



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

“Management e Sicurezza delle Costruzioni”

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

**REALIZZAZIONE E ANALISI SPERIMENTALE DI DUE
PROTOTIPI DI FORNO SOLARE DI TIPO NEWTON**

REALIZATION AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF TWO NEWTON-TYPE
SOLAR OVEN PROTOTYPES

Relatore:

Prof. Giovanni Di Nicola

Tesi di Laurea di:

Lorenzo Celani

Anno Accademico 2020/2021

SOMMARIO

INDICE DELLE FIGURE	III
INDICE DELLE TABELLE	VI
INTRODUZIONE	1
1 STATO DELL'ARTE	2
1.1 Problema energetico	2
1.2 Dati di sintesi – Italia e Europa	3
1.3 Risparmio energetico e sviluppo sostenibile	4
1.3.1 Energia solare: fotovoltaico e termico	4
1.4 Perché costruire un forno solare	5
1.5 Storia della cottura solare	6
1.6 Cos'è un forno solare	7
1.7 Tipologie di forni solari	8
1.7.1 Forno solare a pannelli	9
1.7.2 Forno solare parabolico	10
1.7.3 Forno solare a scatola	11
2 REALIZZAZIONE DEL FORNO SOLARE DI TIPO NEWTON	13
2.1 Premessa	13
2.1.1 Newton Solar Oven – versione 2.0	14
2.1.2 Configurazione 4 specchi: “NSO – 4 specchi”	14
2.2 Dati generali	15
2.3 Elementi riflettenti	17
2.3.1 Polimetilmetacrilato	18
2.4 Bracci di sostegno e cerniere	19
2.5 Base	20
2.6 Sportelli laterali	21
2.7 Isolante, piastra e pentole	25
2.8 Camera di cottura	26
2.9 Caratteristiche dei vetri	27
2.9.1 La radiazione solare	27
2.9.2 Vetro extrachiaro	31
2.10 Schema di funzionamento generale	32
3 SETUP DEL BANCO DI PROVA	36
3.1 Premessa	36
3.2 Pireliometro	38
3.2.1 Struttura del pireliometro	40
3.3 Termocoppie	40
3.3.1 Affidabilità delle termocoppie	41
3.3.2 Termocoppie usate: tipo T	41
3.4 Computer e acquisitore	42

3.5 Sistema schermatura dal vento	44
3.5.1 Osservazione sul vento	45
4 PARAMETRI FONDAMENTALI	46
4.1 Introduzione	47
4.2 Prima e seconda figura di merito: F1 ed F2	48
4.3 Tempo di ebollizione caratteristico e specifico t_c e t_s	49
4.4 Efficienza utilizzabile η_u	50
4.5 Tempo di riscaldamento Δt	51
4.6 COR	51
4.7 T_{fx}	53
4.8 Indicazioni generali	53
4.8.1 Variabili non controllabili	54
4.8.2 Variabili controllabili	55
5 TEST SPERIMENTALI	56
5.1 Premessa	56
5.2 Area di apertura	56
5.2.1 Area di apertura del “NSO”	57
5.2.2 Prove a vuoto	59
5.2.3 Prove con acqua	64
5.2.4 Prove con glicerina	72
6 FORNO SOLARE A CONCENTRAZIONE “HELIAC”	80
6.1 Materiali e proprietà	80
6.2 Dispositivo e pentola	82
6.3 Banco di prova	82
6.4 Canali acquirente dati	84
6.5 Test sperimentali	84
7 FORNO SOLARE A SCATOLA PORTATILE	87
7.1 Materiali e Proprietà	87
7.2 Sistema di accumulo utilizzato	91
7.2.1 Xilitolo	91
7.2.2 Contenitore	93
7.2.3 Olio silconico	94
7.3 Banco di prova	97
7.4 Canali acquirente dati	98
7.5 Inserimento del PCM	99
7.6 Test sperimentali	100
7.6.1 Test in fase di riscaldamento	101
7.6.2 Test in fase di raffreddamento	102
8 CONCLUSIONI	104
9 BIBLIOGRAFIA	107
10 RINGRAZIAMENTI	109

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1: obiettivo fissato dalla Direttiva 2009/28/CE per il 2020

Fig. 2: schema di funzionamento di un CSP

Fig. 3: le tre principali tipologie di forni solari

Fig. 4: un forno solare a pannelli

Fig. 5: un forno solare parabolico

Fig. 6: un forno solare a scatola

Fig. 7: vista generale della configurazione a 4 specchi

Fig. 8: vista assonometrica del progetto del NSO

Fig. 9: vista laterale del NSO chiuso

Fig. 10: specchi nella versione modificata

Fig. 11: particolare: i magneti di fissaggio

Fig. 12: bracci di sostegno

Fig. 13: vista laterale della base

Fig. 14: porticine laterali triangolari rivestite con un film di alluminio

Fig. 15: vista laterale del NSO

Fig. 16: apertura sulla parte superiore del prisma

Fig. 17: vista laterale del NSO e degli sportelli mobili

Fig. 18: fotografia della piastra

Fig. 19: fotografia generale (piastra e pentola)

Fig. 20: andamento della radiazione solare in funzione della lunghezza d'onda

Fig. 21: trasmittanza spettrale di una lastra vetrata

Fig. 22: scomposizione della radiazione solare incidente nelle tre componenti

Fig. 23: energia totale in ingresso attraverso il vetro

Fig. 24: variazione del fattore solare in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare

Fig. 25: vetro Float comune ed extrachiaro a confronto

Fig. 26: schema di funzionamento generale del NSO

Fig. 27: programma di calcolo

Fig. 28: sviluppo dati (H sole)

Fig. 29: dati altezza sole e angoli

Fig. 30: indicazione angoli degli specchi

Fig. 31: schema di funzionamento del banco prova

Fig. 32: il pireliometro usato

Fig. 33: acquisitore con connettori inseriti

Fig. 34,35: sistema schermatura forni

Fig. 36: vista laterale del "NSO"

Fig. 37: vista dall'alto del "NSO"

Fig. 38: area di apertura del "NSO"

Fig. 39: grafico DNI e Tamb al variare del tempo - A vuoto

Fig. 40: grafico DNI e Tamb al variare del tempo – Acqua (prova 09/06/2021)

Fig. 41: grafico efficienza termica forno Newton schermato – Acqua (prova 09/06/2021)

Fig. 42: grafico potenza di cottura standard in funzione della differenza di temperatura forno Newton schermato – Acqua (prova 09/06/2021)

Fig. 43: grafico DNI e Tamb al variare del tempo – Glicerina (prova 03/06/2021)

Fig. 44: grafico efficienza termica forno Newton – Glicerina (prova 03/06/2021)

Fig. 45: grafico efficienza termica Newton schermato – Glicerina (prova 03/06/2021)

Fig. 46: grafico potenza di cottura standard in funzione della differenza di temperatura forno Newton – Glicerina (prova 03/06/2021)

Fig. 47: grafico potenza di cottura standard in funzione della differenza di temperatura forno Newton schermato – Glicerina (prova 03/06/2021)

Fig. 48: vista generale del forno

Fig. 49: vista su camera di cottura

Fig. 50: schema di funzionamento del banco prova

Fig. 51: grafico DNI e Tamb al variare del tempo-Acqua (prova 30/03/2021)

Fig. 52: vista generale del forno

Fig. 53: vista sulla camera di cottura

Fig. 54: struttura molecolare dello xilitolo

Fig. 55: illustrazione delle due pentole con intercapedine

Fig. 56: andamento calore specifico del "Rhodorsil 47 V 100"

Fig. 57: schema di funzionamento del banco prova

Fig. 58: grafico DNI e Tamb al variare del tempo- Olio Siliconico (prova 20/05/2021)

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: FER in Europa

Tabella 2: FER in Italia ed Europa

Tabella 3: principali proprietà termiche del legno massello di abete

Tabella 4: coefficiente di resistenza al passaggio di vapore acqueo

Tabella 5: principali proprietà termiche dell'acciaio

Tabella 6: coefficienti energetici del vetro float comune ed extrachiaro con uno spessore di 4 mm (valori espressi in percentuale)

Tabella 7: caratteristiche tecniche pireliometro NIP

Tabella 8: dati tecnici di una termocoppia di tipo T

Tabella 9: scheda tecnica acquirente

Tabella 10: calcolo parametri Test 1- A vuoto (prova 31/05/2021)

Tabella 11: calcolo parametri Test 2- A vuoto (prova 03/06/2021)

Tabella 12: calcolo parametri Test 3- A vuoto (prova 03/06/2021)

Tabella 13: calcolo parametri Test 1- Acqua (prova 01/06/2021)

Tabella 14: calcolo parametri Test 2- Acqua (prova 01/06/2021)

Tabella 15: calcolo parametri Test 3- Acqua (prova 09/06/2021)

Tabella 16: calcolo parametri Test 4- Acqua (prova 17/06/2021)

Tabella 17: calcolo parametri Test 5- Acqua (prova 30/06/2021)

Tabella 18: calcolo parametri Test 1- Glicerina (prova 03/06/2021)

Tabella 19: calcolo parametri Test 2- Glicerina (prova 04/06/2021)

Tabella 20: calcolo parametri Test 3- Glicerina (prova 22/06/2021)

Tabella 21: calcolo parametri Test 4- Glicerina (prova 29/06/2021)

Tabella 22: calcolo parametri Test 1- Acqua e Test 2,3- Olio Siliconico (prove 30,31/03/2021)

Tabella 23: caratteristiche delle pentole usate

Tabella 24: "Rhodorsil 47 V 100"

Tabella 25: calcolo parametri in fase di riscaldamento Test 1 e 2-Olio Siliconico
(prove 18,20/05/2021)

Tabella 26: calcolo parametri in *fase* di raffreddamento Test 1 e 2-Olio Siliconico
(prove 18,20/05/2021)

INTRODUZIONE

Il seguente elaborato si basa su prove sperimentali di forni solari di tipo:

- *Newton Solar Oven (NSO)*
- *A Concentrazione "HELIAC"*
- *A Scatola Portatile*

Nel primo capitolo viene presentato il problema energetico attuale, i metodi in uso per lo sfruttamento dell'energia solare e infine una traccia sulla storia e sulle tipologie di forni solari esistenti.

Nel secondo capitolo viene introdotto e descritto il forno Newton, nel suo progetto, nelle parti e nei materiali da cui è costituito e infine il suo schema di funzionamento.

Nel terzo capitolo viene mostrato il banco di prova con i vari strumenti che lo compongono.

Nel quarto capitolo vengono presentati i vari parametri internazionali per la valutazione di un forno solare.

Nel quinto capitolo vengono mostrati i risultati ottenuti dalle prove elaborate.

Nel sesto capitolo viene introdotto il forno a concentrazione HELIAC con le varie descrizioni e infine con i risultati dei test ottenuti.

Nel settimo capitolo viene introdotto, infine, l'ultimo forno, ovvero, quello a scatola portatile, con le varie descrizioni e con i risultati dei test ottenuti.

Nell'ottavo capitolo sono raccolte le conclusioni di questo lavoro.

1 STATO DELL'ARTE

1.1 Problema energetico

La produzione di energia è una problematica sempre più attuale, con una richiesta crescente ogni anno; parallelamente al consumo di energia è in aumento anche l'inquinamento atmosferico.

Per queste ragioni sempre più paesi cercano di aumentare la produzione di energia da fonti rinnovabili.

Nel caso dell'energia elettrica, ad esempio, la produzione europea è passata da 676 GW nel 2005 a 938 GW nel 2017 [1], con un conseguente aumento dello sfruttamento di energia da fonti di energia rinnovabili (FER):

Fonte di energia	2005	2017
Eolico	41 GW (6%)	169 GW (18%)
Solare	2 GW (0.3%)	107 GW (11.5%)
Gas	138 GW (20.5%)	188 GW (20.1%)
Carbone	167 GW (24.8%)	148 GW (15.8%)
Nucleare	131 GW (19.4%)	118 GW (12.6%)
Petrolio	52 GW (7.7%)	29 GW (3%)
Idroelettrico	120 GW (17.7%)	137 GW (14.6%)
Biomasse	7 GW (1%)	15 GW (1.6%)
Altro	18 GW (2.6%)	27 GW (2.8%)

Tabella 1: FER in Europa

1.2 Dati di sintesi – Italia e Europa

Nel complesso, tra il 2005 e il 2018 i consumi di energia da FER in Italia sono raddoppiati (da 10,7 Mtep a 21,6 Mtep).

Ad oggi, lo sfruttamento di energia da fonti rinnovabili è discretamente sviluppato, con risultati vicini agli obiettivi imposti per il 2020. [2]

	Italia	Europa
Quota FER sui consumi energetici totali	17.8%	18%
Quota FER nel settore trasporti	7.7%	8.1%
Quota FER nel settore termico	33.9%	32.1%
Quota FER nel settore termico	19.2%	19.7%

Tabella 2: FER in Italia ed Europa

Da notare che al 2018 l'Italia era l'unico tra i principali Paesi UE nel quale si poteva osservare una quota FER sui consumi finali lordi superiore all'obiettivo fissato dalla Direttiva 2009/28/CE per il 2020:

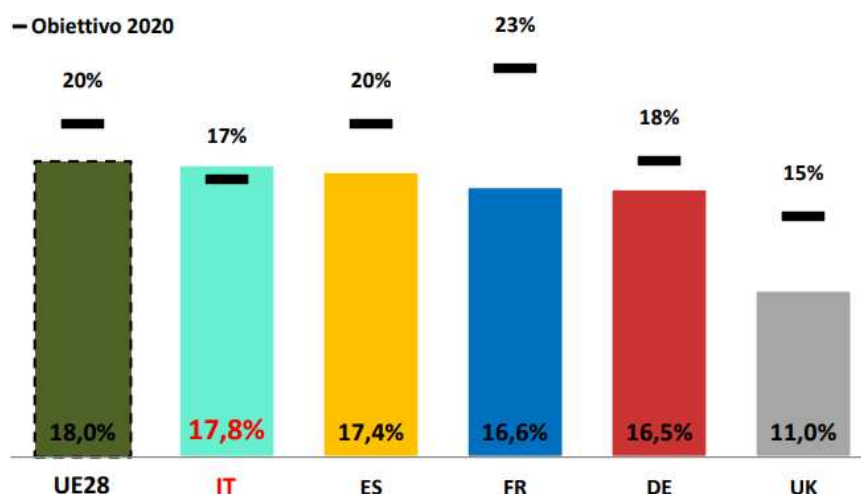


Fig. 1: obiettivo fissato dalla Direttiva 2009/28/CE per il 2020

1.3 Risparmio energetico e sviluppo sostenibile

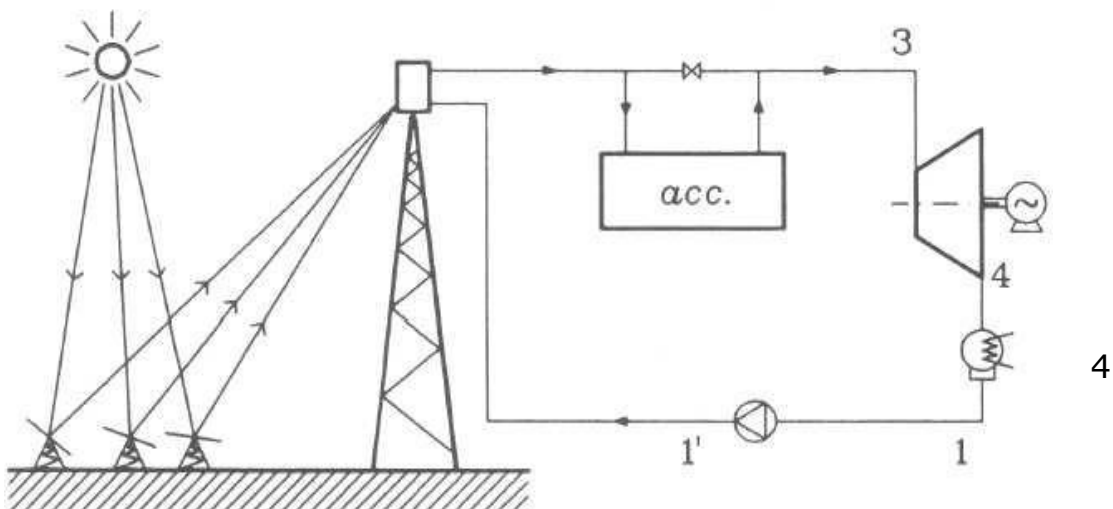
Al fine di favorire il risparmio di energia e ridurre gli sprechi è importante sfruttare fonti di energia inesauribili come l'energia eolica e l'energia solare. Questo elaborato riguarda in particolare l'energia solare, che tra le FER è probabilmente la più promettente in quanto gratuita, pulita, inesauribile ed eco-friendly.

1.3.1 Energia solare: fotovoltaico e termico

Nell'ambito dell'energia solare, ci sono tre tipologie di impianti energetici:

1. Fotovoltaico: mediante delle celle fotovoltaiche, collegate in serie o in parallelo a formare dei pannelli fotovoltaici, la radiazione solare viene convertita in energia elettrica. I costi relativamente bassi e la facilità di utilizzo hanno portato sempre più persone a installare questo tipo di impianto anche nelle proprie abitazioni.
2. Impianti a concentrazione di energia solare (CSP): mediante degli specchi si convoglia la radiazione solare in un unico punto al fine di produrre vapore; questo alimenterà poi una o più turbine generando energia elettrica.

Fig. 2: schema di funzionamento di un CSP



3. Solare termico: non nasce con lo scopo di produrre energia elettrica ma energia termica; può essere sfruttato sia per il riscaldamento che per il raffrescamento. Un tipico esempio è quello di far passare l'acqua all'interno di tubi installati sul tetto dell'abitazione; grazie alla radiazione solare l'acqua si scalderà e potrà essere sfruttata immediatamente o conservata in cisterne coibentate, per mantenere il più possibile la sua temperatura.

1.4 Perché costruire un forno solare

La costruzione o l'acquisto di un forno solare in un paese del primo mondo non ha particolare rilevanza dal punto di vista economico, in quanto:

- 1) non ci sono problemi nel cuocere cibi con un banale forno elettrico;
- 2) perché con la medesima cifra di acquisto di un forno solare si può comprare abbastanza combustibile da cuocere cibi per svariati mesi; ha però un profondo significato se visto nell'ottica di voler cucinare senza inquinare e produrre fumo, ad esempio in un campeggio.

Il discorso varia, invece, se consideriamo paesi in via di sviluppo, in cui rinvenire combustibili può essere molto più complicato e quindi, un forno solare può essere una valida alternativa per la cottura del cibo, specialmente in continenti, quali, quello africano o sud-asiatico, in cui la radiazione solare è mediamente molto elevata.

1.5 Storia della cottura solare

La cottura solare affonda le sue radici nel XVIII secolo. [3] Il primo esperimento riguardante questo tema fu realizzato da un fisico tedesco di nome Tschirn Hausen (1651-1708). Nel 1767, il fisico Horace de Saussure tentò di cucinare sfruttando l'energia del sole; per l'occasione costruì una piccola serra con delle scatole di vetro e provò a cucinare della frutta. Un matematico francese, Augustin Mouchot, nel 1860 costruì un efficiente forno solare mediante degli specchi che riflettevano la radiazione solare in una camera. Nel 1876, W. Adams progettò e costruì un forno solare a 8 specchi con cui cucinò le razioni per 7 soldati in sole due ore. Un anno dopo, Mouchot progettò dei forni solari per i soldati francesi e scrisse un libro sull'utilizzo dell'energia solare in applicazioni industriali. Nel 1891, Clarence Kemp, un idraulico americano, inventò uno scaldabagno che funzionava con l'energia solare. Nel 1894 in Cina venne cucinata un'anatra grazie ai principi della cottura solare. Nel 1930 la Francia inviò molti forni solari alle proprie colonie in Africa e nello stesso periodo l'India iniziò a studiare l'energia solare per combattere la deforestazione. Dalla metà del '900 in America vennero analizzati molti forni solari e fu anche scritto un libro chiamato "Solar Oven" che trattava questo argomento. Nel 1945 entrò in commercio il primo forno solare. Vennero in seguito studiati altri tipi di forni, come ad esempio quelli parabolici e quelli costruiti con materiali riciclati.

Nel 1983, Heather Gurley Larson scrisse il primo libro di cucina tramite forni solari chiamato "Solar cooking naturally".

Nel 1987 Mullick ideò un metodo per analizzare le prestazioni dei forni solari; poco dopo, nel 2000, Funk propose una procedura internazionale standard per studiare la curva di potenza dei forni solari.

1.6 Cos'è un forno solare

Un forno solare è uno strumento in grado di concentrare l'energia del sole in una zona ben precisa (la camera di cottura) con lo scopo, di cuocere/essiccare cibi o sterilizzare l'acqua; occorre ricordare che una delle potenzialità di un forno solare è quella di fornire uno strumento a chi non ha possibilità di accedere all'acqua potabile.

Per sfruttare al massimo l'energia solare è importante che il forno venga spesso ri-orientato (circa ogni 10 minuti) in direzione del sole per bilanciare l'effetto della rotazione terrestre.

Un limite dei forni solari è sicuramente quello di funzionare solo in presenza della loro fonte di energia, ovvero il sole; per ovviare a questo ostacolo, si ricorre principalmente a due sistemi:

- Sistema esterno al forno: ci sono vari prototipi. Un esempio tipico è quello di inserire all'interno del forno delle resistenze elettriche alimentate da pannelli fotovoltaici; un'altra possibilità è, invece, includere nel forno un sistema composto da una pompa che metta in moto un fluido vettore, il quale, accumulando calore all'interno di collettori solari, lo rilascia all'interno del forno.
- Questo tipo di soluzione può servire anche ad aumentare la temperatura interna del forno.

Sistema interno al forno: viene sfruttato un materiale a cambiamento di fase (PCM, dall'inglese "Phase Changing Material"). Si inserisce il PCM in un'intercapedine ricavata tra due pentole concentriche; durante la fase di riscaldamento questo materiale accumula calore latente cambiando di fase. In assenza di radiazione il PCM torna al suo stato solido originario rilasciando calore che viene per la maggior parte assorbito dall'alimento

posizionato nella pentola più interna: in questo modo l'alimento può continuare a cuocersi o mantenere un'elevata temperatura.

Esistono vari tipi di PCM, in questo elaborato è stato sfruttato un materiale a cambiamento di fase e i risultati sono stati ottimi.

1.7 Tipologie di forni solari

La realizzazione di forni solari è ormai un'attività sviluppata con continue nuove presentazioni di brevetti, per questo motivo è difficile creare una precisa classificazione; si possono comunque distinguere tre macroaree principali tra le tipologie di forni solari:

- ***Forno solare a pannelli***
- ***Forno solare parabolico***
- ***Forno solare a scatola***

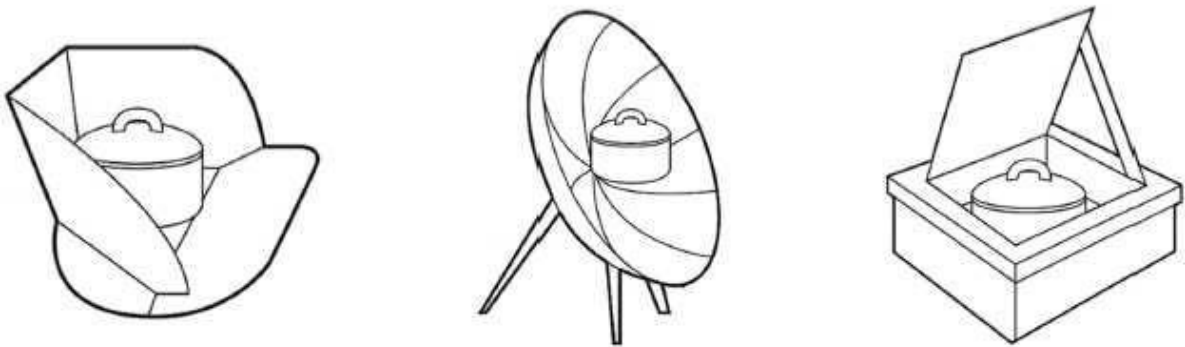


Fig. 3: le tre principali tipologie di forni solari

1.7.1 Forno solare a pannelli

Questa è probabilmente la tipologia di forno solare più diffusa grazie alla facilità di costruzione e il basso costo dei materiali; è inoltre leggero e ripiegabile, caratteristica che lo rende facilmente trasportabile. Uno svantaggio è quello di avere una potenza di cottura limitata.

Il principio di funzionamento è abbastanza semplice: i pannelli riflettono i raggi solari al centro del forno, dove viene posizionata una pentola con all'interno gli alimenti da cuocere.



Fig. 4: un forno solare a pannelli [4]

Il forno in figura è un prototipo del Dr. Roger Bernard [5] ed è stato costruito solo con cartone e pellicola.

Un grosso svantaggio dei forni solari a pannelli è sicuramente la grande dipendenza dalla radiazione solare riflessa, quindi con un cielo meno limpido, il funzionamento sarà decisamente compromesso.

Per aumentarne la capacità di cottura è bene incrementare la superficie riflettente, cioè l'area dei pannelli.

1.7.2 Forno solare parabolico

La comparsa dei primi forni solari parabolici, iniziò intorno alla metà del ventesimo secolo [5] e furono in seguito sviluppate e studiate varie geometrie.

Un forno parabolico presenta ottime prestazioni, riuscendo a raggiungere temperature molto elevate in rapido tempo; per questo motivo ebbe un grande sviluppo che continua tutt'ora.

Uno svantaggio è il rischio di bruciare gli alimenti a causa di una potenza eccessiva, focalizzata tutta nel medesimo punto; inoltre, la costruzione del forno è leggermente complessa in quanto la pentola ha bisogno di un apposito sostegno per essere ben posizionata.



Fig. 5: un forno solare parabolico [6]

1.7.3 Forno solare a scatola

Questa tipologia di forno è costituita da uno o più elementi riflettenti che indirizzano la radiazione solare all'interno della camera di cottura.

Esistono vari modelli di forno a scatola, diversi per potenza e complessità costruttiva. La camera di cottura, ad esempio, può essere più o meno isolata e più o meno esposta.

I forni in cui la camera di cottura è ben coibentata impiegano molto tempo per raggiungere la temperatura di lavoro ideale ma possono funzionare discretamente anche in situazioni in cui la radiazione sia diffusa, la temperatura ambiente bassa o la giornata ventosa.



Fig. 6: un forno solare a scatola [7]

In questo tipo di forno, dagli anni '80 in poi, sono stati cercati di migliorare diversi elementi per aumentare l'efficienza:

- Utilizzo di specchi con maggiori prestazioni di capacità riflettenti;
- Studio dell'inclinazione ottimale degli specchi;
- Camera di cottura verniciata di nero per aumentare l'assorbimento della radiazione.

Il forno studiato in questo elaborato si inserisce nella categoria dei forni solari a scatola; la differenza principale è data dalla camera di cottura che non presenta delle pareti opache ma bensì vetrate, caratteristica che ne permette un aumento di esposizione solare.

Nel prossimo capitolo il forno analizzato verrà presentato in maniera più dettagliata.

2 REALIZZAZIONE DEL FORNO SOLARE DI TIPO NEWTON

2.1 Premessa

Il lavoro svolto in questa tesi è basato sullo studio di forni in versione “Newton Solar Oven 2.0” con configurazione a 4 specchi, realizzata precedentemente da un altro tesista.

I forni solari utilizzati nelle prove si basano su un progetto dell’Ing. Muccioli [8], il quale prototipo è studiato nei minimi dettagli per garantire un buon livello di prestazione e una facile immediatezza di realizzazione e di utilizzo.

A seguito dei risultati ottenuti nel precedente lavoro si è deciso di ottimizzare le prestazioni richieste con una serie di interventi e modifiche, mantenendo comunque inalterata la natura originale del prototipo.

Le prove svolte sono state effettuate su due forni in parallelo pressochè identici, con l’unica differenza che uno di essi è stato provvisto di un sistema di schermatura per il vento per accertarsi di quanto questa variabile sia incidente nei risultati finali.

Questo modello, è composto da due lastre di vetro e due porte laterali in legno che fungono da chiusura e supporto alla struttura vetrata. Il NSO 2.0 è molto semplice da assemblare e pulire; nelle condizioni più favorevoli può raggiungere temperature di 150°C.

2.1.1 Newton Solar Oven – versione 2.0

Il forno è composto principalmente da una camera di cottura autoportante e due specchi che riflettono i raggi solari all'interno della camera.

La camera di cottura è delimitata da due sportelli laterali in legno, rivestiti con un film di alluminio e da due lastre di vetro extrachiaro delle stesse dimensioni che compongono un prisma a base di triangolo equilatero.

Il nome del forno deriva proprio da questa forma, che ricorda il prisma di Newton, con il quale lo scienziato inglese studiò la rifrazione della luce e il relativo spettro luminoso del visibile.

2.1.2 Configurazione 4 specchi: “NSO – 4 specchi”



Fig. 7: vista generale della configurazione 4 specchi

Rispetto al precedente lavoro si è scelto di mantenere la configurazione a 4 specchi avendo avuto risultati ottimali ma scegliendo un ordine di posizionamento diverso.

La configurazione a 4 specchi è così composta:

- Lo specchio primario è composto da 2 specchi di dimensioni 60*40cm posti in orizzontale, uno sormontante l'altro per una dimensione complessiva di 60*80cm specchi:
- Lo specchio secondario è composto da due specchi di dimensioni 30*40 cm posti in configurazione a "V"

2.2 Dati generali

In fase di utilizzo (quando gli specchi sono aperti) il forno ha un'ampiezza massima di 1,3 m, una larghezza massima di 0,6 m, un'altezza massima di 0,9 m e un peso di circa 8,5 kg nella versione base (3,2 kg per la struttura in legno; 3,6 kg per le lastre di vetro; 1,7 kg per gli specchi).

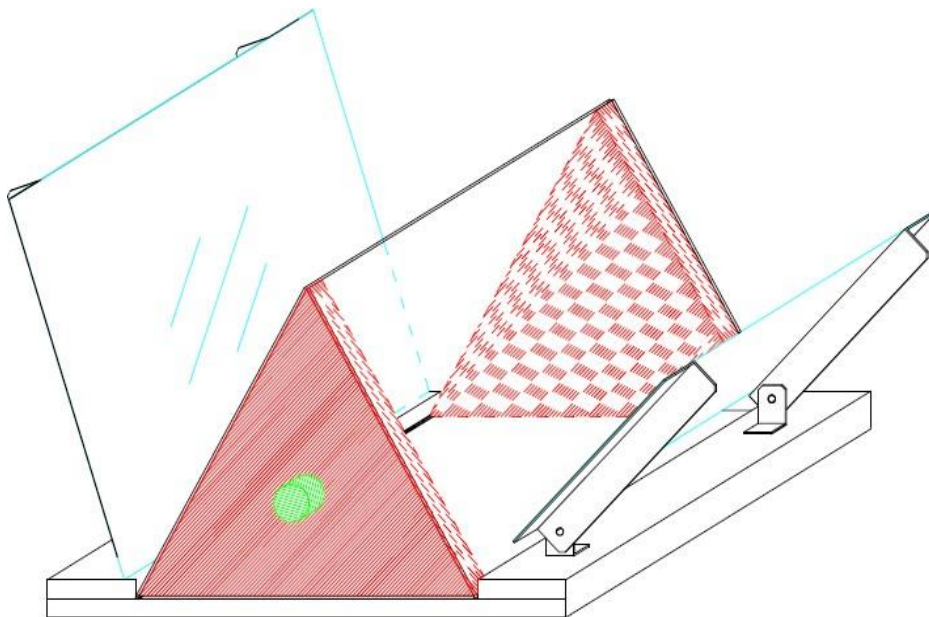


Fig. 8: vista assometrica del progetto del NSO

In fase di trasporto il forno è richiudibile su se stesso, i bracci di sostegno degli specchi possono infatti ruotare mediante delle cerniere e gli specchi possono essere rimossi.

Di seguito viene inserita una foto del forno Newton chiuso, da notare il suo contenuto spessore in fase di trasporto di soli 18 cm.



Fig. 9: vista laterale del NSO chiuso

2.3 Elementi riflettenti

Come precedentemente anticipato, il forno presenta due specchi: il maggiore è detto specchio primario o specchio posteriore, di dimensioni 60*80 cm; il minore è detto specchio secondario o specchio frontale, di dimensioni 40*30 cm.

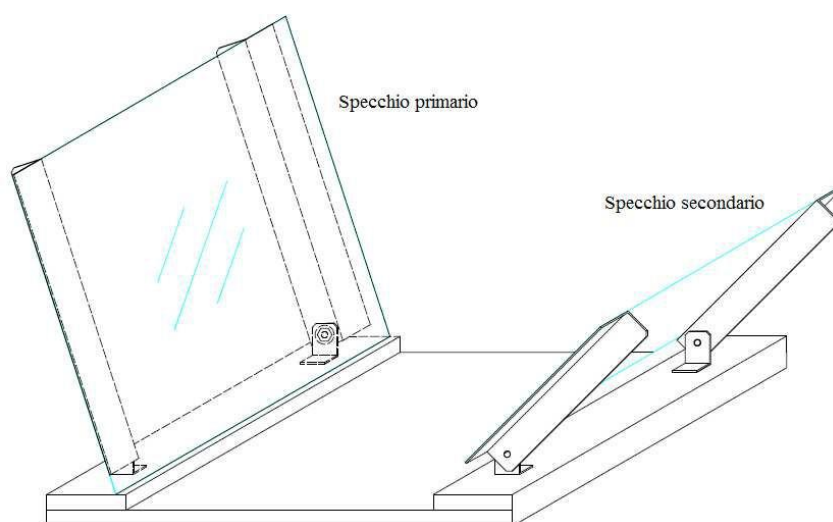


Fig. 10: Specchi nella versione modificata

In fase di funzionamento lo specchio primario viene fissato mediante un sistema a slitta sui bracci principali, mentre gli specchi secondari mediante dei magneti, così da poter essere facilmente rimossi in fase di trasporto.



Fig. 11: particolare: i magneti di fissaggio

2.3.1 Polimetilmetacrilato

Altre analisi, volte anche alla massimizzazione dell'efficienza, sono state svolte con specchi in Polimetilmetacrilato, più comunemente conosciuto come Plexiglass.

Questo tipo di lastre sono impiegate in svariati settori: automobilistico, arredamento, rivestimenti, esposizioni e gadgets, segnaletica, ecc; è quindi un materiale molto efficiente ma anche facilmente recuperabile da oggetti rimasti inutilizzati.

Gli specchi in plexiglass sono da preferire non solo per ragioni di costo ma anche per una questione di sicurezza. Non bisogna dimenticare infatti che un forno solare viene utilizzato all'aperto e una folata di vento potrebbe rimuovere gli specchi: l'utilizzo del plexiglass garantisce un bassissimo rischio di rotture e di infortuni, a parità di proprietà riflettenti dei comuni specchi in vetro; i produttori sostengono infatti che le capacità di riflessione di uno specchio in metacrilato siano pari o superiori a quelle di uno specchio in vetro (coefficiente di riflessione di circa 90%).

2.4 Bracci di sostegno e cerniere

I bracci di sostegno degli specchi sono stati realizzati con un profilo in alluminio, così da garantire allo stesso tempo resistenza meccanica e leggerezza.

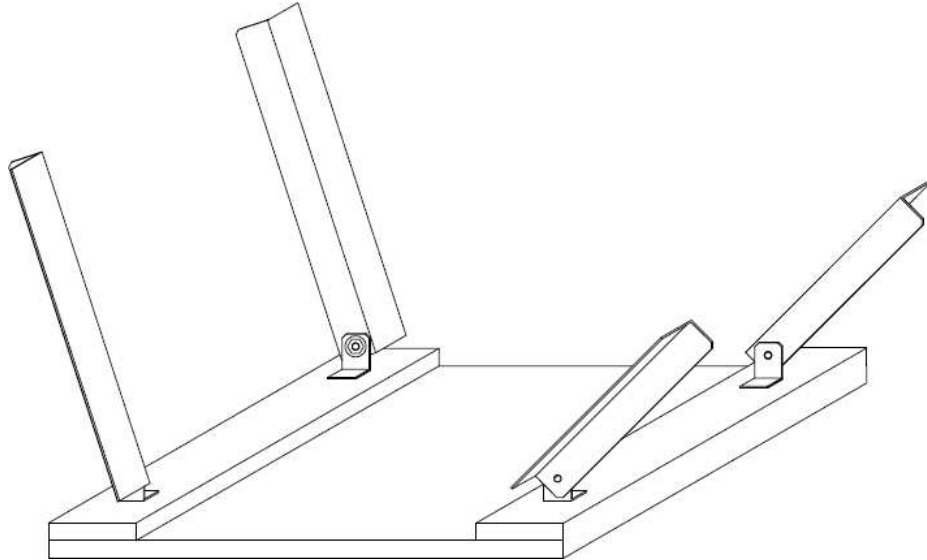


Fig. 12: bracci di sostegno

I bracci vengono poi fissati a delle staffe mediante viti e bulloni; in questo modo è possibile posizionare correttamente il braccio in base all'inclinazione necessaria allo specchio per indirizzare i raggi del sole all'interno della camera di cottura.

Per favorire il bloccaggio dei bracci di sostegno sono state inserite delle manopole, così da aumentare l'attrito e facilitare il mantenimento della corretta posizione di lavoro.

2.5 Base

La base del forno solare ha lo scopo di fornire l'appoggio alla camera di cottura, le sue dimensioni sono di 600*600*20 mm. Il Newton Solar Oven è infatti un forno solare autoportante: i pezzi non sono fissati alla base ma sono appoggiati; questo è un importante fattore che lo rende poco ingombrante e quindi facile da trasportare quando non è assemblato.

I vetri della camera di cottura si reggono grazie alla presenza di un gradino sulla base, che impedisce ai vetri di scivolare, e agli sportelli laterali, che verranno analizzati in seguito.

I gradini hanno dimensione di 600*100*20 mm e sono stati fissati alla base mediante delle viti. Lo spazio tra i gradini è pari alla larghezza della piastra di acciaio: in questo modo i vetri laterali vanno a battuta contro la piastra di base, creando un volume il più stagno possibile.

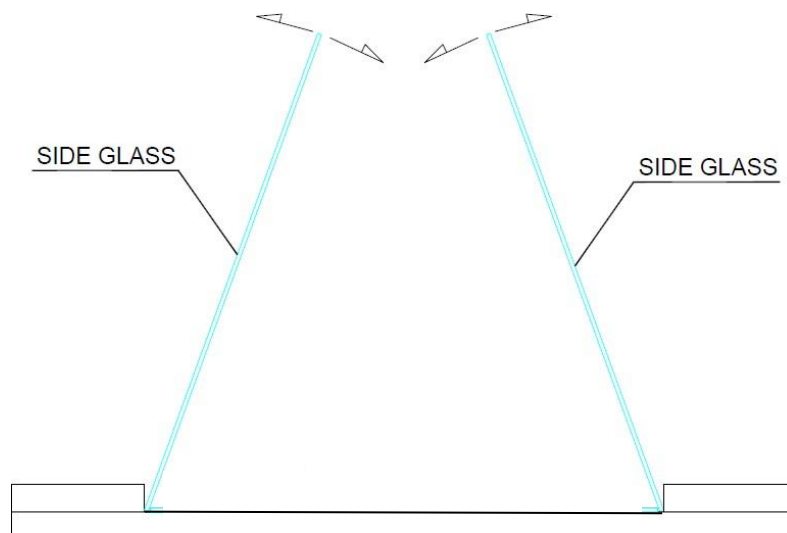


Fig. 13: vista laterale della base

2.6 Sportelli laterali

Gli sportelli laterali hanno forma di triangolo isoscele; le loro dimensioni sono di 37 cm di base, 33 cm di altezza e 3 cm di spessore. Questi sono l'elemento portante del forno, forniscono infatti appoggio verticale ai vetri laterali.

Il materiale scelto per questi elementi è legno massello di abete rivestito con un film di alluminio; non è stato usato legno multistrato perché, a contatto con l'umidità di cibi in cottura o dell'acqua usata per i test (nel caso di queste analisi), si sarebbe potuto scollare.

Calore specifico	Conducibilità	Densità	Diffusività
2386 [J/kgK]	0,13-0,18 [W/mK]	470 [kg/m ³] ±10%	1,6*10 ⁻⁷ [m ² /s]

Tabella 3: principali proprietà termiche del legno massello di abete [9]

Nel legno massello si nota una conducibilità superiore a quella del legno multistrato a causa della sua minor porosità; il suo valore può oscillare tra 0,13 e 0,18 W/mK in funzione della sua durezza.

Il film di alluminio ha lo scopo di riflettere all'interno della camera di cottura eventuali raggi solari diretti verso gli sportelli laterali e diminuire la dispersione di radiazione.

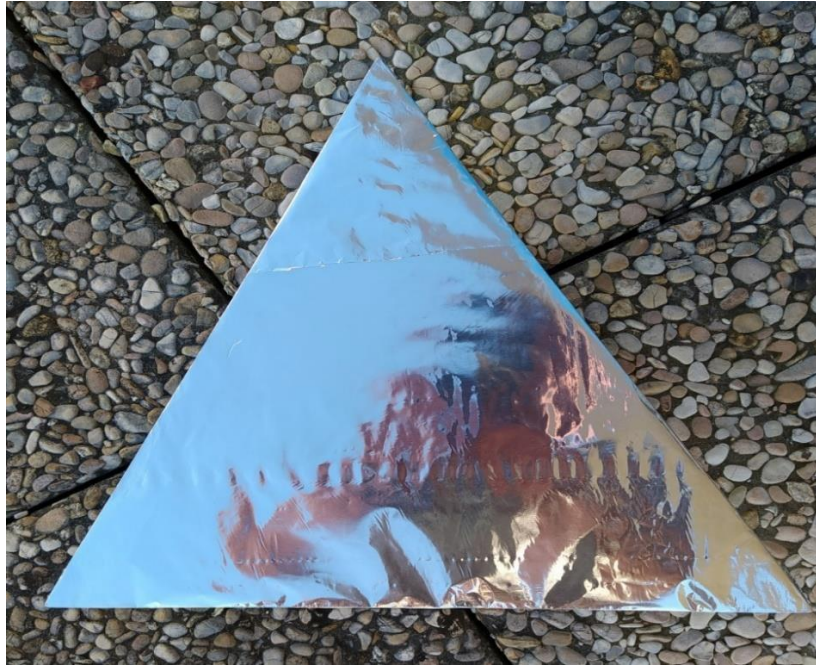


Fig. 14: porticine laterali triangolari rivestite con un film di alluminio

Il film di alluminio evita anche che il vapore penetri e condensi all'interno degli sportelli di legno, precludendone le capacità di isolamento.

	Coefficiente di resistenza al passaggio di vapore acqueo
Legno di abete	170
Alluminio	2000000

Tabella 4: coefficiente di resistenza al passaggio di vapore acqueo [10]

Si noti inoltre che i vetri laterali si possono muovere e quindi è possibile lasciare qualche millimetro di apertura sulla parte superiore della camera di cottura. Questo risulta molto utile per far uscire il vapore ed evitare che i vetri si

appannino così da avere una buona radiazione all'interno del volume in ogni momento; questo è un importante fattore che contraddistingue il NSO dalla quasi totalità di forni solari della sua categoria i quali non presentano nessun sistema anticondensa.

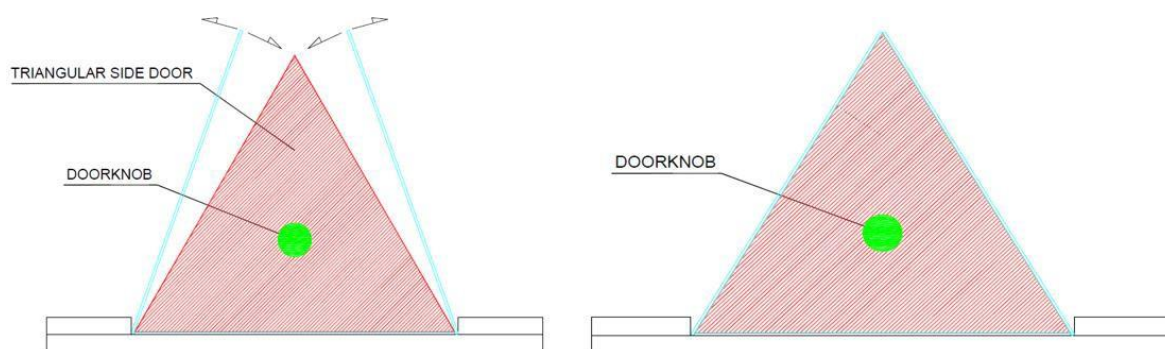


Fig. 15: vista laterale del NSO



Fig. 16: apertura sulla parte superiore del prisma

Come si può vedere nella figura di seguito, agli sportelli sono state applicate delle maniglie per facilitare la loro rimozione, in questo modo mentre il forno è in funzione è possibile rimuovere uno sportello per controllare la cottura degli alimenti senza aprire del tutto la camera di cottura, mantenendo buona parte del calore all'interno del volume delimitato dai vetri.

Gli sportelli mobili danno anche la possibilità di variare il volume della camera di cottura a piacimento, in questo modo è possibile adattare le dimensioni del forno alla pentola che si sta utilizzando.

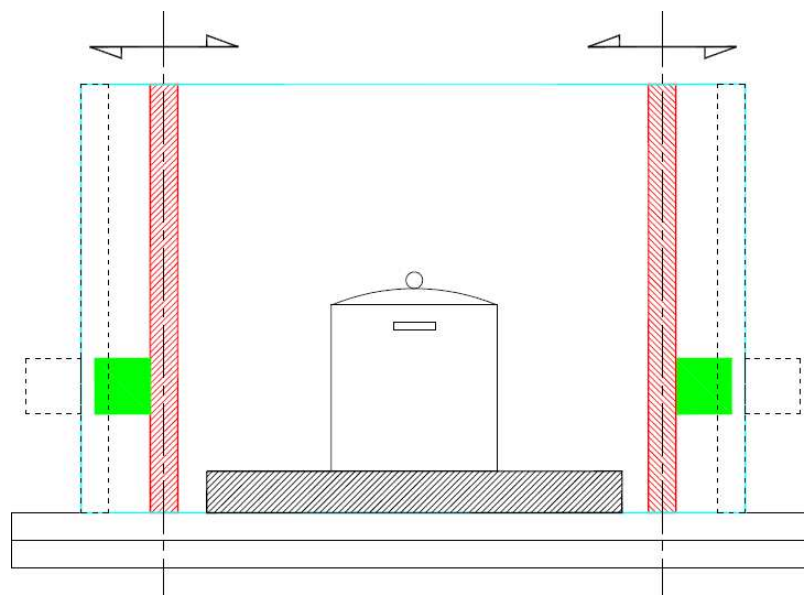


Fig. 17: vista laterale del NSO e degli sportelli mobili

2.7 Isolante, piastra e pentole

Nel corso della trattazione, per ottenere un miglior isolamento aumentando le prestazioni, le basi di entrambi i forni sono state munite di pannelli in sughero con dimensioni di 43 x 37,5 x 0.8 cm (L x W x H), interposti tra le basi in legno e le piastre in acciaio.

Quest'ultime, così come i pannelli in sughero, sono state perfettamente sagomate secondo le dimensioni delle basi dei forni e successivamente dipinte di nero con una vernice ad elevate prestazioni così da aumentare la capacità di assorbire calore dalla radiazione solare. Le dimensioni sono di 42 x 36.5 x 0.1 cm (L x W x H). L'acciaio in questione è stato recuperato da un fabbro quindi non se ne conoscono le proprietà esatte ma se ne può immaginare una stima generale.

Calore specifico	Conducibilità	Densità	Diffusività
440 [J/kgK]	80,2 [W/mK]	7874 [kg/m ³]	2,3*10 ⁻⁵ [m ² /s]

Tabella 5: principali proprietà termiche dell'acciaio

I risultati delle analisi, che verranno mostrati nei prossimi capitoli, hanno dimostrato (come prevedibile) che la presenza di un isolante dato dal pannello di sughero, unita alla presenza di una piastra di acciaio comporta un buon miglioramento dell'efficienza del forno. Questo è dovuto al fatto che l'acciaio presenta un calore specifico molto minore dell'acqua o della glicerina usati durante i test e di conseguenza si scalda molto più in fretta, questo consente ulteriormente di avere una fonte di calore sotto la pentola.

Le pentole utilizzate, di dimensioni 20 x 13 cm (L x H) sono state anch'esse dipinte di nero.



Fig. 18: fotografia della piastra



*Fig. 19: fotografia generale
(piastra e pentola)*

2.8 Camera di cottura

La camera di cottura costituisce il volume all'interno del quale vengono riflessi i raggi solari al fine di accumulare calore; è composta da 2 lastre di vetro delle stesse dimensioni ed ha forma di prisma a sezione di triangolo equilatero.

Come riportato in precedenza, il suo volume è variabile mediante lo spostamento degli sportelli laterali.

Un grande vantaggio del Newton Solar Oven risiede proprio nella sua camera di cottura che, a contrario di come accade in molti altri forni solari, non è racchiusa all'interno di pareti opache. Nel caso dell'analisi sperimentale qui riportata si è comunque cercato di eseguire una trattazione più rigorosa

possibile, quindi il corretto riposizionamento del forno rispetto al sole è avvenuto ad intervalli di circa 15 minuti.

Una camera di cottura composta da vetri comporta però anche un grande svantaggio, ovvero un'alta dispersione termica; occorre considerare il fatto che i vetri siano appoggiati e facilmente rimovibili, di conseguenza il volume non è perfettamente stagno e quindi ci possono essere flussi di calore attraverso delle fessure.

Le lastre di vetro utilizzate in questa trattazione sono di un'unica tipologia avendo riscontrato risultati migliori in prove precedenti.

2.9 Caratteristiche dei vetri

2.9.1 La radiazione solare

La radiazione solare che raggiunge la terra è composta da raggi UV (circa il 3% della radiazione totale), da raggi infrarossi (circa il 55% della radiazione totale) e da luce nella lunghezza d'onda del visibile (circa il 42 % della radiazione totale). Ogni componente appartiene ad una gamma di lunghezza d'onda: l'UV tra 0,28 e 0,38 μm , il visibile tra 0,38 e 0,78 μm e l'infrarosso tra 0,78 e 2,5 μm .

Nella curva rappresentata di seguito, viene illustrata la distribuzione energetica della radiazione solare in funzione della lunghezza d'onda per una superficie perpendicolare a tale radiazione. [11]

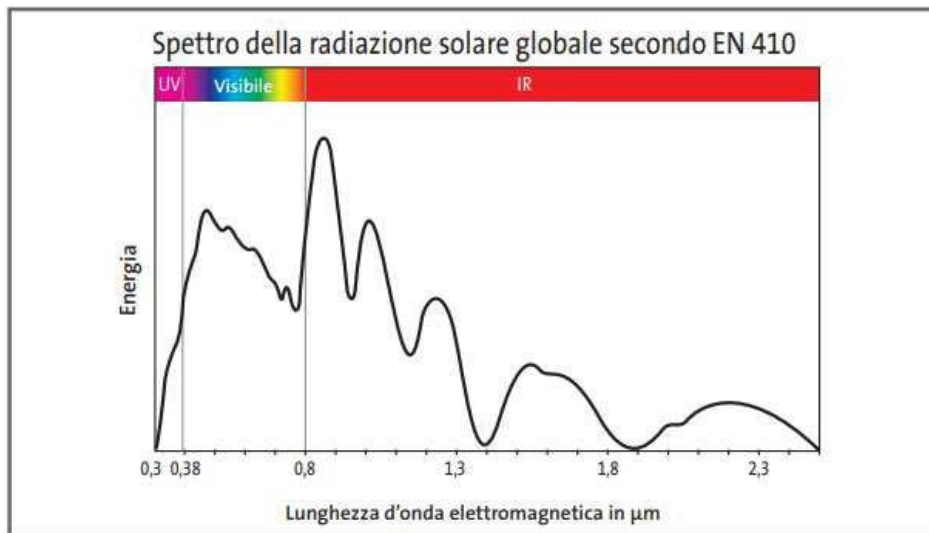


Fig. 20: andamento della radiazione solare in funzione della lunghezza d'onda

Fortunatamente, la quasi totalità di energia si trova a una lunghezza d'onda superiore a quella dell'UV, infatti il vetro comune è praticamente opaco a queste lunghezze d'onda:

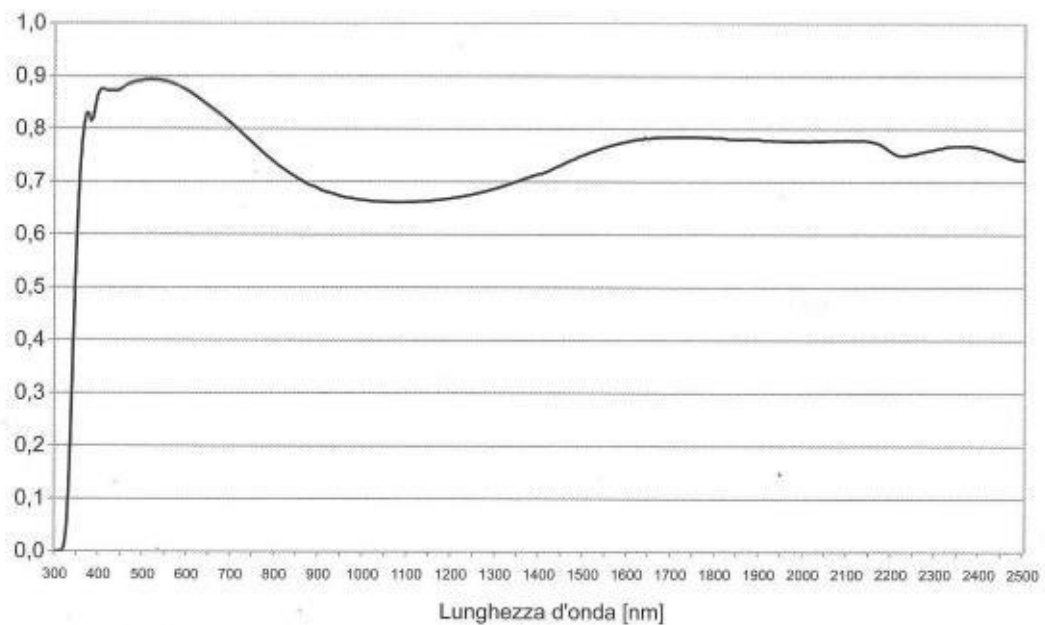


Fig. 21: trasmittanza spettrale di una lastra vetrata

La radiazione che colpisce un vetro viene in parte riflessa, in parte assorbita e in parte trasmessa; i rapporti di queste componenti rispetto alla radiazione totale incidente vengono definiti rispettivamente come fattore di riflessione (ρ), fattore di assorbimento (α) e fattore di trasmissione (τ) energetici.

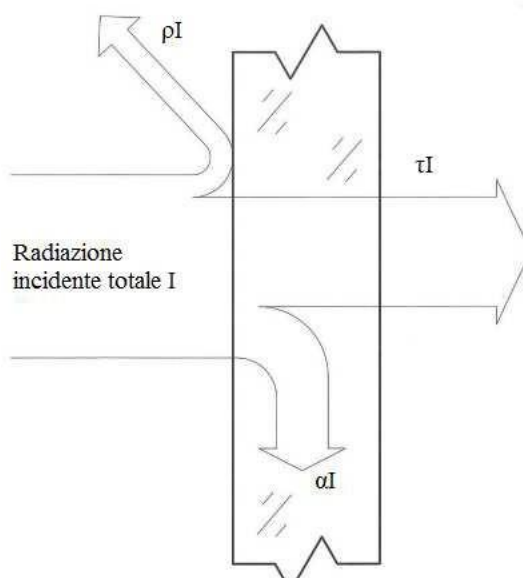


Fig. 22: scomposizione della radiazione solare incidente nelle tre componenti

In realtà l'energia trasmessa attraverso il vetro non è solo pari alla quota parte relativa al coefficiente di trasmissione, questo concetto viene espresso dal fattore solare.

Il fattore solare rappresenta il rapporto tra l'energia totale trasmessa attraverso la vetrata e l'energia solare incidente sulla vetrata stessa: questa energia totale è costituita dalla somma dell'energia immessa per trasmissione diretta e quella ceduta per irraggiamento da parte del vetro stesso che, assorbendo energia solare, si è riscaldato.

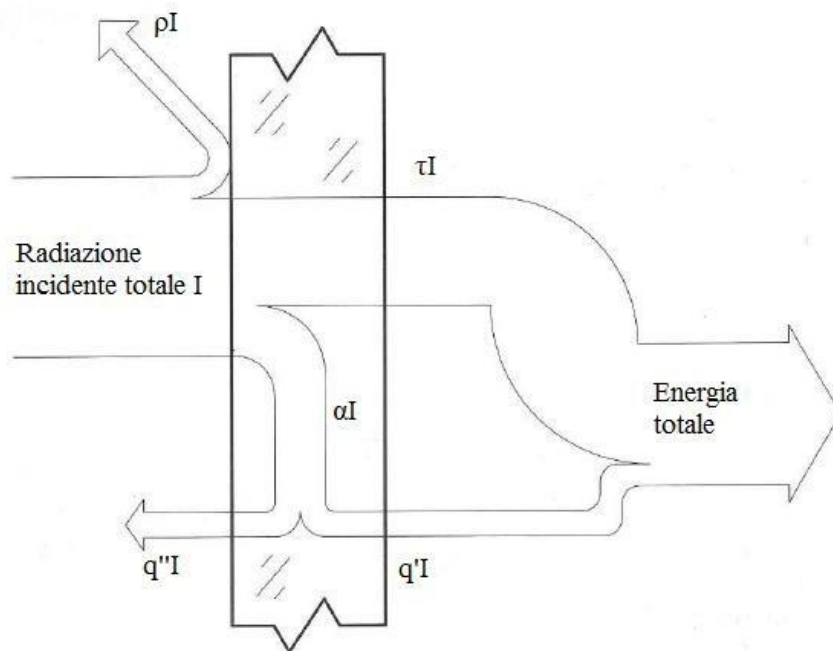


Fig. 23: energia totale in ingresso attraverso il vetro

Quando si parla di coefficiente di trasmissione e riflessione, l'angolo di incidenza assume una grande importanza: la maggior trasmissione si ha con una radiazione incidente in direzione normale al vetro; di conseguenza più l'angolo di incidenza della radiazione si allontana dalla normale, più il coefficiente di riflessione aumenterà (a spese del coefficiente di trasmissione).

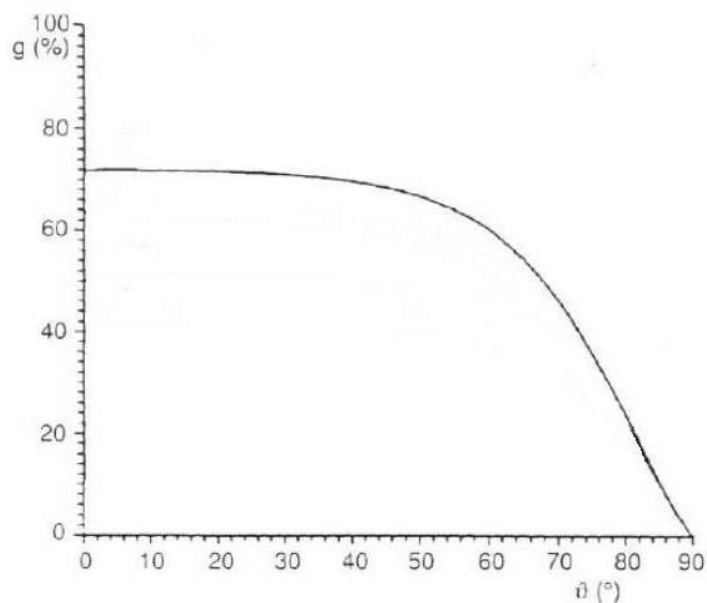


Fig. 24: variazione del fattore solare in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione solare

2.9.2 Vetro extrachiaro

Come anticipato in precedenza, a seguito dei risultati ottenuti nel lavoro precedente, si è optato sull'utilizzo di un'unica tipologia di vetro, precisamente quello extrachiaro a scapito di quello comune (float).

Il vetro esiste nella versione trasparente (quella più comune) e nella versione extrachiaro (più costosa). La versione trasparente ha una tonalità che tende leggermente al verdastro dovuta alla presenza di ossido di ferro; mediante un particolare procedimento è possibile eliminare il 90% di ossido e ottenere il vetro extrachiaro.



Fig. 25: vetro Float comune ed extrachiaro a confronto

La differenza nella colorazione chiaramente si riflette in una differenza di coefficienti di trasmissione, riflessione e assorbimento sia in termini luminosi che energetici (che in questa trattazione sono sicuramente più interessanti).

	τ [%]	ρ [%]	α [%]	Fattore solare [%]	Trasmittanza
Float comune	86	8	6	91	5,8 [W/mK]
Extrachiaro	90	8	2	87	5,8 [W/mK]

Tabella 6: coefficienti energetici del vetro float comune ed extrachiaro con uno spessore di 4 mm (valori espressi in percentuale) [12]

Il vetro extrachiaro è stato acquistato per poter svolgere un'analisi riguardo il miglioramento dell'efficienza di questo forno solare; sono state quindi analizzate 4 lastre di vetro extrachiaro temperato (la tempera è un trattamento scelto per fornire maggiore resistenza alle sollecitazioni termiche) di dimensioni 48 x 38 cm (L x H).

2.10 Schema di funzionamento generale

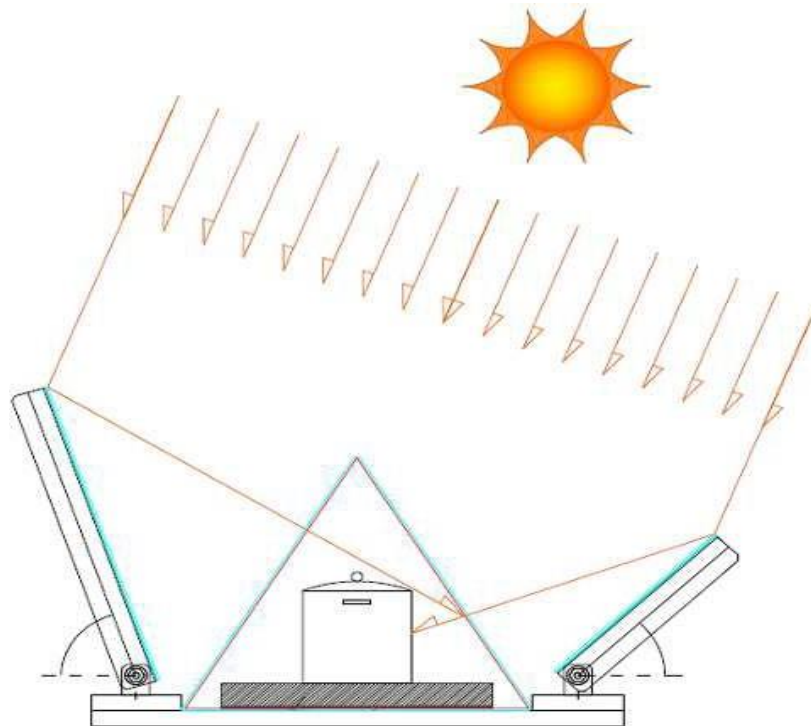


Fig. 26: schema di funzionamento generale del NSO

Lo schema di funzionamento del forno Newton è piuttosto semplice.

Come si può osservare dalla figura (fig.26) lo specchio primario si trova esattamente di fronte al sole e viene posizionato in modo tale che lo spot luminoso di radiazione riflessa coincida con la camera di cottura; lo stesso avviene con lo specchio secondario, che avrà però il sole “dietro di sé”.

La differenza tra i due specchi è che il primario si trova ad una inclinazione più vicina alla normale al terreno, di conseguenza la radiazione che questo riflette attraverserà due lastre di vetro:

1. la prima lastra che i raggi riflessi incontrano viene irradiata con un'angolazione vicina alla direzione normale al vetro, di conseguenza la quasi totalità della radiazione viene trasmessa all'interno della camera di cottura;
2. alcuni raggi impatteranno poi una seconda lastra di vetro; questo avviene però con un'angolazione molto maggiore rispetto alla normale al vetro, di conseguenza la quasi totalità della radiazione viene riflessa, da parte della lastra di vetro, all'interno della camera di cottura.

Lo specchio secondario si trova invece in una posizione più vicina a quella del terreno: i suoi raggi impatteranno solo la lastra di vetro più vicina e con una direzione quasi normale alla superficie, di conseguenza la quasi totalità della radiazione viene trasmessa all'interno della camera di cottura.

Si può notare quindi come l'inclinazione dei vetri che compongono la camera di cottura sia stata studiata nel dettaglio per rendere il forno il più efficiente possibile.

Tutto ciò è stato reso possibile studiando un sistema di inclinazione degli specchi a seconda della posizione del sole, precisamente con l'ausilio di un programma di calcolo creato dall' Ing. Nicola Olivieri [13].

A seconda del periodo dell'anno, dell'orario di programmazione delle prove e della latitudine e longitudine del luogo di lavoro, è possibile ottenere un dato sull'altezza del sole in un preciso istante.



Posizione del Sole

DI NICOLA ULIVIERI

Questa pagina web è stata creata per calcolare facilmente le informazioni sulla posizione del sole ed è associata ai miei libri [Cucinare con il Sole \(ITA\)](#), [I Segreti degli Orologi Solari \(ITA\)](#) e [Solar Cookers](#). Si tratta di una versione javascript online dei fogli di calcolo Excel "Calcolo semplificato dell'alba e tramonto" disponibile su questo sito. L'utente può semplicemente inserire i dati richiesti nel foglio di calcolo interattivo o può premere i pulsanti per inserire automaticamente l'ora locale e la posizione locale. [Di seguito](#) vengono fornite istruzioni più dettagliate sull'utilizzo di questa pagina.

Fig. 27: Programma di calcolo

Lat [°]	Long [°]	<input checked="" type="checkbox"/> Dec.
<input type="text" value="43.167"/>	<input type="text" value="11.383"/>	<input type="radio"/> Sessag.
Giorno	Mese	<input checked="" type="checkbox"/> Ora Legale
<input type="text" value="21"/>	<input type="text" value="June"/>	
Ora [h]	Mer del Fuso [°]	<input type="text" value="ORA"/>
<input type="text" value="13:16:07"/>	<input type="text" value="15"/>	<input type="text" value="QUI"/>
		<input type="text" value="QUI&ORA"/>
<input type="button" value="CALCOLA"/>		
Azimuth [°]	Altezza [°]	
<input type="text" value="-0.00"/>	<input type="text" value="70.26"/>	
Alba [h]	Mezz. Vero [h]	Tramonto [h]
<input type="text" value="05:40:10"/>	<input type="text" value="13:16:07"/>	<input type="text" value="20:52:03"/>
Az Alba [°]	Alt Mezz.Vero [°]	Az Tram. [°]
<input type="text" value="-123.04"/>	<input type="text" value="70.26"/>	<input type="text" value="123.04"/>
Durata Dì [h]	Tempo Vero [h]	EqT Locale [h]
<input type="text" value="15:11:52"/>	<input type="text" value="11:59:59"/>	<input type="text" value="01:16:07"/>

Fig. 28: sviluppo dati (H sole)

Questo dato va poi utilizzato andando a verificare una tabella che, a seconda del risultato ottenuto, ci indica i due angoli ai quali gli specchi devono essere inclinati con l'ausilio di un goniometro.

Azionando delle manopole alla base dei bracci è possibile creare questo movimento.

Newton angles

altezza sole	theta1	theta2
40	71,2	17,0
41	72,3	18,4
42	72,8	19,5
43	73,8	20,5
44	74,3	20,9
45	75,2	21,9
46	76,3	23,0
47	77,8	23,9
48	77,8	24,4
49	78,6	25,4
50	80,3	34,7
51	80,4	35,2
52	81,2	35,9
53	83,1	37,6
54	83,2	37,4
55	84,0	38,1
56	84,3	39,5
57	85,8	39,2
58	86,4	39,9
59	87,4	41,4
60	88,1	41,8
61	88,8	42,1
62	90,3	42,7
63	90,1	43,3
64	91,2	43,8
65	91,9	44,7
66	93,2	45,0
67	93,5	45,8
68	94,1	46,8
69	95,1	47,5
70	96,9	47,8
71	96,7	48,5
72	97,6	49,4
73	98,7	50,0
74	98,9	50,4
75	99,7	51,4

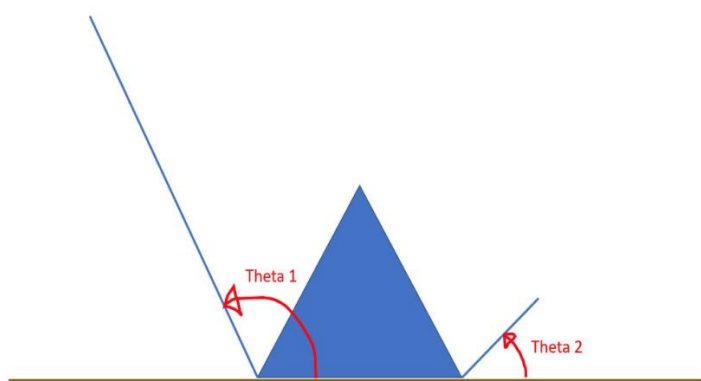


Fig. 29: Dati altezza sole e angoli

Fig. 30: Indicazione angoli degli specchi

Questa procedura, per una buona accuratezza va reiterata ogni 15 minuti stando ben accorti anche al posizionamento degli specchi in direzione dell'azimuth solare, ruotando il forno manualmente essendo provvisto di ruote girevoli al di sotto della base che consentono anche un ulteriore isolamento tra forno e piano di appoggio.

3 SETUP DEL BANCO DI PROVA

3.1 Premessa

Quando si effettuano i test, per prima cosa bisogna disporre il banco prova, in questo modo è possibile misurare tutti i parametri necessari per ogni intervallo di tempo scelto.

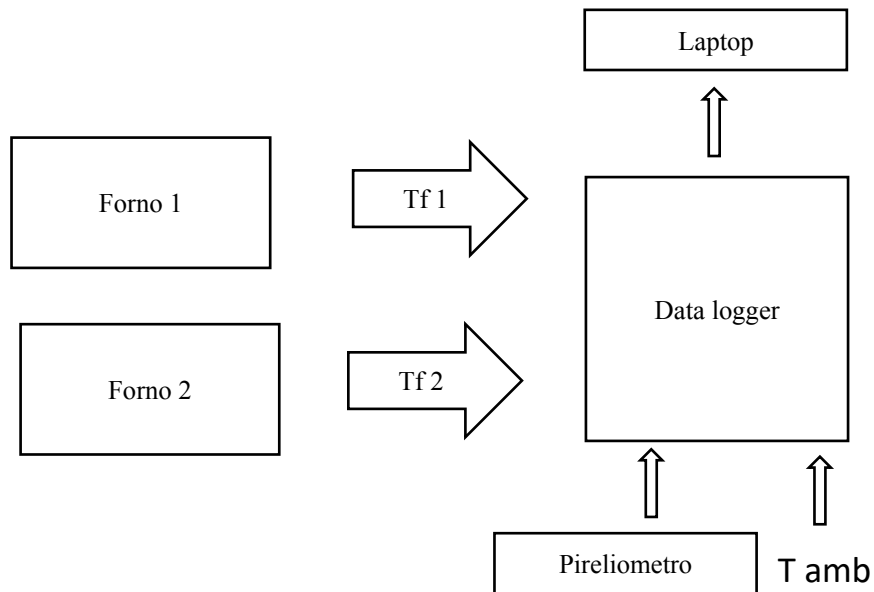
Il banco prova ideato per questa campagna sperimentale è così composto:

- un pireliometro;
- un computer;
- termocoppie per misurare le temperature dei vari elementi;
- un data logger
- una centralina meteo per i dati relativi alla velocità del vento
- un sistema di schermatura per il vento.

L'intervallo di acquisizione di registrazione è fissato ad ogni secondo.

Poiché i test vengono svolti all'aperto, il banco prova deve ogni volta essere montato e successivamente smontato alla fine delle prove.

Lo schema principale è così rappresentato:



*Fig. 31: schema di funzionamento del banco prova*Dove:

- Tf: temperatura del fluido studiato (acqua o glicerina) (°C);
- Tamb: temperatura ambiente (°C)
- DNI: radiazione solare diretta (W/m²)

Di seguito vengono presentati più nel dettaglio i vari elementi.

3.2 Pireliometro

Il pireliometro è uno strumento che permette di misurare l'intensità della radiazione solare diretta. Nel corso delle analisi trattate in questo elaborato è stato usato un pireliometro dell'azienda americana fornitrice di attrezzature per l'energia solare chiamata "Eppley Laboratory Inc" e il modello è il "NIP" (Normal Incidence Pyrheliometer).

Il pireliometro è sostanzialmente composto da un corpo nero che assorbe la radiazione solare, riscaldandosi; attraverso un sensore si misura la temperatura di questo corpo nero, dalla quale si può risalire alla radiazione solare incidente, che viene fornita al computer in W/m^2 grazie ad una precisa ed accurata calibrazione dello strumento.



Fig. 32: il pireliometro usato

Come si può vedere in figura, la flangia superiore presenta un piccolo foro che consente di allineare lo strumento attraverso la proiezione che si ottiene sulla flangia inferiore. Il pireliometro è poi montato su un inseguitore solare, che permette allo strumento di inseguire il sole durante l'arco della giornata.

Di seguito vengono illustrate le caratteristiche tecniche dello strumento fornite dal costruttore.

Sensibilità	$8 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Impedenza	200Ω
Dipendenza dalla temperatura	$\pm 1 \%$ tra $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ e $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_{amb})
Linearità	$\pm 0.5\%$ da 0 a $1400 \text{ W}/\text{m}^2$
Tempo di risposta	1 secondo
Peso	2.3 kg
	Lunghezza 28 cm

Tabella 7: caratteristiche tecniche pireliometro NIP

La radiazione atmosferica può essere distinta in due regioni:

- la regione solare, detta anche “delle onde corte”, compresa tra 0.3 e 3 μm di lunghezza d'onda;
- la regione terrestre (detta anche “delle onde lunghe”), compresa tra 4 e 100 μm di lunghezza d'onda.

Il pireliometro si occupa della misura della radiazione ad onde corte, nella quale ricade approssimativamente il 99% dell'energia solare.

3.2.1 Struttura del pireliometro

Il pireliometro "NIP" incorpora una termopila a filo avvolto alla base del tubo; il rapporto tra il diametro di apertura e la lunghezza è di 1/10, sottendendo un angolo di 5° 43' 30".

L'interno del pireliometro (costituito da un tubo di ottone) è nero, per permettergli di assorbire quanta più energia possibile. Il tubo è riempito di aria secca a pressione atmosferica e sigillato alle estremità.

3.3 Termocoppie

Una termocoppia è un sensore per la misurazione della temperatura che si basa sull'effetto Seebeck, principio per cui una barra metallica sottoposta a un gradiente di temperatura comporta una differenza di potenziale ai capi della barra stessa, la cui entità è di alcuni μV per Kelvin, a seconda dei materiali usati

E' attraverso il sistema di acquisizione che avviene una conversione della differenza di potenziale in temperatura, che può essere visualizzata nello schermo del computer.

Le termocoppie vengono classificate in base al materiale da cui sono composte e chiamate con delle lettere (R, S, B, J, T, ecc); sono strumenti molto diffusi e utilizzati, specialmente nelle misurazioni in laboratorio, perché sono economici, intercambiabili e misurano ampi range di temperatura. Non sono strumenti precisissimi ma si può arrivare ad un livello di accuratezza minore di un grado Celsius; la loro non perfetta linearità costituisce un altro svantaggio.

3.3.1 Affidabilità delle termocoppie

Quello dell'affidabilità delle termocoppie è un problema complesso e strettamente legato al tipo di misurazione che si esegue e allo stato di conservazione; si potrebbe avere perdita di precisione, ad esempio, se si sottopone la termocoppia a ripetuti sforzi meccanici o se la si espone ad agente corrosivi. Per questi motivi è meglio cambiare la termocoppia dopo un certo numero di misurazioni, così da mantenere l'affidabilità sempre ad un buon livello.

3.3.2 Termocoppie usate: tipo T

Le termocoppie usate in quest'analisi sono di tipo T, il cui nome originale era Rame-Costantana. Queste termocoppie possono lavorare nell'intervallo di temperature di -250 °C e 400 °C ma il loro funzionamento è eccellente nel range di temperature compreso tra -200 °C e 200 °C.

Di seguito vengono riportati i dati tecnici di una termocoppia di tipo T forniti da un costruttore. [14]

Materiali	Conduttore positivo	Rame
	Conduttore negativo	Rame-Nickel
T misurata	Uso continuo	Da -185 °C a 300 °C
	Breve durata	Da -250 °C a 400 °C
Tolleranze	Tra ± 0.004 e ± 0.015 (espressa come scostamento in gradi celsius)	

Tabella 8: dati tecnici di una termocoppia di tipo T

3.4 Computer e acquisitore

Le termocoppie (con cui si misurano la temperatura ambiente, la temperatura del fluido in esame, ecc.) e il cavo in uscita dal pireliometro (per la misura della DNI) vengono collegate all'acquisitore.

L'acquisitore usato è un prodotto della "Pico Technology", azienda britannica che produce sensori per la diagnostica delle strumentazioni delle automobili; il prezzo è relativamente basso (circa 430 euro) e la risoluzione decisamente buona.



Fig. 33: acquisitore con connettori inseriti

Vengono di seguito riportate le specifiche tecniche fornite dal costruttore:

Numero di canali	8
Incertezza sulla Temperatura	$\pm 0.2\%$ e $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Incertezza sul voltaggio	$\pm 0.2\%$ e $\pm 10\text{ }\mu\text{V}$
Protezione sul sovraccarico	$\pm 30\text{ V}$
Voltaggio in ingresso	$\pm 70\text{ mV}$
Frequenza in lettura	Fino a 10 al secondo
Connettori in ingresso	Termocoppia in miniatura
Connessione al PC	USB
Dimensioni	201*104*34 mm

Tabella 9: scheda tecnica acquisitore

Gli 8 canali dell'acquisitore sono stati così configurati:

- CH 1: DNI (radiazione solare);
- CH 2: T_{amb} (configurato per termocoppia di tipo T);
- CH 3: Temperatura forno non schermato;
- CH 4: Temperatura forno schermato;
- CH 5,6,7,8: Non utilizzati

L'acquisitore viene fornito dal suo costruttore insieme a uno specifico software per l'utilizzo dello strumento; mediante questo programma è possibile osservare l'andamento delle temperature in funzione del tempo, il valore della DNI in ogni istante e i vari canali con i rispettivi dati in ingresso.

Terminata la prova, i dati vengono esportati dal programma e studiati su un foglio Excel per essere rielaborati e dove necessario, corretti; infine vengono realizzati i grafici e studiati i parametri fondamentali (che verranno presentati nel prossimo capitolo).

3.5 Sistema schermatura dal vento

Come precedentemente anticipato, uno dei due forni è stato munito di un sistema di schermatura per il vento per determinare di quanto questa variabile sia incidente nei risultati finali.

Il sistema di schermatura è stato semplicemente realizzato assemblando dei pannelli in plexiglass su degli appositi sostegni verticali, facili da rimuovere e spostare.



Fig. 34 e 35: Sistema schermatura forni

3.5.1 Osservazione sul vento

Il vento è una variabile incontrollabile di grande impatto e per questo è importante considerarla.

Nel caso di un forno con una camera di cottura non isolata termicamente come il Newton Solar Oven, il fattore vento incide notevolmente in quanto asporterà una discreta quantità di calore.

Di seguito, nelle tabelle delle varie tipologie di test, verranno riportati i dati del vento rilevati per ogni giorno di prova.

Questo è stato possibile attraverso una centralina di rilevazione che si trova sul terrazzo del "DIISM". Più precisamente è stato possibile ricavare i dati nelle date 31 maggio, 1-4-9-22-29 giugno 2021.

Nei giorni in cui la centralina non era attiva, è stato comunque possibile ricavare gli altri dati vento, dalla centralina del porto turistico di Ancona "Marina Dorica". Più precisamente nelle date 3-17-30 giugno 2021.

Il vento è un elemento molto importante da considerare quando si svolgono delle analisi sperimentali sui forni solari.

Un elemento da non sottovalutare è sicuramente la forma del forno relativamente alla direzione del vento: nel caso ad esempio del NSO schermato, il vento proveniente da dietro lo specchio primario verrà totalmente o parzialmente schermato, mentre quello proveniente da davanti o lateralmente impatterà sul forno, asportando calore.

4 PARAMETRI FONDAMENTALI

Prima di introdurre la descrizione dei parametri fondamentali è bene ricordare quali tipi di prove sono state svolte, precisamente:

- **A VUOTO**: in questa fase è stata registrata la temperatura della piastra, la temperatura ambiente e la radiazione solare diretta;
- **A CARICO**: in questo caso all'interno della camera di cottura è stata posizionata la pentola descritta precedentemente con dei fluidi di prova al suo interno.

Nel dettaglio le prove a carico durante la campagna sperimentale sono state effettuate utilizzando H₂O e glicerina:

- ***Ad Acqua***: Le prove con acqua sono un buon metodo per confrontare le proprie analisi con quelle degli altri ricercatori; l'acqua è inoltre un fluido ben conosciuto e comune. È interessante notare come man mano che ci si avvicina alla temperatura di ebollizione (100 °C), la curva della temperatura dell'acqua si appiattisce: più ci si avvicina all'evaporazione (passaggio di fase) e maggiore è la quantità di calore necessario per aumentare di temperatura. Nelle seguenti prove verrà tenuto in considerazione l'intervallo di temperatura del fluido testato compreso tra 40 °C e 90 °C per il calcolo dei vari parametri.

In questa fase sono state registrate la temperatura dell'acqua (T_w) nella pentola (in quantità di 2 kg), la temperatura ambiente e la radiazione solare diretta;

- **Con Glicerina:** Nelle seguenti prove verrà tenuto in considerazione l'intervallo di temperatura del fluido testato compreso tra 40 °C e 110 °C per il calcolo dei vari parametri.

In questa fase sono state registrate le temperature della glicerina (T_w) nella pentola (in quantità di 2 kg), la temperatura ambiente e la radiazione solare diretta.

4.1 Introduzione

Una volta affermatosi lo sviluppo di nuove tecniche e strumenti di cottura più sostenibili e a basso impatto ambientale, il passo successivo è stato quello di ricavare dei parametri standard per poter studiare l'efficienza dei vari forni solari e fornire uno strumento di confronto.

Di seguito verranno presentati i parametri usati in questo elaborato per caratterizzare i due prototipi di Newton Solar Oven:

- Prima e seconda figura di merito: F_1 ed F_2 [15];
- Tempo di ebollizione caratteristico e specifico: t_c e t_s [15];
- Efficienza utilizzabile: η_u [16];
- Tempo di riscaldamento: Δt ;
- COR [17];
- Temperatura massima raggiungibile dal fluido: T_{fx} [17];
- Potenza di Funk: P e P_s [18]

4.2 Prima e seconda figura di merito: F1 ed F2

La prima figura di merito viene calcolata studiando le prestazioni del forno a vuoto (quindi senza fluido o cibo) ed è data dalla seguente formula:

Dove:

$$F_1 = \frac{T_{ps} - T_{amb,corr}}{DNI_{corr}}$$

- T_{ps} = temperatura massima raggiunta dalla piastra all'interno del forno (dove viene posta la pentola con il cibo o il fluido studiato) [°C];
- $T_{amb,corr}$ = temperatura dell'ambiente misurata nel momento in cui si raggiunge la massima temperatura della piastra [°C];
- DNI_{corr} = radiazione solare misurata nel momento in cui si raggiunge la massima temperatura della piastra [W/m²].

F1 è un parametro che rappresenta la stagnazione del forno, ovvero il punto di equilibrio tra il calore accumulato dall'assorbitore e quello disperso dal forno.

La seconda figura di merito è data dalla seguente formula:

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot m_f \cdot C_p}{A_a \cdot \Delta t} \cdot \ln \left[\frac{1 - \left(\frac{1}{F_1}\right) \left(\frac{T_{f0} - T_{amb,m}}{DNI_m}\right)}{1 - \left(\frac{1}{F_1}\right) \left(\frac{T_{f1} - T_{amb,m}}{DNI_m}\right)} \right]$$

Dove gli elementi T_{f0} e T_{f1} rappresentano rispettivamente la temperatura iniziale del fluido (o comunque quella più bassa nell'intervallo di temperature in esame) e la temperatura finale del fluido (o comunque quella più alta nell'intervallo di temperature in esame) e Δt è espresso in secondi.

Mullick ha fissato dei limiti raccomandati entro cui effettuare le misurazioni:

- L'esperimento dovrebbe essere effettuato tra le 10.30 e le 13.30;
- L'intensità della radiazione solare dovrebbe essere maggiore o uguale a 600 W/m^2 ;
- La prova dovrebbe essere condotta con il massimo carico del forno;

4.3 Tempo di ebollizione caratteristico e specifico t_c e t_s

Il tempo specifico è dato dalla formula:

$$t_s = \frac{\Delta t \cdot A_a}{m_f}$$

in cui tutti gli elementi sono stati illustrati in precedenza. Il tempo specifico viene espresso in $[\text{h m}^2/\text{kg}]$ e rappresenta il tempo richiesto per l'ebollizione di 1 kg di acqua con un forno solare con un'area di apertura di 1 m^2 .

Il tempo caratteristico è dato dalla formula:

$$t_c = \frac{t_s \cdot DNI_m}{DNI_{rif}}$$

dove l'unico elemento non ancora illustrato è DNI_{rif} , che rappresenta la radiazione solare di riferimento, assunta pari a 900 W/m^2 . Grazie al tempo caratteristico si possono confrontare diversi forni solari esposti a differenti livelli di radiazione solare.

4.4 Efficienza utilizzabile η_u

Questo parametro rappresenta il rapporto tra il calore immagazzinato e quello fornito dalla radiazione solare (è quindi un valore adimensionale); è dato dalla seguente formula:

$$\eta_u = \frac{Q_F}{Q_{in}}$$

Dove:

- $Q_F = m_f \cdot C_p \cdot \Delta T$ [J]

Dove:

- m_f = massa di fluido usato [kg];
- C_p = calore specifico del fluido usato [kJ/KgK];
- ΔT = intervallo di temperatura preso in esame (nel caso dell'acqua l'intervallo di temperatura studiato è sempre quello compreso tra 40 °C e 90 °C).

- $Q_{in} = DNI_m \cdot A_a \cdot \Delta t$ [J]

Dove:

- $DNI_m = DNI$ media registrata durante la prova [W/m^2];

- A_a = area di apertura [m^2];
- Δt = intervallo di tempo di riscaldamento [h].

4.5 Tempo di riscaldamento Δt

Questo parametro rappresenta il tempo necessario al fluido per variare la sua temperatura di un certo intervallo. Una volta misurato il numero di secondi necessario per variare la sua temperatura, è sufficiente dividerlo per 3600 andando ad ottenere così il numero di ore necessario.

4.6 COR

La procedura proposta da Lahkar et al. (2012), permette di calcolare l'efficienza termica η avvalendosi del confronto tra i dati sperimentali e l'equazione di Hottel -Whiller- Bliss per i forni solari.

Graficando le efficienze termiche calcolate al par. 4.4, per intervalli di tempo della prova di 300 secondi, rispetto al termine $(T_f - T_{amb})/DNI$ e operando una regressione lineare, si può stabilire un'uguaglianza tra i termini $F' \eta_0$ e $F' U_L / C$ e i coefficienti del fitting.

Gli stessi coefficienti della retta di regressione così ottenuti, possono essere impiegati per ricavare un altro parametro ovvero il "cooker opto-thermal ratio" o COR.

Questo parametro è definito come il rapporto tra l'efficienza ottica per la concentrazione ($\eta_0 C$) diviso il fattore di perdita di calore (U_L).

Un alto valore di ($\eta_0 C$) e un basso valore di (U_L) sono necessari per ottimizzare le prestazioni.

$$COR = \eta_0 C / U_L$$

4.7 T_{fx}

Questo parametro indica la temperatura massima raggiungibile dal fluido (°C)

$$T_{fx} = T_{amb,av} + (F' \eta_0 DNI_{,av} / F' U_L / C)$$

Dove:

- $T_{amb,av}$ = temperatura media ambientale (°C)
- $F' \eta_0$ = fattore di efficienza ottica
- $DNI_{,av}$ = radiazione solare totale media sul piano di apertura (W/m^2)
- $F' U_L$ = fattore di Perdita di calore complessivo (W/m^2K)
- C = rapporto di concentrazione

4.8 *Indicazioni generali*

Nel 1997 un comitato internazionale si è riunito per stabilire delle linee guida nella conduzione dei test sui forni solari; di seguito verranno elencate le più importanti tra queste indicazioni generali [26], che furono divise in due categorie: le variabili non controllabili e quelle controllabili.

4.8.1 Variabili non controllabili

4.8.1.1 Vento

La velocità del vento durante la prova dovrebbe essere inferiore a 1 m/s, se è maggiore o uguale a 2.5 m/s per più di 10 minuti il test non è valido; questo a causa della grande perdita di calore che subisce un corpo sottoposto a convezione forzata.

4.8.1.2 Temperatura ambiente

La temperatura ambiente dovrebbe essere compresa tra 20 °C e 35 °C; questo perché l'efficienza di un forno solare è strettamente legata alla temperatura ambiente, che, se al di fuori di questo intervallo, è una condizione atmosferica non facilmente replicabile.

4.8.1.3 Temperatura del contenuto della pentola

La temperatura dell'acqua dovrebbe essere misurata tra 40 °C e 90 °C.

Si è scelto un intervallo in cui:

- Il punto di partenza sia leggermente superiore alla temperatura ambiente, o non ci sarebbero perdite di calore se fosse in equilibrio con l'ambiente circostante;
- Il punto di arrivo sia leggermente distante dall'ebollizione perché la temperatura di ebollizione varia con l'altitudine e perché quando l'acqua si avvicina al suo punto di ebollizione, il calore latente di vaporizzazione

fa sì che si manifesti una diminuzione apparente della potenza del forno (ridurre il limite superiore consente di evitare anomalie nei dati raccolti).

4.8.1.4 Radiazione solare

Il test dovrebbe venire scartato in caso di:

- Una variazione della radiazione solare maggiore di 100 W/m^2 nell'arco di 10 minuti;
- Radiazione solare non contenuta nell'intervallo di 450-1100 W/m^2 .

Questo per evitare grandi sbalzi nella radiazione (che potrebbero portare il forno a subire un effetto termico inerziale) e per mantenere la radiazione in un intervallo facilmente accessibile nella maggior parte delle località.

4.8.2 Variabili controllabili

Le variabili controllabili sono:

- Il carico di acqua: dovrebbe essere di 7 kg/m^2 di area di apertura e dovrebbe essere ben distribuita nel forno;
- Inseguimento: il forno dovrebbe essere ruotato circa ogni 15-30 minuti; un forno parabolico potrebbe richiedere una maggiore frequenza di rotazione;
- Le termocoppie usate dovrebbero misurare la temperatura dell'acqua a circa 1 cm dal fondo della pentola, in una posizione centrale.

5 TEST SPERIMENTALI

5.1 Premessa

Le analisi si sono svolte presso il terrazzo del laboratorio del “DIISM” con il forno solare di tipo Newton descritto in precedenza nei mesi di maggio e giugno 2021.

5.2 Area di apertura

L’area di apertura di un forno solare viene calcolata considerando il sole perfettamente sopra il forno (cosa che accade solo alle 12.00 all’equatore), questo metodo è utile per stabilire un parametro comune a tutte le località; si sistemano allora gli specchi con la giusta inclinazione per far sì che i raggi solari siano riflessi all’interno della camera di cottura e si misura l’area che si può osservare da una vista dall’alto.

L’area di apertura è composta dall’area degli specchi (A_m , da “mirror” che in inglese significa specchio) e dall’area della superficie del box (A_g , da “glass” che in inglese significa vetro).

Essendo forni a geometria variabile è bene ricordare che l’area di apertura non sarà mai la medesima, ma si modificherà di volta in volta andando ad inclinare la posizione degli specchi circa ogni 15 minuti come descritto in precedenza.

A titolo dimostrativo viene mostrato un esempio nelle seguenti immagini di come è stata calcolata l'area di apertura.

5.2.1 Area di apertura del "NSO"

La procedura viene eseguita partendo dalla vista laterale con le giuste inclinazioni degli specchi per ricavare la vista dall'alto per poi tracciare l'area di apertura.

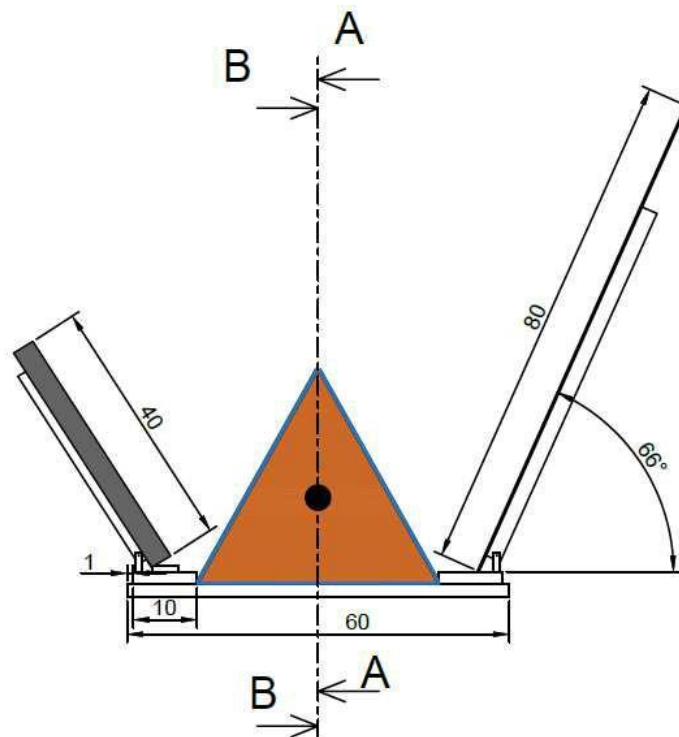


Fig. 36: vista laterale del "NSO"

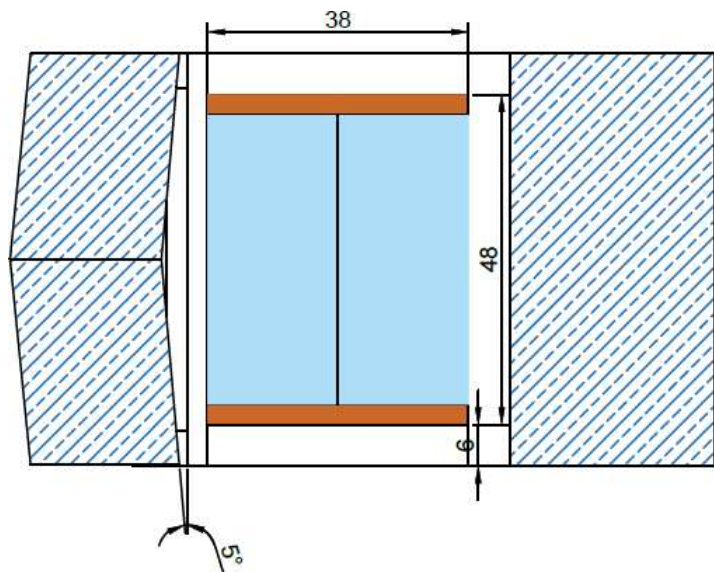


Fig. 37: vista dall'alto del "NSO"

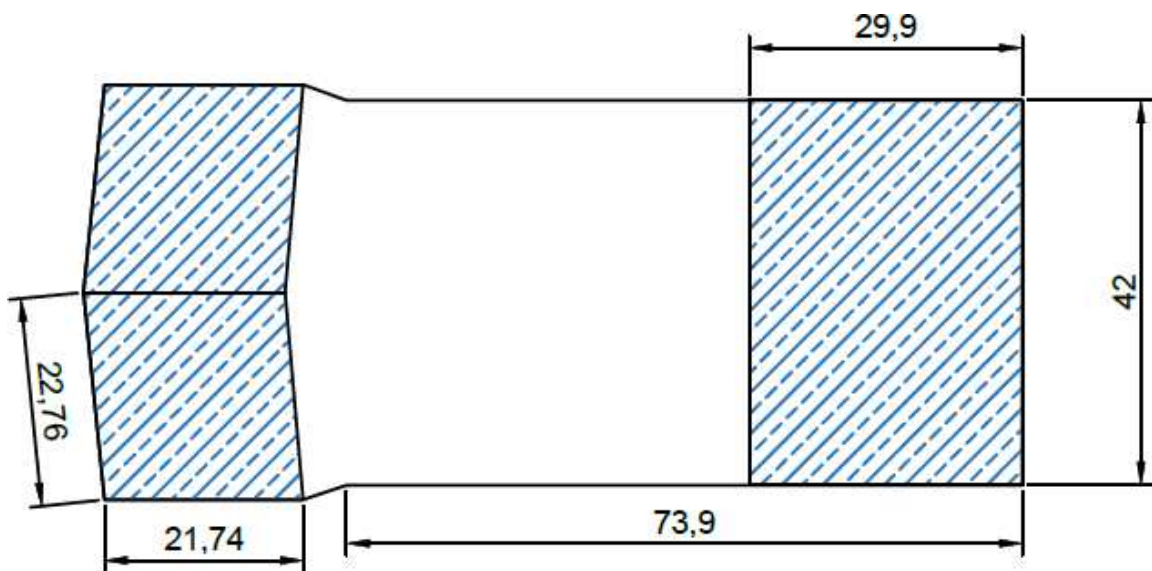


Fig. 38: area di apertura del "NSO"

In figura sono state mostrate con due colori diversi le due aree:

- In azzurro la parte di area degli specchi (A_m), del valore di 0.0991 m^2 per lo specchio secondario e 0.1255 m^2 per lo specchio primario;
- In bianco la parte di area del box (A_g), del valore di 0.2099 m^2 .

L'area di apertura ottenuta del "NSO" è quindi pari a 0.4347 m^2 .

5.2.2 Prove a vuoto

In queste prove sono state registrate la temperatura massima della piastra ($T_{a,max}$ °C), la temperatura ambiente (T_{amb} °C), la radiazione solare diretta (DNI W/m^2); successivamente è stata calcolata l'area di apertura media degli specchi ($A_{a,av}$ m^2) e il parametro F1.

I valori di F1 così ottenuti dai tre test a vuoto per il Newton e per il Newton schermato sono stati mediati e i due parametri di F1 medio così ottenuti, sono stati utilizzati nelle prove a carico per il calcolo della seconda figura di merito F2.

Le prove sono state svolte in data 31 maggio, 3 e 30 giugno 2021.

La dicitura "N" sta ad indicare il forno non provvisto di schermatura per il vento, viceversa l'altro "N schermato".

Il primo test svolto il 31 maggio è iniziato alle ore 12.10 e terminato alle ore 14.50 con una durata complessiva di 2 ore e 40 minuti.

	Test 1	Test 1
Data	31/05/2021	31/05/2021
Tipo di forno	N schermato	N
Hsun,av (°)	65.28	65.28
θ1,av (°)	92.2	92.2
θ2,av (°)	44.93	44.93
Aa,av (m ²)	0.425	0.425
Tamb (°C)	19.75	20.56
DNI (W/m ²)	923.99	922.72
Vm vento (m/s)	3.058	3.058
Ta,max (°C)	126.12	117.87
F1 (°C/(W/m ²))	0.115	0.105

Tabella 10: calcolo parametri Test 1- A vuoto (prova 31/05/2021)

Il secondo test svolto il 3 giugno è iniziato alle ore 14.40 e terminato alle ore 15.40 con una durata complessiva di 1 ora.

	Test 2	Test 2
Data	03/06/2021	03/06/2021
Tipo di forno	N schermato	N
Hsun,av (°)	56.22	56.22
θ1,av (°)	84.9	84.9
θ2,av (°)	38.83	38.83
Aa,av (m ²)	0.401	0.401
Tamb (°C)	30.05	29.70
DNI (W/m ²)	866.71	865.17
Vm vento (m/s)	4.116	4.116
Ta,max (°C)	137.47	137.36
F1 (°C/(W/m ²))	0.124	0.124

Tabella 11: calcolo parametri Test 2- A vuoto (prova 03/06/2021)

Il terzo test svolto il 30 giugno è iniziato alle ore 14.15 e terminato alle ore 15.15 con una durata complessiva di 1 ora.

	Test 3	Test 3
Data	30/06/2021	30/06/2021
Tipo di forno	N schermato	N
Hsun,av (°)	61.5	61.5
$\theta_{1,av}$ (°)	89.3	89.3
$\theta_{2,av}$ (°)	42.33	42.33
Aa,av (m ²)	0.421	0.421
Tamb (°C)	32.60	33.40
DNI (W/m ²)	859.29	858.67
Vm vento (m/s)	8.283	8.283
Ta,max (°C)	133.95	129.07
F1 (°C/(W/m ²))	0.118	0.111

Tabella 12: calcolo parametri Test 3- A vuoto (prova 30/06/2021)

Come anticipato, indichiamo ora il valore di F1 medio dei tre test.

- F1,av (Newton): 0.119 ($^{\circ}\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$)
- F1,av (Newton schermato): 0.113 ($^{\circ}\text{C}/(\text{W}/\text{m}^2)$)

Come esempio di prove a vuoto, viene riportato il grafico dell'andamento della temperatura ambiente e della DNI registrate durante la prova del 30 giugno.

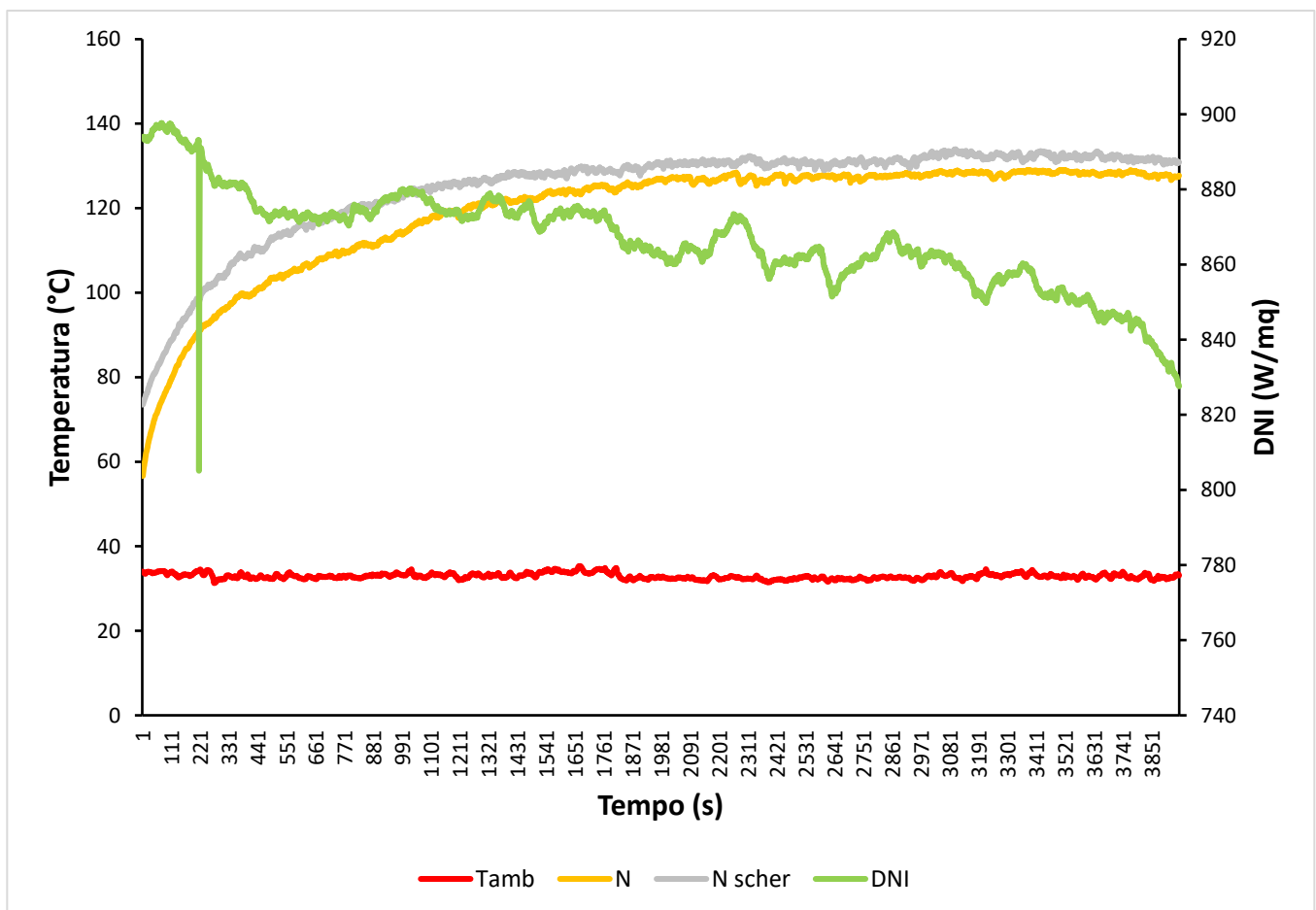


Fig. 39: grafico DNI e Tamb al variare del tempo - A vuoto (prova 30/06/2021)

5.2.3 Prove con acqua

Le prove con acqua sono un buon metodo per confrontare le proprie analisi con quelle degli altri ricercatori; l'acqua è inoltre un fluido ben conosciuto e comune. È interessante notare come man mano che ci si avvicina alla temperatura di ebollizione (100 °C), la curva della temperatura dell'acqua si appiattisce: più ci si avvicina all'evaporazione (passaggio di fase) e maggiore è la quantità di calore necessario per aumentare di temperatura.

Come precedentemente per le prove a vuoto, anche per le prove ad acqua, oltre alla prima fase di registrazione diretta di alcuni parametri, ne sono stati successivamente calcolati altri in una seconda fase.

Nelle seguenti prove verrà tenuto in considerazione l'intervallo di temperature compreso tra 40 °C e 90 °C per il calcolo dei vari parametri.

Le seguenti prove sono state eseguite in data 1,9,17,30 giugno 2021.

Il primo test svolto il 1 giugno è iniziato alle ore 10.00 e terminato alle ore 12.40 con una durata complessiva di 2 ore e 40 minuti.

	Test 1	Test 1
Data	01/06/2021	01/06/2021
Tipo di forno	N	N schermato
Hsun,av (°)	58.6	58.6
θ1,av (°)	87.04	87.04
θ2,av (°)	39.59	39.59
Aa,av (m ²)	0.4107	0.4107
mf (Kg)	2	2
DNI,av (W/m ²)	908.4	906.41
Tamb,av (°C)	21.69	21.60
Vm vento (m/s)	3.020	3.020
Δt_h (h)	2.13	2.14
ts (h m ² /kg)	0.44	0.44
t_ch (h m ² /Kg)	0.44	0.44
η,av	0.15	0.15
F2	0.27	0.27
F'η0	0.292	0.302
F'UI/C (W/m ² °C)	2.82	2.98
COR	0.104	0.102
T _{fx} (°C)	115.91	113.65
Ps slope	0.848	0.921
Ps intercept	82.238	85.912

Tabella 13: calcolo parametri Test 1- Acqua (prova 01/06/2021)

Il secondo test svolto anch'esso il 1 giugno è iniziato alle ore 13.15 e terminato alle ore 15.35 con una durata complessiva di 2 ore e 20 minuti.

	Test 2	Test 2
Data	01/06/2021	01/06/2021
Tipo di forno	N	N schermato
Hsun,av (°)	61.55	61.55
Θ1,av (°)	89.05	89.05
Θ2,av (°)	42.18	42.18
Aa,av (m ²)	0.4155	0.4155
mf (Kg)	2	2
DNI,av (W/m ²)	908.93	911.07
Tamb,av (°C)	23.69	23.59
Vm vento (m/s)	3.97	3.97
Δt_h (h)	2.03	1.96
ts (h m ² /kg)	0.42	0.41
t_ch (h m ² /Kg)	0.43	0.41
η,av	0.15	0.16
F2	0.27	0.28
F'η0	0.281	0.337
F'UI/C (W/m ² °C)	2.573	3.543
COR	0.109	0.095
T _{fx} (°C)	122.8	110.29
Ps slope	0.831	1.149
Ps intercept	82.003	98.942

Tabella 14: calcolo parametri Test- 2 Acqua (prova 01/06/2021)

Il terzo test svolto il 9 giugno è iniziato alle ore 10.20 e terminato alle ore 14.00 con una durata complessiva di 3 ore e 40 minuti.

	Test 3	Test 3
Data	09/06/2021	09/06/2021
Tipo di forno	N	N schermato
H _{sun,av} (°)	63.18	63.18
θ _{1,av} (°)	90.46	90.46
θ _{2,av} (°)	43.45	43.45
A _{a,av} (°C)	0.4172	0.4172
m _f (Kg)	2	2
DNI _{av} (W/m ²)	696.92	702.65
T _{amb,av} (°C)	23.76	23.54
V _m vento (m/s)	3.46	3.46
Δt _h (h)	2.83	2.24
t _s (h m ² /kg)	0.59	0.47
t _{ch} (h m ² /Kg)	0.46	0.36
η _{av}	0.14	0.18
F ₂	0.36	0.45
F'η ₀	0.336	0.429
F'UI/C (W/m ² °C)	2.879	3.613
COR	0.117	0.119
T _{fx} (°C)	105.19	106.89
Ps slope	1.263	1.566
Ps intercept	100.743	126.045

Tabella 15: calcolo parametri Test 3- Acqua (prova 09/06/2021)

Il quarto test svolto il 17 giugno è iniziato alle ore 10.30 e terminato alle ore 13.10 con una durata complessiva di 2 ore e 40 minuti.

	Test 4	Test 4
Data	17/06/2021	17/06/2021
Tipo di forno	N	N schermato
Hsun,av (°)	62.96	62.96
$\Theta_{1,av}$ (°)	90.41	90.41
$\Theta_{2,av}$ (°)	43.26	43.26
Aa,av (°C)	0.4190	0.4190
mf (Kg)	2	2
DNI,av (W/m ²)	711.15	711.1
Tamb,av (°C)	30.22	30.21
Vm vento (m/s)	5.391	5.391
Δt_h (h)	1.88	1.89
ts (h m ² /kg)	0.39	0.4
t_ch (h m ² /Kg)	0.31	0.31
$\eta_{,av}$	0.21	0.21
F2	0.41	0.41
F'η0	0.246	0.347
F'UI/C (W/m ² °C)	1.005	2.494
COR	0.244	0.139
T _{fx} (°C)	204.16	129.03
Ps slope	1.561	1.355
Ps intercept	121.73	114.732

Tabella 16: calcolo parametri Test 4- Acqua (prova 17/06/2021)

Il quinto test svolto il 30 giugno è iniziato alle ore 10.10 e terminato alle ore 13.50 con una durata complessiva di 3 ore e 40 minuti.

	Test 5	Test 5
Data	30/06/2021	30/06/2021
Tipo di forno	N	N schermato
H _{sun,av} (°)	62.34	62.34
Θ _{1,av} (°)	89.83	89.83
Θ _{2,av} (°)	42.13	42.13
A _{a,av} (°C)	0.4208	0.4208
m _f (Kg)	2	2
DNI _{av} (W/m ²)	890.99	891.26
T _{amb,av} (°C)	30.33	30.38
V _m vento (m/s)	8.097	8.097
Δt _h (h)	2.6	2.82
t _s (h m ² /kg)	0.55	0.59
t _{ch} (h m ² /Kg)	0.54	0.59
η _{av}	0.12	0.11
F ₂	0.19	0.18
F'η ₀	0.192	0.213
F'UI/C (W/m ² °C)	1.628	2.329
COR	0.118	0.091
T _{fx} (°C)	135.51	111.89
Ps slope	0.678	0.774
Ps intercept	61.322	62.846

Tabella 17: calcolo parametri Test 5- Acqua (prova 30/06/2021)

Come esempio di prove a carico con acqua, viene riportato il grafico dell'andamento della temperatura ambiente e della DNI registrate durante la prova del 9 giugno.

A seguire vengono illustrati anche i grafici relativi al calcolo del COR e della Potenza di Funk per il Newton schermato.

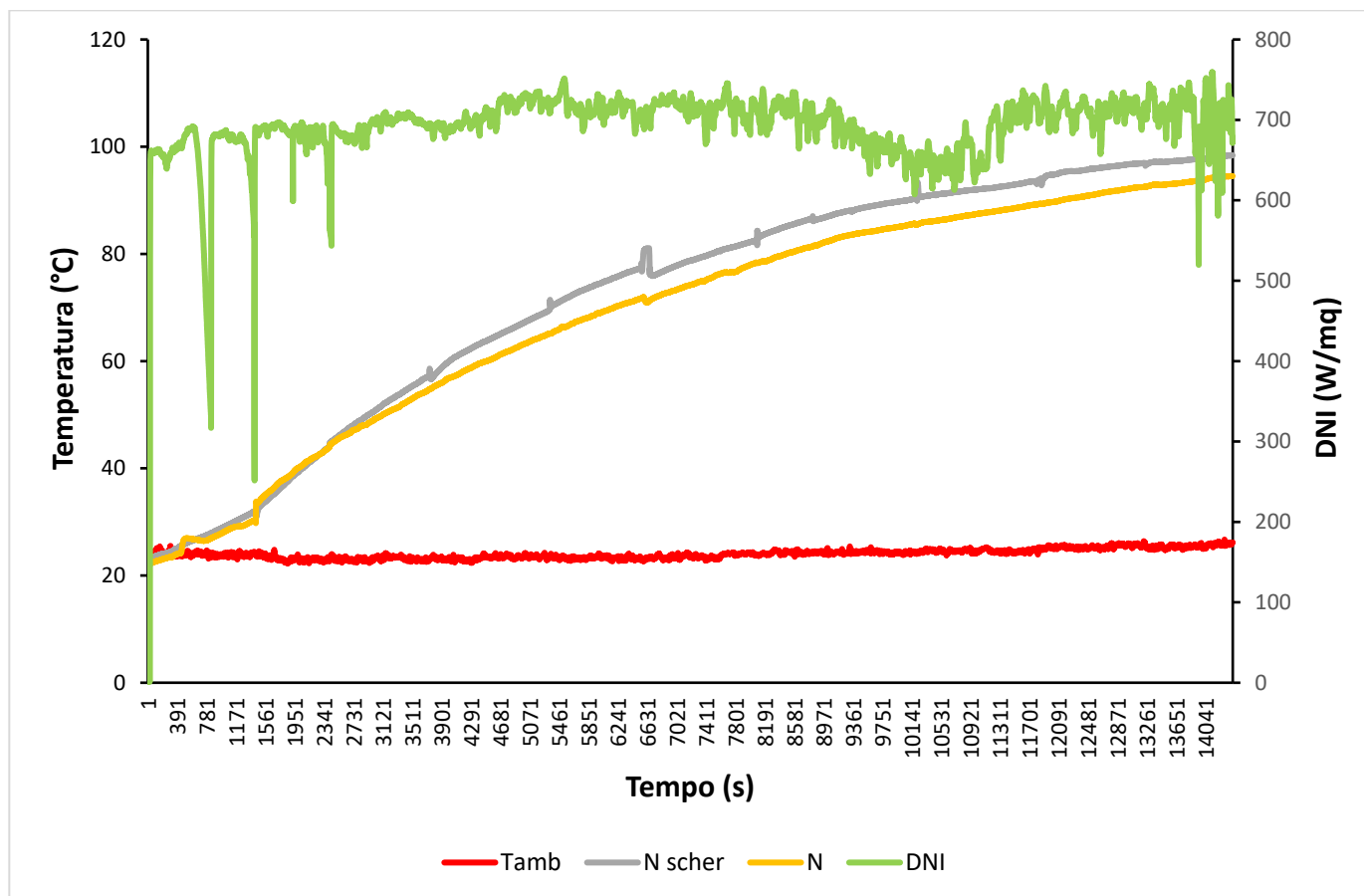


Fig. 40: grafico DNI e Tamb al variare del tempo – Acqua (prova 09/06/2021)

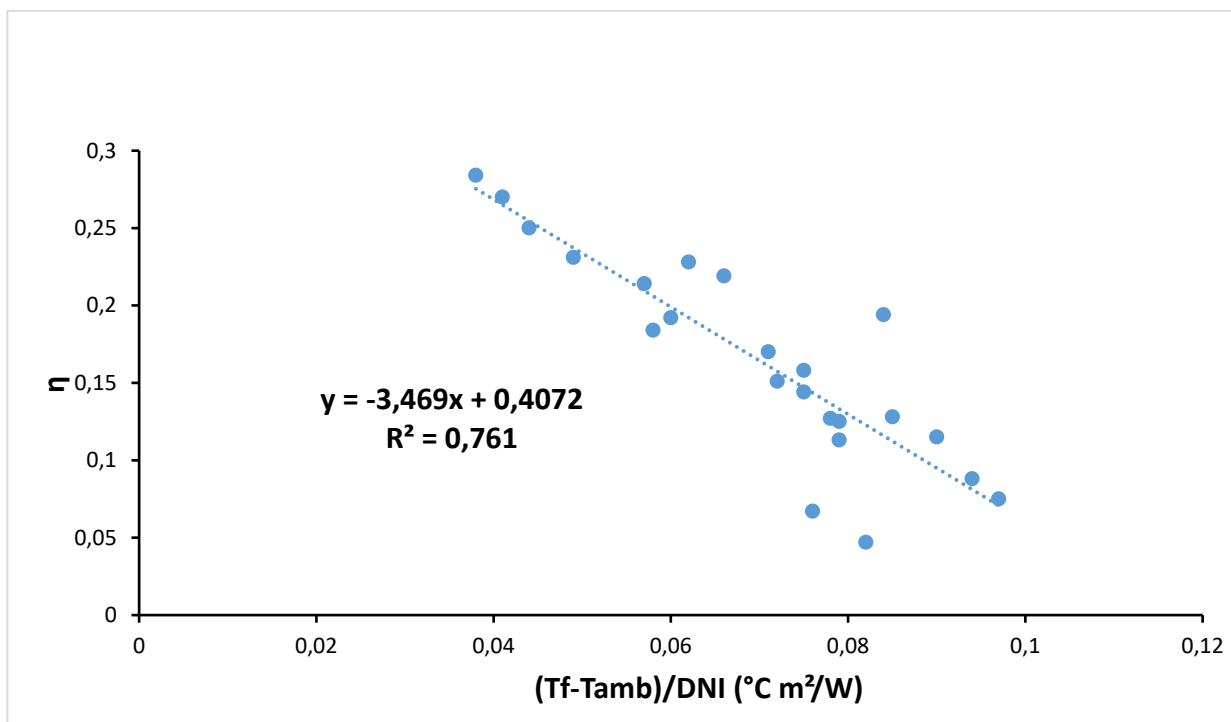


Fig. 41: grafico efficienza termica forno Newton schermato – Acqua (prova 09/06/2021)

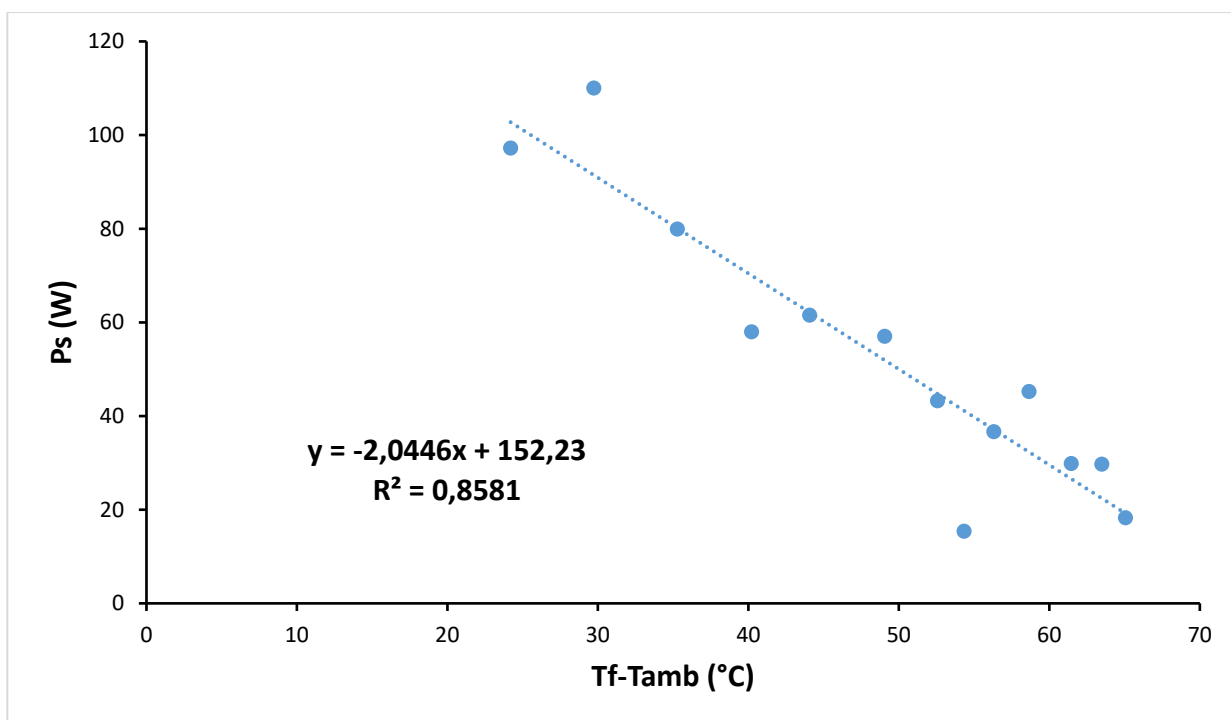


Fig. 42: grafico Potenza di cottura standard in funzione della differenza di temperatura forno Newton schermato – Acqua (prova 09/06/2021)

5.2.4 Prove con glicerina

Come precedentemente per le prove a vuoto e per le prove ad acqua, anche per le prove con glicerina, oltre alla prima fase di registrazione diretta di alcuni parametri, ne sono stati successivamente calcolati altri in una seconda fase.

Nelle seguenti prove verrà tenuto in considerazione l'intervallo di temperature compreso tra 40 °C e 110 °C per il calcolo dei vari parametri.

Le seguenti prove sono state eseguite in data 3,4,22,29 giugno 2021.

Il primo test svolto il 3 giugno è iniziato alle ore 09.50 e terminato alle ore 14.10 con una durata complessiva di 4 ore e 20 minuti.

	Test 1	Test 1
Data	03/06/2021	03/06/2021
Tipo di forno	N	N schermato
H _{sun,av} (°)	60.93	60.93
Θ _{1,av} (°)	88.69	88.69
Θ _{2,av} (°)	40.75	40.75
A _{a,av} (m ²)	0.4142	0.4142
m _f (Kg)	2	2
DNI _{av} (W/m ²)	879.44	871.25
T _{amb,av} (°C)	24.06	23.43
V _m vento (m/s)	2.927	2.927
Δt _h (h)	3.93	2.90
t _s (h m ² /kg)	0.81	0.60
t _{ch} (h m ² /Kg)	0.79	0.58
η _{av}	0.07	0.1
F ₂	0.19	0.27
F'η ₀	0.188	0.246
F'UI/C (W/m ² °C)	1.677	2.134
COR	0.112	0.116
T _{fx} (°C)	122.14	124.27
Ps slope	0.526	0.667
Ps intercept	52.853	69.184

Tabella 18: calcolo parametri Test 1- Glicerina (prova 03/06/2021)

Il secondo test svolto il 4 giugno è iniziato alle ore 09.40 e terminato alle ore 15.00 con una durata complessiva di 5 ore e 20 minuti.

	Test 2	Test 2
Data	04/06/2021	04/06/2021
Tipo di forno	N	N schermato
Hsun,av (°)	60.33	60.33
$\Theta_{1,av}$ (°)	88.4	88.4
$\Theta_{2,av}$ (°)	40.68	40.68
Aa,av (m ²)	0.4128	0.4128
mf (Kg)	2	2
DNI,av (W/m ²)	837.81	846.06
Tamb,av (°C)	26.78	26.94
Vm vento (m/s)	1.52	1.52
Δt_h (h)	3.31	3.12
ts (h m ² /kg)	0.68	0.64
t_ch (h m ² /Kg)	0.64	0.6
$\eta_{,av}$	0.09	0.1
F2	0.24	0.25
F'η0	0.197	0.233
F'UI/C (W/m ² °C)	1.550	2.015
COR	0.127	0.115
T _{fx} (°C)	133.34	124.55
Ps slope	0.614	0.664
Ps intercept	63.229	65.994

Tabella 19: calcolo parametri Test 2 -Glicerina (prova 04/06/2021)

Il terzo test svolto il 22 giugno è iniziato alle ore 10.25 e terminato alle ore 14.45 con una durata complessiva di 4 ore e 20 minuti.

	Test 3	Test 3
Data	22/06/2021	22/06/2021
Tipo di forno	N	N schermato
Hsun,av (°)	63.71	63.71
Θ1,av (°)	90.96	90.96
Θ2,av (°)	43.72	43.72
Aa,av (m ²)	0.4190	0.4190
mf (Kg)	2	2
DNI,av (W/m ²)	766.75	766.25
Tamb,av (°C)	31.05	30.92
Vm vento (m/s)	1.13	1.13
Δt_h (h)	3.57	2.91
ts (h m ² /kg)	0.75	0.61
t_ch (h m ² /Kg)	0.64	0.52
η,av	0.09	0.11
F2	0.26	0.33
F'η0	0.232	0.301
F'UI/C (W/m ² °C)	1.968	2.581
COR	0.118	0.117
T _{fx} (°C)	121.41	120.39
Ps slope	0.706	0.695
Ps intercept	65.420	70.001

Tabella 20: calcolo parametri Test 3- Glicerina (prova 22/06/2021)

Il quarto test svolto il 29 giugno è iniziato alle ore 10.00 e terminato alle ore 13.50 con una durata complessiva di 3 ore e 50 minuti.

	Test 4	Test 4
Data	29/06/2021	29/06/2021
Tipo di forno	N	N schermato
Hsun,av (°)	61.39	61.39
Θ1,av (°)	89.19	89.19
Θ2,av (°)	41.64	41.64
Aa,av (m ²)	0.4155	0.4155
mf (Kg)	2	2
DNI,av (W/m ²)	744.91	745.54
Tamb,av (°C)	32.10	32.12
Vm vento (m/s)	1.73	1.73
Δt_h (h)	2.34	2.44
ts (h m ² /kg)	0.49	0.51
t_ch (h m ² /Kg)	0.40	0.42
η,av	0.15	0.14
F2	0.44	0.42
F'η0	0.300	0.287
F'UI/C (W/m ² °C)	2.164	1.951
COR	0.139	0.147
T _{fx} (°C)	135.45	141.65
Ps slope	1.117	1.227
Ps intercept	97.019	102.895

Tabella 21 : calcolo parametri Test 4 -Glicerina (prova 29/06/2021)

Come esempio di prove a carico con glicerina, viene riportato il grafico dell'andamento della temperatura ambiente e della DNI registrate durante la prova del 3 giugno.

A seguire vengono illustrati anche i grafici relativi al calcolo del COR e della Potenza di Funk per il Newton e il Newton schermato.

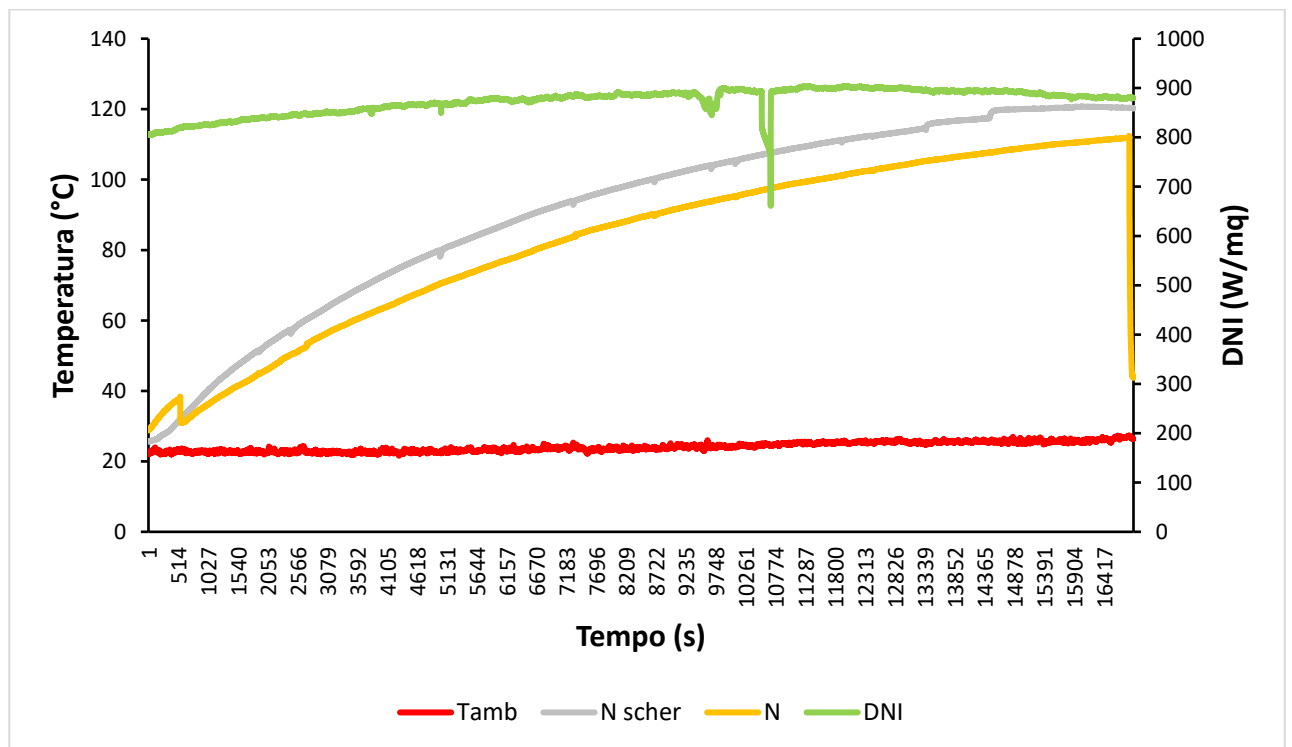


Fig. 43: grafico DNI e Tamb al variare del tempo – Glicerina (prova 03/06/2021)

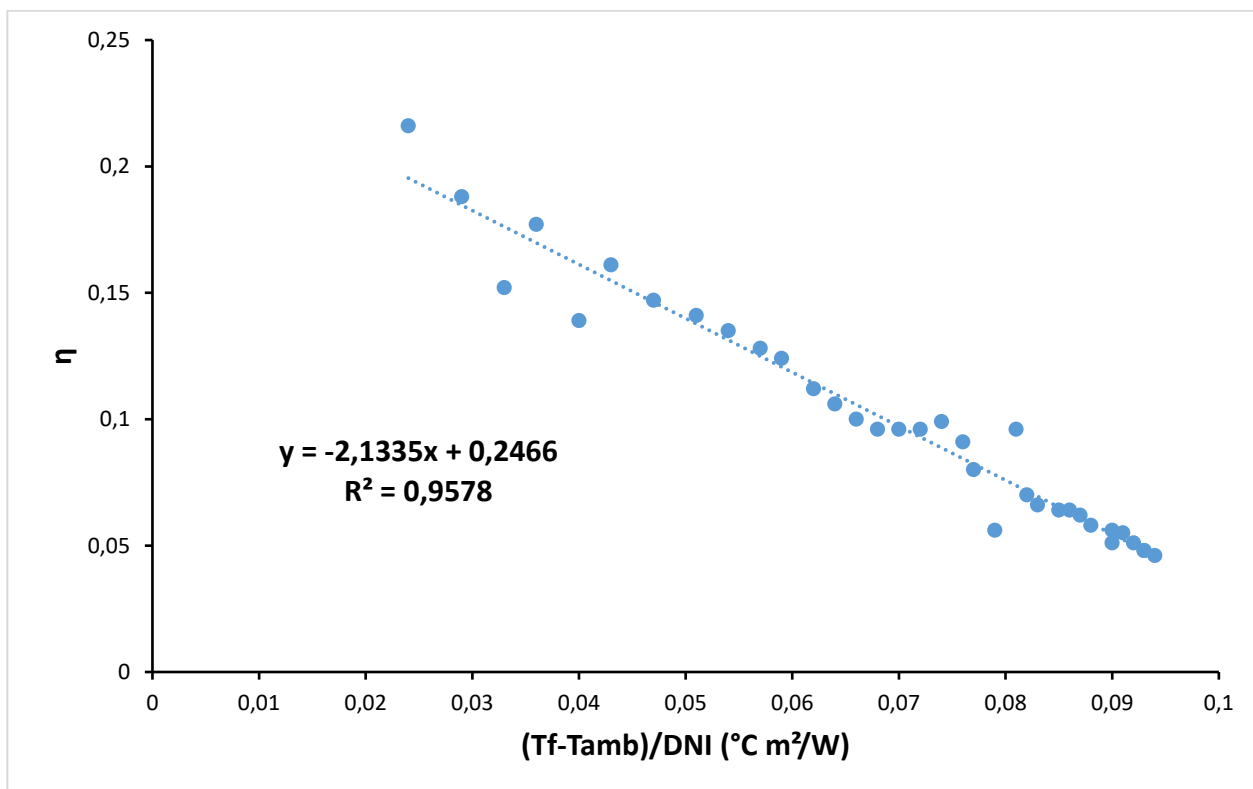


Fig. 44: grafico efficienza termica forno Newton – Glicerina (prova 03/06/201)

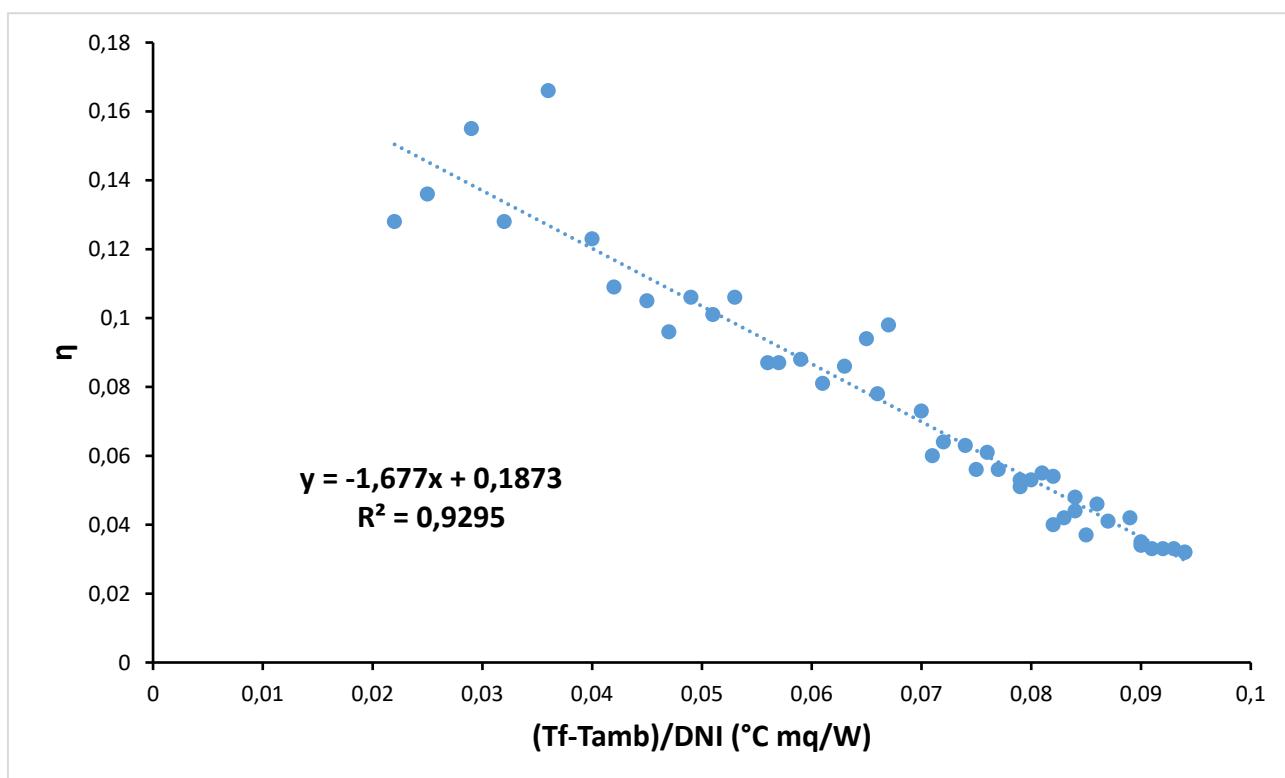


Fig. 45: grafico efficienza termica forno Newton schermato – Glicerina (prova 03/06/2021)

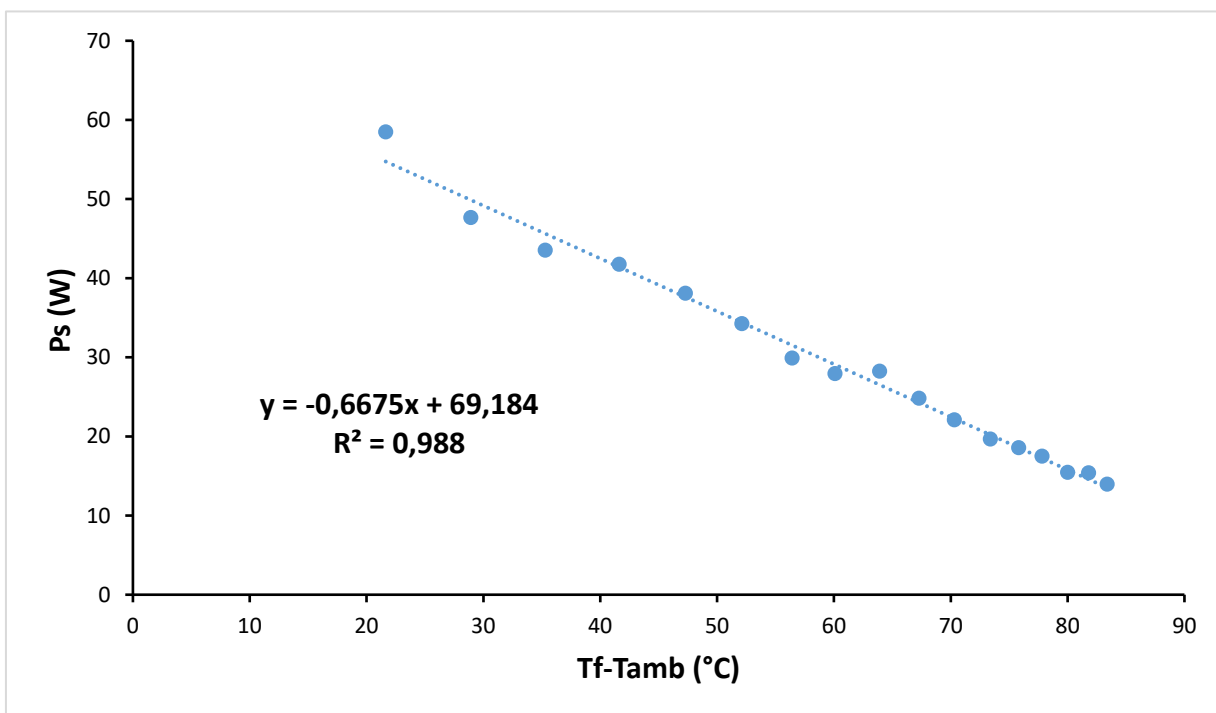


Fig. 46: grafico potenza di cottura standard in funzione della differenza di temperatura forno Newton – Glicerina (prova 03/06/2021)

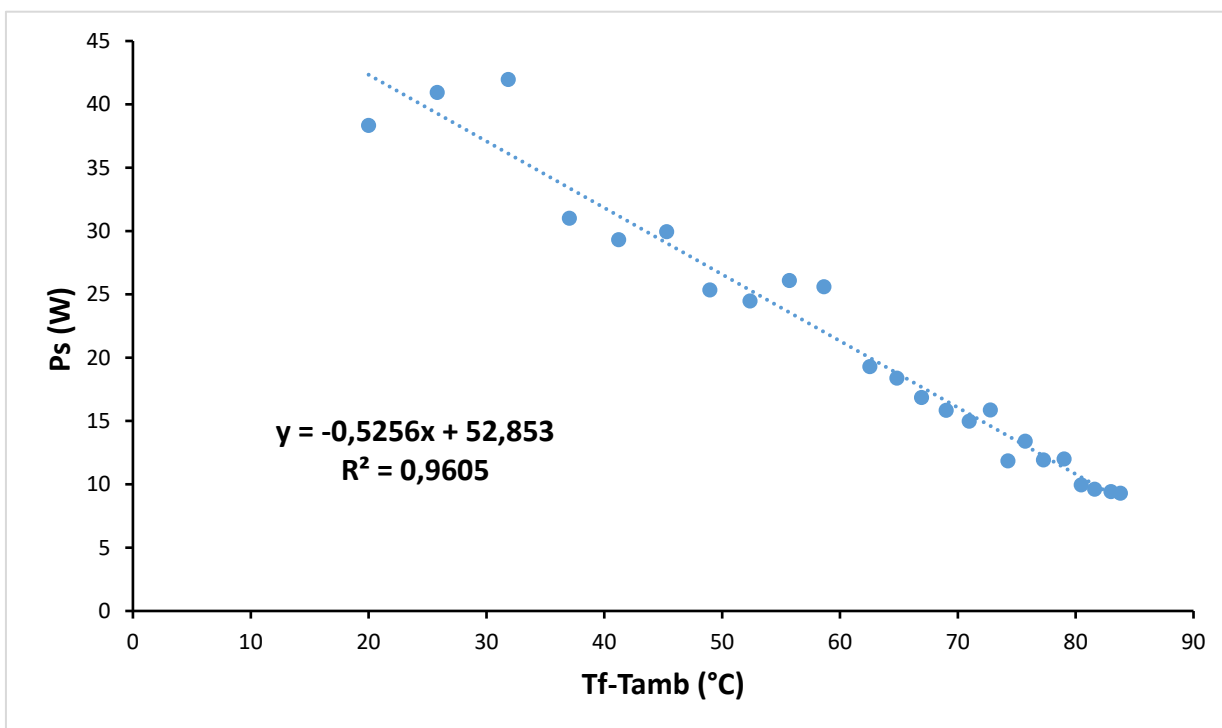


Fig. 47: grafico potenza di cottura standard in funzione della differenza di temperatura forno Newton schermato – Glicerina (prova 03/06/2021)

6 FORNO SOLARE A CONCENTRAZIONE “HELIAC”

Il forno solare HELIAC è stato realizzato secondo le specifiche riportate da Heliac ApS, azienda specializzata nel solare termico.

Grazie all'utilizzo di una speciale lente rettangolare, il forno HELIAC concentra la radiazione solare verso una superficie a specchio, che a sua volta riflette i raggi concentrati su un piano di cottura. Posizionando del cibo o una pentola sull'apposito vano del piano cottura, è possibile cuocere/scaldare il cibo sfruttando la conversione dell'energia solare in energia termica.

6.1 Materiali e proprietà

Il forno HELIAC ha una struttura reticolare in legno in grado di sostenere e consentire la movimentazione della lente e dello specchio. Il piano di cottura, realizzato con una piastra in acciaio, presenta un foro centrale che consente il passaggio della radiazione solare concentrata. La pentola e/o il cibo che si vuole scaldare va dunque posizionato al di sopra di esso.

La lente rettangolare è basata su un materiale polimerico a basso costo ed ha lo scopo di rifrangere i raggi solari su una superficie più piccola. In questo modo, l'energia solare per unità di superficie viene notevolmente incrementata, consentendo un uso più efficiente e proficuo della lente solare.

La radiazione solare che passa attraverso la lente, viene concentrata su una superficie più piccola che corrisponde all'incirca alla superficie dello specchio posto nella parte inferiore del forno.

Lo specchio utilizzato per il forno Heliac è una pellicola speciale che riflette non soltanto la frazione di radiazione solare cosiddetta visibile, ma anche la frazione ultravioletta e infrarossa.

Lo specchio, opportunamente inclinato, riflette quindi la radiazione solare verso il foro del piano di cottura dove è presente la pentola.



Fig. 48: Vista generale forno



Fig. 48: Vista du camera di cottura

6.2 Dispositivo e pentola

Il forno solare HELIAC è stato testato sia con acqua che con olio siliconico per valutare le sue prestazioni ad elevate temperature.

A differenza degli altri forni a scatola, è più sensibile alle differenze di temperature/radiazione solare in quanto essendo un forno aperto non è dotato di una camera di cottura chiusa e isolata termicamente.

La pentola viene posizionata direttamente a contatto con la piastra metallica, quindi, risente notevolmente delle condizioni esterne, quali vento, radiazione solare e temperatura ambiente.

La pentola utilizzata di dimensioni 24 e 15 cm (L x H) anch'essa dipinta di nero con un coperchio forato superiormente per poter immergere la termocoppia nel liquido utilizzato.

Il rapporto di concentrazione del fornello è : $C = \frac{A_a}{A_{pentola}} = 40.97$

6.3 Banco di prova

Anche in questo caso il banco di prova di questo laboratorio era composto da:

- un pireliometro;
- un computer;
- termocoppie per misurare le temperature dei vari elementi;
- un data logger
- una centralina meteo per i dati relativi alla velocità del vento

L'intervallo di acquisizione fissato era di 1 secondo. Poiché i test si sono svolti all'aperto, il banco prova doveva ogni volta essere montato e, successivamente, smontato alla fine delle prove. Lo schema principale è rappresentato nella figura seguente:

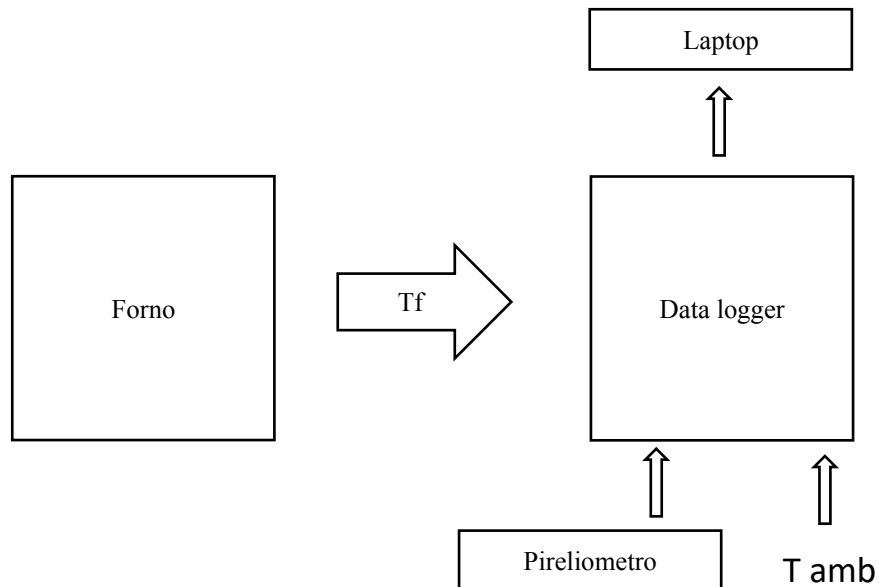


Fig. 50: schema di funzionamento del banco prova

Dove:

- Tf: temperatura del fluido studiato (acqua o olio silconico);
- Tamb: temperatura ambiente (°C)
- DNI: radiazione solare diretta (W/m²)

6.4 Canali acquirente dati

Gli 8 canali dell'acquirente sono stati così configurati:

- CH 1: DNI (radiazione solare);
- CH 2: T_{amb} (configurato per termocoppia di tipo T);
- CH 3: Temperatura fluido;
- CH 4,5,6,7,8: Non utilizzati

6.5 Test sperimentali

Di seguito verranno presentati i parametri usati in questo elaborato:

- Tempo di ebollizione caratteristico e specifico: t_c e t_s [15];
- Efficienza utilizzabile: η_u [16];
- Tempo di riscaldamento: Δt ;
- COR [17];
- Temperatura massima raggiungibile dal fluido: T_{fx} [17];

I range di temperature per il calcolo dei diversi parametri sono stati scelti a seconda della sostanza presa in esame, rispettivamente 40-90 °C per l'acqua e 40-155 °C per l'olio silconico.

In questa fase sono state registrate la temperatura dell'olio e dell'acqua nella pentola (in quantità di 3 kg), la temperatura ambiente e la radiazione solare diretta, mentre in una seconda fase anche i restanti parametri.

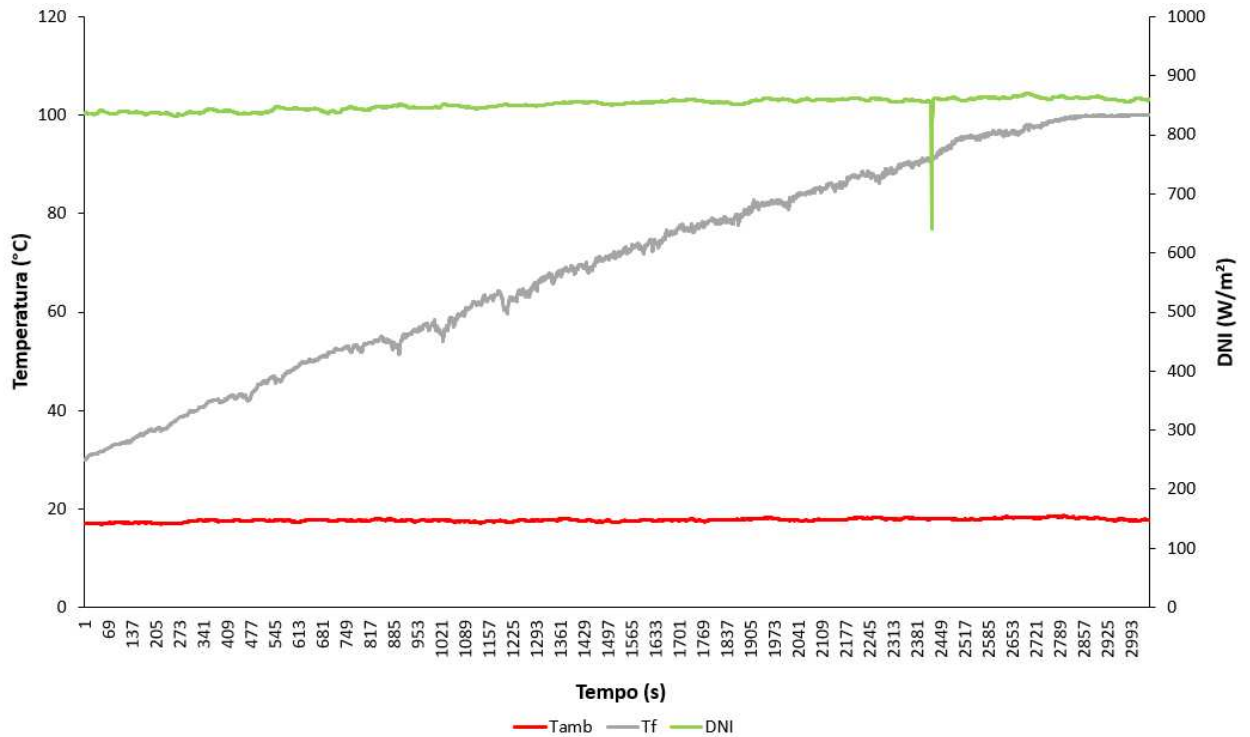
Di seguito, i risultati dei test condotti in data 30 e 31 marzo 2021.

	Test 1	Test 2	Test 3
Data	30/03/2021	31/03/2021	31/03/2021
Sostanza	Acqua	Olio Siliconico	Olio Siliconico
mf (kg)	3	3	3
T1 (°C)	40	40	40
T2 (°C)	90	155	155
DNI,av (W/m ²)	850.86	878.70	889.37
Tamb,av (°C)	17.72	19.19	18.97
Δt_h (h)	0.56	1.14	1.49
ts (h m ² /kg)	0.29	0.59	0.77
tc_h (h m ² /Kg)	0.28	0.58	0.77
η_{av}	0.23	0.1	0.08
F' η_0	0.391	0.222	0.196
F'U _I /C	2.432	1.148	1.109
COR	0.161	0.193	0.177
T _{fx} (°C)	154.52	189.11	176.15

Tabella 22 : calcolo parametri Test 1 Acqua e Test 2,3 – Olio Siliconico (prove 30,31/03/2021)

Come esempio di prova ad acqua, viene riportato il grafico dell'andamento della temperatura ambiente e della DNI registrate durante la prova del 30 marzo.

Fig. 51: grafico DNI e T_{amb} al variare del tempo – Acqua (prova 30/03/2021)



7 FORNO SOLARE A SCATOLA PORTATILE

Il forno solare testato in questo lavoro è un prototipo di forno solare a scatola di ridotte dimensioni, che ne consentono un'agevole movimentazione e spostamento.

Esso è stato testato con una speciale unità di accumulo termico che consiste in una doppia pentola contenente un materiale a cambiamento di fase (PCM) basato su uno zucchero, lo xilitolo.

7.1 Materiali e Proprietà

Il forno è composto da una scatola di legno contenente un telaio in acciaio zincato, avente funzione di camera di cottura; quest'ultima è dipinta con una speciale vernice nera con elevata capacità di assorbimento della radiazione solare (0.90).

La camera di cottura è dotata di una superficie di appoggio in grado di ruotare di 360°, così da mantenere le pentole in equilibrio durante l'allineamento del forno con il sole.

Le pareti sono state isolate termicamente con lana di vetro per ridurre le perdite di calore e ottenere temperature di cottura più elevate.

La copertura è realizzata in vetro temperato, altamente resistente e adatta ad applicazioni termiche solari.

Il coperchio può essere facilmente rimosso per inserire il cibo nella camera di cottura, mentre la parte superiore della scatola è circondata da 8 specchi realizzati con speciali fogli riflettenti in alluminio incollati su elementi in legno sagomati.

Gli specchi garantiscono una rifrazione complessiva di circa 0,94 e permettono di riflettere e concentrare una quantità aggiuntiva di radiazione solare verso il coperchio e conseguentemente verso la camera di cottura.

Il prototipo ha due lancette in legno che permettono sia il suo movimento che il suo orientamento azimutale è anche possibile un orientamento zenitale in quanto il fornello è in grado di ruotare attorno all'asse orizzontale tramite un bullone.

L'area di apertura del fornello A_a è di 0.681 mq, mentre l'area di copertura in vetro A_g è di 1.167 mq.

Il rapporto di concentrazione del fornello è quindi: $C = \frac{A_a}{A_g} = 4.08$

Per prolungare la funzionalità del fornello in assenza o in intermittenza di radiazione solare, è stata progettata e realizzata un'unità di accumulo termico

l'unità di accumulo termico è costituita da due recipienti cilindrici concentrici metallici, collegati tra loro per formare un recipiente a doppia parete

il volume tra le pareti è stato riempito con una certa quantità di materiale a cambiamento di fase a base di xilitolo, con lo scopo di aumentare la superficie di scambio termico e accumulare calore latente da rilasciare successivamente durante la solidificazione.



Fig. 52: vista generale del forno



Fig. 53: vista sulla camera di cottura

Il sistema di accumulo è un importantissimo elemento che ha lo scopo di conservare parte dell'energia termica generata dal sole; così facendo è possibile sfruttarne l'energia anche quando non è presente (ad esempio di sera/notte o quando il cielo diventa nuvoloso), a patto che il sistema abbia accumulato calore a sufficienza per lo scopo per cui viene utilizzato (ad esempio per la cottura di cibi). Un altro vantaggio del sistema di accumulo è sicuramente il fatto che consente di stabilizzare termicamente tutto il sistema.

Una buona soluzione in termini economici è quella che sfrutta sistemi di accumulo a calore latente, mediante materiali a cambiamento di fase (PCM): in questo modo infatti è possibile accumulare sia calore sensibile (legato a un aumento di temperatura), sia calore latente (legato a un cambiamento di fase).

Esistono tre tipi di cambio di fase:

- Solido – solido: cambia solo la struttura cristallina del materiale; moderato scambio di calore latente e piccola variazione di volume;
- Solido – gas / liquido – gas: elevato scambio di calore latente e grande variazione di volume;
- Solido – liquido: moderati scambio di calore latente e variazione di volume.

La terza possibilità è generalmente la più comune perché concilia la possibilità di scambiare una buona quantità di calore e la facilità di utilizzo (legata alla piccola variazione di volume, che permette di usare pentole di dimensioni ridotte e quindi, di contenere i costi).

Nel caso di PCM solido – liquido allora il materiale passerà dalla fase solida a quella liquida durante l'esposizione alla radiazione solare, accumulando così calore; nel momento in cui il materiale non è più esposto al sole questo passerà dalla fase liquida alla fase solida, rilasciando calore.

7.2 Sistema di accumulo utilizzato

Per questo motivo il PCM usato nelle prove che verranno riportate di seguito è lo xilitolo, la scelta è ricaduta su questo materiale per via della sua temperatura di fusione di circa 94.7 °C; infatti occorre essere in grado di raggiungere la temperatura di fusione del materiale selezionato, ma soprattutto riuscire a superarla al fine di permettere il suo passaggio di fase.

Durante le prove sono stati usati 2.5 Kg di xilitolo, inserito in un'intercapedine creata tra due pentole concentriche; nei prossimi paragrafi verrà mostrato questo sistema di inserimento del materiale.

Lo xilitolo inoltre è stato scelto anche perché è un materiale naturale, adatto quindi ad essere utilizzato in applicazioni a contatto con i cibi.

7.2.1 Xilitolo

Lo xilitolo è uno zucchero di tipo alimentare estratto da betulle, fragole, lampone, prugna e dal grano; è un PCM organico ma non è composto da paraffina. Viene spesso usato in applicazioni alimentari e farmaceutiche.

La formula molecolare dello xilitolo è C₅H₁₂O₅, la sua massa molare è di 152.15 g/mol; di seguito viene riportata la sua struttura molecolare:

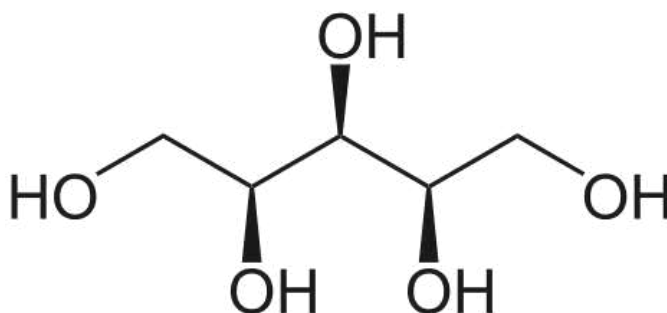


Fig. 54: struttura molecolare dello xilitolo

Se confrontato con il saccarosio, lo xilitolo presenta il caratteristico sapore dolce dello zucchero ma contiene molte meno calorie (fino al 40% in meno) e per questo viene spesso usato nelle diete; altri importanti vantaggi risiedono nel fatto che non contribuisce alla formazione di carie e che è un alimento adatto ai diabetici. Queste caratteristiche hanno portato a uno sviluppo e utilizzo massiccio dello xilitolo, che quindi può essere acquistato sul mercato a costo medio-basso (circa 10 euro/kg).

Uno studio ha approfondito le capacità termiche dello xilitolo nel range di temperatura tra $-193\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $116\text{ }^{\circ}\text{C}$; è stata osservata una transizione di fase nell'intervallo di temperatura tra $86.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $101.85\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un picco della capacità termica a $95.89\text{ }^{\circ}\text{C}$. [19]

Kaizawa et al. [20] [21] hanno determinato il punto di decomposizione dello xilitolo alla temperatura di $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, che viene quindi stabilito come limite per l'uso di questo materiale nell'accumulo di energia termica. In un altro studio di [22] è stata analizzata l'aggiunta di additivi allo xilitolo per aumentarne la velocità di cristallizzazione e il rilascio di calore latente: il metanolo consente una cristallizzazione da 33 a 170 volte più veloce dello xilitolo puro in uno stato super-condensato a $22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

7.2.2 Contenitore

Il test è stato svolto utilizzando due pentole poste una dentro l'altra concentricamente e fissate mediante dei bulloni. Nell'intercapedine creatasi si è inserito il PCM e una termocoppia per monitorarne l'andamento della temperatura.

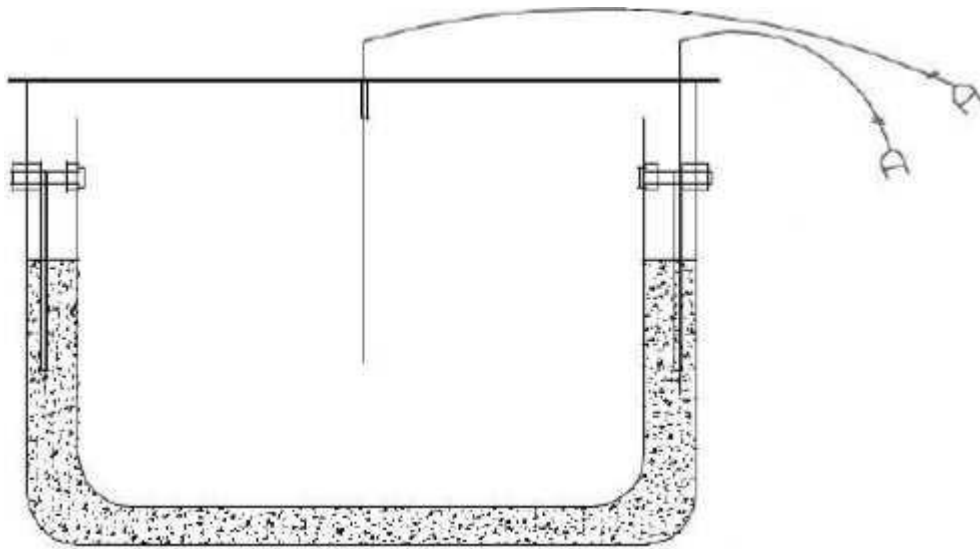


Fig. 55: illustrazione delle due pentole con intercapedine

Nella pentola più interna è stato versato l'olio silconico in quantità di 1.5 kg, la cui temperatura è stata misurata con una termocoppia, anch'essa inserita nel liquido mediante un foro sul coperchio di circa 3 mm; alla pentola esterna è stato in seguito applicato uno strato di vernice nera per aumentare la sua capacità di assorbire la radiazione solare.

	Pentola interna	Pentola esterna	Pentola per acqua
Diametro [cm]	18	20	20.7
Altezza [cm]	8.5	12	10.5
Peso [g]	470	865	880

Tabella 23: caratteristiche delle pentole usate

7.2.3 Olio siliconico

Il fluido usato per i test con PCM è olio siliconico “Rhodorsil 47 V 100” in quantità di 2 kg (il numero “47” si riferisce agli oli della “Bluestar Silicones” composti di polidimetilsilossano, la lettera “V” indica la viscosità e il numero “100” è il valore della viscosità, pari a $100 \text{ mm}^2/\text{s}$ ad una temperatura di $25 \text{ }^\circ\text{C}$). [23]

Gli oli della famiglia “Rhodorsil 47” vengono usati come lubrificanti, ammorbidenti tessili, per la produzione di cosmetici e creme, per scopi medici e molto altro.

Le principali caratteristiche di quest'olio sono riportate nella seguente tabella:

[24]

Oils	41 V 0.65	47 V 3	47 V 5	47 V 20	47 V 50	47 V 100	47 V 350	47 V 500	47 V 1000	47 V 5000 to V 600000
Characteristics										
Viscosity at 25 °C (mm ² /s)	0,65	3	5	20	50	100	350	500	1000	5000 to 600000
Specific gravity at 25 °C	0,760	0,890	0,910	0,950	0,959	0,965	0,970	0,970	0,970	0,973
Flashpoint at °C (closed cup)	- 4	75	120	240	280	> 300	> 300	> 300	> 300	> 300
Freezing point at °C	- 67	- 80	- 65	- 60	- 55	- 55	- 50	- 50	- 50	- 45
Refractive index at 25 °C	1,375	1,395	1,397	1,400	1,402	1,403	1,403	1,403	1,403	1,404
Surface tension (mN/m)	15,9	18,9	19,7	20,6	20,7	20,9	21,1	21,1	21,1	21,1
Vapor pressure at 200 °C (Pascal)	NA	NA	NA	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33	1,33
Expansion coefficient between 25 °C and 100 °C (cm ³ /cm ³ . °C)	1,34.10 ⁻²	1,16.10 ⁻²	1,15.10 ⁻²	1,07.10 ⁻²	1,05.10 ⁻²	9,45.10 ⁻⁴	9,45.10 ⁻⁴	9,45.10 ⁻⁴	9,45.10 ⁻⁴	9,45.10 ⁻⁴
Specific heat (Joules/g. °C)	2,9	NA	NA	1,63	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,50
Thermal conductivity (Watt/m. °C)	0,10	0,11	0,12	0,14	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Viscosity/temperature coefficient	0,31	NA	0,55	0,59	0,59	0,60	0,62	0,62	0,62	0,62
Dielectric strength (kV/mm)	14	14	14	14	15	16	16	16	16	18
Dielectric constant at 25 °C between 0.5 and 100 kHz	2,18	2,50	2,59	2,68	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
Loss angle at 25 °C 0.5 kHz 100 kHz	NA	1.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴ 1.10 ⁻⁵	4.10 ⁻⁵ 1.10 ⁻⁵	2.10 ⁻⁴ 1.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴ 1.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴ 1.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴ 1.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴ 1.10 ⁻⁴	2.10 ⁻⁴ 1.10 ⁻⁴
Volume resistivity at 25 °C (ohm/cm)	NA	1.10 ¹⁵	1.10 ¹⁵	1.10 ¹⁴	1.10 ¹⁴	1.10 ¹⁵	1.10 ¹⁵	1.10 ¹⁵	1.10 ¹⁵	1.10 ¹⁵

Tabella 24: "Rhodorsil 47 V 100"

Il calore specifico degli oli Rhodorsil 47 con viscosità compresa tra 50 e 1000 mm²/s, è indipendente dalla viscosità e vale 0.35 cal/kg°C (o 1.46 J/g°C, come riportato in tabella); questo varia però con la temperatura secondo la seguente legge:

$$C_p = a + b * 10^{-5} * T$$

dove a = 0.34708 e b = 43, T misurata in °C e C_p in kcal/kg°C;

questa legge è valida tra -50 °C e 220 °C. [21]

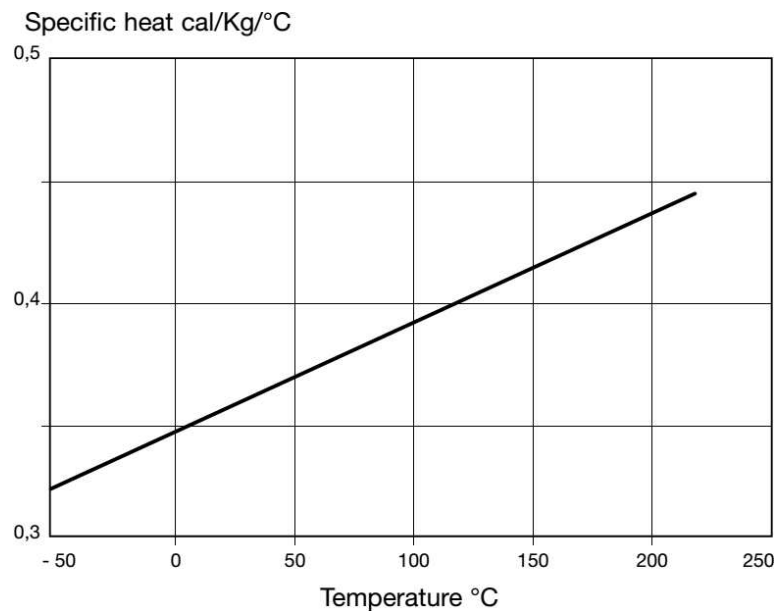


Fig. 56: andamento calore specifico del "Rhodorsil 47 V 100"

7.3 Banco di prova

Anche in questo caso il banco prova di questo laboratorio era composto da:

- un pireliometro;
- un computer;
- termocoppie per misurare le temperature dei vari elementi;
- un data logger
- una centralina meteo per i dati relativi alla velocità del vento

L'intervallo di acquisizione fissato era di 1 secondo. Poiché i test si sono svolti all'aperto, il banco prova doveva ogni volta essere montato e, successivamente, smontato alla fine delle prove. Lo schema principale è rappresentato nella figura seguente:

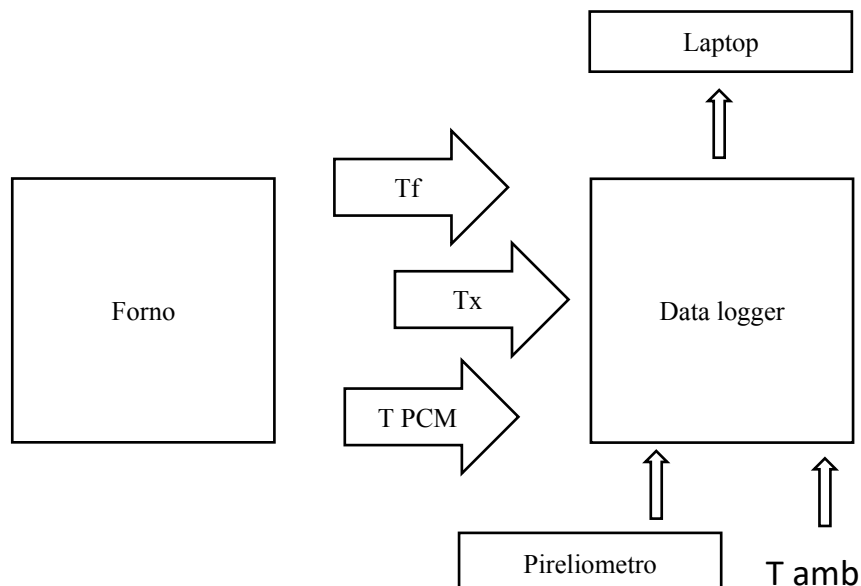


Fig. 57: schema di funzionamento del banco prova

Dove:

- Tf: temperatura del fluido studiato (olio siliconico);
- Tx: temperatura di altre variabili considerate (come la piastra o i vetri che compongono la camera di cottura).
- T PCM: temperature del PCM
- Tamb: temperatura ambiente (°C)
- DNI: radiazione solare diretta (W/m^2)

7.4 Canali acquirente dati

Gli 8 canali dell'acquirente sono stati così configurati:

- CH 1: DNI (radiazione solare);
- CH 2: temperatura ambiente (Tamb);
- CH 3: temperatura vetro (Tglass);
- CH 4: temperatura assorbitore (piastra);
- CH 5: temperatura xilitolo 1 (Txyl1);
- CH 6: temperatura xilitolo 2 (Txyl2);
- CH 7: temperatura olio siliconico (Tf);
- CH 8: non utilizzato.

7.5 Inserimento del PCM

In questa fase le prove a carico sono state effettuate inserendo nella camera di cottura olio siliconico, le cui caratteristiche fisiche sono state mostrate in precedenza.

Le prove sarà così strutturata:

- Prove a carico con olio siliconico (massa 1,5 kg) + sistema di accumulo a base di xilitolo (massa 2,5 Kg).

Lo scopo della prova sarà principalmente quello di analizzare i tempi di riscaldamento e raffreddamento del fluido senza PCM e con PCM, è infatti importante studiare il tempo in più che un accumulo può fornire in fase di raffreddamento, rapportandolo però anche alla maggior durata della fase di riscaldamento. Grazie infatti al PCM si possono superare grandi problematiche come l'assenza di sole per un certo lasso di tempo, cercando però di non perdere la cottura del cibo.

Il fluido verrà fatto arrivare alla massima temperatura possibile (fase di riscaldamento) e solo a quel punto il forno verrà oscurato simulando assenza di radiazione solare (fase di raffreddamento) permettendo il raffreddamento del fluido all'interno della pentola.

7.6 Test sperimentali

Di seguito verranno presentati i parametri usati in questo elaborato:

- Prima e seconda figura di merito: F_1 ed F_2 [15];
- Tempo di ebollizione caratteristico e specifico: t_c e t_s [15];
- Efficienza utilizzabile: η_u [16];
- Tempo di riscaldamento e raffreddamento: Δt .

Per il calcolo dei parametri necessari per caratterizzare il forno si è cercato un range di temperature comune alle prove effettuate sia per la fase di riscaldamento che per quella di raffreddamento. Tali range risultano essere:

- **Fase di riscaldamento:** $T_1 = 55$ °C e $T_2 = 110$ °C con un $\Delta T = 55$ °C. Si è scelto questo intervallo per essere sicuri che tutto il PCM all'interno della pentola avesse cambiato fase;
- **Fase di raffreddamento:** $T_1 = 110$ °C e $T_2 = 80$ °C con un $\Delta T = 30$ °C.

In questa fase sono state registrate la temperatura dell'olio (T_{oil}) nella pentola (in quantità di 1,5 kg), la temperatura del PCM (T_{PCM}), la temperatura ambiente e la radiazione solare diretta, successivamente in una seconda fase i restanti parametri.

Di seguito, vengono riportati i risultati dei test condotti in data 18 e 20 maggio 2021.

7.6.1 Test in fase di riscaldamento

	Test 1	Test 2
Data	18/05/2021	20/05/2021
Sostanza	Olio Siliconico	Olio Siliconico
mf (kg)	1.5	1.5
mPCM (Kg)	2.5	2.5
T1 (°C)	55	55
T2 (°C)	110	110
DNI,av (W/m ²)	923.1	946.13
Tamb,av (°C)	24.08	19.91
Δt_h (h)	1.99	2.26
ts (h m ² /kg)	0.91	1.02
t_ch (h m ² /Kg)	0.03	0.03
η_{av}	0.23	0.1
F2	0.05	0.04

Tabella 25 : calcolo parametri in fase di riscaldamento Test 1 e 2 – Olio Siliconico (prove 18,20/05/2021)

7.6.2 Test in fase di raffreddamento

	Test 1	Test 2
Data	18/05/2021	20/05/2021
Sostanza	Olio Siliconico	Olio Siliconico
mf (kg)	1.5	1.5
mPCM (Kg)	2.5	2.5
T2 (°C)	110	110
T3 (°C)	80	80
Tamb,av (°C)	25.35	19.96
Δt_c (h)	3.79	3.23

Tabella 26: calcolo parametri in fase di raffreddamento Test 1 e 2 – Olio Siliconico (prove 18,20/05/2021)

Come esempio di prova con olio siliconico, viene riportato il grafico dell'andamento della temperatura ambiente e della DNI registrate durante la prova del 20 maggio.

Come è possibile osservare, la curva della DNI va a picco a zero; ciò indica il momento in cui il forno è stato spostato dalla radiazione solare (fase di riscaldamento) e messo in posizione di ombreggiatura (fase di raffreddamento).

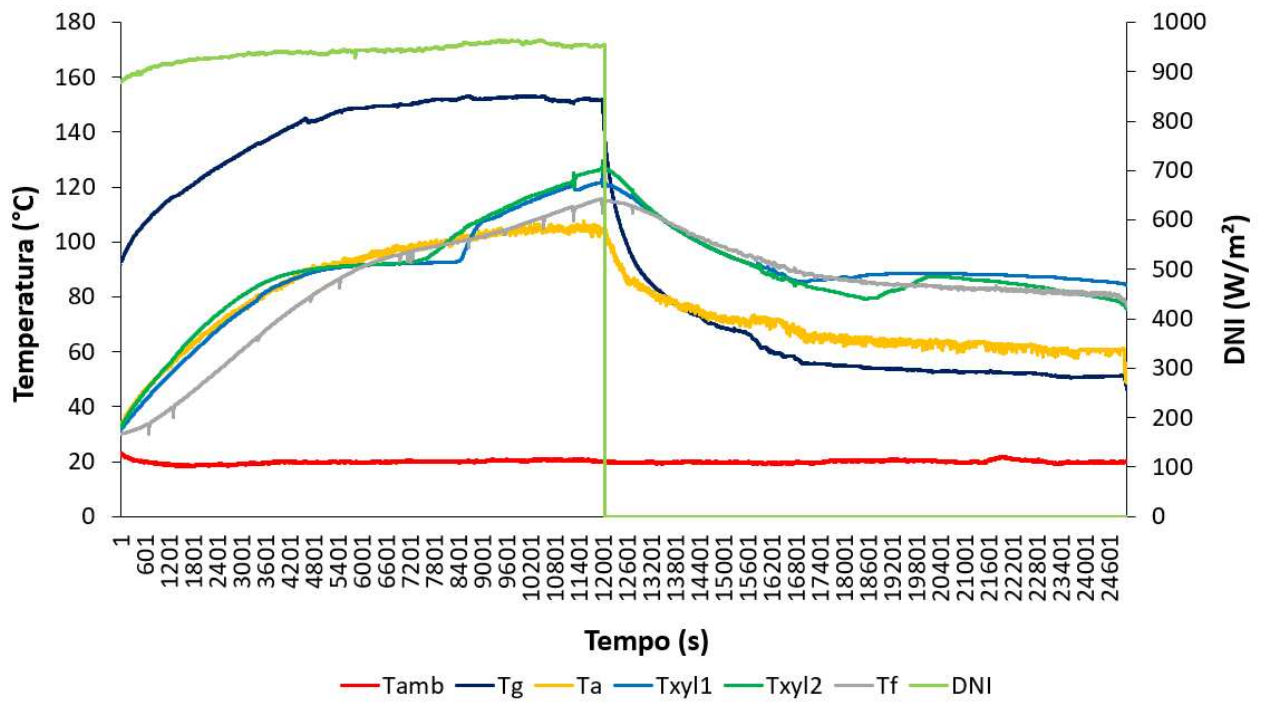


Fig. 58: grafico DNI e Tamb al variare del tempo – Olio siliconico (prova 20/05/2021)

8 CONCLUSIONI

In questo elaborato si è voluta porre attenzione all'energia solare e ai suoi molteplici usi, approfondendo in particolare l'utilizzo dei forni solari.

Per quanto riguarda le prove a vuoto del forno Newton, è possibile riportare delle considerazioni sulle massime temperature dell'assorbitore ottenute durante le prove:

- Test 1: $T_{a,max}=126.12$ (°C)- N scher.
- Test 1: $T_{a,max}=117.87$ (°C)- N
- Test 2: $T_{a,max}=137.47$ (°C)- N scher.
- Test 2: $T_{a,max}=137.36$ (°C)- N
- Test 3: $T_{a,max}=133.95$ (°C)- N scher.
- Test 3: $T_{a,max}=129.07$ (°C)- N

Per quanto riguarda le prove ad acqua e con glicerina, invece, è possibile riportare delle considerazioni sui tempi di riscaldamento medi e sull'efficienza media:

Acqua:

- | | |
|--|--------------------------------------|
| • Test 1: $\Delta t=2.13$ (°C)- N | Test 1: $\eta_{av}=0.15$ - N |
| • Test 1: $\Delta t=2.14$ (°C)- N scher. | Test 1: $\eta_{av}=0.15$ - N scher. |
| • Test 2: $\Delta t=2.03$ (°C)- N | Test 2: $\eta_{av}= 0.15$ - N |
| • Test 2: $\Delta t=1.96$ (°C)- N scher. | Test 2: $\eta_{av}= 0.16$ - N scher. |
| • Test 3: $\Delta t=2.83$ (°C)- N | Test 3: $\eta_{av}=0.14$ - N |
| • Test 3: $\Delta t=2.24$ (°C)- N scher. | Test 3: $\eta_{av}=0.18$ N- scher. |
| • Test 4: $\Delta t=1.88$ (°C)- N | Test 4: $\eta_{av}=0.21$ - N |
| • Test 4: $\Delta t=1.89$ (°C)- N scher. | Test 4: $\eta_{av}= 0.21$ - N scher. |

- Test 5: $\Delta t=2.6$ (°C)- N Test 5: $\eta,av= 0.12$ - N
- Test 5: $\Delta t=2.82$ (°C)- N scher. Test 5: $\eta,av=0.11$ - N scher.

Glicerina:

- Test 1: $\Delta t=3.93$ (°C)- N Test 1: $\eta,av=0.07$ - N
- Test 1: $\Delta t=2.90$ (°C)- N scher. Test 1: $\eta,av=0.1$ - N scher.
- Test 2: $\Delta t=3.31$ (°C)- N Test 2: $\eta,av= 0.09$ - N
- Test 2: $\Delta t=3.12$ (°C)- N scher. Test 2: $\eta,av= 0.1$ - N scher.
- Test 3: $\Delta t=3.57$ (°C)- N Test 3: $\eta,av=0.09$ - N
- Test 3: $\Delta t=2.91$ (°C)- N scher. Test 3: $\eta,av=0.11$ - N scher.
- Test 4: $\Delta t=2.34$ (°C)- N Test 4: $\eta,av=0.15$ - N
- Test 4: $\Delta t=3.34$ (°C)- N scher. Test 4: $\eta,av= 0.14$ - N scher.

Per quanto riguarda le prove con il forno Heliac, è possibile riportare delle considerazioni sulle massime temperature del fluido ottenute durante le prove:

- Test 1: T_{fx} - Acqua =154.52 (°C)
- Test 2: T_{fx} - Olio siliconico=189.11 (°C)
- Test 3: T_{fx} -Olio siliconico= 176.15 (°C)

In conclusione, come descritto in precedenza, il forno Newton così come quello portatile, sono forni a scatola, mentre l'Heliac appartiene ai forni a concentrazione.

Un'ulteriore differenza che contraddistingue l'NSO e quello a scatola dal forno Heliac, è quella di essere a geometria variabile ed è perciò interessante capire il funzionamento per orientare gli specchi per sfruttare al massimo la concentrazione dei raggi solari.

E' bene ricordare l'utilizzo del forno a scatola portatile essendo stato studiato con sistema di accumulo (PCM); importante perchè oltre alla parte del calore sensibile, è possibile sfruttare anche quello latente, durante il passaggio di fase e quindi stabilizzare il sistema allungando i tempi riscaldamento e raffreddamento. Altra differenza è ricordare che l'Heliac nonostante sia un forno aperto, quindi risente maggiormente delle condizioni esterne, è l'unico tra le tre tipologie studiate che ha raggiunto temperature maggiori del fluido; ciò è dovuto al fatto che essendo a concentrazione, i raggi solari vengono convogliati tutti in un unico punto, fornendo calore.

Quindi, si può concludere, affermando che l'area di apertura, così come il rapporto di concentrazione, incidono notevolmente sul rendimento prestazionale.

Infine per quanto concerne gli sviluppi futuri relativi all'NSO, si cercherà di trasformare il forno in un essiccatore solare.

9 BIBLIOGRAFIA

- [1] WindEurope – the voice of the wind energy industry.
- [2] GSE – Gestore dei servizi energetici.
- [3] B. Halacy and D.S. Halacy, *Cooking with the sun*, La Fayette, CA: Morning Sun Press, 1992.
- [4] SCI – Solar Cookers International, Fun-Panel, Teong Tan.
- [5] E. Cuce and P. M. Cuce, “A comprehensive review on solar cookers”, *Applied Energy*, vol. 102, pp. 1399-1421, 2013.
- [6] SCI – Solar Cookers International, AISol 1.4, Dieter Seifert.
- [7] SCI – Solar Cookers International, Minimum Solar Box Cooker, Tom Sponheim and Mark Aalfs.
- [8] SCI – Solar Cookers International, Newton Solar Oven, Matteo Muccioli
- [10] Editecnologia, Proprietà del legname.
- [11] Esiglass, Design glass solutions
- [12] Saint-Gobain, comfort e sostenibilità in edilizia
- [13] Nicola Ulivieri, Engineer, PhD
- [14] TC – Misure e Controlli srl.
- [15] S. C. Mullick, T. Kandpal and A. K. Saxena, “Thermal test procedure for box-type solar cookers”, *Solar Energy*, vol. 39, no. 4, pp. 353-360, 1987.
- [16] A. M. Khalifa, M. M. Taha and M. M. Akyurt, “Solar cookers for outdoors and indoors”, *Energy*, vol. 10, no. 7, pp. 819-829, 1985.
- [17] Pranab J. Lahkar, S. K. Samdarshi (2010), “A review of the thermal performance parameters of box type solar cookers identification of their correlations”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010) 1615-1621.
- [18] P. A. Funk, “Evaluating the international standard procedure for testing solar

- cookers and reporting performance”, *Solar Energy*, vol. 68, pp.1-7, 2000.
- [19] B. Tong, Z. C. Tan, Q. Shi, Y. S. Li, D.T. Yue, S.X. Wang, “Thermodynamic investigation of several natural polyols (I): Heat capacities and thermodynamic properties of xylitol”, *ScienceDirect*.
- [20] A. Kaizawa, N. Maruoka, A. Kawai, H. Kamano, T. Jozuka, T. Senda and T. Akiyama, “Thermophysical and heat transfer properties of phase change material candidate for waste heat transportation system”, *Heat and Mass Transfer*, vol. 44, no. 7, pp. 763-769, 2008.
- [21] S. Höhle, A. König-Haagen and D. Brüggemann, “Thermophysical Characterization of MgCl₂ 6H₂O, Xylitol and Erythritol as Phase Change Materials (PCM) for Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES)”, *Materials*, 2017.
- [22] A. Seppälä, A. Meriläinen, L. Wikström and P. S. Kauranen, “The effect of additives on the speed of the crystallization front of xylitol with various degrees of supercooling”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 34, no. 5, pp. 523-527, 2010.
- [23] SilitechSA,[Online],Available: https://www.silitech.ch/upload/complement_info_fournisseur_d/32.pdf
- [24] Bluestar Silicones, Rhodorsil 47 V 100 Technical Information

10 RINGRAZIAMENTI

Giunto al termine di questo percorso vorrei ringraziare il mio relatore, il Prof. Giovanni Di Nicola, per avermi concesso la possibilità di affrontare un progetto su temi attuali e futuri di notevole importanza e di lavorare in un clima amichevole e familiare, affrontando il periodo di tirocinio e tesi serenamente, molto spesso divertendomi, nonostante il particolare momento storico.

Un ringraziamento sincero alla Dott.ssa Alessia Aquilanti, collaboratrice del Professor Di Nicola, per la sua disponibilità, gentilezza e per i suoi consigli, anche a distanza, per la stesura della tesi.

Ringrazio l'Ing. Matteo Muccioli inventore del Newton Solar Oven per avermi dato la possibilità di studiare il suo prototipo iniziale e svolgere il mio lavoro successivamente.

Un ringraziamento particolare ai miei genitori, che mi hanno sempre sostenuto permettendomi di arrivare fin qui. Spero di avervi dato grande soddisfazione, perchè è quello che meritate.

Un grazie anche agli amici, compagni di corso, perchè in un modo o nell'altro ci siamo sempre aiutati, e a chi mi è stato vicino ultimamente.

Infine, ringrazio me stesso, per essere arrivato fino in fondo e aver raggiunto questo traguardo che rappresenta un nuovo punto di partenza!