temperatura	Applicazioni in multi-generazione ma, chiaramente, i livelli di temperatura impongono l'utilizzo di oli diatermici e permettono di avere generazione di potenza e rendimenti abbastanza elevati.
300 - 400 °C	Medio-alta temperatura	Generazione di potenza con gli impianti solari parabolici lineari ad olio diatermico sino ad oggi realizzati. Le efficienze di conversione termo-elettrica solo elevate.
400 - 600°C	Alta temperatura	Generazione di potenza con gli impianti solari parabolici lineari od a torre ma non può essere più utilizzato l'olio diatermico. Il fluido termovettore sarà un sale fuso. In questo caso le efficienze di conversione termo-elettrica sono molto elevate.
> 600°C	Altissima temperatura	Applicazioni ad energia solare molto concentrata tipo dish o fornaci solari. Il fluido termovettore spesso è aria/gas. L'uso di PCM, in questo caso, è ancora possibile ma in condizioni limite.

Tab. 8 - Intervalli di temperatura e relative applicazioni dei PCM [20]

3.3 INCREMENTO DELLE PRESTAZIONI NEI PCM

Come visto nei paragrafi precedenti, i problemi comuni alla maggior parte dei PCM sono relativi alla bassa conducibilità termica e allo scambio termico in generale. Una bassa conducibilità termica, infatti, porta ad uno scambio termico lento, e quindi a fasi di carica e scarica prolungate. Questo rischia di rendere i sistemi che sfruttano questi materiali come accumulo termico non sufficienti a soddisfare le esigenze che l'applicazione richiede; oltre a ciò, un basso valore di scambio termico richiede superfici più grandi, e quindi un aumento degli ingombri. Al fine di ottenere un sistema compatto ed efficiente vengono utilizzati diversi metodi per incrementare lo scambio termico dei PCM, tra questi quelli più comuni includono:

- Utilizzo di superfici estese o alette
- Unità multiple di PCM
- Microincapsulamento del materiale
- Incremento della conducibilità termica

Superfici estese o alette:

L'utilizzo di superfici estese o alette consente di incrementare la superficie di scambio termico tra PCM e fluido termovettore, determinando di conseguenza delle fasi di carica e scarica del materiale più rapide. Bisogna considerare, però, che l'effettivo incremento delle prestazioni dipende da vari fattori come configurazione, posizione, orientamento, numero e distanza tra le alette. Le geometrie utilizzate possono essere varie: rettangolari, cilindriche, sferiche e a tubi coassiali, con alette longitudinali, trasversali o di tipo anulare. Questo tipo di applicazioni comporta, però, anche degli svantaggi: vi è un notevole aumento di peso e ingombro dell'impianto.

Nella figura seguente sono mostrati degli esempi di applicazioni termiche con l'utilizzo di alette.

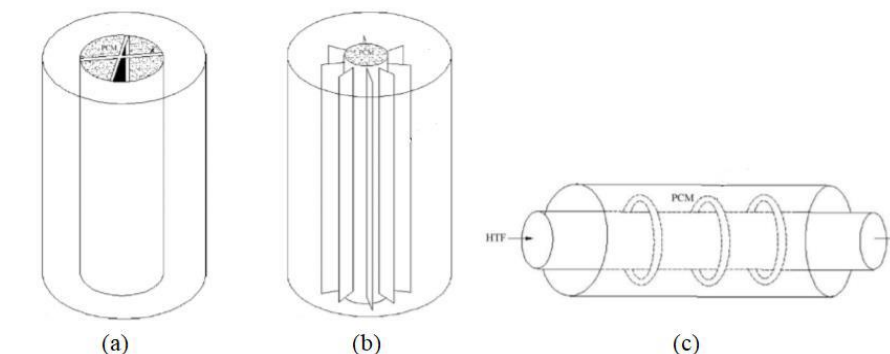


Fig. 39 - (a) Unità di accumulo a calore latente con alette longitudinali interne, (b) unità di accumulo a calore latente con alette longitudinali esterne, (c) unità di accumulo a tubi coassiali con alette anulari [26]

Unità multiple di PCM:

Questa tecnica consiste nell'utilizzo di unità multiple di PCM caratterizzate da diversi materiali con differenti punti di fusione. Queste, posizionate nel verso decrescente delle temperature, determinano un flusso termico pressoché costante. Nelle figure successive sono mostrati degli esempi di utilizzo di unità multiple di PCM con variazione di temperatura di tipo assiale (Fig.40), oppure senza variazione della stessa. Quest'ultimo è il caso tipico in cui il PCM è posto all'interno di un serbatoio, e scambia calore con il fluido termovettore in ingresso e in uscita dallo stesso (Fig.41).

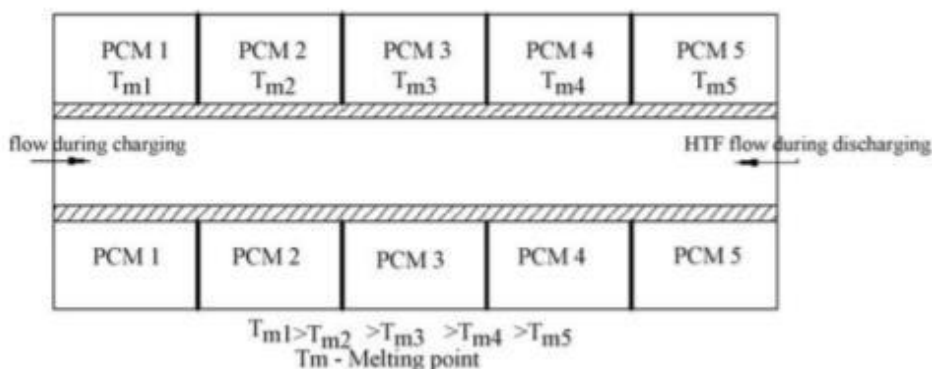


Fig. 40 - Esempio di sistema con unità multiple di PCM con variazione di temperatura assiale [26]

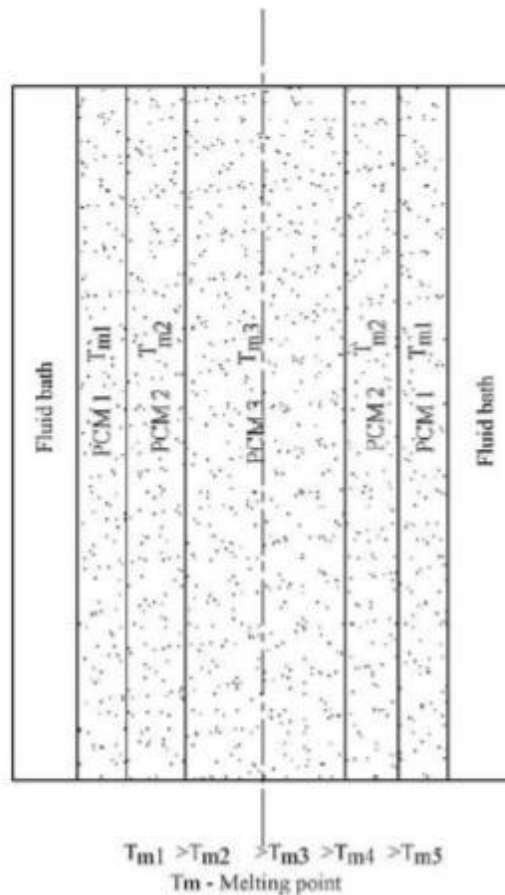


Fig. 41 - Esempio di sistema con unità multiple di PCM senza variazione di temperatura assiale [26]

Microincapsulamento:

La tecnica del microincapsulamento consiste nell’inserire il PCM all’interno di capsule, le quali solitamente sono sferiche e di materiali metallici o polimerici. I benefici di questa pratica sono molteplici, infatti abbiamo:

- Maggiore superficie di scambio termico tra PCM e fluido
- Maggiore stabilità nei cicli di carica e scarica
- Aumento di compatibilità tra PCM e materiali circostanti
- Maggiore capacità di contenimento

La diffusione di questa tecnica è dovuta soprattutto alla necessità di risolvere alcuni problemi derivanti dall’utilizzo di materiali sfusi, soprattutto in edilizia, dove non sono ammesse delle perdite di PCM che potrebbero causare danni ed essere tossiche per l’uomo.

L’utilizzo di materiali micro-incapsulati, però, presenta anche delle forti limitazioni. Il principale svantaggio è la bassa conducibilità termica dovuta ai tipi di materiali utilizzati per le capsule; inoltre, a causa della poca quantità di PCM contenuto nelle singole capsule, la capacità di accumulo risulta limitata.

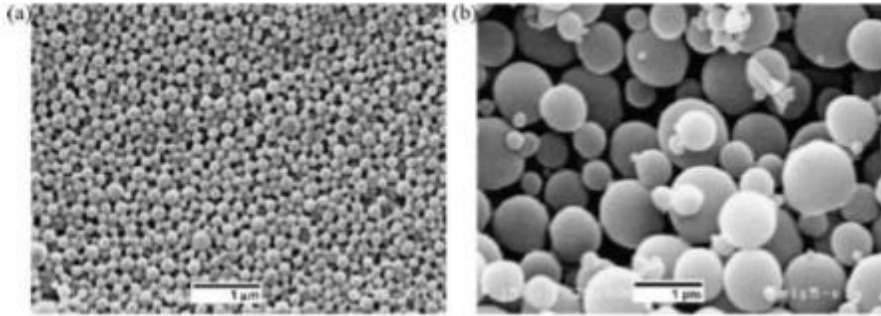


Fig. 42 - Esempi di PCM incapsulato [26]

Metodi per incrementare la conducibilità termica dei PCM:

La maggior parte dei PCM sono contraddistinti da una bassa conducibilità termica, che possiamo compensare integrandoli con materiali ad elevata conducibilità, quali la grafite, le particelle e nano particelle metalliche, e le fibre di carbonio. Un'altra modalità consiste nell'utilizzo di schiume metalliche a celle aperte, ovvero di un materiale poroso composto da una matrice solida in metallo che viene attraversata dal PCM. In fase liquida si instaura un movimento dello stesso nella schiuma, mentre, in fase solida, vi è la formazione di un composto eterogeneo caratterizzato da due solidi a differente conducibilità termica.

Sebbene l'utilizzo di tale tecnica comporti una diminuzione di volume del PCM, l'incremento della conducibilità termica può arrivare anche a due ordini di grandezza superiore.

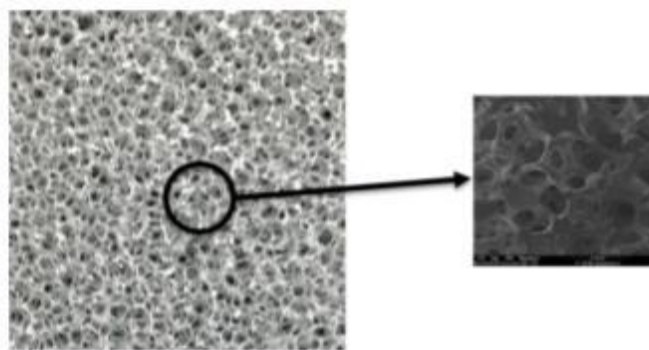


Fig. 43 - Schiuma metallica a celle aperte [26]

3.4 PCM UTILIZZATO: ERITRITOLO

Per l'accumulo di energia termica il PCM utilizzato è l'eritritolo. Si tratta di uno zucchero polialcol comunemente presente nella frutta e nei cibi fermentati. Solitamente è utilizzato come dolcificante alimentare in sostituzione dello zucchero in quanto ha quasi zero calorie.

Le principali caratteristiche termo-fisiche di questo zucchero derivato dall'alcol secondo quanto indicato in letteratura sono riportate nella tabella seguente:

Property	Value	Reference
T_{melt} (°C)	117.7	Honguntikar and Pawar (2019)
L (kJ/kg)	339.8	Honguntikar and Pawar (2019, 2008)
$c_{PCM,s}$ (20 °C) (kJ/(kg K))	1.383	Shukla et al. (2008)
$c_{PCM,l}$ (140 °C) (kJ/(kg K))	2.76	Honguntikar and Pawar (2019)
$\rho_{PCM,s}$ (20 °C) (kg/m ³)	1480	Honguntikar and Pawar (2019)
$\rho_{PCM,l}$ (140 °C) (kg/m ³)	1300	Honguntikar and Pawar (2019)

Tab. 9 Proprietà termo-fisiche dell'Eritritolo [27]

La scelta dell'eritritolo come PCM è ricaduta sul fatto che la sua temperatura di fusione, compresa tra i 100°C e i 120°C, ha garantito un ottimo connubio con il forno a scatola solare capace di arrivare a temperature dell'ordine di 200 °C e oggetto di tale studio. Altro fattore che ha contribuito alla scelta dell'eritritolo è il fatto che risulta essere una sostanza commestibile e non tossica.

L'analisi dello zucchero adoperato è stata effettuata mediante l'utilizzo di uno spettrometro ad infrarossi con trasformata di Fourier (FTIR) (Spettro GX I, Perkin Elmer) con lo scopo di valutare la qualità del campione.

Gli spettri sono stati acquisiti in riflessione, utilizzando un attenuato cristallo di riflettanza totale (ATR) (DuraSampl IR II, SensIR Technologies) con una risoluzione spettrale di 4 cm⁻¹ da 4000 a 650 cm⁻¹. Ogni spettro è il risultato di 16 consecutive scansioni.

La fig. 44, di seguito riportata, mostra i risultati dell'analisi riportando i dati di assorbimento del campione:

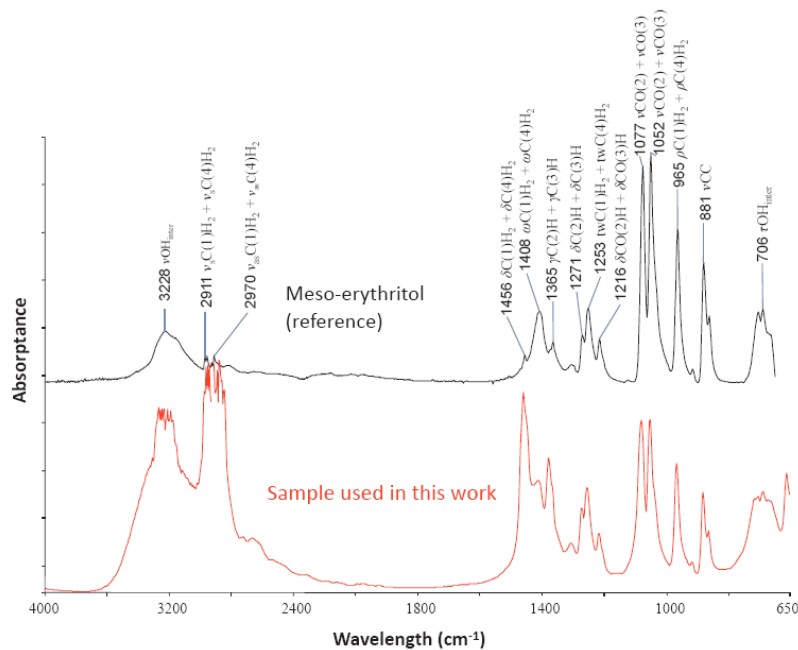


Fig.44 Analisi con spettrometro ad infrarossi con trasformata di Fourier (FTIR) del campione di Eritritolo [27]

La stessa figura riporta anche i risultati del meso-eritritolo, fornendo un confronto diretto tra il campione in esame e la sostanza di riferimento.

Come si evince, anche se è stata adoperata una sostanza di tipo commerciale, il campione di eritritolo considerato nell'esperienza, non contiene quantità considerevoli di altri componenti.

L'eritritolo è stato testato anche con un calorimetro a scansione differenziale (DSC) al fine di valutarne la temperatura di fusione e il calore latente di fusione.

Tre diversi campioni di eritritolo sono stati analizzati con un NETZSCH DSC 214 Polyma alla velocità di 1 K/min.

Le curve del flusso di calore in funzione della temperatura sono state ottenute con il software NETZSCH Proteus 7.0 e sono riportate in Fig. 45.

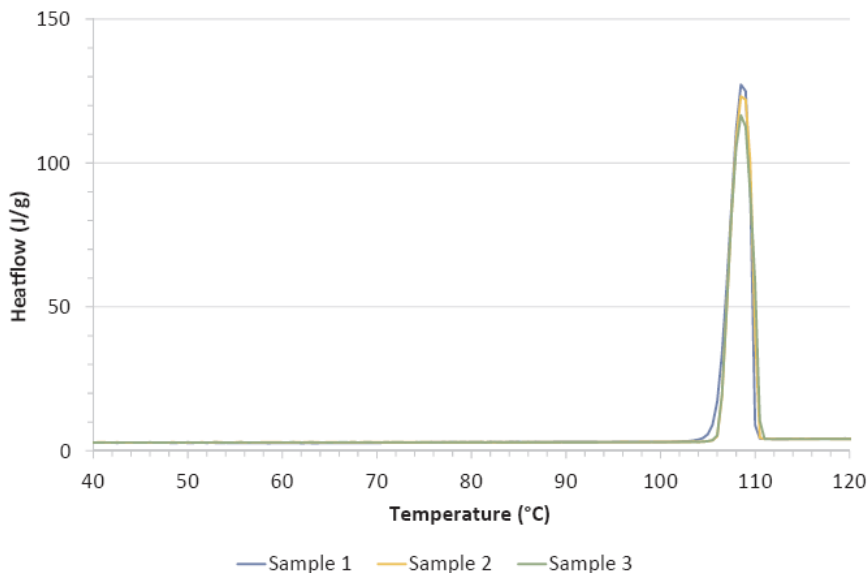


Fig.45 Analisi con DSC dei campioni di Eritritolo [27]

Come si può vedere, la fase di fusione è molto ripetibile tra i tre campioni. La temperatura media di fusione e il calore latente di fusione è stato calcolato rispettivamente a 108,7 °C e 312,8 kJ/kg. notiamo inoltre, che i valori ottenuti con il DSC sono in linea con quelli riportati in letteratura riferiti all'eritritolo commerciale (vd. Tab. 9)

Prima di essere utilizzato per i test sperimentali, relativi al sistema di accumulo termico, una massa di circa 2,5 kg di eritritolo è stata riscaldata in un forno elettrico alla temperatura di 100°C per circa 2 ore. La stessa operazione è stata ripetuta una seconda volta al fine di evitare qualsiasi possibile presenza di umidità all'interno del campione. In seguito, il campione è stato inserito nell'intercapedine del sistema di accumulo termico e tutto il sistema è stato riscaldato nel forno elettrico a circa 200 °C per 2 ore. completato l'intero processo, l'eritritolo era pronto per essere utilizzato per i test sperimentali.

3.5 PENTOLA CON DOPPIO FONDO

Al fine di valutare le caratteristiche e le proprietà dell'eritritolo, è stata realizzata nel dipartimento "DIISM" una pentola a doppio fondo, costituita da due pentole di misure diverse. Durante le prove, all'interno della pentola più piccola viene inserito l'olio silconico, mentre, in quella più grande l'eritritolo. In questo modo il PCM in questione continuerà a fornire calore all'olio anche quando il forno non sarà più esposto al sole, durante la fase di solidificazione.

3.6 REALIZZAZIONE DELLA PENTOLA

Per la realizzazione della pentola sono state utilizzate due pentole di diametri diversi in acciaio INOX, 4 bulloni, 3 termocoppie di tipo K, vernice nera e due tubicini in acciaio INOX. Le dimensioni delle pentole sono state scelte sulla base di quelle della camera di cottura del forno e della quantità di PCM da immettere nell'intercapedine.

Nella tabella successiva sono mostrate le misure riferite alle due pentole:

	Pentola esterna	Pentola interna
Diametro (cm)	23	19
Altezza (cm)	15	13
Capacità (l)	5.2	3.2
Peso (kg)	1.02	0.53

Tab. 10 Misure principali delle pentole

Nella fase iniziale sono stati eliminati i manici da entrambe le pentole. Successivamente, la pentola più piccola è stata inserita in quella più grande mantenendo lo spessore dell'intercapedine pari a 2 cm in tutta la circonferenza, e alla base delle due pentole attraverso l'utilizzo di listelli di legno (Fig. 44).



Fig. 46 - Fase di assemblaggio delle pentole utilizzate.

Una volta definita la posizione corretta, sono stati effettuati quattro fori diametralmente opposti, che sono stati utilizzati per fissare il tutto attraverso bulloni, rondelle e dadi in acciaio INOX. Una volta assemblate le pentole, sono state inserite le due termocoppie di tipo K per la misurazione delle temperature del PCM. Al fine di scongiurare uno spostamento delle stesse durante i passaggi di stato del materiale, e quindi un'acquisizione sbagliata delle temperature dovute al contatto delle termocoppie con le pareti della pentola, sono stati utilizzati due tubicini in acciaio inox saldati al bullone che blocca le due pentole (Fig. 47-48), all'interno dei quali sono state fatte passare le termocoppie, facendole uscire solamente di un centimetro dai tubicini.



Fig. 47 - Sistema di fissaggio delle pentole con tubicino in acciaio INOX per il passaggio delle termocoppie.



Fig. 48 - Tubicini in acciaio INOX saldati ai bulloni

Successivamente, la pentola esterna è stata verniciata di nero. Questa volta, al contrario della camera di cottura del forno (come mostrato nel capitolo 2), è stata utilizzata una vernice generica (Fig.49).



Fig. 49 - Pentola verniciata

Invece, per misurare la variazione di temperatura dell'olio silconico posto all'interno della pentola di diametro minore, è stata utilizzata una termocoppia posta centralmente, mantenuta da un'asta orizzontale che permette alla termocoppia di restare sospesa all'interno del liquido senza entrare in contatto con le pareti della pentola.



Fig. 50 - *Pentola terminata*

CAPITOLO 4: SETUP SPERIMENTALE

PROCEDURE SPERIMENTALI, BANCO DI PROVA E FLUIDI UTILIZZATI

L'esigenza di combustibili alternativi per la cottura ha condotto ad un interesse in crescita da parte di studiosi e ricercatori, in particolare per quanto concerne lo sviluppo dei forni solari. È fondamentale utilizzare coefficienti e parametri comuni per misurare e catalogare le prestazioni di quest'ultimo, in modo tale da facilitare la comunicazione dei risultati degli esperimenti ad altri ricercatori di tutto il mondo.

4.1 PROCEDURE DI CALCOLO STANDARD INTERNAZIONALI

Per la realizzazione di questo standard sono state prese come riferimento due procedure già presenti in letteratura, le quali mostrano i parametri da ricavare che si devono avere per ottenere così risultati standardizzati. Le procedure sperimentali valutate sono state:

- Procedura proposta da Khalifa et al. [28]
- Test sperimentale proposto da Mullick [28]

La valutazione di queste procedure consisterà nel determinare la praticità nell'utilizzo degli standard in riferimento al nostro prototipo, quindi capire se ci sono differenze tra le diverse tipologie di forni solari e se i risultati sono ripetibili e applicabili al forno solare studiato e testato presso il nostro Dipartimento.

4.1.1 PROCEDURA PROPOSTA DA KHALIFA ET AL.

La prassi seguita per valutare le prestazioni dei forni solari consistono sulla determinazione dei seguenti parametri:

Tempo di cottura per i diversi prodotti alimentari

Tempo necessario per avvertire un sensibile riscaldamento di una quantità nota di acqua fino al punto di ebollizione

Temperatura massima raggiungibile registrata in una prova senza carico

Il secondo e terzo metodo sono gli approcci migliori in quanto il primo criterio comporta indeterminatezze dovute alla variazione degli ingredienti e in tal caso entrerebbe in gioco un giudizio del tutto soggettivo sul grado di cottura degli alimenti da parte dell'osservatore. Possiamo quindi asserire che il primo metodo è riconducibile ad un giudizio soggettivo e non del tutto imparziale.

Khalifa et al. [28] hanno utilizzato il secondo metodo per valutare le prestazioni del forno solare attraverso il calcolo dell'efficienza termica complessiva η_{av} e anche il tempo di ebollizione specifico t_s e quello caratteristico t_{ch} . La quantità t_s espressa in (min m^2/kg) rappresenta il tempo richiesto per bollire 1 kg di acqua usando un forno solare con 1 m^2 di superficie di apertura; t_{ch} (min m^2/kg) è usato come parametro di confronto tra i vari forni solari con diversi livelli di radiazione solare. Le espressioni matematiche per il calcolo di t_s , t_{ch} e di η_{av} sono fornite da Refs e sono rispettivamente:

$$t_s = \frac{\Delta t A_a}{m_f} \quad (4)$$

$$t_{ch} = t_s \frac{DNI_{,av}}{DNI_{,ref}} \quad (5)$$

$$\eta_{av} = \frac{m_f c_f (T_2 - T_1)}{DNI_{,av} A_a \Delta t_h} \quad (6)$$

dove m_f e c_f sono la massa (kg) e il calore specifico (J/kg K) del fluido, Δt_h è il tempo necessario per raggiungere la massima temperatura del fluido, $DNI_{,av}$ è l'intensità solare media (W/m²) durante l'intervallo di tempo Δt_h . $DNI_{,ref}$ è l'intensità media solare di riferimento pari a 900 W/m². T_2 e T_1 sono rispettivamente la temperatura massima e la temperatura minima dell'intervallo di tempo considerato mentre A_a è l'area di apertura (m²) del forno solare.

4.1.2 PROCEDURA PROPOSTA DA MULLICK

Mullick [28] propose una procedura di prova standard per i forni solari a scatola, dove determinò due figure di merito F_1 e F_2 , attraverso la prova di stagnazione (senza carico) e riscaldando una massa nota di acqua. F_1 (°C m²/W) è definito come:

$$F_1 = \frac{T_{a,max} - T_{amb}}{DNI} \quad (7)$$

Dove $T_{a,max}$, T_{amb} e DNI sono rispettivamente, la temperatura dell'assorbitore, la temperatura ambiente e la radiazione solare su un piano orizzontale una volta raggiunta la temperatura di stagnazione.

F_2 implica la misura dell'incremento della temperatura nel tempo di una quantità nota di acqua contenuta nella pentola, come indicato dalla seguente relazione:

$$F_2 = \frac{F_1 |m_f c_f}{A_a \Delta t_h} \ln \frac{1 - \frac{1}{F_1} (T_1 - T_{amb,av}) / DNI_{,av}}{1 - \frac{1}{F_1} (T_2 - T_{amb,av}) / DNI_{,av}} \quad (8)$$

Dove Δt_h rappresenta l'intervallo di tempo (s) durante il quale la temperatura dell'acqua passa da T_1 (temperatura iniziale dell'acqua) a T_2 (temperatura finale dell'acqua). $DNI_{,av}$ e $T_{amb,av}$ sono rispettivamente la radiazione solare media (W/m²) e la temperatura ambiente media (°C), nell'intervallo di tempo Δt_h considerato. I valori m_f , c_f e A_a sono rispettivamente, come detto sopra, la massa dell'acqua (kg), il calore specifico (J/kg K) e l'area di apertura del collettore (m²).

Inoltre, Mullick [18], con la collaborazione di Buddhi [18] analizzò gli effetti del carico m_f e del numero di pentole in F_2 . Si è concluso che F_2 aumenta con l'aumentare sia della massa m_f che del numero di pentole.

4.2 INSTALLAZIONE DEL BANCO DI PROVA

Il banco di prova è un sistema di rilevamento che permette di estrarre le caratteristiche nei differenti intervalli di tempo di ciascun giorno di prova ed il suo funzionamento.

Gli elementi che costituiscono tale banco di prova, se collegati correttamente tra loro, offrono i risultati desiderati in termini di efficienza.

Il banco di prova da noi utilizzato è composto dai seguenti elementi:

- computer portatile
- acquisitore
- termocoppie di tipo K e tipo T
- pireliometro

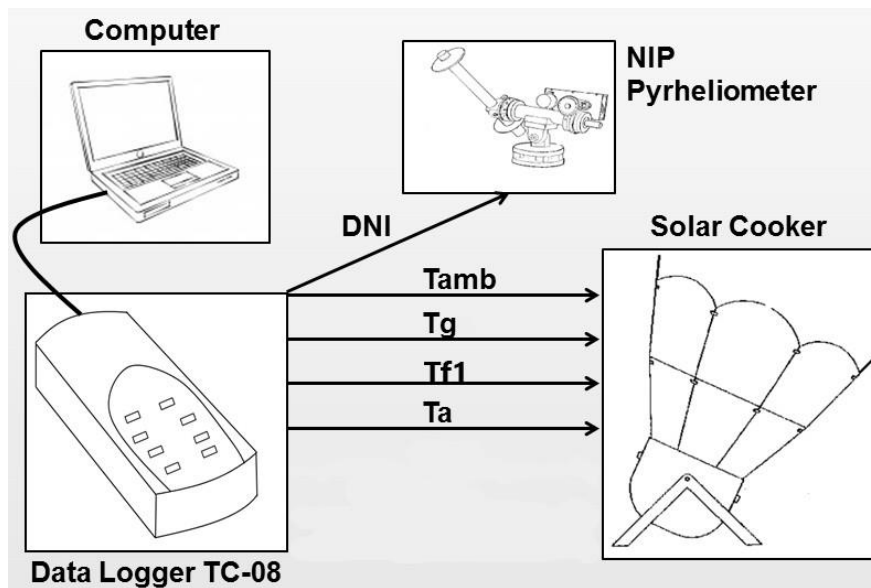


Fig. 53 - Esempio di allestimento banco di prova

Entriamo nel dettaglio dei vari strumenti per capirne il loro funzionamento.

4.2.1 TERMOCOPPIE

La termocoppia è un trasduttore di temperatura il cui meccanismo di funzionamento è basato sull'effetto termoelettrico. Sono diffusamente utilizzate perché economiche, facilmente sostituibili, standardizzate e in grado di misurare un vasto intervallo di temperature. L'unica pecca è l'accuratezza, in quanto gli errori sistematici inferiori al grado celsius sono difficili da ottenere.

Un gruppo di termocoppie messe in serie viene detto termopila. Inoltre, le termocoppie sono dei dispositivi non lineari.

4.2.1.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Le termocoppie sfruttano il cosiddetto fenomeno chiamato Seebeck che trae il suddetto nome dal proprio scopritore Thomas Seebeck, che nel 1821 riuscì ad individuare che in un circuito formato da due conduttori di natura differente, sottoposto ad un gradiente di temperatura, si instaura una differenza

di potenziale; fenomeno che non poteva sussistere in un circuito formato da un solo conduttore omogeneo.

La termocoppia si compone perciò di una coppia di conduttori elettrici di differente materiale uniti tra loro in un punto chiamato giunto caldo o giunzione calda, in cui viene rilevata la temperatura da misurare, mentre le estremità libere vengono collegate da un morsetto detto giunto freddo o giunzione fredda. Al morsetto va collegato a sua volta un acquisitore necessario per ricavare i dati relativi alla temperatura misurata.

Quando sussiste una variazione di temperatura tra la zona del giunto caldo e la zona del giunto freddo, si può rilevare una differenza di potenziale elettrico tra le estremità libere della termocoppia in corrispondenza del giunto freddo. Tale valore di potenziale elettrico è funzione diretta della differenza di temperatura, secondo una legge non lineare.

Nella pratica, la termocoppia è inserita all'interno di una guaina di protezione che penetra all'interno dell'apparecchiatura della quale si vuole misurare la temperatura. Immediatamente all'esterno, i due conduttori sono congiunti ad una morsettiera contenuta dentro una testina di protezione.

Da questo punto, un paio di conduttori elettrici di metallo, identici a quelli della termocoppia, prolungano il collegamento elettrico e vengono connessi alla morsettiera di uno strumento indicatore o registratore di temperatura, nel nostro caso un acquisitore, come possiamo notare in Fig.54. In tale maniera il giunto freddo si trova fisicamente subordinato alla temperatura presente su tale morsettiera.

Questa temperatura viene misurata mediante una termoresistenza ed adoperata, all'interno dello strumento, per correggere elettricamente il segnale derivante dalla termocoppia medesima.

Così facendo, in tale zona la temperatura potrebbe essere qualsiasi ma il giunto freddo è come se si trovasse alla temperatura di 0 °C. Questa operazione è denominata compensazione della temperatura ambiente ed assicura la massima precisione di misura.

Lo strumento misuratore avrà sulla sua scala o sul suo display l'indicazione direttamente in °C (e non in mV), in quanto al suo interno esistono sistemi che tengono conto anche della non linearità del segnale in ingresso.

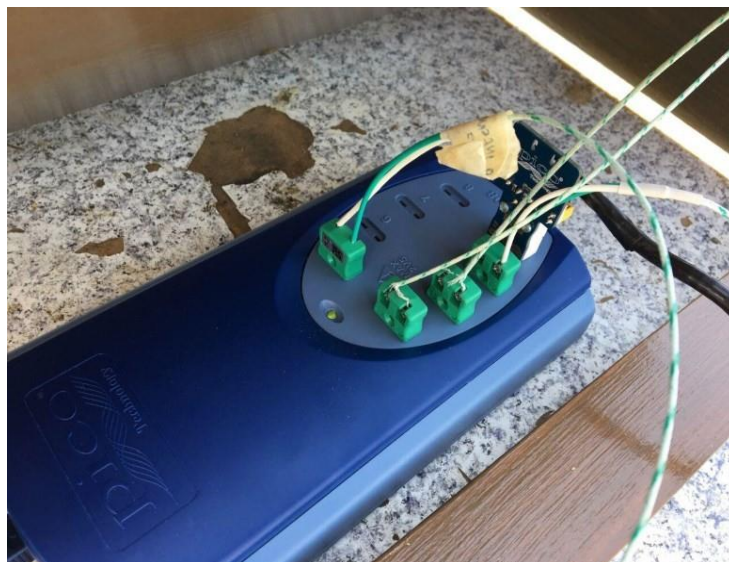


Fig. 54 - Termocoppie collegate ad un acquisitore

4.2.1.2 AFFIDABILITÀ DELLE TERMOCOPPIE

Il problema dell'affidabilità di una termocoppia è un problema articolato, strettamente connesso alla tipologia di utilizzo che si fa della termocoppia stessa, alle condizioni di misura più o meno gravose ed all'incertezza che si richiede nella misura.

Riscontriamo la prima causa di perdita di affidabilità delle termocoppie nella presenza di disomogeneità nei fili causata da motivi di natura chimica o fisica quali: volatilizzazione di un componente o contaminazione dovuta alla presenza di agenti corrosivi, stress meccanici quali piegamenti o stiramenti, mutazione della struttura cristallina del materiale a causa di diversi trattamenti termici subiti da differenti porzioni di filo. Per questa ragione è buona norma l'uso di fili nuovi che sono esenti dalle suddette anomalie che possono verificarsi durante l'uso.

Uno studio svolto dall'università di Caserta sulla stabilità della termocoppia Platino/Platino Rodio, ha fatto emergere i seguenti inconvenienti:

- Rottura della termocoppia in seguito al riscaldamento per 10 ore a 1290 °C
- Deriva di 0,2 °C in seguito al riscaldamento per 10 ore a 1200 °C
- Deriva di 0,5 °C in seguito al riscaldamento per 35 giorni a 800 °C
- Deriva di 1 °C in seguito al riscaldamento per 25 ore a 1600 °C
- Deriva di 9 °C mantenendo per 3 anni a 1290 °C

L'analisi di dati così discordanti dà una netta indicazione di come sia difficile stabilire a priori il grado di affidabilità di una termocoppia ed in particolare la durata di validità di una taratura.

4.2.1.3 TERMOCOPPIE UTILIZZATE: TIPO K E TIPO T

Possiamo distinguere le termocoppie in funzione dei due conduttori elettrici che costituiscono la giunzione e in base al campo di applicazione (industriale, scientifico, alimentare, medico etc.).

Le termocoppie sfruttate per rilevare le varie temperature essenziali all'analisi da noi sviluppata sono quelle di tipo K (per la misura delle temperature raggiunte dal forno sia vicino al vetro, sia all'interno dell'assorbitore) e di tipo T (che calcolano la temperatura del fluido utilizzato durante le prove a carico).

Le termocoppie di tipo K supportano un intervallo di temperatura che va da -200 °C a 1200 °C con una sensibilità pari a circa 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Esse sono formate da Chromel (Ni-Cr) (+) e Alumel (Ni-Al) (-) ed è una termocoppia nata per subentrare alle termocoppie a metallo nobile ad elevate temperature, infatti può essere impiegata fino a 1260°C con un'incertezza di $\pm 2,2$ °C [19] in atmosfere inerti e ossidanti. Presenta però problemi di riproducibilità e stabilità.

Le termocoppie di tipo T, invece, sono composte da Rame (Cu) (+) e Costantina (Cu-Ni) (-) e sono una varietà di termocoppie adeguate a temperature inferiori a 0 °C con limite di temperatura di 350 °C e possono essere sfruttate in atmosfera ossidante, riducente o con gas inerte. La termocoppia non subisce corrosione in presenza di atmosfere umide e la scelta ricade in funzione del valore di temperatura media da calcolare e in relazione al background in cui verranno situate.

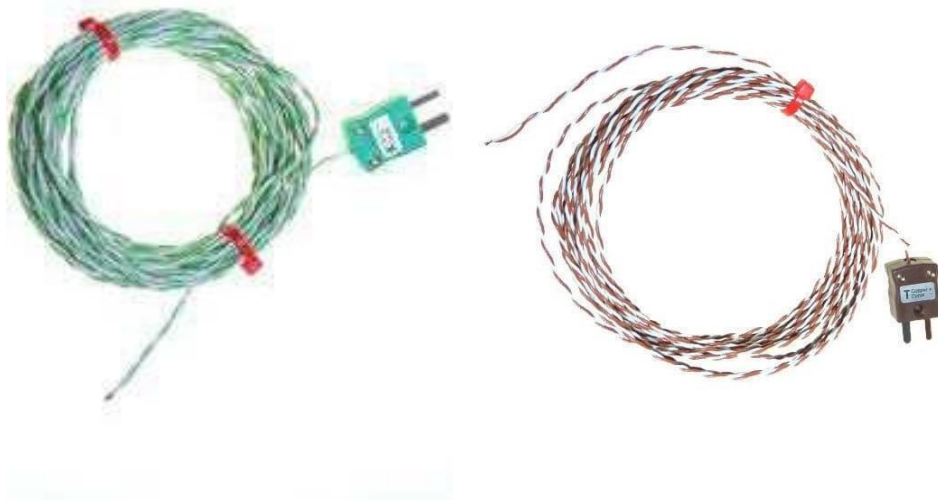


Fig. 55 - Termocoppie tipo K a sinistra, tipo T a destra

4.2.2 PIRELIOMETRO

Il pireliometro è uno strumento atto a misurare l'intensità della radiazione solare diretta, cioè quella che giunge a toccare la terra con un preciso angolo e senza essere soggetta a riflessioni.

Generalmente costituito da un lungo tubo all'estremità in cui è sito un sensore che si presenta come un corpo nero il quale assorbe tutta la radiazione solare scaldandosi.

Per risalire all'intensità della radiazione (e quindi all'energia assorbita) che ha colpito il sensore in maniera diretta, basta osservare la misura della tensione generata dalla termopila posizionata sul fondo del tubo. Il pireliometro utilizzato per le nostre prove è composto, per di più, da un motore elettrico che gli consente di ruotare e, perciò, continuare ad effettuare le misurazioni in tutto l'arco della giornata, senza l'esigenza di essere riposizionato manualmente. Anche il pireliometro, come le termocoppie, va connesso al data-logger per l'acquisizione dei dati.



Fig. 56 - Pireliometro

4.2.2.1 STRUTTURA DEL PIRELIOMETRO

La Eppley [29] ha ideato il pireliometro per la misurazione precisa della radiazione solare diretta. Il NIP incorpora una termopila a filo alla base di un tubo e la fessura sulla quale passa la radiazione ha un rapporto di lunghezza che va da 1 a 10, relativo ad un angolo di $5^{\circ} 43' 30''$. Il tubo di ottone all'interno è annerito e viene riempito di aria secca a pressione atmosferica e sigillato alle estremità. In un capo del tubo, è posto un dispositivo di avvistamento al fine di puntare direttamente il sole, mentre l'allineamento si ottiene montando il NIP su un inseguitore solare.

4.2.2.2 INSTALLAZIONE E MANUTENZIONE

Il NIP misura il fascio di irraggiamento diretto a onde corte rivolgendosi direttamente verso il sole. Eppley produce due tipi di inseguitori solari utilizzati per raggiungere questo allineamento:

il modello Tracker ST che è a singolo asse, con un orologio a motore per l'inseguimento ed il modello Tracker SMT che è invece un computer a doppio asse controllato con un inseguitore automatico.

È fondamentale che il pireliometro venga verificato ogni giorno, in cui viene utilizzato, per un corretto tracciamento solare, utilizzando l'apposito puntatore. Il vetro deve essere giustamente pulito con un panno morbido, facendo attenzione a non recare graffi alla superficie.

Questo strumento è dotato di una costante di calibrazione (sensibilità) che, divisa per il segnale rilevato, restituisce l'irradianza in watt per metro quadro (W/m^2). Eppley raccomanda oltre a ciò di collegare il pireliometro ad un sistema di acquisizione dati che sarà poi a ragion veduta collegato ad un computer per la visualizzazione degli stessi.



Fig. 57 - Tubo del pireliometro[29]

4.2.3 COMPUTER E ACQUISITORE

Il Data Logger TC-08 è un acquirente che collega opportunamente tutti gli strumenti sopra citati e mediante un determinato software denominato PicoLog (Fig.58), riusciamo a visualizzare l'andamento delle temperature e della radiazione solare nel computer a nostra disposizione.

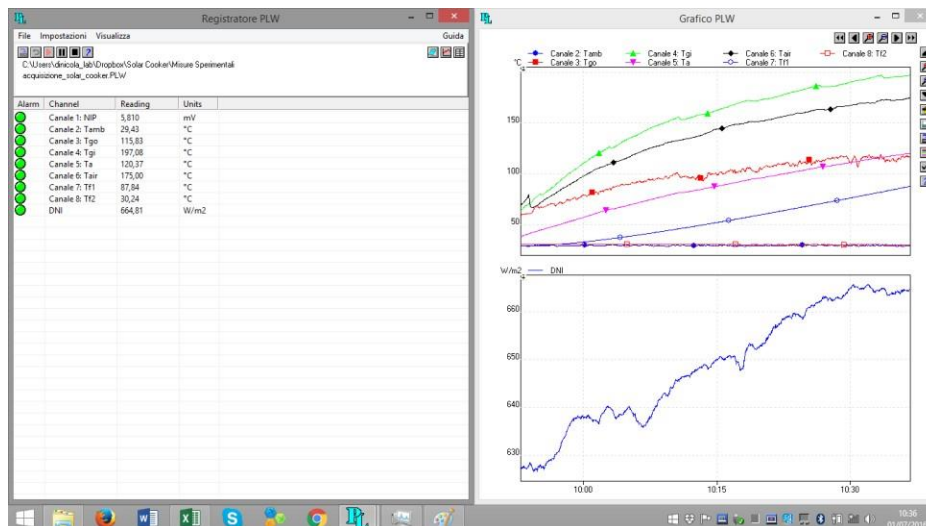


Fig. 58 - Esempio della schermata del programma di acquisizione durante il test sperimentale (Software PicoLog)

Come evidente dalla figura precedente (Fig.58), questo acquisitore fornisce 8 canali di ingresso. Nel primo canale verrà collegato il pireliometro ed otterremo il valore della radiazione solare diretta sia in mV che convertiti in W/m2 (rispettivamente Canale 1: NIP e DNI).

Simultaneamente tale valore verrà tradotto a livello grafico al fine di intuire l'andamento della radiazione solare a seconda delle condizioni climatiche e del luogo in cui verranno effettuate le prove. Gli altri 7 canali liberi saranno invece impiegati per collegare le termocoppie, le quali restituiranno valori in °C:

- Canale 2: Tamb (temperatura ambiente)
- Canale 3: Tg (temperatura del vetro)
- Canale 4: Ta (temperatura dell'assorbitore)
- Canale 5 e 6: Tpcm (temperatura del PCM) che nel nostro caso non sono stati utilizzati.
- Canale 7: Tf (temperatura dei fluidi)



Fig. 59 - Computer per la visualizzazione di dati

4.3 FLUIDI UTILIZZATI DURANTE LE PROVE

4.3.1 ACQUA DISTILLATA

L'acqua distillata (dH₂O) è quasi del tutto priva di impurità (tra cui microorganismi, sali minerali e gas disciolti), per questo è stata utilizzata nelle nostre prove iniziali (nella quantità di 3 kg) oltre ad essere facilmente reperibile ed oggetto di studio per altri ricercatori, dandoci così l'opportunità di un immediato confronto.

4.3.2 OLIO SILICONICO

Come fluido termovettore è stato utilizzato 1,5 kg di olio siliconico Rhodorsil Oils 47 V 100 (47 è il riferimento della Bluestar Silicones per gli oli polidimetilsilossano; V sta per viscosità; 100 indica la viscosità in mm²/s a 25 °C). Le principali proprietà di quest'olio sono: bassa viscosità, alta tensione superficiale, alta comprimibilità, resistenza alle alte e alle basse temperature, resistenza all'ossidazione e all'idrolisi, mancanza di invecchiamento agli agenti atmosferici, chimicamente inerte, combustibilità molto limitata. La tensione di vapore è molto bassa con una viscosità di oltre 50 (mm²/s). Oltre i 200 °C l'olio siliconico, in presenza di aria, non è più stabile e cominciano i fenomeni di ossidazione.

La capacità termica specifica degli oli di Rhodorsil® 47 di viscosità da 50 a 1,000 mm²/s è indipendente dalla viscosità, e pari a 0,35 cal/kg/°C (o 1,46 J/g.°C) a 25 °C. Ciò aumenta con la temperatura secondo la seguente legge generale: $C_p = a + b \cdot 10^{-5} T$ con $a = 0.34708$ e $b = 43$ T in °C, C_p in kcal/kg/°C (Fig.60). Questa legge è valida tra -50 °C e + 220 °C.

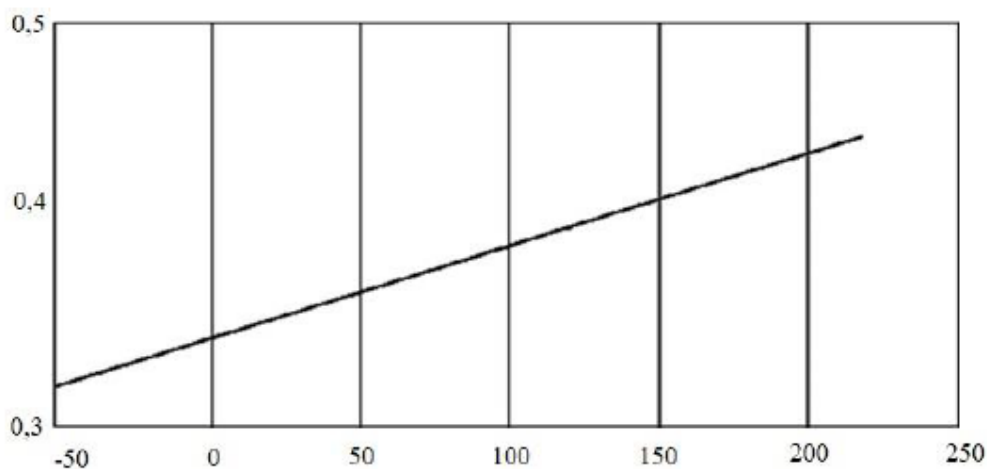


Fig. 60 - Variazione del calore specifico in funzione della temperatura [30]

La conducibilità termica degli oli di Rhodorsil® 47 varia poco con la temperatura nell'intervallo da +20 a +250 °C. Cambia solo in funzione della viscosità per oli molto fluidi e rimane sostanzialmente costante da una viscosità di 50 mm²/s: la conducibilità termica degli oli di Rhodorsil® 47 è fondamentalmente identica a quella degli oli minerali.

La legge generale che disciplina la variazione della conducibilità termica in funzione della temperatura (Fig. 61) è la seguente:

$$\lambda = \lambda_0 [1 + (T + T_0)]$$

T in K, λ in mW/m °C $T_0 = 298$ K, Per gli oli 47 V 50 a V 1,000:

$$\text{In mW/m}^\circ\text{C} \quad \lambda = 156,82 - 0,233 T \quad (T \text{ in } ^\circ\text{C})$$

$$\text{In kcal/h.m}^\circ\text{C} \quad \lambda = 0,1351 - 2,10 \cdot 10^{-4} T$$

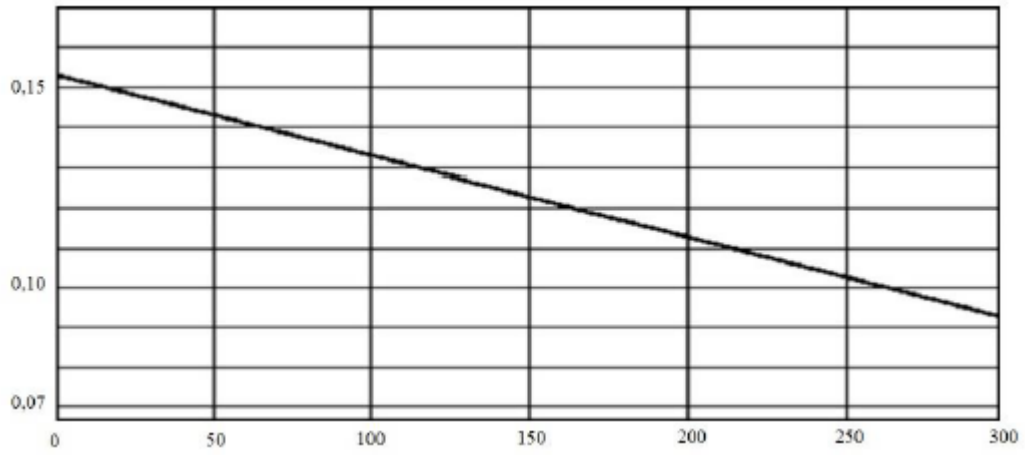


Fig. 61 - *Variazione della conducibilità termica in funzione della temperatura* [30]

CAPITOLO 5: TEST SPERIMENTALI

In questo paragrafo verranno riportate e analizzate le prove sperimentali eseguite con il prototipo di forno solare a scatola portatile costruito dall'UNIVPM presso il Dipartimento "DIISM" dell'Università Politecnica delle Marche. La caratterizzazione del forno a scatola portatile studiato con il PCM in esame, l'eritritolo, richiede la determinazione di una serie di parametri ampiamente studiati in letteratura (Sagade et al., 2019) [27] ed in questa tesi andremo a valutare le prestazioni termiche del forno in questione, mediante delle prove sperimentali una volta allestito uno specifico banco di prova; questo ci ha condotto alla definizione di parametri di prestazione in tempistiche differenti e differenti intervalli per ciascun test.

Le prove sono state condotte da maggio ad ottobre nel corso degli anni 2017, 2018 e 2019 sul tetto: DIISM (latitudine 43,5867 N, longitudine 3.5150 E) sono state effettuate nelle seguenti tipologie:

- Prove a vuoto
- Prove con carico

Prove con accumulo termico utilizzando diversi materiali

In questo lavoro andremo ad analizzare i risultati delle ultime due tipologie di prove, e nello specifico verrà utilizzato come PCM per l'accumulo termico l'eritritolo. Verranno, in seguito, confrontati i risultati delle prove con e senza accumulo termico, al fine di rilevare le variazioni di rendimento del forno e valutare eventuali miglioramenti apportabili. Le prove a vuoto sono state necessarie al fine di un'analisi delle caratteristiche del prototipo di forno solare che hanno permesso di determinare la temperatura massima raggiungibile dal forno.

Le prove con carico invece sono state svolte inserendo un fluido di prova, tra cui acqua ed olio silconico descritto nel capitolo 3. Inizialmente sono stati eseguiti i test con acqua, in quanto facilmente reperibile e quindi usata per questo tipo di prove con conseguente facilità di confronto con i risultati ottenuti dai ricercatori. Successivamente è stato utilizzato l'olio per portare il fluido alla massima temperatura raggiungibile.

Qui di seguito verranno rappresentati e commentati i risultati ottenuti dalle singole prove.

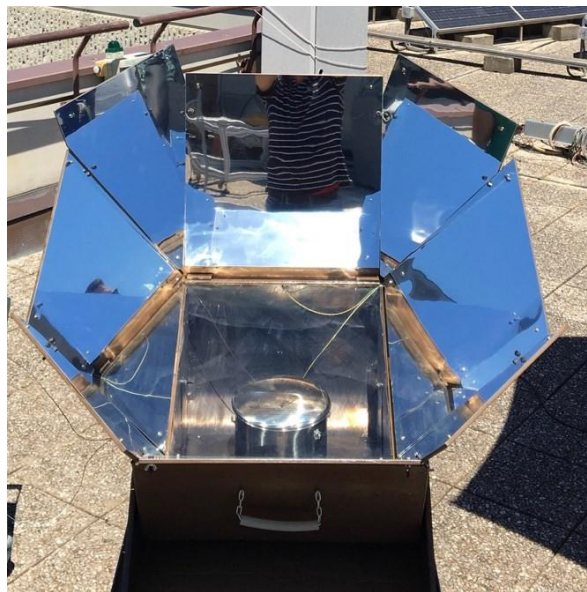


Fig. 62 - Forno solare durante la prova a carico

5.1 PROVE A CARICO

I fluidi impiegati per le prove con carico, come già accennato, sono acqua e olio silconico, in quantità rispettivamente di 3 kg e 1,5 kg. Durante questi test sono state rilevate, attraverso le termocoppie, le seguenti temperature in prima fase di riscaldamento, mentre solamente nel caso di uso dell'olio sono state analizzate le medesime temperature anche in fase di raffreddamento:

- Temperatura ambiente T_{amb} (°C)
- Temperatura del vetro T_g (°C)
- Temperatura dell'assorbitore T_a (°C)
- Temperatura del fluido T_f (°C)
- Radiazione solare DNI (W/m^2)

Una volta che il fluido esaminato è giunto alla temperatura di ebollizione o comunque alla massima temperatura possibile in funzione delle condizioni climatiche della giornata di prova, il fornello è stato orientato nella parte antistante il sole, in una zona ombreggiata e si è proseguito a rilevare i parametri studiando così anche i tempi di raffreddamento. In questa seconda fase non avendo più la radiazione solare diretta il pireliometro è stato scollegato ed è stato registrato il tempo, Δt_c , richiesto dall'olio di silicone per ridurre la sua temperatura da $T_2 = 125$ °C fino a $T_3 = 100$ °C.

Sono state effettuate innanzitutto 3 prove a vuoto in diverse condizioni ambientali di cui possiamo visualizzare un resoconto nella seguente tabella:

Summary of tests without load.			
Quantity	Test 1	Test 2	Test 3
Date	23/05/2017	09/06/2017	13/06/2017
T_{amb} (°C)	29.39	23.39	31.27
DNI (W/m^2)	839.71	971.75	841.24
T_{max} (°C)	197.30	187.42	189.10
F_1 (°C/(W/m^2))	0.20	0.17	0.19

Tab. 11- *Sommario dei test senza carico [27]*

come si può notare, la massima temperatura raggiunta era di circa 189 °C e la corrispondente temperatura solare la radiazione e la temperatura ambiente erano, rispettivamente, 841 W/m^2 e 31.27 °C. In Figura 63 sono evidenti le temperature e la radiazione solare rilevate durante il test del 13/06/2017:

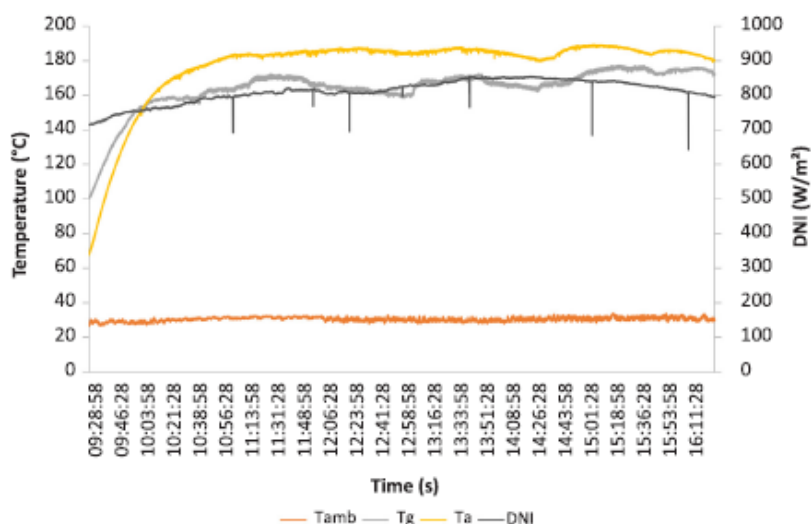


Fig. 63 - Test senza carico del 13/ 06 /2017 [27]

Dai 3 valori in tabella 11 è stata calcolata una media $F1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C} (\text{W}/\text{mq})$ che rappresenta la prima cifra di merito del fornello a scatola solare in fase di esame. Il valore è inferiore al precedente progetto di forno solare (Coccia et al., 2017) in cui $F1$ corrispondeva a $0,39 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$, ma va anche considerato il fatto che il fornello precedente aveva un rapporto di concentrazione di più del doppio ed era dotato di un miglior sistema di isolamento termico.

5.1.1 PROVE CON ACQUA

Prova 1: 14/09/2017

Il test è stato effettuato dalle ore 11:40 alle ore 14:10 circa. In questo intervallo di tempo si è pervenuti alla massima temperatura raggiungibile dal fluido (acqua) in base alla stagione e pertanto alle condizioni climatiche. Si è partiti da una temperatura iniziale del fluido di $24,77 \text{ } ^\circ\text{C}$ per arrivare alla temperatura finale di $72,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ rimasta stabile per via delle temperature molto basse esterne ($12 \text{ } ^\circ\text{C}$ di media come possiamo vedere dai dati acquisiti), con una radiazione solare media rilevata nell'intervallo di $858,02 \text{ W}/\text{m}^2$.

La temperatura massima raggiunta dal vetro è stata di $120,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ e il fluido ha impiegato circa 2:30 ore per arrivare ad una temperatura stabile.

I risultati grafici sono visionabili nella pagina successiva.

Ora	Canale 1: NIP mV	Tamb °C	Tg °C	Ta °C	Tg2 °C	Tf °C	Tf2 °C	DNI W/m2
11:37:54	7,562	13,54	85,08	39,4	12,17	24,77	12,48	865,27
11:37:55	7,561	13,39	85,16	39,39	12,19	24,78	12,49	865,07
11:37:56	7,56	13,09	85,24	39,37	12,14	24,79	12,42	865
11:37:57	7,561	12,84	85,33	39,39	12,18	24,8	12,48	865,15
11:37:58	7,56	12,64	85,43	39,38	12,07	24,8	12,45	865,02
11:37:59	7,562	12,47	85,53	39,38	12,08	24,82	12,48	865,24
11:38:00	7,561	12,29	85,71	39,37	12,08	24,82	12,44	865,14
11:38:01	7,565	12,22	85,88	39,35	11,95	24,8	12,23	865,6
11:38:02	7,566	12,27	86	39,39	12,02	24,81	12,21	865,63
11:38:03	7,568	12,29	86,09	39,39	12	24,82	12,3	865,85
11:38:04	7,569	12,31	86,17	39,36	12,05	24,81	12,45	866,01
11:38:05	7,574	12,32	86,27	39,36	12,18	24,82	12,41	866,55
11:38:06	7,569	12,34	86,36	39,35	12,1	24,81	12,36	866,02
11:38:07	7,568	12,4	86,45	39,31	12,13	24,82	12,31	865,96
11:38:08	7,569	12,49	86,56	39,31	12,19	24,84	12,41	865,97
11:38:09	7,57	12,59	86,75	39,28	12,2	24,86	12,39	866,11
11:38:10	7,565	12,56	86,9	39,27	12,28	24,9	12,48	865,51
11:38:11	7,562	12,52	86,97	39,25	12,23	24,9	12,49	865,21
11:38:12	7,562	12,5	87,03	39,24	12,24	24,92	12,63	865,26
11:38:13	7,566	12,47	87,11	39,22	12,16	24,93	12,42	865,65
11:38:14	7,568	12,45	87,21	39,21	12,18	24,94	12,4	865,92
11:38:15	7,57	12,41	87,34	39,18	12,21	24,94	12,5	866,11
11:38:16	7,566	12,26	87,43	39,19	12,22	24,93	12,35	865,65
11:38:17	7,564	12,11	87,51	39,18	12,1	24,92	12,34	865,49
11:38:18	7,56	11,99	87,62	39,18	12,03	24,93	12,28	864,99
11:38:19	7,559	12	87,68	39,19	12,11	24,95	12,3	864,86
11:38:20	7,561	12,01	87,77	39,21	12,02	24,96	12,28	865,09

Fig. 63 - Dati rilevati e riportati in Excel (prova 14/09/2017)

Nel grafico in Fig. 64 si nota l'andamento delle temperature rilevate in rapporto alla radiazione solare misurata in quel determinato range di tempo:

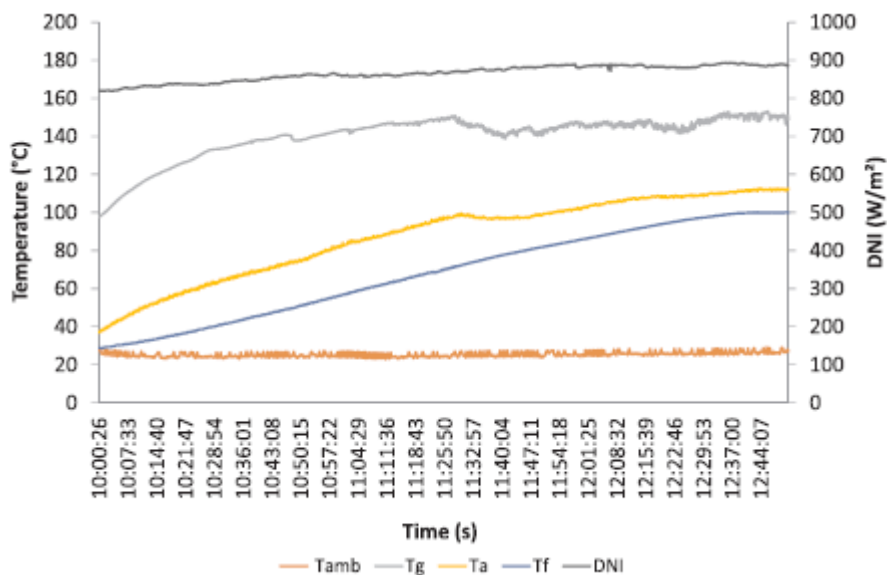


Fig. 64 - Grafico delle rilevazioni (prova 14/09/2017)

Per l'elaborazione dei dati raccolti attraverso l'acquisitore e per i successivi calcoli è stato utilizzato il programma Excel, come è facilmente osservabile in Fig. 65.

RISCALDAMENTO_w_m	
Test	1
Data	06/12/2017
mPCM (kg)	-
m _f (kg)	3
T ₁ (°C)	30
T ₂ (°C)	60
DNI _{av} (W/m ²)	858,02
T _{amb,av} (°C)	12,94
Δt _h (h)	1,56
t _s (h m ² /kg)	0,36
t _{ch} (h m ² /kg)	0,34
η _{av}	0,11
F ₂	0,14

Fig. 65 - Foglio elaborazione dati (prova 06/12/2017)

Prova 2: 01/06/2018

Il test è stato effettuato dalle ore 11:50 alle ore 13:50. In questo intervallo di tempo si è arrivati alla massima temperatura raggiungibile dal fluido (acqua) di circa 100 °C, quindi la prova può considerarsi superata. Si è partiti da una temperatura iniziale del fluido di 32 °C per arrivare ad oscillare sul valore di ebollizione del fluido pari a 97 °C. La radiazione solare media rilevata in questo intervallo è stata di 869,28 W/m², con una temperatura ambiente media di 27,23 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera è stata di 108,67 °C, quella del vetro 141,87 °C e il fluido ha impiegato precisamente 2 ore di tempo per arrivare ad ebollizione.

Data	Ora	Canale 1: NIP mV	Canale 2: Tamb °C	Canale 3: Tg1 °C	Canale 4: Ta1 °C	Canale 5: Tg2 °C	Canale 7: Tf1 °C	Canale 8: Tf2 °C	DNI W/m2
01/06/2018	11:49:40	7,562	27,62	59,02	43,71	26,92	32,01	26,99	865,22
01/06/2018	11:49:41	7,561	27,49	58,95	43,89	26,93	32,07	27,04	865,05
01/06/2018	11:49:42	7,562	27,46	59	43,86	26,84	32,13	27,13	865,27
01/06/2018	11:49:43	7,562	27,49	59,84	43,78	26,78	32,16	26,88	865,24
01/06/2018	11:49:44	7,562	27,54	60,28	43,73	26,69	32,18	26,8	865,19
01/06/2018	11:49:45	7,56	27,59	60,52	43,73	26,55	32,21	26,79	865,03
01/06/2018	11:49:46	7,562	27,58	60,36	43,81	26,71	32,25	26,85	865,21
01/06/2018	11:49:47	7,559	27,63	60,31	43,78	26,9	32,27	26,93	864,9
01/06/2018	11:49:48	7,562	27,67	60,48	43,75	26,81	32,3	26,99	865,24
01/06/2018	11:49:49	7,562	27,68	60,94	43,73	26,83	32,35	27,01	865,26
01/06/2018	11:49:50	7,56	27,66	60,74	43,69	26,77	32,4	27,13	865,03
01/06/2018	11:49:51	7,564	27,72	60,97	43,85	26,79	32,45	26,97	865,46
01/06/2018	11:49:52	7,564	27,73	61,47	43,98	26,8	32,5	26,98	865,49
01/06/2018	11:49:53	7,568	27,76	62,07	43,96	26,74	32,52	27,03	865,92
01/06/2018	11:49:54	7,57	27,63	62,54	43,94	26,89	32,55	27,2	866,14
01/06/2018	11:49:55	7,567	27,5	62,46	43,95	26,9	32,57	27,12	865,84
01/06/2018	11:49:56	7,564	27,43	62,45	44,08	26,76	32,58	27,04	865,44
01/06/2018	11:49:57	7,563	27,49	62,23	44,17	26,63	32,58	26,84	865,36
01/06/2018	11:49:58	7,562	27,54	62,8	44,21	26,76	32,57	27,01	865,19
01/06/2018	11:49:59	7,564	27,78	62,61	44,28	26,83	32,58	27,12	865,42
01/06/2018	11:50:00	7,561	27,83	63,18	44,34	26,81	32,58	27,04	865,07
01/06/2018	11:50:01	7,562	27,86	62,93	44,39	26,62	32,57	26,88	865,22
01/06/2018	11:50:02	7,563	27,92	63,66	44,51	26,74	32,59	27,04	865,29
01/06/2018	11:50:03	7,565	28	64,6	44,52	26,82	32,6	27,06	865,53
01/06/2018	11:50:04	7,564	28,01	64,92	44,45	26,92	32,64	27,26	865,39
01/06/2018	11:50:05	7,563	28,05	65,18	44,41	26,8	32,66	27,02	865,29
01/06/2018	11:50:06	7,563	28,11	64,93	44,36	26,83	32,7	27,16	865,34

Fig. 66 - Dati rilevati e riportati in Excel (prova 01/06/2018)

Nel grafico in Fig. 67 si nota l'andamento delle temperature rilevate in rapporto alla radiazione solare misurata in quel determinato range di tempo:

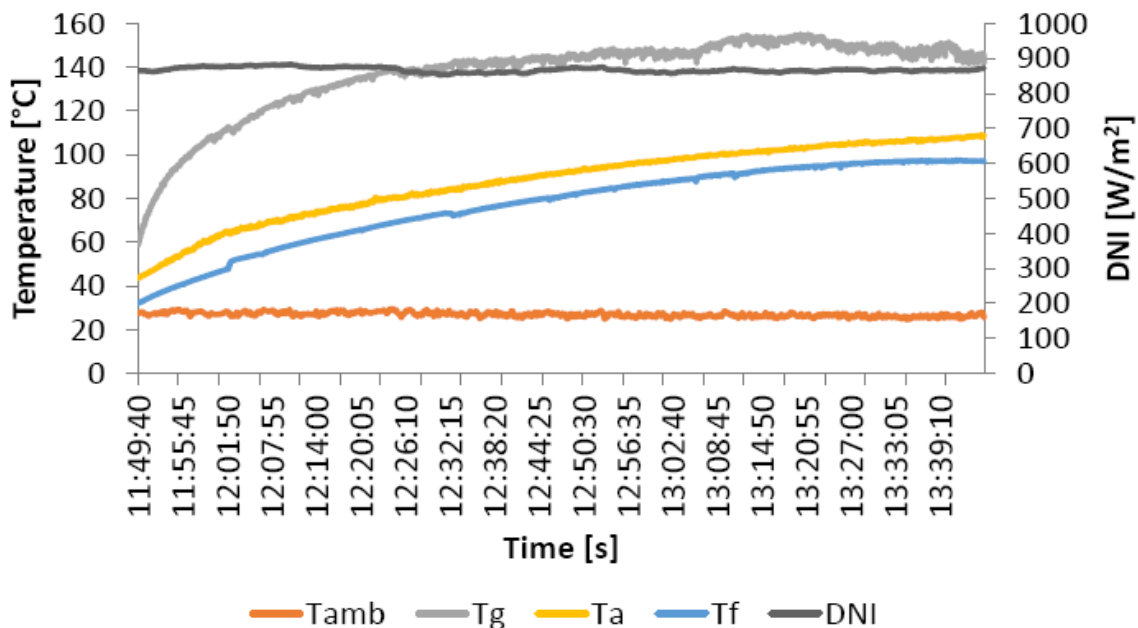


Fig. 67 - Grafico delle rilevazioni (prova 01/06/2018)

Per l'elaborazione dei dati raccolti attraverso l'acquisitore e per i successivi calcoli è stato utilizzato il programma Excel, come è facilmente osservabile in Fig. 68.

RISCALDAMENTO_w_m	
Test	2
Data	01/06/2018
mPCM (kg)	-
m _f (kg)	3
T ₁ (°C)	40
T ₂ (°C)	90
DNI _{av} (W/m ²)	869,28
Tamb,av (°C)	27,23
Δt _h (h)	1,2
t _s (h m ² /kg)	0,27
t _{ch} (h m ² /kg)	0,26
η _{av}	0,24
F ₂	0,31

Fig. 68 - Foglio elaborazione dati (prova 01/06/2018)

Prova 3: 20/06/2018

Il test è stato effettuato dalle ore 10:32 alle ore 12:21. In questo intervallo di tempo si è arrivati alla massima temperatura raggiungibile dal fluido (acqua), quindi la prova può considerarsi superata. Si è partiti da una temperatura iniziale del fluido di 35 °C per arrivare ad oscillare sul valore di ebollizione

del fluido pari a 99.69 °C. La radiazione solare media rilevata in questo intervallo è stata di 805,61 W/m², con una temperatura ambiente media di 26,96 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera è stata di 110,14 °C, quella del vetro 147,47 °C e il fluido ha impiegato precisamente 2 ore di tempo per arrivare ad ebollizione.

Nella tabella in Fig. 69 è riportato un secondo valore di temperatura di un secondo fluido (Tf2), quest'ultimo non ha importanza ai fini della ricerca poiché riguarda un secondo forno solare, in quanto le prove sono state eseguite in "parallelo".

Data	Ora	Canale 1: N mV	Tamb °C	Tg °C	Ta °C	Tg2 °C	Tf1 °C	Tf2 °C	DNI W/m2
20/06/2018	10:32:55	6,327	26,92	106,04	49,29	27,3	35,11	38,52	723,92
20/06/2018	10:32:56	6,328	26,92	105,57	49,27	27,46	35,12	38,56	724,05
20/06/2018	10:32:57	6,327	26,96	105,07	49,31	27,25	35,12	38,59	723,95
20/06/2018	10:32:58	6,327	27	104,99	49,34	27,51	35,13	38,62	723,95
20/06/2018	10:32:59	6,331	26,9	105,06	49,42	27,34	35,14	38,67	724,39
20/06/2018	10:33:00	6,331	26,69	105,07	49,65	27,26	35,16	38,74	724,36
20/06/2018	10:33:01	6,333	26,53	104,77	49,76	27,31	35,17	38,81	724,65
20/06/2018	10:33:02	6,337	26,4	104,84	49,65	27,22	35,19	38,88	725,06
20/06/2018	10:33:03	6,339	26,34	104,85	49,63	27,39	35,2	38,97	725,26
20/06/2018	10:33:04	6,34	26,19	105,42	49,84	27,49	35,23	39,04	725,37
20/06/2018	10:33:05	6,339	26,08	105,82	50	27,51	35,23	39,07	725,28
20/06/2018	10:33:06	6,336	26,06	105,98	50,05	27,28	35,22	39,14	724,94
20/06/2018	10:33:07	6,328	25,98	106,04	50,05	27,3	35,22	39,22	724,06
20/06/2018	10:33:08	6,322	25,98	106,11	49,86	27,11	35,23	39,32	723,35
20/06/2018	10:33:09	6,319	25,99	106,13	49,76	27,2	35,23	39,42	723,03
20/06/2018	10:33:10	6,315	26,03	106,11	49,73	27,41	35,25	39,51	722,57
20/06/2018	10:33:11	6,312	26,07	106,22	49,71	27,47	35,27	39,55	722,23
20/06/2018	10:33:12	6,31	26,13	106,2	49,68	27,58	35,26	39,67	721,96
20/06/2018	10:33:13	6,305	26,18	106,19	49,62	27,32	35,27	39,83	721,43
20/06/2018	10:33:14	6,303	26,19	106,14	49,58	27,36	35,27	39,91	721,15
20/06/2018	10:33:15	6,302	26,25	106,27	49,65	27,44	35,27	39,98	721
20/06/2018	10:33:16	6,3	26,32	106,33	49,91	27,32	35,28	39,77	720,79
20/06/2018	10:33:17	6,3	26,39	106,52	49,84	27,03	35,28	39,49	720,81
20/06/2018	10:33:18	6,301	26,43	106,55	49,76	26,89	35,29	39,52	720,9
20/06/2018	10:33:19	6,301	26,52	106,65	49,73	27,11	35,3	39,96	720,98
20/06/2018	10:33:20	6,303	26,58	106,66	49,76	27,07	35,31	40,03	721,14
20/06/2018	10:33:21	6,301	26,62	106,76	49,8	27,45	35,33	40,02	720,97

Fig. 69 - Dati rilevati e riportati in Excel (prova 01/06/2018)

Nel grafico in Fig. 70 si nota l'andamento delle temperature rilevate in rapporto alla radiazione solare misurata in quel determinato range di tempo:

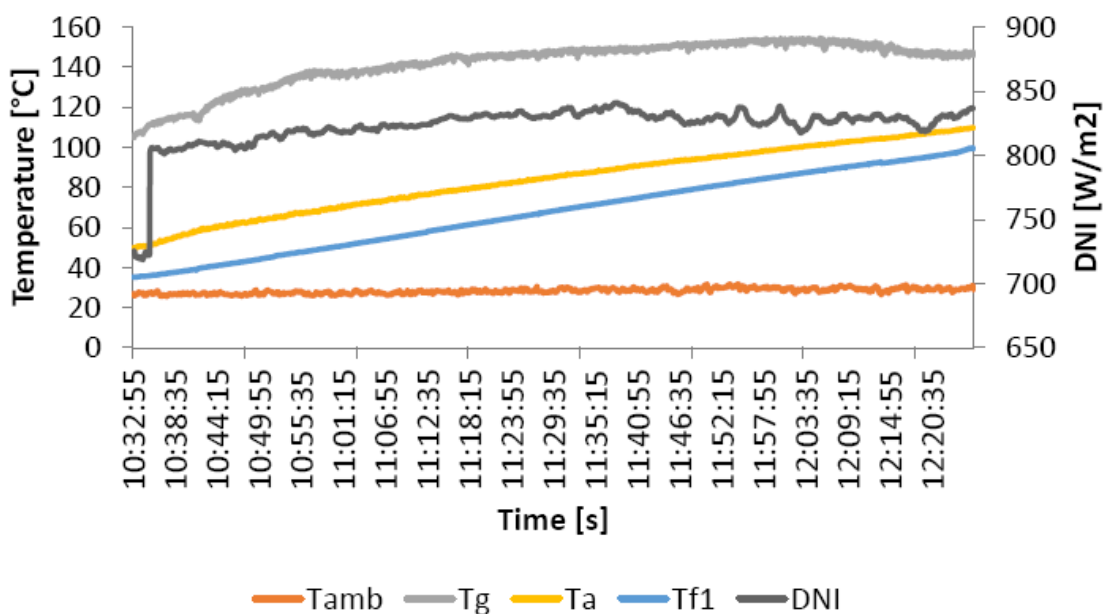


Fig. 70 - Grafico delle rilevazioni (prova 20/06/2018)

Per l'elaborazione dei dati raccolti attraverso l'acquisitore e per i successivi calcoli è stato utilizzato il programma Excel, come è facilmente osservabile in Fig. 71.

RISCALDAMENTO_w_n		
Test		6
Data		20/06/2018
mPCM (kg)		-
m _f (kg)		3
T ₁ (°C)		40
T ₂ (°C)		90
DNI _{av} (W/m ²)		805,61
T _{amb,av} (°C)		26,96
Δt _h (h)		0,46
t _s (h m ² /kg)		0,1
t _{ch} (h m ² /kg)		0,09
η _{av}		0,68
F ₂		0,39

Fig. 71 - Foglio elaborazione dati (prova 20/06/2018)

Prova 4: 04/07/2018

Il test è stato effettuato dalle ore 10:03 alle ore 14:01, ma l'intervallo di interesse va dalle ore 10:03 alle ore 12:31, in quanto la prova, essendo stata svolta in parallelo con un secondo forno solare, riporta appunto anche i dati del secondo sistema fino alle 14.

In questo intervallo di tempo si è arrivati alla massima temperatura raggiungibile dal fluido (acqua), quindi la prova può considerarsi superata. Si è partiti da una temperatura iniziale del fluido di 35,26 °C per arrivare ad oscillare sul valore di ebollizione del fluido pari a 100,17 °C. La radiazione solare media rilevata in questo intervallo è stata di 599,13 W/m² per via della presenza di alcune nuvole, con una temperatura ambiente media di 27,88 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera è stata di 108,96 °C, quella del vetro 136,18 °C e il fluido ha impiegato 2 ore e 28 minuti di tempo per arrivare ad ebollizione.

Nella tabella in Fig. 72 è riportato un secondo valore di temperatura di un secondo fluido (Tf2), quest'ultimo non ha importanza ai fini della ricerca poiché riguarda un secondo forno solare, in quanto le prove sono state eseguite in "parallelo".

Ora	Canale 1: NTamb mV	°C	Tg °C	Ta °C	Tg °C	Tf1 °C	Tf2 °C	DNI W/m2	cp_oil J/(kg °C)
10:03:55	5,703	27,29	93,41	45,07	27,79	35,26	36,83	652,53	1519,53
10:03:56	5,709	27,28	93,45	45,17	28,15	35,29	36,99	653,21	1519,82
10:03:57	5,713	27,11	93,53	45,18	28,19	35,29	37,19	653,66	1520,18
10:03:58	5,715	26,87	93,62	45,13	28,16	35,3	37,39	653,95	1520,54
10:03:59	5,717	26,7	93,77	45,11	28,13	35,32	37,6	654,07	1520,92
10:04:00	5,716	26,61	93,9	45,15	28,36	35,32	37,78	654	1521,24
10:04:01	5,715	26,58	94,01	45,19	28,36	35,33	37,91	653,86	1521,48
10:04:02	5,713	26,54	94,24	45,15	28,5	35,35	38,03	653,67	1521,69
10:04:03	5,715	26,46	94,36	45,19	28,4	35,35	38,08	653,86	1521,78
10:04:04	5,717	26,42	94,35	45,31	28,23	35,36	38,11	654,1	1521,84
10:04:05	5,721	26,38	94,42	45,31	28,22	35,37	38,1	654,56	1521,82
10:04:06	5,725	26,36	94,52	45,28	28,29	35,37	38,07	655	1521,77
10:04:07	5,729	26,34	94,63	45,25	28,2	35,37	38,04	655,5	1521,71
10:04:08	5,732	26,31	94,64	45,32	28,05	35,37	38,01	655,89	1521,66
10:04:09	5,734	26,31	94,71	45,47	28,29	35,38	37,98	656,03	1521,60
10:04:10	5,735	26,34	94,73	45,5	28,39	35,38	37,97	656,2	1521,59
10:04:11	5,735	26,36	94,85	45,42	28,23	35,38	37,93	656,14	1521,51
10:04:12	5,735	26,41	94,9	45,44	28,17	35,39	37,93	656,15	1521,51
10:04:13	5,735	26,43	94,89	45,42	28,08	35,39	37,92	656,23	1521,50
10:04:14	5,735	26,49	94,95	45,41	28,08	35,39	37,92	656,16	1521,50
10:04:15	5,736	26,53	94,99	45,4	28,15	35,4	38,24	656,3	1522,07
10:04:16	5,739	26,63	95,04	45,36	28,19	35,41	39,54	656,61	1524,41
10:04:17	5,741	26,79	95,13	45,35	28,45	35,42	40,94	656,83	1526,93
10:04:18	5,741	26,82	95,11	45,36	28,35	35,42	41,49	656,88	1527,92
10:04:19	5,743	26,88	95,12	45,38	28,1	35,42	41,45	657,13	1527,85
10:04:20	5,745	26,89	95,03	45,39	28,06	35,43	41,2	657,32	1527,40
10:04:21	5,748	26,97	94,97	45,37	27,95	35,43	40,76	657,66	1526,61

Fig.72 - Dati rilevati e riportati in Excel (prova 04/07/2018)

Nel grafico in Fig. 73 si nota l'andamento delle temperature rilevate in rapporto alla radiazione solare misurata in quel determinato range di tempo:

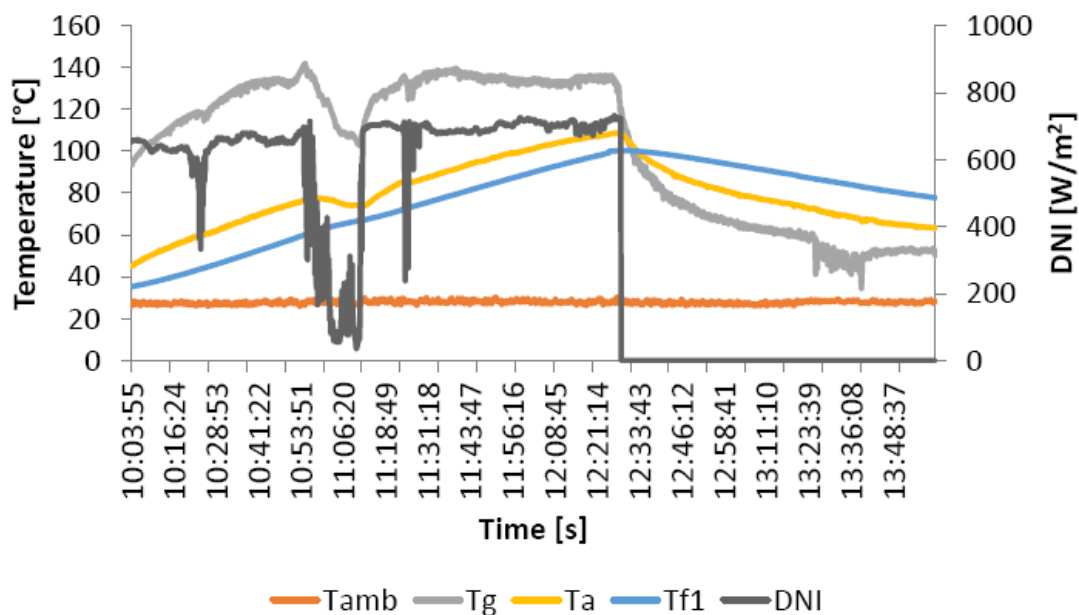


Fig. 73 - Grafico delle rilevazioni (prova 04/07/2018)

Per l'elaborazione dei dati raccolti attraverso l'acquisitore e per i successivi calcoli è stato utilizzato il programma Excel, come è facilmente osservabile in Fig. 74.

RISCALDAMENTO_w_m	
Test	4
Data	04/07/2018
mPCM (kg)	-
m _f (kg)	3
T ₁ (°C)	40
T ₂ (°C)	90
DNI _{av} (W/m ²)	599,13
T _{amb,av} (°C)	27,88
Δt _h (h)	1,77
t _s (h m ² /kg)	0,52
t _{ch} (h m ² /kg)	0,35
η _{av}	0,19
F ₂	0,37

Fig. 74 - Foglio elaborazione dati (prova 20/06/2018)

5.1.2 PROVE CON OLIO SILICONICO

Prova 5: 11/06/2018

Il test è stato effettuato dalle ore 11:46 alle ore 16:34. In questo intervallo di tempo si è arrivati alla massima temperatura raggiungibile dal fluido (olio siliconico) in base alle correnti condizioni meteo. Si è partiti da una temperatura iniziale del fluido di 35,26 °C per arrivare a stabilizzarsi intorno alla temperatura di 160 °C. La radiazione solare media rilevata in questo intervallo è stata di 737,11 W/m², con la temperatura ambiente media di 29,92 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera è stata di 151,69 °C, quella del vetro 173,65 °C e il fluido ha impiegato 3 ore e 34 minuti di tempo per raggiungere la massima temperatura ottenibile.

In questa prova, dato l'utilizzo di un fluido diverso dalla comune acqua, con la capacità di raggiungere temperature maggiori rispetto a quest'ultima, è stata registrata anche la fase di raffreddamento; raffreddamento eseguito orientando il forno verso sud e posizionandolo all'ombra in modo tale da non ricevere più radiazione solare e nessun'altra forma di riscaldamento.

La fase di raffreddamento è visibile nel grafico in Fig. 76 in corrispondenza dell'azzeramento del segnale dato dal pireliometro, in quanto non era più necessario registrare la radiazione solare.

Nella tabella in Fig. 75 è riportato un secondo valore di temperatura di un secondo fluido (T_{f2}), quest'ultimo non ha importanza ai fini della ricerca poiché riguarda un secondo forno solare, in quanto le prove sono state eseguite in "parallelo".

Canale 1: NTamb		Tg	Ta	Tg	Tf1	Tf2	DNI	cp_oil
mV	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W/m2	J/(kg °C)
6,882	31,03	117,97	65,39	43,5	49,14	34,02	787,39	1541,70
6,882	30,89	117,42	65,32	43,46	49,16	34,04	787,43	1541,73
6,882	30,98	117,72	65,37	43,67	49,2	34,13	787,4	1541,80
6,879	30,83	117,78	65,63	43,62	49,23	34,21	787,12	1541,86
6,878	30,71	117,63	65,67	43,7	49,24	34,25	786,95	1541,88
6,877	30,47	117,87	65,75	43,64	49,26	34,31	786,86	1541,91
6,876	30,28	118,02	65,8	43,61	49,29	34,29	786,76	1541,97
6,874	30,24	118,34	65,98	43,62	49,32	34,28	786,49	1542,02
6,872	29,97	118,22	66,15	43,63	49,34	34,25	786,23	1542,06
6,87	29,87	118	66,09	43,61	49,35	34,22	786,08	1542,07
6,867	29,93	117,68	65,9	43,52	49,38	34,19	785,74	1542,13
6,868	30,07	117,79	65,84	43,72	49,44	34,21	785,77	1542,24
6,866	30,2	117,59	66,02	43,58	49,44	34,19	785,64	1542,24
6,867	30,29	117,35	66,29	43,59	49,48	34,21	785,72	1542,31
6,865	30,01	117,88	66,51	43,63	49,5	34,24	785,41	1542,34
6,865	29,55	118,3	66,43	43,61	49,53	34,35	785,43	1542,40
6,866	29,62	118	66,26	43,68	49,56	34,45	785,55	1542,45
6,864	29,84	118,04	66,4	43,67	49,57	34,5	785,31	1542,47
6,862	29,89	118,27	66,61	43,75	49,61	34,53	785,09	1542,54
6,861	29,94	118,72	66,49	43,88	49,64	34,53	784,97	1542,60
6,858	29,84	118,96	66,48	43,62	49,66	34,51	784,71	1542,63
6,858	29,97	118,84	66,44	43,62	49,69	34,52	784,65	1542,69
6,858	30,11	118,59	66,32	43,72	49,72	34,53	784,65	1542,74
6,858	30,28	118,28	66,17	43,65	49,73	34,54	784,63	1542,76
6,858	30,33	118,34	66,04	43,63	49,76	34,57	784,61	1542,81
6,857	30,39	118,35	66,04	43,79	49,79	34,67	784,56	1542,87
6,855	30,31	118,38	66,25	43,93	49,81	34,74	784,31	1542,90

Fig.75 - Dati rilevati e riportati in Excel (prova 11/06/2018)

Nel grafico in Fig. 76 si nota l'andamento delle temperature rilevate in rapporto alla radiazione solare misurata in quel determinato range di tempo e la fase di raffreddamento dopo l'interruzione del segnale dato dal pireliometro:

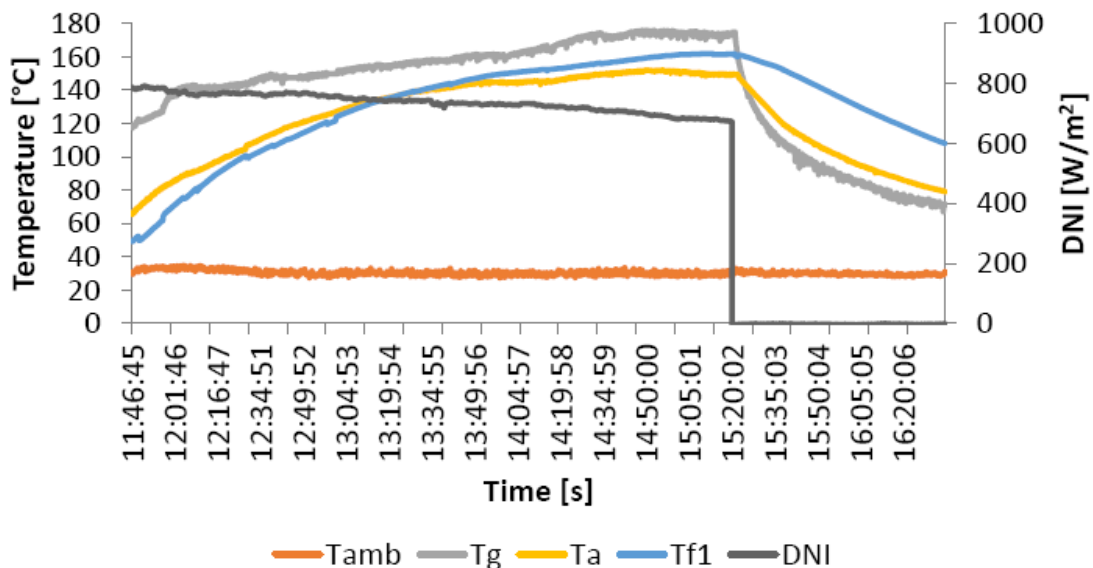


Fig. 76 - Grafico delle rilevazioni (prova 11/06/2018)

Per l'elaborazione dei dati raccolti attraverso l'acquisitore e per i successivi calcoli è stato utilizzato il programma Excel, come è facilmente osservabile in Fig. 77.

RISCALDAMENTO_o_m			RAFFREDDAMENTO_o_m		
Test		5	Test		5
Data		11/06/2018	Data		11/06/2018
mPCM (kg)		-	mPCM (kg)		-
mf (kg)		1,5	mf (kg)		1,5
T ₁ (°C)		100	T ₂ (°C)		160
T ₂ (°C)		160	T ₃ (°C)		130
DNI _{av} (W/m ²)	✓	737,11	T _{amb,av} (°C)	✓	30,07
T _{amb,av} (°C)	✓	29,92	Δt _c (h)		0,66
Δt _h (h)		2,45			
t _s (h m ² /kg)		1,12			
t _{ch} (h m ² /kg)		0,92			
η _{av}		0,02			
F ₂		0,16			

Fig. 77 - Foglio elaborazione dati (prova 11/06/2018)

Prova 6: 10/07/2018

Il test è stato effettuato dalle ore 10:20 alle ore 16:17. In questo intervallo di tempo si è arrivati alla massima temperatura raggiungibile dal fluido (olio silconico) in base alle correnti condizioni meteo. Si è partiti da una temperatura iniziale del fluido di 52,42 °C per arrivare a stabilizzarsi intorno alla temperatura di 176,9 °C. La radiazione solare media rilevata in questo intervallo è stata di 829,08 W/m², con la temperatura ambiente media di 30,18 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera è stata di 164,27 °C, quella del vetro 181,38 °C e il fluido ha impiegato 4 ore e 40 minuti di tempo per raggiungere la massima temperatura ottenibile.

In questa prova, dato l'utilizzo di un fluido diverso dalla comune acqua, con la capacità di raggiungere temperature maggiori rispetto a quest'ultima, è stata registrata anche la fase di raffreddamento; raffreddamento eseguito orientando il forno verso SUD e posizionandolo all'ombra in modo tale da non ricevere più radiazione solare e nessun'altra forma di riscaldamento.

La fase di raffreddamento è visibile nel grafico in Fig. 79 in corrispondenza dell'azzeramento del segnale dato dal pireliometro, in quanto non era più necessario registrare la radiazione solare.

Nella tabella in Fig. 78 è riportato un secondo valore di temperatura di un secondo fluido (Tf2), quest'ultimo non ha importanza ai fini della ricerca poiché riguarda un secondo forno solare, in quanto le prove sono state eseguite in "parallelo".

Prova 7: 25/09/2018

Data	Ora	Canale 1: N Tamb mV	Tg °C	Ta °C	Tg2 °C	Tf1 °C	Tf2 °C	DNI W/m2	cp_oil_m J/(kg °C)	cp_oil_n J/(kg °C)	
10/07/2018	10:20:14	7,244	31,04	120,5	66,93	29,6	52,42	76,26	828,84	1547,60	1590,52
10/07/2018	10:20:15	7,246	30,96	120,68	66,93	29,63	52,43	76,28	829,03	1547,62	1590,56
10/07/2018	10:20:16	7,246	30,96	120,76	66,92	29,55	52,43	76,3	829,03	1547,62	1590,60
10/07/2018	10:20:17	7,245	30,94	121,05	66,89	29,79	52,44	76,32	828,99	1547,64	1590,63
10/07/2018	10:20:18	7,244	30,79	121,13	66,89	29,57	52,46	76,36	828,8	1547,67	1590,70
10/07/2018	10:20:19	7,245	30,6	121,32	66,86	29,54	52,47	76,4	828,94	1547,69	1590,78
10/07/2018	10:20:20	7,244	30,51	121	66,85	29,63	52,49	76,44	828,8	1547,73	1590,85
10/07/2018	10:20:21	7,244	30,41	120,49	66,82	29,67	52,5	76,45	828,8	1547,75	1590,87
10/07/2018	10:20:22	7,244	30,34	120,67	66,76	29,49	52,51	76,49	828,84	1547,76	1590,94
10/07/2018	10:20:23	7,245	30,21	120,82	66,74	29,65	52,53	76,51	828,94	1547,80	1590,97
10/07/2018	10:20:24	7,243	30,19	120,86	66,75	29,6	52,54	76,52	828,69	1547,82	1590,99
10/07/2018	10:20:25	7,244	30,12	120,61	66,77	29,62	52,55	76,45	828,86	1547,84	1590,87
10/07/2018	10:20:26	7,245	29,97	120,79	66,85	29,46	52,56	76,28	828,99	1547,85	1590,56
10/07/2018	10:20:27	7,248	29,84	121,03	66,89	29,54	52,58	76,09	829,28	1547,89	1590,22
10/07/2018	10:20:28	7,249	29,67	120,93	66,83	29,66	52,6	75,96	829,43	1547,93	1589,98
10/07/2018	10:20:29	7,244	29,46	121,23	66,87	29,54	52,62	75,95	828,86	1547,96	1589,97
10/07/2018	10:20:30	7,245	29,32	120,61	66,91	29,6	52,64	76	828,96	1548,00	1590,06
10/07/2018	10:20:31	7,243	29,24	120,66	66,92	29,64	52,65	76,06	828,75	1548,02	1590,16
10/07/2018	10:20:32	7,248	29,11	120,49	66,86	29,66	52,66	76,14	829,33	1548,03	1590,31
10/07/2018	10:20:33	7,249	28,99	120,85	66,85	29,33	52,66	76,23	829,44	1548,03	1590,47
10/07/2018	10:20:34	7,251	28,9	121,1	66,91	29,52	52,68	76,31	829,61	1548,07	1590,61
10/07/2018	10:20:35	7,246	28,83	120,79	66,98	29,62	52,69	76,39	829,11	1548,09	1590,76
10/07/2018	10:20:36	7,249	28,74	120,73	67,01	29,76	52,72	76,45	829,35	1548,14	1590,87
10/07/2018	10:20:37	7,244	28,61	120,35	67	29,59	52,73	76,51	828,86	1548,16	1590,97
10/07/2018	10:20:38	7,243	28,54	120,5	66,98	29,65	52,76	76,54	828,72	1548,21	1591,03
10/07/2018	10:20:39	7,245	28,5	120,69	66,97	29,7	52,77	76,56	828,92	1548,23	1591,06
10/07/2018	10:20:40	7,243	28,48	120,21	66,9	29,73	52,78	76,56	828,7	1548,25	1591,06

Fig.78 - Dati rilevati e riportati in Excel (prova 10/07/2018)

Nel grafico in Fig. 79 si nota l'andamento delle temperature rilevate in rapporto alla radiazione solare misurata in quel determinato range di tempo e la fase di raffreddamento dopo l'interruzione del segnale dato dal pireliometro:

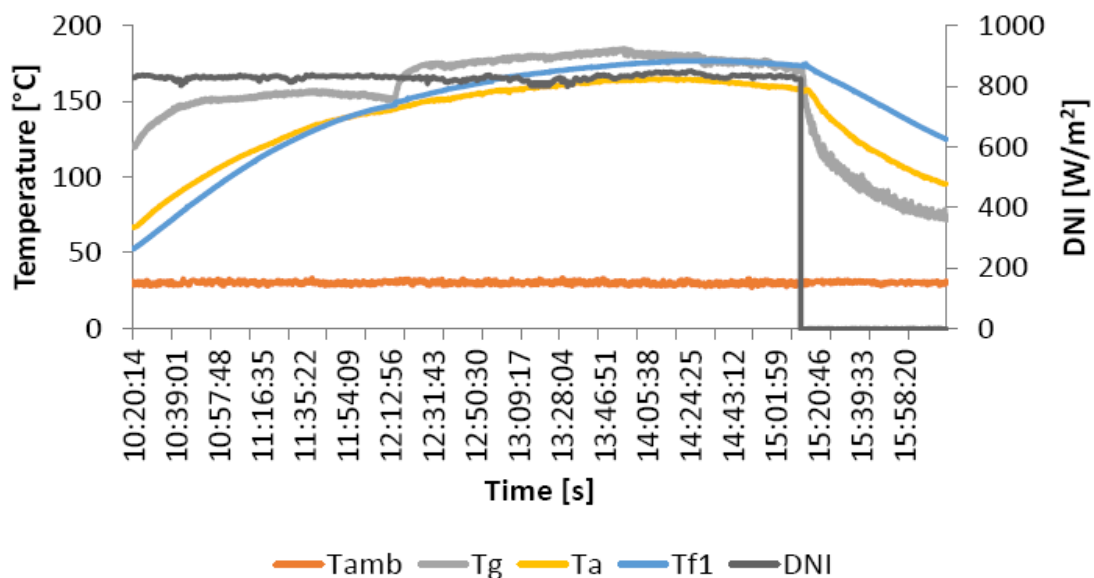


Fig. 79 - Grafico delle rilevazioni (prova 10/07/2018)

Per l'elaborazione dei dati raccolti attraverso l'acquisitore e per i successivi calcoli è stato utilizzato il programma Excel, come è facilmente osservabile in Fig. 80.

RISCALDAMENTO_o_m			RAFFREDDAMENTO_o_m		
Test		10	Test		10
Data		10/07/2018	Data		10/07/2018
m _{PCM} (kg)		-	m _{PCM} (kg)		-
m _f (kg)		1,5	m _f (kg)		1,5
T ₁ (°C)		100	T ₂ (°C)		160
T ₂ (°C)		160	T ₃ (°C)		130
DNI _{av} (W/m ²)	▶	829,08	T _{amb,av} (°C)	▶	30,23
T _{amb,av} (°C)	▶	30,18	Δt _c (h)		0,62
Δt _h (h)		1,71			
t _s (h m ² /kg)		0,78			
t _{ch} (h m ² /kg)		0,72			
η _{av}		0,05			
F ₂		0,14			

Fig. 80 - Foglio elaborazione dati (prova 10/07/2018)

5.2 RIEPILOGO

Osservando le analisi sperimentali condotte con l'utilizzo del forno solare è possibile confrontare i risultati ottenuti con diversi fluidi e diverse condizioni ambientali, suddividendo il processo in due fasi, quella di riscaldamento e quella di raffreddamento; nel caso del fluido acqua è stata analizzata solo la fase di riscaldamento, in quanto il raffreddamento non risulta importante ai fini della ricerca; è stato possibile osservare il comportamento del fluido nelle prove da 1 a 4; caso particolare è quello della prova 1 nella quale è stata registrata una temperatura ambientale media di 13°C, questo fattore ha fatto sì che il forno, non essendo isolato dalle temperature esterne ma solamente per quello che riguarda la dissipazione del calore verso l'esterno, disperdesse calore; le altre prove riguardanti l'acqua sono state eseguite in condizioni pressoché perfette in termini di DNI e temperatura ambientale.

Per quanto riguarda il fluido olio, grazie alle sue caratteristiche e alle maggiori temperature raggiungibili rispetto all'acqua, è stato possibile studiare il comportamento del forno sia in fase di riscaldamento, raggiungendo quindi le massime temperature "a carico" del forno, sia in fase di raffreddamento, avendo un range di temperatura maggiore sul quale lavorare, questi andamenti sono visionabili nelle prove 5 e 6.

5.2.1 FASE DI RISCALDAMENTO

Come si evince nella tabella riassuntiva del paragrafo (Tab. 11), la fase di riscaldamento nei test con olio silconico ha richiesto un tempo più lungo rispetto a quello dell'acqua, perché, anche avendo un calore specifico minore rispetto all'acqua, riesce a raggiungere temperature molto più elevate avendo un punto di ebollizione molto più alto.

Prova	1	2	3	4	5	6
Data (2018)	06/12	01/06	20/06	04/07	11/06	10/07
mPCM (kg)	-	-	-	-	-	-
mf (kg)	3	3	3	3	1,5	1,5
T1 (°C)	30	40	40	40	100	100
T2 (°C)	60	90	90	90	160	160
DNI _{av} (W/m ²)	858,02	869,28	805,61	591,32	737,11	829,08
T _{amb,av} (°C)	12,94	27,23	26,96	27,31	29,92	30,18
Δth (h)	1,56	1,2	0,46	0,15	2,45	1,71
t _s (h m ² /kg)	0,36	0,27	0,1	0,03	1,12	0,78
t _{ch} (h m ² /kg)	0,34	0,26	0,09	0,02	0,92	0,72
η _{av}	0,11	0,24	0,68	0,44	0,02	0,05
F2	0,14	0,31	0,39	1,03	0,16	0,14

Tab. 11 - Riassunto della fase di riscaldamento

5.2.2 FASE DI RAFFREDDAMENTO

Per quanto riguarda la fase di raffreddamento sono state studiate, come detto in precedenza, solo le prove con olio siliconico. Si è studiato la capacità del forno solare di trattenere calore senza alcun tipo di radiazione solare o fonte di riscaldamento; questi comportamenti sono riportati in Tab. 12.

Prova	5	6
Data(2018)	11/06	20/06
mPCM (kg)	-	-
mf(kg)1,5	1,5	
T2 (°C)	160	160
T3 (°C)	130	130
Tamb,av(°C)	30,07	30,23
Δtc (h)	0,66	0,62

Tab. 12 - Riassunto della fase di raffreddamento

5.3 PROVE CON OLIO DI SILICONE E PCM

Il comportamento del forno a scatola solare accoppiato con l'eritritolo è stato studiato eseguendo 4 test all'aperto nei mesi di luglio e settembre 2018. Per questa tipologia di prove è stato utilizzato come fluido lo stesso olio siliconico delle prove precedenti. A differenza delle altre prove, sono stati inseriti nell'intercapedine tra le due pentole 2,5 kg di Eritritolo, che ha la funzione di accumulare calore durante la fase di riscaldamento, per poi fornirlo all'olio durante la fase di raffreddamento. Sono stati utilizzati 1,5 kg di olio siliconico per i test n°14 e n°17. In questi test sono state misurate le stesse temperature dei test precedenti, con l'aggiunta di due termocoppie per la misurazione della temperatura del PCM:

- Temperatura ambiente Tamb in °C
- Temperatura vetro Tg in °C
- Temperatura dell'assorbitore Ta in °C
- Temperatura dell'olio siliconico Tf in °C
- Radiazione solare DNI in W/m²
- Temperatura PCM (destra) Tpcm1 in °C
- Temperatura PCM (sinistra) Tpcm2 in °C

La fase di riscaldamento termina quando l'olio arriva ad una temperatura di 110 °C; successivamente, il forno viene spostato all'ombra e si procede con la fase di raffreddamento che termina quando il fluido avrà raggiunto la temperatura di 80 °C.

I risultati dei test sperimentali sono riassunti nelle tabelle 13 e 14 relative alle prove 14-17), che si riferiscono rispettivamente alla fase di riscaldamento e alla fase di raffreddamento.

Quantity	Test 9	Test 10	Test 11	Test 12	Test 13	Test 14	Test 15	Test 16	Test 17
Date	11/06/2018	27/09/2018	11/06/2019	12/06/2019	17/06/2019	24/07/2018	11/09/2018	12/09/2018	25/09/2018
m_f (kg)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
m_{PCM} (kg)	-	-	-	-	-	2.5	2.5	2.5	2.5
T_1 (°C)	55	55	55	55	55	55	55	55	55
T_2 (°C)	125	125	125	125	125	125	125	125	125
DNI_{tot} (W/m ²)	767.22	882.77	720.04	601.80	751.80	834.99	855.53	867.96	946.62
$T_{amb,av}$ (°C)	31.38	17.35	30.35	28.15	28.83	28.62	26.70	28.14	19.33
Δt_h (h)	1.11	1.58	1.27	1.01	0.95	1.94	2.30	3.35	2.52
i_s (h m ² /kg)	0.50	0.72	0.57	0.46	0.43	0.88	1.04	1.52	1.14
i_{ch} (h m ² /kg)	0.43	0.71	0.46	0.31	0.36	0.82	0.99	1.47	1.20
η_{av}	0.08	0.05	0.08	0.11	0.10	0.04	0.04	0.02	0.03
F_2	0.06	0.04	0.06	0.13	0.08	0.03	0.03	0.02	0.02

Tab. 13 - Risultati prove sperimentali con olio silconico e PCM in fase di riscaldamento

Quantity	Test 9	Test 10	Test 11	Test 12	Test 13	Test 14	Test 15	Test 16	Test 17
Date	11/06/2018	27/09/2018	11/06/2019	12/06/2019	17/06/2019	24/07/2018	11/09/2018	12/09/2018	25/09/2018
m_f (kg)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
m_{PCM} (kg)	-	-	-	-	-	2.5	2.5	2.5	2.5
T_2 (°C)	125	125	125	125	125	125	125	125	125
T_3 (°C)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$T_{amb,av}$ (°C)	29.24	17.35	29.69	29.02	28.46	29.77	26.46	27.57	19.87
Δt_c (h)	0.45	0.31	0.50	0.48	0.46	1.88	2.19	2.03	1.67

Tab. 14 - Risultati prove sperimentali con olio silconico e PCM in fase di raffreddamento

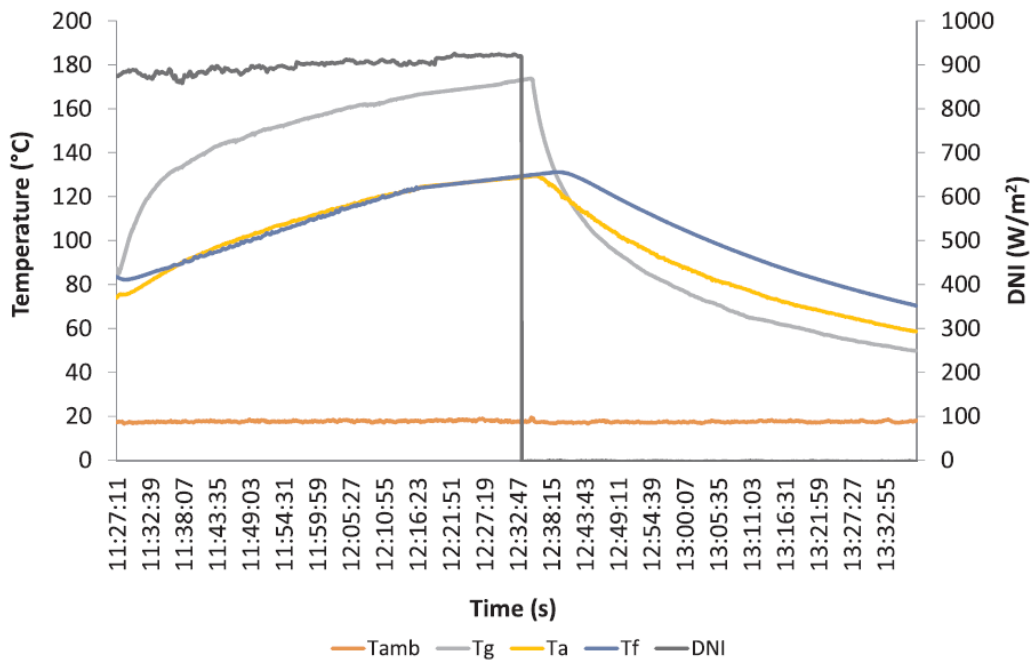


Fig. 81 - Prove con PCM e olio silconico del 27/09/2018

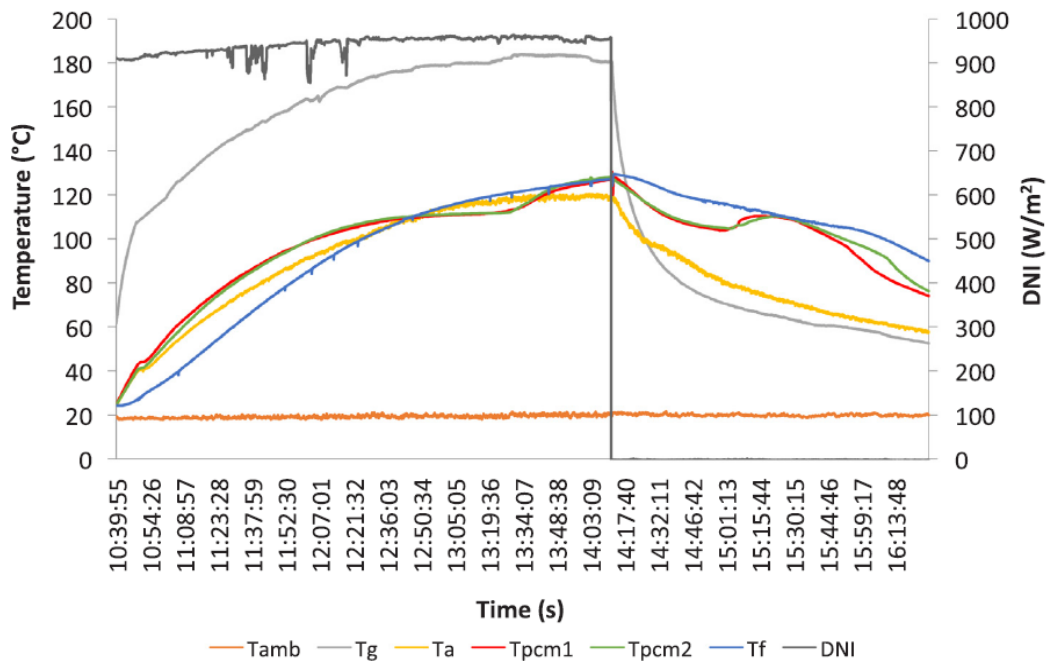


Fig. 82 - Prove con PCM e olio siliconico del 25/09/2018

La Fig. 82 evidenzia i risultati ottenuti il 25 settembre 2018, quando la radiazione solare era 946,62 W/m² e la temperatura ambiente corrispondeva a 19,33 °C. Si nota che la temperatura del PCM misurata dalle due termocoppie opposte è quasi la medesima.

5.3.1 FASE DI RISCALDAMENTO

Durante la fase di riscaldamento, la temperatura del PCM esibisce un cambiamento di circa 109 °C, valore che identifica il punto di fusione dell'eritritolo. Quando il forno solare è stato utilizzato con l'eritritolo, il processo di riscaldamento ha richiesto circa 2,52 h per condurre la temperatura dell'olio siliconico in questione da 55 a 125 °C. In confronto, il test dell'olio di silicone effettuato il 27 settembre 2018 ha necessitato circa 1,58 h per il processo di riscaldamento nello stesso intervallo di temperatura. L'aumento del tempo di riscaldamento, insieme alle svantaggi associati all'efficienza media del forno, sono dovuti alla presenza di massa aggiuntiva del PCM.

Un confronto con il precedente progetto di forno (Coccia et al., 2018) mostra valori di t_s , t_{ch} , η_{av} e F_2 solo leggermente più bassi. Tuttavia, va notato che sono stati considerati intervalli di temperatura, PCM e masse differenti nei due forni.

5.3.2 FASE DI RAFFREDDAMENTO

La fase di raffreddamento, invece, ha richiesto 1,65 h per diminuire la temperatura del fluido da 125 a 100 °C. Durante questa fase, la temperatura media ambientale era di 19,87 °C. Rispetto al caso senza la massa di PCM ($\Delta t_c = 0,31$ h), il tempo di raffreddamento dell'olio di silicone è aumentato di più di 5 volte.

Nella Fig. 82, è perfino possibile notare un fenomeno di super raffreddamento del PCM, ovvero la sostanza non si solidifica immediatamente al di sotto della temperatura di congelamento, ma la sua cristallizzazione avviene solo dopo il raggiungimento di una temperatura inferiore (circa 105°C). Questo effetto è ben noto in letteratura (Safari et al., 2017) e, nel nostro caso di studio, potrebbe essere a causa della nucleazione eterogenea sulla superficie del recipiente contenente il PCM. Nonostante il fenomeno di *supercooling* conduca ad una minore cristallizzazione e, di conseguenza, ad una prestazione di accumulo termico non ottimale (Safari et al., 2017), nella Fig. 82 è possibile vedere che la curva di raffreddamento dell'eritritolo si alza e si stabilizza alla temperatura di solidificazione di 109 °C immediatamente dopo la cristallizzazione. Così, lo svantaggio associato al fenomeno risulta essere minimo.

5.4 SINTESI E CONFRONTO DELLE PROVE CON E SENZA PCM

In questo paragrafo viene proposta una metodologia specifica per quantificare sia i benefici che gli svantaggi connessi all'utilizzo di un forno solare a scatola portatile accoppiato al PCM eritritolo.

La procedura richiede di analizzare separatamente le fasi di riscaldamento e di raffreddamento delle prove effettuate solo con olio di silicone (test da 9 a 13) e con olio di silicone e PCM (prove da 14 a 17). In particolare, è necessario confrontare il riscaldamento ($\Delta t_{h,olio}$ e $\Delta t_{h,olio+PCM}$) e i tempi di raffreddamento ($\Delta t_{c,olio}$ e $\Delta t_{c,olio+PCM}$) calcolati per i due set di prova. In tal modo, è possibile determinare il tempo incrementale necessario per riscaldare il fluido di prova accoppiato con il PCM, e il tempo incrementale durante la fase di raffreddamento.

Partendo dalla fase di riscaldamento, la tabella 13 evidenzia che quando il forno viene utilizzato con l'eritritolo (test da 14 a 17), la sua fase di riscaldamento è più lenta e i suoi parametri sperimentali sono in genere peggiori. Evidentemente, ciò è dovuto alla massa aggiuntiva di PCM e al suo corrispondente calore latente di fusione. Il tempo di riscaldamento Δt_h varia a seconda delle condizioni ambientali e può essere influenzato dalla frequenza con cui l'operatore regola l'orientamento del forno solare.

Tuttavia, tali fattori esterni non sembravano influenzare il tempo di riscaldamento in maniera importante.

I tempi medi, migliori e peggiori di riscaldamento dei test con olio di silicone e con olio di silicone associato a PCM forniti nella tabella 13 vengono riassunti in tabella 15 nella quale si evidenzia il caso migliore, che si riferisce all'olio di silicone con un tempo di riscaldamento più lungo, e l'olio silicico accoppiato con il PCM con tempi di riscaldamento più brevi; il contrario per il caso peggiore. Gli scostamenti sono calcolati come differenza percentuale tra i tempi di riscaldamento dei due set di prova.

Quantity	Average	Best	Worst
$\Delta t_{h,olio}$ (h)	1.18 (tests 9–13)	1.58 (test 10)	0.95 (test 13)
$\Delta t_{h,olio+PCM}$ (h)	2.53 (tests 14–17)	1.94 (test 14)	3.35 (test 16)
Deviation (%)	114.41	22.78	252.63

Tab. 15 - Tempi medi migliori e peggiori di riscaldamento dei test con olio di silicone e con olio di silicone e PCM

La tabella 15 suddetta, fornisce perciò i tempi medi di riscaldamento delle prove sperimentali effettuate con olio di silicone ($\Delta t_{h,olio}$, media del Δt_h fornito in Tabella 13 per le prove 9-13), e con olio di silicone e PCM ($\Delta t_{h,olio+PCM}$, media del Δt_h previsto nella Tabella 13 per le prove 14-17), riportando la corrispondente variazione media, calcolata come differenza percentuale tra il tempo medio di riscaldamento dell'olio siliconico associato al PCM (2,53 h) e il tempo medio di riscaldamento dell'olio di silicone (1,18 h). Pertanto, quando il forno solare è accoppiato con l'eritritolo, il tempo di riscaldamento aumenta mediamente del 114,41% rispetto alla media delle prestazioni ottenute solo con olio di silicone.

D'altra parte, la variazione "migliore" indica che, nella condizione maggiormente favorevole, cioè quando il tempo di riscaldamento assume il massimo valore per l'olio di silicone (test 10, 1,58 h) e il valore più basso per quello abbinato all'eritritolo (prova 14, 1,94 h), la differenza percentuale tra i due casi è pari al 22,78%. Nel caso "peggiore", invece, vale a dire quando l'olio siliconico da solo si riscalda rapidamente (test 13, 0,95 h) e si riscalda lentamente associato al PCM (prova 16, 3,35 h), la massima risultante di scostamento è pari al 252,63%.

Invece, i tempi medi migliori e peggiori di raffreddamento dei test con olio di silicone e con olio di silicone accoppiato all'eritritolo forniti dalla Tabella 14, vengono riassunti in Tab. 16. Il caso migliore si riferisce all'olio di silicone il cui tempo di raffreddamento è più breve mentre per l'olio di silicone abbinato al PCM il tempo di raffreddamento risulta essere più lungo; il contrario per il caso peggiore. Anche in tal caso gli scostamenti sono calcolati come differenza percentuale tra i tempi di raffreddamento dei due set di prova.

Quantity	Average	Best	Worst
$\Delta t_{c, oil}$ (h)	0.43 (tests 9–13)	0.31 (test 10)	0.50 (test 11)
$\Delta t_{c, oil+PCM}$ (h)	1.94 (tests 14–17)	2.19 (test 15)	1.67 (test 17)
Deviation (%)	351.16	606.45	234.00

Tab. 16 - *Tempi medi migliori e peggiori di raffreddamento dei test con olio di silicone e con olio di silicone e PCM*

Allo stesso modo della tabella 13, la tabella 14 riporta i dati registrati durante le fasi di raffreddamento dei test all'aperto. In questo caso, il tempo di raffreddamento Δt_c è influenzato solamente dalla temperatura ambientale, che è sempre prossima ai 30 °C, ad eccezione di due prove (10 e 17), quando è inferiore ai 20 °C. In realtà, i risultati, delle due prove riflettono un calo di temperatura ambientale. Tuttavia, il vantaggio derivante dall'uso combinato con il PCM è evidente, data la significativa estensione della stabilità termica del forno.

La tabella 16 fornisce i tempi medi di raffreddamento delle prove effettuate con solo olio di silicone (Δt_c olio, media dei Δt_c forniti nella tabella 14 per i test 9-13), e con olio di silicone abbinato ad eritritolo (Δt_c olio+PCM, media dei Δt_c forniti nella Tabella 14 per le prove 14-17). Inoltre, la Tabella 16 riporta la variazione media calcolata come differenza percentuale tra i due set di prova che prevede un aumento di circa il 351,16%.

La prova 10 rappresenta il caso "migliore", che si è verificato con il solo olio di silicone, in cui si è raggiunta la temperatura in tempi brevi (prova 10, 0,31 h) insieme alla prova 15 per

quanto concerne i tempi più lunghi di raggiungimento della temperatura nel test con il PCM (prova 15, 2,19 h); queste hanno portato ad una variazione massima pari al 606,45%. Mentre nel caso "peggiore", che è stato determinato sulla base del tempo di raffreddamento più lungo per il solo olio di silicone (test 11, 0,50 h) e il più breve tempo di raffreddamento per olio di silicone e PCM (prova 17, 1,67 h), il minimo lo scostamento calcolato è stato pari al 234,00% (in ogni caso, più di 3 volte rispetto al contenitore di riferimento dell'olio di silicone). Un sostanziale miglioramento della stabilità termica della nostra cucina in assenza di radiazioni solari era quindi ottenuto anche nel peggiore dei casi considerati. Questo permette di fornire energia termica per tempi più lunghi, e quindi di poter cuocere i cibi anche dopo il tramonto, oppure quando siamo in presenza di nuvolosità irregolare. Infine, confrontando i risultati del fornello solare portatile in esame con quelli ottenuti con precedente progetto (Coccia et al., 2018), si può notare che la variazione media del tempo di riscaldamento è leggermente più lungo (114,41% contro 82,41%), ma questo vale anche per la variazione media del tempo di raffreddamento, che è di gran lunga superiore (351,16% contro l'88,58%). Anche in questo caso, è importante notare che un confronto preciso non è possibile a causa delle diverse masse, temperature e PCM considerati nelle due opere.

CAPITOLO 6: CONCLUSIONI

L'obiettivo che mi sono posta in questa tesi è stato quello di analizzare i risultati delle prove svolte nel Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) dell'Università Politecnica delle Marche, al fine di valutare il grado di efficienza di un forno solare a scatola con e senza la presenza di materiale a cambiamento di fase; nello specifico, l'eritritolo.

I risultati ottenuti hanno fatto emergere quali sono i vantaggi e gli svantaggi di questa tecnologia. Questi ultimi, infatti, sono delineati dall'impossibilità di utilizzare i forni solari quando il cielo è privo di raggi solari (notte e nuvolosità).

Mediante le nostre prove, abbiamo cercato di ovviare a questo problema con l'utilizzo del PCM. Dall'analisi dei risultati si può notare come l'accumulo di energia termica conduca a apprezzabili miglioramenti, allungando di gran lunga le tempistiche di raffreddamento. Contemporaneamente, tuttavia, abbiamo potuto osservare che il PCM assorbendo una ingente quantità di calore, fa sì che i tempi di riscaldamento e, quindi, di cottura aumentino. Un altro aspetto singolare derivante dalle prove è l'influenza che può avere il vento sul rendimento del forno. Sarebbe interessante in futuro introdurre anche questa variabile nei test per valutare l'efficienza dei forni solari.

La ricerca sui forni solari e sulle varie tecnologie di accumulo in tal senso ha ancora molta strada da percorrere, ma perseverando negli studi c'è la speranza di giungere, un giorno, ad un livello di efficienza tale da far sostituire i tradizionali metodi di cottura con la cottura solare.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Sito internet <https://www.qualenergia.it> (articolo pubblicato il 18 maggio 2020 *La pandemia sta accelerando la fine del carbone*)
- [2] Immagine presa da “riscaldamentoglobale.it”
- [3] Sito internet <https://www.bioecogeo.com/> (articolo pubblicato il 28 febbraio 2020 *I vantaggi delle energie rinnovabili sulle non rinnovabili*)
- [4] Sito internet <https://www.reteclima.it> (*protocollo-di-kyoto: l'accordo internazionale per contrastare il cambiamento climatico*)
- [5] Focus, articolo pubblicato il 16 Gennaio 2016 “*Prima di Parigi: il Protocollo di Kyoto*”
- [6] “*Experimental determination of energy and exergy efficiency of the solar parabolic-cooker*”
- [7] Sito internet <http://ecoage.it>
- [8] Enciclopedia *Treccani la cultura italiana*
- [9] Sito internet “Scienza verde”
- [10] “*Storia e scienza sull'impiego dell'energia solare*” di Fausto Cavallaro (pubblicazione di gennaio 2014)
- [11] Erdem Cuce, Pinar Mert Cuce, “*A comprehensive review on solar cookers*”. *Applied Energy* 2012; 102: 1399-1421
- [12] 2000 “*Design, development and performance evaluation of a latent heat storage unit for evening cooking in a solar*”
- [13] Sito internet <https://www.heliac.dk/solar-cooker>
- [14] G. Crovatto, “*Forno a media efficienza*”,<http://digilander.libero.it/giannicrovatto/f-meff.htm>.
- [15] “*Analisi dei risultati delle prove sperimentali di un prototipo di forno solare a scatola con specchi riflettenti multipli*”, Andre Pio Concettini, 2016/2017.
- [16] “*Progettazione e realizzazione di un prototipo di forno solare a scatola con specchi riflettenti multipli*”, Alessandro Del Re, 2016/2017.
- [17] Scheda tecnica, SOLKOTE HI/SORB-II, “*Selective Solar Coating*”.
- [18] DOE Fundamentals Handbook - “*Thermodynamics, Heat transfer, and fluid flow*”, p. 21.
- [19] DOE Fundamentals Handbook - “*Thermodynamics, Heat transfer, and fluid flow*”, pp. 20-21.
- [20] Aceves-Saborio S, Nakamura H, Reistad GM. “*Optimum efficiencies and phase change temperatures in latent heat storage systems*”. *ASME Adv Energy Syst Div Publ AES* 1992;27:17–24
- [21] A. Miliozzi, E. Veca, S. Sau, R. Grena, M. Celino, M. Falconieri, F. Rondino- “*Individuazione e caratterizzazione di miscele di materiali a cambiamento di fase e nanoparticelle da impiegare come sistemi alternativi di accumulo termico*” – Report RdS/2013/079 [ENEA]

[22] V. T. C. C. D. B. Atul Sharma, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 318–345, 2009

[23] Freund, Mihály; Mózes, Gyula (1982). "Paraffin products: properties, technologies, applications". Translated by Jakab, E. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. p. 121. ISBN 978-0-444-99712-8

[24] Sharma et al. - "Renewable and Sustainable Energy Reviews" 2009

[25] F. D'Annibale, G. Zummo, C. Menale, F. Sfrattoni – "Test sperimentali di nuovi materiali a cambiamento di fase in grado di assicurare performance più elevate in termini velocità di risposta del PCM alla variazione di temperatura del fluido primario" - Report RdS/PAR2013/156 [ENEA]

[26] A. Andreozzi, F. Ascione, N. Bianco, M. Caliano, M. Iasiello - "Studio e individuazione di soluzioni tecniche per il miglioramento della trasmissione del calore in sistemi di accumulo termico basati sui materiali a cambiamento di fase (PCM) nell'ambito dell'accumulo del freddo" - Report RdS/PAR2015/152 [ENEA]

[28] A. A. El-Sebaei, A. Ibrahim, "Experimental testing of a box-type solar cooker using the standard procedure of cooking power". (*Renewable Energy*) A. (2005); 30: 1861-1871.

[27] "Design, realization, and tests of a portable solar box cooker coupled with an erythritol-based PCM thermal energy storage"

Gianluca Coccia, Alessia Aquilanti, Sebastiano Tomassetti, Gabriele Comodi, Giovanni Di Nicola

[29] Scheda tecnica, "The Eppley Laboratory".

[30] G. Coccia, G. Di Nicola, S. Tomassetti, G. Gabrielli, M. Chieruzzi, M. Pierantozzi - "Experimental characterization of a solar cooker with thermal energy storage based on solar salt".

RINGRAZIAMENTI

Vorrei fare un ringraziamento particolare innanzitutto al Professor Giovanni Di Nicola che mi ha trasmesso la passione per le tematiche di energia rinnovabile permettendomi di partecipare a questo stimolante e avvincente progetto.

Ringrazio anche l'Ingegnere Gianluca Coccia per avermi seguita ed aiutata nella realizzazione della mia tesi, per i preziosi consigli e la grande disponibilità mostrata.

Inoltre un ringraziamento speciale va a tutti i tecnici di laboratorio che hanno contribuito allo sviluppo e alla costruzione di questo lavoro.

Ringrazio i miei compagni di Università, Martina, Cecilia, Fabio, Matteo, Edoardo e Alessandro che non sono semplici compagni di corso ma si sono dimostrati anche veri amici.

Ringrazio Gennaro, amico e guida nel mio percorso di studi a cui devo molto sia per quanto concerne il mio metodo di studio che riguardo le mie conoscenze ingegneristiche.

Ringrazio la mia amica storica del cuore Eva che da 27 anni mi stringe la mano nel mio cammino. E un grazie speciale va alle mie migliori amiche Elisa, Sara R., Sara N., Martina F., Giulia, Jolanda, Ilaria e Arianna che in questi anni mi hanno sostenuto nelle difficoltà spronandomi a dare il massimo.

Ringrazio i miei cugini William ed Alice per essere sempre presenti nella mia vita e in tutte le sfide che ho affrontato.

Ringrazio tutti i miei amici che non posso nominare uno ad uno in quanto sono tanti e di questo sono estremamente grata.

Ma soprattutto ringrazio mio fratello Christian, mio papà e mia mamma, Glauco e Cristina, per aver asciugato le mie lacrime negli insuccessi e aver gioito nelle vittorie insieme a me, per avermi supportata e sopportata in questo lungo cammino, per averci creduto più di tutti anche quando nessuno avrebbe scommesso su di me e per tutti i sacrifici fatti per me. Spero di avervi reso orgogliosi.

Infine ringrazio me stessa per la grinta e la tenacia dimostrata, per non aver mollato nonostante non sia facile conciliare studio e lavoro, ringrazio me stessa per aver creduto in me ed aver dimostrato che con l'impegno e la volontà posso raggiungere tutti gli obiettivi che mi prefiggo. E ringrazio Dio, perché la forza che ho deriva da lui. Ce l'ho fatta.