



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

**ANALISI SPERIMENTALI DI DIVERSI TIPI DI FORNI SOLARI DI TIPO PANEL
IN DIVERSE CONFIGURAZIONI**

**Experimental analysis of different solar panel cooker types
in different configurations**

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. **Giovanni Di Nicola**

Tesi di Laurea di:

Elena Dezi

A.A. 2021/2022

Indice

Sommario

1	Stato dell'arte.....	1
1.1	Fonti di energia alternative e sviluppo sostenibile.....	1
1.2	Storia della cottura solare.....	2
1.3	La radiazione solare.....	6
1.4	Che cos'è un forno solare.....	12
1.5	Tipologie di forni solari e caratteristiche.....	13
1.5.1	FORNI SOLARI PARABOLICI E A CONCENTRAZIONE.....	13
1.5.2	FORNI SOLARI A SCATOLA.....	15
1.5.3	FORNI SOLARI A PANNELLI.....	16
1.5.4	FORNI SOLARI A TUBI SOTTOVUOTO.....	17
1.5.5	Confronto tra le principali geometrie di forni.....	19
2	Realizzazione dei prototipi di tipo panel utilizzati.....	20
2.1	Principio di funzionamento.....	20
2.2	Il ricevitore: cuore del sistema.....	24
2.3	KIMONO.....	26
2.4	COOKIT.....	32
2.5	FUN-PANEL.....	34
2.6	DUAL-SETTING PANEL COOKER (DSPC).....	41

3	Test Bench.....	44
3.1	Pireliometro.....	44
3.1.1	Struttura del pireliometro.....	45
3.1.2	Principio di funzionamento del pireliometro.....	45
3.1.3	Radiazione del corpo nero.....	46
3.2	Piranometro.....	47
3.2.1	Struttura del piranometro.....	47
3.2.2	Principio di funzionamento del piranometro.....	48
3.3	Termocoppie.....	50
3.3.1	Affidabilità delle termocoppie.....	50
3.3.2	Termocoppie utilizzate.....	50
3.3.3	Principio di funzionamento delle termocoppie.....	51
3.4	Datalogger e PC	52
3.5	Setup e configurazioni dei forni di tipo panel.....	55
3.5.1	Collimazione e anticipo.....	56
3.5.2	Area di apertura.....	56
3.5.3	Incidenza del vento e sistemi di schermatura.....	57
3.5.4	Analisi dei dati vento.....	59
4	Prove sperimentali.....	60
4.1	Parametri di riferimento.....	60
4.1.1	Prima figura di merito (F_1).....	60
4.1.2	Seconda figura di merito (F_2).....	61
4.1.3	Tempo di ebollizione (T_s e T_c).....	62
4.1.4	Efficienza termica e COR.....	62

4.2	Tipologie di prove effettuate.....	64
5	Risultati.....	66
5.1	Primo set di misure.....	67
5.1.1	Test a vuoto.....	67
5.1.2	Test ad acqua.....	69
5.1.3	Test ad olio.....	71
5.2	Secondo set di misure.....	72
5.2.1	Test a vuoto.....	73
5.2.2	Test ad acqua.....	74
5.2.3	Test ad olio.....	77
5.3	Terzo set di misure.....	77
5.3.1	Test a vuoto.....	78
5.3.2	Test ad acqua.....	79
5.3.3	Test ad olio.....	82
5.4	Confronto tra i set di misure.....	82
6	Conclusioni.....	83
	BIBLIOGRAFIA.....	84
	RINGRAZIAMENTI.....	85

Elenco delle figure

1.1 Aree terrestri in cui si può maggiormente sfruttare l'energia solare.....	1
1.2 Stampa che riproduce l'uso degli specchi ustori durante l'assedio romano a Siracusa.....	2
1.3 Horace-Bénédicte de Saussure.....	3
1.4 Scatola di Saussure.....	3
1.5 Augustine Mouchot.....	4
1.6 Generatore solare del 1978.....	4
1.7 Incidenza della radiazione solare sulla Terra.....	6
1.8 Schema delle radiazioni visibili e non visibili.....	7
1.9 Spettro di radiazione solare alle soglie dell'atmosfera terrestre.....	8
1.10 Variazione della costante solare nel corso dell'anno.....	8
1.11 Riflessione e assorbimento della radiazione solare.....	9
1.12 Spettro della radiazione solare al di sopra dell'atmosfera e sulla superficie terrestre.....	10
1.13 Flussi radiativi in atmosfera.....	11
1.14 Forno solare a parabolico.....	14
1.15 Forno solare aperto a concentrazione "Heliac".....	14
1.16 Forno solare a scatola con uno specchio riflettente.....	15
1.17 Forno solare a scatola portatile.....	15
1.18 Forno ad alta concentrazione con specchi riflettenti.....	15
1.19 Principio di assorbimento della radiazione solare.....	16
1.20 Newton Solar Oven.....	17
1.21 Evacuated Tube Solar Cooker.....	18

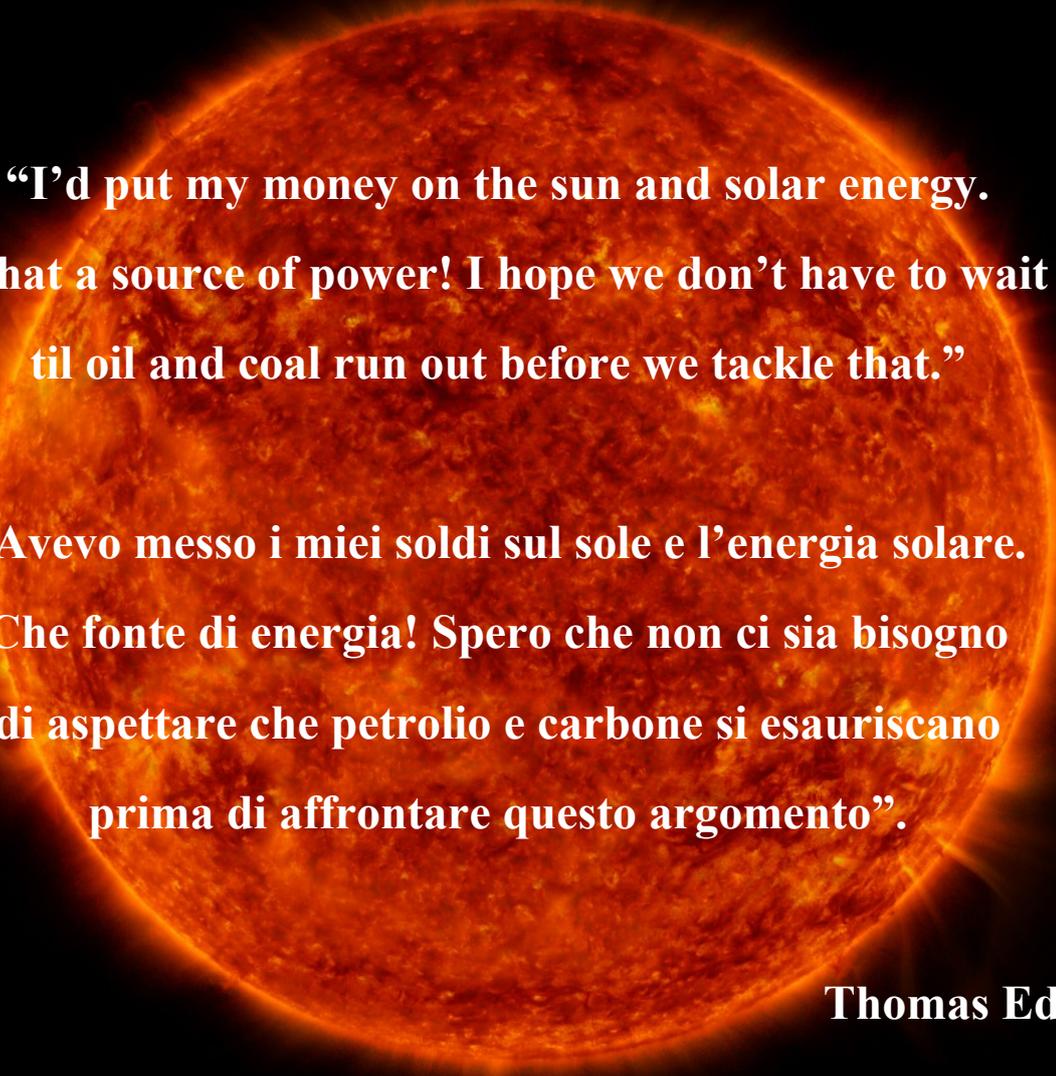
1.22	Principio di funzionamento dei tubi sottovuoto.....	18
1.23	Prestazioni dei forni solari a confronto.....	19
2.1	Effetto Serra.....	20
2.2	Modalità di trasmissione del calore in una pentola.....	20
2.3	Moti convettivi che provocano la fuoriuscita e la perdita di calore.....	21
2.4	Tortiera nera con coperchio in vetro.....	24
2.5	Differenza di assorbimento della radiazione solare tra una pentola nera e una chiara.....	24
2.6	Incidenza dei materiali sulle prestazioni del ricevitore.....	25
2.7	Ricevitore usato nelle prove, costituito da una tortiera in acciaio inox nera, una ciotola e un coperchio in vetro.....	25
2.8	Kimono Solar Cooker usato nelle prove.....	26
2.9	Schema di funzionamento del Kimono Solar Cooker.....	27
2.10	Pannello laterale.....	28
2.11	Pannello inferiore.....	28
2.12	Pannello frontale.....	29
2.13	Pannello posteriore.....	29
2.14	Assemblaggio di ciascun gruppo di pannelli (x 2).....	30
2.15	Collegamento finale.....	30
2.16	Configurazione del Kimono per basse altezze solari.....	31
2.17	Configurazione del Kimono per elevate altezze solari.....	31
2.18	Cookit.....	32
2.19	Schema costruttivo del Cookit.....	33
2.20	Forno non piegato e prospetto frontale del Cookit.....	33
2.21	Prospetto posteriore e laterale del Cookit.....	34
2.22	Fun-Panel.....	34

2.23	Disegni costruttivi per la realizzazione del Fun-Panel.....	35
2.24	Schema di assemblaggio del Fun-Panel.....	36
2.25	Procedura per l'incollaggio e l'assemblaggio dei pannelli.....	37
2.26	Supporto posteriore semovibile.....	38
2.27	Configurazione del Fun-Panel per basse altezze solari.....	39
2.28	Configurazione del Fun-Panel per elevate altezze solari.....	39
2.29	Prospetti laterali del Funnel in CONFIGURAZIONE B.....	40
2.30	Forni Fun-Panel realizzati in cemento da Celestino Ruivo.....	41
2.31	Schema costruttivo per la realizzazione del DSPC.....	41
2.32	Configurazione del DSPC per basse altezze solari.....	42
2.33	Configurazione del DSPC per elevate altezze solari.....	43
3.1	Pireliometro NIP utilizzato.....	44
3.2	Schema di funzionamento del pireliometro.....	46
3.3	Radiazione assorbita e in piccola parte riflessa da un corpo nero reale.....	47
3.4	Piranometro.....	47
3.5	Schema di funzionamento del piranometro.....	48
3.6	Piranometro per la misurazione della radiazione solare diffusa.....	49
3.7	Piranometro SR30-M2-D1 nella centralina del DIISM.....	49
3.8	Termocoppie di tipo T in rame e rame-nichel.....	50
3.9	Principio di funzionamento di una termocoppia.....	51
3.10	Datalogger e PC.....	52
3.11	Programma "Software Picolog" usato per l'acquisizione dei dati durante i test.....	54
3.12	Setup dei forni.....	55
3.13	Test bench.....	56

3.14 Sistemi di schermatura dal vento con pannelli di plexiglass.....	58
3.16 Sistemi di schermatura dal vento con bancali in legno.....	59
3.17 Forni posti in prossimità del parapetto per proteggerli dal vento.....	59
4.1 Variazione del calore specifico dell'olio siliconico in funzione della temperatura.....	65
5.1 Test a vuoto: Prova 1, 18/09/2020.....	68
5.2 Test con acqua: Prova 4, 24/09/2020.....	70
5.3 Test a vuoto: Prova 7*, 01/04/2021.....	73
5.4 Test con acqua: Prova 9*, 24/03/2021.....	75
5.5 Grafici di efficienza dei forni nella prova con acqua del 24/03/2021.....	76
5.6 Sistema di fissaggio delle termocoppie sul fondo delle tortiere nere.....	78
5.8 Test a vuoto: Prova 13, 02/08/2021.....	79
5.9 Test ad acqua: Prova 14, 03/08/2021.....	81

Elenco delle tabelle

3.1 Specifiche tecniche del pireliometro.....	45
3.2 Caratteristiche tecniche delle termocoppie di tipo T.....	51
3.3 Specifiche tecniche dell'acquisitore fornite dal costruttore.....	53
3.4 Area di apertura dei forni all'altezza solare nei diversi periodi dell'anno.....	57
5.1 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove a vuoto del primo set di misure.....	67
5.2 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove ad acqua del primo set di misure.....	70
5.3 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove ad olio del primo set di misure.....	71
5.4 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove a vuoto del secondo set di misure.....	72
5.5 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove ad acqua del secondo set di misure.....	74
5.6 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove ad olio del secondo set di misure.....	77
5.7 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove a vuoto del terzo set di misure.....	78
5.8 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove ad acqua del terzo set di misure.....	80
5.9 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove ad olio del terzo set di misure.....	82



**“I’d put my money on the sun and solar energy.
What a source of power! I hope we don’t have to wait
til oil and coal run out before we tackle that.”**

**“Avevo messo i miei soldi sul sole e l’energia solare.
Che fonte di energia! Spero che non ci sia bisogno
di aspettare che petrolio e carbone si esauriscano
prima di affrontare questo argomento”.**

Thomas Edison

Sommario

Lo scopo di questo elaborato è di mettere a confronto le analisi sperimentali effettuate su quattro forni di tipo Panel. Si è voluto analizzare il comportamento e il rendimento degli stessi attraverso delle prove sul tetto del DIISM in diversi periodi dell'anno, valutando sia la configurazione per medio-basse altezze solari (CONFIGURAZIONE A) che quella per altezze solari maggiori (CONFIGURAZIONE B). Sono state svolte prove in diversi periodi dell'anno per avere un'idea complessiva degli andamenti delle temperature e sono stati analizzati i parametri caratteristici di ciascun forno per i vari tipi di prove, come si può vedere dai grafici e dalle tabelle riportati. Un altro fattore molto importante consiste nella scelta del ricevitore migliore, in grado di ridurre al minimo le dispersioni termiche. In questo tipo di prove devono essere curati anche i minimi dettagli per garantire elevate prestazioni, a partire dai materiali con cui questi sono costruiti ma anche dall'accuratezza degli strumenti di misura utilizzati. I forni aperti a pannelli, inoltre, sono particolarmente influenzati dai fattori ambientali, non sempre prevedibili (tra questi il fattore che incide maggiormente è il vento).

Nel primo capitolo viene rimarcata l'importanza del Sole come fonte primaria di energia, soprattutto nei paesi in via di sviluppo. Poi è stata presentata la storia della cottura solare ed è stato descritto che cos'è un forno solare e quali sono le sue caratteristiche per l'assorbimento della radiazione solare. Dopodiché sono state classificate le principali categorie con alcune foto di forni presenti nel DIISM, oggetto di studio per molti studenti.

Nel secondo capitolo si è spiegato il principio di funzionamento dei forni e l'importanza del ricevitore, cuore del sistema, con particolare riferimento al ricevitore utilizzato per le prove in oggetto. In seguito sono state descritte nel dettaglio le quattro tipologie di forni a pannelli presi in esame: il Kimono, il Cookit, il Fun-Panel e il Dual Setting (DSPC).

Nel terzo capitolo viene presentato il banco di prova con le attrezzature e gli strumenti utilizzati, descrivendo le caratteristiche e il principio di funzionamento di ciascuno. Tra questi, particolare importanza assumono il Pireliometro e il Piranometro, impiegati per rilevare rispettivamente la radiazione solare diretta e quella diffusa durante le prove. Ciò è stato possibile anche attraverso l'utilizzo di termocoppie, usate per rilevare la temperatura della radiazione solare diretta (DNI) misurata dal pireliometro, la temperatura ambiente e le temperature dei quattro forni analizzati. Le termocoppie sono collegate a un datalogger o acquisitore, a sua volta collegato al PC, dove vengono acquisiti i dati attraverso un software, con la possibilità di esportarli su un foglio Excel per l'elaborazione. I forni a pannelli sono stati posizionati sempre secondo lo stesso ordine, facendo attenzione a dare un certo anticipo, ruotandoli il meno possibile durante la prova per inseguire il sole. Sono state adottate diverse configurazioni in base al periodo dell'anno e all'altezza solare, per cui variano le aree di apertura di ciascun forno in base all'assetto. L'esposizione al vento influenza negativamente il risultato delle prove, per cui in giornate particolarmente ventose le prove sono state eseguite proteggendo i forni il più possibile con adeguati sistemi di schermatura, in modo tale da avere risultati accettabili. Alla fine di questo capitolo è riportata anche una tabella dei dati vento presi dalla centralina del DIISM per i vari test eseguiti.

Nel quarto capitolo vengono descritti i parametri caratteristici analizzati: prima e seconda figura di merito, tempo di ebollizione, efficienza termica e COR. Inoltre vengono indicate le tipologie di

prove effettuate, distinte in prove a vuoto (senza carico) e prove con carico, in cui il ricevitore è stato riempito con acqua o con olio siliconico.

Nel quinto capitolo, infine, sono presentati i risultati dei tre set di misure effettuati in diversi periodi dell'anno, con grafici e tabelle che descrivono l'andamento delle temperature e l'efficienza termica di ciascun forno in base al tipo di prova. Nel terzo set di misure sono state apportate delle piccole modifiche al ricevitore per massimizzare le prestazioni dei forni. In particolare, il fissaggio delle termocoppie sul fondo della tortiera nera nelle prove a vuoto e l'utilizzo dei coperchi neri in acciaio inox sotto al coperchio in vetro per le prove ad acqua e ad olio, ha permesso di creare una camera di cottura quasi perfetta, dando l'opportunità di riscontrare risultati interessanti rispetto ai primi due set, svolti senza l'utilizzo dei coperchi neri.

Nel sesto capitolo sono raccolte le conclusioni della campagna sperimentale.

1 Stato dell'arte

1.1 Fonti di energia alternative e sviluppo sostenibile

In molte zone del mondo l'unica fonte di energia è rappresentata dal fuoco, sviluppato da legna o sterco essiccato per la cottura del cibo; tale combustibile è però di difficile approvvigionamento o costosa, causa di deforestazione e fonte di pericolo per le problematiche correlate al suo reperimento. Inoltre, il fumo causato dalla combustione del legno o di materiali equivalenti è una delle cause principali di surriscaldamento globale e di malattie respiratorie, principalmente risultanti dalla combustione di combustibili solidi per cucinare e riscaldarsi.

Per tutti questi motivi, oltre al fatto che il legno tagliato per uso cucina contribuisce a circa 16 milioni di ettari di foresta distrutti ogni anno, è importante riflettere sulla possibilità di implementare fonti di energia alternative.

Poichè i paesi più poveri sono anche quelli più caldi, si può sfruttare l'abbondanza di Sole, che rappresenta una fonte di energia del tutto gratuita ed ecosostenibile (**fig.1.1**).

Ogni giorno il Sole irradia la Terra di una quantità inimmaginabile di energia solare, gran parte della quale arriva sulla superficie sotto forma di luce visibile.

Questa può essere utilizzata in modo innovativo ed economico, rendendola completamente fruibile in modo semplice a tutti.

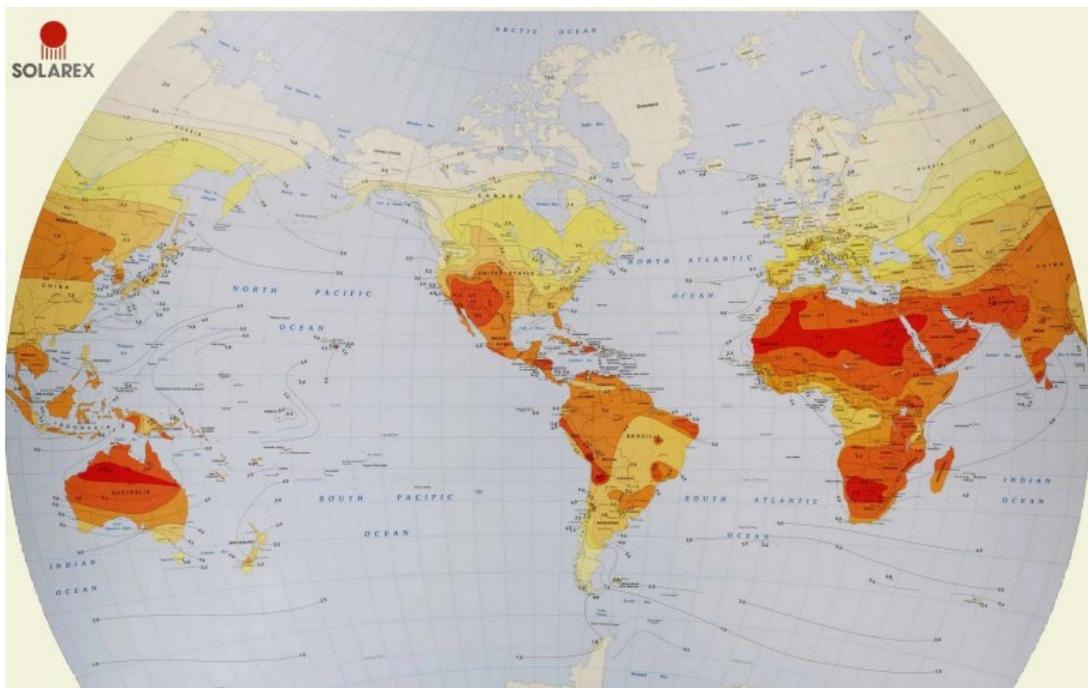


Figura 1.1 Aree terrestri in cui si può maggiormente sfruttare l'energia solare

1.2 Storia della cottura solare

Gli specchi di Archimede che, secondo la leggenda, incendiarono le navi romane nel porto di Siracusa, rappresentarono una prima applicazione di quello che oggi chiamiamo *solare termodinamico* (fig.1.2).



Figura 1.2 Stampa che riproduce l'uso degli specchi ustori durante l'assedio romano a Siracusa

L'ideazione di *pannelli solari termici* può risalire all'Impero romano che già conosceva un metodo per sfruttare l'irraggiamento solare per mezzo dell'effetto serra, creato dai vetri con cui venivano chiuse le finestre delle case.

Nel Cinquecento Leonardo Da Vinci aveva ampliato lo studio di *parabole* per concentrare l'energia solare per applicarlo all'industria dell'epoca.

Nel Settecento, Lavoisier riuscì a fondere il platino, il cui punto di fusione è di 1780 °C, riscaldandolo tramite la concentrazione di raggi solari.

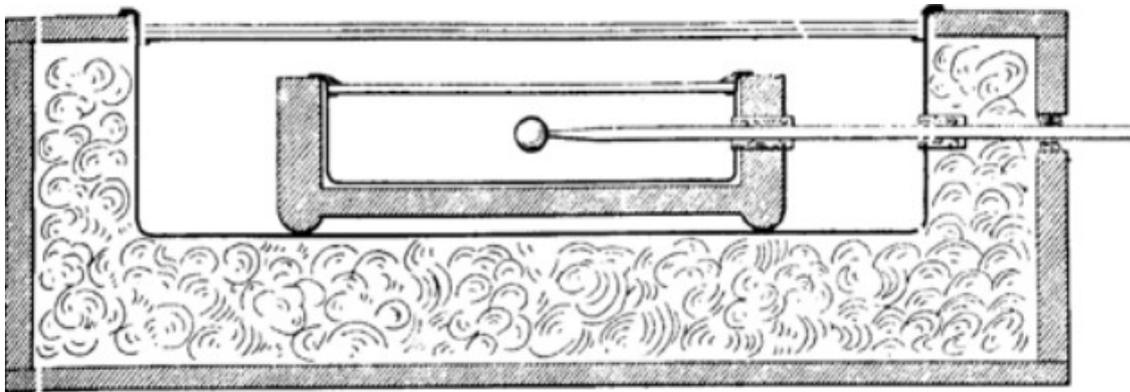
Nel 1767 fu inventato dallo scienziato svizzero Horace-Bénédict de Saussure (fig. 1.3) il primo esempio di *collettore solare*. Si trattava di una scatola di legno foderata di sughero nero, sulla parte superiore della quale erano applicati tre strati di vetro posti ad opportuna distanza per assorbire energia termica.

Questa specie di pentola veniva utilizzata dagli americani per cucinare in quanto la temperatura all'interno della scatola arrivava a 109 °C.



Figura 1.3 *Horace-Bénédict de Saussure*

La *scatola di Saussure* (**fig. 1.4**), nota anche con il nome di *Eliometro*, fu il primo forno solare in grado di raggiungere temperature di 230 gradi Fahrenheit (110°C).



Cross-section of Langley's hot box, which was similar to de Saussure's later models. A thermometer penetrating the walls at right was used to measure the air temperature inside the inner box.

Figura 1.4 *Scatola di Saussure*

Nel 1830 in Inghilterra John Herschel perfezionò il sistema ideato da Horace-Bénédict de Saussure da cui nacque una tecnica di cottura chiamata oggi *solar cooking*.

Nell'Ottocento il francese Augustin Mouchot (**fig. 1.5**) pensò di sfruttare l'energia solare per la produzione di energia meccanica, con l'intento di ridurre la dipendenza dal carbone dell'industria

del suo Paese. Nel 1860 iniziò ad esplorare l'energia solare, sulla base del lavoro di Horace-Bénédict de Saussure e Claude Pouillet. Ulteriori esperimenti hanno coinvolto una caldaia piena d'acqua racchiusa in vetro, esposta al calore del sole fino alla bollitura dell'acqua, il vapore così prodotto avrebbe dovuto fornire l'energia motrice per un piccolo motore a vapore.

Nell'agosto del 1866 Mouchot sviluppò il primo *collettore parabolico solare*, che fu presentato all'imperatore Napoleone III a Parigi.



Figura 1.5 Augustine Mouchot

La pubblicazione del suo libro sull'energia solare, *La Chaleur solaire et ses Applications industrielles* (1869), ha coinciso con l'inaugurazione del più grande motore a vapore solare mai costruito.

Nel dicembre del 1875 presentò all'Accademia delle Scienze un dispositivo che, con il sole ottimale, avrebbe fornito un flusso di vapore di 140 litri al minuto.

Nel 1878 Mouchot realizzò un motore presso l'Esposizione Universale di Parigi, e vinse una medaglia d'oro per le sue opere, in particolare per la produzione di ghiaccio con il calore solare concentrato (**fig. 1.6**).

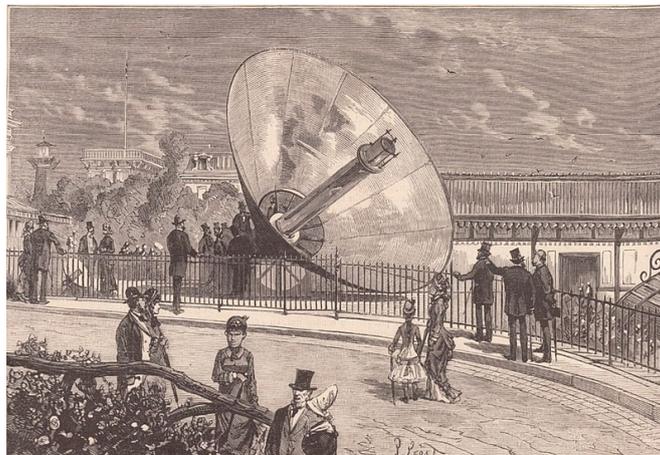


Figura 1.6 Generatore solare del 1878

Nel 1878 l'inglese William Adams cominciò la costruzione della prima *torre a concentrazione* per la produzione di energia elettrica.

Nel 1885 il francese Charles Tellier utilizzò dei *pannelli solari* piatti per la produzione di vapore.

In questo stesso periodo John Ericsson inventò i *primi pannelli parabolici* e li applicò a vari motori solari che usavano alternativamente aria calda o vapore.

L'americano Clarence Kemp brevettò nel 1891 il primo *pannello solare termico* per la produzione di acqua calda sanitaria; questo sistema ebbe un grande successo e si diffuse facilmente a seguito della crisi energetica del 1973.

Nel 1897 un terzo delle case di Pasadena, in California, erano dotate di *dispositivi solari* per il riscaldamento dell'acqua.

Nel 1906 Frank Shuman costruì un impianto in grado di sfruttare solo il vapore per produrre una capacità energetica di circa 300 kW. L'impianto copriva una superficie di 4.000 m² ed era situato in Egitto.

Dopo la prima guerra mondiale, a partire dal 1920 negli USA, in particolare in Florida e California, iniziò a diffondersi un sistema a circolazione naturale chiamato *day and night water heater*, in grado di fornire acqua calda 24 ore al giorno; si trattava di un *sistema a circolazione naturale* in cui l'acqua veniva accumulata in un serbatoio posto più in alto dei collettori solari piani.

Nel 1935, sempre in America, fu realizzato il primo edificio in cui il riscaldamento era affidato a una serie di *collettori solari*.

Nel 1950 si diffondono i primi *boiler solari*.

1.3 La radiazione solare

La radiazione solare è l'energia radiante emessa dal Sole nello spazio interplanetario, generata a partire dalle reazioni termonucleari di fusione che avvengono nel nucleo solare e che producono radiazioni elettromagnetiche a varie frequenze o lunghezze d'onda, le quali si propagano poi nello spazio alle velocità tipiche di queste onde, trasportando con sé energia solare. La quantità totale di radiazione emessa dal Sole nell'unità di tempo, nell'unità di superficie e misurata alle soglie esterne della atmosfera terrestre, come valore pressoché costante nel tempo, è detta *costante solare*.

Ogni forma di vita presente sulla Terra viene mantenuta dal flusso energetico solare che penetra nella biosfera. L'energia utilizzata per la formazione ed il mantenimento della biomassa è l'1% della radiazione totale in arrivo. Lo scambio energetico della radiazione solare con le molecole terrestri, avrà un'influenza diretta sulla temperatura dell'aria e del terreno e quindi sul processo di evapotraspirazione (consiste nella quantità d'acqua che dal terreno passa nell'aria allo stato di vapore per effetto congiunto della traspirazione, attraverso le piante, e dell'evaporazione, direttamente dal terreno), e indirettamente sul valore di umidità atmosferica e sul movimento delle masse d'aria e delle precipitazioni (fig.1.7).

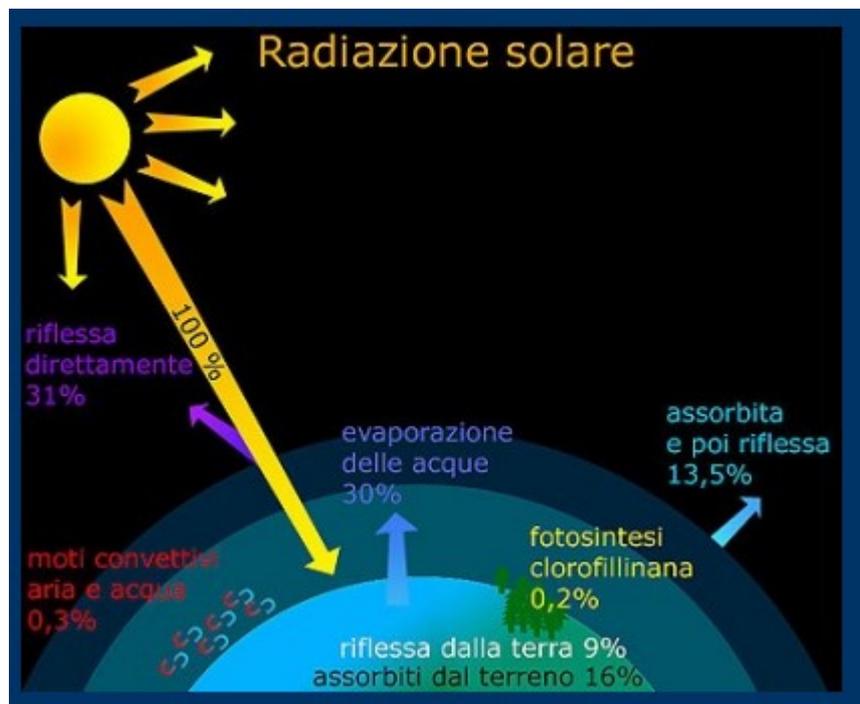


Figura 1.7 Incidenza della radiazione solare sulla terra

La radiazione solare non è concentrata su una singola frequenza, ma è distribuita su un ampio spettro di frequenze, in modo non uniforme, ma con la tipica forma *a campana*, similmente allo spettro del corpo nero, col quale la sorgente solare è confrontata. Il massimo della radiazione, misurata fuori dall'atmosfera terrestre (in base alla *legge di Wien*), è centrato nella banda della *luce visibile*, che ha il picco alla lunghezza d'onda di circa 500 nm, corrispondente al colore Ciano-Verde.

La banda delle radiazioni fotosinteticamente attive (PAR) va dai 400 ai 700 nm, corrisponde alla *radiazione visibile* ed è pari al 41% della radiazione totale. All'interno del PAR esistono sottobande con radiazioni:

- *blu-violette*, (400-490 nm), assorbite dai pigmenti, con azione sulla fioritura, sintesi proteica, effetti fototropici, medio effetto sulla fotosintesi;
- *verdi* (490-560 nm), le meno attive fotosinteticamente;
- *gialle* (560-590 nm);
- *rosso-arancio* (590-700 nm), molto attive per la fotosintesi.

Oltre alla radiazione visibile una componente energeticamente minoritaria, ma comunque degna di nota per i loro effetti è costituita dagli *infrarossi* e soprattutto dai *raggi ultravioletti* (**fig. 1.8**)

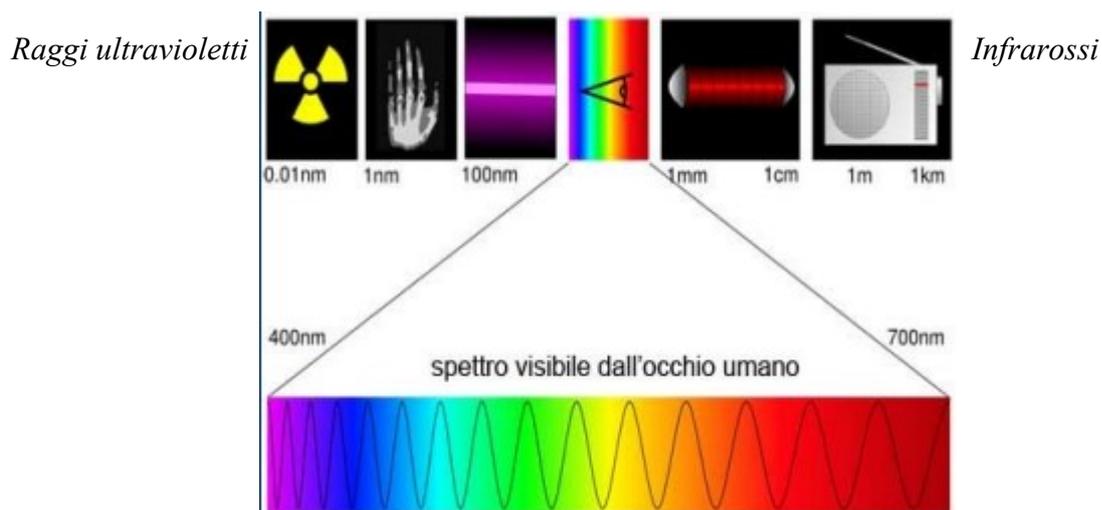


Figura 1.8 Schema delle radiazioni visibili e non visibili

Nell'attraversare l'atmosfera la radiazione solare subisce fenomeni di *riflessione, rifrazione, assorbimento*, diffusione ad opera dei vari gas atmosferici in misura variabile in funzione della frequenza, così che al suolo lo spettro solare risulta irregolare rispetto a quello rilevato alle soglie esterne dell'atmosfera (TOA) con presenza di tipiche bande di assorbimento o riflessione (**fig. 1.9**).

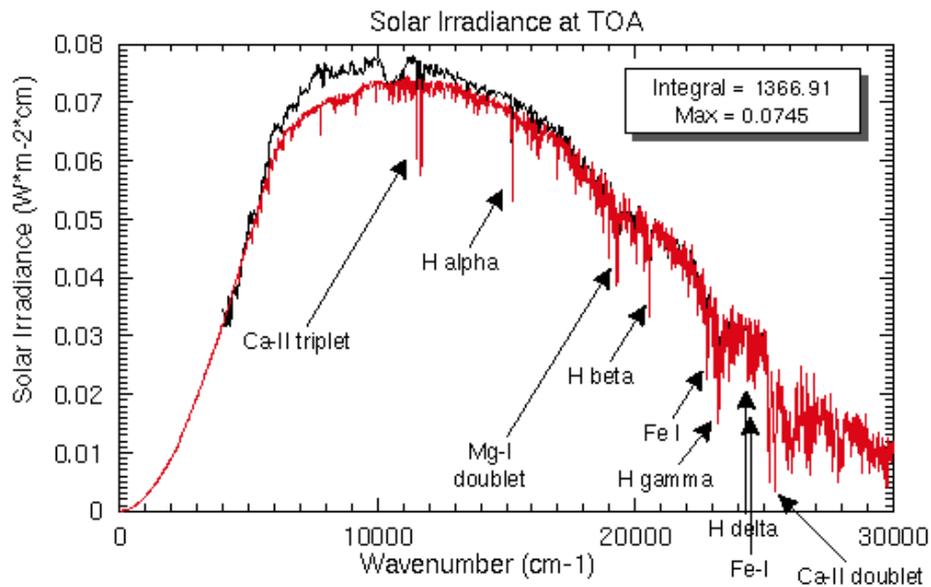


Figura 1.9 *Spettro di radiazione solare alle soglie dell'atmosfera terrestre*

La Terra riceve dal Sole mediamente 1366 W/m^2 (*costante solare*). Questa è riferita alle soglie dell'atmosfera e al piano perpendicolare ai raggi solari entranti: occorre quindi considerare che questa sulla Terra colpisce una calotta sferica per 1440 minuti ogni giorno, riducendosi del 75%.

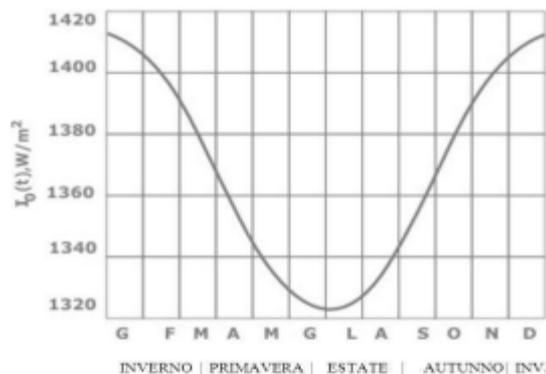


Figura 1.10 *Variazione della costante solare nel corso dell'anno*

Fuori dall'atmosfera terrestre:

$$CS = 1321 \text{ W/m}^2 \text{ (in giugno)} < 1368 \text{ W/m}^2 < 1412 \text{ W/m}^2 \text{ (in gennaio)}$$

Poiché l'atmosfera riflette e assorbe una parte della radiazione solare, il valore di CS a terra è:

$$CS = 1000 \text{ kW / m}^2 \text{ (nelle giornate limpide e serene dell'anno)}$$

L'atmosfera filtra in una certa misura i raggi solari provocando (**fig. 1.11**):

- una *riflessione* ed una retrodiffusione dei raggi dovuta alla sua albedo, alle nubi e ai gas atmosferici stessi;
- un *assorbimento* che ne provoca un aumento di temperatura, a seguito del quale riemette radiazioni in ogni direzione in accordo con la *legge di Wien*. Tale assorbimento è comunque modesto nella banda della luce visibile risultando così trasparente alla radiazione solare diretta.

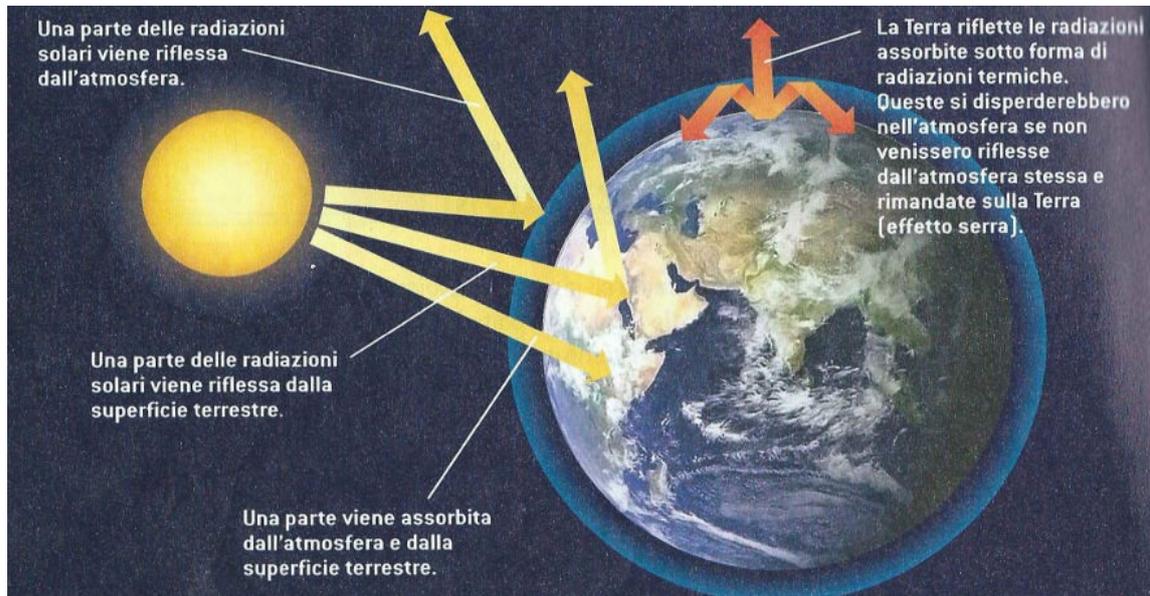


Figura 1.11 *Riflessione e assorbimento della radiazione solare*

Circa metà della radiazione attraversa invece l'atmosfera senza alterazioni prendendo il nome di *radiazione netta*. Metà della radiazione netta contribuisce infine all'evaporazione delle masse d'acqua, di conseguenza l'energia disponibile è circa un quarto di quella complessivamente emessa.

La stratosfera assorbe i raggi ultravioletti compresi nella banda 200-300 nm grazie all'ozono, la troposfera assorbe e diffonde l'infrarosso grazie al vapore acqueo e alla CO₂. L'azione di filtro delle bande alle lunghezze d'onda dell'ultravioletto, per la maggior parte letali, è essenziale per lo sviluppo della vita (**fig. 1.12**).

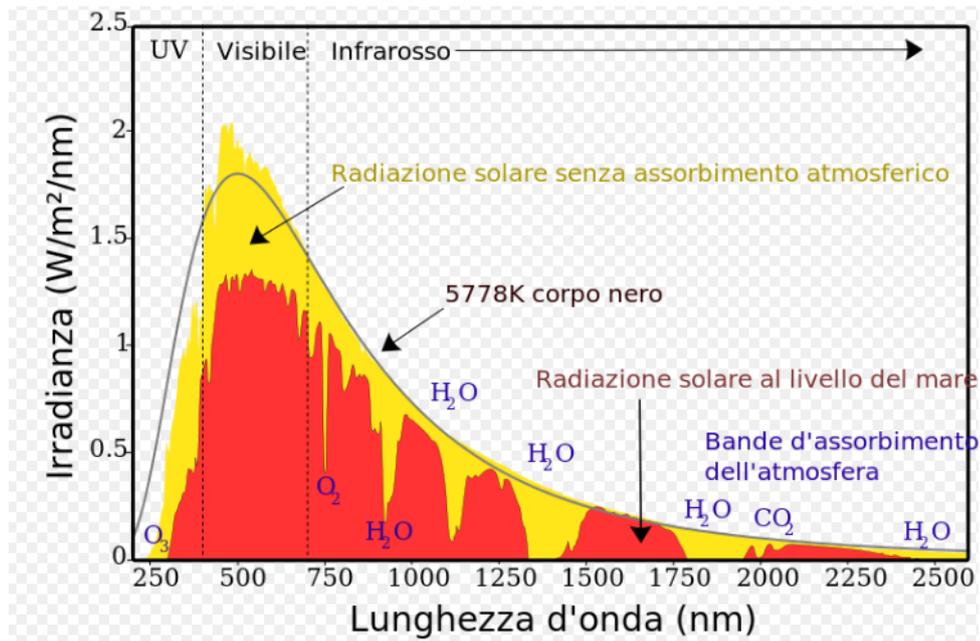


Figura 1.12 *Spettro della radiazione solare al di sopra dell'atmosfera e sulla superficie terrestre*

In base alle modalità con cui la radiazione solare viene filtrata dall'atmosfera possiamo distinguere queste componenti (**fig. 1.12**):

Radiazione diffusa (o indiretta)

Detta anche *indiretta*, rappresenta quella quota di radiazione che ha colpito almeno una particella dei gas atmosferici cambiando angolo di incidenza e che arriva comunque nel suolo perché verso esso indirizzata. Aumenta relativamente alla totale in cieli nuvolosi. In particolare lo scattering di *Rayleigh* della componente blu della radiazione solare è responsabile del colore blu del cielo. Una parte della radiazione diffusa è retrodiffusa verso lo spazio.

Radiazione incidente

È quella radiazione che ha incontrato un ostacolo qualsiasi al quale ha ceduto tutta o una parte della propria energia. L'energia che non arriva alla superficie della terra si dice estinta ed è formata dalla radiazione riemessa, riflessa e retrodiffusa verso lo spazio.

Secondo la **legge di Lambert** la quantità di radiazioni che colpisce l'unità di superficie è proporzionale al coseno dell'angolo d'incidenza:

$$I' = I \times \cos\alpha$$

Si ha la massima quantità con incidenza perpendicolare, all'aumentare dell'angolo aumenta sia la superficie colpita dalla stessa quantità di radiazioni che lo spessore dell'atmosfera attraversato da questi. Ciò crea le variazioni d'irraggiamento giornaliere, annuali e latitudinali.

Radiazione riflessa

La radiazione *riflessa* è quella quota parte della radiazione solare incidente riflessa dalla superficie terrestre per effetto dell'albedo. L'*albedo* è il *coefficiente di riflessione c*. I valori di *c* sono di solito compresi tra 0 e 1 oppure sono espressi in percentuale. È data dal rapporto tra l'energia radiante riflessa da una superficie rispetto all'energia incidente. La Terra ha un valore medio del 40% ($c = 0,4$). Alla quota di albedo terrestre si aggiungono le radiazioni riflesse dalle particelle atmosferiche verso lo spazio.

Radiazione assorbita

Detratte tutte le perdite per riflessione e retrodiffusione da parte di atmosfera e superficie terrestre, l'energia incidente che rimane è assorbita dalla superficie terrestre e contribuisce così al suo riscaldamento, in maniera variabile a seconda della latitudine e del tipo di superficie.

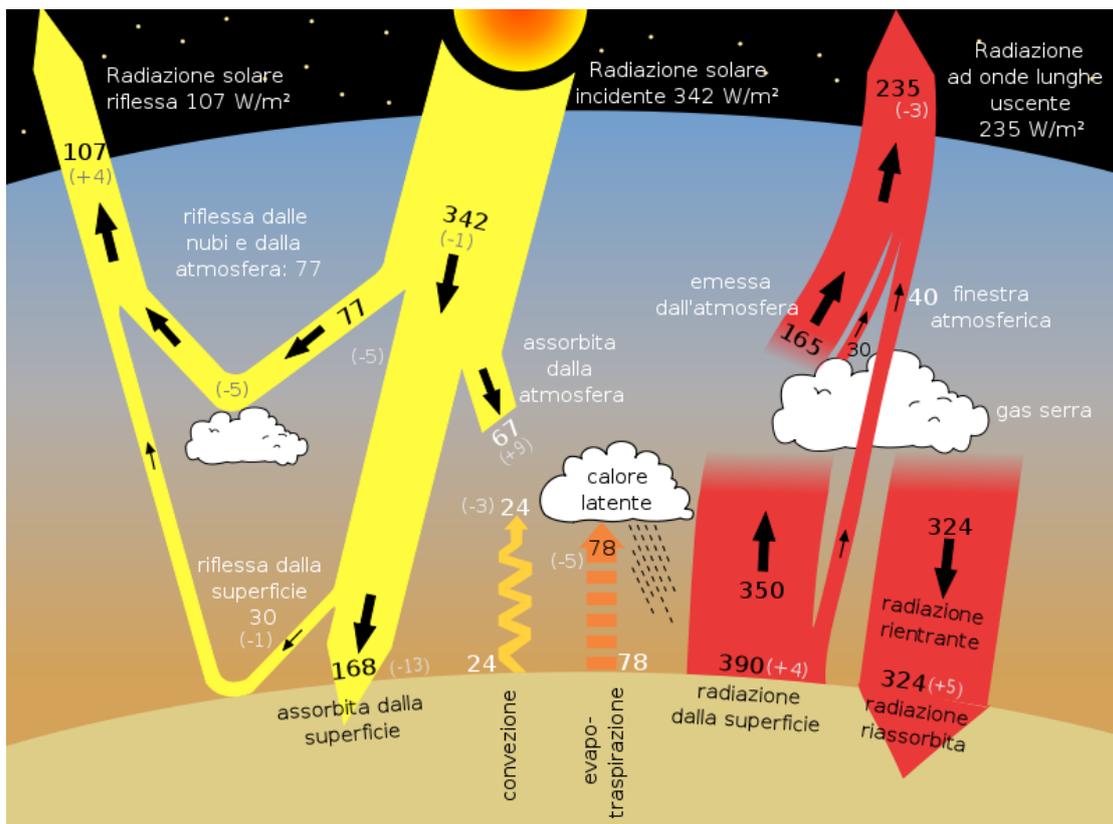


Figura 1.13 *Flussi radiativi in atmosfera*

1.4 Che cos'è un forno solare

Il *forno solare* è un dispositivo in grado di concentrare la luce del sole per fini alimentari: i suoi utilizzi più comuni vanno dalla cottura o riscaldamento di cibi, fino alla sterilizzazione dell'acqua.

I forni solari sono dunque dei sistemi termodinamici che convertono l'energia solare in energia termica da sfruttare per il riscaldamento e la cottura di cibo.

Questa tecnologia si sta diffondendo sia nei paesi in via di sviluppo che in situazioni emergenziali, ma anche tra i paesi ricchi come valida risposta alle crisi ambientale, energetica ed economica.

Sono anche interessanti le potenzialità che la cucina solare rivela in situazioni di emergenza umanitaria. Basti pensare che in caso di disastri ambientali quali terremoti, maremoti o alluvioni, la prima mancanza che ci si trova a dover affrontare è quella relativa all'energia elettrica: l'immediata conseguenza di un evento simile, in assenza di forni solari, è l'impossibilità di cuocere cibi.

Ma i vantaggi derivanti dall'utilizzo del sole nella cottura dei cibi sono innumerevoli anche alle nostre latitudini. I forni solari operano generalmente a temperature più basse rispetto a quelle raggiunte dalla cucina tradizionale e ciò consente di non dover essere presenti durante la cottura, in quanto non c'è bisogno di controllare che il cibo non bruci. Inoltre, cucinare a temperature più basse contribuisce a preservare nutrienti, i quali andrebbero persi alle temperature della cucina tradizionale, e l'assenza di fiamme vive riduce il rischio di incendi.

L'utilizzo dei forni solari permette, soprattutto nei mesi estivi, di non surriscaldare gli ambienti interni all'abitazione, riducendo notevolmente il consumo energetico per il raffrescamento degli stessi. Oltretutto, dato non immediatamente percepibile, l'utilizzo di forni solari, essendo dispositivi non connessi alla rete energetica, diminuisce il carico sulla rete sulla rete stessa nel periodo del loro funzionamento. Per un'abitazione totalmente elettrica, servita da un impianto fotovoltaico, ad esempio, l'uso di forni solari "libera" un certo quantitativo di kW prodotti dal FV; questo si traduce nell'avere a disposizione una potenza utile per altre applicazioni.

Il mercato dei forni solari offre una vasta scelta, sia ai fini dell'auto-costruzione, che dell'acquisto vero e proprio di un dispositivo. Diversi sono infatti i privati cittadini che si cimentano nella costruzione di piccoli forni solari, perché spinti da una particolare attitudine ecologista, per una questione di strategia in caso di black-out energetico, o perché desiderosi di trovare soluzioni originali di cucina nelle situazioni più disparate, quale, ad esempio, il campeggio.

Essi possono essere classificati in base al tipo di concentrazione della radiazione solare realizzabile, le diverse tipologie di forni solari (sia da costruire che da acquistare) possono essere raggruppate in tre principali categorie [1]:

- *forni a pannelli*, che verranno ampiamente trattati in questo elaborato;

- *forni a scatola*, con o senza specchi riflettenti: più semplici e facili da costruire in casa con materiali poveri. Con questo tipo di forni la cottura avviene generalmente a basse temperature: ciò consente di allontanarsi per svolgere altre faccende senza rischiare di bruciare il cibo.
- *forni aperti a concentrazione*, parabolici o di differente geometria: molto più efficienti di quelli a scatola anche se più cari, sfruttano uno specchio per concentrare al massimo la luce nel punto in cui si pone il ricevitore, superando anche i 200°C di temperatura.

1.4 Tipologie di forni solari e caratteristiche

1.4.1 FORNI SOLARI PARABOLICI E A CONCENTRAZIONE

Il termine *parabola* viene usato per indicare una porzione di paraboloide, ricavato dall'intersezione del paraboloide stesso con un piano perpendicolare all'asse.

Questi forni sono particolarmente efficienti e la loro potenza li rende in grado di avvicinarsi maggiormente alla tradizionale cottura ai fornelli senza la necessità di un involucro trasparente in cui isolare la pentola.

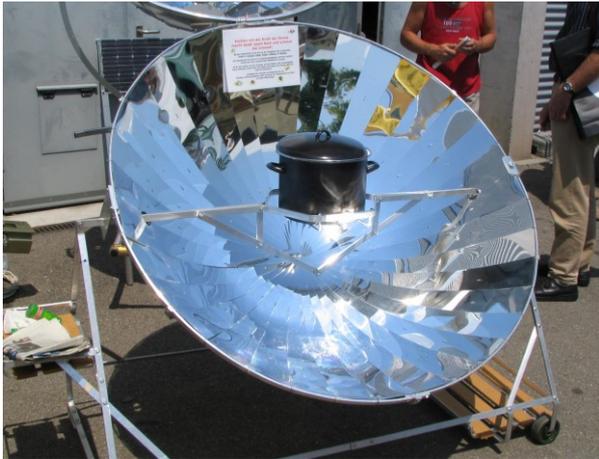
La proprietà principale è infatti quella per la quale i raggi riflessi sulla loro superficie si concentrano in un unico punto, denominato fuoco, in cui si raggiungono temperature elevate (superiori ai 200°C). Nella parabola classica il fuoco è centrato, mentre nel modello *offset* esso è spostato rispetto alla verticale di un certo angolo (*angolo di offset*).

Esistono modelli a “Fuoco esterno”, dove il ricevitore è posto al di fuori dal piano della parabola e necessitano di sistema di supporto esterno; ed a “Fuoco interno”, dove il ricevitore è posto all'interno del piano ottico.

La dimensione della parabola dipende dalle temperature che si vogliono ottenere e dalla precisione del punto focale: tanto più precisa è la parabola, tanto più piccolo è il punto focale, con maggiori temperature raggiungibili, e maggiore necessità di continui allineamenti con il sole.

La superficie della parabola è rivestita esternamente da un materiale riflettente, che influisce notevolmente sulle prestazioni del forno; in genere vengono utilizzati materiali quali: vinile riflettente cromato, alluminio anodizzato, specchi, mylar.

Nella versione più classica del forno (**fig. 1.14**), la parabola viene montata su un telaio che le permette di essere inclinata rispetto all'asse orizzontale e di essere ruotata. Su due estremità opposte della parabola viene realizzato un supporto per il contenitore di cibo, la cui posizione dovrà ovviamente coincidere con il punto focale. I forni solari parabolici sono molto efficienti e possono raggiungere temperature fino a 230°C in soli 10 minuti.



1.14 Forno Solare Parabolico

La realizzazione di forni parabolici risulta molto più complessa e più costosa rispetto ai forni a scatola, motivo per cui vengono molto più spesso acquistati che non auto-costruiti.

Nel Dipartimento dell'Univpm non sono presenti forni parabolici ma viene studiato un prototipo di forno aperto costituito da una struttura mobile di differente geometria, chiamato “**Heliac**”. Il suo funzionamento è molto interessante perché consente di catturare la radiazione solare attraverso delle *lenti di Fresnel* per concentrarla all'interno del ricevitore (come si può vedere in **figura 1.15**). Questo forno permette di raggiungere elevate temperature.



Fig. 1.15 Forno solare aperto a concentrazione “Heliac”

1.4.2 FORNI SOLARI A SCATOLA

Come suggerito dal nome, questi forni consistono in una scatola, la cui faccia superiore è trasparente, spesso di vetro, per permettere l'entrata dei raggi solari all'interno, dove le superfici sono di colore nero per assorbire la maggior quantità di radiazioni possibile. All'interno di essa vengono posti i contenitori con il cibo da cuocere. Nelle **figure 1.16, 1.17 e 1.18** sono riportati due esempi di forni a scatola studiati nel Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona.

Il principio fisico è molto semplice: la radiazione solare attraversa il vetro con facilità ed entra nel forno, dove viene assorbita dalla superficie nera. Si crea così all'interno una radiazione termica la cui fuoriuscita viene ostacolata dal vetro superiore. La spiegazione fisica di questo fenomeno è data dal fatto che la radiazione solare e quella termica presentano lunghezze d'onda differenti, per cui il vetro assorbe la prima e riflette la seconda, creando una sorta di effetto serra artificiale prodotto all'interno della scatola (**fig.1.19**).

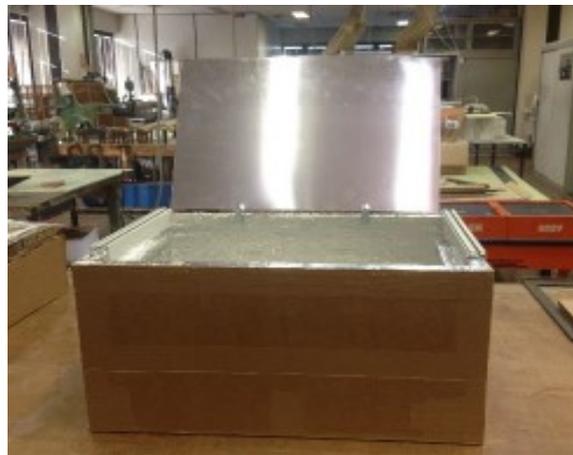


Figura 1.16 *Forno solare a scatola con uno specchio riflettente*

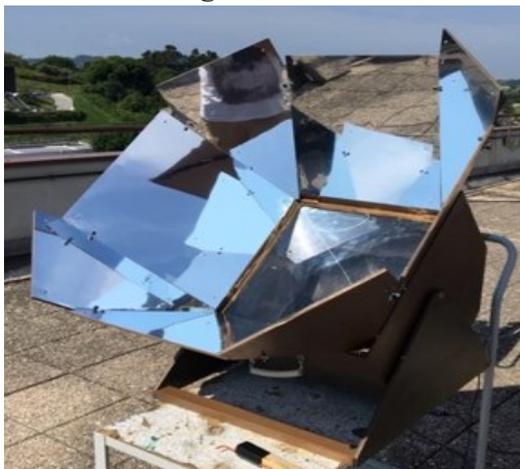


Figure 1.17 e 1.18 *Forno solare a scatola portatile (a sinistra) e forno ad alta concentrazione con specchi riflettenti (a destra)*

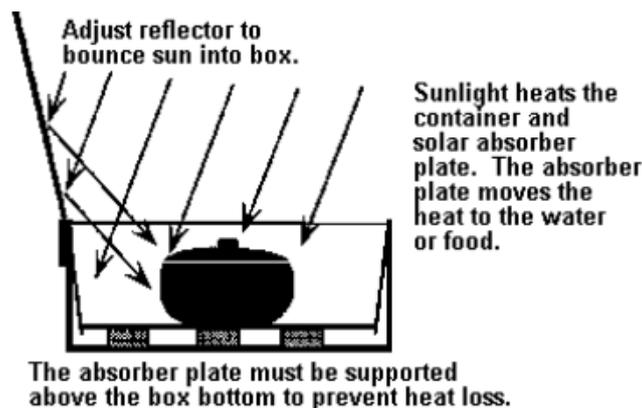


Figura 1.19 *Principio di assorbimento della radiazione solare*

Per aumentare l'efficienza di questo schema di base, si può lavorare su due aspetti:

1. Il posizionamento di superfici riflettenti sui bordi esterni della scatola, in modo da aumentare la quantità di radiazione solare che attraversa il vetro.
2. La ricerca di materiali che garantiscano il massimo isolamento termico al corpo della scatola, per impedire la dissipazione di calore.

Questo tipo di forno può essere costruito con materiali quali alluminio, plastica, legno o addirittura cartone e raggiunge al massimo i 200°C, risultando ideale per cotture delicate.

Proprio per le temperature che è in grado di raggiungere, risulta praticamente impossibile bruciare il cibo, per cui una volta inseriti gli alimenti al loro interno e orientati verso il sole, ci si può dedicare ad altre attività, controllando e aggiustando di tanto in tanto l'allineamento rispetto al sole.

Poiché non necessita di tecnologie sofisticate per essere prodotto, è il più diffuso a livello mondiale, utilizzato soprattutto nei territori del terzo mondo o in situazioni di emergenza.

I tempi di cottura dipendono dal tipo e dalla quantità di alimenti ma, generalmente, sono comprese tra una e tre ore (cibi particolari possono richiedere anche più tempo).

1.4.3 FORNI SOLARI A PANNELLI

Questa tipologia incorpora elementi propri del forno solare a scatola e di quello parabolico. Essa è caratterizzata da un corpo composto da pannelli, in genere di carta o plastica, rivestiti di materiali riflettenti, al cui centro viene posto il contenitore per la cottura del cibo, preferibilmente di colore nero ed inserito in un sacchetto di plastica resistente che impedisce al calore di fuoriuscire. Spesso questi pannelli sono facce di un unico corpo pieghevole ed è possibile che sia presente anche un vetro esterno per poter ottenere temperature più alte, raggiungibili per mezzo dell'isolamento o effetto serra artificiale che si crea all'interno dell'involucro in vetro o altro materiale trasparente.

Il forno a pannelli è sicuramente la tipologia di forno più economico e semplice da costruire, grazie al design minimale e alla natura dei materiali utilizzati, come ad esempio il **forno solare Newton** presente all'interno del DIISM. (**fig. 1.20**).

Esistono anche forni a pannelli per contesti prevalentemente domestici, costituiti per esempio da pannelli rigidi di metallo, aventi efficienza più elevata e, di conseguenza, un prezzo maggiore. Questa tipologia di forni permette di raggiungere in breve tempo temperature superiori ai 180°C, sono molto semplici da costruire ma consentono la cottura di meno cibo rispetto a un Box Solar Cooker.



Figura 1.20 Newton Solar Oven

1.4.4 FORNI SOLARI A TUBI SOTTOVUOTO

Il primo ad utilizzare questo tipo di tecnologia è stato apparentemente Alex Kee in Malesia, il quale ha presentato il suo fornello solare durante la Conferenza internazionale di Solar Cookers and Food Processing (2006) a Granada, in Spagna.

Questa tipologia funziona all'incirca come un thermos, presentando una parete a doppio vetro, la cui tecnologia deriva da quella dei tubi sottovuoto utilizzata per i pannelli solari. La camera di cottura è costruita con due strati di vetro soffiato a forma di tubo sigillato, dove l'aria è stata rimossa tra gli strati. La camera è così efficiente che spesso non richiede un grande riflettore per catturare la luce solare. All'interno del tubo viene inserito uno strato di metallo e l'estremità opposta è sigillata con un tappo o è stata sigillata durante il processo di fabbricazione (**fig.1.21**).



Figura 1.21 Evacuated Tube Solar Cooker

Quando i raggi del sole colpiscono il materiale, questo si riscalda e il calore generato viene trattenuto nel tubo. Come un termostato, è un eccellente isolante che impedisce la perdita di calore. Non c'è rischio di bruciature, la superficie della pentola rimane sempre fredda (fig.1.22).

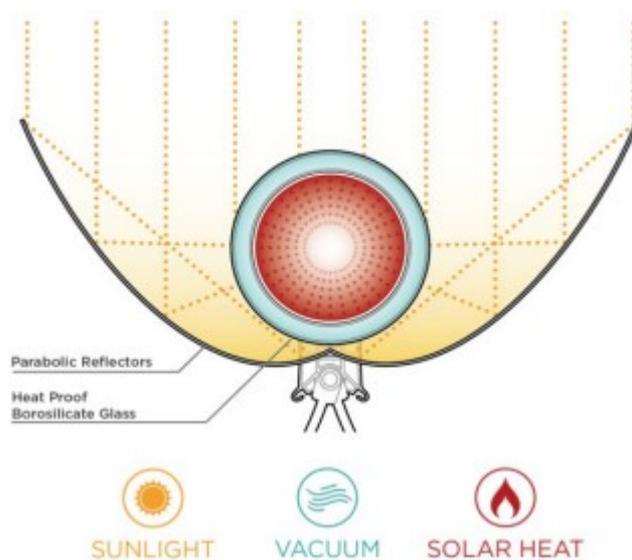


Figura 1.22 Principio di funzionamento dei tubi sottovuoto

Per inserire il cibo, basta far scorrere il *cassetto* tubolare nel tubo e mettere il cibo che si desidera nel tubo prima di chiuderlo. I miglioramenti nella tecnologia del vetro consentono di fabbricare tubi anche di diametro elevato, il che consente di inserire all'interno vaschette più grandi. Questo sistema tubolare è allo stesso tempo molto semplice e molto efficace, raggiungendo anche temperature di 280°C.

Per costruire questa tipologia di forni solari è necessario avere accesso ai tubi sottovuoto, motivo per cui vengono molto più spesso acquistati che auto-costruiti. E' possibile costruire forni solari a tubi isolati il cui principio di funzionamento è identico a quello dei tubi sottovuoto ma le cui temperature di funzionamento sono molto più simili a quelle dei Box Solar Cooker.

La ricerca è molto attiva per migliorare le prestazioni di tutte le tipologie di forni, anche in condizioni climatiche non favorevoli. Attualmente molto interesse suscitano i materiali a cambiamento di fase (PCM), nei quali il calore latente viene immagazzinato quando questi materiali cambiano fase durante il processo di riscaldamento. Se per qualsiasi motivo (ad esempio, l'improvvisa formazione di nuvole) l'apporto energetico del sole dovesse venire meno, questi materiali sono in grado, cambiando nuovamente fase, di restituire il calore latente in modo che il processo di riscaldamento possa continuare.

1.4.5 Confronto tra le principali geometrie di forni

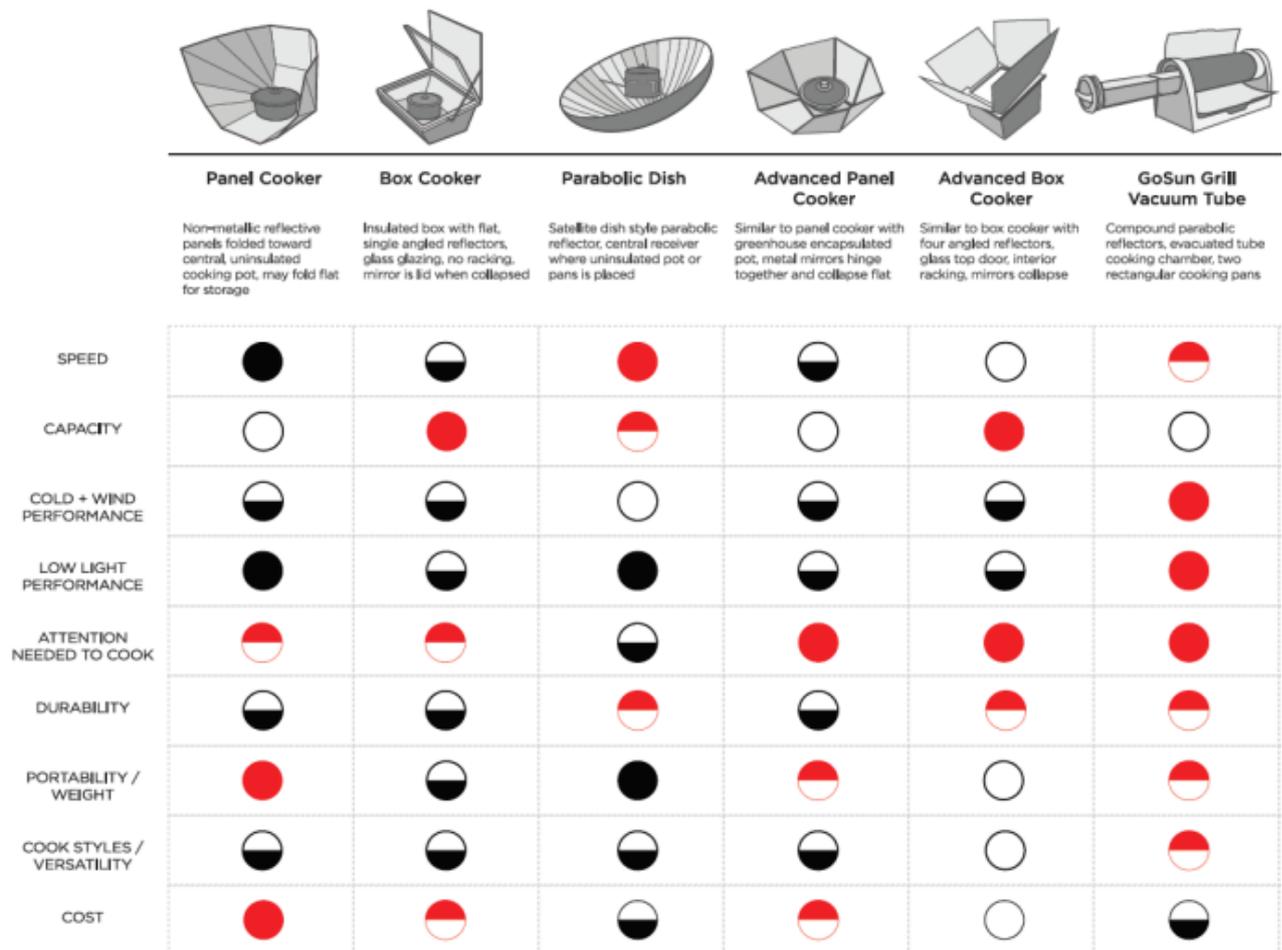


Figura 1.23 Prestazioni dei forni solari a confronto

LEGENDA:

- ◑ Prestazioni medio-alte
- ◐ ● Prestazioni medio-basse

2 Realizzazione dei prototipi di tipo panel utilizzati

2.1.2 Principio di funzionamento [2]

Il forno solare ha la funzione di scaldare gli alimenti ricorrendo all'*effetto serra* (**fig 2.1**). Esso inoltre può essere impiegato non solo per cucinare, ma anche per sterilizzare l'acqua e la strumentazione medica.

L'aumento della temperatura ad opera dell'effetto serra, continua fino a quando non si raggiunge un *punto di equilibrio* fra l'apporto di energia del sole e le perdite di calore attraverso le pareti, il fondo e coperchio del ricevitore.

La luce solare assorbita dalla pentola scura, viene convertita in radiazioni di maggiore lunghezza d'onda (*raggi infrarossi*). La luce visibile passa facilmente attraverso il coperchio trasparente e viene in parte assorbita e in parte riflessa.

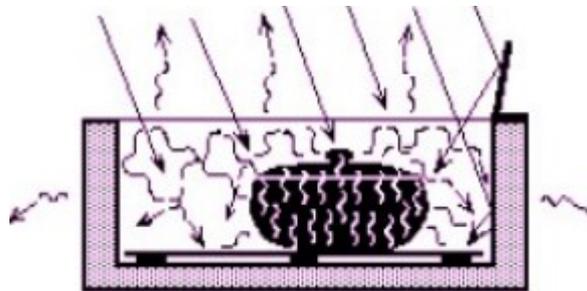


Figura 2.1 *Effetto Serra*

La *seconda legge della termodinamica* definisce che la temperatura si trasferisce sempre dal corpo più caldo al corpo più freddo. Il calore dall'interno del ricevitore viene perso principalmente in tre modi: *Conduzione, Convezione ed Irraggiamento* (**fig.2.2**), come analogamente avviene in una pentola.



Figura 2.2 *Modalità di trasmissione del calore in una pentola*

CONDUZIONE

Le maniglie di un tegame in metallo posto su un fuoco diventano calde per trasferimento del calore attraverso il materiale del tegame.

CONVEZIONE

Il trasferimento di calore delle molecole di aria che entrano ed escono dal contenitore è detto *convezione*. L'aria calda dei forni di cottura ad energia solare sfugge principalmente attraverso le fenditure del coperchio, l'apertura di accesso laterale, imperfezioni di costruzione. Dalle stesse vie l'aria fredda può entrare nel contenitore.

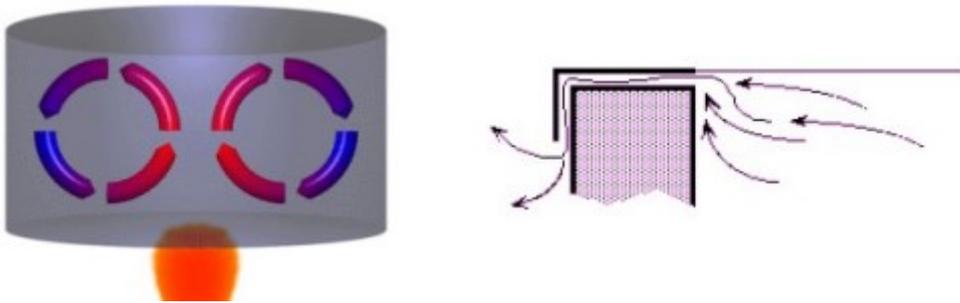


Figura 2.3 *Moti convettivi che provocano la fuoriuscita e la perdita di calore*

La capacità del forno di mantenere la temperatura, aumenta mano a mano che aumenta la densità ed il peso dei materiali.

L'energia introdotta viene trasferita e conservata in questi materiali pesanti rallentando il riscaldamento dell'aria contenuta nel forno. Gli stessi materiali ad alta densità irradiano il calore mantenendo il forno caldo per un certo periodo di tempo.

IRRAGGIAMENTO

Gli oggetti riscaldati emettono onde termiche ed irradiano calore verso gli oggetti vicini attraverso l'aria o lo spazio. La maggior parte del calore irraggiato da un tegame in un forno di cottura è riflesso verso il tegame stesso o il fondo di assorbimento dal vetro o dalla superficie trasparente.

Anche se le superfici trasparenti riescono a riflettere all'interno la maggior quantità di calore irradiato, una buona parte riesce a sfuggire all'esterno.

Esistono diversi tipi di materiali che sono tipicamente usati nella costruzione dei forni solari.

Le proprietà che devono essere maggiormente tenute in considerazione sono le seguenti:

A. Materiale di costruzione

La struttura del materiale deve essere tale per cui il contenitore possa durare nel tempo e mantenere le forme e le caratteristiche con cui viene creato.

Molti dei materiali con buone caratteristiche strutturali sono troppo densi per essere buoni isolanti. Per avere delle buone caratteristiche strutturali e di isolamento, è solitamente necessario usare diversi materiali con diverse caratteristiche complementari.

B. Isolamento

Per ottenere all'interno del forno una temperatura sufficiente per la cottura è necessario che le pareti ed il fondo del contenitore siano convenientemente isolate (*ritenzione del calore*). Buoni materiali di isolamento sono i fogli di alluminio, che permettono una *riflessione radiante*.

Quando si realizza un forno di cottura è importante che il materiale di isolamento avvolga completamente tutte le pareti della cavità interna ad esclusione di quella trasparente che solitamente è quella superiore. Il materiale isolante deve essere installato in modo da ridurre al minimo la trasmissione della temperatura dal materiale del contenitore strutturale interno a quello del contenitore esterno. Minore è la perdita di calore, maggiore è la temperatura di cottura.

C. Materiali Trasparenti

Almeno una delle superfici deve essere trasparente ed essere rivolta verso il sole per effettuare il riscaldamento con l'*effetto serra*. I materiali trasparenti più comuni sono il vetro e le plastiche per alta temperatura come i sacchetti per cottura in forno.

Nei sistemi a doppia superficie trasparente, siano di vetro o di plastica, entrambi partecipano ad incrementare ed a disperdere il calore. In funzione del materiale utilizzato si può ridurre del 5-15% il rapporto *trasmissione solare/incremento del calore*.

D. Resistenza all'umidità

Tutti i cibi che vengono cotti nei forni a cottura solare contengono umidità. Quando l'acqua o il cibo vengono riscaldati nel forno solare, si crea una pressione che spinge l'umidità dall'interno verso l'esterno del contenitore. Ci sono molti modi in cui può avvenire questo trasferimento. Può sfuggire direttamente dalle fessure o, se non sono previste le barriere anti umidità, può essere compresso nelle pareti o nel fondo del contenitore.

Nella progettazione dei forni di cottura è molto importante che la superficie più interna del contenitore sia una ottima barriera anti vapore. Questa barriera protegge i componenti della struttura e dell'isolamento dai danni causati dall'umidità che potrebbe trasferirsi nelle pareti e nel fondo del contenitore.

Altri parametri importanti sono:

E. Dimensioni del contenitore

Il forno per cottura solare deve essere dimensionato secondo i seguenti fattori:

- la dimensione deve essere calcolata per accogliere la maggiore quantità di cibo normalmente cucinata;
- se il forno deve essere spostato frequentemente, le dimensioni non devono essere tali da renderlo difficoltoso;
- la forma del contenitore deve essere compatibile con i tegami disponibili.

F. Rapporto Volume contenitore-Area di captazione solare

Mantenendo costanti tutti gli altri parametri, maggiore è l'area di captazione esposta al sole confrontata con l'area di dispersione del contenitore, maggiore sarà la temperatura di cottura.

Supposto che due contenitori abbiano la stessa area di captazione con le stesse dimensioni e proporzioni, quello con minore profondità avrà una minore dispersione perché ha un'area di dispersione inferiore.

G. Proporzioni del forno

Un forno per cottura solare rivolto verso il sole di mezzogiorno deve avere la sua dimensione maggiore orientata nella direzione est/ovest per avere una migliore esposizione del riflettore durante il periodo di alcune ore di cottura.

Mano a mano che il sole si sposta attraverso il cielo, questa configurazione si dimostra la più idonea per una migliore temperatura di cottura.

Con un contenitore di forma quadrata o con la dimensione maggiore in direzione nord/sud, una maggiore percentuale di raggi solari mattutini o serali sarà erroneamente riflessa in terra e non sul contenitore.

H. Riflettori

Uno o più riflettori possono essere utilizzati per convogliare una maggiore quantità di raggi solari all'interno del contenitore per aumentare la radiazione entrante e incrementare la temperatura di cottura in tempi rapidi, mantenendo potenze utili alla cottura degli alimenti.

Anche senza i riflettori è possibile cucinare correttamente nelle aree equatoriali dove il sole è praticamente a picco, ma il loro utilizzo nelle zone temperate può migliorare notevolmente le caratteristiche del forno.

2.1.2 Il ricevitore: cuore del sistema

Poiché le superfici scure diventano molto calde alla luce del sole, per cucinare è necessario usare pentole di metallo scure, poco profonde e sottili, con coperchi aderenti per trattenere calore e umidità (**fig. 2.4**).



Figura 2.4 Tortiera nera con coperchio in vetro

E' molto importante usare pentole di colore scuro che assorbono la luce e convertono la radiazione solare in calore. Al contrario pentole con finiture lucide riflettono la luce lontano dalla pentola invece di assorbirla (**fig.2.4**).



Figura 2.5 Differenza di assorbimento della radiazione solare tra una pentola nera e una chiara

L'utilizzo del coperchio di metallo nero tra la pentola ed il coperchio di vetro superiore, massimizza la distribuzione termica ed elimina il problema della condensa che, diversamente, andrebbe ad opacizzare il ricevitore, riducendo la resa ottica.

Il materiale di cui è composto il ricevitore influenzerà anche la velocità con cui si riscalda e quanto bene trattiene il calore (**fig. 2.6**). In generale le pentole realizzate con materiale sottile si riscaldano più velocemente di quelle più spesse e le pentole di metallo si scaldano più velocemente rispetto a quelle fatte di altri materiali, come la ceramica o la terracotta.

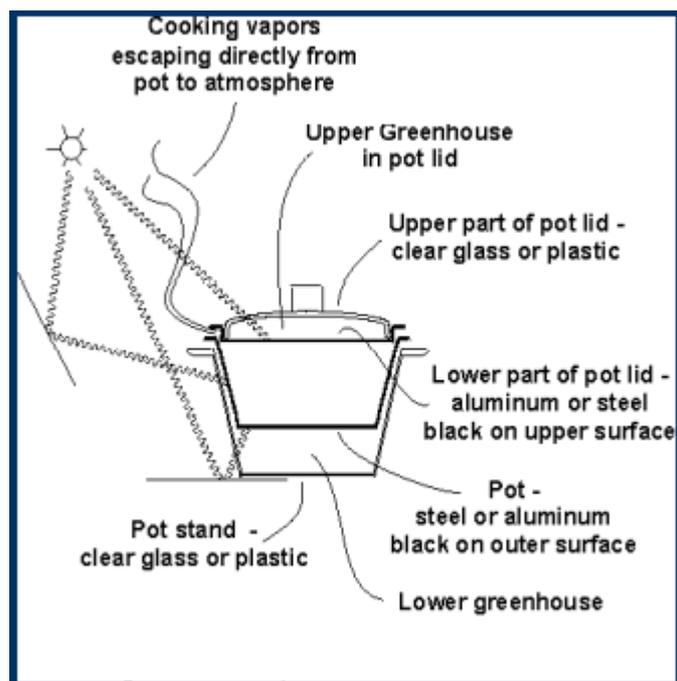


Figura 2.6 *Incidenza dei materiali sulle prestazioni del ricevitore*

Il ricevitore utilizzato nelle prove consiste in una **tortiera in acciaio inox nero** (diametro 20 cm, altezza di 6 cm, volume 1,8 dm³ e massa di 0,12 kg) posto all'interno di una **ciotola in vetro** (diametro 23 cm, altezza 10 cm, volume 2,9 dm³ e massa di 0,85 kg) e coperto da un **coperchio di vetro** di 22 cm con una massa di 0,43 kg. Il pomello del coperchio è stata rimosso per inserire il sensore di temperatura al centro della tortiera, che è stata fissata all'estremità superiore del coperchio in vetro mediante della **plastilina** per impedirne lo spostamento nel corso della prova e garantire una maggior accuratezza della misura rilevata (**fig. 2.7**).



Figura 2.7 *Ricevitore usato nelle prove, costituito da una tortiera in acciaio inox nero, una ciotola e un coperchio in vetro*

2.3 KIMONO [3] [17]

Il **Kimono Solar Cooker** è un forno solare a pannelli inventato da **Matteo Muccioli**. Ha una geometria autoportante ed è composto da due gruppi ottici principali fissati mediante un perno scorrevole che consente di regolarli e fissarli in posizione in base all'inclinazione del sole nel cielo.

L'inclinazione dei due gruppi ottici principali comporta anche l'apertura e la rotazione degli stessi, permettendo a questo forno dalla particolare geometria di irraggiare sia dalla parte superiore che dai lati del ricevitore. Lo specchio frontale consente ai raggi del sole di essere riflessi dalla parte anteriore del ricevitore. Alla sua massima apertura si evidenzia la somiglianza con un Kimono giapponese, da cui prende il nome.

I pannelli riflettenti possono essere realizzati in diversi materiali. Per questo prototipo si è deciso di utilizzare il **plexiglas**, successivamente rivestito di **materiale riflettente (Figura 2.8)**. Il prototipo del Kimono, così come gli altri dispositivi che verranno presentati nei paragrafi successivi, sono stati realizzati da Luigi Terra, un tirocinante del DIISM.

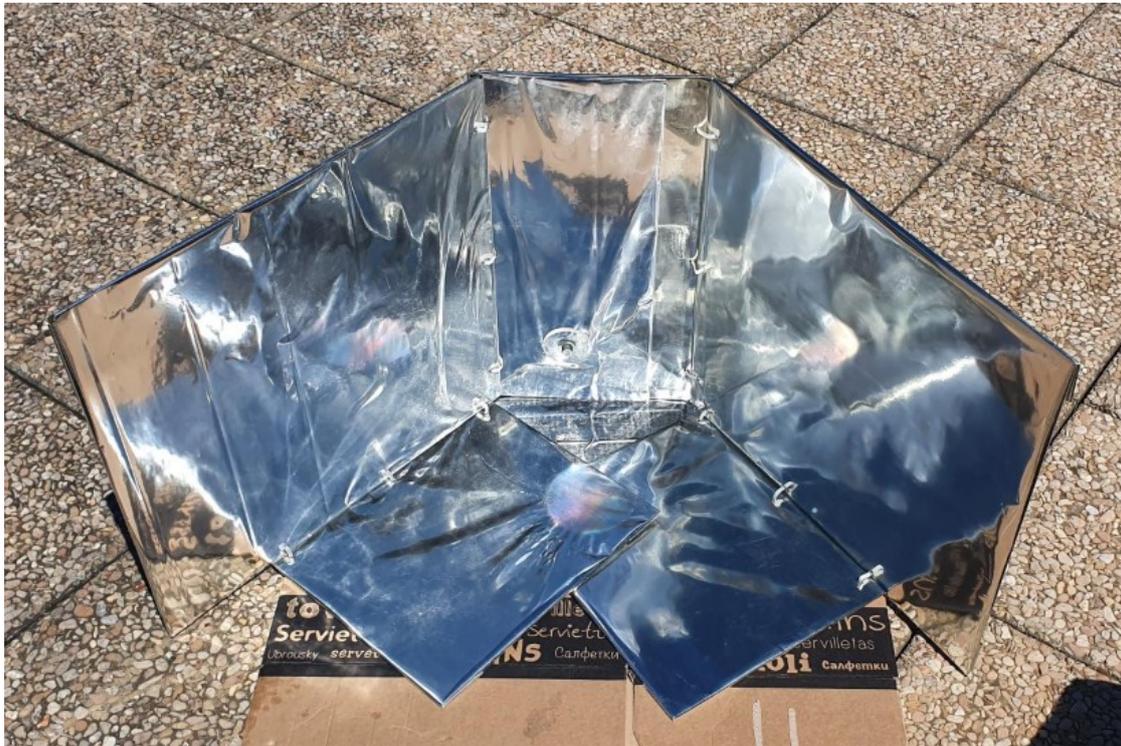


Figura 2.8 Kimono Solar Cooker usato nelle prove

La scelta del **plexiglas** al posto del cartone è stata adottata per garantire una maggiore resistenza all'usura, essendo il forno in esame caratterizzato da una struttura composta da diverse parti mobili facilmente soggette al deterioramento in seguito ad frequente montaggio/smontaggio ed uso durante le prove.

Come materiale riflettente è stato usato il **mylar** per ricoprire la parte interna delle **sei superfici riflettenti** e lo **specchio anteriore**, di inclinazione orientabile in base all'altezza del sole usando un piccolo supporto di legno, in modo tale che il fascio di luce prodotto dalla radiazione diretta investa la parte anteriore del ricevitore (**Figura 2.9**).

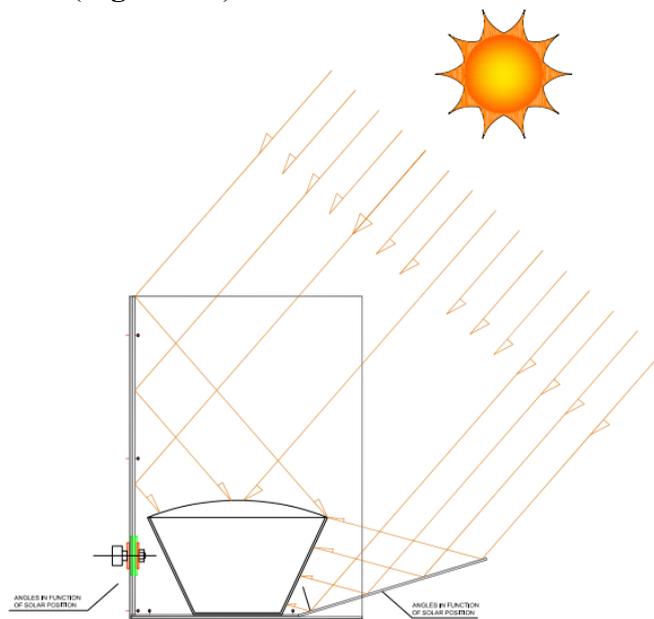


Figura 2.9 *Schema di funzionamento del Kimono Solar Cooker*

Per la realizzazione del Kimono, Luigi Terra si è servito degli schemi costruttivi forniti da Matteo Muccioli, sotto riportati (**Fig. 10-11-12-13**). Vengano assemblati in **due gruppi** il pannello laterale, quello posteriore e quello inferiore (**Figura 2.14**). Gli stessi sono stati collegati tra loro mediante delle **fascette elettriche**. Queste ultime, poichè continuamente sottoposte ad esposizione prolungata ad alte temperature, sono state di frequente cambiate nel corso delle prove per garantire la stabilità tra i pannelli.

Durante il montaggio questi due gruppi si uniscono attraverso il foro presente nei due pannelli posteriori, collegati per mezzo di una **vite filettata M8**, posizionando **due dischi di plexiglas** tra i pannelli per incrementare la superficie di contatto. Il sistema di serraggio si può facilmente regolare grazie alla presenza di **due rondelle lisce** e una **manopola** (**Figura 2.15**), che permettono anche di aprire il forno per passare dalla **CONFIGURAZIONE A** (**Figura 2.16**) alla **CONFIGURAZIONE B** (**Figura 2.17**) nel periodo estivo (in cui il sole è più alto), aumentando l'area di apertura del forno. Per tenere il forno in posizione è stata usata un **morsetto a molla da falegname**.

Un altro piccolo accorgimento che va tenuto in considerazione nella **CONFIGURAZIONE B** per grandi altezze solari, consiste nell'aumentare leggermente l'inclinazione dello specchio riflettente anteriore utilizzando un supporto più alto per garantire ottime prestazioni e rendere il forno ancora più performante. Anche in questo caso, per la conformazione del forno, è opportuno predisporlo su un **basamento di cartone** in modo tale da ruotarlo più agevolmente per inseguire il sole durante la prova. Essendo composto da due gruppi di pannelli collegati tra loro, è il forno che maggiormente risente dell'**azione del vento**, pertanto è necessario proteggerlo con opportuni sistemi di schermatura.

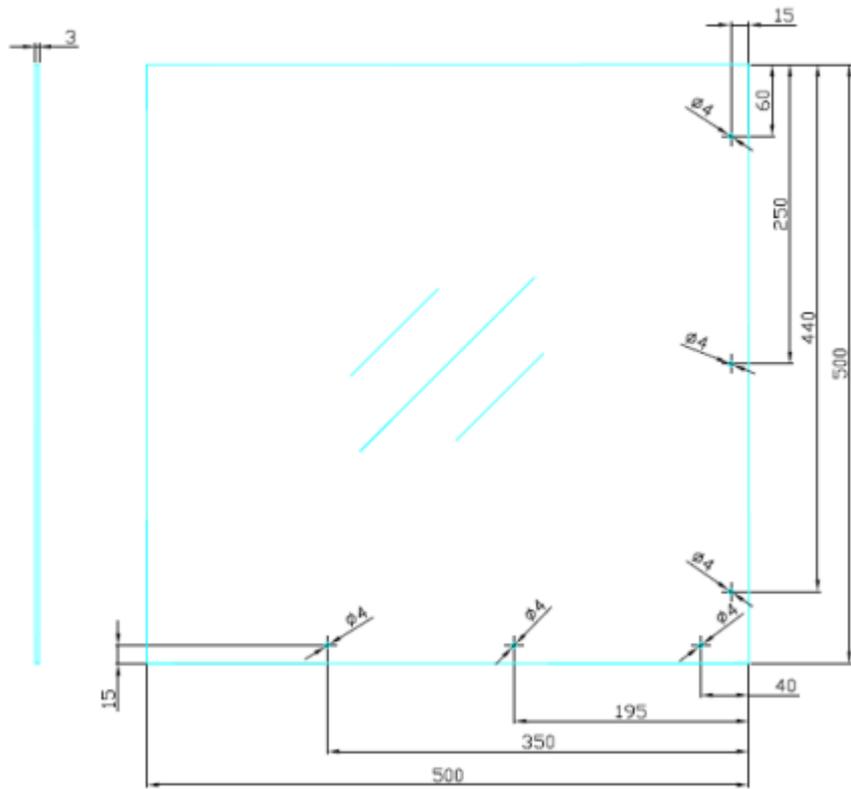


Figura 2.10 *Pannello laterale*

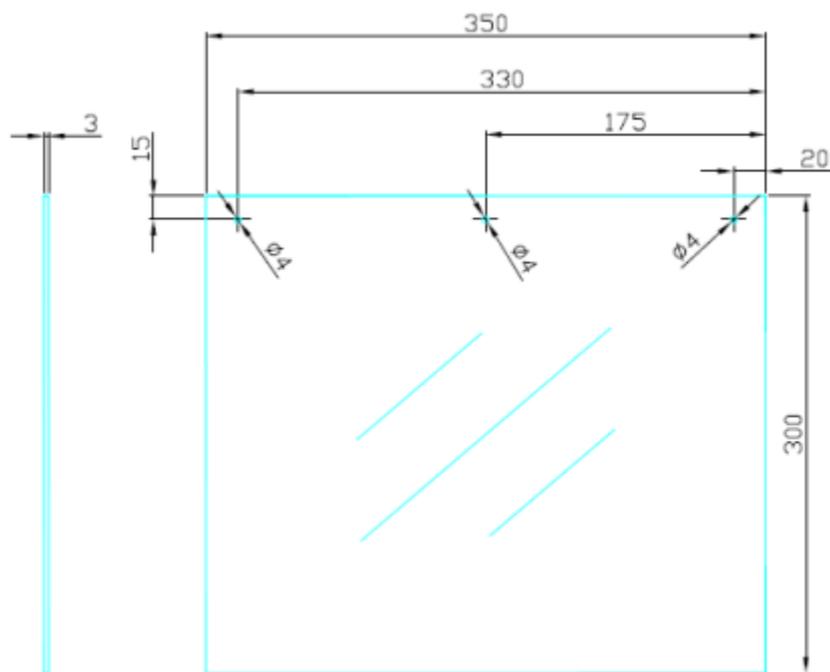


Figura 2.11 *Pannello inferiore*

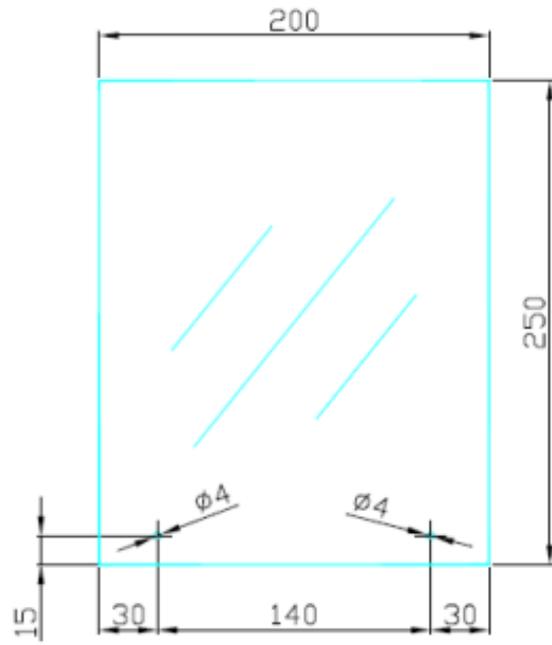


Figura 2.12 Pannello frontale

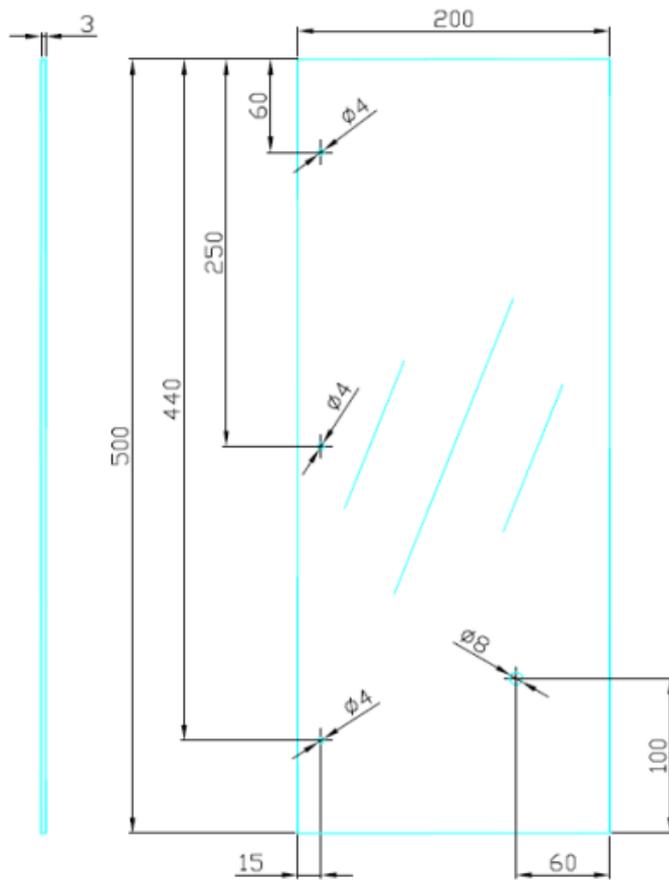


Figura 2.13 Pannello posteriore

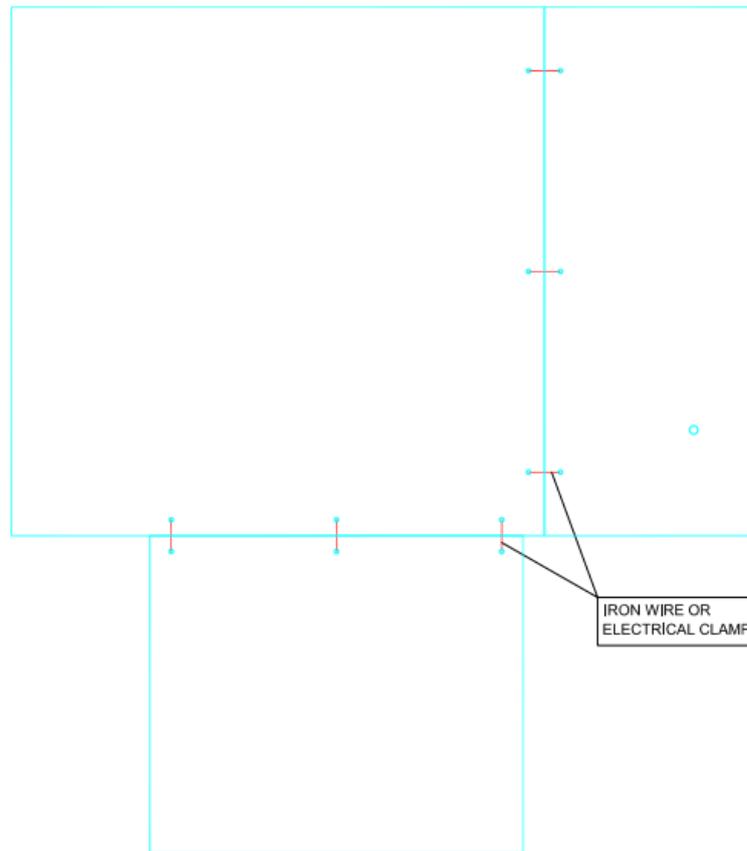


Figura 2.14 *Assemblaggio di ciascun gruppo di pannelli (x2)*

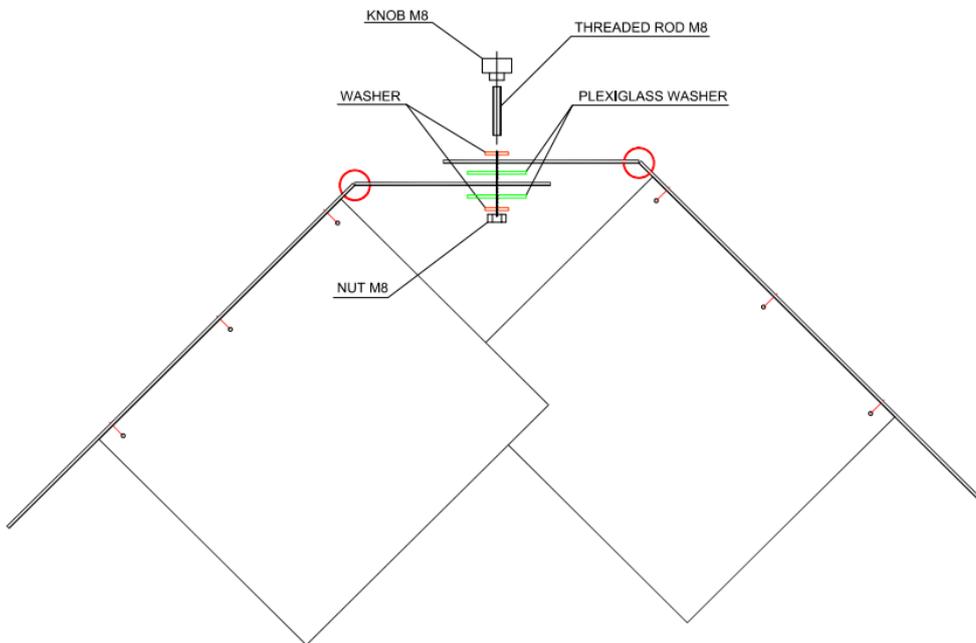


Figura 2.15 *Collegamento finale*

CONFIGURAZIONE A



Figura 2.16 *Configurazione del Kimono per basse altezze solari*

CONFIGURAZIONE B



Figura 2.17 *Configurazione del Kimono per elevate altezze solari*

2.4 COOKIT [4]

Nel 1994, un gruppo volontario di ingegneri e cuochi solari associati a Solar Cookers International, ha sviluppato e prodotto il Cookit, basato su un progetto dello scienziato francese **Roger Bernard**. I co-sviluppatori sono Barbara Kerr degli Stati Uniti, con il lavoro anche di Ed Pejack, Jay Campbell e Bev Blum. Numerosi test sul campo negli Stati Uniti e in molti paesi in via di sviluppo ne confermano le prestazioni, la convenienza, il basso costo, l'accettazione e l'adattabilità alle diverse esigenze.

Se pur dall'aspetto semplice, è un forno solare efficace e conveniente. Con poche ore di sole, consente di preparare gustosi pasti per cinque o sei persone a temperature miti, cuocendo i cibi e preservando i nutrienti senza bruciarli o seccarli.



Figura 2.18 Cookit

Il Cookit utilizzato per le prove (**Figura 2.18**) è stato realizzato in **cartone** e **mylar** per riflettere la massima luce solare su una tortiera nera, in modo tale da convertire la luce solare in energia termica.

Questi forni sono prodotti attualmente in dozzine di paesi nel mondo. Tra i maggiori vantaggi ci sono la facilità di costruzione e la possibilità di impiegare un'ampia varietà di materiali.

Inoltre possono essere utilizzati anche per completare la cottura con altri metodi di cottura di notte e nei giorni nuvolosi. Il Cookit non utilizza alcun combustibile, è molto facile da utilizzare ed ecocompatibile. Nelle prove è stata usata la **variante di Teong. H Tan**, utilizzando un unico foglio di cartone quadrato di 90 cm di lato. In **Figura 2.19** è riportato un disegno utile per la costruzione, dove le linee tratteggiate indicano le pieghe e misure sono indicate sia in pollici che in cm.

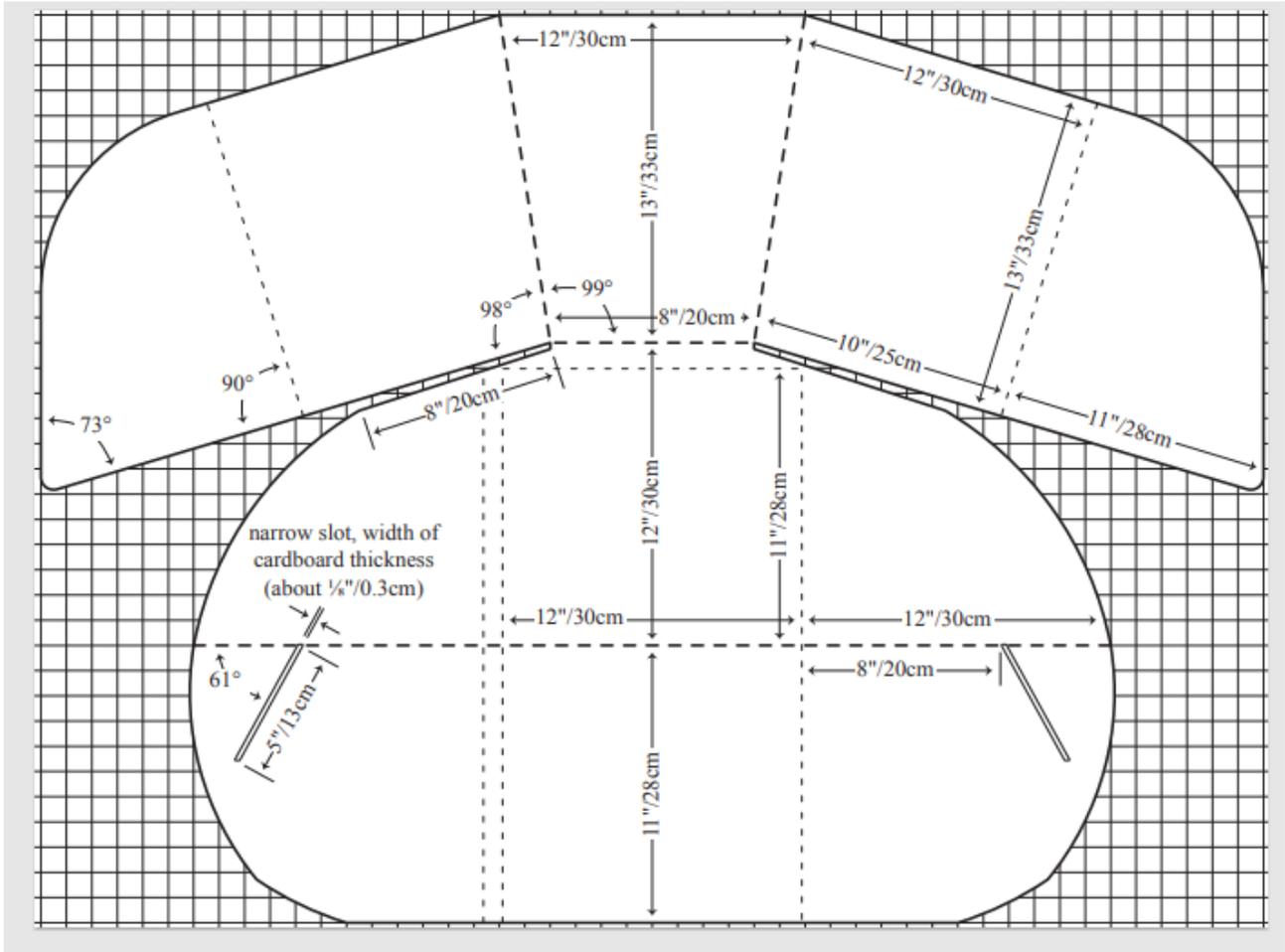


Figura 2.19 Schema costruttivo del Cookit

Il materiale riflettente è stato applicato dopo aver riportato le quote e prima di fare le pieghe e i tagli. La parte interna è stata rivestita con del nastro adesivo trasparente per proteggere il mylar da possibile deterioramento e usura durante l' utilizzo.

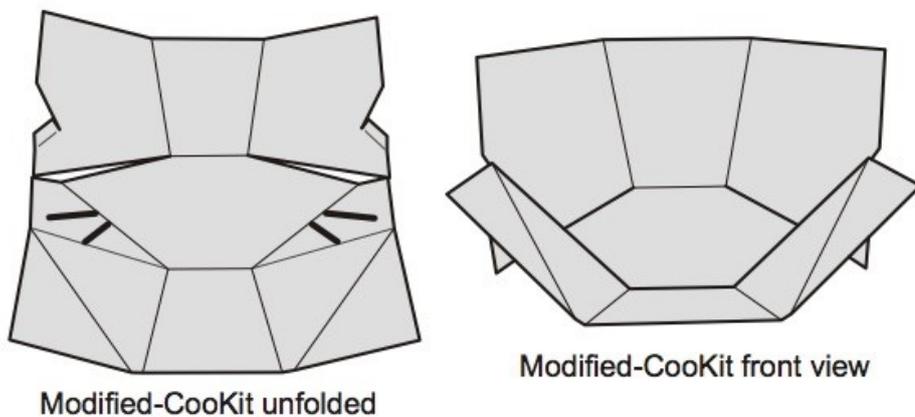


Figura 2.20 Forno non piegato e prospetto frontale del Cookit

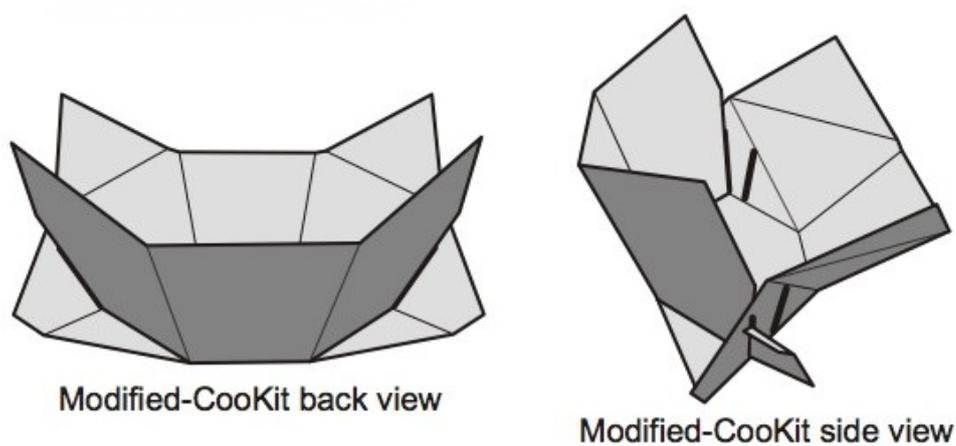


Figura 2.21 *Prospetto posteriore e laterale del Cookit*

2.5 FUN-PANEL [5]

Il forno **Fun-Panel** è stato progettato all'inizio del 2008 da **Teong Tan**, attivo dal 1998 nella progettazione di forni solari. Il Fun-Panel, chiamato anche "**Funnel**", è un forno portatile basato sul particolare design a imbuto (**Figura 2.22**).



Figura 2.22 *Fun-Panel*

La motivazione di Teong Tan per la progettazione di questo forno fu la seguente: il *Funnel*, con la sua superficie riflettente conica a 60° , è molto efficiente nel catturare la luce solare.

Il Fun-Panel conserva l'efficientissima superficie riflettente conica del forno a imbuto, ma ne elimina gli svantaggi, tra cui lo spazio limitato per il ricevitore all'estremità inferiore del forno e la forma instabile che rende difficile mantenere in posizione il forno e il ricevitore.

Tra gli altri vantaggi, può essere costruito in una o due ore da mezza scatola di cartone e un foglio di mylar, come è stato fatto per le prove in esame.

Utilizzando il cartone di metà scatola, infatti, si può facilmente tagliare e piegare per creare il forno. Una grande scatola a forma di cubo di 50x50x50 cm può essere utilizzata per realizzare due Fun-Panel. Teong ha realizzato il suo forno da una scatola di cartone usata che misurava circa 50 cm (19,7 pollici) su tutti i lati. Se è disponibile solo una scatola di forma rettangolare, si può tagliare il pannello laterale per renderlo quadrato. Inoltre possono essere usate anche scatole di dimensioni diverse, basta semplicemente modificare il design.

Per realizzare il forno in esame sono stati impiegati **due fogli di cartone** da imballaggio di **dimensione 50x80 cm**.

Bernhard Mueller e Celestino Ruivo consigliano di aumentare le dimensioni per una maggiore potenza di cottura. Invece di 50x50 cm, si possono usare 60x60 cm o anche 65x65 cm.

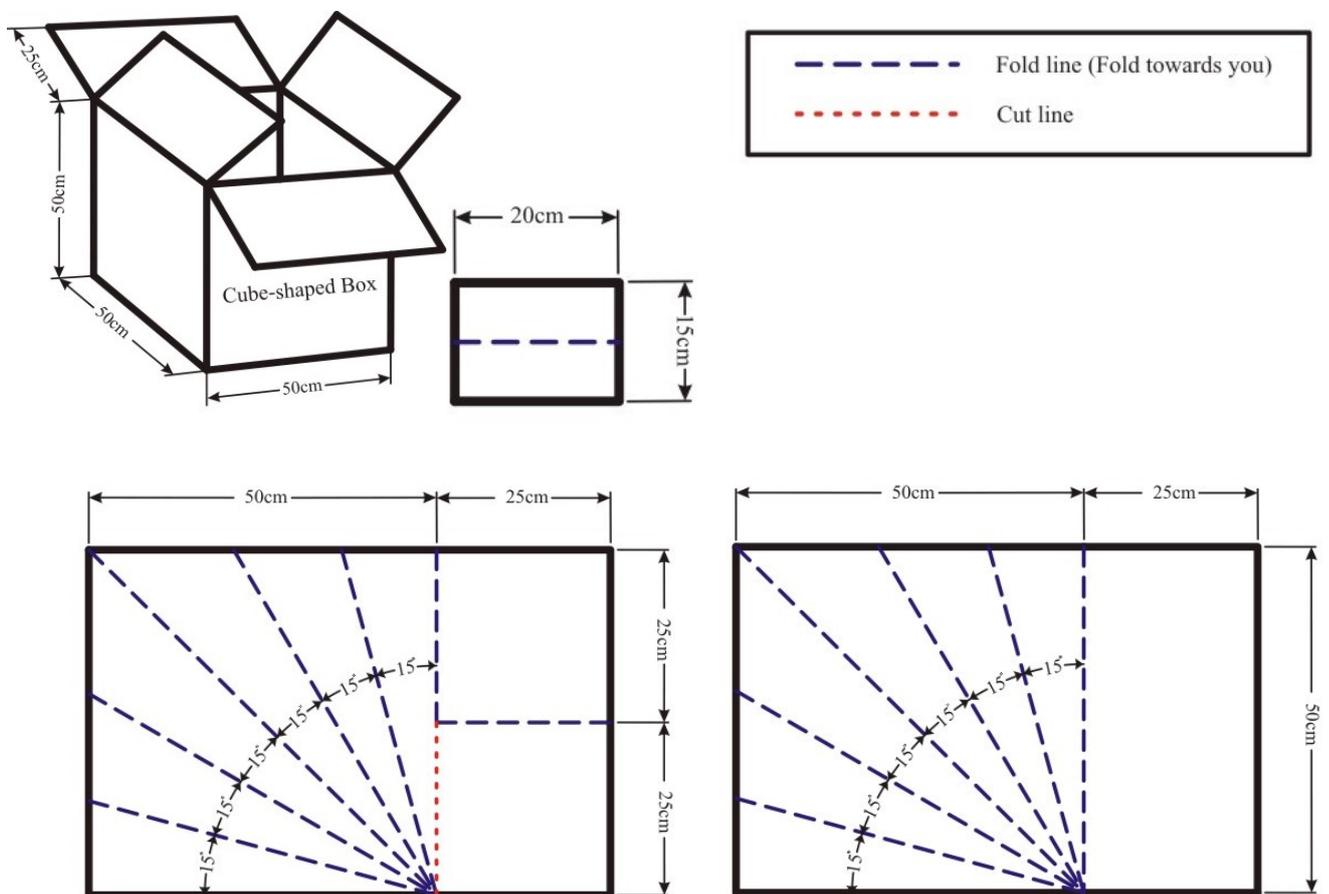


Fig.2.23 *Disegni costruttivi per la realizzazione del Fun-Panel*

I materiali di costruzione necessari per una forno Fun-Panel sono semplici e a basso costo:

- Mezza scatola di cartone
- Nastro
- Un foglio in materiale riflettente mylar
- Colla

Per la costruzione del forno sono previste le seguenti fasi:

1) Creazione dei pannelli

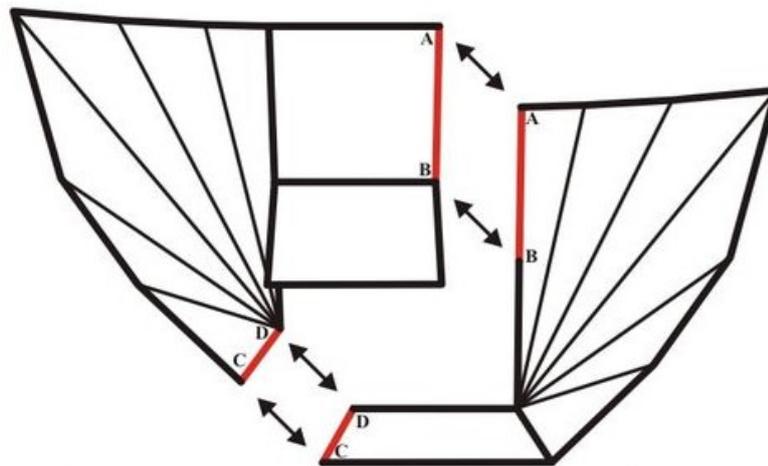
Tagliare la scatola di cartone a forma di cubo per ottenere due grandi pannelli rettangolari. Ogni pannello è costituito da una faccia quadrata della scatola insieme a un lembo.

Disegnare tutte le linee di piegatura ad angoli di 15° e tagliare le linee sui pannelli.

Tagliare lungo le linee di taglio, quindi piegare lungo le linee di piegatura, come mostrato in **Figura 2.23**. Incollare un foglio di alluminio sul lato interno dei due grandi pannelli rettangolari di cartone.

2) Montaggio dei pannelli

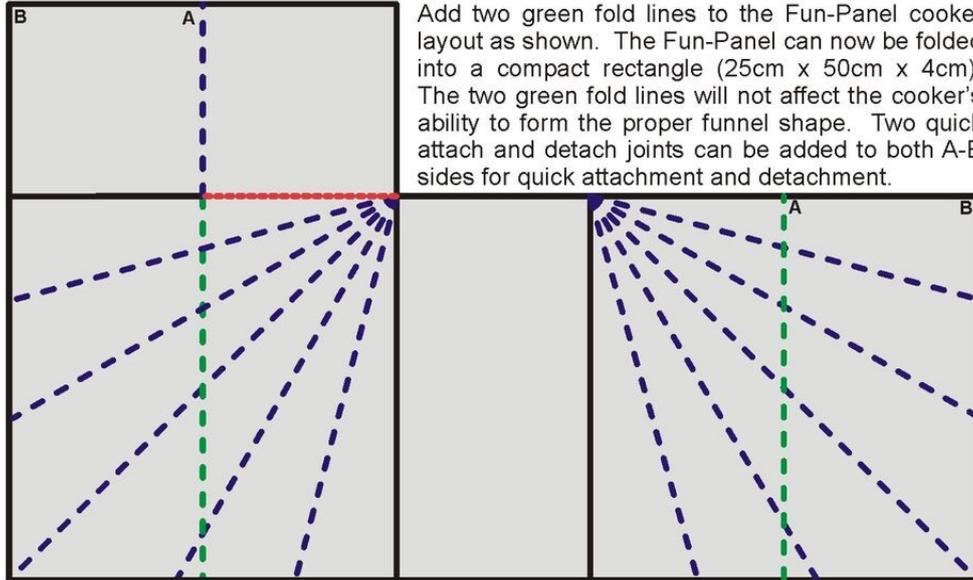
Unire insieme i due grandi pannelli rettangolari di cartone secondo le indicazioni riportate nelle **Figure 2.24 e 2.25** per assemblare il forno.



Assemble the two rectangular panels to form the cooker by joining both 'AB' and 'CD' edges together with paper tape

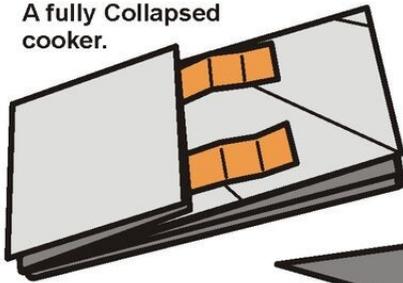
Figura 2.24 *Schema di assemblaggio del Fun-Panel*

Collapsing & Assembling a Fun-Panel Cooker

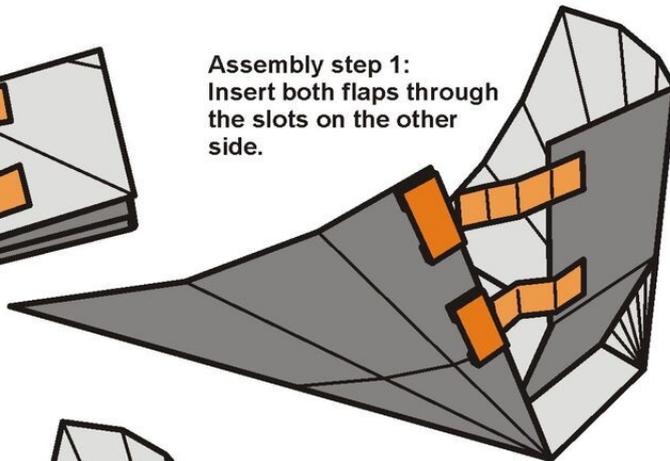


Add two green fold lines to the Fun-Panel cooker layout as shown. The Fun-Panel can now be folded into a compact rectangle (25cm x 50cm x 4cm). The two green fold lines will not affect the cooker's ability to form the proper funnel shape. Two quick attach and detach joints can be added to both A-B sides for quick attachment and detachment.

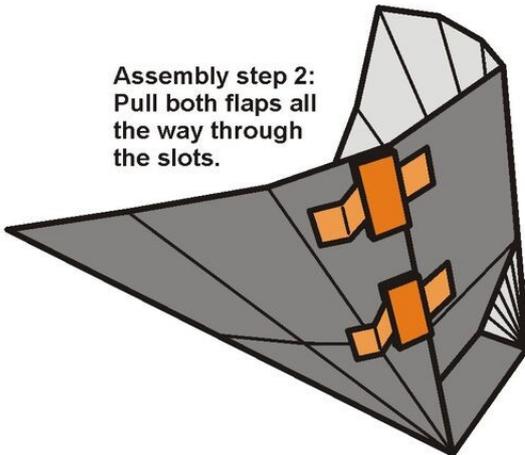
A fully Collapsed cooker.



Assembly step 1:
Insert both flaps through the slots on the other side.



Assembly step 2:
Pull both flaps all the way through the slots.



Assembly step 3:
Bend both ends of the flaps inward to lock the flaps in position.

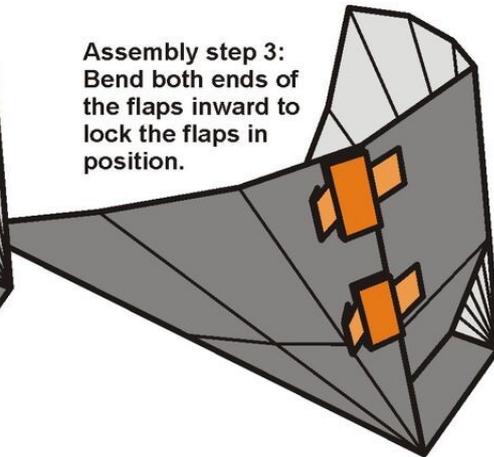
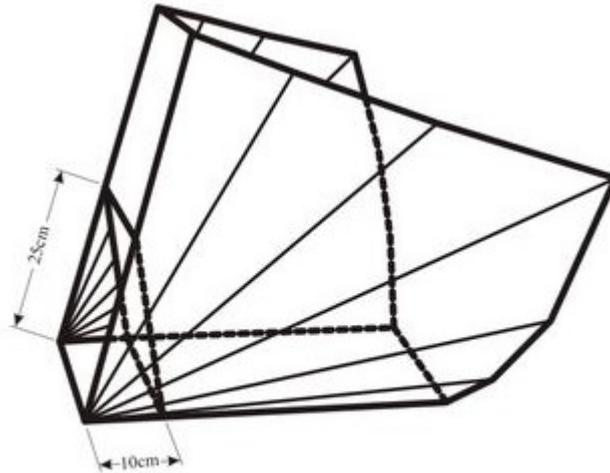


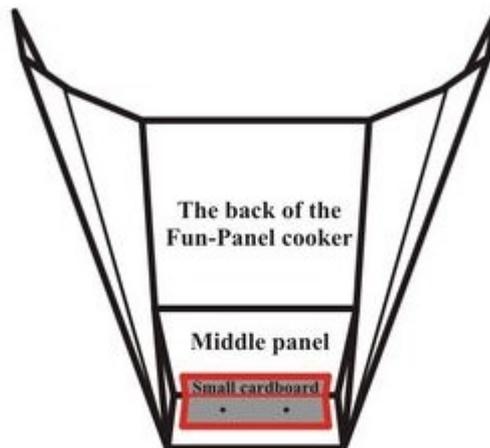
Figura 2.25 Procedura per l'incollaggio e l'assemblaggio dei pannelli

3) Aggiunta di un piccolo supporto in cartone

Infine aggiungere un piccolo supporto di cartone nella parte posteriore, come mostrato in **Figura 2.6**. Questo supporto può essere orientato in modo tale che la radiazione luminosa investa tutto il ricevitore, per sfruttare così la massima energia che può essere assorbita.



Push forward the lower edge of the center square panel by a distance of 10 cm from the rear edge, and keep it in that position.



Glue the small folded-cardboard to the lower edge of the middle panel only. Punch two holes through the horizontal face of the small cardboard and its adjacent base. Tie them together with a string to keep the middle panel in this desired position.

Figura 2.26 *Supporto posteriore semovibile*

CONFIGURAZIONE A



Figura 2.27 *Configurazione del Fun-Panel per basse altezze solari*

Per cotture a basse altezze solari (tra 35 e 50°), si può posizionare la pentola con il pannello rettangolare sul pavimento, come mostrato nella **Figura 2.27**. Per altezze solari molto basse (inferiore a 35°), è opportuno alzare la pentola da 5 a 7,5 cm (da 2 a 3 pollici) sopra la base per catturare meglio la luce del sole.

CONFIGURAZIONE B



Figura 2.28 *Configurazione del Fun-Panel per elevate altezze solari*

Con un angolo tra 50 e 70°, si può modificare la configurazione capovolgendo il forno in modo che il pannello quadrato al centro del forno sia ora orizzontale e posizionare il forno sopra un piccolo rialzo alto da 12 a 15 cm (o da 5 a 6 pollici), come si può vedere nelle **Figure 2.28 e 2.29** .



Figura 2.29 Prospetti laterali del Funnel in CONFIGURAZIONE B

Il rialzo serve a sostenere sia il forno che il ricevitore, per cui potrebbe risultare particolarmente difficoltosa l'operazione di rotazione dell'intero sistema forno-ricevitore per inseguire il sole. Per questo motivo è opportuno posizionare un **foglio di cartone** sotto al forno stesso per facilitare questa operazione e ruotare più agevolmente il Funnel. Per altezze solari molto elevate (superiori a 70°), occorre inclinare leggermente all'indietro i pannelli rettangolari verticali fino a quando il ricevitore riceva la massima luce solare riflessa. Si possono legare insieme le due estremità con una corda per tenere il pannello rettangolare in quella posizione.

Variante in cemento

Nel 2009 **Celestino Ruivo** ha creato un Fun-Panel in cemento (**Fig. 2.30**) utilizzando specchi per riflettere i raggi del sole sul vaso. Questo modello funziona anche durante l'inverno e non presenta nessun problema in caso di pioggia o vento. Il forno solare Fun-Panel in cemento con specchi è facile da pulire, resistente e può durare molti anni. Può essere una buona alternativa a un Cookit, la cui durata di servizio può essere solo di diversi mesi. Nei paesi africani, questo tipo di forno solare può anche essere costruito localmente.



Figura 2.30 Forni Fun-Panel realizzati in cemento da Celestino Ruivo

2.6 DUAL-SETTING PANEL COOKER (DSPC) [6]

Questo forno fu ideato da **Teong H. Tan** quando viveva in Malesia, un paese molto vicino all'Equatore. Egli notò che il Cookit funzionava in modo meno efficiente quando l'altezza del sole era molto alta. La spiegazione è semplice: l'intervallo di elevazione del sole, ai tropici e in alcune zone temperate, durante l'estate è troppo ampio perché un forno a pannelli con impostazione fissa funzioni in modo efficiente per tutto il tempo. Il **Dual-Setting Panel Cooker (DSPC)** è stato dunque progettato per ridurre questo effetto, utilizzando due diverse configurazioni al variare della geometria, per concentrare meglio la luce solare in base all'altezza solare.

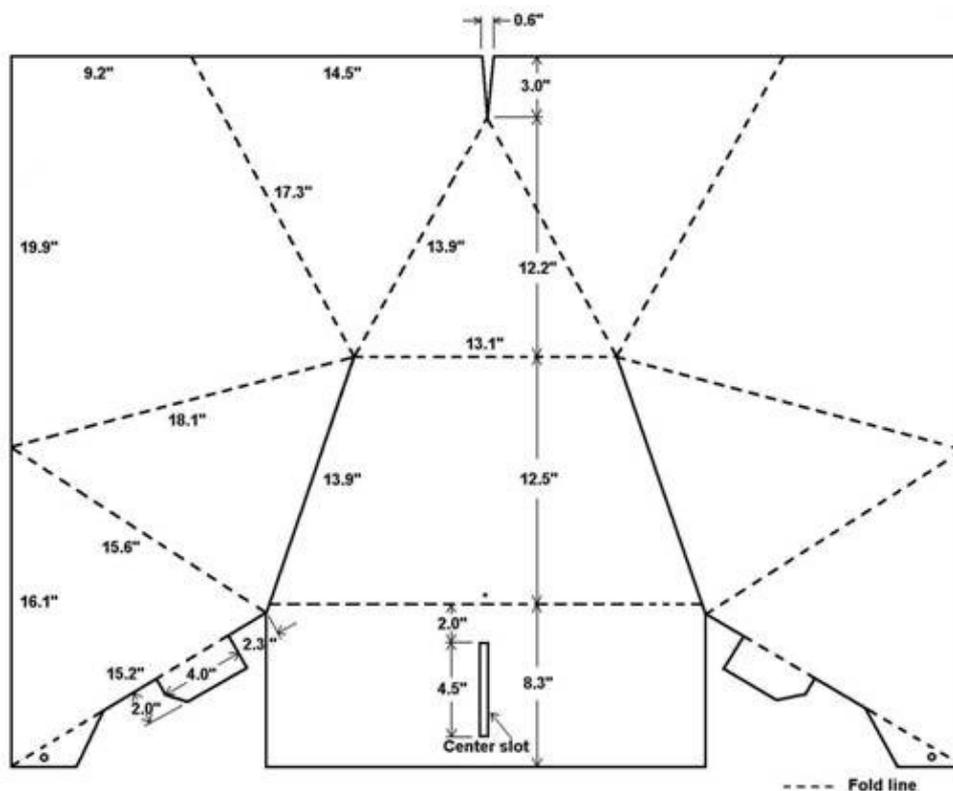


Figura 2.31 Schema costruttivo per la realizzazione del DSPC

Il forno in oggetto per le prove è stato costruito utilizzando un singolo foglio di cartone di dimensioni 1,3 x 0,9 metri e applicando il materiale riflettente (**mylar**) sul lato interno.

Per prima cosa è stato disegnato il modello DSPC sul cartone, secondo lo schema costruttivo indicato in **Figura 2.31**. Poi sono stati fatti dei tagli lungo le linee continue e delle pieghe lungo le linee tratteggiate, assicurandosi che tutte le linee di piegatura siano ben piegate in modo tale da far assumere al forno la forma corretta una volta installato. Successivamente è stata creata la fessura centrale di larghezza equivalente allo spessore di due fogli di cartone impilati insieme ed infine è stato incollato il foglio di mylar all'interno.

CONFIGURAZIONE A



Figura 2.32 *Configurazione del DSPC per basse altezze solari*

Per altezze solari inferiori ai 65° , i due pannelli triangolari anteriori, su ogni ala laterale del DSPC, sono posti sotto la base trapezoidale (figura). In questa impostazione, il DSPC funziona e si comporta più o meno come Cookit.

Il pannello rettangolare anteriore può essere disteso o appoggiato, con un piccolo oggetto, per il corretto angolo di riflessione.

CONFIGURAZIONE B



Figura 2.33 *Configurazione del DSPC per elevate altezze solari*

Per la cottura in posizioni geografiche e periodi dell'anno dove l'altezza solare è maggiore di 60° , i due pannelli triangolari anteriori, su ciascuna ala laterale del DSPC, devono essere posizionati sopra la base trapezoidale. I due piccoli lembi si inseriscono all'interno della fessura centrale, sul pannello rettangolare anteriore, per mantenere la forma del forno (**Figura 2.31**).

Le prove sono state svolte nelle due diverse configurazioni, adattando il DSPC al variare dell'altezza solare nei differenti periodi dell'anno. In particolare, i primi due set di misure sono stati effettuati nella **CONFIGURAZIONE A** (**Figura 2.32**), mentre nel terzo set è stato adottato l'assetto per elevate altezze solari **CONFIGURAZIONE B** (**Figura 2.33**).

La descrizione dettagliata delle configurazioni dei forni sarà ampiamente trattata nel capitolo 3.5.

3 Test bench

In questo capitolo vengono descritte le **attrezzature** usate nel **banco di prova**, nonché viene enunciato il sistema di elaborazione dei dati relativi alla **radiazione solare** e al **vento**.

I **forni a pannelli**, essendo dei **forni aperti**, sono fortemente influenzati dalle **condizioni climatiche**, in particolare dalla presenza delle **nubi** e dal **vento**.

Per questo motivo, nelle prove effettuate in giornate particolarmente ventilate, sono stati adottati adeguati **sistemi di schermatura** dei forni, che verranno descritti in seguito.

3.1 Pireliometro

Il pireliometro è uno strumento che permette di misurare l'intensità della **radiazione solare diretta** o **Direct Normal Irradiance (DNI)**.

E' basato sulla misurazione della quantità di calore assorbita nell'unità di tempo da un ricevitore integrale di energia raggiante (una superficie metallica annerita, di area nota), esposto ortogonalmente alla radiazione solare

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 (o irradianza)**, restituita al computer in **W/m²** grazie ad una precisa ed accurata **calibrazione dello strumento** e ottenuta dividendo la costante di calibrazione (sensibilità) per il segnale rilevato.

È importante che il pireliometro venga controllato quando viene utilizzato, per un corretto tracciamento solare, utilizzando l'apposito puntatore. Il vetro deve essere opportunamente pulito con un panno morbido, facendo attenzione a non graffiare la superficie.



Fig. 3.1 Pireliometro NIP utilizzato

Come si può vedere in **figura 3.1**, 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.

Sensibilità	8 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$
Impedenza	200 Ω
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
Lunghezza	28 cm
Peso	2.3 kg

Tabella 3.1 *Specifiche tecniche del pireliometro*

Il pireliometro permette di misurare la **radiazione solare delle onde corte** compresa tra **0.3 e 3 μm** di lunghezza d'onda, nella quale ricade approssimativamente il **99% dell'energia solare**.

3.1.2 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.

3.1.3 Principio di funzionamento del pireliometro [7]

La struttura esterna dello strumento Pireliometro sembra un telescopio perché è un lungo tubo. Utilizzando questo tubo, possiamo indirizzare la lente verso il sole per calcolare la radiazione solare diretta (DNI). La struttura di base del pireliometro è mostrata di seguito. La lente può essere puntata nella direzione del sole e la radiazione solare scorrerà attraverso la lente, dopo quel tubo e infine nell'ultima parte in cui l'ultimo a parte include un oggetto nero nella parte inferiore (**Fig. 3.2**).

L'irraggiamento solare entra in questo dispositivo attraverso una lente di quarzo cristallino e raggiunge direttamente una termopila. Quindi questa energia può essere modificata da calore a un segnale elettrico che può essere registrato. Un fattore di calibrazione può essere applicato una volta cambiando il segnale mV in un flusso di energia radiante corrispondente, ed è calcolato in W/m^2 .

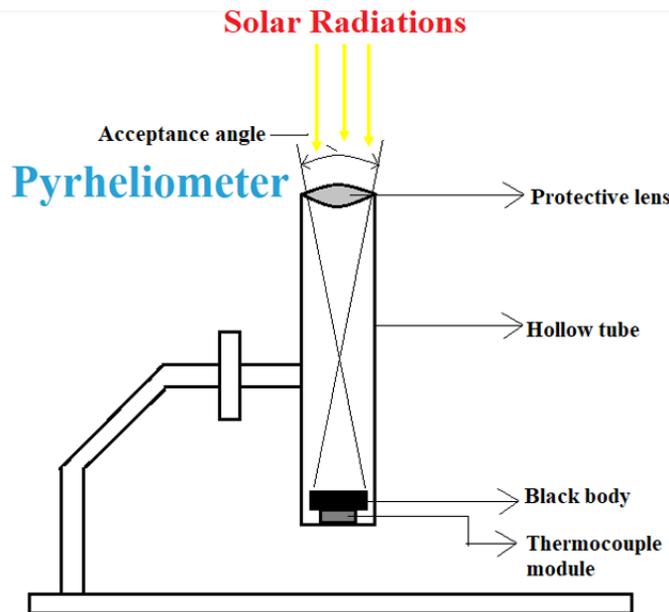


Fig. 3.2 *Schema di funzionamento del pireliometro*

3.1.4 Radiazione del corpo nero

Un **CORPO NERO** è un corpo ideale che può emettere la massima energia termica e costituisce un riferimento standard per la valutazione della radiazione emessa da un **CORPO REALE**.

Un **CORPO NERO IDEALE** di solito **assorbe tutte le radiazioni senza emettere nulla nell'atmosfera** e presenta le seguenti caratteristiche:

- 4) E' un **ASSORBITORE REALE**, cioè è in grado di assorbire tutta l'energia termica radiante incidente su di esso, indipendentemente dalla distribuzione spettrale e spaziale della radiazione stessa;
- 5) E' un **RADIATORE PERFETTO**, poiché nessun corpo può emettere più energia di un corpo nero ad una data temperatura e lunghezza d'onda;
- 6) E' un **EMETTITORE DIFFUSO (o SUPERFICIE DIFFUSA)**, perché possiede un'intensità di radiazione spettrale costante rispetto alla direzione di emissione.

Si tratta di una idealizzazione fisica, dal momento che in natura non esistono corpi che soddisfano perfettamente tale caratteristica. Dopo che il corpo nero ha assorbito la radiazione, si riscalda poiché la radiazione stessa è energia e dopo l'assorbimento, gli atomi nel corpo vengono emessi. Questo principio viene usato negli **strumenti di misura della radiazione solare**. Al contrario del corpo nero, un corpo bianco riflette nell'atmosfera tutte le radiazioni che cadono su di esso. In basso

possiamo vedere l'immagine di un **corpo nero reale (fig. 3.3)**, che assorbe gran parte dell'energia e riflette in minima parte la radiazione solare, avvicinandosi molto al modello dell'assorbitore perfetto.

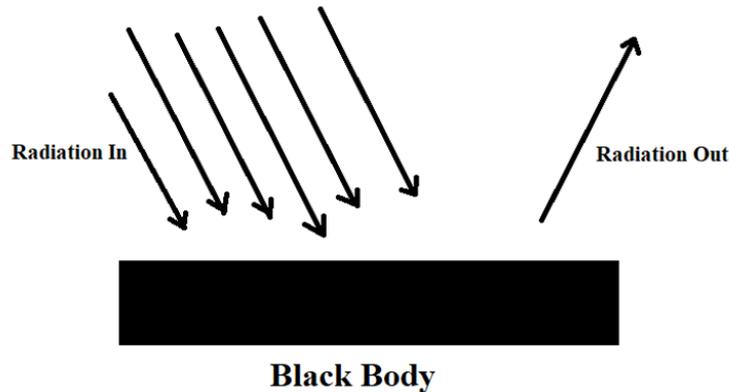


Fig. 3.3 Radiazione assorbita e in piccola parte riflessa da un corpo nero reale

3.2 Piranometro

Il **piranometro** è un dispositivo che può essere utilizzato per misurare sia la **radiazione del fascio** che la **radiazione diffusa**. In altre parole, viene utilizzato per misurare la **radiazione emisferica globale** (fascio più diffuso su una superficie orizzontale).

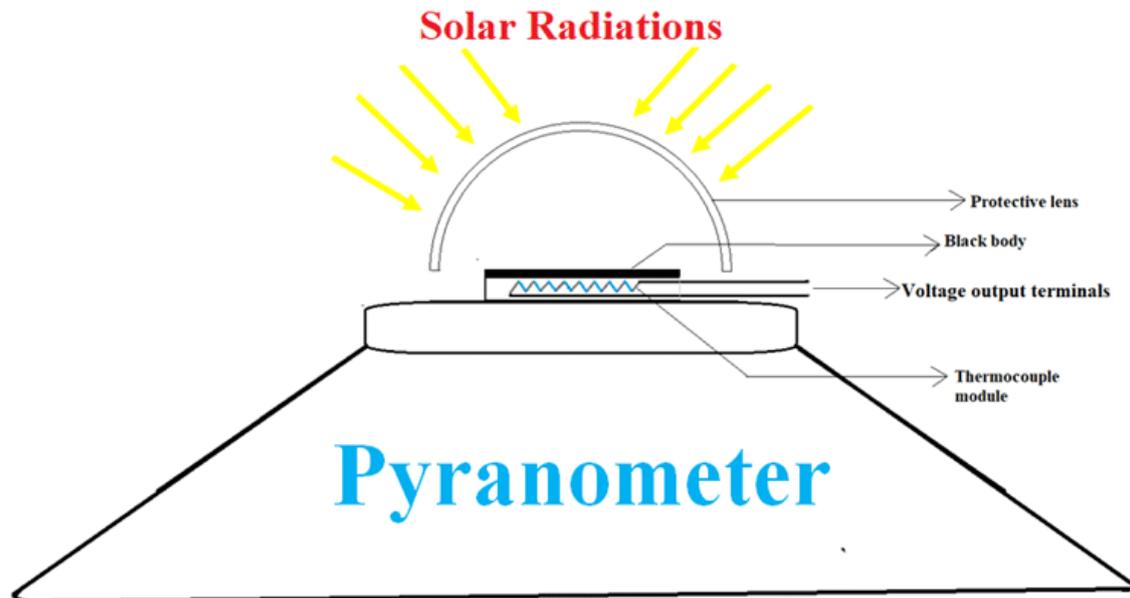
3.2.1 Struttura del piranometro

Il dispositivo sembra un piattino UFO che è la forma più adatta al suo scopo. Questo dispositivo è più popolare degli altri e la maggior parte dei dati sulle risorse solari oggi viene misurata utilizzando esso. Di seguito è possibile vedere l'immagine originale e la struttura interna del Piranometro (fig. 3.4).



Figura 3.4 Piranometro

3.2.2 Principio di funzionamento del piranometro [7]



3.5 Schema di funzionamento del piranometro

Come si può vedere dalla **figura 3.5**, la radiazione proveniente dall'atmosfera circostante passa attraverso la **cupola di vetro** e cade sul **corpo nero** situato al centro dello strumento. La temperatura del corpo aumenta dopo aver assorbito tutta la radiazione e questo aumento sarà sperimentato anche dalla catena della termocoppia o dal modulo della termocoppia presente direttamente sotto il corpo nero. Quindi un lato del modulo sarà caldo e un altro sarà freddo a causa del dissipatore di calore. Il modulo termocoppia genera una tensione e questa può essere vista sui terminali di uscita. Questa tensione ricevuta ai terminali di uscita è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura secondo il principio di una termocoppia.

Poiché sappiamo che la differenza di temperatura è correlata alla radiazione assorbita dal corpo nero, possiamo dire che la **tensione di uscita è linearmente proporzionale alla radiazione**.

Analogamente al calcolo precedente, il **valore della radiazione globale** può essere facilmente ottenuto da questo **valore di tensione**.

Esistono due diverse modalità di configurazione del piranometro a seconda che si voglia misurare la radiazione globale o solo quella diffusa.

- **Piranometro per la radiazione globale:** il cui elemento sensibile è sprovvisto di campana di protezione, per cui lo strumento misura la **radiazione solare globale**, cioè quella **diretta dal Sole**, quella **diffusa dal cielo** e quella **proveniente dal suolo e dall'aria circostanti**.

- **Piranometro per la radiazione diffusa:** viene inserita una **campana protettiva** provvista di un **piccolo schermo** che ripara l'elemento sensibile dalla luce diretta solare, cosicché lo strumento misura la sola **radiazione solare diffusa** dal cielo (**fig. 3.6**).



3.6 Piranometro per la misurazione della radiazione solare diffusa

Per la misura della radiazione diffusa, proveniente, cioè, da un angolo solido di 2π steradiani ad eccezione del disco solare, si utilizza generalmente un piranografo corredato di un dispositivo di occultamento del disco solare dotato di movimento manuale o, negli strumenti più perfezionati, automatico e sincrono col movimento apparente del sole, costituito di un nastro metallico (banda ombreggiante), regolabile in funzione della stagione, che occulti il disco solare lungo tutto il suo corso apparente giornaliero. Con il valore della **radiazione globale** e della **radiazione diffusa**, è anche possibile calcolare il valore della **radiazione del fascio**.

In riferimento alle prove in oggetto, l'**irraggiamento solare orizzontale globale** [8], è stato registrato utilizzando un **piranometro SR30-M2-D1** con linearità $\pm 3.0\%$ da 0 a 4000 W/m^2 , presente nella centralina del DIISM (**figura 3.7**). Seguendo la stessa procedura descritta da altri autori [9], la **radiazione solare normale globale** (G_n) è stata ottenuta utilizzando il **modello di Liu-Jordan** [10], considerando un valore di **albedo di 0.2**.



Fig. 3.7 Piranometro SR30-M2-D1 nella centralina del DIISM

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.

Attraverso il sistema di acquisizione avviene una **conversione della differenza di potenziale in temperatura**, che potrà essere letta nel computer.

Le termocoppie sono classificate in base al materiale da cui sono composte; in particolare, si distinguono diverse tipologie, contraddistinte dalle lettere R, S, B, K, J, T, ecc... Vanno scelte in base al valore di temperatura media da misurare ed in relazione all'ambiente in cui verranno poste; 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 agenti corrosivi. In ogni caso, per il tipo di prove effettuate, questi rilevatori di temperatura possono essere considerati piuttosto affidabili, pur tenendo conto dell'incertezza dello strumento e del fatto che sono molto sensibili e soggetti a deteriorarsi nel tempo, soprattutto a seguito di esposizioni prolungate a temperature particolarmente elevate. Per questi motivi è opportuno cambiare le termocoppie dopo un certo numero di misurazioni, così da mantenere l'affidabilità sempre ad un buon livello.

3.3.2 Termocoppie utilizzate



Figura 3.8 *Termocoppie di tipo T in rame e rame-nichel*

Le **termocoppie** usate in quest'analisi sono **di tipo T (Figura 3.8)**, il cui nome originale era **Rame-Costantana**. Queste termocoppie sono utilizzate nelle misure di temperature effettuate in

laboratorio nell'intervallo da -250 °C e 400 °C, nonostante la rapida ossidazione del conduttore in rame sopra questo intervallo. Possono essere utilizzati in atmosfera ossidante, riducente o con gas inerte e non subiscono corrosione in presenza di atmosfere umide.

Il loro funzionamento è eccellente nel range di temperature compreso tra -200 °C e 200 °C ($\pm 0,1^\circ\text{C}$). Hanno una sensibilità di $48 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ e spicca tra le caratteristiche tecniche l'**elevata conducibilità termica** del conduttore in rame.

Di seguito vengono riportati i dati tecnici di una termocoppia di tipo T forniti da un costruttore: [11]

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	Scostamento in °C	Tra ± 0.004 e ± 0.015

Tabella 3.2 *Caratteristiche tecniche delle termocoppie di tipo T*

3.3.3 Principio di funzionamento delle termocoppie

La **termocoppia** è un semplice dispositivo costruito utilizzando **due conduttori di materiale diverso** come mostrato in **Figura 3.9**.

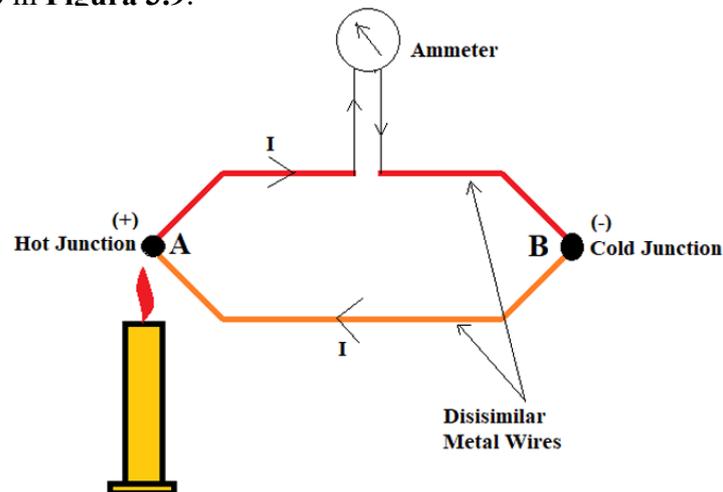


Figura 3.9 *Schema di funzionamento di una termocoppia (Hot Junction=Giunto caldo; Cold Giunction=Giunto Freddo; Dissimilar metal wires=Conduttori di materiali differenti; Ammeter=Amperometro)*

Due fili sono collegati per formare un anello con due giunzioni e queste giunzioni sono designate come "A" e "B". Ora una candela viene portata vicino all'incrocio "A" mentre lo svincolo "B" viene lasciato solo. Con la candela presente nella giunzione "A" la sua temperatura aumenta notevolmente mentre la giunzione B rimane fredda a temperatura ambiente. A causa di questa differenza di temperatura, alle giunzioni appare una tensione (**differenza di potenziale**) secondo l' "**effetto Seebeck**". Poiché il circuito è chiuso, una corrente "I" scorre attraverso il circuito come mostrato in figura e per misurare questa corrente collegheremo un amperometro in serie. È importante ricordare che l' **ampiezza della corrente "I" nel circuito è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura** alle giunzioni, quindi differenze di temperatura più elevate si traducono in una maggiore intensità della corrente. Quindi, ottenendo la lettura dell'amperometro, possiamo calcolare la **differenza di temperatura** alle giunzioni. Se un conduttore elettrico è soggetto ad **un gradiente termico**, un flusso di energia (calore) si associa al flusso di elettroni lungo il conduttore e genera una **forza elettromotrice (f.e.m.)**. Il valore e la direzione della f.e.m. prodotta dipendono dal valore e dalla direzione del gradiente di temperatura e dal materiale del conduttore. La tensione è funzione della differenza di temperatura agli estremi del conduttore. Questo fenomeno fu scoperto da T.J. Seebeck nel 1822.

3.4 Datalogger e PC

Le termocoppie con cui si misurano la temperatura ambiente, le temperature rilevate all'interno dei forni e il cavo in uscita dal pireliometro (per la misura della DNI) vengono collegate all'**acquisitore**.

L'acquisitore usato è un **datalogger** della "Pico Technology" (**figura 3.10**), azienda britannica che produce sensori per la diagnostica delle strumentazioni delle automobili; il prezzo è relativamente basso e la risoluzione decisamente buona.



Figura 3.10 Datalogger con termocoppie inserite

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 3.3 Specifiche tecniche dell'acquisitore fornite dal costruttore

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:** Cookit
- **CH 4:** Fun-Panel
- **CH 5:** Kimono
- **CH 6:** DSPC
- **CH 7:** Non usato perché non necessario.
- **CH 8:** Non usato perché non necessario.

L'acquisitore viene fornito dal suo costruttore insieme a uno specifico software (**figura 3.11**) 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.

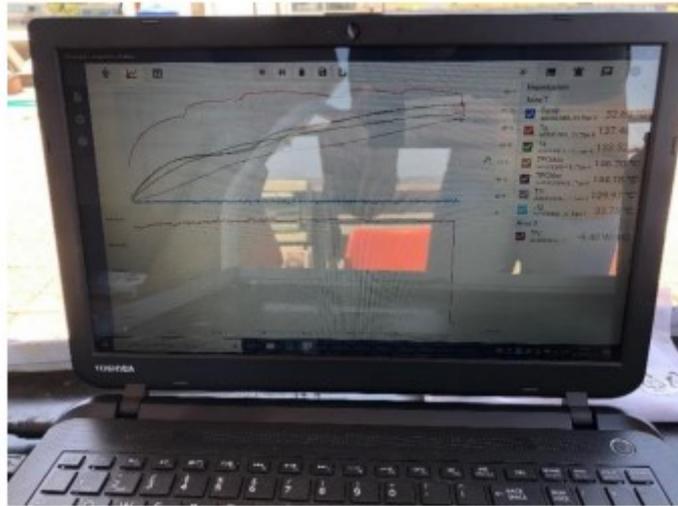


Figura 3.11 Programma “Software Picolog” usato per l’acquisizione dei dati durante i test

Una volta finita 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 Setup e configurazioni dei forni di tipo panel

I quattro prototipi di forni a pannelli sono stati testati appoggiandoli a terra, eliminando così la possibilità di cambiare il loro inclinazione rispetto al piano orizzontale. Non essendo possibile tenere sotto controllo l'altezza solare, infatti, si può regolare solo l'**azimut**, unico grado di libertà per l'inseguimento del sole.

Essi sono stati disposti uno accanto all'altro e testati contemporaneamente, essendo sottoposti alle stesse condizioni climatiche e ambientali, e utilizzando gli stessi ricevitori descritti in precedenza.



Figura 3.12 *Setup dei forni*

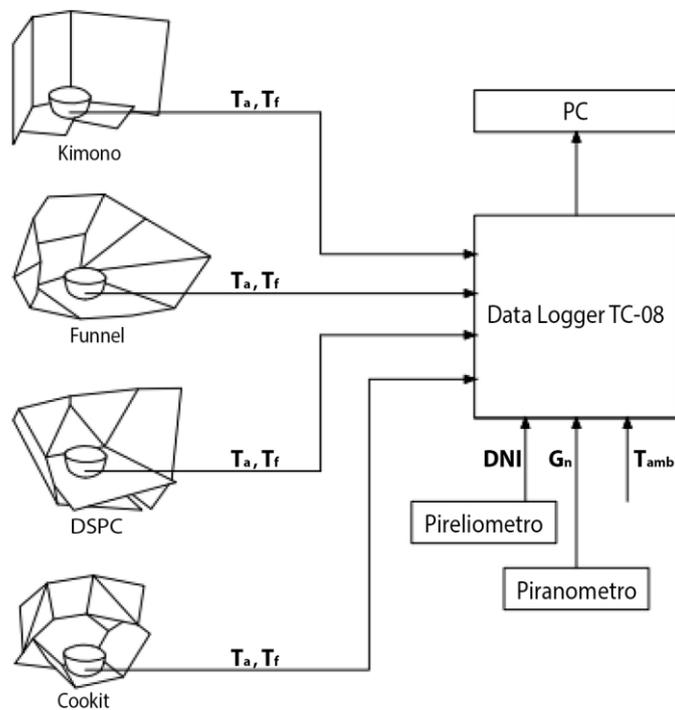


Figura 3.13 *Test bench*

T_a = Temperatura del ricevitore

T_f = Temperatura del fluido testato

T_{amb} =Temperatura ambiente

DNI = Radiazione solare diretta

G_n = Radiazione solare normale globale

3.5.1 Collimazione e anticipo

Per **collimazione** si intende l'allineamento dei forni con il sole. In questa posizione essi ricevono la massima quantità di energia, pertanto sarà fondamentale mantenerli in questa configurazione il più a lungo possibile. Se non si adottasse nessun accorgimento, si dovrebbero aggiustare continuamente per inseguire il sole, ma utilizzando l'**anticipo** sarà possibile regolarli ad intervalli temporali variabili. Ciascun forno possiede, in base alle proprie caratteristiche geometriche, diverse modalità di orientamento rispetto alla radiazione, ma alcuni concetti sono comunque validi in generale per tutte le tipologie.

Per un corretto setup, è opportuno disporre i forni con un **leggero anticipo** rispetto alla posizione del sole all'inizio della prova: le ombre identificano la direzione dei raggi solari. Il sole si sposta nel suo moto apparente da est verso ovest, per cui è consigliabile posizionare i forni a vantaggio di questa posizione. Ciò significa che all'inizio della prova i forni non devono essere perfettamente allineati con il sole, ma leggermente ruotati verso ovest. Ad esempio, se volessimo un anticipo di 40 minuti, ricordando che il sole in un'ora si sposta di 15° , basterebbe ruotarlo di 10° in senso orario. Una volta raggiunta la temperatura minima di prova, basterà inseguire il sole continuando a ruotare leggermente i forni.

3.5.2 Area di apertura

L'effettiva area di apertura dei forni a pannelli solari dipende dall'elevazione del sole durante le prove e la configurazione specifica dei pannelli riflettenti. Tuttavia, per semplificare l'analisi dei risultati, sono state considerate aree di apertura medie (A_a) per calcolare i parametri prestazionali. La configurazione utilizzata per l'**elevazione solare medio-bassa** è stata calcolata considerando la seguente elevazione solare media: $\alpha_{sun,av} \sim 41^\circ$. Invece, i valori della configurazione per **elevazione medio-alta** sono stati calcolati usando $\alpha_{sun,av} \sim 62^\circ$. Queste elevazioni solari medie sono state stimate mediante gli algoritmi descritti da Meeus (1991), prendendo in conto che le prove sono state effettuate nei mesi di settembre-ottobre, marzo-aprile e luglio-agosto tra le 10:00 e le 16:00 (ora solare locale Ancona). La **tabella 3.4** mostra i valori A_a della configurazione di ciascun forno a pannelli per **altezze solari medio-basse (CONFIGURAZIONE A)** e quella per altezze solari **medio-alte (CONFIGURAZIONE B)**:

	AREA DI APERTURA A_a (m ²)			
	Kimono	Fun-Panel	DSPC	Cookit
CONFIGURAZIONE A (Basse-medie altezze solari)	0,526	0,417	0,419	0,323
CONFIGURAZIONE B (Medie-alte altezze solari)	0,540	0,420	0,440	0,323

Tabella 3.4 Area di apertura dei forni all'altezza solare nei diversi periodi dell'anno

3.5.3 Incidenza del vento e sistemi di schermatura

I forni a pannelli utilizzati risentono molto delle condizioni ambientali.

Affinchè le prove risultino accettabili ai fini dell'analisi sperimentale, è opportuno che siano rispettate le condizioni di cui sotto per quanto riguarda le **variabili (meteorologiche) non controllate**:

1) Velocità media del vento

Le prove dovrebbero essere condotte qualora il **vento medio** durante la prova sia **inferiore a 1,0 m/s**, misurato all'elevazione del forno in prova e entro dieci metri da essa.

2) Velocità massima del vento

Se il **vento supera i 2,5 m/s per più di dieci minuti**, i dati di prova devono essere scartati.

3) Protezione dal vento

Se è necessaria una **protezione antivento**, questa deve essere progettata in modo da non interferire con l'irraggiamento totale in ingresso e la strumentazione del vento deve essere collocata in prossimità dell'ombra del forno.

4) Temperatura ambiente

I test devono essere condotti quando la **temperatura ambiente è compresa tra 20 e 35 °C**.

5) Temperatura dell'acqua

I dati del test devono essere registrati per **temperature** dell'acqua contenuta nel ricevitore **comprese tra 5 °C al di sopra della temperatura ambiente e 5 °C al di sotto della temperatura di ebollizione locale.**

6) Insolazione

La massima energia solare disponibile deve essere misurata nel piano perpendicolare all'irraggiamento diretto del sole utilizzando un **piranometro** a radiazione. Una **variazione dell'insolazione maggiore di 100 W/m² durante un intervallo di dieci minuti o letture inferiori a 450 W/m² o superiore a 1100 W/m²** durante la prova, rendono la **prova non valida.**

7) Zenit solare e angolo azimutale

I test dovrebbero essere condotti **tra le 10:00 e le 14:00 (ora solare)** ma l'orario di prova può variare in base alla posizione geografica in cui vengono svolte le prove e alla differente altezza solari nei vari periodi dell'anno.

La zona dove sono state svolte le prove in Ancona è molto ventosa e poiché, specialmete le prove del secondo test di misure sono state effettuate in giornate particolarmente ventose, sono state adottati per alcune di esse **opportuni sistemi di schermatura dei forni**, utilizzando **pannelli di plexiglass e bancali di legno**, e **posizionando i forni in prossimità del parapetto** per sfruttarne l'azione protettiva, come si può vedere dalle foto riportate sotto (**Figure 3.14-3.15-3.16**).



Figura 3.14 Sistemi di schermatura dal vento con pannelli di plexiglass



Figure 3.15 *Sistemi di schermatura dal vento con bancali di legno*



Figure 3.16 *Forni posti in prossimità del parapetto per proteggerli dal vento*

3.5.4 Analisi dei dati vento

A titolo di esempio, vengono riportati in **Figura 3.17** sono riportati i **dati vento** delle prove a vuoto e con acqua di tutti i set di misure. I seguenti dati sono stati presi da una centralina posta vicino al sito di prova.

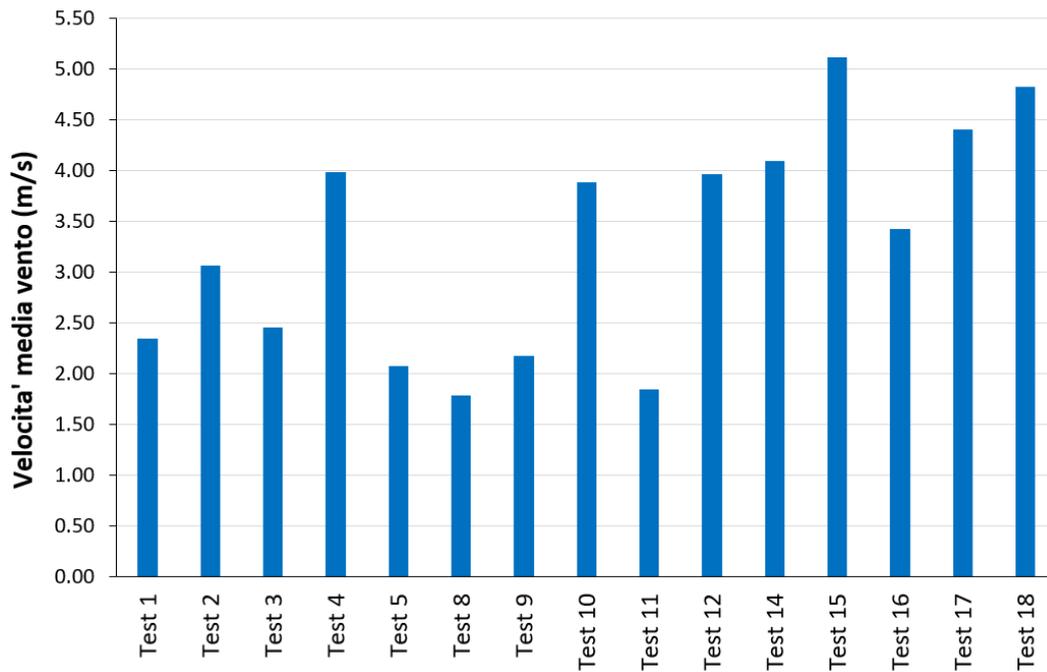


Figura 3.17 Velocità media del vento nei test a vuoto e ad acqua dei tre set di misure

4 Prove sperimentali

4.1 Parametri di riferimento [16]

Date le stesse variabili esterne incontrollabili come il vento, la radiazione solare e la temperatura ambiente, l'obiettivo nel testare i quattro prototipi in parallelo e' stato valutare come i diversi dispositivi si comportassero in base alle diverse geometrie in termini di prestazioni termiche e ottiche. I principali parametri utilizzati per caratterizzare le prestazioni di i fornelli solari a quattro pannelli in condizioni di carico e vuoto sono mostrati nei successivi paragrafi.

4.1.1 Prima figura di merito (F_1)

La prima figura di merito è stata calcolata da **Mullick** [12] studiando le prestazioni del forno a vuoto ed è data dalla seguente formula:

$$F_1 = \frac{(T_{\max} - T_{\text{amb}})}{DNI}$$

Dove: T_{\max} = Temperatura massima raggiunta dalla piastra all'interno del forno, dove viene posizionato il ricevitore (°C). E' la **temperatura di stagnazione**, ovveo una condizione di

l'equilibrio tra il calore in entrata dovuto all'incidente irraggiamento solare e il calore in uscita dovuto alle dispersioni termiche.

T_{amb} = Temperatura dell'ambiente misurata nel momento in cui si raggiunge la massima temperatura della piastra ($^{\circ}C$)

DNI = Radiazione solare normale globale, misurata nel momento in cui si raggiunge la massima temperatura della piastra (W/m^2)

Questo parametro è legato alle **prove a vuoto**.

Il calcolo di F_1 fornisce una lettura delle qualità ottiche e della sensibilità verso le perdite di calore dell'apparato solare. Un alto valore sta ad indicare che il materiale riflettente adoperato ha un'eccellente resa e la geometria del forno è piuttosto performante, offrendo allo stesso tempo una bassa dispersione di calore.

4.2.2 Seconda figura di merito (F_2)

La seconda figura di merito è stata studiata sempre da **Mullick** [12] ed è data dalla seguente formula:

$$F_2 = \frac{F_1(mc)'_w}{A_a \Delta t} \ln \left[\frac{1 - \frac{1}{F_1} (T_{w1} - T_{amb,m})/DNI_m}{1 - \frac{1}{F_1} (T_{w2} - T_{amb,m})/DNI_m} \right]$$

Dove gli elementi T_{w1} e T_{w2} rappresentano rispettivamente la temperatura iniziale (la più bassa nell'intervallo di temperature in esame) e la temperatura finale del fluido (la più alta nell'intervallo di temperature in esame) e Δt è espresso in secondi.

A_a = Area di apertura del forno solare.

DNI_m = Radiazione solare normale globale misurata nell'intervallo di tempo Δt .

$(mc)'_w = m_f c_f$, si ottiene moltiplicando la massa del fluido per il calore specifico del fluido contenuto nel ricevitore.

$T_{amb, m}$ = Temperatura ambiente media nell'intervallo Δt considerato.

Questo parametro si riferisce alle **prove con carico**.

Alti valori denotano un forno dalle ottime proprietà ottiche, in grado di trasferire il calore al carico in maniera efficiente e con un ricevitore dalla bassa capacità termica rispetto a quella del fluido in esso contenuto.

4.1.3 Tempo di ebollizione (T_s e T_c)

Un dato molto semplice che si può ricavare dai **test con carico**, studiato da **Khalifa [13]**, è il tempo necessario affinché l'acqua arrivi ad ebollizione. In generale, questo parametro può essere impiegato anche per misurare il tempo che impiega un certo fluido a raggiungere una particolare temperatura d'interesse, partendo da una di riferimento.

Questo intervallo può essere usato per ricavare il **tempo di ebollizione specifico (T_s)**:

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

che può essere visto come il tempo che occorre per bollire 1 kg d'acqua, avvalendosi di un forno con area di apertura di 1 m². Il tempo specifico viene espresso in h m² /kg.

Contestualmente è possibile definire anche il **tempo di ebollizione caratteristico (T_c)**, utile quando si devono operare dei confronti tra più modelli che lavorano in condizioni differenti.

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

La DNI_m è la radiazione media nell'intervallo di tempo Δt , mentre quella di riferimento DNI_{rif} è assunta pari a **900 W/m²**. Grazie al tempo caratteristico si possono confrontare diversi forni solari esposti a differenti livelli di radiazione solare.

4.1.4 Efficienza termica e COR

È possibile determinare anche un'**efficienza termica media**, sempre secondo **Khalifa [13]**, dividendo l'energia trasferita al fluido con quella massima che idealmente viene messa a disposizione dal forno. Questo parametro rappresenta il rapporto tra il calore immagazzinato e quello fornito dalla radiazione solare. E' quindi un valore adimensionale, dato dalla seguente formula:

$$\eta_m = \frac{m c \Delta T}{DNI_m A_a \Delta t}$$

Dove:

m_c = Massa di fluido usato (kg)

c = 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).

DNI_m = DNI media registrata durante la prova (W/m²)

A_a = Area di apertura (m²)

Δt = Intervallo di tempo di riscaldamento (h)

Esiste, inoltre, una procedura, illustrata da **Lakhar** [14], che permette di calcolare l'efficienza termica avvalendosi del confronto tra i dati sperimentali e l'equazione di Hottel-Whillier-Bliss per i forni solari.

Un altro parametro che si può calcolare è il **COR** (*Cooker Opto-thermal Ratio*):

$$COR = \frac{\eta_o C_r}{U_L}$$

Dove:

η_o = Efficienza ottica

C_r = Rapporto geometrico di concentrazione

U_L = Fattore di perdita di calore

Si può notare come formalmente l'espressione sia molto simile a quella di F_1 , ma a differenza di quest'ultimo, il COR è stato ottenuto analiticamente. Questo parametro risulta utile nel calcolo della **temperatura massima raggiungibile dal fluido nel ricevitore**.

4.2 Tipologie di prove effettuate

La caratterizzazione dei forni solari a pannelli è stata effettuata conducendo test outdoor sul terrazzo del DIISM. In particolare sono state svolte due tipologie di prove:

- **TEST A VUOTO**, in cui è stato utilizzato il ricevitore vuoto.

Servono a determinare la temperatura massima raggiungibile dal forno solare all'equilibrio, chiamata anche *stagnation temperature* o **temperatura di ristagno**.

Generalmente i test a vuoto non possono essere effettuati per dispositivi aperti e i forni a pannelli rientrano proprio in questa categoria, ma è stato possibile svolgere questo tipo di prove grazie alla scelta **ricevitore** utilizzato, costituito dalla **bowl in vetro** con il **coperchio in vetro**, in modo tale da creare una vera e propria **camera di cottura chiusa** per la **tortiera nera**. Si sottolinea l'importanza del ricevitore in questo tipo di prove.

- **TEST CON CARICO**, in cui il ricevitore è stato riempito con un fluido.

Consentono di ricavare i tempi di ebollizione specifici/caratteristici, la potenza di cottura, l'efficienza ottica e termica del forno.

E' stato interessante studiare il comportamento dei forni in presenza di una sostanza a cui trasferire energia.

Nella presente campagna sperimentale sono stati impiegati **due tipi di fluidi**:

- **l'acqua**, che è l'elemento più diffuso in natura.

Nelle **prove ad acqua** è stato studiato l'aumento di temperatura dei forni nel range compreso **tra 40°C e 90°C**.

- **l'olio silconico**, il cui utilizzo ha permesso di superare il limite di ebollizione dell'acqua a **100°C**, estendendo il range di temperatura massima raggiungibile fino a **120°C**.

In particolare, l'intervallo preso come riferimento per le **prove ad olio** è compreso **tra 50°C e 120°C**, aumentando così il ΔT di 20°C rispetto alle prove con acqua.

Inoltre l'olio silconico è una sostanza capace di mantenere le proprietà costanti in funzione dell'aumento della temperatura e del tempo.

Il fluido usato per i test è **olio silconico "Rhodorsil 47 V 100"** [16] in quantità di 1 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 mm²/s ad una temperatura di 25 °C).

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 proprietà che caratterizzano quest'olio sono:

- Bassa viscosità
- Alta tensione superficiale
- Alta comprimibilità
- Resistenza alle alte e alle basse temperature
- Resistenza all'ossidazione e all'idrolisi
- Mancanza di invecchiamento agli agenti atmosferici
- Chimicamente inerte
- Combustibilità molto limitata

La tensione di vapore è molto bassa con una viscosità di oltre 50 (mm²/s). Oltre i 200 °C l'olio siliconico, in presenza di aria, non è più stabile e cominciano i fenomeni di ossidazione.

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) a 25°C; 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 in °C, T misurata in °C e C_p in kcal/kg/°C; questa legge è valida tra -50 °C e 220 °C (**figura 4.1**).

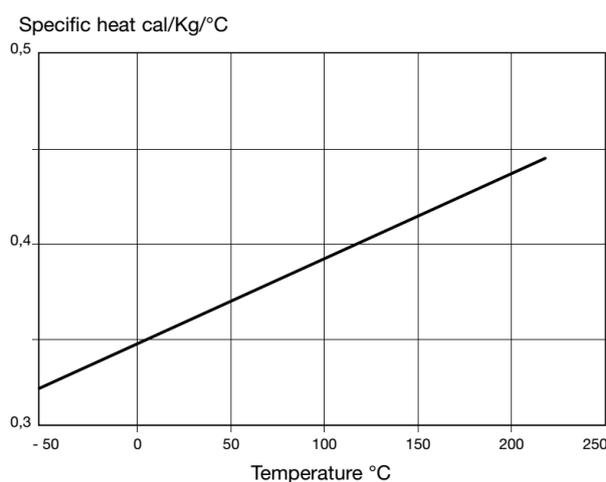


Figura 4.1 *Variazione del calore specifico dell'olio siliconico in funzione della temperatura*

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

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

- $T_0 = 298 \text{ K}$, per gli oli 47 V 50 a V 1,000:
- In $\text{m}\cdot\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ $\lambda = 156,82 - 0,233 T$ (T in $^\circ\text{C}$)
- In $\text{kcal}/\text{h}\cdot\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ $\lambda = 0,1351 - 2,10\cdot 10^{-4} T$

5 Risultati

Tutti i test sono stati effettuati ad Ancona, Italia, sul tetto del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (latitudine 43.5871°N, longitudine 13.5149°E) utilizzando i quattro prototipi in parallelo e quattro ricevitori identici.

Sono state effettuati **tre set di misurazioni** in diversi periodi dell'anno solare per avere una visione complessiva del comportamento dei forni e studiare le prestazioni di ciascuno dei quattro dispositivi di tipo panel.

- **PRIMO SET DI MISURE: Settembre e ottobre 2020**, le cui prove sono state svolte da **Luigi Terra**;
- **SECONDO SET DI MISURE: Tra marzo e aprile 2021 e aprile 2022**;
- **TERZO SET DI MISURE: Tra luglio e agosto 2021.**

Le prove di cui mi sono occupata personalmente hanno interessato gli ultimi due set di misure, che hanno avuto come obiettivo quello di mettere a confronto il comportamento dei forni in diversi periodi dell'anno, studiando le varie configurazioni per ottenere da essi elevate prestazioni in termini di efficienza termica, e completando così i test già iniziati da Luigi Terra.

Nel pianificare la suddetta campagna sperimentale, si è deciso di non prendere in considerazione i mesi più freddi dell'anno, cioè i mesi invernali, perché è stato valutato che i test non avrebbero portato a risultati adeguati per la posizione geografica di Ancona, la temperatura ambiente e l'irraggiamento solare registrato in questo periodo, che è mediamente inferiore a 20 °C e 450 W/m², valori minimi accettabili indicati da gli Standard ASAE. [15]

5.1 Primo set di misure

Le seguenti misurazioni sono state effettuate da Luigi Terra nel periodo **tra Settembre e Ottobre 2020**, in cui l'elevazione solare è medio-bassa ad Ancona, per questo motivo sono stati impiegati i valori A_a della **configurazione A** per il calcolo dei parametri prestazionali di tutti i prototipi.

Sono di seguito riportati i risultati di **3 prove a vuoto** e **2 prove a carico con acqua**.

1.1.1 Test a vuoto

Sono state effettuate **3 prove senza carico** in diverse condizioni ambientali.

TEST 1

PROVA A VUOTO 18/09/2020				
	Kimono	Fun-Panel	DSPC	Cookit
T_{amb} [°C]	24.91	24.99	25.18	25.11
DNI [W/m ²]	715.09	718.82	718.48	718.89
T_{max} [°C]	138.78	133.01	122.79	127.79
F_1 [°C/(W/m ²)]	0.159	0.15	0.136	0.143

TEST 2

PROVA A VUOTO 05/10/2020				
	Kimono	Fun-Panel	DSPC	Cookit
T_{amb} [°C]	22.26	22.14	21.56	21.74
DNI [W/m ²]	890.17	887.05	885.39	884.81
T_{max} [°C]	135.32	135.78	114.85	125.82
F_1 [°C/(W/m ²)]	0.127	0.128	0.105	0.117

TEST 3

PROVA A VUOTO 13/10/2020				
	Kimono	Fun-Panel	DSPC	Cookit
T_{amb} [°C]	13.88	14	14	13.94
DNI [W/m ²]	835.04	810.65	810.65	832.25
T_{max} [°C]	118.9	121.04	113.14	119.69
F_1 [°C/(W/m ²)]	0.126	0.132	0.122	0.127

Tabella 5.1 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove a vuoto del primo set di misure

Nelle **Figura 5.1** vengono mostrate le temperature e le radiazioni solari rilevate durante il test del 18/09/2020 (**Test 1**). Come possiamo notare, le temperature dell'assorbitore più alte registrate sono state circa 138,78 °C, 133,01 °C, 122,79 °C e 127,79 °C rilevate rispettivamente per Kimono, Funnel, DSPC e Cookit.

TEST A VUOTO 18/09/2020

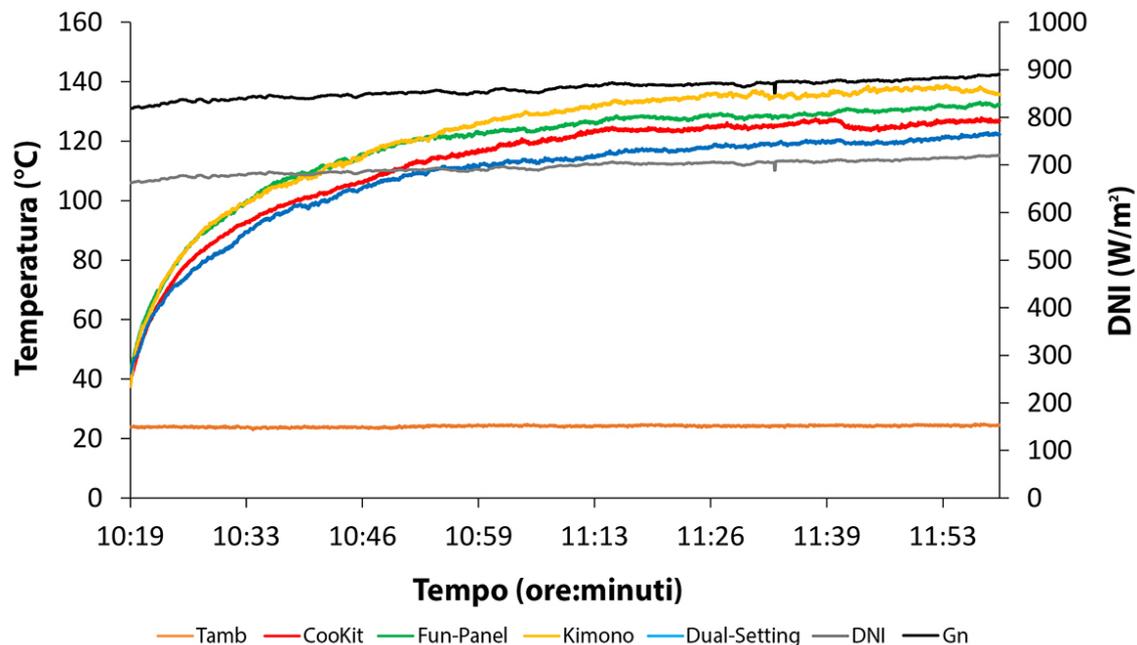


Figura 5.1 Test a vuoto: Prova 1, 18/09/2020

In particolare, dalla **Tabella 5.1** e dalla **Figura 5.1** si possono fare le seguenti considerazioni:

- I **test 1 e 2** sono quelli che meglio descrivono le prestazioni termiche dei forni a pannello, date le buone condizioni ambientali rilevate (G_n e T_{amb}) e la ripetibilità dei valori trovati per $T_{a,max}$. Infatti, come mostrato, i trend delle quattro temperature dell'assorbitore di ogni forno sono estremamente ripidi nella prima parte delle due prove per poi spianare ad alte temperature, quando si raggiungono le condizioni di equilibrio.
- Il **test 3** mostra che la temperatura ambiente gioca un ruolo primario nelle prestazioni dei dispositivi. In effetti, la temperatura ambiente dei quattro forni registrati in questo test, 13,61 °C, è significativamente inferiore a quelle registrate nei due precedenti test (25,05 °C per il test 1 e 21,93 °C per il test 2). Nonostante G_n è confrontabile con quello degli altri test, T_{amb} sensibilmente inferiori hanno portato a temperature massime dell'assorbitore inferiori a quelle registrate nelle altre due prove.

- In generale, il Kimono e il Fun-Panel sono i due dispositivi che hanno raggiunto le più alte temperature massime dell'assorbitore quando le condizioni ambientali erano ottimali, superando i 130 °C. Tuttavia, vale la pena notare che il Funnel è caratterizzato da un'area di apertura inferiore rispetto a quella del Kimono.

- Nel **test 3**, invece, hanno risentito maggiormente della bassa temperatura ambiente, raggiungendo temperature massime dell'assorbitore molto più basse. Tuttavia, anche in questo caso, i valori di $T_{a,max}$ per il Kimono e i Funnel erano superiori a 100 °C e paragonabili a quelli di gli altri due forni a pannello.

1.1.2 Test ad acqua

La **Tabella 5.2** mostra un riepilogo delle **due prove** effettuate **con acqua**.

TEST 4

PROVA CON ACQUA 24/09/2020			
	Kimono	Fun-Panel	Cookit
m [kg]	1	1	1
$T_{amb,m}$ [°C]	27.24	27.24	27.22
DNI_m [W/m ²]	808.67	808.35	806.32
Δt [s]	3898	3818	4557
t_s [(min · m ²)/kg]	34.17	26.53	24.53
t_{ch} [(min · m ²)/kg]	30.7	23.83	21.98
η_m	0.126	0.163	0.176
F_2	0.2	0.258	0.291

TEST 5

PROVA CON ACQUA 09/10/2020			
	Kimono	Fun-Panel	Cookit
m [kg]	1	1	1
$T_{amb,m}$ [°C]	19.81	19.82	19.66
DNI_m [W/m ²]	638.67	638.05	667.31
Δt [s]	8144	7927	10357
t_s [(min · m ²)/kg]	71.4	55.1	55.75
t_{ch} [(min · m ²)/kg]	50.66	39.06	41.43
η_m	0.077	0.099	0.094
F_2	0.182	0.239	0.231

Tabella 5.2 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove ad acqua del primo set di misure

Questi test sono stati eseguiti utilizzando la stessa configurazione sperimentale e quattro ricevitori identici contenenti una massa d'acqua di 1 kg ciascuno.

TEST CON ACQUA 24/09/2020

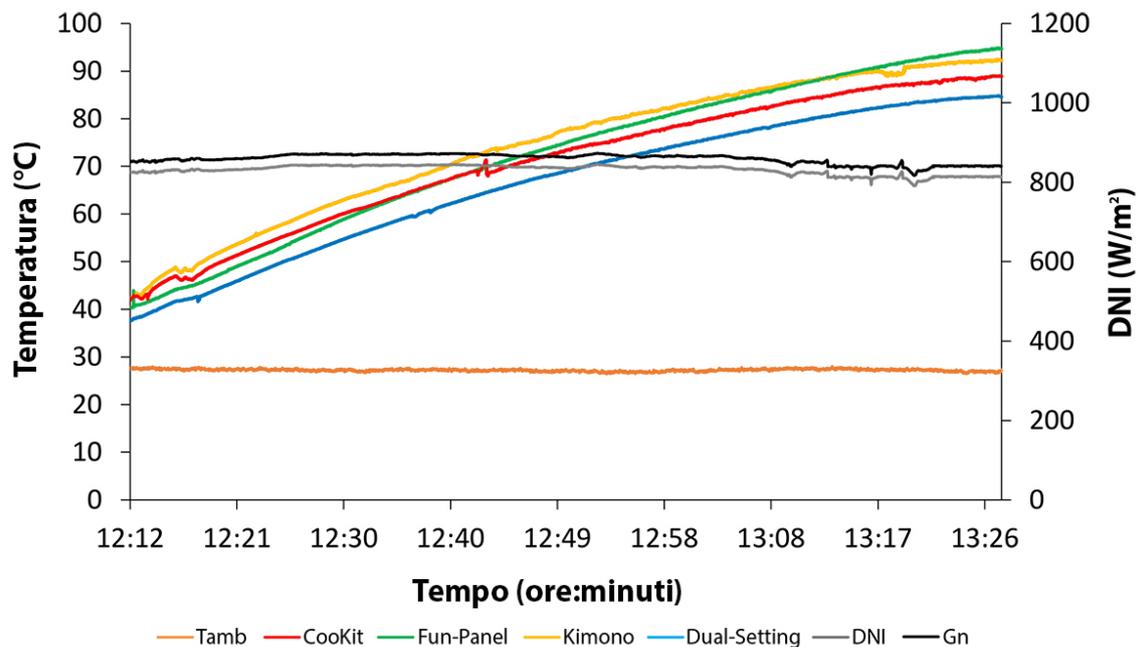


Fig. 5.2 Test con acqua: Prova 4, 24/09/2020

I grafico in figura mostra le temperature registrate durante il test il 24/09/2020 (**Prova 4**). La DNI era di circa $862,31 \text{ W/m}^2$ e la temperatura ambiente media era di $27,24 \text{ }^\circ\text{C}$. L'acqua ha impiegato circa 1 ora per passare da 40 a $90 \text{ }^\circ\text{C}$ nei forni solari Kimono e Fun-Panel. In questo test, l'intervallo di tempo di riscaldamento, Δt_{th} , era più lungo nel caso del Cookit, mentre la temperatura massima dell'acqua registrato nel DSPC era di $84,7 \text{ }^\circ\text{C}$, come mostrato nel test del 18/09/2020..

Dunque la temperatura dell'acqua registrata per il DSPC, non solo non ha raggiunto la temperatura del punto di ebollizione, ma non ha neanche raggiunto i $90 \text{ }^\circ\text{C}$, limite per il calcolo dei parametri. Un comportamento simile alla temperatura dell'acqua del DSPC registrato nel test 4, è stato osservato anche per l'altro test della **Tabella 5.2**. Infatti, in tutti e due test (**Test 4 e 5**), il DSPC non è mai stato in grado di portare l'acqua a temperatura superiore a $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Di conseguenza, non è stato possibile calcolare i parametri descritti nella tabella nell'intervallo di temperatura da $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a $90 \text{ }^\circ\text{C}$ per questo forno. Per questo motivo, i risultati forniti dal DSPC nei due test non sono stati riportati.

In conclusione si possono delineare diverse considerazioni:

- È evidente che il DSPC mostra prestazioni peggiori rispetto agli altri prototipi testati. Quindi, la geometria di DSPC sembra non essere adatto per l'elevazione solare di questo periodo dell'anno ad

Ancona, poiché non è in grado di concentrare la radiazione solare con buona efficienza ottica nel ricevitore.

- Nonostante le configurazioni del DSPC e del Funnel per medio-basse elevazioni solari abbiano aree di apertura molto simili tra loro (0,419 m² e 0,417 mq, rispettivamente), i due fornelli si sono comportati in modo molto diverso durante i test. Ciò può essere dovuto alla geometria DSPC, che risultata non adatta ad altitudini solari medio-basse, come menzionato sopra.

- Nel **test 4**, caratterizzato dalle migliori condizioni ambientali, il tempo necessario per far passare l'acqua da 40 °C a 90 °C era in media più breve per i forni Kimono e Funnel rispetto al Cookit. Ciò conferma che il design di questi due forni si presta bene anche per altitudini medio-basse.

- Le condizioni ambientali non ottimali durante la **prova 5** hanno causato un forte aumento del tempo necessario all'acqua per raggiungere i 90 °C per tutti i forni; in particolare, questa volta è raddoppiato per il Kimono e il Funnel, pur essendo in ogni caso inferiore a quello del Cookit.

11.3 Test ad olio

PROVA CON OLIO 20/10/2020			
	Kimono	Fun-Panel	Cookit
m [kg]	1	1	1
c_o [J/(kg · K)]	1617	1616	1632
$T_{amb,m}$ [°C]	14.86	14.81	15.64
DNI_m [W/m ²]	812.1	824.04	732.97
Δt [s]	3672	3240	8424
t_s [(min · m ²)/kg]	32.24	22.5	45.34
t_{ch} [(min · m ²)/kg]	29.01	20.6	36.92
η_m	0.072	0.1	0.057
F_2	0.288	0.393	In neg.

PROVA CON OLIO 21/10/2020 N.1			
	Kimono	Fun-Panel	Cookit
m [kg]	1	1	1
c_o [J/(kg · K)]	1613	1617	1614
$T_{amb,m}$ [°C]	15.33	15.35	15.39
DNI_m [W/m ²]	817.37	819.34	828.05
Δt [s]	4248	4644	5004
t_s [(min · m ²)/kg]	37.28	32.21	26.92
t_{ch} [(min · m ²)/kg]	33.86	29.33	24.76
η_m	0.062	0.072	0.085
F_2	0.233	0.287	0.449

Tabella 5.3 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove ad olio del primo set di misure

Le prove del 20/10/2020 e del 21/10/2020 n.1 sono state molto simili, con condizioni meteo insolitamente buone per il periodo. In particolare nella prima c'è stata una radiazione non proprio ottimale, per cui il Cookit ha raggiunto la temperatura di 120 °C molto più tardi rispetto al Kimono e al Fun-Panel. Attraverso queste prove si è confermato ciò che era stato ottenuto per le misure con acqua. I valori ottenuti sono però più elevati rispetto ai test precedenti, grazie all'adozione di un intervallo di temperature più grandi. L'alta temperatura raggiunta dall'olio ha incentivato le dispersioni termiche, facendo sì che l'efficienza media registrata sia stata sempre molto bassa.

5.2 Secondo set di misure

Le seguenti misurazioni sono state effettuate nel periodo tra **marzo/aprile 2021** e ad **aprile 2022**.

Sebbene questi mesi siano un periodo caratterizzato da un'altezza solare media ad Ancona, è stato utilizzata in tutte le prove la configurazione per altezze solari medio-basse sia per il Kimono che per il DSPC. Per il Fun-Panel, invece, sono state adottate entrambi le configurazioni: sia quella per elevazione solare medio-bassa che quella per elevazione solare medio-alta. In ogni caso, sono stati considerati nel calcolo dei parametri prestazionali i corrispondenti valori di area di apertura per ciascun prototipo.

5.2.1 Test a vuoto

Sono state effettuate **tre prove senza carico** in diverse condizioni ambientali.

Data	Test 8				Test 9				Test 10			
	29/03/2021				01/04/2021				28/04/2022			
Tipo di forno	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit
Configurazione	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A
T_{amb} (°C)	18.23	18.86	19.42	18.89	23.21	23.18	23.46	23.45	15.98	15.88	15.95	15.4
G_n (W/m ²)	926.52	937.84	909.49	932.14	996.92	996.28	995.53	995.32	983.79	982.54	983.50	986.13
DNI (W/m ²)	805.47	815.14	788.03	808.41	902.17	902.69	900.89	899.03	920.3	919.13	920.03	922.49
$T_{a,max}$ (°C)	122.59	118.3	98.16	104.88	133.77	110.29	110.67	125.54	131.00	157.15	114.76	124.37
F_1 (°C/(W/m ²))	0.113	0.106	0.087	0.092	0.111	0.087	0.088	0.103	0.117	0.144	0.100	0.111

Tabella 5.4 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove a vuoto del secondo set di misure

La **tabella 5.4** mostra una sintesi dei test con le grandezze misurate.

Nei test con un **asterisco**, è stata utilizzato il Funnel in **CONFIGURAZIONE A** per altezze solari medio-basse. A titolo esemplificativo, la **Figura 5.1** mostra le temperature ambiente e dell'assorbitore e la variazione degli irraggiamenti solari rilevati durante il prova del 01/04/2021 (**Prova 7***), dove tutti i forni solari sono stati testati con la **CONFIGURAZIONE A**.

TEST A VUOTO 01/04/2021

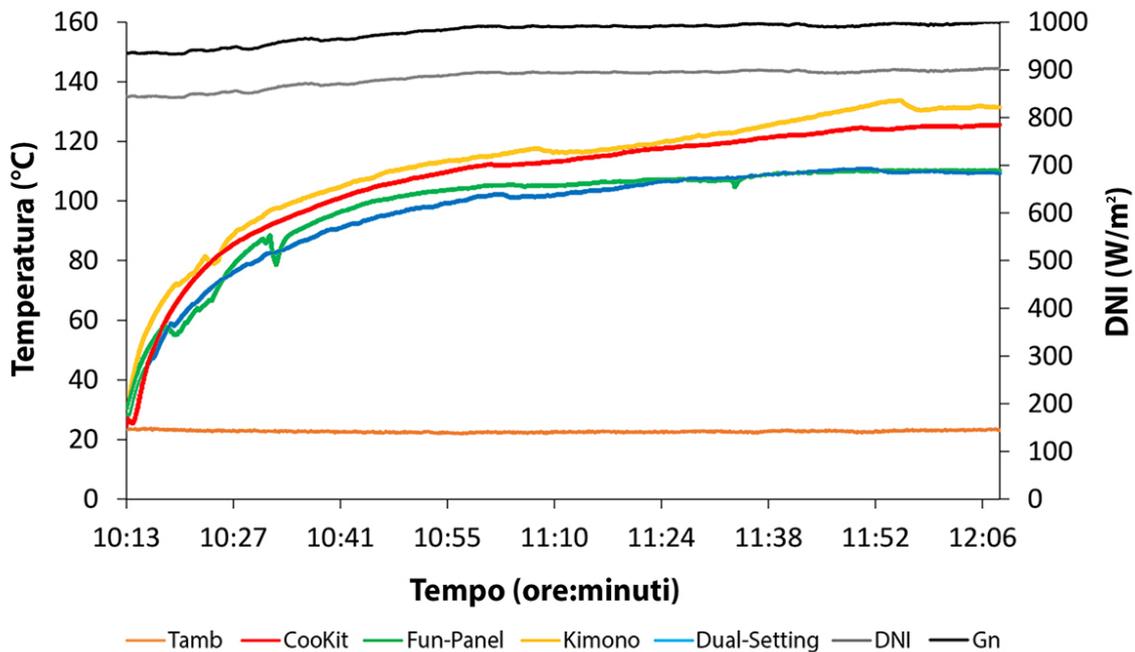


Fig. 5.3 Test a vuoto: Prova 7*, 01/04/2021

Come si può notare, le temperature di assorbimento più elevate registrate sono state di circa 133,77 °C, 110,29 °C, 110,67 °C e 125,54 °C rispettivamente per Kimono, Funnel, DSPC e Cookit. In generale, come per i test senza carico nella prima serie di test, il Kimono era il dispositivo che di solito raggiungeva la temperatura di massimo assorbimento. Invece, le temperature massime dell'assorbitore raggiunte dalla configurazione A del Funnel erano inferiori a quelle garantite dal Kimono.

D'altra parte, i risultati del **Test 8** dove il Funnel è stato utilizzato con la configurazione per altezza solare medio-alta (**CONFIGURAZIONE B**) ha mostrato che il ricevitore di questo dispositivo ha raggiunto la massima temperatura. Ciò dimostra che la configurazione B del Fun-Panel è più adatto per questo periodo dell'anno ad Ancona. In questo secondo set, anche il Cookit è riuscito a raggiungere un elevato assorbimento dovuto alla media altezza solare registrata durante il periodo in cui è stato svolto il test.

5.2.2 Test ad acqua

La **tabella 5.5** mostra un riepilogo delle due prove effettuate mediante il ricevitore riempito con acqua.

Data	Test 11				Test 12			
	24/03/2021				26/04/2022			
Tipo di forno	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit
Configurazione	A	A	A	A	A	B	A	A
m_f (kg)	1	1	1	1	1	1	1	1
T_1 (°C)	40	40	40	40	40	40	40	40
T_2 (°C)	90	90	90	90	90	90	80	90
$G_{n,av}$ (W/m ²)	1008.68	1004.41	1007.52	1008.80	1005.76	1006.21	1006.91	1010.82
$T_{amb,av}$ (°C)	11.88	12.00	11.89	11.90	19.26	19.26	19.26	19.4
Δt_h (h)	2.21	2.89	2.48	2.22	2.12	1.65	1.68	2.6
t_s (h m ² /kg)	1.16	1.21	0.86	0.72	1.11	0.69	0.7	0.84
t_{ch} (h m ² /kg)	1.3	1.35	0.96	0.8	1.24	0.77	0.79	0.94
η_{av}	0.05	0.05	0.07	0.08	0.05	0.08	0.07	0.07
F_2	0.10	0.11	0.20	0.19	0.09	0.13	0.13	0.13
$F'\eta_0$	0.248	0.235	0.201	0.343	0.254	0.222	0.181	0.242
$F'U_l/C$ (W/m ² °C)	3.07	2.97	2.25	4.20	3.59	2.70	2.56	3.30
COR (W/m ² °C)	0.081	0.079	0.089	0.082	0.071	0.082	0.071	0.073
T_{fx} (°C)	93.46	91.65	101.78	94.15	90.42	101.93	90.39	93.35
R^2	0.95	0.93	0.93	0.95	0.94	0.92	0.93	0.96

Tabella 5.5 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove ad acqua del secondo set di misure

Nell' prova ad acqua del 26/04/2022 il DSPC non ha raggiunto la temperatura minima di 90°C, ecco il motivo per cui le sue prestazioni sono state valutate nel range compreso tra 40°C e 80°C.

Inoltre, poiché è stato visto che il Funnel già fin da marzo lavora meglio con altezze solari medio-alte, nella stessa prova ad acqua del 26/04/2022 è stato valutato in CONFIGURAZIONE B, proprio perché si è riscontrato che con un'area di apertura maggiore dà dei risultati migliori.

Anche in questo caso nelle prove con asterisco è stata adottata la configurazione del Funnel per altezze solari medio-basse (CONFIGURAZIONE A).

TEST AD ACQUA 24/03/2021

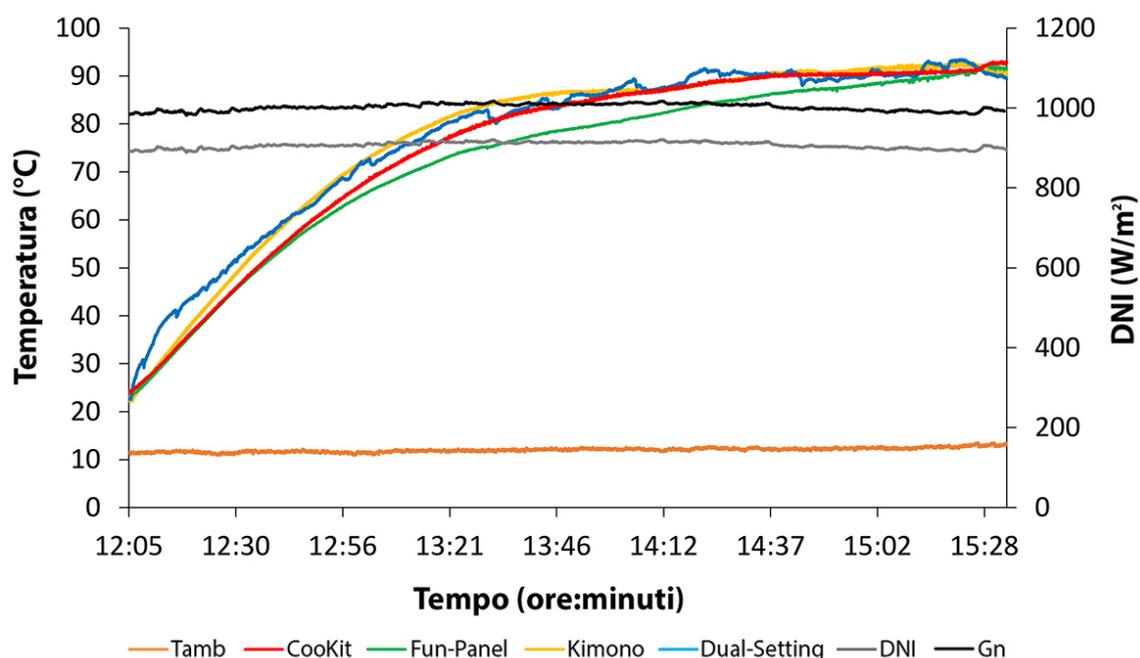


Fig. 5.4 Test con acqua: Prova 9*, 24/03/2021

La **Figura 5.4** mostra l'andamento delle temperature del fluido all'interno dei quattro prototipi e gli irraggiamenti solari registrati durante il prova il 24/03/2021 (prova 9*). $G_{n,av}$ e $T_{amb,av}$ registrate durante il test erano rispettivamente $1007,49 \text{ W/m}^2$ e $11,90 \text{ °C}$. In tutti i forni l'acqua ha impiegato più di 2 ore per passare da 40 a 90 °C . Il tempo necessario affinché il fluido abbia raggiunto i 90 °C è stato di $2,21 \text{ h}$ per il Kimono e $2,22 \text{ h}$ per il Cookit. Gli altri due forni, invece, hanno impiegato più tempo per far salire la temperatura dell'acqua: rispettivamente $2,48 \text{ h}$ il DSPC e $2,89 \text{ h}$ il Funnel.

Alla luce di ciò, si possono trarre le seguenti conclusioni:

- A differenza della prima serie di prove, in questa seconda serie è stato più difficile effettuare prove soddisfacenti per le condizioni meteorologiche variabili registrate nei mesi di marzo e aprile ad Ancona. In effetti, ci sono stati alcuni giorni molto freddi e ventosi.
- Il test 9* è stato caratterizzato da una temperatura ambiente media molto bassa pari a $11,90 \text{ °C}$ ma anche da una temperatura ambiente globale molto alta (DNI di circa $1007,49 \text{ W/m}^2$), che è rimasto quasi invariato per tutta la **prova 9*** del 24/03/2021. Queste condizioni ambientali esterne durante il test hanno permesso a tutti i dispositivi di portare acqua al suo punto di ebollizione in un tempo relativamente breve ($2,89 \text{ h}$ per il Funnel è stato il tempo più lungo necessario).
- Mentre il tempo necessario all'acqua per raggiungere i 90 °C per il Kimono e per il Cookit è stato simile nei due test, c'è stata una differenza significativa tra la Δt_h del Funnel nei test 9* e 10. Infatti, i valori Δt_h registrati nel test 9* (dove il Funnel è stato testato con la CONFIGURAZIONE A) era

circa il 43% più lungo di quella registrata nel test 10 (dove il Funnel è stato testato con la configurazione per altezze solari medio-alta, cioè configurazione B). A parte le diverse condizioni meteorologiche nei test, questi i risultati sembrano mostrare che la **configurazione B del Funnel assicura migliori prestazioni termiche in questo periodo dell'anno in Ancona.**

- Durante il **test 9*** il DSPC è stato in grado di portare la temperatura dell'acqua sopra i 90 °C, ciò non è avvenuto nel test 10, dove questo dispositivo ha portato la temperatura dell'acqua leggermente sopra gli 80 °C. Quest'ultimo risultato conferma che **la geometria del DSPC potrebbe non essere adatta per portare l'acqua al punto di ebollizione nelle condizioni meteorologiche testate.**

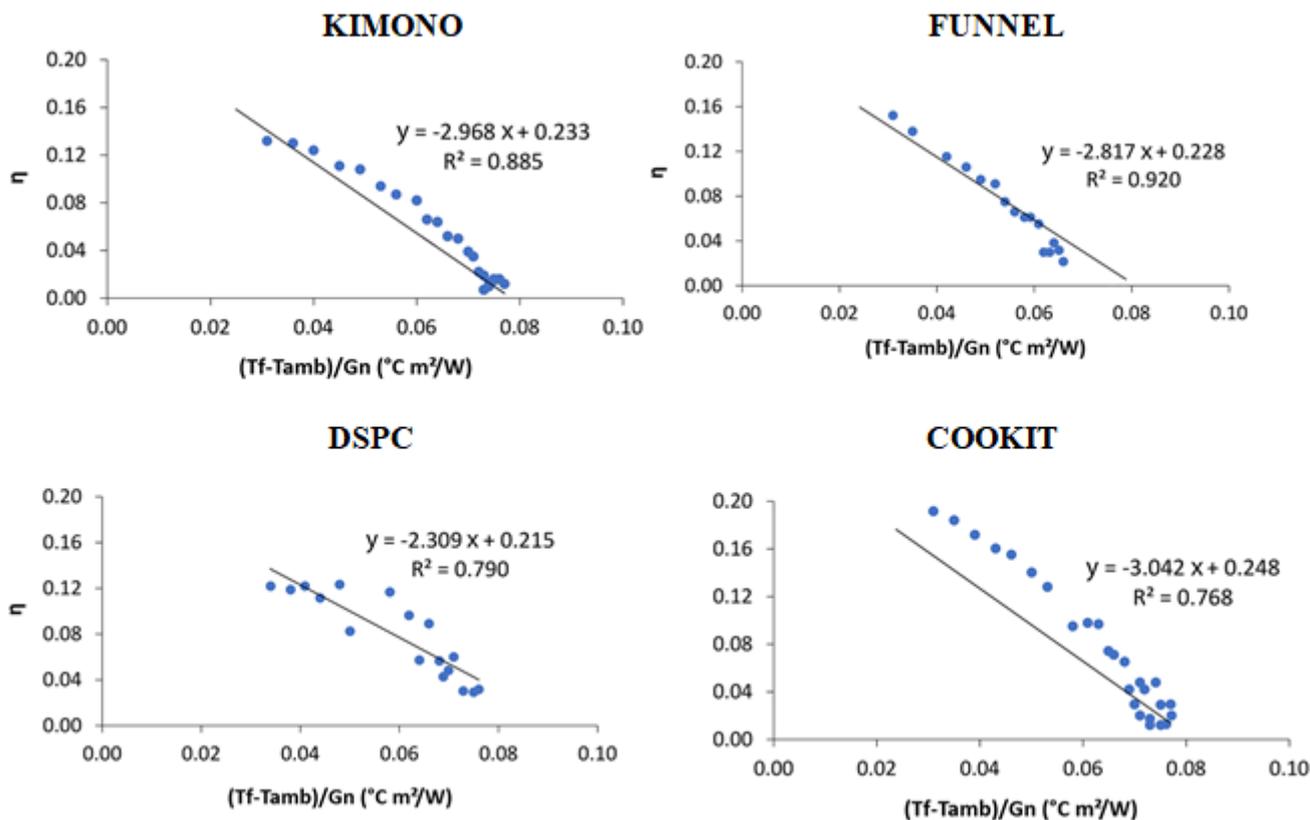


Figura 5.5 Grafici di efficienza dei forni nella prova con acqua del 24/03/2021

5.2.3 Test ad olio

Test 13				
Data	24/03/2021			
Tipo di forno	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit
Configurazione	A	A	A	A
m_f (kg)	1	1	1	1
T_1 (°C)	50	50	50	50
T_2 (°C)	120	105	120	120
DNI (W/m ²)	951.81	952.32	946.53	943.94
$T_{amb,av}$ (°C)	19.83	19.86	19.9	19.79
Δt_h (h)	4.31	4.60	3.05	2.30
t_s (h m ² /kg)	2.27	1.92	1.28	0.74
t_{ch} (h m ² /kg)	2.4	2.03	1.35	0.78
η_{av}	0.01	0.01	0.03	0.05
F_2	0.04	0.03	0.09	0.2
$F'\eta_0$	0.122	0.142	0.114	0.19
$F'U_l/C$ (W/m ² °C)	1.146	1.688	0.986	1.71
COR (W/m ² °C)	0.1064572	0.08412	0.11562	0.111
T_{fx} (°C)	121.15707	99.9722	129.337	124.83
R^2	0.861	0.884	0.776	0.943

Tabella 5.6 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove ad olio del secondo set di misure

Dai valori in tabella, è evidente che il Funnel non sia stato in grado di raggiungere la temperatura di 120° nella prova ad olio del 24/03/2021.

5.3 Terzo set di misure

Le seguenti misurazioni sono state effettuate nei mesi di **luglio e agosto 2021**.

Poiché questo è un periodo in cui il sole è in posizione medio-alta ad Ancona, sono stati usati il Kimono, il Funnel e il DSPC in **CONFIGURAZIONE B** durante tutti i test. Pertanto sono stati usati i valori dell'area di apertura in **CONFIGURAZIONE B** per il calcolo dei parametri di tutti i prototipi testati.

5.3.1 Test a vuoto

Sono state effettuate **tre prove a vuoto** in diverse condizioni ambientali. In questo set di misure le **termocoppie** sono state messe a contatto con la **piastra nera della tortiera** ed è stato inserito un **coperchio di acciaio inox verniciato di nero sotto al coperchio in vetro**, in modo da implementare le prestazioni dei forni. Nella **Figura 5.6** in basso si può vedere il sistema di fissaggio delle termocoppie sul fondo ricevitore, utilizzando dei **bulloni** che sono stati appoggiati per fermare le termocoppie e incollando l'estremità dei sensori al centro della tortiera, utilizzando uno **scotch resistente alle alte temperature**.



Fig. 5.6 Sistema di fissaggio delle termocoppie sul fondo delle tortiere nere

La **Tabella 5.7** mostra un riepilogo delle grandezze misurate. In questa terza serie di test, mentre le geometrie di Kimono, Funnel e DSPC sono stati modificate per elevazioni del sole più elevate, per il Cookit è stata mantenuta la stessa configurazione che veniva usata per altezze medio-basse (a tal proposito si rimarca il fatto che il Cookit è l'unico forno che non ha subito variazioni di configurazione durante i vari set di prove).

Data	Test 14				Test 15				Test 16			
	21/07/2021				22/07/2021				02/08/2021			
Tipo di forno	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit
Configurazione	B	B	B	A	B	B	B	A	B	B	B	A
T_{amb} (°C)	33.06	32.78	32.63	33.34	28.21	29.33	28.43	29.49	27.9	29.31	28.07	29.19
G_n (W/m ²)	947.62	946.91	950.31	950.51	916.51	919.63	925.58	928.68	926.98	929.12	926.63	929.09
DNI (W/m ²)	764.02	763.45	766.19	766.35	748.01	746.16	751.44	755.13	797.58	799.72	797.23	799.62
$T_{a,max}$ (°C)	132.23	137.54	127.53	126.31	141.81	139.89	118.65	120.97	134.53	146.53	122.51	123.68
F_1 (°C/(W/m ²))	0.105	0.111	0.100	0.098	0.124	0.120	0.097	0.099	0.115	0.126	0.102	0.102

Tabella 5.7 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove a vuoto del terzo set di misure

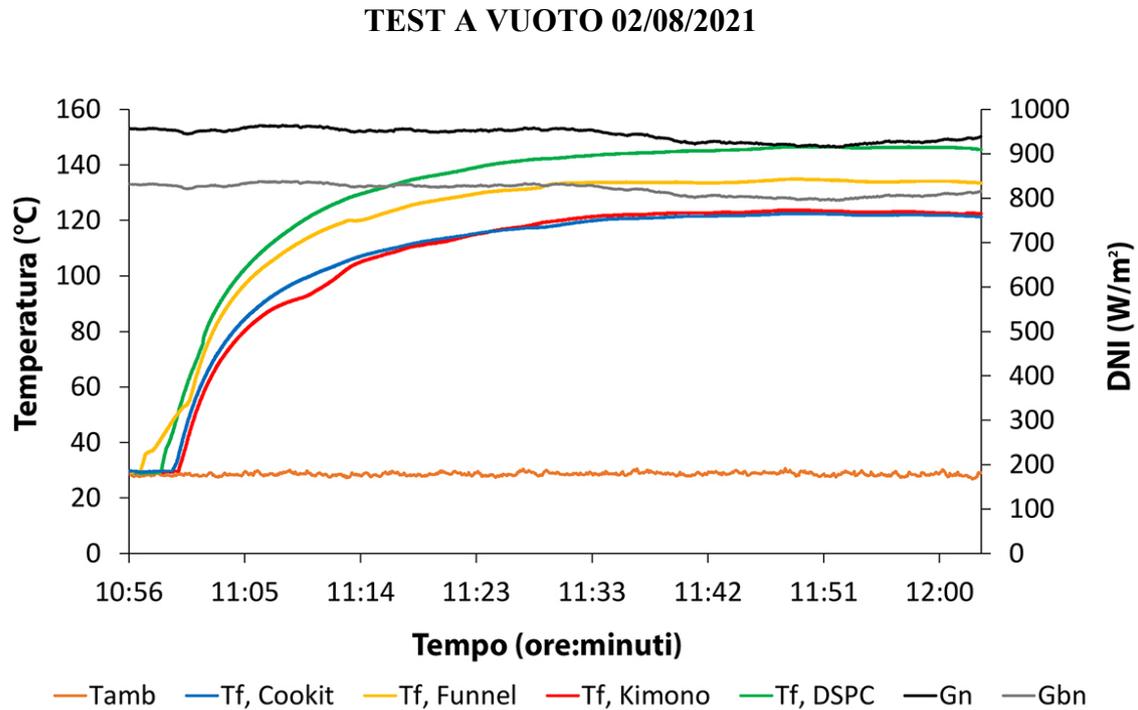


Fig. 5.8 Test a vuoto: Prova 13, 02/08/2021

A titolo esemplificativo, nel grafico in **Figura 5.8** sono indicate la temperatura ambiente, quella raggiunta dal ricevitore nei vari forni, e la variazione di radiazione solare diretta registrata durante la prova del 02/08/2021 (**Prova 13**). Come si può notare, le massime temperature raggiunte dagli assorbitori sono state di circa 134,93 °C, 146,53 °C, 122,51 °C e 123,68 °C, rispettivamente per Kimono, Funnel, DSPC e Cookit. In tutti i test, nonostante la sua area di apertura inferiore, il **Funnel ha raggiunto temperature massime dell'assorbitore simili o superiori a quelle del Kimono**, superando i 145 °C nel **test 13**. Invece le massime temperature raggiunte dagli altri forni solari sono state generalmente inferiori di circa 10–20 °C rispetto a quelli assicurate da Kimono e Funnel. Tuttavia, è importante sottolineare che il Cookit è stato testato utilizzando la configurazione per le altezze solari medio-basse.

5.3.2 Test ad acqua

I risultati ottenuti dai test utilizzando l'acqua come fluido di prova sono riassunte nella **Tabella 5.6**. In questo terzo set molte delle prove con carico sono state effettuate modificando leggermente il ricevitore di base e inserendo un **coperchio verniciato di nero sotto al coperchio in vetro**. Motivo di questa scelta è stato creare una camera di cottura quasi perfetta in grado di limitare al minimo le dispersioni di calore. In questo modo è stato possibile mettere a confronto le prestazioni dei forni con e senza coperchio nero. Mentre da una parte il **coperchio nero** permette di proteggere il ricevitore dalla **condensa** che si forma, evitando che gran parte della radiazione venga riflessa nella

parte superiore del ricevitore e massimizzando dunque l'apporto di energia, dall'altra **senza coperchio** si viene a creare una sorta di *camera termica* che in alcuni casi riduce la quantità di energia che arriva al fluido.

Data	Test 17				Test 18			
	03/08/2021				03/08/2021			
Tipo di forno	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit
Configurazione	B	B	B	A	B	B	B	A
m_f (kg)	1	1	1	1	1	1	1	1
T_1 (°C)	40	40	40	40	40	40	40	40
T_2 (°C)	90	90	90	90	90	90	90	90
$G_{n,av}$ (W/m ²)	945.49	936.23	951.73	949.02	917.12	933.83	921.83	928.17
$T_{amb,av}$ (°C)	28.35	28.22	28.63	28.49	29.1	28.96	29.1	29.15
Δt_h (h)	1.29	0.98	1.89	1.62	1.84	0.99	1.5	1.32
t_s (h m ² /kg)	0.7	0.41	0.83	0.52	0.99	0.42	0.66	0.43
t_{ch} (h m ² /kg)	0.73	0.43	0.88	0.55	1.01	0.43	0.68	0.44
η_{av}	0.09	0.15	0.07	0.12	0.06	0.15	0.1	0.15
F_2	0.14	0.23	0.13	0.2	0.1	0.23	0.17	0.26
$F'\eta_0$	0.19	0.334	0.227	0.338	0.159	0.275	0.16	0.23
$F'U_l/C$ (W/m ² °C)	2.39	4.44	3.27	4.71	1.99	3.58	1.49	2.11
COR (W/m ² °C)	0.080	0.075	0.069	0.072	0.080	0.077	0.107	0.109
T_{fx} (°C)	103.85	98.73	94.74	96.55	102.27	100.71	128.09	130.37
R^2	0.88	0.88	0.97	0.97	0.96	0.83	0.92	0.95

Tabella 5.8 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove ad acqua del terzo set di misure

TEST A VUOTO 03/08/2021

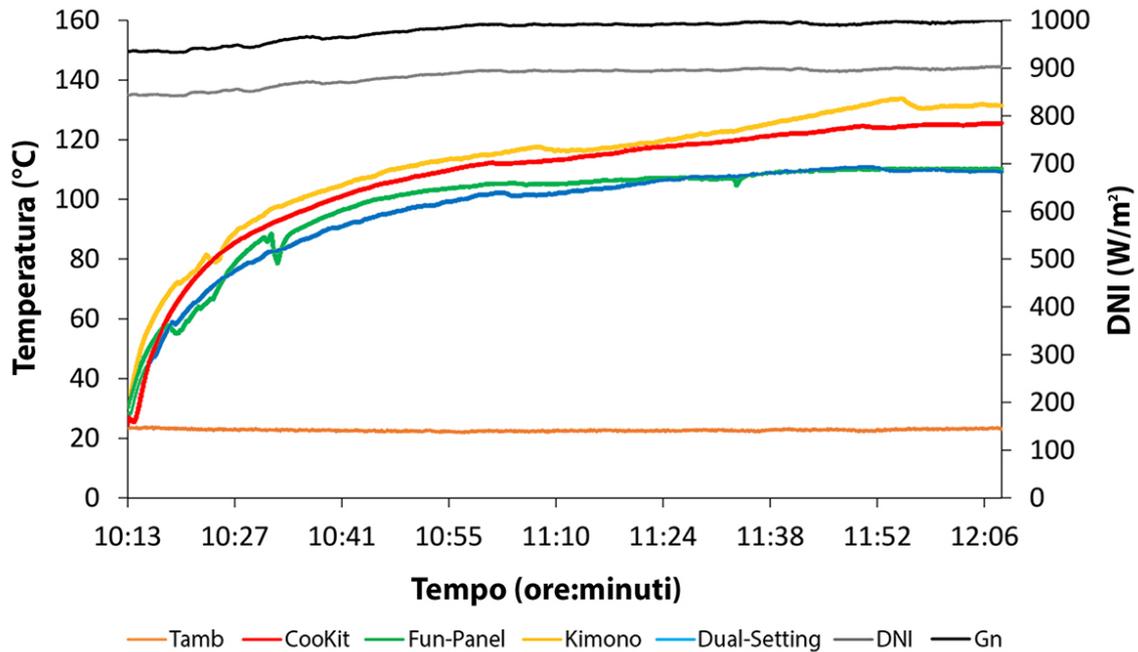


Fig. 5.9 Test ad acqua: Prova 14, 03/08/2021

La Fig. 5.9 mostra l'andamento delle temperature dell'acqua registrate nei quattro dispositivi, la temperatura ambiente e la DNI durante la prova del 03/08/2021 (**Prova 14**). I valori medi di $G_{n,av}$ e $T_{amb,av}$ registrati sono stati rispettivamente $945,62 \text{ W/m}^2$ e $28,42 \text{ }^\circ\text{C}$. L'acqua contenuta nel ricevitore del Fun-Panel ha impiegato circa 1 ora per raggiungere il range di temperatura di $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Il tempo necessario affinché il fluido abbia raggiunto i $90 \text{ }^\circ\text{C}$ negli altri dispositivi è stato più lungo: 1.29 h per il Kimono, 1.62 h per il Cookit e 1,89 h per il DSPC. I quattro forni sono stati in grado di raggiungere una temperatura dell'acqua di oltre $90 \text{ }^\circ\text{C}$ per entrambi i test del 03/08/2021 (**Prove 14 e 15**). In questa terza serie di misurazioni, si può vedere chiaramente che l'irraggiamento solare normale globale elevato e l'elevata temperatura ambiente, registrati durante il periodo di prova, hanno avuto un'influenza positiva sul successo delle prove. In generale, infatti, tutti i dispositivi, grazie anche alla configurazione adottata per le elevate altezze solari, sono stati in grado di garantire l'ebollizione dell'acqua.

5.3.3 Test ad olio

Anche nelle prove ad olio del terzo set di misure è stato inserito un **coperchio nero** sotto il coperchio in vetro a chiusura del ricevitore.

Data	Test 19				Test 20			
	06/08/2021				06/08/2021			
Tipo di forno	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit	Kimono	Funnel	DSPC	Cookit
Configurazione	B	B	B	A	B	B	B	A
m_f (kg)	1	1	1	1	1	1	1	1
T_1 (°C)	50	50	50	50	50	50	50	50
T_2 (°C)	105	120	120	120	120	120	120	120
DNI (W/m^2)	849.97	853.50	852.75	846.40	855.21	853.15	856.16	854.46
$T_{amb,av}$ (°C)	34.90	35.57	35.37	34.88	28.71	28.49	29.02	28.63
Δt_h (h)	1.56	1.10	1.16	1.79	0.86	0.74	1.30	0.88
t_s ($h\ m^2/kg$)	0.84	0.46	0.51	0.58	0.46	0.31	0.57	0.28
t_{ch} ($h\ m^2/kg$)	0.79	0.44	0.48	0.54	0.44	0.29	0.54	0.27
η_{av}	0.03	0.08	0.07	0.06	0.08	0.12	0.06	0.13
F_2	0.06	0.43	0.17	0.14	0.18	0.29	0.18	0.34
$F'\eta_0$	0.11	0.17	0.63	0.18	0.20	0.25	0.18	0.33
$F'U_l/C$ ($W/m^2\ ^\circ C$)	1.15	1.274	7.741	1.55	2.265	1.678	1.509	2.985
COR ($W/m^2\ ^\circ C$)	0.091	0.129	0.081	0.116	0.087	0.146	0.120	0.111
T_{fx} (°C)	112.51	145.89	69.18	132.83	74.00	124.57	131.75	94.46
R^2	0.91	0.90	0.81	0.93	0.89	0.90	0.96	0.93

Tabella 5.9 Riepilogo dei principali parametri misurati nelle prove ad olio del terzo set di misure

Per la presenza del vento, nella prova ad olio del 06/08/2021 il Kimono non è riuscito a raggiungere la temperatura di 120°C ma è arrivato a 105 °C,

5.4. Confronto tra i set di misure

In questo paragrafo viene fornito un confronto finale dei risultati ottenuti per i forni solari studiati con e senza carico nei tre set di misurazione.

Si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Tutte e tre le serie di test mostrano come le condizioni ambientali esterne abbiano influenzato positivamente o negativamente l'esecuzione dei test. La temperatura ambiente, in particolare, gioca

un ruolo fondamentale nelle prestazioni termiche dei quattro dispositivi. Nella terza serie di test, caratterizzati da un $T_{amb,av}$ più alta rispetto a quella degli altri, i valori medi di $T_{a,max}$ sono più alti in tutti i forni pannelli solari testati, ma soprattutto nel Fun-Panel. Nel dettaglio, la media $T_{a,max}$ per il Funnel è più alto di circa 13 °C nel terzo set rispetto agli altri.

- Nei tre set di misurazione, tutti i forni solari sono stati mediamente in grado di portare la tortiera nera a temperature superiori a 100°C. Tuttavia, in tutte le serie di test, il DSPC ha raggiunto temperature inferiori a quelle degli altri prototipi.

- In generale, il Kimono e il Funnel hanno raggiunto le temperature massime più alte nel ricevitore. Questo comportamento si è verificato in tutti e tre i test di misurazione, indicando il buon funzionamento di questi due forni a pannelli durante tutto l'anno per elevate altezze del sole.

- Dai valori medi della prima figura di merito (F_1), è possibile notare che sono simili in tutte e tre le serie di misure. In particolare, i parametri medi di F_1 per il Kimono e il Funnel sono sempre più alti rispetto agli altri due dispositivi, a dimostrazione del fatto che i primi due forni hanno prestazioni migliori.

6 Conclusioni

I risultati dell'analisi hanno mostrato che il Kimono e il Funnel sono i dispositivi con le migliori prestazioni, sia nella configurazione per medio-basse altezze solari che per quelle medio-alte. Il forno solare Cookit, invece, ha ottenuto risultati migliori per altezze medie. Per quanto riguarda il Dual-Setting, si è notato che, per le basse elevazioni solari, non è in grado di garantire l'ebollizione dell'acqua (a livello del mare), mentre questa condizione è stata raggiunta in alcuni test condotti a media elevazione solare. Una considerazione generale, che può essere tratta dal presente studio, è che l'utilizzo dei forni solari è una valida alternativa, semplice ed efficiente, per la cottura dei cibi. Possono essere fabbricati forni poco costosi e costruiti con materiali comuni, come il cartone. Per sfruttare al massimo le loro potenzialità, tuttavia, si dovrebbe avere un buon valore di irraggiamento solare globale normale (G_n), superiore a 800 W/m². Questa condizione non è tuttavia sufficiente per garantire un buon rendimento dei forni di tipo panel; infatti è importante avere condizioni atmosferiche favorevoli: assenza di nubi, elevata temperatura ambiente e vento debole.

A mio avviso è molto importante portare avanti questo studio perché può condurre a risultati molto interessanti, con la possibilità di implementare le prestazioni dei forni studiando l'assetto in base al periodo dell'anno in cui vengono svolte le prove e migliorando le caratteristiche del ricevitore. Inoltre l'analisi sperimentale può essere estesa utilizzando anche altri tipi di fluidi nelle prove con carico, come ad esempio la glicerina, la cui consistenza può essere equiparabile alle sostanze alimentari, per valutarne ancor meglio i risultati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Laboratorio di solare termico | Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (univpm.it) https://www.diism.univpm.it/laboratori/solare_termico
- [2] 180202_Forni_solari_MUMA.pdf
- [3] Kimono Solar Cooker | Solar Cooking | Fandom https://solarcooking.fandom.com/wiki/Kimono_Solar_Cooker
- [4] Cookit | Solar Cooking | Fandom <https://solarcooking.fandom.com/wiki/Cookit>
- [5] Fun-Panel | Cocina Solar | Fandom <https://solarcooking.fandom.com/wiki/Fun-Panel>
- [6] Dual-Setting Panel Cooker | Solar Cooking | Fandom https://solarcooking.fandom.com/wiki/Dual-Setting_Panel_Cooker
- [7] Metodi di misurazione della radiazione solare mediante pireliometro e piranometro - Elettronica 2023 (amen-technologies.com) <https://it.amen-technologies.com/solar-radiation-measurement-methods-using-pyrheliometer#menu-4>
- [8] Experimental characterization and performance comparison of four prototypes of panel solar cooker for low to high sun elevations Alessia Aquilanti , Sebastiano Tomassetti , Gianluca Coccia, Matteo Muccioli, Giovanni Di Nicola.
- [9] Aquilanti et al., 2022; Ruivo et al., 2021; Apaolaza-Pagoaga et al., 2022b,a; Ruivo et al., 2022°
- [10] Kalogirou, 2013
- [11] Sensori Termocoppia – Produttore di Termocoppie (tc-srl.it) <https://www.tc-srl.it/termocoppie-informazione/termocoppie-informazione.html#thermocouple-theory>
- [12] S. Mullick, T. Kandpal e S. Kumar. “Testing of box-type solar cooker: Second figure of merit F_2 and its variation with load and number of pots”. In: Solar Energy 57 (1996). A cura di Elsevier, pp. 409–413.
- [13] A. Khalifa, M. Taha e M. Akyurt. “Solar cookers for outdoors and in doors”. In: Energy 10 (1985). A cura di Elsevier, pp. 819–829.
- [14] P. Lahkar, R. Bhamu e S. Samdarshi. “Enabling inter-cooker thermal performance comparison based on cooker opto-thermal ratio (COR)”. In: Applied Energy 99 (2012). A cura di Elsevier, pp. 491–495.
- [15] ASAE, 2013; Funk, 2003.

[16] Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica di Giacomo Cioppettini (Realizzazione e analisi sperimentale di un forno di tipo Newton dotato di accumulo termico a base di materiali a cambiamento di fase, Cap. 4.5.3 e 6).

[17] Tesi di Laurea Magistrale di Luigi Terra (Costruzione e analisi sperimentale di quattro tipologie di forni solari, Cap.2.2)

RINGRAZIAMENTI

Colgo l'occasione per ringraziare il particolar modo il Professor Giovanni Di Nicola per avermi dato la possibilità di intraprendere questo studio e la sua collaboratrice Alessia Aquilanti per avermi supportato durante le prove.

Ringrazio anche Luigi Terra per aver abilmente costruito i forni a pannelli che sono stati utilizzati durante la campagna sperimentale e l'Ingegnere Matteo Muccioli per avermi dato ottimi consigli sulle configurazioni dei dispositivi e sugli accorgimenti da adottare per migliorare l'assorbimento del ricevitore, sia durante le prove a vuoto che in quello con carico.