



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

**PROGETTAZIONE E MISURE DI COLLETTORI SOLARI
PER L'ESSICCAZIONE DI ALIMENTI**

**DESIGN AND MEASUREMENT OF SOLAR
COLLECTORS FOR FOOD DRYING**

Relatore:

Prof. Giovanni Di Nicola

Tesi di Laurea di:

Ettore Donati

Correlatore:

Sebastiano Tomassetti

A.A. 2020/2021

Indice

INTRODUZIONE	4
1. STATO DELL'ARTE	5
1.1 Il contesto energetico	5
1.2 Dati di sintesi – Europa e Italia	7
1.4 L'essiccazione	9
1.4.1 Scopi	9
1.4.2 Metodi di essiccazione	9
1.4.3 Storia dell'essiccazione	10
1.4.4 Perché costruire un essiccatore solare?	11
1.5 Tipologie di essiccatori solari	12
1.5.1 Essiccatori solari attivi	13
1.5.2 Essiccatori solari passivi	15
1.5.3 Essiccatori solari ibridi	19
1.5.4 Osservazioni generali	19
2. REALIZZAZIONE DELL'ESSICCATORE SOLARE	21
2.1 Premessa	21
2.2 Newton solar oven 2.0	21
2.3 Newton solar dryer	24
2.3.1 Struttura portante e base	27
2.3.2 Regolatore flusso d'aria	28
2.3.3 Camera di essiccazione	29
2.3.4 Caratteristiche dei vetri	30
2.3.5 Lastre di acciaio	34
2.3.6 Sportelli laterali	36
2.3.7 Elementi riflettenti	37
2.3.8 Bracci di sostegno	40
2.3.9 Schema di funzionamento generale	44
2.3.10 Dati generali	46
3. SETUP DEL BANCO DI PROVA	49
3.1 Premessa	49
3.2 Pireliometro	50
3.3 Termocoppie	52

3.4 Computer e data logger	54
3.4.1 Software di acquisizione	55
3.5 Igrometro	56
3.6 Centralina meteo	56
4. PARAMETRI FONDAMENTALI	57
4.1 Temperatura e tempo di essiccazione	57
4.2 Velocità dell'aria	58
4.3 Umidità relativa ambiente e nella camera di essiccazione	58
4.4 Peso, dimensione e quantità dei prodotti da essiccare	59
4.5 Radiazione solare diretta	59
4.6 Tasso di essiccazione	59
4.7 Altri parametri	59
4.8 Variabili non controllabili	60
4.8.1 Vento.....	60
4.8.2 Temperatura ambiente	61
4.8.3 Radiazione solare	61
4.9 Variabili controllabili	61
5. TEST SPERIMENTALI	62
5.1 Prova del 30/11/2021	62
5.2 Prova del 17/12/2021	63
5.3 Prova del 19/12/2021	65
5.4 Prova del 18/01/2022	67
5.5 Risultati delle prove	69
6. CONCLUSIONI	71
7. BIBLIOGRAFIA	72
8. RINGRAZIAMENTI	73

INTRODUZIONE

L'aria calda necessaria per l'essiccazione industriale è solitamente fornita bruciando combustibili fossili, e in tutto il mondo è usata una grande quantità di combustibili per questo scopo. L'alto costo dei combustibili fossili, il graduale esaurimento delle loro riserve e i relativi impatti ambientali, hanno posto severe limitazioni al loro consumo. Molte zone dei paesi in via di sviluppo, soprattutto nelle aree rurali, soffrono per il mancato accesso alla rete elettrica e le forniture di altre fonti di energia non rinnovabili sono indisponibili, inaffidabili o, per molti agricoltori, troppo costose. In tali aree quindi, è difficile l'utilizzo di sistemi di essiccazione delle colture che utilizzino ventilatori elettrici, riscaldatori e altri accessori. Il consumo di energia per la cottura nei paesi in via di sviluppo è una componente principale del consumo totale di energia, per cui l'utilizzo di energia solare per applicazioni termiche, come la cottura, il riscaldamento e l'essiccazione, è già molto impiegato nelle regioni tropicali e semitropicali. L'essiccazione al sole ha prevalso per secoli come strumento di conservazione e stoccaggio degli alimenti e economicamente è rimasta la migliore alternativa. Tale processo però, presenta numerosi svantaggi, tra cui il lungo tempo necessario e la mancanza di controllo dei parametri di essiccazione; perciò, sono stati sviluppati diversi tipi di essiccatori che utilizzano come fonte primaria l'energia solare, migliorando l'efficienza rispetto all'essiccazione al sole tradizionale. In questo elaborato, dopo aver analizzato le ragioni che portano alla realizzazione di un essiccatore solare e aver illustrato i vari prototipi già esistenti, si focalizza l'attenzione sulla progettazione e realizzazione del Newton Solar Dryer. Questo è un essiccatore solare costruito a partire da una serie di modifiche effettuate su un forno solare già esistente: il Newton Solar Oven. Dopo aver descritto la costruzione, gli elementi che compongono l'essiccatore e il suo funzionamento, sono analizzate le sue prestazioni attraverso dei test sperimentali. I risultati delle prove preliminari consentono di fornire una prima valutazione del prototipo realizzato per poterne proporre un effettivo utilizzo.

1. STATO DELL'ARTE

1.1 Il contesto energetico

Ogni attività dell'uomo è strettamente legata al consumo di energia. Il crescente sviluppo industriale, tecnologico e un aumento della popolazione mondiale ha portato ad un aumento di domanda di energia, che nasce da una crescente domanda di servizio. Questa può essere soddisfatta da più vettori energetici, i quali a loro volta possono essere prodotti in modi differenti.

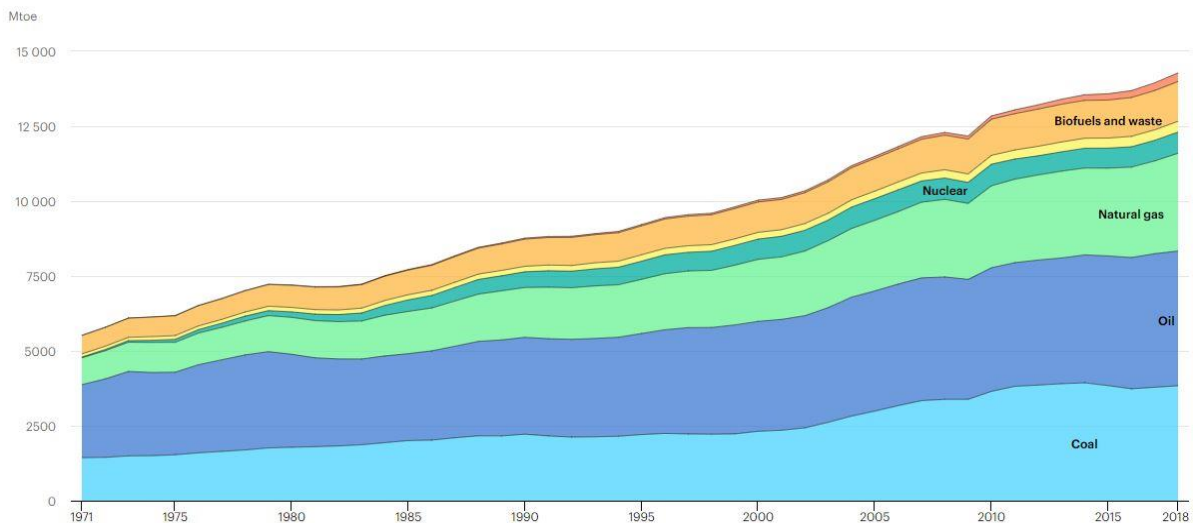


Fig. 1: Fornitura totale di energia in base alla fonte energetica [1]

Tutta la domanda di servizio (10 Gtoe) è soddisfatta dalle fonti mostrate in Figura 1; i combustibili fossili sono usati per fornire la maggior parte dell'energia necessaria, ma il loro eccessivo utilizzo ha un grave impatto sull'ambiente e sul cambiamento climatico a causa dell'emissione di CO₂ e gas serra.

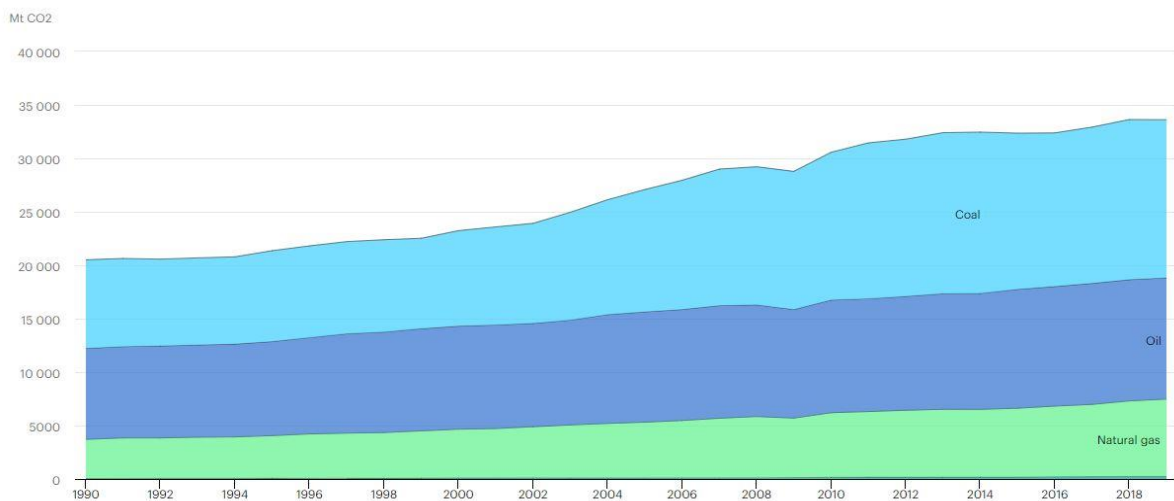


Fig. 2: Emissione totale di CO₂ suddivisa per fonte energetica [2]

Un trattato internazionale noto come Accordo di Parigi 2016 è stato indetto con l'obiettivo di definire un piano d'azione globale i cui elementi chiave sono:

- Mantenere l'aumento medio della temperatura mondiale ben al di sotto di 2°C rispetto ai livelli preindustriali come obiettivo a lungo termine
- Puntare a limitare l'aumento a 1,5°C così da ridurre in misura significativa i rischi e gli impatti dei cambiamenti climatici
- Fare in modo che le emissioni globali raggiungano il livello massimo il più presto possibile (pur riconoscendo che per i Paesi in via di sviluppo occorrerà più tempo) e procedere successivamente a rapide riduzioni, in conformità con le soluzioni scientifiche più avanzate disponibili

L'Unione Europea è stata la prima tra le maggiori economie ad aderire all'accordo di Parigi e ha adottato misure per attuare il suo obiettivo di ridurre le emissioni del 40% al 2030 attraverso il pacchetto “Clean energy for all Europeans “.

In seguito l'UE ha sposato l'obiettivo di rendere l'Europa un continente neutrale dal punto di vista climatico entro il 2050 sostenendo che gli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas a effetto serra per il 2030 devono essere aumentati dal 40% al 50% o al 55%. [3]

Per raggiungere questi obiettivi si punta ad una maggiore efficienza energetica attraverso innovazione e ricerca, ad uno sviluppo del mercato interno dell'energia e soprattutto all'aumento dell'utilizzo delle fonti rinnovabili.

1.2 Dati di sintesi – Europa e Italia

In Europa la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile è aumentata significativamente dal 2005 al 2019 (dal 19,14% al 37,12%), mentre In Italia si è passati da una produzione nel 2005 del 18,67% ad una nel 2019 del 40,85%.

	Europa			Italia	
	2005	2019		2005	2019
Carbone	28,98	17,71	Carbone	28,98	17,71
Petrolio	3,92	1,36	Petrolio	3,92	1,36
Gas naturale	20,34	21,07	Gas naturale	20,34	21,07
Nucleare	27,57	22,7	Nucleare	27,57	22,7
Biomasse	2,16	5,64	Biomasse	2,16	5,64
Idroelettrico	15,01	15,99	Idroelettrico	15,01	15,99
Geotermico	0,17	0,52	Geotermico	0,17	0,52
Solare	0,03	3,68	Solare	0,03	3,68
Eolico	1,77	11,29	Eolico	1,77	11,29

Tab. 1: Produzione dell'energia elettrica in funzione della fonte energetica in Europa e in Italia nel 2005 e nel 2019

In Italia è stato attuato il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) attraverso il quale si vogliono raggiungere il 56% in meno di emissioni nella grande industria, il 35% in meno nel terziario e trasporti e l'obiettivo del 30% di fonti rinnovabili sui consumi totali (attualmente siamo al 20,4%). [4]

1.3 Il ruolo dell'energia solare

Tra le fonti energetiche, l'energia solare ha guadagnato molti interessi nella ricerca e nello sviluppo a causa della sua abbondanza di fornitura, che crea un enorme potenziale per la sua applicazione sia in ambito industriale che domestico. L'energia solare deriva dal sole perciò si è dimostrata pulita e sicura per l'uso senza impatto negativo per l'ambiente e la società. Il totale della radiazione solare annuale ricevuta dalla Terra è più di 7500 volte il consumo totale annuo di energia primaria del mondo. Storicamente, l'uomo ha utilizzato l'energia solare per l'uso quotidiano come l'accensione del fuoco, la cottura, l'asciugatura di cibo e vestiti e il riscaldamento dell'acqua. Da allora, ci sono molti studi e sviluppi sull'energia solare per

adattarne l'applicazione nel mondo moderno. Come risultato oggi si hanno principalmente tre tipologie di impianti energetici che sfruttano l'energia solare:

Fotovoltaico: attraverso l'unione di più celle fotovoltaiche si formano i pannelli fotovoltaici che catturano l'energia solare producendo energia elettrica in corrente continua, poi convertita in corrente alternata mediante un inverter. Grazie a incentivi europei e nazionali e alla loro facilità di utilizzo l'utilizzo di questi impianti è sempre maggiore anche in ambito domestico.

Solare termico: i pannelli solari termici catturano e sfruttano l'energia solare per trasformarla in energia termica. Si utilizzano sia in ambito domestico per la produzione di acqua calda sanitaria che nei processi industriali in cui è richiesto calore (settore alimentare per le attività di essiccazione e cottura degli alimenti, sterilizzazione e lavaggio di bottiglie e contenitori, distillazione e fermentazione, pastorizzazione del latte, ecc.).

Impianti a concentrazione di energia solare (CSP): sfruttano la possibilità di concentrare la luce del sole focalizzandola attraverso lenti o specchi concavi. In genere l'energia del sole viene trasformata in energia termica e poi convertita in energia elettrica.

Il processo segue le seguenti fasi:

- Centinaia di specchi parabolici seguono l'inclinazione dei raggi del Sole facendoli convergere su una caldaia in cui si accumula calore ad alta temperatura
- L'energia termica così concentrata riscalda il fluido contenuto nella caldaia e produce il vapore ad alta pressione che aziona la turbina
- Successivamente, proprio come avviene in una centrale termoelettrica tradizionale, la turbina trasmette la sua energia meccanica all'alternatore
- L'alternatore trasforma l'energia meccanica in energia elettrica. [5]

1.4 L'essiccazione

1.4.1 Scopi

L'essiccazione è una delle tecniche utilizzate per conservare i prodotti agricoli, ittici e prodotti erboristici. Ha diversi vantaggi tra cui il mantenimento del sapore, delle sostanze nutritive e della qualità del prodotto; consente di migliorare l'aspetto, estendere la durata di conservazione, ridurre la capacità di imballaggio e spedizione. L'essiccazione dei cibi permette una più durevole conservazione di questi, perché sottrae all'alimento la maggior parte dell'acqua contenuta in esso. La presenza d'acqua, infatti, in concomitanza con altri fattori come temperatura e pH, così come la presenza di ossigeno, favorisce la proliferazione di batteri che comporta la putrefazione dell'alimento. Con l'essiccazione, quindi, si inibisce lo sviluppo dei microrganismi che proliferando nella parte umida del prodotto possono alterarne le caratteristiche organolettiche. Principalmente è, quindi, il grado di umidità del prodotto a determinarne o meno la possibilità di conservazione. Riducendo il quantitativo di acqua presente all'interno dell'alimento si ha una riduzione anche di peso e volume. Questo favorisce un sostanziale risparmio relativo ai costi di trasporto e stoccaggio, e in alcuni casi, una riduzione delle spese per il confezionamento [6].

1.4.2 Metodi di essiccazione

L'essiccazione è un processo economicamente molto più oneroso rispetto ad altre tecniche per la conservazione degli alimenti, poiché necessita di grandi quantitativi di energia; per questo motivo risulta importante lavorare in condizioni ottimali col fine di limitarne i consumi energetici. L'essiccazione è spesso descritta come un simultaneo fenomeno di trasporto di massa e di calore e affinché essa avvenga si devono verificare:

- Trasferimento del calore dalla fonte al prodotto
- Trasferimento dell'acqua dal prodotto verso l'esterno

Infatti per fare in modo che avvenga l'evaporazione dell'acqua deve essere trasferito al cibo il calore sensibile e latente necessario affinché avvenga la transizione di fase dell'acqua con successivo abbandono di questa per trasferimento di massa. Il metodo più utilizzato perché questo avvenga è sistemare il cibo in una corrente d'aria calda la cui percentuale di acqua sia di molto minore rispetto a quella nell'alimento da essiccare. Il calore è trasferito per convezione dall'aria alla superficie del cibo e per conduzione all'interno di questo. In alternativa, il cibo può essere messo in contatto con una superficie riscaldata; in questo caso il calore viene

trasferito sia all'esterno che all'interno di questo per conduzione. Ovviamente ogni tipo di cibo dovrà essere essiccato con una tecnica che gli permetta di mantenere maggiormente integre le sue proprietà organolettiche originali.

1.4.3 Storia dell'essiccazione

Sin dall'antichità l'essiccazione ha rappresentato il metodo più utilizzato per la conservazione degli alimenti, come le verdure, la frutta, il pesce e i prodotti a base di carne col fine di accumulare scorte di cibo per tutto il periodo dell'anno. Questa tecnica di conservazione è stata scoperta sicuramente per caso, osservando il comportamento di frutti rimasti attaccati alla pianta che appassivano pur conservando molte delle loro caratteristiche, compresa la commestibilità. L'essiccazione mediante esposizione al sole è una delle più antiche applicazioni dell'energia solare. Fin dalla preistoria l'umanità ha usato la radiazione solare come unica fonte di energia termica disponibile per asciugare e conservare tutti gli alimenti, per asciugare i mattoni di terra per le loro case e per asciugare le pelli degli animali per la vestizione. Il primo impianto di essiccazione conosciuto si trova nel sud della Francia ed è datato intorno al 8000 a.C. Questo è costituito da una superficie pavimentata in pietra utilizzata per l'essiccazione dei raccolti. La brezza o la velocità moderata del vento naturale erano combinate con la radiazione solare per accelerare l'essiccazione. Varie altre installazioni sono state trovate in tutto il mondo, datate tra il 7000 e 3000 a.C. alcune di queste utilizzano la radiazione solare combinata con la circolazione naturale dell'aria. In Mesopotamia sono stati trovati vari siti per l'essiccazione solare ad aria di materiale tessile colorato e di piatti di argilla scritta. Il primo impianto di essiccazione esclusivamente ad aria per colture è stato trovato nella valle del fiume Hindu ed è datato a circa 2600 a.C. Il noto filosofo e medico greco Aristotele (384-322 a.C.) descrisse in dettaglio i fenomeni di essiccazione e ne diede per la prima volta spiegazioni teoriche. Più tardi, la biomassa e il legno sono stati utilizzati per alimentare forni primitivi per asciugare materiale da costruzione, ma il cibo era esposto solo alla radiazione solare diretta [7]. La disidratazione a livello industriale attraverso forni si è sviluppata a partire dall'inizio del '900, sfruttando i principi basilari usati nell'antichità, ma nonostante i metodi moderni sviluppati, l'essiccazione tramite esposizione al sole continua ad essere il metodo principale per l'essiccazione di piccole quantità di prodotti agricoli in tutto il mondo.

1.4.4 Perché costruire un essiccatore solare?

L'essiccazione solare tradizionale (open sun drying) presenta molteplici svantaggi. Si hanno problematiche dal punto di vista igienico (inquinamento da insetti, polveri ed uccelli) e legate al fatto che i prodotti sono esposti direttamente ai raggi del sole. Infatti, i raggi ultravioletti degradano le caratteristiche organolettiche dei prodotti alimentari, agendo sulla parte esposta al sole. Per ovviare a questi problemi sono state realizzate macchine che utilizzano l'energia solare per il loro funzionamento, schermandone gli effetti indesiderati e creando un ambiente di trattamento igienicamente idoneo. L'utilizzo del sole come fonte prevalente di energia impone procedure e attenzioni particolari per portare a termine con successo questo processo e ottenere prodotti sicuri, di alto valore nutrizionale ed idonei alla conservazione per lunghi periodi.

Al fine di ridurre il costo operativo e affrontare le preoccupazioni ambientali legate all'uso di combustibile convenzionale, si utilizza un innovativo sistema che sfrutta l'energia solare, noto anche come "essiccatore solare".

Un ruolo importante nella domanda nel settore residenziale è certamente giocato dall'energia necessaria per cucinare. Ciò è particolarmente importante nei Paesi a basso reddito come alcune regioni dell'Asia e dell'Africa. Infatti, il 36% dell'energia totale in India è utilizzata per questo scopo, mentre nelle zone rurali dell'Africa subsahariana è 90-100%. Questa percentuale è certamente inferiore nei Paesi sviluppati; ad esempio, negli Stati Uniti il consumo di energia per la preparazione del cibo è del 37-53% [8]. Bisogna aggiungere che tipicamente nei paesi non sviluppati c'è una scarsità disponibilità di fonti di combustibili fossili e quindi l'approvvigionamento energetico per esigenze di cottura è coperto da legna da ardere, rifiuti agricoli e sterco di mucca. Una soluzione immediata e rispettosa dell'ambiente è quella di utilizzare l'energia solare, che è già implementata in diverse applicazioni. Una di queste è rappresentata dagli essiccatori solari, sistemi che consentono di conservare i cibi senza l'utilizzo di fonti fossili. Sono un'interessante e valida soluzione soprattutto nei paesi in via di sviluppo, dove c'è abbondanza di radiazione solare per la maggior parte dell'anno.

Nell'essiccazione solare, l'energia solare viene usata come unica fonte di riscaldamento o come fonte supplementare. La procedura di riscaldamento potrebbe coinvolgere il passaggio dell'aria preriscaldata attraverso il prodotto o esponendo direttamente il prodotto alla radiazione solare, o una combinazione di entrambi. Il trasferimento di calore al prodotto umido avviene per convezione dalla massa d'aria circostante a temperature superiori di quelle del prodotto, in misura minore per radiazione dalle superfici calde circostanti, infine per conduzione da

superfici riscaldate in contatto con il prodotto. Numerosi essiccatori solari sono stati sviluppati e studiati in tutto il mondo.

1.5 Tipologie di essiccatori solari

Lo scopo di un essiccatore solare è quello di fornire al prodotto più calore di quello disponibile naturalmente in condizioni ambientali, aumentando sufficientemente la pressione del vapore uscente dal prodotto. Di conseguenza, la migrazione dell'umidità dal raccolto viene migliorata. L'essiccatore diminuisce significativamente anche l'umidità relativa dell'aria di essiccazione e, così facendo, aumenta la sua capacità di trasportare l'umidità.

Gli essiccatori a energia solare sono classificati in base al movimento dell'aria all'interno dell'essiccatore, a come viene utilizzato il calore solare e alla loro disposizione strutturale. Secondo il movimento dell'aria possono essere attivi o passivi. L'essiccatore solare passivo è fatto di una costruzione semplice per cui l'aria si muove naturalmente all'interno dell'essiccatore per effetto di galleggiamento. Nell'essiccatore solare attivo invece, si usa un ventilatore o una soffiante per facilitare il flusso di aria all'interno della camera di essiccazione, migliorando il trasferimento di calore al prodotto. Il ventilatore inoltre mantiene costante la portata d'aria richiesta nell'essiccatore, ma il suo utilizzo richiede, oltre all'energia solare, altre fonti di energia non rinnovabili, quindi un costo operativo maggiore. Per quanto riguarda il modo di utilizzo dell'energia solare e le disposizioni strutturali, le tre principali sottoclassi sono gli essiccatori di tipo integrale o diretto, distribuito o indiretto e misto. Queste sottoclassi appartengono sia agli essiccatori attivi e passivi. In quelli di tipo distribuito il collettore di energia solare e la camera di essiccazione sono unità separate. La radiazione solare è incidente sul collettore solare che riscalda l'aria al suo interno; questa viaggia poi verso la camera di essiccazione per rimuovere l'umidità dai prodotti. La camera di essiccazione è fatta di materiale opaco o solido per impedire l'esposizione diretta dei prodotti alla luce del sole.

Negli essiccatori di tipo integrale, la stessa camera è usata sia per la raccolta dell'energia solare che per l'essiccazione, cioè viene raccolta direttamente l'energia solare nella camera di essiccazione, in cui il prodotto è esposto direttamente alla radiazione solare e non è necessario un collettore solare. Negli essiccatori a modalità mista si hanno un collettore solare e un'unità di essiccazione. La radiazione solare viene ricevuta sia dal collettore che dall'unità di essiccazione, attraverso il vetro trasparente sulla sua parte superiore. L'aria passa attraverso il

collettore e si muove verso l'unità di essiccazione per poi fuoriuscire. Il prodotto riceve calore dall'aria riscaldata proveniente dal collettore solare e dal calore diretto della radiazione solare.

1.5.1 Essiccatori solari attivi

Gli essiccatori a energia solare attiva sono solitamente adatti per grandi quantità di materiale e spesso sono unità ibride che usano fonti ausiliarie di energia come combustibili convenzionali per funzionare durante il tempo nuvoloso e/o di notte. Questi sono più complicati e più costosi dei sistemi passivi perché richiedono ventilatori.

1.5.1.1 Tipo distribuito

Un tipico essiccatore solare attivo di tipo distribuito è mostrato in Figura 3.

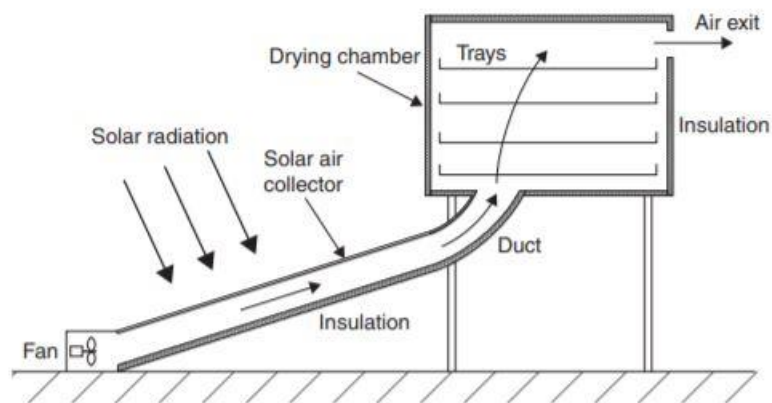


Fig. 3: Diagramma schematico di un essiccatore solare attivo di tipo distribuito [9]

Comprende quattro componenti: una camera di essiccazione, un riscaldatore d'aria, un ventilatore e un condotto per trasferire l'aria calda dal collettore all'essiccatore. In questo progetto, i prodotti si trovano su vassoi o scaffali all'interno di una camera di essiccazione opaca, che non permette alla radiazione solare di raggiungere direttamente il prodotto. L'aria viene riscaldata durante il suo passaggio attraverso un collettore solare e grazie all'azione di un ventilatore, è canalizzata verso la camera di essiccazione.

1.5.1.2 Tipo integrale

Gli essiccatori su larga scala, commerciali, a convezione forzata, di tipo a serra, sono come dei granai solari dal tetto trasparente e sono usati per l'essiccazione del legno (vedi Figura 4).

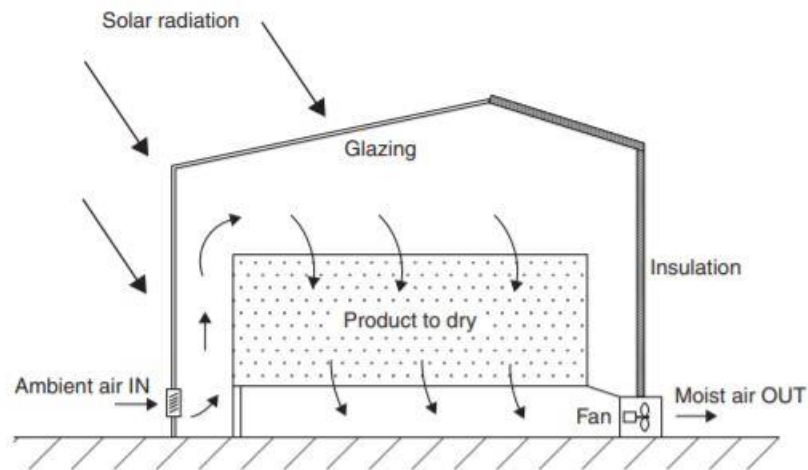


Fig. 4: Schema di un fienile solare con tetto trasparente e convezione forzata [9]

Una variazione di questi è l'essiccatore attivo a serra costruito all'interno di un guscio esterno semicilindrico. La struttura semicilindrica agisce come un riscaldatore solare. Consiste in una copertura esterna trasparente, che funge da vetrata del collettore, e un foglio assorbente interno semicilindrico nero. Un ventilatore fa circolare l'aria calda attraverso il condotto formato dai due fogli semicircolari verso il materiale e l'aria umida viene infine espulsa dalla parte superiore della copertura trasparente. Un'altra variante di questo tipo di essiccatore è il collettore solare tetto/parete mostrato nella Figura 5 sottostante, in cui il collettore di calore solare è parte integrante del tetto e/o della parete della camera di essiccazione.

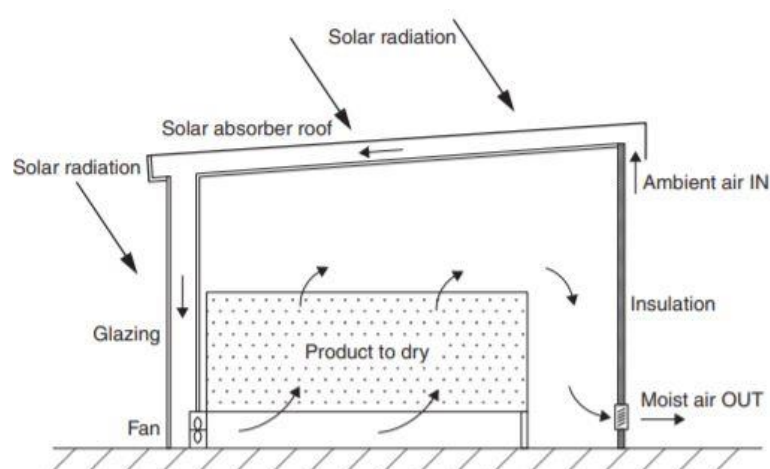


Fig. 5: Diagramma schematico di un essiccatore solare attivo con tetto collettore di energia solare [9]

1.5.1.3 Tipo a modalità mista

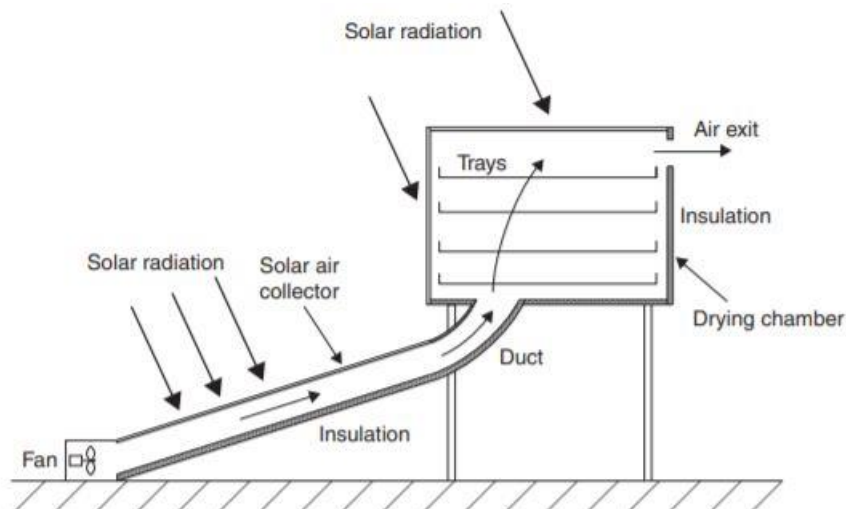


Fig. 6: Diagramma schematico di un essiccatore solare attivo di misto [9]

L'essiccatore a modalità mista è simile al tipo distribuito, con la differenza che le pareti e il tetto sono fatti di vetro, per permettere all'energia solare di riscaldare direttamente i prodotti. Va notato che, poiché l'efficienza di essiccazione aumenta con la temperatura, negli essiccatori convenzionali si utilizza la massima temperatura che non deteriora la qualità del prodotto. Negli essiccatori solari, tuttavia, la temperatura massima di essiccazione è determinata dai collettori solari. La maggior parte dei riscaldatori d'aria usa assorbitori in metallo o legno, anche se sono stati usati assorbitori in polietilene nero in alcuni progetti nel tentativo di minimizzare i costi.

1.5.2 Essiccatori solari passivi

L'essiccazione passiva sono costituiti da un'unità a "scatola calda" in cui il prodotto è esposto alla radiazione solare attraverso un coperchio trasparente. Il riscaldamento avviene per convezione naturale, attraverso il coperchio trasparente dell'essiccatore o in un riscaldatore d'aria solare.

Gli essiccatori solari di tipo passivo sono costruzioni primitive poco costose, facili da installare e far funzionare, specialmente in siti dove non esiste una rete elettrica, infatti funzionano utilizzando fonti di energia interamente rinnovabili, come il solare e il vento.

1.5.2.1 Tipo distribuito

Gli essiccatori solari a circolazione naturale distribuita sono anche chiamati essiccatori indiretti passivi. Un tipico essiccatore a energia solare a circolazione naturale comprende un collettore di energia solare per il riscaldamento dell'aria, un'appropriata canalizzazione isolata, una camera di essiccazione e un camino, come mostrato in Figura 7.

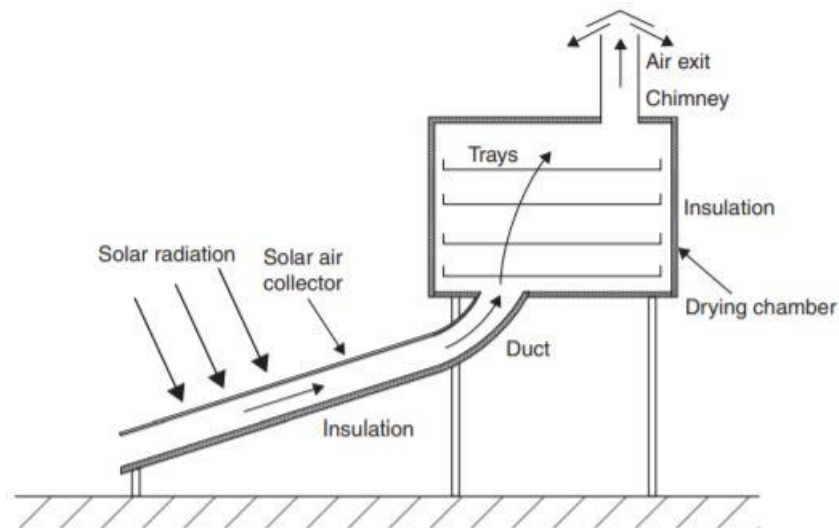


Fig. 7: Diagramma schematico di un essiccatore solare passivo di tipo distribuito [9]

In questo progetto, il raccolto si trova su vassoi o scaffali all'interno di una camera di essiccazione opaca, che non permette alla radiazione solare di raggiungere direttamente il prodotto. L'aria, che viene riscaldata durante il suo passaggio attraverso un collettore solare, viene convogliata nella camera di essiccazione per asciugare il prodotto. Poiché le colture non ricevono la luce solare diretta, la caramellizzazione (formazione di cristalli di zucchero sulla superficie del raccolto) e i danni da calore non si verificano. Pertanto, gli essiccatori indiretti sono di solito utilizzati per alcuni prodotti deperibili e frutta, per i quali il contenuto vitaminico viene ridotto dall'esposizione diretta alla luce del sole. Questa può causare anche una ritenzione del colore in alcuni prodotti altamente pigmentati.

Negli essiccatori a circolazione naturale distribuita si ottengono generalmente temperature d'esercizio più alte che negli essiccatori diretti. Essi possono generalmente fornire prodotti di qualità superiore. I loro svantaggi sono che la fluttuazione della temperatura dell'aria in uscita dal collettore solare rende le condizioni operative costanti all'interno della camera di essiccazione difficili da mantenere; sono strutture relativamente elaborate, che richiedono un

maggior investimento di capitale in attrezzature e hanno costi d'esercizio più alti per la manutenzione rispetto ai tipi integrali.

1.5.2.2 Tipo integrale

Gli essiccatori solari a circolazione naturale di tipo integrale sono chiamati anche essiccatori solari passivi diretti. In questo sistema, il raccolto è posto in una camera di essiccazione costituita da pareti trasparenti; il calore necessario è quindi ottenuto dall'assorbimento diretto della radiazione solare sul prodotto, dalle superfici interne della camera, e per convezione dalla massa d'aria riscaldata all'interno della camera. Il calore rimuove l'umidità dal prodotto e, allo stesso tempo, abbassa l'umidità relativa della massa d'aria residente, aumentando la sua capacità di trasportare l'umidità. L'aria nella camera subisce anche un'espansione perché la densità dell'aria calda è inferiore a quella dell'aria fredda, generando così una circolazione naturale, che aiuta la rimozione dell'umidità, insieme all'aria calda. Poiché il calore viene trasferito al raccolto sia per convezione che per radiazione, il tasso di essiccazione degli essiccatori diretti è maggiore di quello degli essiccatori indiretti.

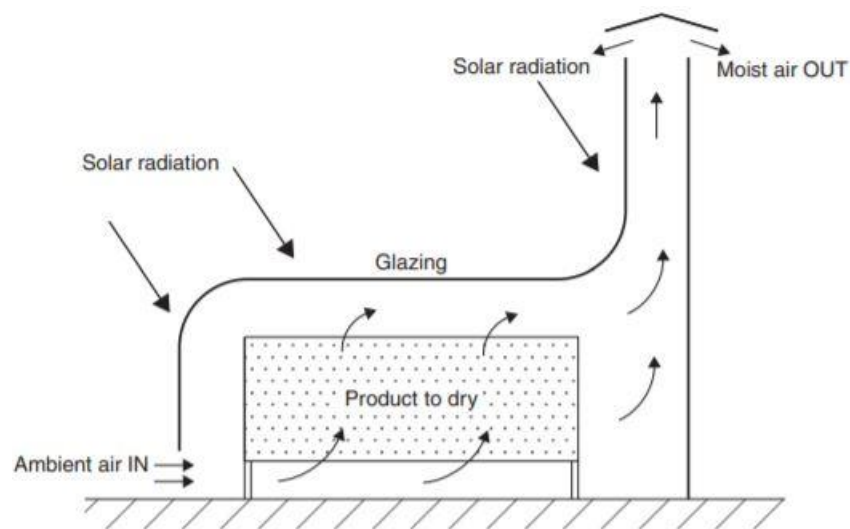


Fig. 8: Diagramma schematico di un essiccatore solare passivo di tipo integrale [9]

Gli essiccatori solari a circolazione naturale di tipo integrale possono avere una costruzione molto semplice, che consiste in un contenitore isolato ai suoi lati e coperto da un singolo vetro o tetto. Le pareti interne sono annerite, quindi la radiazione solare trasmessa attraverso la copertura è assorbita dalle superfici interne, aumentando la temperatura interna del contenitore. Nella parte anteriore, aperture speciali forniscono la ventilazione, con l'aria calda che esce

attraverso l'apertura superiore sotto l'azione delle forze di galleggiamento. Il prodotto da essiccare è posto su vassoi perforati all'interno del contenitore. Questo tipo di essiccatore ha il vantaggio di una facile costruzione con materiali economici disponibili localmente ed è usato comunemente per conservare frutta, verdura, pesce e carne. Lo svantaggio è la scarsa circolazione dell'aria ottenuta, che si traduce in una scarsa rimozione dell'aria umida, e il fatto di avere un'essiccazione ad alte temperature dell'aria (70-100 °C), che è molto alta per la maggior parte dei prodotti.

Una variazione dell'essiccatore mostrato nella Figura 9 è l'essiccatore a cabina. Il materiale da essiccare viene appoggiato su piastre perforate, attraverso le quali l'aria circola per convezione naturale e infine lascia la camera di essiccazione dal lato superiore. Le pareti inferiori e laterali sono opache e ben isolate. Questi essiccatori sono semplici e poco costosi e adatti per l'essiccazione di prodotti agricoli. Sono normalmente costruiti con un'area di essiccazione di 1-2 m² e capacità di 10-20 kg.

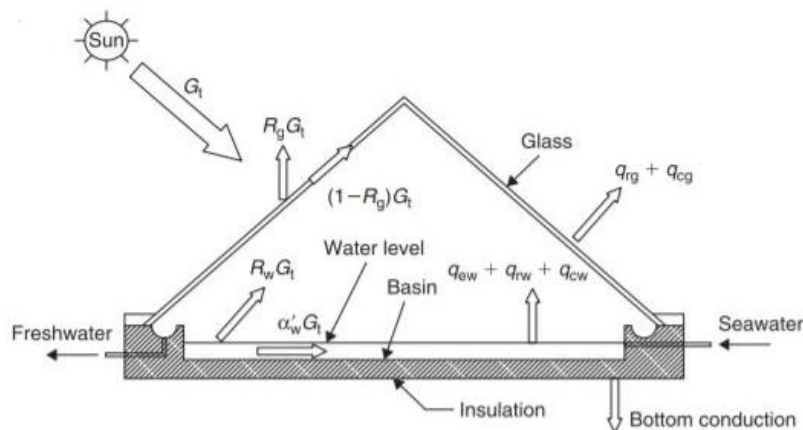


Fig. 9: Diagramma schematico di un tipo di essiccatore solare passivo integrale [9]

1.5.2.3 Tipo a modalità mista

Gli essiccatori a energia solare a circolazione naturale di tipo misto combinano le caratteristiche del tipo integrale e degli essiccatori solari a circolazione naturale di tipo distribuito. In questo caso, l'azione combinata di radiazione solare incidente direttamente sul prodotto da essiccare e dell'aria riscaldata in un collettore d'aria solare fornisce il calore necessario per il processo di essiccazione. Hanno le stesse caratteristiche strutturali del tipo distribuito, cioè un riscaldatore d'aria solare, una camera di essiccazione separata e un camino. Le pareti della camera di essiccazione sono vetrate in modo che la radiazione solare possa raggiungere direttamente il prodotto come negli essiccatori di tipo integrale.

1.5.3 Essiccatori solari ibridi

Negli ultimi anni sono stati sviluppati anche essiccatori ibridi a energia solare che combinano l'energia della radiazione solare con una fonte ausiliaria di energia convenzionale o con l'immagazzinamento dell'energia per assistere il processo. Nella maggior parte dei casi questi sistemi sono installazioni di media e grande capacità e funzionano con una frazione solare dell'ordine del 50-60%.

1.5.4 Osservazioni generali

Un accumulo di energia è essenziale per i luoghi con un'alta o bassa intensità di radiazione e nei casi in cui i prodotti del raccolto devono essere essiccati in funzionamento continuo, immediatamente dopo il raccolto. I dispositivi di stoccaggio aumentano il costo del capitale iniziale così come i costi di funzionamento, quindi per evitare spese inutili lo stoccaggio deve essere applicato nei seguenti casi [7]:

- Quando l'intensità solare è alta in modo da immagazzinare energia per evitare l'essiccazione eccessiva del prodotto a temperature troppo alte.
- Quando l'operazione di essiccazione deve essere continuata durante la notte.

Un accumulo termico potrebbe essere fornito da un riscaldatore d'aria solare che può essere caricato durante le ore di picco del sole e utilizzato (scaricato) in seguito per fornire l'aria calda all'essiccatore. Una valida alternativa è l'utilizzo di "materiali a cambiamento di fase", che permettono di immagazzinare energia termica durante le ore di sole e rilasciarla nelle ore notturne.

Il processo di essiccazione dipende da diversi parametri, per cui è molto complicato. Infatti anche lo stesso prodotto può avere diverse condizioni fisiche, un diverso sito di coltivazione e un certo contenuto di umidità iniziale. Due parametri molto importanti sono la temperatura di essiccazione e la procedura di pre-trattamento. La temperatura di essiccazione più bassa parte da circa 30 °C, ma a queste basse temperature il tasso di essiccazione è molto lento e c'è il rischio di deterioramento o muffa. In generale, la maggior parte degli alimenti può essere essiccata a una temperatura media di 60 °C. I prodotti hanno bisogno di temperature di essiccazione più basse all'inizio, e dopo essere stati semi-essiccati, la temperatura può essere aumentata fino ad un certo valore. Questa tecnica aiuta a mantenere la pelle del raccolto morbida. Nell'essiccazione all'aria aperta, la temperatura dipende dall'intensità della radiazione

solare, quindi non è facilmente controllabile e varia da 40 a 70 °C. Negli essiccatori a energia solare attiva, in caso di intensità di radiazione elevata la temperatura può essere regolata mescolando l'aria calda con la quantità necessaria di aria fresca dall'atmosfera.

Il pretrattamento aiuta a rallentare l'attività dei microrganismi e generalmente ogni raccolto ha le sue condizioni ottimali di pretrattamento. Le fasi principali per i prodotti agricoli sono:

1. Selezione dopo il raccolto: i prodotti devono essere maturi, sodi e senza graffi;
2. lavaggio accurato per ridurre al minimo la presenza di microrganismi;
3. sgusciatura, pelatura e/o affettatura, in base al tipo di prodotto;
4. sbollentatura per distruggere gli enzimi e aiutare a mantenere il colore. Questa consiste nell'immergere le colture in acqua bollente o nel trattarle a vapore;
5. trattamento con zolfo, che aiuta a prevenire le perdite di colore, sapore e nutrienti e agisce come disinfettante. La solforazione è un vecchio metodo di trattamento delle colture mediante soluzione di solfito di sodio o soluzioni di bisolfito di sodio o metabisolfito;
6. trattamento con soluzione di acido ascorbico per prevenire l'imbrunimento della frutta o delle fette di frutta.

2. REALIZZAZIONE DELL'ESSICCATORE SOLARE

2.1 Premessa

Il lavoro svolto in questa tesi parte dallo studio del “Newton Solar Oven 2.0” con configurazione a 4 specchi, realizzata in precedenza. Il forno solare si basa su un progetto dell’Ing. Muccioli [10], il quale ha studiato nei minimi dettagli il prototipo per garantire un buon livello di prestazione e una facile immediatezza di realizzazione e di utilizzo. Partendo dal forno sono state apportate una serie di modifiche e interventi con lo scopo di ottenere un essiccatore solare, realizzando così il “Newton Solar Dryer”. Per effettuare i test sperimentali sono stati realizzati due prototipi uguali tra loro.

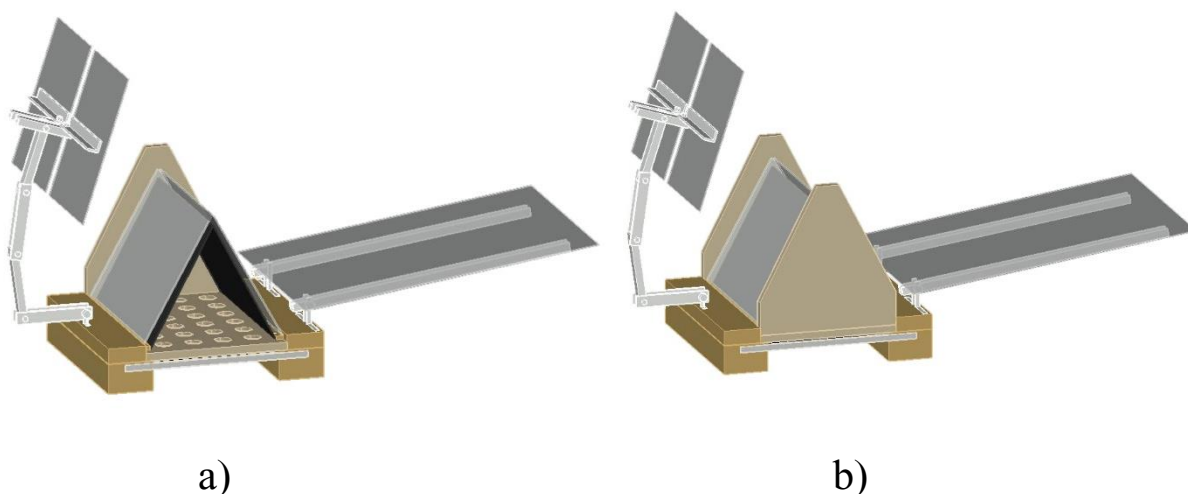


Fig. 10: Modello tridimensionale del prototipo realizzato, configurazione aperta (a), configurazione chiusa (b)

2.2 Newton solar oven 2.0

Il forno è composto principalmente da una camera di cottura autoportante e degli specchi che riflettono i raggi solari all’interno della camera. La camera di cottura è delimitata da due sportelli laterali in legno, rivestiti con un film di alluminio e da due lastre di vetro extrachiaro che compongono un prisma a base triangolare. Il nome del forno deriva proprio da questa forma, che ricorda il prisma di Newton, con il quale lo scienziato inglese studiò la rifrazione della luce e il relativo spettro luminoso del visibile.

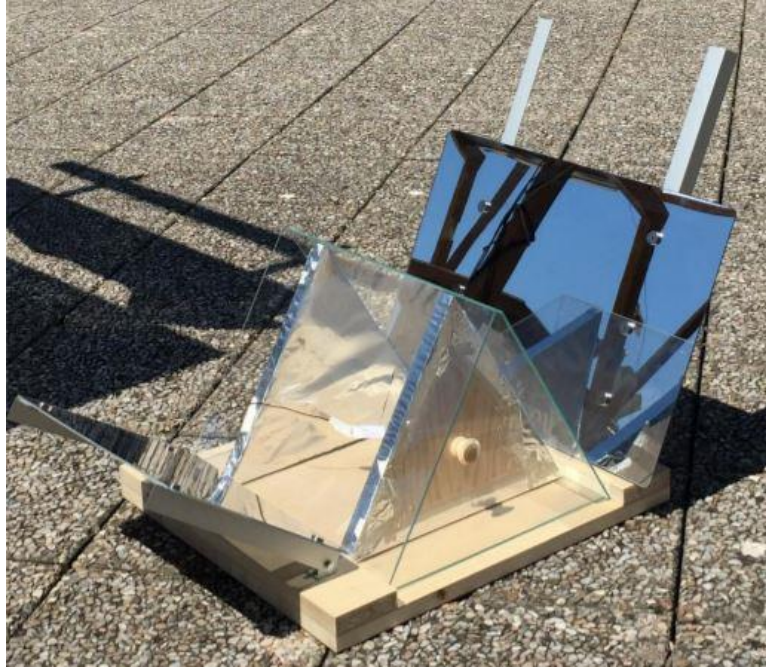


Fig. 11: Vista generale del Newton Solar Oven 2.0

La base del forno solare è in legno ed ha lo scopo di fornire l'appoggio alla camera di cottura. Il Newton Solar Oven è infatti un forno solare autoportante: i pezzi non sono fissati alla base ma sono appoggiati; questo è un importante fattore che lo rende poco ingombrante e quindi facile da trasportare quando non è assemblato. I vetri che delimitano la camera di cottura si reggono grazie alla presenza di un gradino sulla base, impedendo loro di scivolare. Sono stati scelti dei vetri extrachiarissimi, in quanto hanno un coefficiente di trasmissione maggiore rispetto ai vetri comuni (float), quindi delle prestazioni migliori. La camera di cottura costituisce il volume all'interno del quale vengono riflessi i raggi solari al fine di accumulare calore. Oltre che dalla base e dai vetri, questa è delimitata dagli sportelli laterali che hanno forma di triangolo isoscele e forniscono l'appoggio verticale ai vetri laterali. Sono in legno rivestito con un film di alluminio, che ha lo scopo di riflettere all'interno della camera di cottura eventuali raggi solari diretti verso gli sportelli laterali e diminuire la dispersione di radiazione. Il film di alluminio evita anche che il vapore penetri e si condensi all'interno degli sportelli di legno, precludendone le capacità di isolamento. Agli sportelli sono state applicate delle maniglie per facilitare la loro rimozione, in questo modo mentre il forno è in funzione è possibile rimuovere uno sportello per controllare la cottura degli alimenti senza aprire del tutto la camera di cottura, mantenendo buona parte del calore all'interno del volume delimitato dai vetri. Gli sportelli mobili danno anche la possibilità di variare il volume della camera di cottura a piacimento, così da poter

adattare le dimensioni del forno alla pentola che si sta utilizzando. I raggi solari devono essere convogliati all'interno della camera di cottura, attraversando i due vetri. La versione base presentava due elementi riflettenti, ma successivamente sono stati aggiunti altri specchi per aumentare l'efficienza, arrivando alla configurazione a 4 specchi: due primari e due secondari. I primi sono posizionati di fronte al sole, gli altri due invece hanno il sole alle loro spalle.

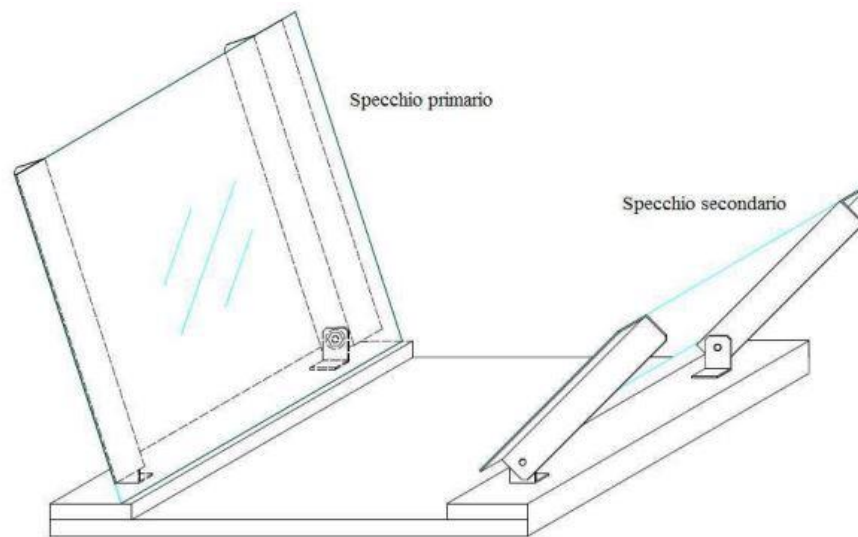


Fig. 12: Specchi nel Newton solar Oven 2.0

In fase di funzionamento gli specchi primari vengono fissati mediante un sistema a slitta sui bracci principali, mentre gli specchi secondari mediante dei magneti, così da poter essere facilmente rimossi in fase di trasporto. Per massimizzare l'efficienza si sono utilizzati specchi in Polimetilmetacrilato, più comunemente conosciuto come Plexiglass. Questo è un materiale molto efficiente, ma anche facilmente recuperabile da oggetti rimasti inutilizzati. Gli specchi in plexiglass sono da preferire non solo per ragioni di costo, ma anche per una questione di sicurezza. Non bisogna dimenticare infatti che un forno solare viene utilizzato all'aperto e una folata di vento potrebbe rimuovere gli specchi: l'utilizzo del plexiglass garantisce un bassissimo rischio di rotture e di infortuni, a parità di proprietà riflettenti dei comuni specchi in vetro; infatti le capacità di riflessione di uno specchio in plexiglass sono pari o superiori a quelle di uno specchio in vetro (coefficiente di riflessione di circa 90%). I bracci di sostegno degli specchi sono stati realizzati con un profilo in alluminio, così da garantire allo stesso tempo resistenza meccanica e leggerezza. I bracci vengono poi fissati a delle staffe mediante delle manopole, in modo da poterli posizionare correttamente in base all'inclinazione necessaria allo specchio per

indirizzare i raggi del sole all'interno della camera di cottura. Infatti, a seconda del periodo dell'anno, dell'orario di programmazione delle prove e della latitudine e longitudine del luogo di lavoro si avrà una diversa altezza del sole. Da questo dato è possibile ricavare i due angoli ai quali gli specchi devono essere inclinati. Questa procedura, per una buona accuratezza va reiterata ogni 15 minuti, facendo attenzione anche al posizionamento degli specchi in direzione dell'azimuth solare, ruotando il forno manualmente

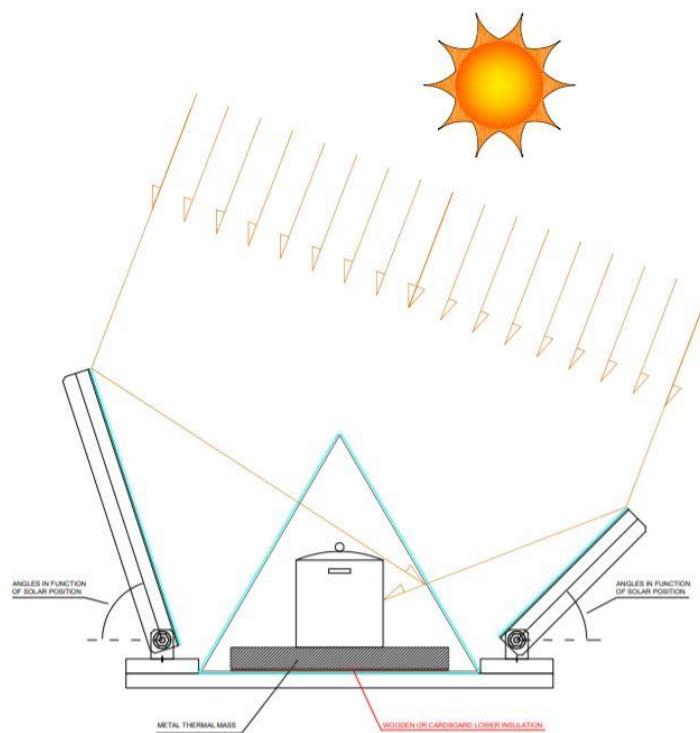


Fig. 13: Schema di funzionamento generale del Newton solar Oven

2.3 Newton solar dryer

Come già visto in precedenza, lo scopo di un essiccatore solare è quello di asportare l'umidità contenuta all'interno dei prodotti da essiccare. Affinché ciò avvenga è necessario che all'interno della camera di essiccazione ci sia un flusso di aria calda, che prima lambisce i prodotti, poi fluisce verso l'esterno, trascinando con sé il vapore. L'idea è quindi quella di fare in modo che si crei una circolazione naturale dell'aria, che entra dalla base, percorre la camera di essiccazione e, sfruttando l'effetto camino, esce dalla parte superiore. L'essiccatore è composto da una struttura portante, su cui viene appoggiato una base dotata di aperture per permettere l'ingresso dell'aria. La base va a formare la camera di essiccazione, insieme a due lastre di acciaio, due lastre di vetro e due sportelli laterali. Sulla struttura sono fissati dei bracci che

hanno la funzione di sostenere e mantenere in una determinata posizione degli elementi riflettenti. In seguito verranno analizzati nel dettaglio i vari componenti, descrivendo le scelte fatte, la realizzazione e le modifiche effettuate per ottenere la configurazione attuale dell'essiccatore partendo dal forno solare.

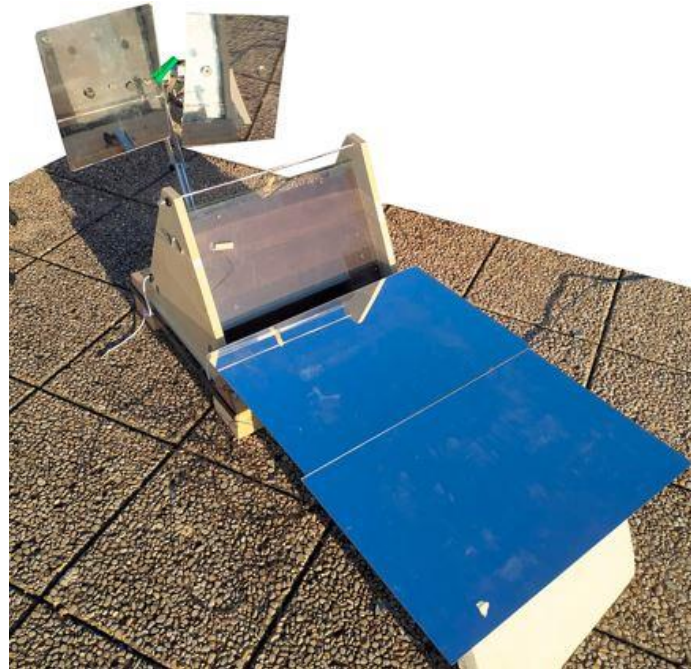
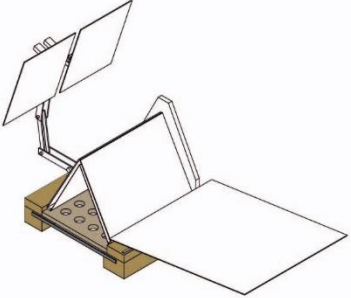
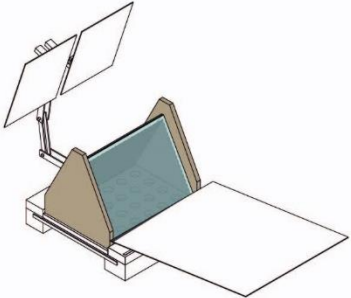
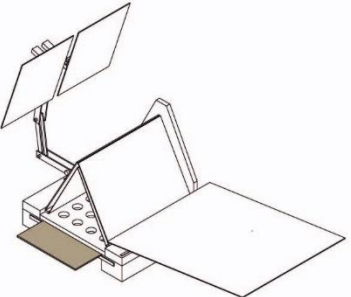
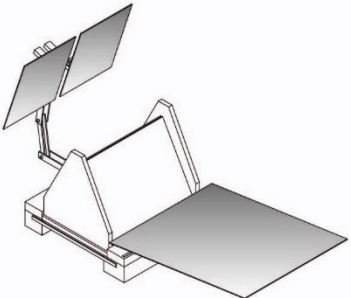
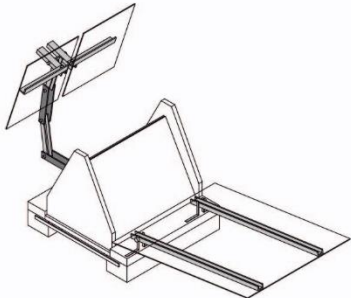


Fig. 14: Vista del prototipo del Newton Solar Dryer realizzato

Nella Tabella 2 riportata a pagina seguente, l'essiccatore è scomposto nelle sue parti principali, che vengono di volta in volta messe in risalto nella vista assonometrica corrispondente. Inoltre è possibile dai disegni comprendere il materiale costitutivo di ogni componente.

Struttura portante e base	
Camera di essiccazione	
Regolatore flusso d'aria	
Elementi riflettenti	
Bracci di sostegno	

Legno lamellare
 Vetro extrachiario temprato
 Barre di acciaio
 Polimetacrilato

Pannello multistrato di pioppo
 Lastre di acciaio zincato e preverniciato
 Profilati alluminio

Tab. 2: Rappresentazione componenti principali del Newton Solar Dryer

2.3.1 Struttura portante e base

È stata costruita una struttura rialzata in modo da permettere l'ingresso dell'aria dal basso. Questa è composta da due blocchi, ciascuno dei quali formato da due pezzi di legno lamellare: uno di sezione 12*8 cm, lungo 54 cm, sopra il quale è stato fissato l'altro, attraverso delle viti, della stessa lunghezza e di sezione 10*4 cm. È necessario infatti che il pezzo superiore abbia una larghezza minore rispetto a quello inferiore, in modo che si crei un gradino alto 4 cm e largo 2 cm sul quale poter appoggiare la base dell'essiccatore. Questa caratteristica consente innanzitutto un semplice assemblaggio e soprattutto la possibilità di poter cambiare facilmente la base. Questa è costituita da un pannello multistrato di pioppo di dimensioni 38*54 cm e spessore 2 cm, ed è dotato di aperture che permettono l'ingresso dell'aria nell'essiccatore. Le aperture possono assumere forme e dimensioni diverse; nel nostro caso sono stati costruiti e utilizzati per gli esperimenti due diversi tipi di base. Su una sono stati apportati 24 fori di 4,3 cm di diametro. L'altra invece, è costituita da 5 aperture rettangolari di dimensioni 4*40 cm.

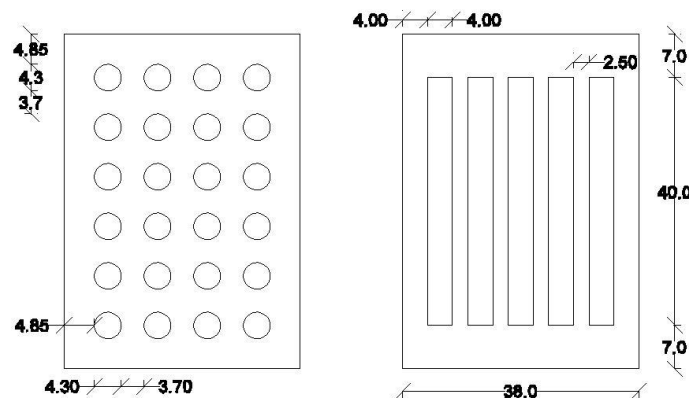


Fig. 15: Vista in pianta delle due differenti basi realizzate

I blocchi della struttura, infine, devono essere uniti tra loro mediante due pezzi di acciaio, uno nella parte anteriore e uno in quella posteriore, così da garantire stabilità e rigidità alla struttura. Tra i due blocchi deve essere assicurata una distanza di 34 cm per poter inserire la base dell'essiccatore.

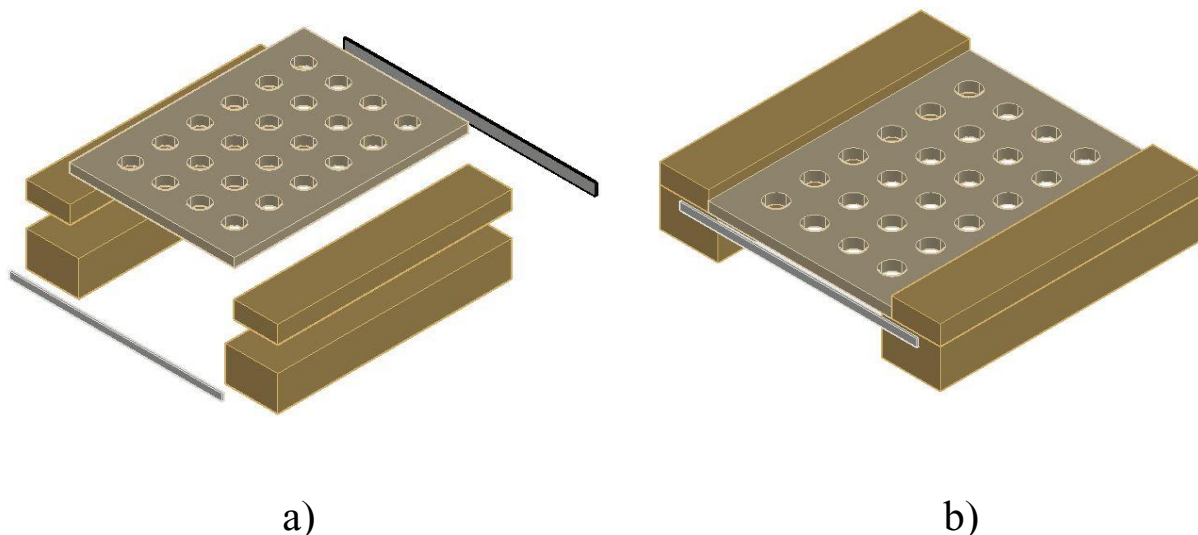


Fig. 16: Esploso (a) e vista assonometrica (b) degli elementi che compongono la struttura e la base

2.3.2 Regolatore flusso d'aria

Dal momento che l'essiccatore solare viene utilizzato all'aperto, è stato pensato un sistema di regolazione del flusso d'aria in ingresso nella camera di essiccazione. Questo è creato attraverso un pannello multistrato di pioppo di spessore 6 mm di dimensioni 34*54 cm, che scorrendo su una guida può chiudere di più o di meno le aperture presenti sulla base. Le guide sono formate da due listelli di legno di sezione 2*1 cm e lunghi 54 cm. Ogni listello è fissato attraverso dei chiodi alla struttura, in modo che la parte superiore del pannello di regolazione vada a contatto con la parte inferiore della base. Infatti il gioco tra i due elementi dovrà essere minimo, così da non permettere il passaggio di aria. Limitare l'ingresso di aria nell'essiccatore attraverso il regolatore però, potrebbe rappresentare uno svantaggio. Infatti il flusso di aria potrebbe essere insufficiente per innescare l'effetto camino, quindi si avrebbe aria stagnante nella camera di essiccazione e non si avrebbe asportazione del vapore proveniente dai prodotti da essiccare. Un altro svantaggio del regolatore è che crea una distribuzione di flusso non omogenea nella camera. Il vantaggio di questo dispositivo è che mantiene una temperatura media più elevata e costante nella camera di essiccazione, poiché non si risente dell'effetto della variazione di velocità dell'aria causata dal vento. L'utilizzo del regolatore è quindi molto utile e consigliato quando si vuole velocizzare la fase di riscaldamento dell'essiccatore e nelle giornate in cui il vento rappresenta un vincolo per il raggiungimento di temperature sufficienti all'essiccazione.

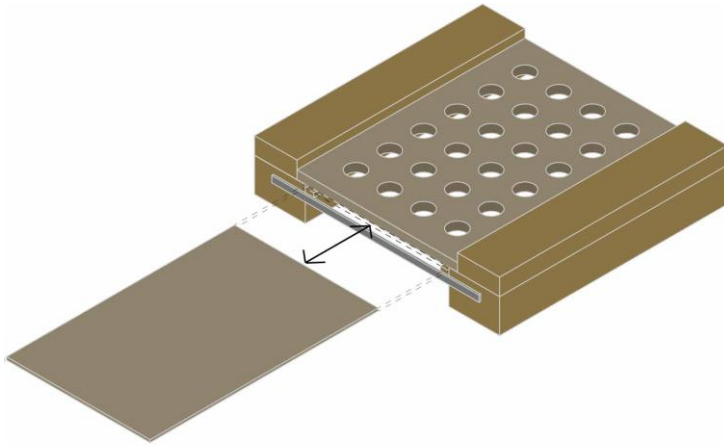


Fig. 17: Vista assonometrica del regolatore di flusso prima di essere infilato al di sotto della base

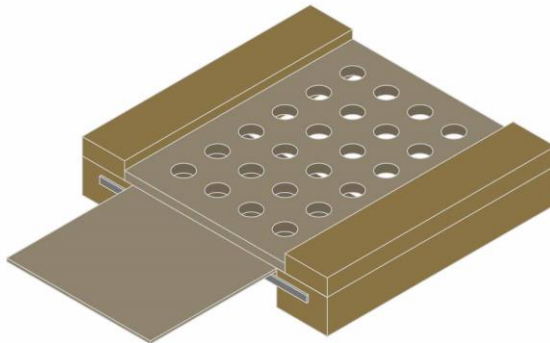


Fig. 18: Vista assonometrica del regolatore di flusso inserito sotto alla base

2.3.3 Camera di essiccazione

La camera di essiccazione costituisce il volume all'interno del quale si deve avere il flusso di aria calda per essiccare i prodotti. Per comporre la camera, si posizionano due lastre di vetro della stessa dimensione, nello stesso modo in cui erano posizionate nel forno solare. Questi saranno quindi da un lato a contatto con il piano di appoggio, dall'altro a contatto tra loro, a formare un prisma a base triangolare. Il gradino creato sulla struttura della base, consente loro di non scivolare e mantenere la loro posizione. In questo caso, più internamente rispetto ai vetri e nella stessa configurazione, si inseriscono due lastre nere di acciaio zincato. A chiudere la camera di essiccazione si hanno due sportelli laterali in legno tenuti in tensione tra loro. In realtà i vetri non sono appoggiati direttamente sul piano dell'essiccatore, ma su due listelli di legno, della stessa lunghezza dei vetri e di sezione 2*1 cm. Questi hanno lo scopo di rialzare i vetri, così da favorire l'inserimento delle due lastre di acciaio e di evitare il contatto tra loro. Inoltre vanno a creare un ulteriore piccolo gradino, che consente di non far scorrere lateralmente le lastre. Per garantire la fuoriuscita dell'aria dalla camera di essiccazione, sia i due vetri che le due lastre dovranno avere un'apertura superiore. Questa può essere variabile e ottenuta

mediante appositi distanziatori. In seguito verranno analizzati in maniera più approfondita i vetri, le lastre di acciaio e gli sportelli laterali.

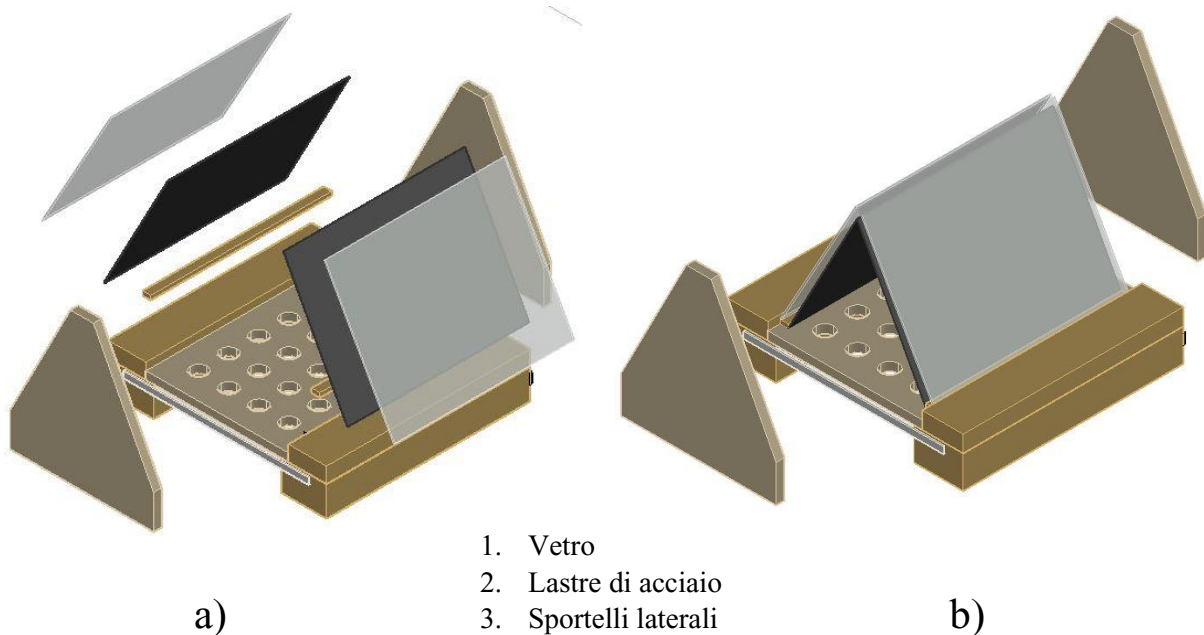


Fig. 19: Esploso (a) e vista assonometrica (b) degli elementi della camera di essiccazione assemblati

2.3.4 Caratteristiche dei vetri

2.3.4.1 La radiazione solare

La radiazione solare che raggiunge la terra è composta da raggi UV (circa il 3% della radiazione totale), da raggi infrarossi (circa il 55% della radiazione totale) e da luce nella lunghezza d'onda del visibile (circa il 42 % della radiazione totale). Ognuna delle tre componenti appartiene ad un intervallo di lunghezza d'onda: l'UV tra 0,28 e 0,38 μm , il visibile tra 0,38 e 0,78 μm e l'infrarosso tra 0,78 e 2,5 μm . Nella curva rappresentata nella Figura 20, viene illustrata la distribuzione energetica della radiazione solare in funzione della lunghezza d'onda per una superficie perpendicolare a tale radiazione [11].

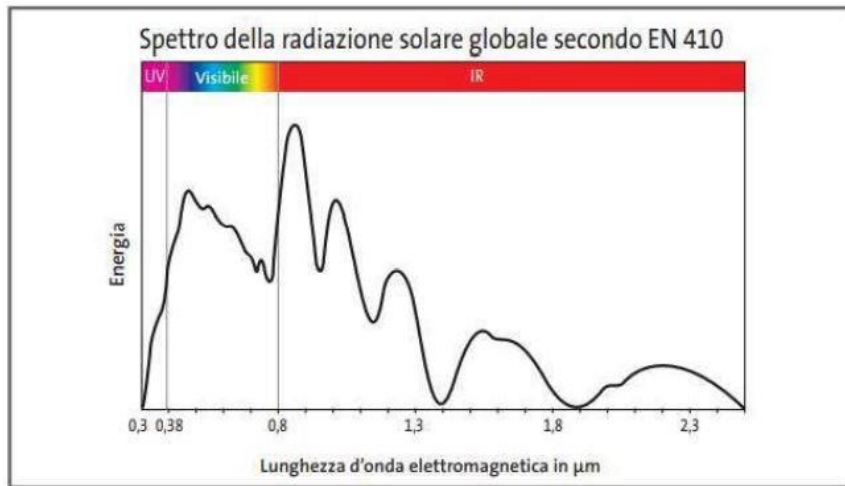


Fig. 20: Andamento della radiazione solare in funzione della lunghezza d'onda

La quasi totalità di energia si trova a una lunghezza d'onda superiore a quella dell'UV. Il vetro comune alla lunghezza d'onda dell'UV si comporta come un corpo opaco:

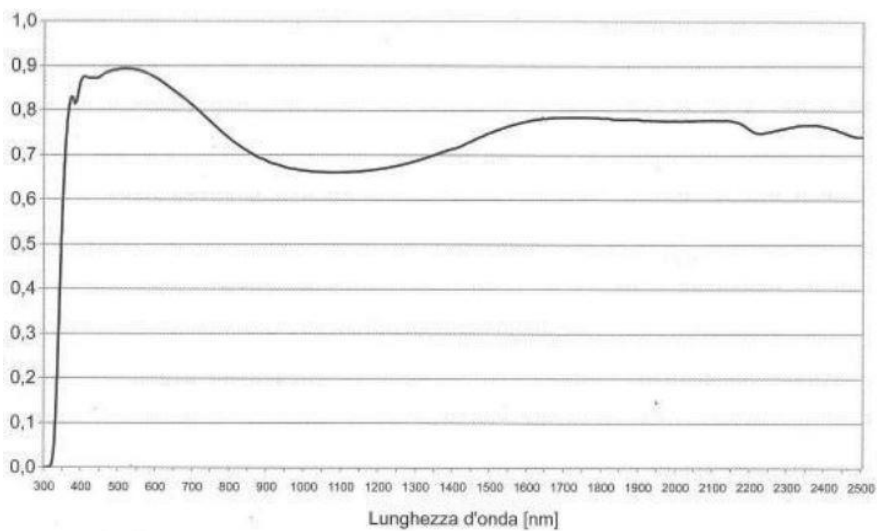


Fig. 21: Trasmittanza spettrale di una lastra vetrata

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

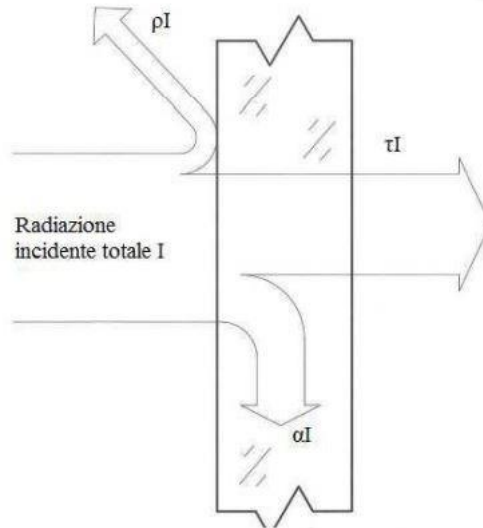


Fig. 22: *Scomposizione della radiazione solare incidente nelle tre componenti*

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

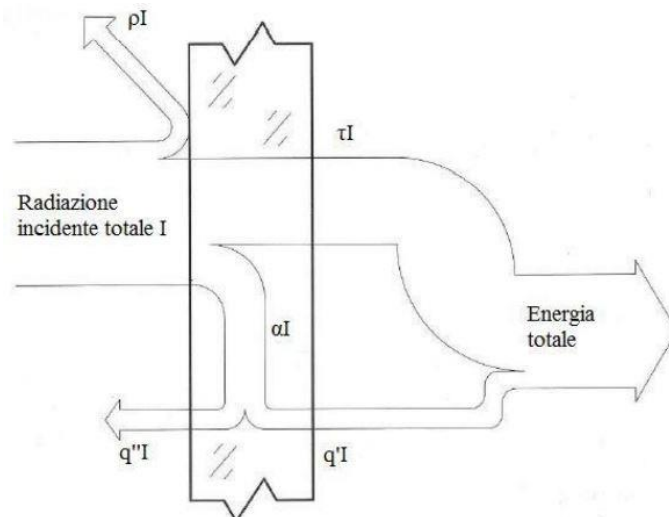


Fig. 23: *Energia totale in ingresso attraverso il vetro*

L'angolo di incidenza assume una grande importanza nella valutazione dei coefficienti di trasmissione e riflessione. La maggior trasmissione si ha con una radiazione incidente in direzione normale al vetro, perciò più l'angolo di incidenza della radiazione si allontana dalla normale, più il coefficiente di riflessione aumenterà, a spese del coefficiente di trasmissione.

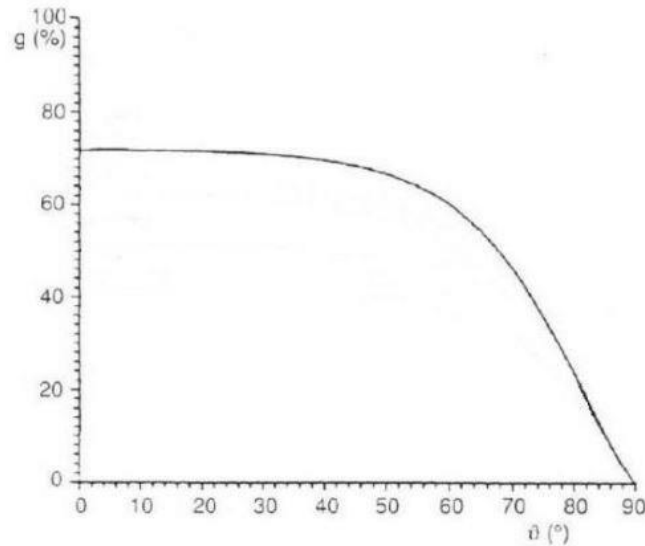


Fig. 24: variazione del fattore solare in funzione dell'angolo di incidenza della radiazione

2.3.4.2 Vetro extrachiaro

Il vetro esiste nella versione trasparente, quella più comune, e nella versione extrachiaro (più costosa). Si è optato sull'utilizzo di un'unica tipologia di vetro, precisamente quello extrachiaro a scapito di quello comune (float). La versione trasparente ha una tonalità che tende leggermente al verdastro dovuta alla presenza di ossido di ferro; mediante un particolare procedimento è possibile eliminare il 90% di ossido e ottenere il vetro extrachiaro.



Fig. 25: Vetro float comune e extrachiaro a confronto

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

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

Tab. 3: coefficienti energetici del vetro float comune ed extrachiaro con uno spessore di 4 mm (valori espressi in percentuale) [12]

Il vetro extrachiaro migliora l'efficienza dell'essiccatore solare, avendo un maggiore coefficiente di trasmissione e un minore coefficiente di assorbimento. Sono state utilizzate quindi lastre di vetro extrachiaro temprato (la tempera è un trattamento scelto per fornire maggiore resistenza alle sollecitazioni termiche) di dimensioni 48*38, di spessore 4 mm. Il vetro garantisce la trasmissione della radiazione solare alle lastre di acciaio. Inoltre grazie all'intercapedine d'aria che si viene a creare tra il vetro e l'acciaio, si ha un maggiore accumulo di calore e una minore dispersione termica. Infatti l'intercapedine, composto da aria calda a bassa velocità fungerà da isolante per la camera di essiccazione.

2.3.5 Lastre di acciaio

Le lastre di acciaio svolgono un ruolo molto importante per il funzionamento dell'essiccatore. Per prima cosa vanno a delimitare la camera di essiccazione, facendo in modo che i prodotti al suo interno non siano a contatto diretto con la radiazione solare. Come abbiamo visto in precedenza infatti, una radiazione diretta all'interno della camera di essiccazione potrebbe portare ad un danneggiamento e ad una peggiore qualità del prodotto finale. Le lastre svolgono poi un ruolo fondamentale dal punto di vista termico: il loro scopo è quello di accumulare l'energia solare e trasmetterla all'interno della camera. La trasmissione del calore all'aria circolante nella camera, e quindi ai prodotti, avviene soprattutto per convezione e irraggiamento. Per questo il materiale delle lastre dovrà essere tale da avere un'elevata conducibilità termica, così come un'elevata emissività. La presenza del vetro, quindi

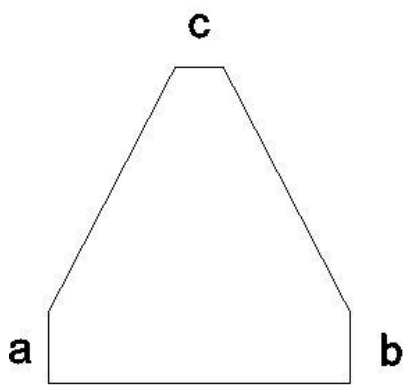
dell'intercapedine d'aria, riduce lo scambio di calore verso l'esterno, favorendo lo scambio verso la camera di essiccazione. Inizialmente sono state applicate delle comuni teglie da forno nere, poi sostituite da lastre di lamiera in acciaio zincato preverniciato, per migliorare le prestazioni del processo. L'acciaio zincato preverniciato è un laminato che si compone di uno strato in acciaio rivestito da una base di zinco che viene poi verniciato e rifinito superficialmente. Questo materiale può essere utilizzato in tutte le possibili applicazioni all'aperto poiché abbina le caratteristiche fisiche e meccaniche dell'acciaio ad una maggiore resistenza alla corrosione data dalla zincatura e dalla verniciatura. Le lastre hanno una lunghezza di 48 cm, un'altezza di 36 cm e uno spessore di 0,8 mm, così da avere una maggiore conducibilità termica. Attraverso la verniciatura "testa di moro" si rendono le piastre opache, aumentando la loro emissività. Nella parte superiore le due lastre, oltre ad essere appoggiate tra loro, sono fissate mediante due bulloni, garantendo una maggiore stabilità. Agendo sui bulloni inoltre e inserendo distanziatori opportuni, è possibile variare l'apertura tra le due piastre. L'apertura tra le piastre è un aspetto molto importante, perché influenza molto il flusso d'aria all'interno dell'essiccatore; minore sarà l'apertura, maggiori saranno le temperature che si stabiliscono nella camera di essiccazione e minore sarà la portata di aria uscente.



Fig. 26: Lastre di acciaio zincate e preverniciate con bulloni di bloccaggio posizionate sulla base

2.3.6 Sportelli laterali

Gli sportelli laterali devono garantire la chiusura della camera di essiccazione. Nel forno questi erano posti all'interno della camera di cottura e assicuravano anche un sostegno per i vetri stessi. In questo caso invece, poiché si ha la presenza sia dei vetri che delle lastre di acciaio, devono essere messi esternamente. Per poter chiudere correttamente la camera di essiccazione, gli sportelli hanno una forma particolare; questa può idealmente essere rappresentata da un trapezio posto sopra un rettangolo.



L'idea iniziale era quella di utilizzare un triangolo, ma poi è stato necessario aggiungere i segmenti "a" e "b" in Figura 27, per assicurare una migliore chiusura della camera. Infine è stata tagliata la parte superiore del triangolo per limitare l'ingombro dello sportello, ottenendo così il segmento "c". La base dello sportello è appoggiata al piano dell'essiccatore e si estende per tutta la sua larghezza (38cm). I segmenti "a" e "b" hanno una lunghezza di 8 cm, mentre il segmento "c" di 6 cm.

Fig. 27: Rappresentazione grafica di uno sportello laterale

Il materiale scelto è il legno multistrato di pioppo di spessore 2 cm. Questo materiale può essere lavorato con grande facilità, è particolarmente resistente alla flessione e leggero (densità 410 kg/m³). Inoltre è un materiale igroscopico, cioè favorisce il passaggio dell'umidità e non l'accumulo. Ha una conducibilità termica pari a 0,12 W/(m K) [13], per cui limita fortemente la dispersione termica verso l'esterno della camera di essiccazione. Per ottenere una chiusura migliore, quindi una maggiore aderenza degli sportelli ai vetri e alla lastre di acciaio, è stato utilizzato un sistema di tensionamento. Questo è stato attuato facendo tre fori su ogni sportello: uno sulla parte superiore, gli altri due nei pressi dell'angolo che rispettivamente i segmenti "a" e "b", mostrati in Figura 27, formano con i lati obliqui del trapezio. Si ha una corda che attraversa prima il foro nella parte superiore di uno sportello, poi il rispettivo foro nell'altro sportello. Per ogni capo della corda si inserisce un fermacorda in plastica, con chiusura a molla. Cosa analoga viene effettuata per gli altri due fori che si hanno sui due sportelli. In questo modo, tirando i fermacorda da un lato e dall'altro, le corde entreranno in tensione, facendo aderire il più possibile gli sportelli alla camera di essiccazione. Questo metodo, oltre ad assicurare la

chiusura, permette di aprire e chiudere la camera con estrema facilità da entrambi i lati, o, nel caso si voglia mantenere il calore nella camera, da un solo lato.



Fig. 28: Sportelli laterali con sistema di tensionamento durante il funzionamento dell'essiccatore

2.3.7 Elementi riflettenti

Per il funzionamento dell'essiccatore è fondamentale la presenza di specchi. Questi infatti, convogliando e riflettendo la radiazione solare sulle lastre di acciaio permettono il loro riscaldamento e di conseguenza il riscaldamento dell'aria all'interno della camera di essiccazione. La Figura 29 mostra la configurazione a 4 specchi del Newton Solar Oven da cui siamo partiti. Questa presentava due specchi primari, più grandi, posti di fronte al sole, e due specchi secondari, più piccoli, che avevano il sole alle loro spalle.



Fig. 29: Configurazione a 4 specchi del Newton Solar Oven

Inizialmente si è deciso di mantenere la stessa configurazione e utilizzare gli stessi specchi. Il primario è quindi composto da due specchi di dimensioni 60*40 cm, che posti uno sopra l'altro, sullo stesso piano, è come se formassero uno specchio unico di dimensioni 60*80 cm. Lo specchio secondario è formato da due specchi di dimensioni 30*40 cm. Per massimizzare l'efficienza sono stati utilizzati specchi in Polimetilmetacrilato, più comunemente conosciuto come Plexiglass. Questo tipo di lastre sono impiegate in svariati settori, per cui è un materiale facilmente recuperabile da oggetti rimasti inutilizzati. Gli specchi in plexiglass sono da preferire non solo per ragioni di costo ma anche per una questione di sicurezza. Non bisogna dimenticare infatti che l'essiccatore solare viene utilizzato all'aperto e per esempio il vento potrebbe far cadere a terra gli specchi: l'utilizzo del plexiglass garantisce un bassissimo rischio di rotture e di infortuni, a parità di proprietà riflettenti dei comuni specchi in vetro; i produttori sostengono infatti che le capacità di riflessione di uno specchio in metacrilato siano pari o superiori a quelle di uno specchio in vetro (coefficiente di riflessione di circa 90%).

Per sorreggere gli elementi riflettenti, sulla struttura della base sono fissati dei bracci, analizzati più nel dettaglio in seguito. In fase di funzionamento lo specchio primario viene infilato, mediante un sistema a slitta, sui bracci principali, mentre gli specchi secondari sono fissati, mediante dei magneti, su appositi bracci di sostegno. Di seguito è riportata l'immagine della configurazione ottenuta del Newton Solar Dryer.



Fig. 30: Prima configurazione del Newton Solar Dryer

L'idea era quella di utilizzare lo specchio primario più in basso per riflettere la radiazione solare sulla lastra di acciaio di destra, mentre lo specchio primario più in alto per riflettere la radiazione sugli specchi secondari, che a loro volta l'avrebbero riflessa sulla lastra di acciaio di sinistra. Quest'ultima avrebbe ricevuto anche la radiazione diretta del sole. Applicando questa disposizione degli specchi però, si sono riscontrate delle criticità. Si è notato che la radiazione solare non riusciva ad incidere sullo specchio primario più in basso, a causa dell'ombra che le lastre di acciaio facevano su di esso. Inoltre, la radiazione solare diretta del sole non riusciva a raggiungere la lastra di acciaio di sinistra a causa della presenza degli specchi secondari. Infine, l'inclinazione dello specchio primario più in alto, non era tale da garantire una riflessione della radiazione ottimale, trovandoci nella stagione invernale, quando si ha un'altezza solare molto esigua. Si è deciso allora di ruotare l'essiccatore di 180° e che ogni coppia di specchi si occupasse di riflettere la radiazione su un'unica lastra di acciaio, cioè quella situata sullo stesso lato della coppia di specchi. Gli specchi più piccoli sono posti di fronte al sole e da specchi secondari diventano specchi primari; viceversa per gli elementi riflettenti più grandi.

In questa nuova configurazione, gli specchi secondari, quindi quelli più grandi, si occupano di riscaldare la lastra posta di fronte al sole, che chiameremo "diretta", gli specchi primari si occupano dell'altra piastra, che chiameremo "indiretta". Per fare in modo che sulla lastra diretta arrivi sia la radiazione solare diretta, che la radiazione riflessa dagli specchi secondari, questi dovranno avere un piccolo angolo di inclinazione rispetto al terreno. Questo varierà ovviamente con l'altezza solare: più il sole sarà basso e minore è l'angolo di inclinazione rispetto al terreno e viceversa. Con questa configurazione però, è rimasto il problema legato ad una zona di ombra che si veniva a creare sugli specchi posti di fronte al sole. Per questo si è deciso di modificare i bracci di sostegno degli specchi primari, creando un sistema di più bracci regolabili, arrivando così alla configurazione attuale. Questo sistema oltre a permettere di posizionare gli specchi primari più in alto, in modo da evitare ombra su di essi, consente di ottenere più gradi di libertà, così da assicurare la corretta inclinazione degli specchi in funzione dell'altezza solare.



Fig. 31: Vista della configurazione finale del Newton Solar Dryer durante il funzionamento

2.3.8 Bracci di sostegno

I bracci di sostegno servono per mantenere gli specchi in una determinata posizione durante il funzionamento dell'essiccatore solare. Inizialmente si sono adottati gli stessi bracci che si avevano nel forno solare poiché la configurazione era la stessa. Per gli specchi secondari sono stati utilizzati due profili in alluminio a "C" di lunghezza 75 cm, così da garantire allo stesso tempo resistenza meccanica e leggerezza. Ogni braccio è poi fissato ad una coppia di staffe ad "L", a loro volta fissate alla struttura dell'essiccatore mediante viti. Tra le staffe di un braccio si deve avere una distanza pari alla larghezza dei profili di alluminio (3 cm), in modo che questi vadano ad inserirsi tra le staffe e vengano fissati ad esse tramite delle viti e manopole di serraggio. Stringendo o allentando ogni manopola sarà possibile orientare correttamente il braccio affinché lo specchio possa indirizzare i raggi del sole verso la camera di essiccazione. Tra i due bracci di alluminio si ha una distanza di 30 cm.



Fig. 32: Bracci di sostegno per gli specchi più grandi

Per poter ancorare gli specchi secondari ai rispettivi bracci, si deve creare un sistema a slitta: attraverso il nastro biadesivo, si fissano dietro ad ogni specchio 4 profili di alluminio ad “U”, due in corrispondenza di un braccio e due in corrispondenza dell’altro. In questo modo i bracci fungeranno da guida per i profili ad “U”, che scorrendo fanno in modo che i due specchi si infilino lungo i bracci stessi.



Fig. 33: Sistema a slitta nella parte posteriore degli specchi più grandi

Una volta inseriti gli specchi, per fare in modo che questi non si sfilino, si forano trasversalmente le estremità superiori dei due bracci. Facendo passare attraverso i fori una vite senza fine con bulloni, è impedito lo scorrimento degli specchi verso l’alto. Dalla parte opposta della struttura si hanno i bracci di sostegno per gli specchi primari. Inizialmente si avevano due bracci in legno, uno per ogni specchio. Ogni braccio era fissato alla struttura attraverso una staffa ad “L”, di dimensioni più piccole rispetto a quelle utilizzate per gli specchi secondari.

Anche in questo caso, per permettere la giusta inclinazione, i bracci erano fissati alle staffe mediante viti e manopole di serraggio. Il braccio in legno garantiva la rigidità necessaria per il sostegno, ma il bloccaggio vero e proprio degli specchi veniva effettuato attraverso due profili di alluminio ad “L”. Una faccia di questi infatti, era avvitata lateralmente all’asse di legno, in modo che l’altra faccia formasse una sporgenza. Gli specchi, quindi, venivano prima appoggiati su tale sporgenza, poi fissati attraverso un sistema di calamite, nella zona a contatto con l’alluminio. Infatti, mettendo una calamita da un lato della sporgenza del profilo e una calamita sull’altro lato, interponendo lo specchio, si garantiva l’ancoraggio di quest’ultimo.



a)



b)

Fig. 34: Bracci per gli specchi più piccoli senza (a) e con gli specchi (b)



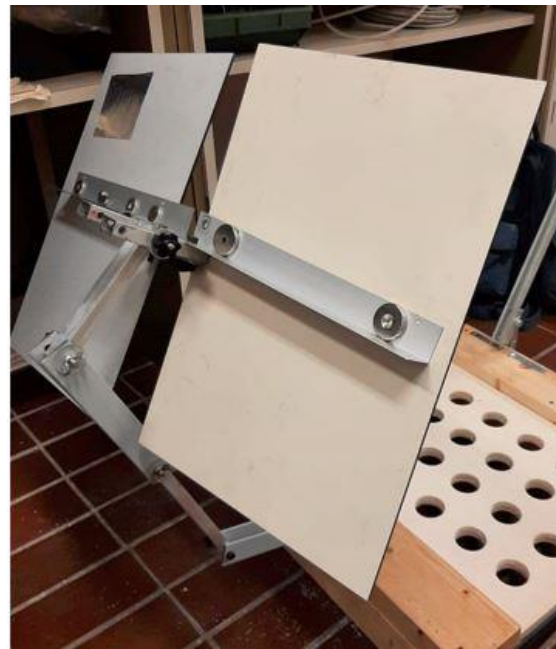
Come già anticipato nella sezione dedicata agli elementi riflettenti, con questa configurazione si creava una zona di ombra sugli specchi primari, perciò è stato necessario creare un nuovo tipo di sostegno. Questo è composto da una serie di bracci regolabili, che conferiscono agli specchi la possibilità di assumere l’inclinazione desiderata.

Fig. 35: Nuovo sostegno con bracci regolabili per gli specchi

Il sostegno è composto da 8 bracci ed è collegato alla struttura con due staffe ad “L”. Il primo braccio è formato da due barre di acciaio, ciascuna fissata ad una staffa, attraverso dei fori su cui passa una vite con manopola di serraggio, che stringe grazie ad un profilo di alluminio a “C” posto tra le staffe. Il secondo braccio è fissato all’estremità del primo tramite una vite senza fine e due manopole di serraggio e, affinché possa ruotare, è composto da un profilo di alluminio a “C” che si interpone tra le due barre. Il terzo braccio sarà formato da altre due barre di acciaio, mentre il quarto da un profilo di alluminio a “C”. A quest’ultimo sono collegati altri due profili, uno da un lato e uno sull’altro lato. All’estremità di questi due profili, sono collegate, sempre tramite una vite senza fine e due manopole di serraggio, due barre di alluminio ad “L”, sulle quali verranno fissati i due specchi, attraverso il sistema di calamite visto in precedenza. Per aumentare l’attrito tra le manopole e i bracci, quindi favorire il bloccaggio di questi in una determinata posizione, si sono utilizzate delle rondelle in plexiglass.



a)

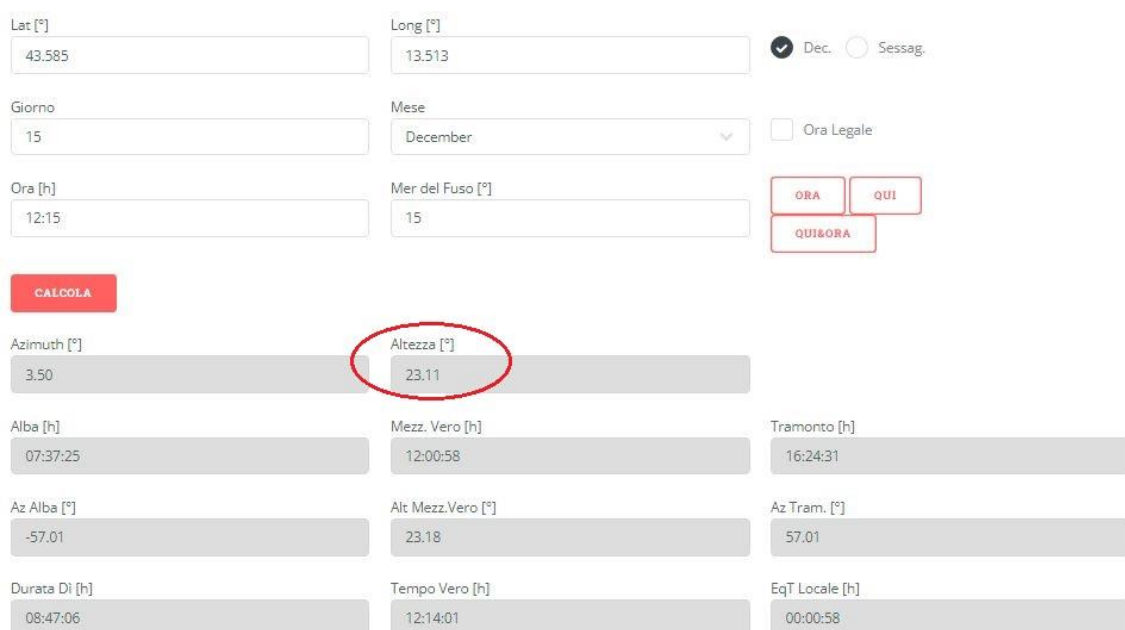


b)

Fig. 36: Fronte (a) e retro (b) degli specchi primari montati sul sostegno attraverso le calamite

2.3.9 Schema di funzionamento generale

Lo schema di funzionamento del Newton Solar Dryer è piuttosto semplice. Gli specchi primari si devono trovare esattamente di fronte al sole e vengono posizionati in modo tale che lo spot luminoso di radiazione riflessa coincida con la lastra di acciaio indiretta, quindi con la camera di essiccazione. Gli specchi secondari hanno il sole dietro di loro, ma allo stesso modo dovranno essere posizionati in maniera tale che la radiazione riflessa arrivi sulla camera di essiccazione. La differenza tra gli specchi è che il primario si trova ad una inclinazione più vicina alla normale al terreno, mentre il secondario forma con il terreno un piccolo angolo di inclinazione. La radiazione solare riflessa dagli specchi, prima di arrivare sulla lastre di acciaio, incontrano quelle di vetro. Affinché arrivi la maggiore quota di radiazione possibile sulle lastre di acciaio, è necessario che i vetri non riflettano la radiazione, ma la trasmettano il più possibile. Tanto più la radiazione solare riflessa dagli specchi impatta i vetri con un'angolazione normale ad essi, tanto più sarà trasmessa alle lastre di acciaio e tanto meno sarà riflessa in ambiente. Si può notare quindi, come l'inclinazione dei vetri e delle lastre di acciaio sia stata studiata nel dettaglio per rendere l'essiccatore il più efficiente possibile. Infatti, in base all'altezza solare, saranno gli specchi a variare la loro inclinazione, per fare in modo che la radiazione solare che arriva ai vetri abbia un'angolazione vicina alla normale ad essi. A seconda del periodo dell'anno, dell'orario di programmazione delle prove e della latitudine e longitudine del luogo di lavoro, è possibile ottenere il dato dell'altezza del sole in un preciso istante, grazie ad un programma di calcolo creato dall'Ing. Nicola Ulivieri [14].



Lat [°] 43.585	Long [°] 13.513	<input checked="" type="radio"/> Dec. <input type="radio"/> Sessag.
Giorno 15	Mese December	<input type="checkbox"/> Ora Legale
Ora [h] 12:15	Mer del Fuso [°] 15	<input type="button" value="ORA"/> <input type="button" value="QUI"/> <input type="button" value="QUI&ORA"/>
<input type="button" value="CALCOLA"/>		
Azimuth [°] 3.50	Altezza [°] 23.11	
Alba [h] 07:37:25	Mezz. Vero [h] 12:00:58	Tramonto [h] 16:24:31
Az Alba [°] -57.01	Alt Mezz.Vero [°] 23.18	Az Tram. [°] 57.01
Durata Di [h] 08:47:06	Tempo Vero [h] 12:14:01	EqT Locale [h] 00:00:58

Fig. 37: Programma di calcolo per ricavare l'altezza del sole

Nota l'altezza solare è possibile inclinare ed inclinare correttamente gli specchi. Per una buona accuratezza bisogna modificare ogni 15 minuti l'inclinazione degli specchi, così come ruotare manualmente l'essiccatore, in modo che questo risulti sempre in corrispondenza dell'azimuth solare. Le lastre di acciaio quindi, investite dalla radiazione solare, inizieranno a riscaldarsi e a scambiare calore con l'aria in ingresso nella camera di essiccazione, che inizialmente si trova a temperatura ambiente. L'aria mano a mano che sale verso l'alto, si riscalda, diminuisce la sua umidità relativa ed entrano in contatto con i prodotti da essiccare, facendo evaporare l'acqua contenuta in essi. In seguito l'aria uscirà dall'apertura superiore della camera di essiccazione portando con sé il vapore assorbito dai prodotti. Questi perciò, non dovranno essere posizionati direttamente sulla base dell'essiccatore, ma ad un'altezza maggiore. Infatti maggiore è l'altezza all'interno della camera di essiccazione e più alta sarà la temperatura dell'aria, quindi si avrà un'essiccazione più veloce e migliore dal punto di vista della qualità del prodotto finito. L'altezza però, non deve essere troppo elevata, perché le temperature che si raggiungono potrebbero essere troppo elevate (si deve rimanere in un range di 40-70 °C). Inoltre, essendo la sezione della camera di essiccazione triangolare, più ci si sposta verso l'alto e minore è lo spazio a disposizione per posizionare i prodotti, quindi diminuisce la capacità dell'essiccatore. Gli alimenti da essiccare, affinché possano essere investiti dall'aria proveniente dal basso, sono rialzati attraverso appositi dispositivi, costituiti da una base microforata, su cui si andranno ad appoggiare i prodotti.

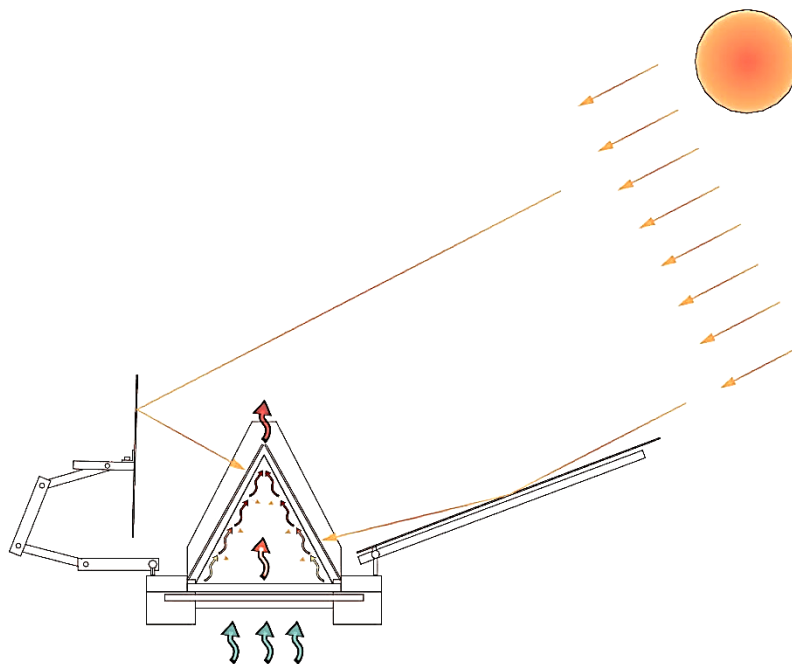


Fig. 38: Schema di funzionamento del Newton Solar Dryer nel periodo estivo

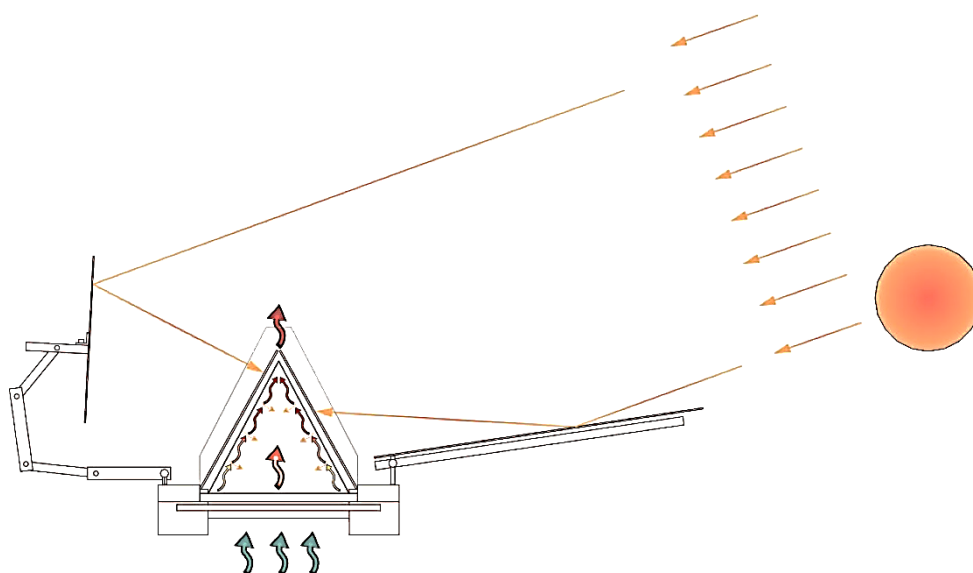
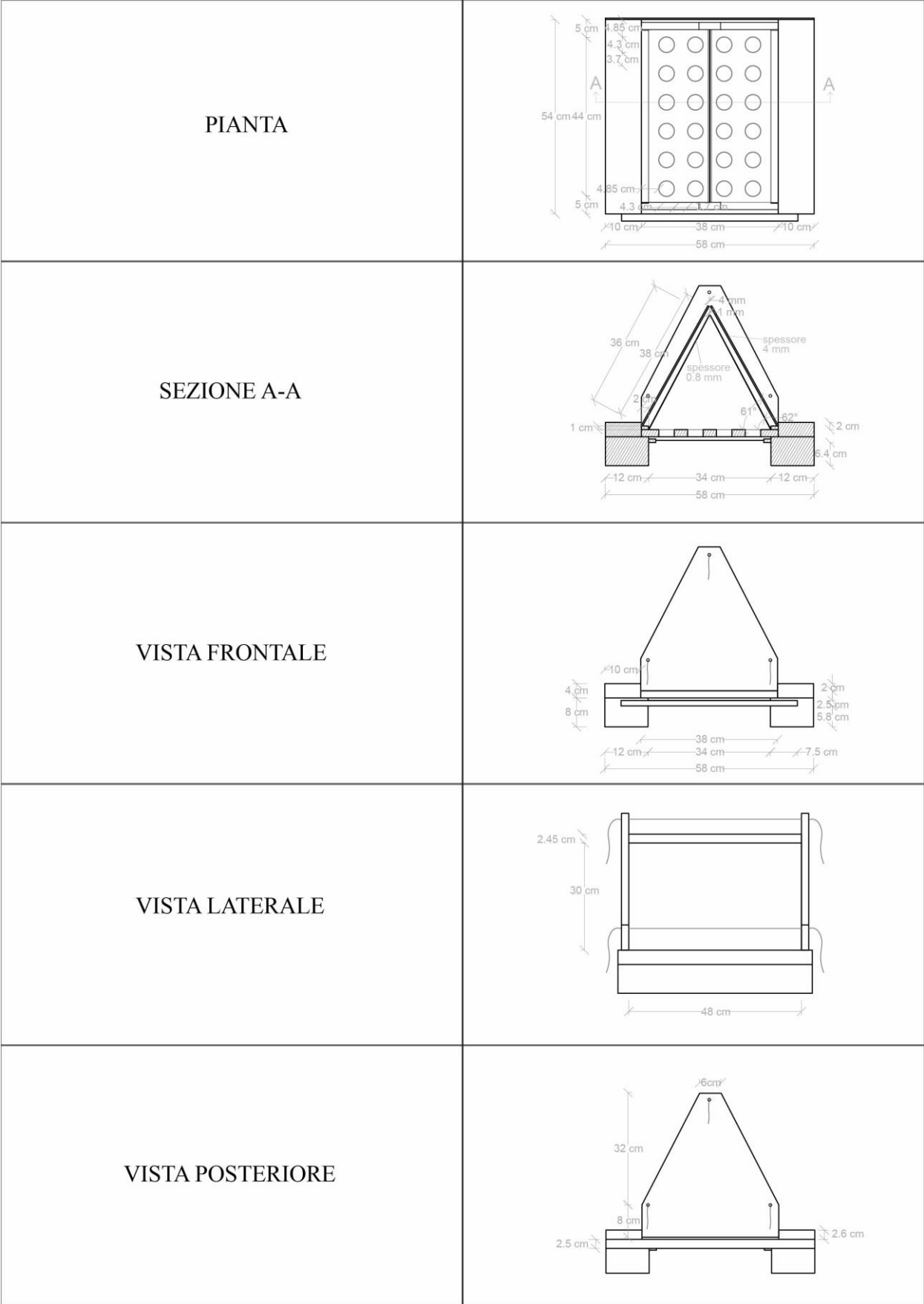


Fig. 39: Schema di funzionamento del Newton Solar Dryer nel periodo invernale

2.3.10 Dati generali

Nella Tabella 4 sono rappresentate piante, viste laterali e una sezione del Newton Solar Dryer, escludendo bracci di sostegno e specchi. In alto si ha la pianta quotata che fornisce la lunghezza e larghezza dell'essiccatore totali (58*54). La sezione mostra che la base, le lastre di vetro e quelle di acciaio sono semplicemente appoggiate sulla struttura, per cui possono essere rimosse con semplicità. Essendo inoltre, i bracci degli specchi richiudibili, in fase di trasporto l'essiccatore avrà come dimensioni quelle della struttura. Le lastre di vetro sono rappresentate con un'apertura superiore di 4 mm, la stessa utilizzata nei test illustrati in seguito. Le lastre di acciaio in questo caso invece, hanno un'apertura superiore di 1 mm. Entrambe sono ottenute mediante dei distanziatori e possono variare a seconda delle esigenze. Si nota che sia le lastre di vetro che quelle di acciaio, formano con la base un angolo variabile, ma prossimo a 60°, che rappresenta un'inclinazione ottimale per il funzionamento dello strumento. In sezione è possibile vedere anche i listelli di legno sotto alla base, che fungono da guida per il regolatore di flusso. Sono raffigurate inoltre, la vista frontale, posteriore e laterale, in cui si possono vedere i cavi di tensionamento per gli sportelli laterali e da cui si può ottenere l'altezza totale dell'essiccatore di 48 cm, escludendo sempre bracci e specchi.



Tab. 4: Pianta, sezione e viste dell'essiccatore quotate, escludendo bracci di sostegno e specchi

In figura 40 è rappresentata la pianta dell'essiccatore realizzato, da cui si può dedurre che in fase di funzionamento la larghezza totale è data da quella degli specchi ed è quindi di 60 cm, mentre la lunghezza è molto variabile e dipende soprattutto dall'inclinazione degli specchi primari.

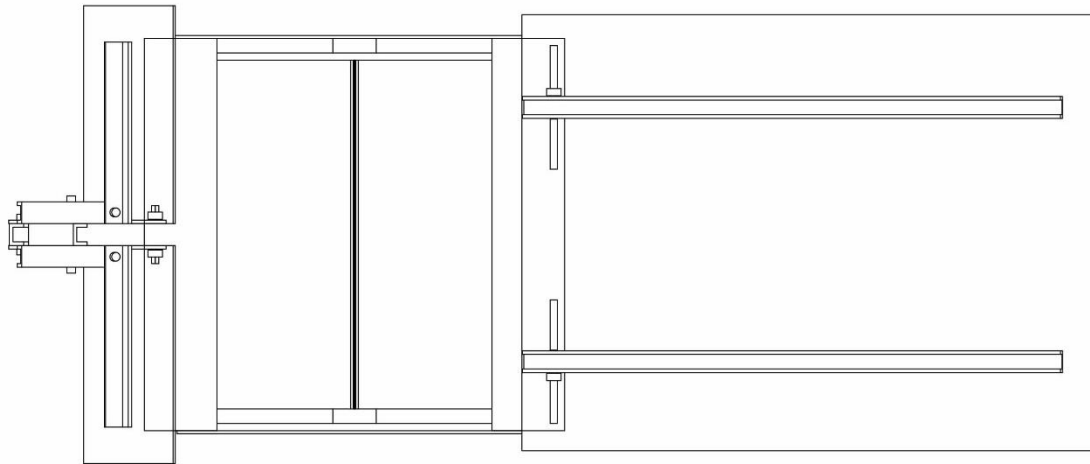


Fig. 40: Pianta del Newton Solar Dryer

Si riporta in Figura 41 anche una vista frontale del Newton Solar Dryer dotato di bracci di sostegni e specchi e a cui è stato tolto uno sportello laterale, in modo da poter vedere l'interno della camera di essiccazione. Attraverso delle frecce è possibile vedere come sia gli specchi, che le lastre di vetro e di acciaio, possano variare la propria inclinazione, determinando un diverso funzionamento dell'essiccatore, in funzione delle condizioni ambientali del luogo in cui lavora.

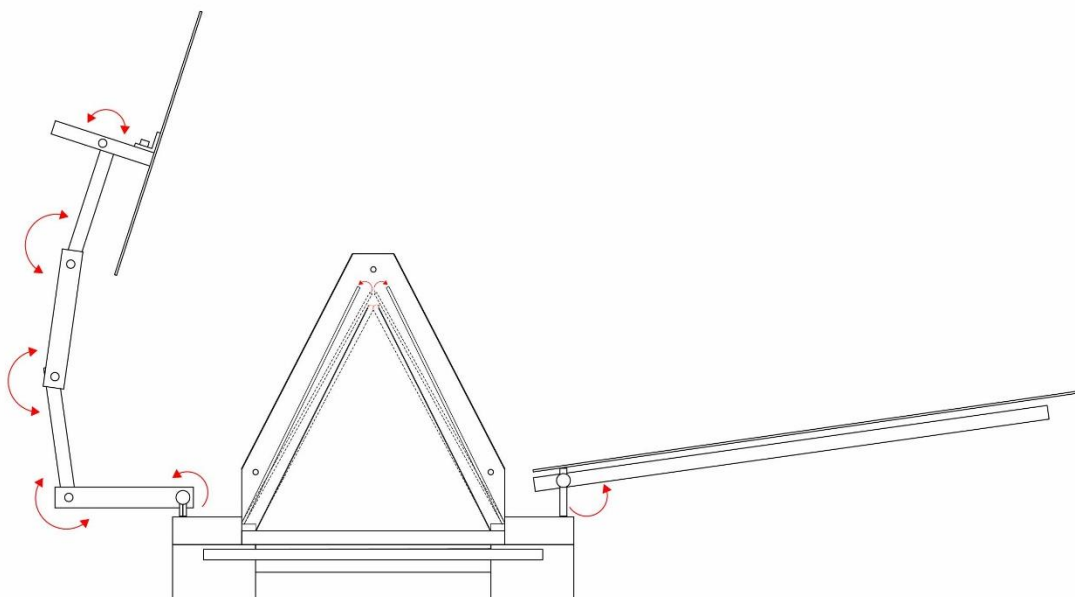


Fig. 41: Vista frontale del Newton Solar Dryer

3. SETUP DEL BANCO DI PROVA

3.1 Premessa

Quando si effettuano i test, per prima cosa bisogna disporre il banco prova. In questo modo è possibile misurare tutti i parametri necessari per ogni intervallo di tempo scelto. I test analizzati in seguito sono stati effettuati sui due prototipi realizzati. Il banco di prova di questo laboratorio è composto da:

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

L'intervallo di acquisizione fissato per le termocoppie e per il pireliometro è di 1 secondo. Poiché i test si sono svolti all'aperto, il banco prova deve ogni volta essere montato e, successivamente, smontato alla fine delle prove. Lo schema principale è rappresentato nella Figura 42 di seguito riportata:

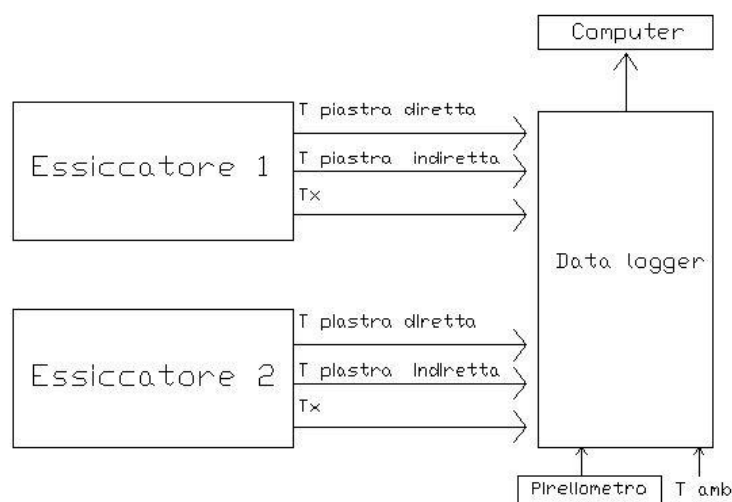


Fig. 42: Schema di funzionamento del banco di prova

In cui:

- T piastra diretta e T piastra indiretta sono le temperature misurate rispettivamente sulla lastra di acciaio diretta e su quella indiretta;
- Tx è la temperatura delle altre variabili misurate di volta in volta (temperature interne alla camera di essiccazione in vari punti e varie altezze);
- T amb rappresenta la temperatura ambiente
- DNI (W/m^2), cioè il valore della radiazione solare diretta misurata dal pireliometro.



Fig. 43: Banco di prova durante la misurazione

Di seguito vengono presentati più nel dettaglio i vari elementi.

3.2 Pireliometro

Il pireliometro è uno strumento che permette di misurare l'intensità della radiazione solare diretta. Nel corso delle analisi trattate in questo elaborato, è stato usato un pireliometro di un'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; un sensore misura la temperatura di questo corpo nero, dalla quale si può risalire alla radiazione solare incidente. Questa viene acquisita dal computer in W/m^2 grazie ad una precisa ed accurata calibrazione dello strumento.



Fig. 44: Pireliometro utilizzato

La flangia superiore del pireliometro presenta un piccolo foro attraverso il quale può passare a radiazione solare. Questa viene proiettata quindi sulla flangia inferiore, sulla quale è presente il corpo nero. Allineando la proiezione con il corpo nero, lo strumento entra in funzione, fornendo il valore corretto di radiazione solare diretta. Il pireliometro è montato su un inseguitore solare, che permette allo strumento di inseguire il sole durante l'arco della giornata. Di seguito vengono illustrate le caratteristiche tecniche dello strumento fornite dal costruttore.

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

La radiazione atmosferica può essere distinta in due regioni:

- la regione solare, detta anche “delle onde corte”, compresa tra 0.3 e 3 μm di lunghezza d'onda;

- la regione terrestre (detta anche “delle onde lunghe”), compresa tra 4 e 100 μm di lunghezza d’onda.

Il pireliometro si occupa della misura della radiazione ad onde corte, nella quale ricade approssimativamente il 99% dell’energia solare. 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 $5^\circ 43' 30''$. L’interno del pireliometro (costituito da un tubo di ottone) è nero, per permettergli di assorbire quanta più energia possibile. Il tubo è riempito di aria secca a pressione atmosferica e sigillato alle estremità.

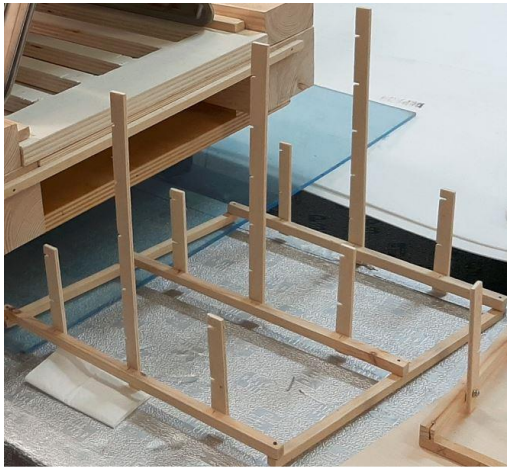
3.3 Termocoppie

Una termocoppia è un sensore per la misurazione della temperatura che si basa sull’effetto Seebeck, principio per cui una barra metallica sottoposta a un gradiente di temperatura comporta una differenza di potenziale ai capi della barra stessa, la cui entità è di alcuni μV per Kelvin, a seconda dei materiali usati. Attraverso il sistema di acquisizione avviene una conversione della differenza di potenziale in temperatura, che potrà essere letta nel computer. Le termocoppie vengono classificate in base al materiale da cui sono composte e chiamate con delle lettere (R, S, B, J, T, ecc.); sono strumenti molto diffusi e utilizzati, specialmente nelle misurazioni in laboratorio, perché sono economici, intercambiabili e misurano ampi range di temperatura. Non sono strumenti precisissimi ma si può arrivare ad un livello di accuratezza minore di un grado Celsius; la loro non perfetta linearità costituisce un altro svantaggio. L’affidabilità delle termocoppie è un problema complesso e strettamente legato al tipo di misurazione che si esegue e allo stato di conservazione; si potrebbe avere perdita di precisione ad esempio se si sottopone la termocoppia a ripetuti sforzi meccanici o se la si espone ad agente corrosivi. Per questi motivi è meglio cambiare la termocoppia dopo un certo numero di misurazioni, così da mantenere l’affidabilità sempre ad un buon livello. Le termocoppie usate in quest’analisi sono di tipo T, il cui nome originale era Rame-Costantana. Queste termocoppie possono lavorare nell’intervallo di temperature di -250°C e 400°C , ma il loro funzionamento è eccellente nel range di temperature compreso tra -200°C e 200°C . Di seguito vengono riportati nella Tabella 5 i dati tecnici di una termocoppia di tipo T forniti da un costruttore.

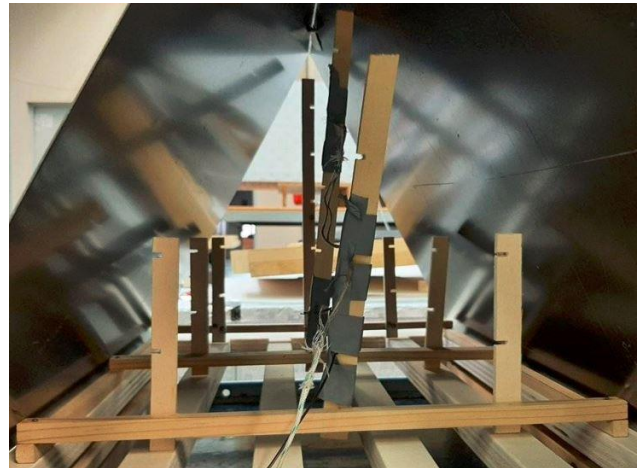
Materiali	Conduttore positivo	Rame
	Conduttore negativo	Rame-Nickel
T misurata	Uso continuo	Da -185 °C a 300 °C
	Breve durata	Da -250 °C a 400°C
Tolleranze	Tra $\pm 0,004$ e $\pm 0,015$ (espressa come scostamento in gradi Celsius)	

Tab. 5: Dati tecnici di una termocoppia di tipo T [15]

Nei test effettuati, le termocoppie sono state utilizzate per misurare la temperatura ambiente, la temperatura della piastra diretta e di quella indiretta e varie temperature interne alla camera di essiccazione. Per misurare queste ultime è stato allestito un sostegno in legno da poter inserire nella camera durante le prove. Il sostegno è composto da un telaio su cui sono stati fissati 9 listelli in 9 posizioni differenti; guardando la camera di essiccazione dall'alto, 3 listelli si trovano nella parte superiore, 3 nella zona centrale e 3 in basso. In ognuna di queste zone si ha un listello a sinistra, uno a destra e uno al centro. I listelli che si trovano a sinistra e a destra hanno un'altezza minore, mentre quelli nella zona centrale hanno un'altezza maggiore, in quanto lo spazio a disposizione è maggiore. Ogni 5 cm di altezza si ha su ogni listello una scanalatura su cui poter inserire la termocoppia. Questa verrà mantenuta quindi in una determinata posizione grazie anche all'utilizzo di nastro adesivo. Il sostegno viene appoggiato alla base e, attraverso di esso, è possibile misurare la temperatura nella camera di essiccazione in varie posizioni e a varie altezze, così da conoscere i gradienti di temperatura che si instaurano.



a)



b)

Fig. 45: Sostegno utilizzato (a) per le termocoppie non in funzione e (b) durante l'esperimento.

3.4 Computer e data logger

Le termocoppie, con cui si misurano le varie temperature, e il cavo in uscita dal pireliometro (per la misura della DNI) vengono collegate ad un data logger. L'acquisitore usato è un prodotto della "Pico Technology", azienda britannica che produce sensori per la diagnostica delle strumentazioni delle automobili; il prezzo è relativamente basso (circa 430 euro) e la risoluzione decisamente buona.



Fig. 46: Data logger utilizzato negli esperimenti

Vengono in Tabella 6 riportate le specifiche tecniche fornite dal costruttore:

Numero di canali	8
Incertezza sulla temperatura	$\pm 0,02\%$ e $\pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$
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

Tab. 6: Scheda tecnica acquirente

3.4.1 Software di acquisizione

L'acquirente viene fornito dal suo costruttore insieme ad uno specifico software per l'utilizzo dello strumento chiamato "PicoLog"; mediante questo programma è possibile configurare ogni canale del data logger, inserendo per ognuno di essi il nome, il tipo di termocoppia utilizzato e la frequenza di campionamento. Una volta partita la prova, attraverso un grafico ed una tabella, si può osservare sul computer l'andamento delle temperature in funzione del tempo, il valore della DNI e dei dati in ingresso dei vari canali. Una volta finita la registrazione i dati vengono esportati dal programma e studiati su un foglio Excel, per essere rielaborati e, dove necessario, corretti.

3.5 Igrometro

Per calcolare l'umidità relativa dell'ambiente esterno è stato utilizzato un semplice igrometro domestico, alimentato a batterie. Ha una lunghezza di 48 mm, una larghezza di 28 mm, uno spessore di 17 mm e un peso di 25 g, per cui è facilmente trasportabile.



Fig. 47: Igrometro utilizzato

Il range di misura dell'umidità relativa va dal 10 all'80 % e fornisce la misura ogni 10 secondi, con un'incertezza del ± 5 %. Oltre ad un sensore di umidità ha un sensore che misura la temperatura in un range che va da -50 a 70 °C con un'incertezza di ± 1 %. Il dispositivo durante la prova va posizionato in una zona d'ombra, in modo che la misura non sia influenzata dalla radiazione solare. Lo svantaggio di questo strumento è che non presenta un metodo di acquisizione, perciò questa dovrà essere fatta manualmente ad un intervallo di tempo prestabilito.

3.6 Centralina meteo

Per la misura della velocità del vento e delle raffiche di vento si è utilizzata una centralina di rilevazione meteo situata ad Ancona in località Breccie Bianche. Vengono registrati ad intervalli di 5 minuti: la temperatura e temperatura apparente dell'aria, il punto di rugiada, l'umidità relativa, la velocità del vento e delle raffiche di vento, la pressione atmosferica e le precipitazioni. I dati possono essere consultati in tempo reale, ma essendo registrati in un archivio si possono ottenere i dati relativi a un periodo di tempo precedente desiderato. Infatti, attraverso grafici e tabelle, selezionando un intervallo di tempo all'interno di un giorno, settimana, mese o anno, si possono ricavare, per ogni proprietà registrata, i relativi andamenti, valori medi, massimi e minimi. [16]

4. PARAMETRI FONDAMENTALI

Una volta affermatosi lo sviluppo di nuove tecniche e strumenti di essiccazione più sostenibili e a basso impatto ambientale, il passo successivo è stato quello di ricavare dei parametri per poter studiare l'efficienza dei vari essiccatori solari e fornire uno strumento di confronto. Di seguito verranno presentati e analizzati i seguenti parametri:

- Temperatura e tempo di essiccazione
- Velocità dell'aria
- Umidità relativa ambiente e nella camera di essiccazione
- Peso, dimensione e quantità dei prodotti da essiccare
- Radiazione solare diretta
- Tasso di essiccazione

Altri parametri di confronto per gli essiccatori solari da studiare per un'analisi più approfondita sono:

- Efficienza del collettore solare
- Efficienza dell'essiccatore
- Tasso di estrazione dell'umidità specifica (SMER)

4.1 Temperatura e tempo di essiccazione

Aumentando la temperatura dell'aria si aumenta il tasso di asciugatura in due modi. In primo luogo, aumenta la capacità dell'aria di trattenere l'umidità, in secondo luogo, l'aria riscalderà maggiormente il prodotto, aumentando la sua pressione di vapore. Tuttavia, c'è un limite all'aumento della temperatura dell'aria in un essiccatore. Il funzionamento ad alte temperature è comunemente limitato dalla sensibilità termica della maggior parte della frutta e della verdura. Se la temperatura è troppo alta all'inizio, può svilupparsi un guscio duro all'esterno (noto come case hardening) intrappolando l'umidità all'interno del guscio [17]. Temperature troppo alte alla fine del periodo di essiccazione possono causare la bruciatura del cibo. Si verificano cambiamenti irreversibili dei componenti dei tessuti di frutta e verdura se il prodotto è tenuto per periodi prolungati ad alta temperatura, anche se l'esposizione è insufficiente a produrre l'annerimento o la bruciatura. Un'elevata temperatura dell'aria di essiccazione potrebbe inoltre comportare una maggiore perdita di calore per conduzione e radiazione dalla camera di essiccazione, con conseguente riduzione complessiva dell'efficienza del sistema. La temperatura di essiccazione quindi, dipende dal prodotto da essiccare e di solito deve essere

compresa tra 40 °C e 70 °C. La scelta del binomio tempo/temperatura di essiccazione è molto importante nella definizione della qualità del prodotto ottenuto e permette di determinarne alcune importanti caratteristiche sensoriali e nutrizionali a fine processo. Temperature alte permettono tempi di essiccazione brevi, ma anche una qualità più bassa del prodotto finito. Si è notato che temperature più basse, quindi tempi di essiccamento lunghi, possono indurre reazioni di imbrunimento con contrastanti conseguenze sulla qualità: si ottiene un prodotto più scuro, ma allo stesso tempo più ricco di composti ad alto valore nutrizionale, la cui sintesi è stata permessa dal lungo periodo di essiccamento.

4.2 Velocità dell'aria

In alcuni impianti è possibile regolare la velocità e la direzione dell'aria. Tale parametro influisce sull'efficienza dell'essiccatore, perché influenza la temperatura all'interno della camera di essiccazione. Infatti una bassa velocità dell'aria comporta un aumento di temperatura di essiccazione, ma una minore asportazione di vapore a causa del ristagno di aria nella camera. Un'alta velocità invece, fa sì che l'aria esca troppo presto dalla camera di essiccazione, non riuscendo a riscaldarsi sufficientemente e non avendo un tempo di contatto adeguato con il cibo per aumentare il suo contenuto di umidità. La velocità ottimale del flusso d'aria per gli essiccatori solari è stata riportata a circa 0,75 m³/min per metro quadrato di area del vassoio [17].

4.3 Umidità relativa ambiente e nella camera di essiccazione

Per avere una maggiore efficienza nel processo di essiccazione, l'aria che entra nell'essiccatore nelle condizioni ambientali, deve avere la più bassa umidità relativa possibile. Infatti, tanto più l'aria è lontana dal suo punto di saturazione, tanto più vapore proveniente dai prodotti da essiccare potrà assorbire. L'umidità relativa dell'aria nella camera di essiccazione diminuisce all'aumentare della temperatura, ma aumenta con il numero di campioni da essiccare. Inoltre maggiore è la temperatura interna alla camera e maggiore è l'evaporazione che si ottiene dai prodotti, quindi si ottiene un aumento di umidità relativa.

4.4 Peso, dimensione e quantità dei prodotti da essiccare

Questa variabile è correlata all'efficienza di essiccamento dell'impianto e va valutata di volta in volta, considerando le caratteristiche del materiale da essiccare. Per uno stesso alimento, una dimensione e un peso maggiore del prodotto, comporta un aumento del tempo di essiccazione. Infatti avendo dei pezzi più piccoli, si ha un migliore scambio termico, quindi una migliore migrazione dell'acqua contenuta nei prodotti verso l'esterno, viceversa per un pezzo più grande [17]. Nel caso dell'essiccamento solare è buona norma non caricare molte materie prime, specialmente se il prodotto è ricco d'acqua perché una quantità troppo elevata potrebbe aumentare troppo l'umidità relativa nella camera di essiccazione, rallentando il processo.

4.5 Radiazione solare diretta

La radiazione solare è un parametro che dipende dal periodo dell'anno, dall'ora del giorno e dall'angolo di incidenza su una superficie. È un parametro fondamentale, perché da essa dipende la temperatura che si raggiunge nella camera di essiccazione, quindi l'efficienza dell'intero processo. Infatti una radiazione solare sugli specchi elevata, porta ad un riscaldamento maggiore e più veloce delle lastre di acciaio. La conseguenza sarà un maggiore scambio termico con l'aria presente nella camera di essiccazione, perciò temperature più elevate.

4.6 Tasso di essiccazione

È un parametro utilizzato per definire l'efficienza del sistema di essiccazione, è espresso in percentuale ed è calcolato attraverso la formula:

$$E = ((m_f - m_i) / m_i) * 100$$

In cui m_f e m_i rappresentano rispettivamente la massa del prodotto da essiccare dopo il processo e prima dell'inizio del processo.

4.7 Altri parametri

Sulla base del principio della prima legge della termodinamica, viene analizzato il rendimento termico di un essiccatore solare. Per ogni parte del sistema di essiccazione solare, come il collettore solare e la camera di essiccazione, l'equazione del bilancio energetico è sviluppata e

risolta con il metodo numerico. Nel prototipo presentato, il collettore solare e la camera di essiccazione coincidono. L'efficienza termica del collettore è il rapporto tra l'energia assorbita dall'aria mentre scorre attraverso di esso Q_a e l'energia solare ricevuta Q_c [17].

$$\eta = Q_a/Q_c = mc_p\Delta T/IA$$

in cui m è il flusso di massa che attraversa il collettore [kg/s], c_p è il calore specifico dell'aria [kJ/(kg K)], ΔT è la differenza di temperatura tra l'aria che esce dall'essiccatore e l'aria in ingresso (T ambiente), I è l'intensità della radiazione solare in W/m^2 e A è l'area del collettore in m^2 .

L'efficienza del sistema di un essiccatore solare è una misura di quanto efficacemente l'energia in entrata (radiazione solare) è usata per essiccare il prodotto. Per gli essiccatori solari a convezione naturale è data dalla relazione [17]:

$$\eta_e = WL/IA$$

dove W [kg], rappresenta il peso della quantità di acqua evaporata e può essere trovato dalla differenza della massa del prodotto prima e dopo l'essiccazione e L è il calore latente di vaporizzazione dell'acqua alla temperatura dell'aria in uscita in J/kg.

I fattori principali che influenzano l'efficienza del sistema di essiccazione includono l'aumento della temperatura dell'aria nella camera di essiccazione, la velocità del flusso d'aria, la velocità del vento e il design del collettore/essiccatore, che direttamente o indirettamente si riferiscono alle perdite termiche complessive nel sistema.

Le prestazioni di essiccazione possono anche essere valutate dal tasso di estrazione dell'umidità specifica (SMER) che è definito come il rapporto tra la massa di umidità rimossa in chilogrammi e il totale energia fornita. SMER è, in effetti, l'inverso del consumo energetico specifico [18].

4.8 Variabili non controllabili

4.8.1 Vento

Il vento è una variabile incontrollabile di grande impatto e per questo è importante considerarla. Nel caso di un essiccatore solare in cui l'aria in ingresso nella camera di essiccazione è quella dell'ambiente esterno, il fattore vento incide notevolmente in quanto asporterà una discreta

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

4.8.2 Temperatura ambiente

L'efficienza di un essiccatore solare è strettamente legata alla temperatura ambiente, in quanto rappresenta la temperatura dell'aria che entra nella camera di essiccazione. È una condizione atmosferica non facilmente replicabile e soprattutto nei test illustrati in seguito, effettuati nella stagione invernale, ha rappresentato uno svantaggio importante.

4.8.3 Radiazione solare

Il test dovrebbe venire scartato in caso di:

- Una variazione della radiazione solare maggiore di 100 W/m² nell'arco di 10 minuti;
- Radiazione solare non contenuta nell'intervallo di 450-1100 W/m².

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

4.9 Variabili controllabili

Le variabili controllabili sono:

- Inseguimento: l'essiccatore dovrebbe essere ruotato circa ogni 15-30 minuti, in modo da trovarsi sempre rivolto verso il sole;
- Inclinazione degli specchi: dovrebbe essere cambiata circa ogni 15-30 minuti, in funzione dell'altezza solare;
- Apertura superiore della camera di essiccazione: in base alle condizioni atmosferiche, quindi alle temperature che si raggiungono nella camera, può essere variata l'apertura superiore delle lastre di acciaio, per richiamare più o meno aria, quindi avere un flusso maggiore o minore;
- Area di apertura della base: considerando sempre le condizioni atmosferiche è possibile variare l'area delle aperture dalle quali entrerà aria nella camera di essiccazione.

5. TEST SPERIMENTALI

Le analisi si sono svolte presso il terrazzo del laboratorio del “DIISM” con l’essiccatore di tipo Newton descritto in precedenza nei mesi di novembre e dicembre 2021 e gennaio 2022. I test svolti mirano a fornire dei risultati preliminari per quanto riguarda il comportamento termodinamico del prototipo. Infatti le analisi si sono focalizzate sulle temperature raggiungibili sulle lastre di acciaio e nella camera di essiccazione, in funzione delle condizioni ambientali, dell’area di apertura della base e dell’apertura superiore dell’essiccatore. Di seguito verranno riportate alcune delle prove più significative svolte, utilizzando la base con i 24 fori descritta precedentemente.

5.1 Prova del 30/11/2021

In questa prova si sono volute valutare le temperature chiudendo l’apertura superiore tra le lastre di acciaio e si è utilizzato il regolatore di flusso d’aria, lasciando libero l’ingresso solo attraverso 4 fori della base. L’area totale di apertura era quindi di $232,35\text{cm}^2$. La prova è iniziata alle 12:35 e si è conclusa alle 15:43, cioè 3h e 8 minuti. La radiazione solare media registrata durante il test è stata di $684,6\text{ W/m}^2$, la velocità media dell’aria era di $0,85\text{ m/s}$ e un’umidità relativa media dell’aria del $36,42\%$. In questa prova si è misurata la temperatura ambiente, la temperatura della piastra diretta e di quella indiretta e le temperature nella zona centrale della camera di essiccazione a 5 cm, 15 cm e 20 cm di altezza. Nel grafico in Figura 48 è riportato l’andamento delle temperature del test. Le ascisse indicano il tempo trascorso dall’inizio dell’esperimento, le ordinate il valore della temperatura espresso in gradi Celsius.

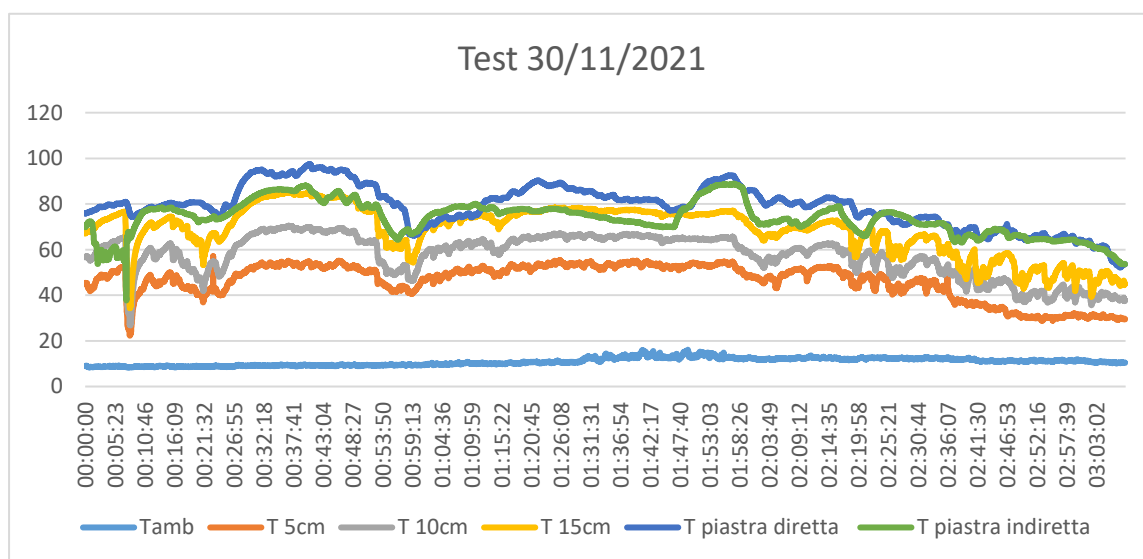


Fig. 48: Grafico andamento temperature durante la prova del 30/11/2021

In Tabella 7 si riportano le temperature medie e massime che si ottengono durante la prova:

T medie		T massime	
<i>T</i> ambiente	11,09	<i>T</i> ambiente	16,16
<i>T</i> 5cm	50,84	<i>T</i> 5cm	57,02
<i>T</i> 15cm	62,46	<i>T</i> 15cm	70,36
<i>T</i> 20cm	74,29	<i>T</i> 20cm	85,14
<i>T</i> piastra diretta	83,82	<i>T</i> piastra diretta	97,45
<i>T</i> piastra indiretta	77,17	<i>T</i> piastra indiretta	88,88

Tab. 7: Temperature medie e massime misurate durante la prova del 30/11/2021

A causa della bassa radiazione solare sulle due piastre non si raggiungono delle temperature molto elevate, ma nonostante ciò all'interno della camera di essiccazione si ottengono alte temperature. Infatti la temperatura a 20 cm di altezza è paragonabile alla temperatura della piastra indiretta. Questo accade perché non avendo un'apertura superiore e avendo una minima apertura sulla base, il flusso entrante nella camera è esiguo, perciò l'aria ristagna al suo interno e si scalda maggiormente.

5.2 Prova del 17/12/2021

In questo esperimento si è utilizzato il regolatore di flusso come nel caso precedente, ma si è utilizzata un'apertura superiore tra le lastre di acciaio di 4 mm, ottenuta attraverso dei distanziatori. La prova è iniziata alle 12:55 ed è finita alle 15:52, per un totale di 2h e 57 minuti. La radiazione solare media registrata durante il test è stata di 500,32 W/m², la velocità media dell'aria era di 2,1 m/s e un'umidità relativa media dell'aria del 70,23 %. In questa prova si sono misurate le stesse temperature considerate nel caso precedente. Si riporta ora in Figura 49 l'andamento delle temperature e della radiazione solare diretta:

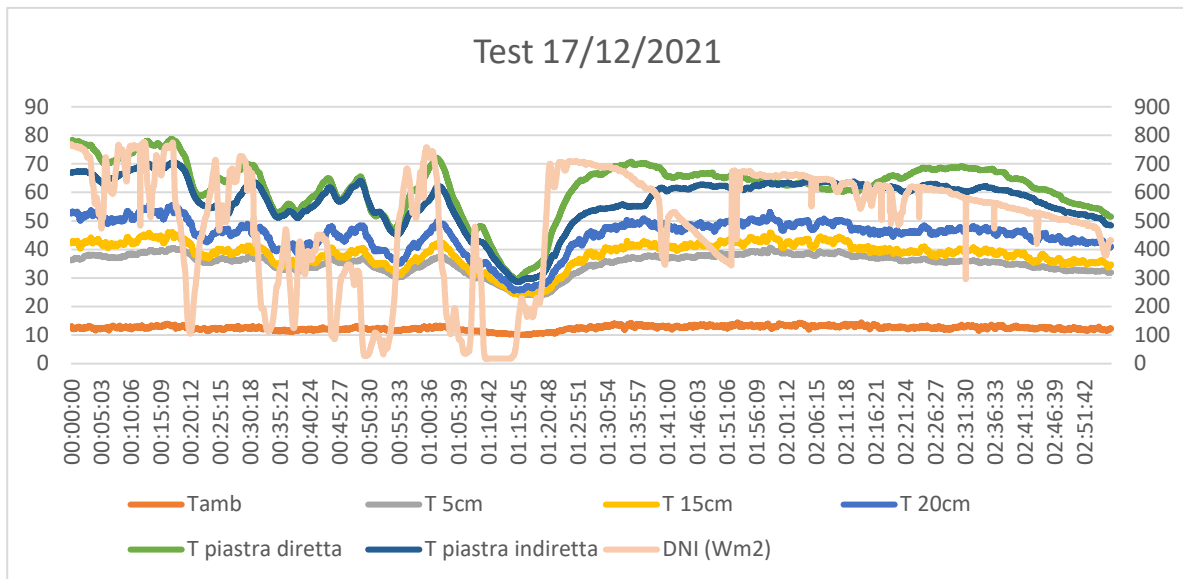


Fig. 49: Grafico andamento temperature e radiazione solare diretta durante la prova del 17/12/2021

Possiamo notare un'oscillazione elevata della radiazione solare diretta e come questa influenzi notevolmente l'andamento delle temperature, di cui si riportano, in Tabella 8, le medie ottenute durante il test:

T medie		T massime	
<i>T</i> ambiente	12,47	<i>T</i> ambiente	14,45
<i>T</i> 5cm	35,2	<i>T</i> 5cm	40,7
<i>T</i> 15cm	38,42	<i>T</i> 15cm	46,11
<i>T</i> 20cm	45,04	<i>T</i> 20cm	55,62
<i>T</i> piastra diretta	62	<i>T</i> piastra diretta	78,7
<i>T</i> piastra indiretta	56,99	<i>T</i> piastra indiretta	70,56

Tab. 8: Temperature medie e massime misurate durante la prova del 17/12/2021

Rispetto al caso precedente si hanno delle temperature inferiori delle piastre e all'interno della camera di essiccazione, nonostante una temperatura ambiente media più alta. Questo è giustificato dal fatto che la radiazione solare diretta è notevolmente inferiore e dal fatto di avere l'apertura superiore delle piastre, che non si aveva nella prova precedente. Nella Figura 50 è riportato il grafico della velocità del vento e delle raffiche di vento, ottenuto dai dati in archivio della centralina descritta in precedenza, selezionando l'intervallo di tempo relativo al periodo del test.

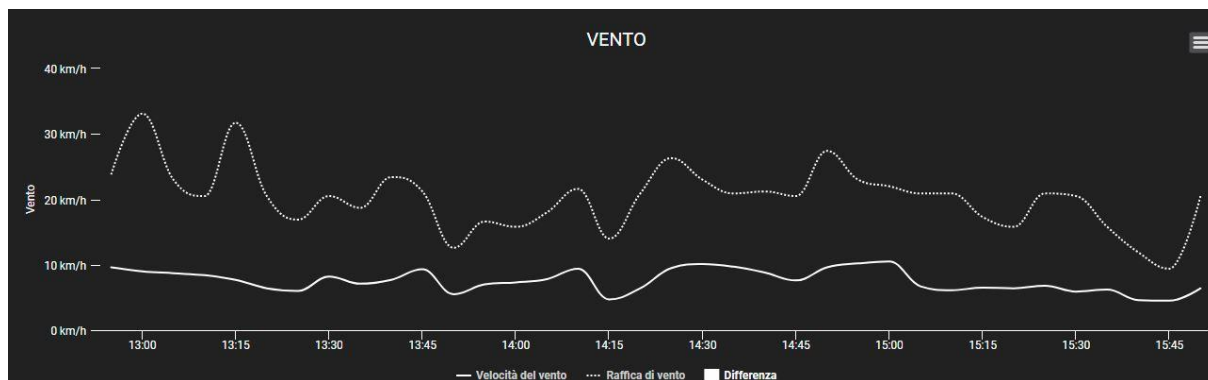


Fig. 50: Grafico della velocità del vento e delle raffiche di vento durante la prova del 17/12/2021

Da questo si nota che nonostante una modesta velocità del vento e la presenza di raffiche ad elevata velocità, l'andamento delle temperature all'interno della camera di essiccazione non mostra un moto oscillatorio tipico delle giornate ventose, ma dipendente solamente dalla radiazione solare. Questo è dovuto al fatto della presenza del regolatore di flusso applicato sulla base durante questo test.

5.3 Prova del 19/12/2021

Questo test è stato effettuato lasciando libero l'ingresso dell'aria in tutti i 24 fori della base, cioè con un'area di apertura di 1394,11 cm², la massima possibile. Inizialmente la camera di essiccazione era chiusa superiormente, in seguito è stata dotata di un'apertura di 4 mm. Si può suddividere quindi la prova in due parti: la prima, senza apertura superiore, inizia alle 9:18 e termina alle 12:53, quando inizia la seconda che poi finirà alle 13:55. In questa prova si sono misurate le temperature delle piastre e quelle interne alla camera di essiccazione nella zona centrale a 15 cm e a 20 cm. Si riporta ora in Figura 51 il grafico dell'andamento delle temperature.

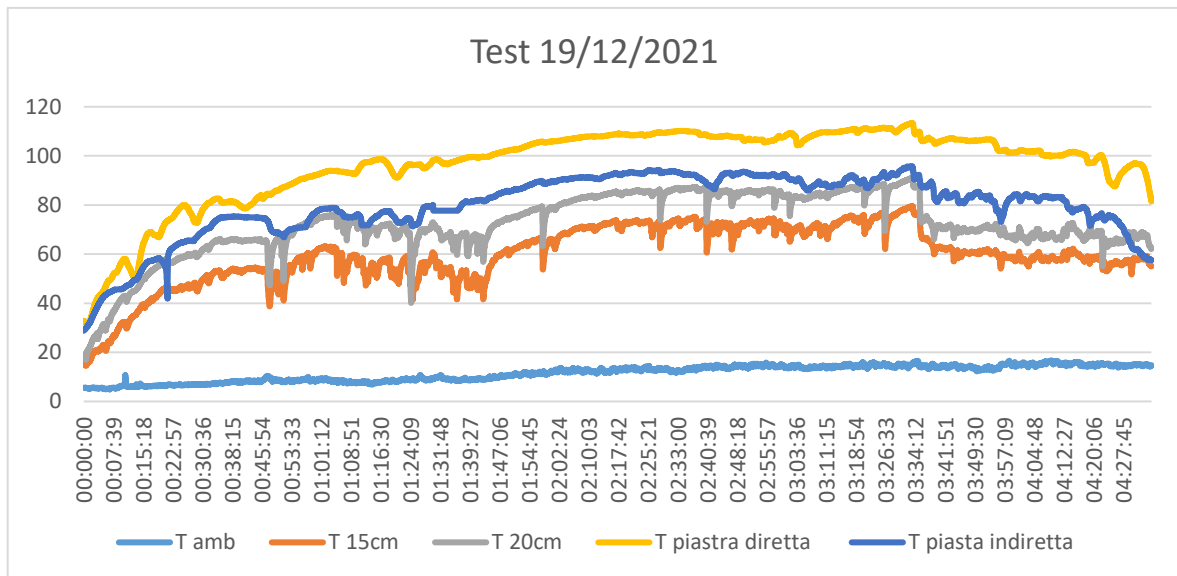


Fig. 51: Grafico andamento temperature durante la prova del 19/12/2021

La prova è iniziata la mattina alle 9:18, quando il sole era ancora molto basso, per cui si può notare che si raggiungono le temperature di regime dopo circa 37 minuti. Le temperature interne alla camera di essiccazione presentano un'oscillazione maggiore rispetto ai casi precedenti, a causa del fatto che si ha un'apertura totale della base, per cui una dipendenza maggiore alla variazione della velocità dell'aria. Si riportano di seguito nella Tabella 9 le temperature medie e massime registrate nella prima parte della prova a partire dalla condizione di regime:

T medie		T massime	
T_{ambiente}	11,97	T_{ambiente}	16,57
$T_{15\text{cm}}$	65,88	$T_{15\text{cm}}$	79,46
$T_{20\text{cm}}$	79,38	$T_{20\text{cm}}$	90,86
$T_{\text{piastra diretta}}$	104,57	$T_{\text{piastra diretta}}$	113,37
$T_{\text{piastra indiretta}}$	86,77	$T_{\text{piastra indiretta}}$	95,88

Tab. 9: Temperature medie e massime misurate durante la prima parte di prova del 19/12/2021

Alle 12:53, cioè dopo 3h e 35 minuti della prova viene applicata l'apertura superiore di 4 mm, per cui termina la prima parte e inizia la seconda. Questo può essere notato anche dal grafico: infatti, in corrispondenza del tempo 3:35 si ha una diminuzione drastica delle temperature interne alla camera di essiccazione e una diminuzione di temperatura meno accentuata sulle piastre, a parità di tutte le altre condizioni. Si inseriscono di seguito in Tabella 10 anche le temperature medie e massime ottenute in questa parte di prova:

T medie		T massime	
<i>T</i> ambiente	14,68	<i>T</i> ambiente	16,68
<i>T</i> 15cm	59,06	<i>T</i> 15cm	66,61
<i>T</i> 20cm	68,34	<i>T</i> 20cm	75,6
<i>T</i> piastra diretta	100,9	<i>T</i> piastra diretta	107,36
<i>T</i> piastra indiretta	78,57	<i>T</i> piastra indiretta	89,5

Tab. 10: Temperature medie e massime misurate durante la seconda parte di prova del 19/12/2021

Nonostante la seconda parte della prova ha una durata minore rispetto alla prima ed è stata effettuata nel periodo più caldo della giornata, le temperature sono minori. Ciò dimostra il fatto che l'apertura superiore della camera di essiccazione comporta un flusso d'aria maggiore circolante al suo interno, con un conseguente abbassamento delle temperature.

5.4 Prova del 18/01/2022

In questo test si è mantenuta l'apertura totale della base e si è adottata un'apertura superiore delle piastre di 0,6 mm, ottenuta con dei distanziatori. La prova ha avuto inizio alle 11:47 e si è conclusa alle 15:43, per un totale di 3h e 54 minuti. La radiazione solare media registrata durante il test è stata di $725,57 \text{ W/m}^2$, la velocità media dell'aria era di 1,76 m/s e un'umidità relativa media dell'aria del 80,6 %. In questa prova si è misurata la temperatura ambiente, la temperatura della piastra diretta e di quella indiretta e le temperature nella zona centrale della camera di essiccazione a 5 cm e a 20 cm di altezza. Si riporta in Figura 52 l'andamento delle temperature e della radiazione solare durante il test:

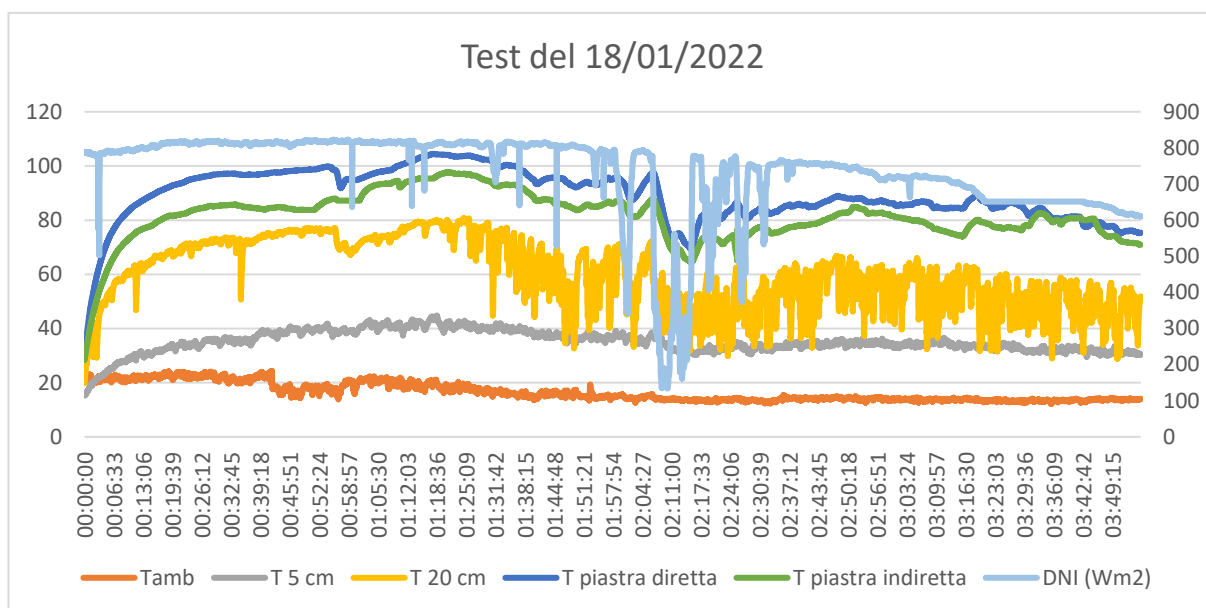


Fig. 52: Grafico andamento temperature e radiazione solare diretta durante la prova del 18/01/2022

Viene riportato in Figura 53 anche l'andamento della velocità del vento e delle raffiche di vento, ricavato dalla centralina meteo, relativo all'intervallo di tempo in cui si è svolto il test:

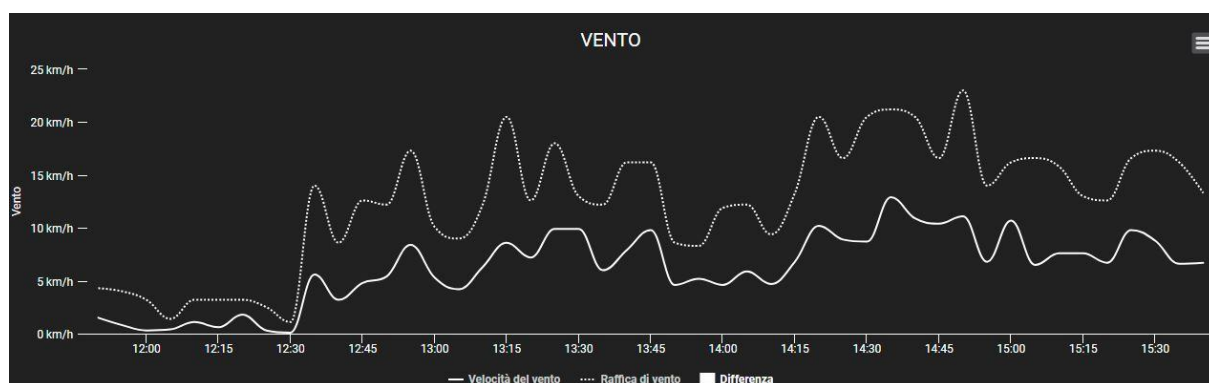


Fig. 53: Grafico della velocità del vento e delle raffiche di vento durante la prova del 18/01/2022

Si nota che dopo circa 1h e 20 minuti dall'inizio del test, quindi dalle 13:15 circa, l'andamento della temperatura a 20 cm di altezza inizia ad essere oscillatorio. Ciò è giustificato da un aumento della velocità del vento e soprattutto delle raffiche di vento. La fase di riscaldamento ha una durata di circa 26 minuti. Vengono ora riportate nella Tabella 11 le temperature medie e massime ottenute a partire dal raggiungimento dei valori di regime:

T medie		T massime	
<i>T ambiente</i>	15,77	<i>T ambiente</i>	20,1
<i>T 5cm</i>	35,85	<i>T altezza 5cm</i>	44,83
<i>T 20cm</i>	59,93	<i>T 20cm</i>	80,72
<i>T piastra diretta</i>	90,17	<i>T piastra diretta</i>	104,45
<i>T piastra indiretta</i>	82,81	<i>T piastra indiretta</i>	97,78

Tab. 11: Temperature medie e massime misurate durante la prova del 18/01/2022

5.5 Risultati delle prove

Le prove sperimentali riportate rappresentano dei test preliminari per studiare il comportamento dell'essiccatore solare dal punto di vista termo-fluidodinamico in modo da comprendere se e come esso possa essere effettivamente utilizzato per il suo scopo. Per effettuare un confronto, si riassumono nella Tabella 12 la radiazione solare media e le temperature medie ottenute per ogni prova:

	30-nov	17-dic	19-dic	19-dic	18-gen
<i>T ambiente</i>	11,09	12,47	11,97	14,68	15,77
<i>T 5cm</i>	50,84	35,2	-	-	35,85
<i>T 15cm</i>	62,46	38,42	65,88	59,06	-
<i>T 20cm</i>	74,29	45,04	79,38	68,34	59,93
<i>T piastra diretta</i>	83,82	62	104,57	100,9	90,17
<i>T piastra indiretta</i>	77,17	56,99	86,77	78,57	82,81
Radiazione diretta	684,6	500,32	790,4	796,8	725,57

Tab. 12: Riepilogo delle temperature medie e della radiazione solare media ottenute durante le prove illustrate

Ciò che maggiormente influenza le temperature che si raggiungono sulla piastra diretta e su quella indiretta è la radiazione solare. Si nota che in tutte le prove la piastra diretta ha una temperatura maggiore rispetto alla piastra indiretta, questo a causa del fatto che la piastra diretta, trovandosi di fronte al sole, riceve, oltre alla radiazione riflessa dagli specchi, anche la

radiazione solare diretta. La differenza di temperatura tra le piastre va dai 5 ai 15 °C ed è tanto più marcata quanto maggiore è la radiazione solare. Come ci si aspettava, in tutte le prove si osserva che nella camera di essiccazione si ha un gradiente verticale di temperatura. Si nota come la temperatura media misurata a 5 cm di altezza il 17 Dicembre e il 18 Gennaio è simile, nonostante il 18 Gennaio le temperature sulle piastre era molto più elevata. Questo è dovuto al fatto che nella prova del 17 Dicembre si adottava una chiusura della base, mentre nell'altra prova la base era completamente aperta. La temperatura a 20 cm di altezza invece è maggiore nel caso del 18 Gennaio, poiché nella prova del 17 Dicembre si ha un'apertura superiore maggiore (4 mm piuttosto che 0,6 mm), quindi un maggiore flusso d'aria uscente. Le due prove effettuate il 19 Dicembre, svolte con le stesse condizioni ambientali, mostra come passando da una chiusura superiore a un'apertura di 4 mm, si abbia una diminuzione delle temperature interne di circa 10 °C e una leggera diminuzione delle temperature sulle piastre. Infatti, nonostante un leggero aumento della radiazione solare, un maggiore flusso di aria comporta anche una diminuzione delle temperature delle piastre, a causa della maggiore dispersione di calore. Si può concludere, quindi, che le temperature delle piastre dipende sia dalla radiazione solare che dal flusso d'aria circolante nella camera di essiccazione. A loro volta, le temperature interne dipendono dal flusso d'aria e dalle temperature delle piastre. Di conseguenza, avere una chiusura maggiore della base, così come avere una chiusura più piccola nella parte superiore, comporta una diminuzione del flusso di aria, quindi un aumento delle temperature, e viceversa.

6. CONCLUSIONI

In questo studio si è cercato di approfondire le opportunità derivanti dall'uso di essiccatori solari e dai miglioramenti che si possono ottenere attraverso un loro sviluppo tecnologico. Partendo dai requisiti richiesti da un essiccatore solare e dallo studio degli elementi e del funzionamento del forno solare di tipo Newton, è stato possibile progettare e sviluppare delle modifiche per ottenere un essiccatore solare. I test illustrati in questo elaborato sono mirati a conoscere il funzionamento di base dello strumento e a fornire un'idea sulle temperature ottenibili. In base al tipo di prodotto da essiccare, si dovrebbero raggiungere temperature interne alla camera di essiccazione comprese tra 40 e 70 °C. Nonostante le prove fossero state effettuate nelle stagioni più fredde, quindi con una bassa radiazione solare, i risultati ottenuti sono stati soddisfacenti e dimostrano che effettivamente il prototipo realizzato può essere utilizzato come essiccatore solare, pur richiedendo ulteriori miglioramenti. I test hanno dimostrato che gli elementi che influenzano maggiormente le prestazioni dello strumento sono i seguenti: gli specchi e la loro inclinazione, la base (in particolare le aperture che si hanno su di essa), le lastre di acciaio e l'apertura superiore della camera di essiccazione. Le modifiche future dovranno quindi migliorare le prestazioni agendo su questi elementi e diminuendo le dispersioni termiche che si hanno attualmente nella camera di essiccazione. Da test più approfonditi sarà possibile risalire a valori ottimali delle aperture sulla base e delle aperture superiori, in funzione delle condizioni ambientali. Inoltre all'interno della camera si instaura un gradiente verticale di temperatura, per cui sarà interessante comprendere a quale altezza posizionare i vassoi di essiccazione, in base alle condizioni e alle temperature che si raggiungono di volta in volta. Sarà importante studiare in maniera approfondita anche i flussi termici che si instaurano sulle lastre di acciaio in funzione della radiazione solare e dell'inclinazione degli specchi. Questi ultimi, devono garantire la maggiore concentrazione possibile di radiazione sulla camera di essiccazione, così da arrivare ad un prototipo con la maggiore efficienza ottenibile. Un ulteriore miglioramento delle prestazioni dell'essiccatore può essere fornito da un sistema di accumulo del calore, in modo da poter continuare il processo anche nelle ore in cui non si ha una disponibilità di energia solare.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>
- [2] <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020/emissions>
- [3] https://snam.it/it/transizione_energetica/il_contesto/sfida_climatica/
- [4] <https://www.iea.org/data-and-statistics/>
- [5] <https://www.pannellisolari.name>
- [6] A. Kamarulzaman, M. Hasanuzzaman, N. A. Rahim, “Global advancement of solar drying technologies and its future prospects”, 2021
- [7] V. Belessiotis, E. Delyannis, “Solar energy”, vol. 85, n° 8, 2011
- [8] G. Coccia, A. Aquilanti, S. Tomassetti, A. Ishibashi, G. Di Nicola, “Design, manufacture and test of a low-cost solar cooker with high performance light-concentrating lens” 2021
- [9] Soteris A. Kalogirou, “Solar Energy Engineering”, Processes and System, Second Edition, cap. 7.4, pp. 415-425
- [10] SCI – Solar Cookers International, Newton Solar Oven, Matteo Muccioli
- [11] Esiglass, Design glass solutions
- [12] Saint-Gobain, comfort e sostenibilità in edilizia
- [13] EN 12664
- [14] Nicola Ulivieri, Engineer, PhD, <https://www.nicolaulivieri.com/sundata.html>
- [15] TC – Misure e Controlli srl.
- [16] <https://stazioni.soluzionimeteo.it/breccebianche/indexDesktop.php>
- [17] M. Augustus Leon, S. Kumar, S. C. Bhattacharya, “A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers”, 2002
- [18] P. K. Jangde, A. Singh, T. V. Arjunan, “Efficient solar drying techniques: a review”, 2021

8. RINGRAZIAMENTI

Nel concludere questo elaborato, vorrei ringraziare tutte le persone che mi hanno accompagnato nel percorso dei miei studi.

Innanzitutto vorrei ringraziare il mio relatore, il Prof. Giovanni Di Nicola, per avermi concesso l'opportunità di conoscere e affrontare il tema dell'essiccazione solare, per la sua presenza e disponibilità con cui ha fornito preziosi insegnamenti.

Grazie al Dott. Sebastiano Tomassetti, correlatore di tesi, e al Dott. Francesco Pio Muciaccia per il sostegno, l'aiuto e i suggerimenti ricevuti durante il periodo di tirocinio e nella stesura della tesi.

Un ringraziamento all'Ing. Matteo Muccioli per avermi dato la possibilità di studiare il suo progetto e per i suoi consigli, sempre utili, per condurre questo lavoro.

Grazie alla mia famiglia che, nelle difficoltà, ha sempre avuto una parola di conforto ed incoraggiamento nei miei confronti e mi ha permesso di diventare ciò che sono oggi.

Grazie agli amici di sempre, per avermi regalato momenti di gioia e spensieratezza, che hanno reso questo periodo più sereno.

Ringrazio Matteo e Federico, perché aiutandoci e supportandoci a vicenda siamo arrivati insieme a questo traguardo.