

**ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
- Sede di Forlì -

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA MECCANICA
Classe: L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In: Disegno Assistito dal Calcolatore

STUDIO ED OTTIMIZZAZIONE DEL "FIORE DEL DESERTO"

CANDIDATO
Marco Molari

RELATORE
Chia.mo Prof. Luca Piancastelli

Anno Accademico 2012 - 2013
Sessione II

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1 - Il disco parabolico	
1.1 - Stato dell'arte degli impianti solari a concentrazione	7
1.2 - Il solare termodinamico in Italia	10
1.3 - Il disco parabolico	
1.3.1 - <i>La parabola</i>	12
1.3.2 - <i>Il dimensionamento</i>	14
1.4 - Le travi di sostegno	
1.4.1 - <i>Le travi verticali</i>	17
1.4.2 - <i>Le travi di rinforzo</i>	21
1.5 - Il ricevitore	23
1.5.1 - <i>La forma del ricevitore</i>	25
Capitolo 2 - L'irraggiamento solare	
2.1 - Il sole	29
2.1.1 - <i>Composizione chimica</i>	29
2.1.2 - <i>La propagazione dell'energia attraverso gli strati</i>	30
2.2 - La radiazione solare	32
2.3 - L'energia solare giornaliera emessa	34
2.4 - Funzionamento a 24 ore dell'impianto	38
Capitolo 3 - Il ciclo termodinamico	
3.1 - Il ciclo Rankine	41
3.2 - Gli ORC	41
3.2.1 - <i>Definizione generale</i>	44
3.2.2 - <i>I principali utilizzi</i>	46
3.3 - Il ciclo per il progetto Fiore del Deserto	47
3.4 - I fluidi per la trasmissione dell'energia	49
3.4.1 - <i>Il fluido primario: R245fa</i>	50
3.4.2 - <i>Il glicole etilenico</i>	55
3.4.3 - <i>Il fluido secondario: miscela-acqua glicole</i>	56
3.5 - Il rendimento del ciclo	59
Capitolo 4 - Il fiore del deserto e i suoi componenti	
4.1 - I serbatoi e il problema dell'accumulo	63
4.1.1 - <i>Calcolo della quantità di fluido riscaldato</i>	64
4.1.2 - <i>Il problema dell'accumulo</i>	66
4.2 - La pompa a portata variabile del ciclo secondario	69

4.3 - La pompa a portata costante del ciclo primario	73
4.4 - Lo scambiatore a piastre	74
4.5 - Il condensatore	75
4.6 - Il motore a palmole	76
Conclusione	79
Bibliografia	80

INTRODUZIONE

"Quando sei in salute, non hai bisogno di altro". Quante volte l'abbiamo sentito dire. Eppure siamo arrivati ad un punto tale che l'uomo non può più guardare solo alla propria salute, ma deve salvaguardare anche quella del proprio pianeta. Ogni giorno le malattie per inquinamento aumentano vertiginosamente, i cambiamenti climatici generano disastri. E tutto questo è causato dall'uomo. Non si sa per quanto ancora saremo in grado di maltrattare questo pianeta.

Il problema dell'assenza di risorse per la generazione di energia è oramai sempre più sentito poiché il petrolio e gli altri combustibili fossili (gas naturale e carbone) sono la base della nostra civiltà e del nostro modo di vivere. Sappiamo che circa il 90% dell'energia primaria prodotta oggi in tutto il mondo (escludendo il legno) viene dai combustibili fossili, e di questa la singola fonte più importante è il petrolio greggio (circa il 40%), seguito poi dal gas naturale, dal carbone e poi a distanza dalle altre fonti. Al momento, il mondo consuma più di 80 milioni di barili di petrolio al giorno, 29 miliardi di barili l'anno. Questa cifra sta salendo rapidamente, come già accade da decenni e ci si aspetta in maniera generale che continuerà a farlo nei prossimi anni: l'Agenzia internazionale per l'energia prevede entro il 2030 un consumo di 121 milioni di barili al giorno. Ma sappiamo tutti che il petrolio non è una fonte rinnovabile di energia e prima o poi scomparirà per sempre, e questo dato è strettamente tenuto nascosto, sia per ragioni commerciali che politiche. Basti solo pensare che gli studiosi più ottimisti pensano che ci siano ancora circa 900 miliardi di barili ancora da scoprire, che sommati alle riserve accertate danno la cifra di 2.600 miliardi. Visto che il consumo mondiale si aggira sugli 80 milioni di

barili al giorno e continua a crescere del 2 per cento l'anno (ma c'è chi dice di più), la riserva di 2.600 miliardi collocherebbe il picco globale intorno al 2030; non così lontano da oggi.

Questi dati ci fanno capire che il petrolio non sarà in grado di soddisfare i futuri consumi: per questo è necessario effettuare ricerche nei campi delle energie rinnovabili, per aumentare le efficienze delle macchine che le sfruttano in modo da coprire il fabbisogno energetico, che sia cittadino, nazionale, mondiale.

Gli impianti solari a concentrazione CSP (Concentrating Solar Thermal Power) sono una ottima soluzione tra le possibili disponibili, in quanto utilizzano l'energia termica del sole e allo stesso tempo non producono alcun tipo di inquinante. Le tecnologie che impiegano l'energia solare sono di due tipologie: quella termoelettrica e quella fotovoltaica. La prima sfrutta la componente termica dell'energia solare per portare un fluido ad alta temperatura in modo da potere ottenere da esso energia elettrica; essendo per essa necessaria solo la componente diretta dell'energia solare, questa tecnologia è applicabile con grandi rendimenti solo in quelle aree in cui è presente una elevata insolazione. La seconda invece, ovvero la tecnologia fotovoltaica, utilizza la radiazione elettromagnetica per attivare reazioni chimico-fisiche e permettere quindi una conversione diretta da radiazione solare a energia elettrica; questa, a differenza della termoelettrica, è in grado di sfruttare pure la componente diffusa della radiazione, avendo però livelli di efficienza minori per quanto riguarda la conversione dell'energia. La tecnica termoelettrica è quella che, tra le due, nell'ultimo periodo ha subito il maggiore incremento del suo potenziale, soprattutto il ramo definito "a concentrazione", in quanto sfrutta la capacità di riflessione dei raggi solari per convogliarli in un unico punto e aumentare così il

potere termico, e diventare una valida alternativa alle altre fonti di energia primaria.

Come appena descritto, questi impianti, definiti per l'appunto "solari termodinamici" in quanto uniscono alla captazione dell'energia termica solare un ciclo termodinamico per la trasformazione dell'energia termica in energia elettrica, trovano le più favorevoli condizioni di applicazione nelle regioni con grandi valori di irraggiamento solare. Queste regioni, evidenziate nella Figura 1, comprendono l'Australia, la Cina, l'India e tutte le regioni che si affacciano sull'Oceano Pacifico, il Medio Oriente, la quasi totalità dell'Africa, alcune regioni dell'America Meridionale, in particolare Brasile e Cile, e la parte sud occidentale degli Stati Uniti, in particolare lo stato della California, e il Messico. Questa fascia, che si estende di circa 35° a Nord e Sud dell'Equatore, è chiamata Sun Belt, ed è la zona che più sarebbe adatta ad accogliere

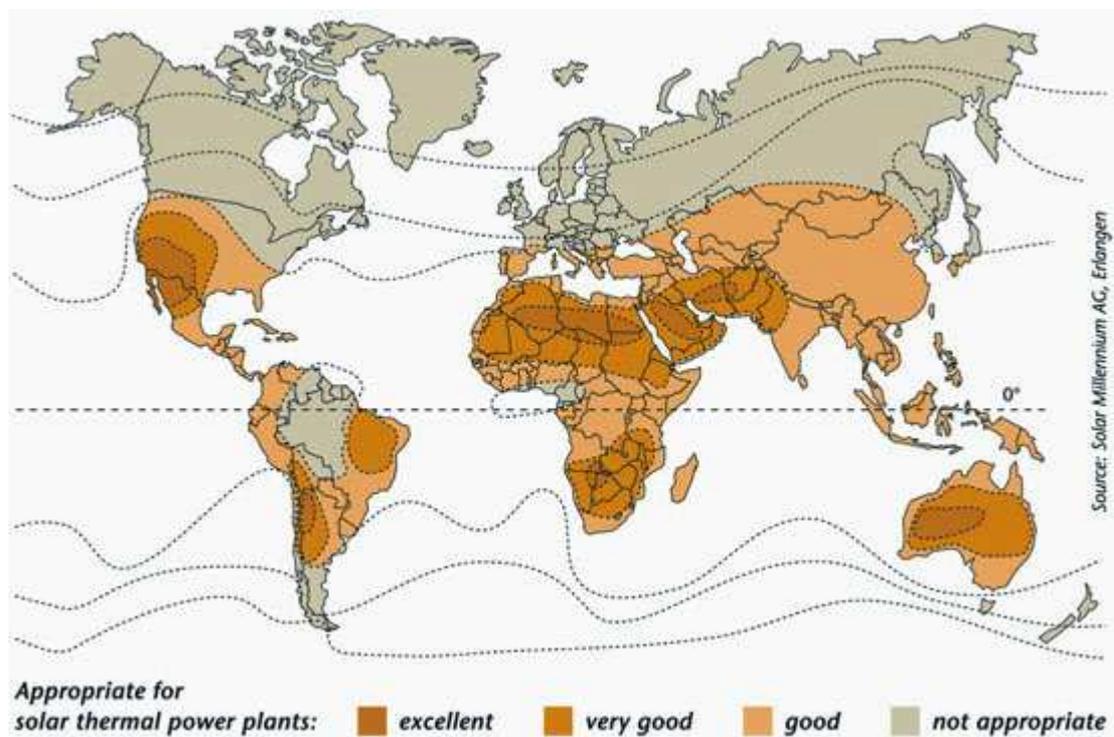


Figura 1: Aree della superficie terrestre interessate allo sviluppo del solare termodinamico

impianti termosolari; potremmo all'interno di essa inserire pure i territori europei che si affacciano sul Mediterraneo, in particolare Italia, Grecia e la penisola Iberica. Tra questi, sono prediletti i paesi del Nord Africa e del Medio Oriente, in quanto possiedono vaste aree desertiche, inadatte per essere sfruttate a livello di agricoltura e pastorizia, e quindi ideali per l'installazione di grandi impianti solari. Le aree del Nord Africa e del Medio Oriente, oltre a registrare i picchi massimi di irraggiamento solare annuo, possiedono vaste aree territoriale desertiche che, essendo inadatte all'utilizzo in agricoltura o alla pastorizia, si pongono come ottime candidate per l'installazione di grandi impianti solari.

Il progetto "Fiore del Deserto", esposto in questo elaborato, si colloca proprio nell'ambito del solare termodinamico: si tratta di un concentratore solare costituito da un insieme di specchi formanti un disco parabolico con ricevitore puntuale, atto alla produzione di energia elettrica. Deve il proprio nome alla forma degli specchi: essi infatti, suddivisi in settori circolari, avvolgono il ricevitore centrale proprio come i petali del fiore fanno con il pistillo. L'obbiettivo di questa tesi è quello di studiare la possibilità della realizzazione di un concentratore solare in zone desertiche con alta intensità di radiazione solare, con la produzione di energia elettrica non solo durante le ore solari, ma anche quelle notturne, tramite l'applicazione di un sistema di accumulo.

Nel capitolo 1 viene prima svolta un'introduzione sullo stato odierno del solare termodinamico, per poi passare alla esposizione del disco parabolico e del ricevitore. Nel capitolo 2 viene spiegata la composizione della radiazione solare e i calcoli svolti per comprendere l'intensità dell'energia solare giornaliera. Nel capitolo 3 viene esposto il ciclo termodinamico scelto per il progetto "Fiore del deserto", mentre

nell'ultimo capitolo vengono illustrati tutti i componenti che lo compongono.

CAPITOLO 1 - IL DISCO PARABOLICO

1.1 - Stato dell'arte degli impianti solari a concentrazione

Tutti hanno sentito la storia di Archimede da Siracusa che riuscì a respingere l'attacco dei Romani che arrivavano dal mare sulle coste sicule utilizzando rudimentali concentratori solari ricavati da scudi di bronzo. Gli egizi utilizzavano sistemi di specchi per illuminare i corridoi all'interno delle piramidi, così da permettere agli artisti di affrescarne le pareti. L'idea della "concentrazione" della luce solare in un punto predefinito è stata quindi una costante nella storia dell'uomo, anche se i primi studi per la realizzazione di macchine con sistemi di concentrazione solare sono nati alla fine del 1800: nel 1907 venne registrato il primo brevetto di un collettore solare a forma di cilindro che sfruttava la radiazione diretta del sole per la generazione del vapore.

All'inizio del XX Secolo poi, con l'avvento del petrolio e lo scoppio della Guerra Mondiale, queste idee vennero accantonate, per poi essere riprese alla fine degli anni '70 per via della crisi energetica, dovuta alla rivoluzione iraniana del 1979 . In questi anni paesi come Russia, Giappone, Stati Uniti, Spagna e Italia ripresero le ricerche sul solare termico.

Lo svolta è stato effettuato dalla "Luz International", una compagnia Israelo/Americana quando iniziò la costruzione di concentratori di tipo parabolico lineare a scopo commerciale. Di questo tipo di pannelli è costituito quello che, al giorno d'oggi, è il più grande impianto solare termodinamico al mondo, il cui finanziamento arriva proprio dalla Luz International: il suo nome è SEGS (Solar Energy Generating Systems) ed è



Figura 1.1:immagine aerea dell'impianto SEGS in California

situato nel deserto del Mojave, in California. Costruito tra il 1984 e il 1991, esso conta 936384 specchi, divisi in nove centrali, e ricopre una superficie di $6,5 \text{ km}^2$; se posizionati in fila, gli specchi parabolici si estenderebbero per 370 km. Questo impianto di proporzioni incredibili riesce a garantire una potenza complessiva di 354 MW, in grado quindi di sopperire al fabbisogno energetico di 232.500 abitazioni ed evitare immissione nell'atmosfera di 3.800 tonnellate di sostanze inquinanti ogni anno che si sarebbero prodotte con le centrali elettriche alimentate con combustibili fossili.

Per quando riguarda gli impianti solari termici a concentrazione, sono possibili tre tecnologie di realizzazione:

- Impianti solari a torre: sono composti da "eliostati", pannelli che seguono il movimento del sole durante l'arco della giornata, disposti a circonferenza attorno a una torre centrale che costituisce il ricevitore. I raggi solari vengono indirizzati verso la torre, dove sono presenti dei fasci di tubi disposti in modo tale da massimizzare lo scambio termico (Figura 1.2).

- Impianti solari a pannelli parabolici puntuali: costituiti da uno o più specchi circolari, convogliano i raggi solari nel loro fuoco geometrico, dove è situato il ricevitore. Il funzionamento è del tutto simile a quello dell'impianto a torre, producendo in questo caso delle potenze che variano a seconda delle sue dimensioni. Aumentando il numero dei pannelli, si può raggiungere potenze più elevate (Figura 1.3).
- Impianti solari a pannelli parabolici lineari: come le altre tecnologie, assorbono la radiazione diretta che viene riflessa dagli specchi verso il ricevitore, costituito in questo caso da un cilindro, poiché la forma della superficie riflettente è quella di un semicilindro con profilo parabolico. Il fluido termovettore entra alla minima temperatura, procede nella direzione dello specchio, riscaldandosi ed uscendo a temperatura massima (Figura 1.4).



Figura 1.2: esempio di impianto solare a torre centrale



Figura 1.3: disco parabolico con ricevitore puntuale



Figura 1.4: disco parabolico con ricevitore lineare

1.2 - Il solare termodinamico in Italia

Nel nostro paese questa tecnologia ha visto i suoi primi albori nel 1981, con la costruzione dell'impianto a torre e specchi da 1 MW di Adrano in Sicilia. Dopo questo inizio però, questa tecnologia sembra aver lasciato spazio negli anni successivi alla impetuosa crescita del fotovoltaico.

Il 15 luglio 2010 è stato inaugurato a Priolo Gargallo (provincia di Siracusa) quello che per alcuni è l'impianto solare più avanzato al mondo: Archimede.

Questo progetto, che prende il nome dal siracusano che respinse le navi dei romani grazie a i primi rudimentali concentratori solari, produce 20 MW di potenza elettrica dal novembre 2011, mese della sua entrata in funzione. La tecnologia usata a Priolo è quella dei sali fusi, ideata dal premio Nobel Carlo Rubbia mentre era presidente Enea. L'idea di inserire i sali fusi direttamente nei tubi ricevitori è stata scelta perché così si evitano rischi di incidenti e inquinamento. Grazie agli speciali tubi ricevitori, questa tecnica permette di lavorare fino a 550 °C, invece che a circa 300-400 °C come le altre, e raggiungere quindi rendimenti molto più elevati, circa il 20%. Inoltre, l'accumulo di sali fusi ad alta temperatura permette di immagazzinare abbastanza energia da far funzionare la centrale a piena potenza anche per 12 ore, in assenza di sole. Modulando opportunamente il prelievo di energia dal serbatoio si può tenere l'impianto in funzione per oltre una settimana senza sole, prima di ricorrere a un bruciatore a gas d'emergenza. Nei luoghi con forte insolazione quindi, le centrali a sali fusi rendono la produzione elettrica solare quasi continua e programmabile. Inoltre, sempre per le temperature elevate, producono anche molto calore di scarto nella fase di condensazione del vapore, che può essere usato localmente, per esempio per dissalare l'acqua di mare.

Questa centrale, che al giorno d'oggi funziona ottimamente, è la prima di una linea di centrali solari termodinamiche che il gruppo Enel ha intenzione di costruire in Italia e nel mondo. Il prossimo progetto si chiama Archetype, sarà costruito vicino a Catania e produrrà 30 MW di potenza elettrica.

Il solare termodinamico in Italia è adatto solo nel Meridione, poiché è l'unica parte che raggiunge o supera l'insolazione minima necessaria al CSP (Concentrating Solar Power) , ovvero 1800 kWh/m² annui. Un'altra limitazione è quella di aver bisogno di terreni piani ma, essendo gli specchi molto distanziati fra loro, il CSP consente anche la coltivazione, nonché la

pastorizia. Inoltre, il vantaggio dell'accumulo di cui è stato detto in precedenza è importante per il nostro Paese, per i non trascurabili problemi di dispacciamento che possiede la rete italiana. Comunque, grazie anche a incentivi fra i più alti del mondo, la somma dei progetti presentati dovrebbe portare ad avere in Italia entro il 2016, 600-800 MW di impianti CSP, concentrati in Sicilia e Sardegna

1.3 - Il disco parabolico

1.3.1 - La parabola

La tecnologia adottata per il progetto Fiore del Deserto è quella a pannelli parabolici puntuali. I raggi solari vengono riflessi dal disco parabolico e concentrati nel suo punto focale, dove è posizionato il ricevitore che ha il compito di riscaldare il fluido termovettore presente al suo interno. Questa tecnologia permette la più alta concentrazione dei raggi solari, raggiungendo le più alte prestazioni tra tutti i tipi di concentrazioni.

Come sarà mostrato nel Capitolo 2 , la potenza termica sviluppata dall'impianto termosolare è proporzionale alla proiezione della superficie del disco parabolico. Dato che la superficie del disco è proporzionale al quadrato del diametro della circonferenza esterna del disco stesso, possiamo dire che la potenza termica è direttamente proporzionale al diametro del disco; tanto il diametro è maggiore, tanto sarà più grande la potenza termica solare. Il diametro scelto per il Fiore del Deserto è di 20 metri, in quanto questo valore permette sia la generazione di una potenza rilevante e idonea allo sviluppo dell'impianto, sia una dimensione non troppo ingombrante e che permette quindi una costruzione in serie del medesimo progetto.

Essendo la realizzazione di un unico disco parabolico di queste dimensioni impegnativa e costosa, la superficie dello specchio è stata divisa in più

sezioni, le quali non sono curve ma piatte, così da facilitarne la costruzione; allo stesso tempo questa disposizione permette di coprire con la riflessione dei raggi, non più un punto, ovvero quello focale del disco, ma una superficie, che ha una larghezza dipendente dalla larghezza della sezione considerata, e una lunghezza che è un intorno del punto focale.

Sezionando il disco parabolico, si può notare il tipico profilo a parabola. Impostata l'altezza massima della parabola a 4 metri, è possibile ricavare l'equazione della parabola che determina il profilo: scegliendo due assi ortogonali e chiamando x lo sviluppo in direzione parallela al terreno e y quello in direzione perpendicolare, considerando come misura dell'unità 1 metro e ponendo come origine degli assi il vertice della parabola, l'equazione della stessa è

$$y = 0,04 x^2.$$

Il fuoco della parabola sarà posizionato, considerando l'equazione della generica parabola $y = ax^2 + bx + c$, alle coordinate $(-\frac{b}{2a}; \frac{1-\Delta}{4a})$, ove $\Delta = b^2 - 4ac$. Quindi le coordinate del fuoco sono (0; 6,25).

Una volta nota l'equazione della parabola, e considerata solo una delle due semiparabole che nascono dal vertice e terminano nelle estremità, si è voluto dividere la curva in tratti rettilinei. Questi tratti hanno lunghezza 2 metri, e sono così posizionati: si fissa un estremo del tratto all'estremità della semiparabola, mentre l'altro estremo viene posizionato facendo ruotare il tratto fino a che lo stesso estremo incontra la semiparabola; quello è il punto di fissaggio. Da lì parte un altro tratto, e nello stesso modo vengono posizionati tutti gli altri. Per occupare l'intera semicurva occorrono cinque tratti, per questo la semiparabola viene divisa in cinque livelli.

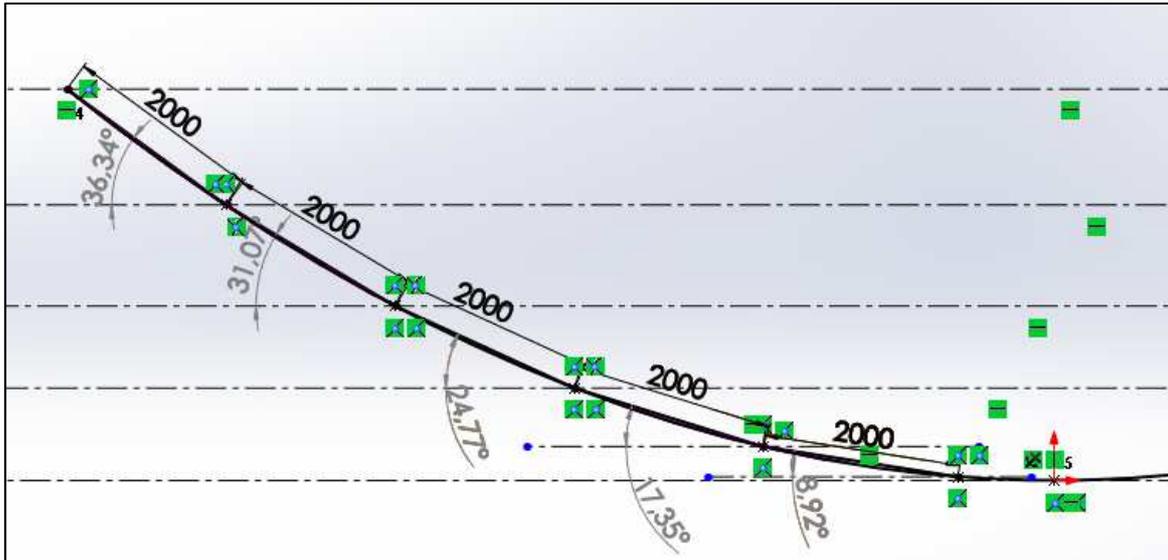


Figura 1.5 : rappresentazione dei tratti in cui viene suddivisa la semiparabola

Considerando la vista in pianta, il disco parabolico assume la forma di una circonferenza. Si è deciso di dividere la circonferenza in dodici settori circolari. Ogni settore circolare è quindi composto da cinque sezioni, ognuna avente dimensione diverse a seconda del suo livello di appartenenza: la forma sarà quella trapezoidale isoscele, ma le dimensioni delle basi vanno sempre più crescendo man mano che ci si allontana dal vertice e si arriva all'estremità. Ogni livello è così composto da dodici specchi, a forma trapezoidale e delle stesse dimensioni, per cui è anche facilitata la riproduzione e il montaggio. Il numero totale delle sezioni è di sessanta.

1.3.2 - Il dimensionamento

Nella figura 1.7 si può notare una rappresentazione grafica realizzata con Solid Works: le cinque sezioni diventano più sottili quando si avvicinano al centro del disco; in più l'ultima sezione non si congiunge esattamente con il vertice, ma vi è un foro di circa 700 mm di diametro per permettere alle condotte di raggiungere l'ebollitore.

Nella tabella 1.6 sono riassunte tutte le dimensioni delle basi delle varie sezioni, ove la sezione 1 è quella più lontana dal vertice, posizionata alle estremità, mentre la sezione 5 è quella più vicina al centro del disco parabolico. L'altezza di tutte le sezioni, come già detto, è di 2000 mm. Viene indicata anche l'area di ogni trapezio.

Numero Sezione	Base Maggiore [mm]	Base Minore [mm]	Area Sezione [mm ²]
1	3900	3275	7175000
2	3275	2605	5880000
3	2605	1900	4505000
4	1900	1150	3050000
5	1150	100	1250000

Tabella 1.6: elenco delle dimensioni delle varie sezioni

Per calcolare l'area utile per il riscaldamento bisogna conoscere la proiezione dell'area di ogni sezione nella direzione del terreno. La parabola è infatti montata perpendicolare al terreno, e il dimensionamento viene effettuato considerando i raggi solari (ovvero la radiazione solare) ortogonali alla superficie terrestre. Per conoscere quindi queste grandezza è necessario sapere quanto vale l'angolo che ogni pannello forma con l'orizzontale, ovvero la direzione ortogonale ai raggi. Questi angoli, già visti nella figura 1.5, sono qui di nuovo riportati esplicitamente:

$$\alpha_1 = 36,34^\circ$$

$$\alpha_2 = 31,05^\circ$$

$$\alpha_3 = 24,77^\circ$$

$$\alpha_4 = 17,35^\circ$$

$$\alpha_5 = 8,92^\circ$$

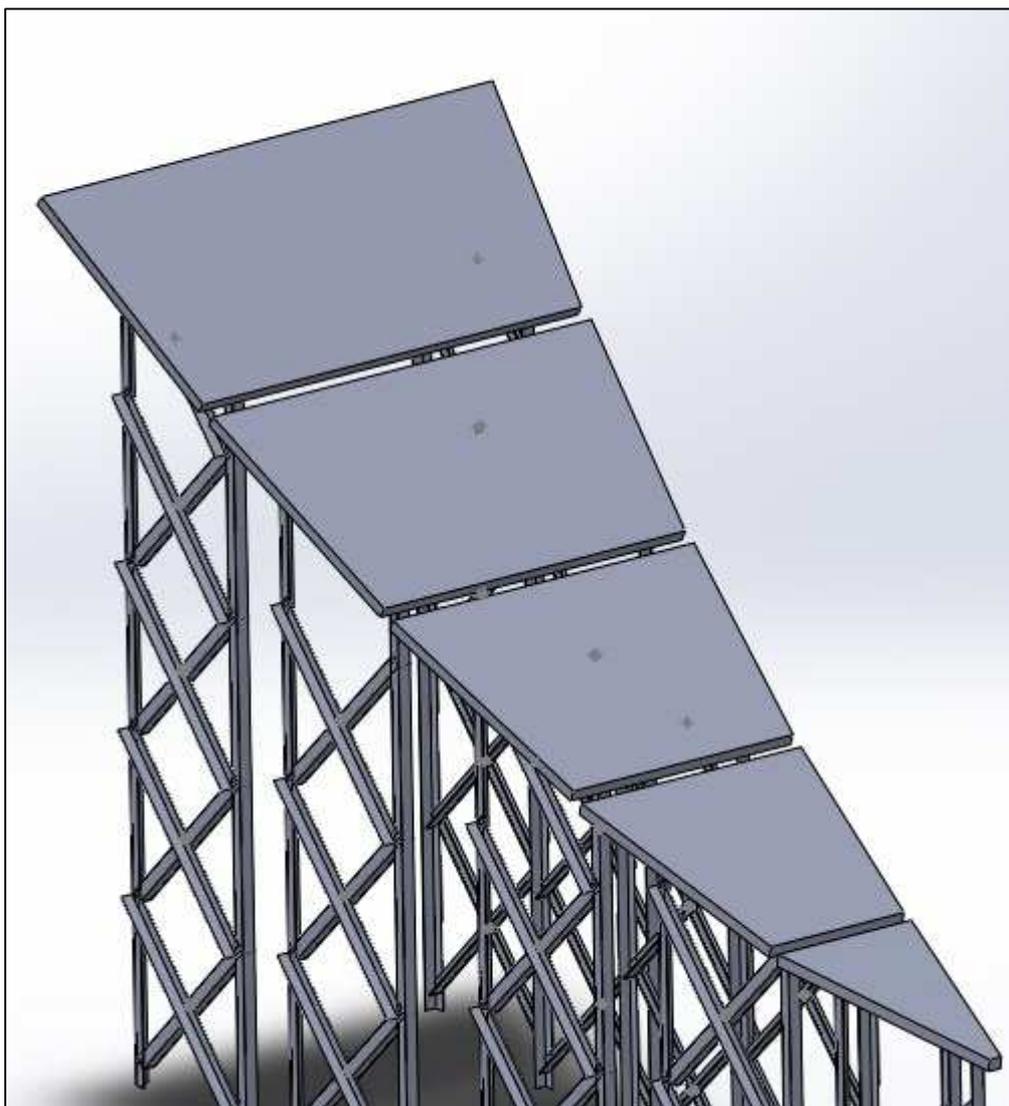


Figura 1.7: si può notare come dall'alto verso il basso le sezioni si restringano notevolmente per via dalla diminuzione del raggio man mano che ci si avvicina al centro del disco parabolico.

Per calcolare la proiezione dell'area basta eseguire il semplice calcolo:

$A_{p_i} = A_i \cdot \cos \alpha_i$, dove A_{p_i} è l'area proiettata della sezione i -esima, A_i l'area effettiva dell' i -esima sezione e α_i l'angolo che essa forma con la superficie terrestre. Si ottengono perciò i seguenti valori (espressi in notazione scientifica):

$$A_{p_1} = 5,78 \times 10^6 \text{ mm}^2 = 5,78 \text{ m}^2$$

$$A_{p_2} = 5,04 \times 10^6 \text{ mm}^2 = 5,04 \text{ m}^2$$

$$A_{p3} = 4,09 \times 10^6 \text{ mm}^2 = 4,09 \text{ m}^2$$

$$A_{p4} = 2,91 \times 10^6 \text{ mm}^2 = 2,91 \text{ m}^2$$

$$A_{p5} = 1,23 \times 10^6 \text{ mm}^2 = 1,23 \text{ m}^2$$

La proiezione totale vale quindi:

$$A_{\text{tot}} = 12 \cdot \sum_{i=1}^5 A_{p_i} = 2,29 \times 10^8 \text{ mm}^2 = 229 \text{ m}^2 .$$

1.4 - Le travi di sostegno

1.4.1 - Le travi verticali

Gli specchi, che deviano la direzione dei raggi solari in modo tale da colpire il ricevitore e quindi cedere la componente termica della radiazione al fluido per aumentarne la temperatura, hanno bisogno di un sostegno per poter restare in posizione. Questa posizione, individuata dall'arco di parabola esposto nei precedenti paragrafi, è diversa per ogni pannello, sia per quanto riguarda l'altezza, ovvero la distanza dal suolo, sia per la loro inclinazione. Questo comporta delle travi che, sebbene abbiano un profilo identico, hanno la necessità di possedere una estremità unica a seconda dello specchio a esse associate, e della posizione che occupano per sostenere lo stesso specchio. Sono state scelte per questo progetto le travi angolari a lati uguali e spigoli tondi, della normativa UNI 5783-66.

Considerando un solo specchio, esso avrà quattro travi che, proprio come le gambe di un tavolo, lo sostengono. Esse saranno disposte ai quattro angoli dello specchio, non allineate ai suoi vertici, ma leggermente in posizione rientrata. L'inclinazione dello specchio comporta che l'estremità sulla quale lo specchio si appoggia e alla quale è saldato generi lo stesso angolo con il terreno.

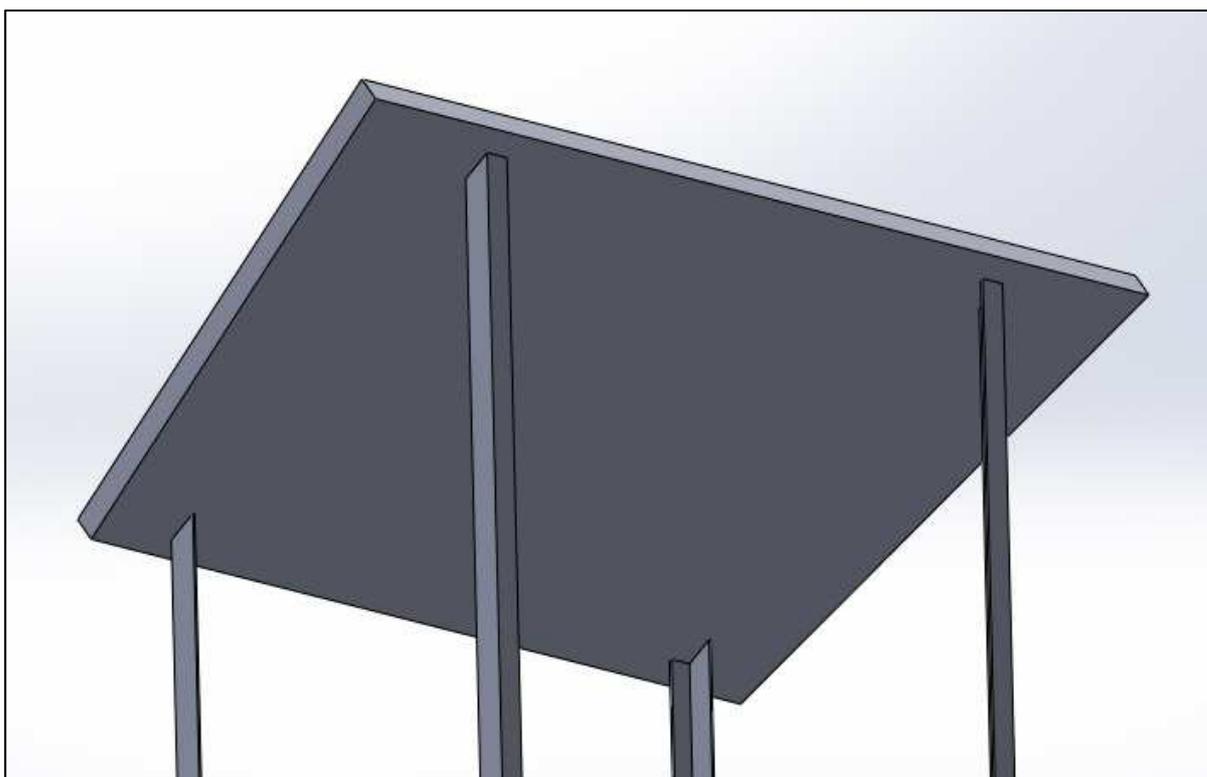


Figura 1.8: Vista inferiore di un pannello. Particolare delle quattro travi di sostegno

Come si può notare dalla figura 1.8, è logico affermare che le quattro travi debbano avere una sezione all'estremità diversa le une dalle altre: infatti lo spigolo della trave è, in ogni angolo, diretto nello stesso verso dell'angolo corrispondente dello specchio; dato che tutte le estremità devono combaciare perfettamente con la sezione corrispondente per non avere problemi di costruzione, se si provasse a inserire una trave con l'estremità già lavorata per combaciare in un preciso angolo, ruotandola di 90° si nota che l'inclinazione della stessa estremità non combacia più con la superficie inclinata dello specchio. Questo comporta che, considerando la totalità del sistema di specchi che genera il disco parabolico, la presenza di cinque specchi di dimensioni e inclinazioni diverse per ogni settore circolare, e dodici settori circolari per comporre il disco parabolico nella sua integrità, si ottengono venti travi diverse tra loro per lunghezza e diversità dell'estremità saldata al rispettivo specchio per ogni settore circolare. Ognuna di queste travi possiede dodici copie esatte, per il fatto che i settori circolari sono identici tra di loro e possiedono semplicemente una posizione diversa. Si

ottiene un totale di 240 travi angolari a lati uguali e spigoli tondi, posizionati verticalmente.

Per quanto riguarda la sezione, facendo riferimento alla figura 1.9 , (dal sito www.oppo.it) , queste sono le misure unificate:

Profilo: 100 x 10

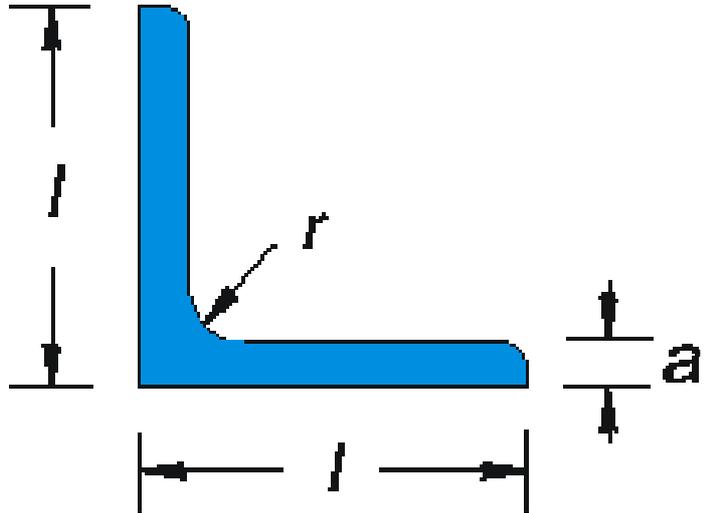
$l = 100 \text{ mm}$

$a = 10 \text{ mm}$

$r = 12 \text{ mm}$

Peso = 15,1 kg/m

Sezione = $19,2 \text{ cm}^2$



Momenti di inerzia = $177,0 \text{ cm}^4$ ($J_x = J_y$)

Figura 1.9: profilo della trave angolare

Moduli di resistenza = $24,60 \text{ cm}^3$ ($W_x = W_y$)

Raggi di inerzia = $3,040 \text{ cm}$ ($i_x = i_y$)

Le lunghezze delle travi variano a seconda della loro distanza dal centro; se ne contano comunque dieci diverse, proprio per il fatto che essendo le sezioni inclinate, per ogni specchio abbiamo due lunghezze, quella maggiore verso l'esterno e una minore verso l'interno. Sono indicate di seguito le lunghezze specifiche, numerate a seconda del livello in cui si trovano (si consideri che le prime due sono riferite allo specchio più esterno, e così via a due a due fino alle ultime, riferite a quelle interne). La lunghezza indicata si riferisce alla distanza tra il livello del terreno e l'estremità opposto della trave, in maniera particolare al lato più lungo, dal quale parte il taglio per generare la superficie d'appoggio inclinata.

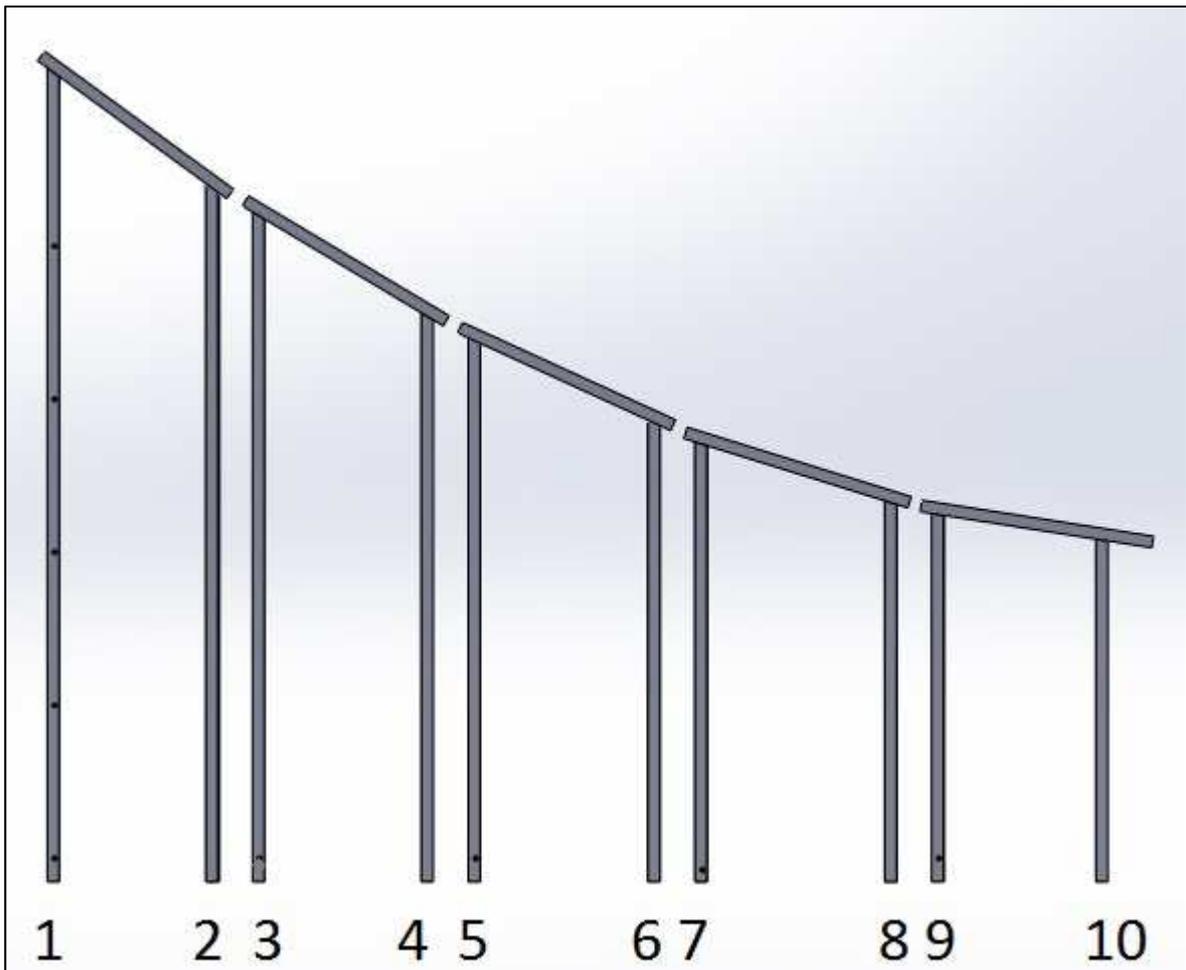


Figura 1.10: profilo di un settore circolare, con indicati i numeri dei vari livelli

$$L_1 = 7000 \text{ mm} \quad L_2 = 5992,77 \text{ mm}$$

$$L_3 = 5760,25 \text{ mm} \quad L_4 = 4891,55 \text{ mm}$$

$$L_5 = 4676,14 \text{ mm} \quad L_6 = 3968,12 \text{ mm}$$

$$L_7 = 3781,24 \text{ mm} \quad L_8 = 3275,71 \text{ mm}$$

$$L_9 = 3164,54 \text{ mm} \quad L_{10} = 2945,70 \text{ mm}$$

Queste lunghezze riportate qui sopra sono chiaramente lunghezze di costruzione, restituite dal software con il quale sono stati effettuati i disegni virtuali. La precisione di questi valori sarà in realtà dipendente dal metodo di lavorazione e dagli strumenti utilizzati per creare la sezione inclinata di appoggio.

Le travi sono fissate al terreno tramite incastro. Perciò la loro lunghezza può essere maggiorata di 2 metri per poi essere infilate nel terreno per un lunghezza pari a questo valore, lasciando fuori la parte della trave che possiede la misura necessaria al corretto montaggio.

1.4.2 - Le travi di rinforzo

Per rinforzare la struttura sono state inserite delle travi, che collegano il livello superiore di una sezione a quello inferiore della stessa. Esse hanno la stessa sezione delle travi verticali, e sono disposte con un'inclinazione di 45° . La sezione ad angolo, chiamata anche "ad L", permette l'ancoraggio delle travi di rinforzo alle travi di sostegno mettendo a disposizione per ognuna di esse una delle due superfici delle quali è composta. Questa sezione della trave, che ha uno spessore pari ad $a=10$ mm, permette il serraggio delle travi di rinforzo sia internamente che esternamente; è possibile così, dando due inclinazione opposte tra interno ed esterno, formare la solita formazione a "X", concedendo il serraggio pure della zona centrale.

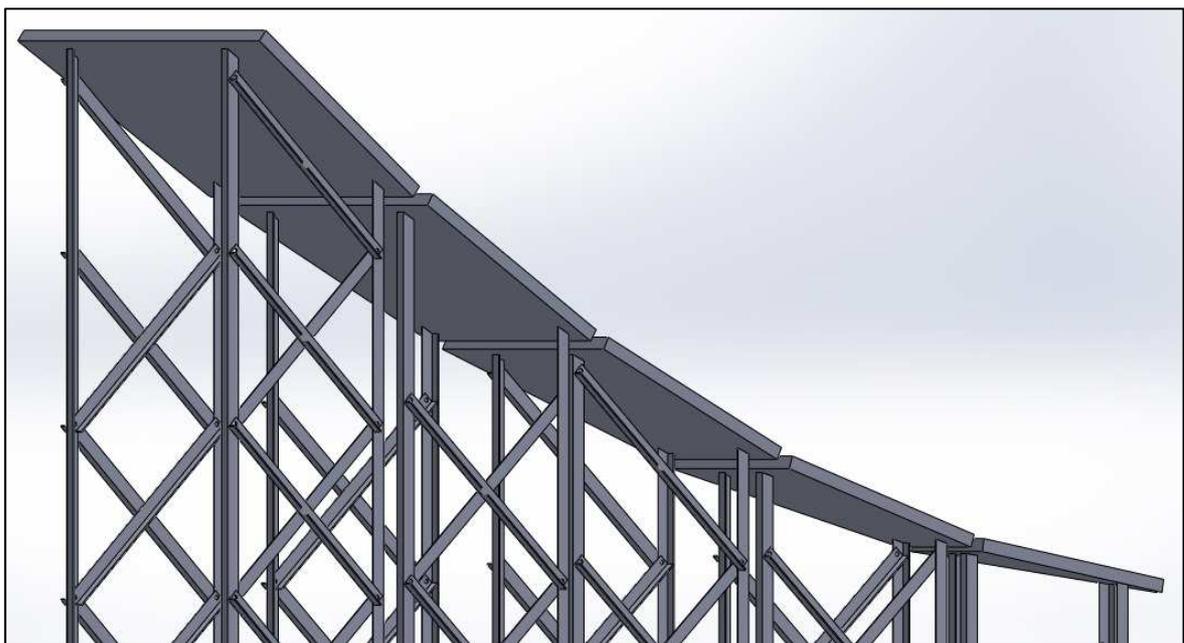


Figura 1.11: visione di insieme delle travi di rinforzo; si può notare il tipico montaggio a "X".

Come si nota facilmente in figura 1.11, per ogni sezione di specchi ognuna delle travi di rinforzo possiede una lunghezza diversa, dovuta alla diversa distanza tra le gambe superiori e le gambe inferiori. Di seguito sono elencate le varie lunghezze, dove il numero 1 corrisponde alla sezione più periferica, e la numero 5 a quella più vicina al centro del disco parabolico.

$$L_{r1} = 1925 \text{ mm}$$

$$L_{r2} = 2030 \text{ mm}$$

$$L_{r3} = 2146 \text{ mm}$$

$$L_{r4} = 2264 \text{ mm}$$

$$L_{r5} = 1830 \text{ mm}$$

Si può notare che queste lunghezze, partendo dalla più lontana e arrivando alla più vicina al centro, tendono ad aumentare. Il motivo è semplice: dato che l'altezza di ogni specchio è costante e pari a 2 metri, a una maggiore inclinazione corrisponde una proiezione ortogonale sul piano della superficie terrestre minore; conseguentemente, la distanza per unire i due livelli, superiore ed inferiore, è minore per le sezioni più lontane, in quanto l'inclinazione dello specchio è maggiore. Per quanto riguarda l'ultima lunghezza, le travi verticali di sostegno sono più ravvicinate, lasciando l'ultima parte sospesa. Ciò si verifica per problemi di realizzazione fisica del progetto: infatti se si cercasse di conservare il metodo di scelta della posizione delle travi di sostegno delle altre sezioni, una volta montati tutti i dodici settori circolari, si verificherebbe una sovrapposizione fisica, ovvero due travi nello stesso posto, dato dalla vicinanza al centro del disco considerato. Infine, essendo anch'esse lunghezze di costruzione, sono valide anche per le travi di rinforzo tutte le considerazioni fatte per le travi verticali di sostegno.

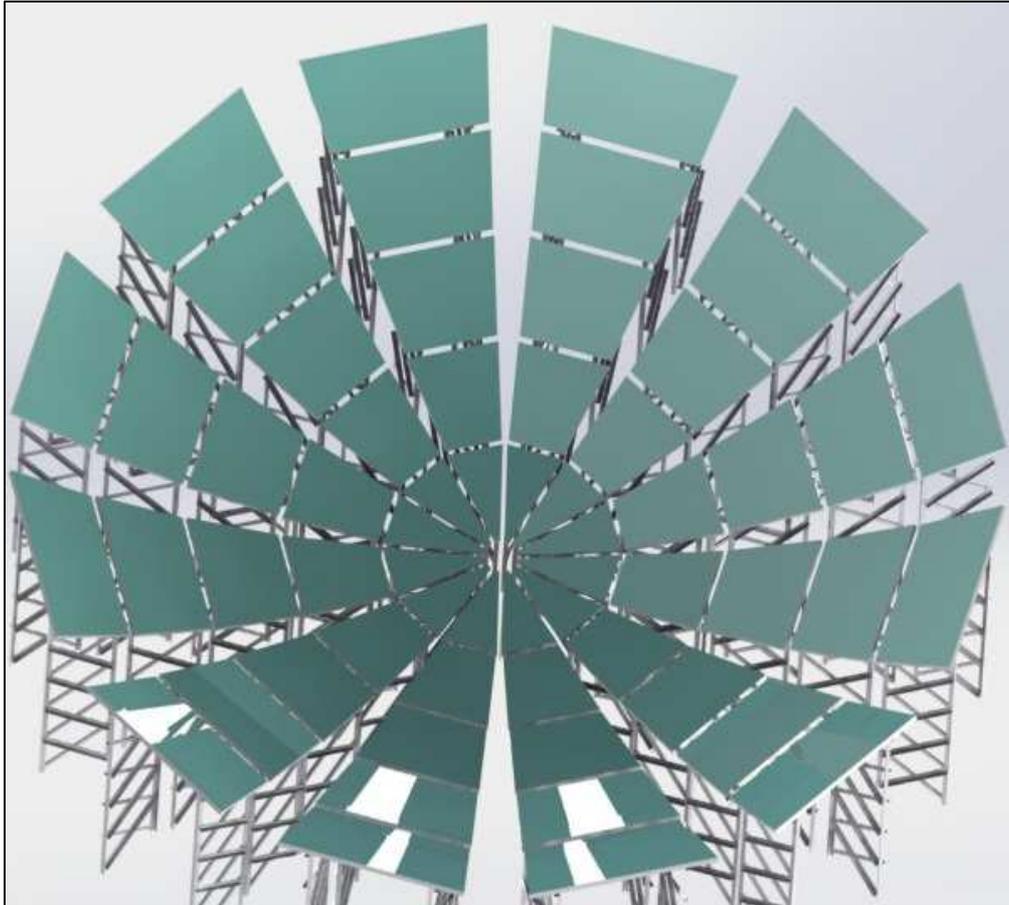


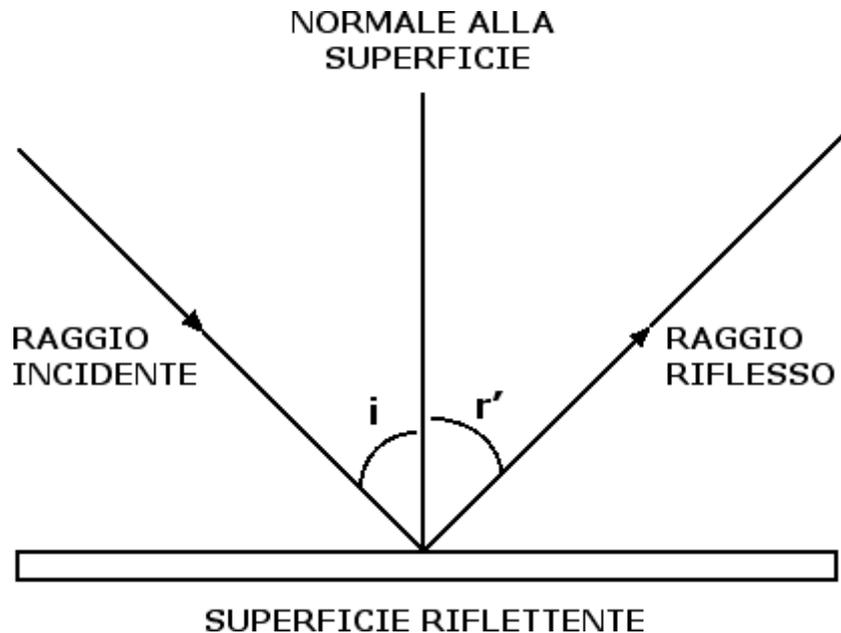
Figura 1.12: Insieme degli specchi. Si possono osservare tutte le sezioni che lo compongono.

1.5 - Il ricevitore

La posizione e le dimensioni del ricevitore, posto nell'intorno del fuoco, in direzione verticale data dalla congiungente il vertice con il fuoco stesso, sono calcolate considerando la riflessione dei raggi sugli specchi. Vi sono due leggi che descrivono il fenomeno della riflessione:

- La prima legge della riflessione afferma che il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie riflettente giacciono sullo stesso piano, detto anche piano di incidenza.
- La seconda legge della riflessione afferma invece che l'angolo di incidenza i e l'angolo di riflessione r' sono uguali tra loro: $i = r'$, dove l'angolo di incidenza i è l'angolo che il raggio incidente forma con la

normale alla superficie, mentre r' è l'angolo che la normale alla superficie forma con il raggio riflesso.



Dato che le sezioni, ognuna delle quali è formata da uno specchio di forma trapezoidale, non sono curve ma piane, vuol dire che i raggi non convoglieranno in un punto, ma spazzeranno una superficie, limitata dagli estremi superiore e inferiore dello specchio. Questo permette anche di avere la certezza che quando i raggi non saranno esattamente verticali, ma inclinati con angolazioni diverse a seconda della posizione del sole nell'arco della giornata, il ricevitore, avendo una dimensione significativa, sarà in ogni caso colpito. Considerando che i raggi solari hanno una direzione perpendicolare alla superficie terrestre, e che gli specchi sono inclinati con angoli α diversi, il raggio riflesso avrà una inclinazione rispetto la superficie di un angolo β complementare ad α . Perciò:

$$\beta_1 = 90^\circ - \alpha_1 = 53,66^\circ$$

$$\beta_2 = 58,95^\circ$$

$$\beta_3 = 65,23^\circ$$

$$\beta_4 = 72,65^\circ \text{ e } \beta_5 = 81,08^\circ$$

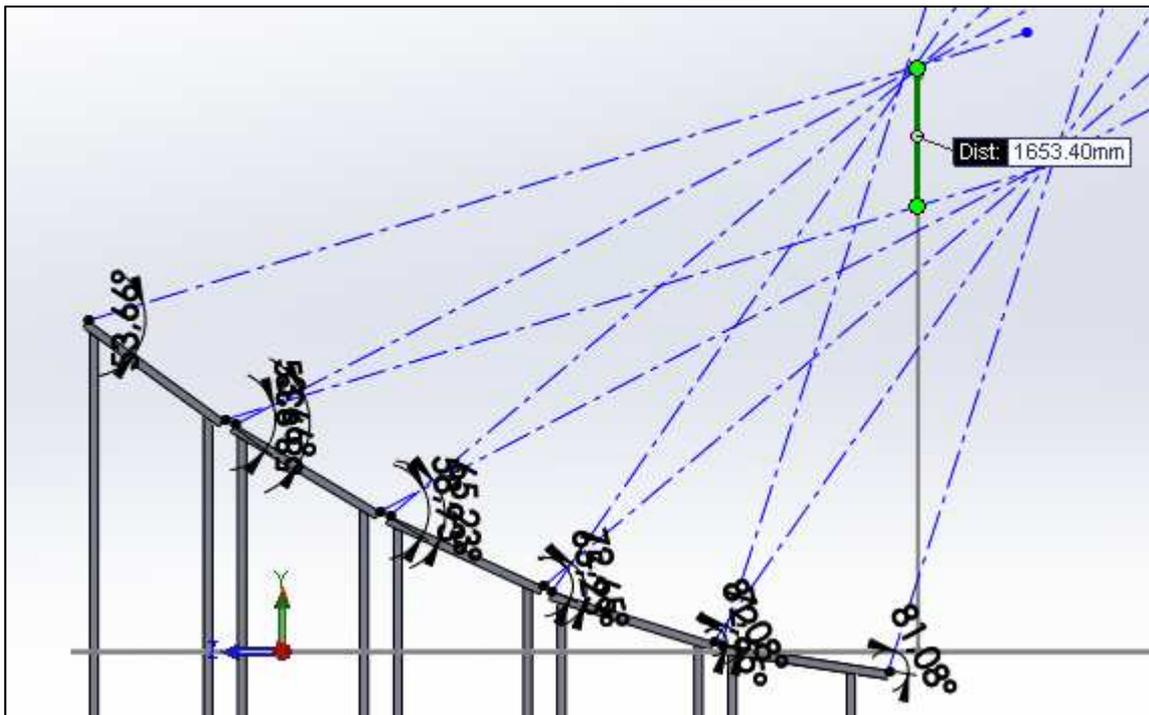


Figura 1.14: andamento dei raggi riflessi.

Come si può notare in figura 1.14 , dall'andamento dei raggi riflessi si ottiene un'area sul piano della riflessione nella quale tutti i raggi sono coinvolti. In quest'area, tracciando la verticale all'asse di rotazione del profilo parabolico, si ottiene l'altezza del ricevitore, che sarà di 1650 mm. Avrà quindi un'altezza di 1650 mm, per un diametro di 400 mm.

1.5.1 - La forma del ricevitore

Nel ricevitore non avviene un cambiamento di fase, ma il liquido che vi entra riceve dell'energia termica che innalza la propria temperatura fino ad un valore massimo, minore del punto di ebollizione. Per questo motivo non si può realizzare un semplice cilindro nel quale il fluido si deposita per poi stazionare fino al momento di essere prelevato: infatti se il fluido evaporasse, la parte diventata gassosa andrebbe verso l'alto, permettendone in questo modo il prelievo; ciò non è possibile se il fluido rimane liquido. Si deve quindi realizzare un percorso che permette al fluido di rimanere nella parte

termicamente alterata dell'impianto, ovvero quella dove sono concentrati tutti i raggi riflessi, ma allo stesso tempo che ne permetta anche l'uscita.

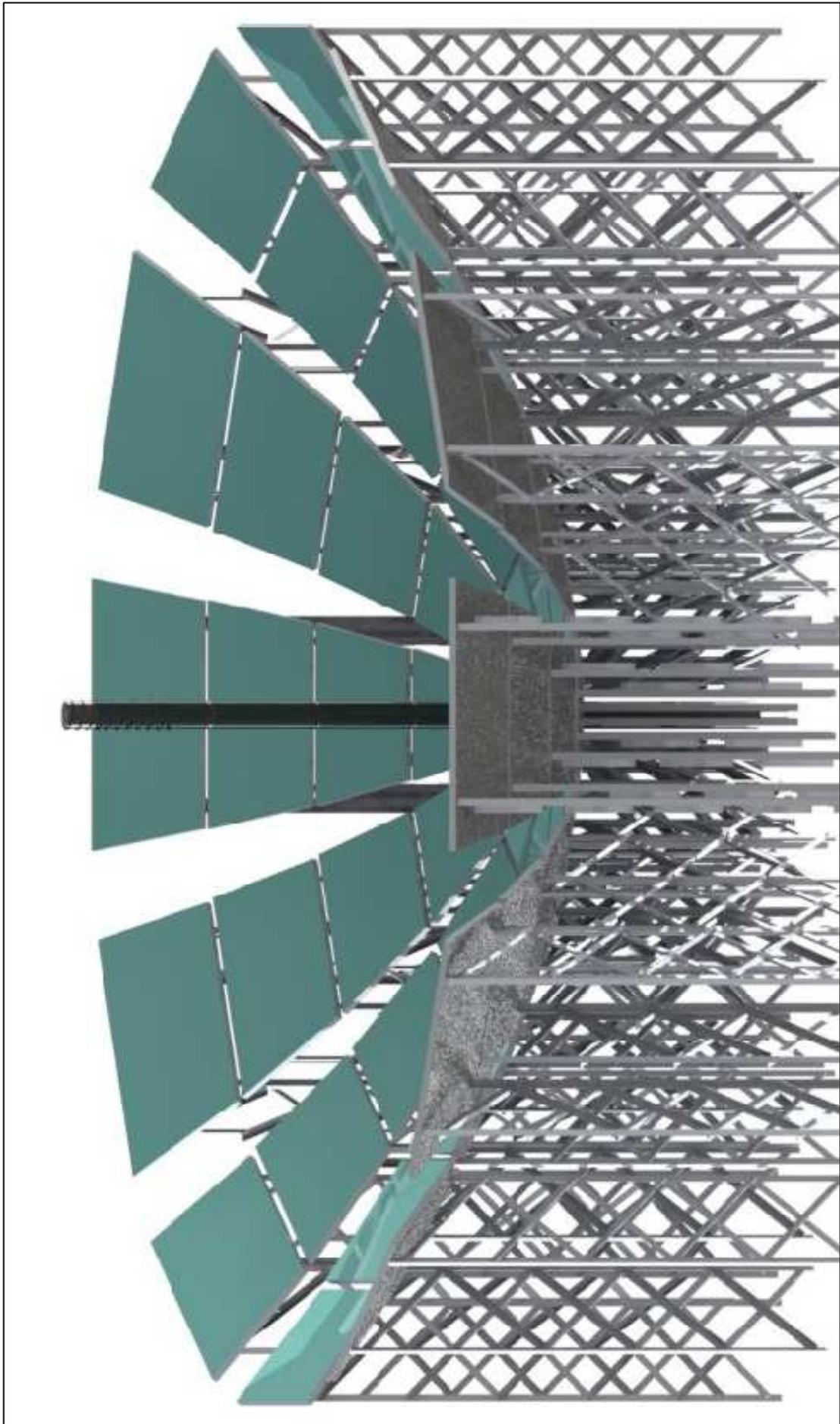
Un'elica permette al fluido di percorrere i 1650 mm indicati, generando un percorso curvilineo che possiede un diametro di 400 mm. Il tubo, che fino a poco prima di entrare nella zona di concentrazione è rettilineo verticale, seguendo l'asse di rotazione del sistema di specchi, si allarga pian piano seguendo la traiettoria dell'elica. Vengono così percorse undici eliche che possiedono un passo di 150 mm. Una volta giunti in cima, il tubo rientra all'interno dell'elica e segue nuovamente una traiettoria verticale, parallela a quella seguita in entrata, ma dall'alto verso il basso. In questo modo si è garantiti la continuità del percorso, e si sono eliminati tutti i problemi derivanti l'impossibilità dello stazionamento del fluido.

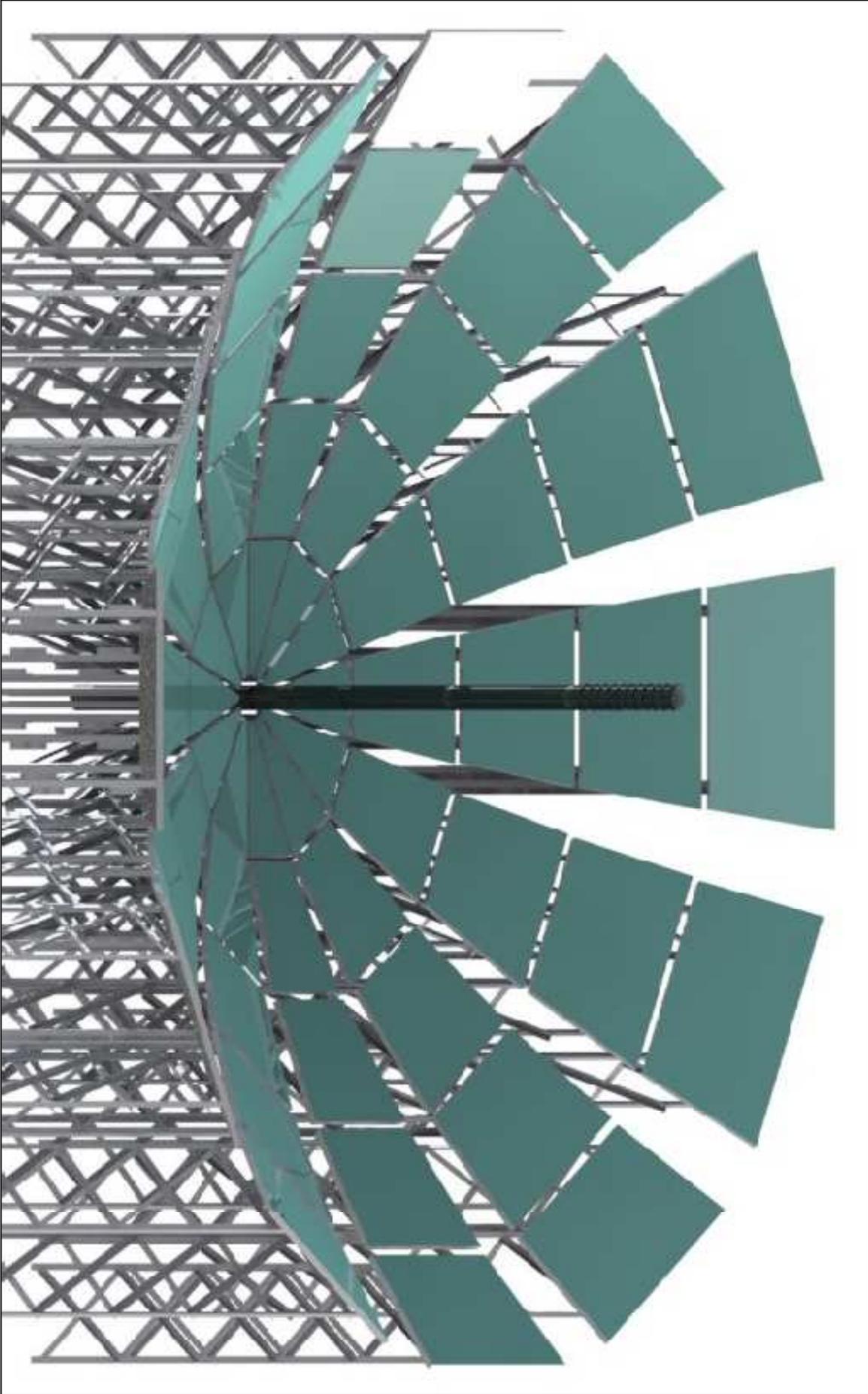


Figura 1.15 (qui a sinistra): la forma del ricevitore.

Figura 1.16 (pag.27): vista del Fiore del Deserto.

Figura 1.17 (pag 28): un'altra. vista di insieme del Fiore del Deserto, con la corolla (i settori degli specchi), e il pistillo (il ricevitore).





CAPITOLO 2 - L'IRRAGGIAMENTO SOLARE

2.1 - Il Sole

La stella che ha dato il nome al nostro sistema di pianeti, e che a noi sembra così incredibilmente grande, non è altro che una piccola fonte di luce, se confrontata con le altre enormi stelle scoperte nell'universo. Eppure, questa piccola nana gialla (così viene classificata dagli astronomi) permette la vita sul nostro pianeta. E' infatti grazie alla radiazione solare che le piante riescono a nutrirsi e a crescere; gli uomini devono respirare per sopravvivere, e l'ossigeno è prodotto appunto dalle piante. Negli ultimi anni la collaborazione tra astrofisici stellari e astrofisici solari ha dato ottimi frutti. Eppure il Sole rimane ugualmente alquanto misterioso. Bisogna però ammettere che negli anni Novanta le cose sono cambiate anche grazie ad alcune importanti missioni spaziali volute dall'ESA, l'Agenzia Spaziale Europea: gradualmente si fa strada la consapevolezza che il Sole è l'oggetto astronomico più importante in assoluto, se non altro per il fatto che da esso dipende l'esistenza di ogni forma di vita sulla Terra.

2.1.1 - Composizione chimica

La stella ha "ereditato" la sua composizione chimica dal mezzo interstellare da cui ha preso origine: l'idrogeno e l'elio, che ne costituiscono la grande parte, si sono costituiti grazie alla nucleosintesi del Big Bang, gli elementi più pesanti sono stati sintetizzati dalla nucleosintesi delle stelle più evolute che, al termine della propria evoluzione, li hanno diffusi nello spazio circostante. La composizione del nucleo è fortemente alterata dai processi di fusione nucleare, che hanno aumentato la percentuale in massa dell'elio a discapito dell'idrogeno: infatti l'idrogeno costituisce il 34% della massa del nucleo, mentre l'elio costituisce il restante 64%. La percentuale di elementi

pesanti, detti convenzionalmente metalli, è rimasta invece pressoché invariata. Gli elementi più pesanti, presenti in tracce soprattutto negli strati più superficiali, sono: litio, berillio e boro; neon, la cui quantità effettiva sarebbe maggiore di quella precedentemente stimata tramite le osservazioni eliosismologiche; gli elementi del gruppo 8 della tavola periodica, cui appartengono ferro, cobalto e manganese.

2.1.2 - La propagazione dell'energia attraverso gli strati

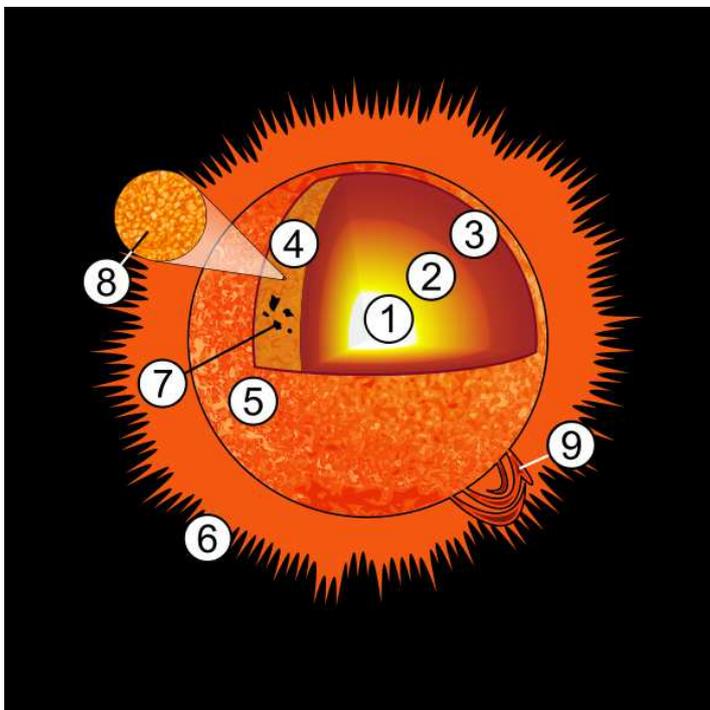


Figura 2.1: diagramma del sole.

1. Nucleo
2. Zona radiativa
3. Zona convettiva
4. Fotosfera
5. Cromosfera
6. Corona
7. Macchia solare
8. Granulazione fotosferica
9. Protuberanza ad arco

Il Sole possiede una struttura interna ben definita, che viene studiata dall'eliosismologia, la disciplina che studia la propagazione delle onde di pressione sulla nostra stella; questa ha una composizione a strati, dove all'interno avviene la generazione dell'energia solare tramite reazioni nucleari, e passando da uno strato all'altro fino a raggiungere la superficie, questa energia si attenua, ma mantenendo intensità rilevanti, soprattutto dal punto di vista umano: questa energia infatti che si va a propagare

nell'Universo, raggiunge la nostra atmosfera con intensità nettamente inferiori. Gli strati, dal centro verso l'esterno, sono:

- Il nucleo: rappresenta il 10% in volume della stella, ma oltre il 40% in massa. Qui sono presenti caratteristiche fisiche davvero intense, una densità superiore a $150\,000\text{ kg/m}^3$, temperature superiori ai 13 milioni di gradi kelvin e pressioni di quasi 500 miliardi di atmosfere. Questi valori generano un ambiente, unico all'interno del Sole, tale da permettere la fusione nucleare tra idrogeno ed elio.
- Zona radioattiva: si estende da 0,2 fino a 0,7 raggi solari. Questa zona assorbe l'energia emessa dal nucleo e la trasmette per irraggiamento agli strati successivi. Questo trasferimento avviene in maniera molto lenta: infatti gli ioni di idrogeno ed elio emettono fotoni, che viaggiano attraverso una breve distanza prima di essere riassorbiti ed emessi da altri ioni.
- Zona convettiva: possiede uno spessore di circa 200 000 km, e si colloca nella parte esterna del Sole. Essendo in questo strato la temperatura e la densità inferiori, l'energia e il calore non possono più essere trasferiti per irraggiamento, ma attraverso moti convettivi (da qui il nome alla zona). Infatti la materia più calda viene portata nella zona alta, dove cede la propria energia allo strato successivo; raffreddata, risprofonda alla base, dove riceve nuovamente energia dalla zona radioattiva.
- Fotosfera: questa zona possiede uno spessore di circa 500 km e una temperatura che si aggira attorno ai 6000 gradi kelvin. Costituisce la superficie del Sole visibile ad occhio nudo dalla Terra.
- Cromosfera: in questa zona la temperatura, che si stava abbassando man mano che ci si allontanava dal nucleo, rizia a salire fino a raggiungere le decine di migliaia di gradi kelvin. È uno strato di poche

migliaia di chilometri, ma è principalmente sede di migliaia di getti gassosi emessi contemporaneamente, chiamati *spiculae*: questi getti hanno un diametro superiore ai 1000 km e una velocità superiore ai 30 km/s.

- Corona: qui la temperatura raggiunge il milione di gradi kelvin: è infatti costituita da plasma, e si estende nello spazio per decine di milioni di chilometri. Gli astrofisici non sono ancora riusciti a comprendere perché la corona abbia una temperatura così elevata; essi ritengono che parte del calore sia originato dalla riconnessione delle linee del campo magnetico solare.

2.2 La radiazione solare

Il sole emette una potenza pari a circa 175-178 miliardi di Megawatt, di cui solo circa 1350 W/m^2 raggiungono l'atmosfera terrestre. L'irraggiamento sulla superficie del nostro pianeta è in realtà di valore ben più basso, e questo per diverse motivazioni: tra queste ne possiamo indicare due: quella più scontata riguardante le condizioni atmosferiche, e un'altra meno ovvia data dalla latitudine della zona terrestre considerata. Infatti a maggiori latitudini corrispondono maggiori inclinazioni, ovvero una maggiore porzione di atmosfera attraversata e quindi una minore intensità solare al suolo.

La radiazione solare che giunge sulla terra non è concentrata su una sola frequenza, ma è distribuita su di un ampio spettro di ampiezza non uniforme con la tipica forma di una campana, dove il massimo di radiazione è centrato nella banda della radiazione visibile.

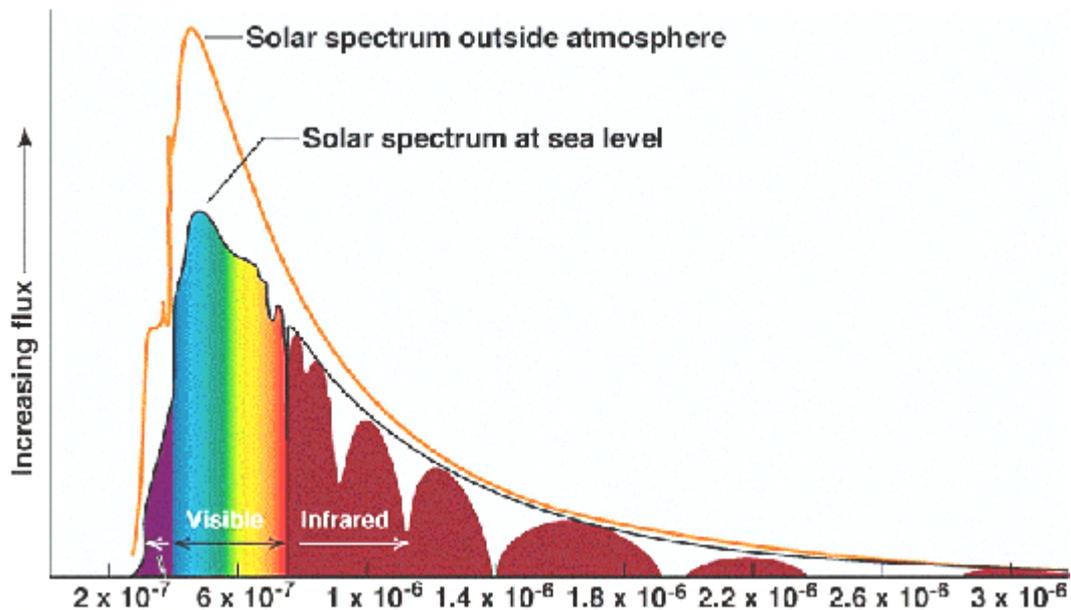


Figura 2.2: Spettro della radiazione solare

La massima intensità spettrale di radiazione emessa dal Sole è a $0,48 \mu\text{m}$. Per quanto riguarda la curva dello spettro, essa è caratterizzata da onde di lunghezza compresa tra circa $0,2$ e $3 \mu\text{m}$ (micrometri, cioè milionesimi di metro). L'occhio umano percepisce come luce solo le radiazioni con lunghezza d'onda compresa mediamente tra $0,38$ e $0,76 \mu\text{m}$, che compongono circa il 42% dello spettro totale. Le onde di lunghezza inferiore a $0,38 \mu\text{m}$ sono denominate ultraviolette e sono il 7%, quelle di lunghezza superiore a $0,76 \mu\text{m}$ sono dette infrarosse, coprendo il 51% dello spettro totale.

La radiazione solare si divide in quattro parti attraversando l'atmosfera:

- Una parte viene riflessa verso lo spazio quando colpisce le nubi.
- Un'altra viene diffusa in tutte le direzioni. Questo fenomeno è causato dagli urti con le molecole di azoto, ossigeno e anidride carbonica.
- Una parte viene assorbita e riemessa come raggi infrarossi da tutte le molecole che costituiscono l'atmosfera.
- Infine una parte raggiunge la superficie terrestre, ed è la parte della radiazione solare che viene chiamata diretta.

La parte diffusa in tutte le direzioni e quella assorbita e riemessa da tutte le molecole facenti parte dell'atmosfera viene più generalmente chiamata come radiazione diffusa.

Si definisce inoltre come insolazione l'energia media giornaliera che colpisce una superficie piana orizzontale. E' espressa in kWh/m², essendo un Wh (wattora) l'energia necessaria a fornire una potenza di un Watt per un'ora (corrisponde quindi a 3,6 kJ, poichè un'ora è composta da 3600 secondi).

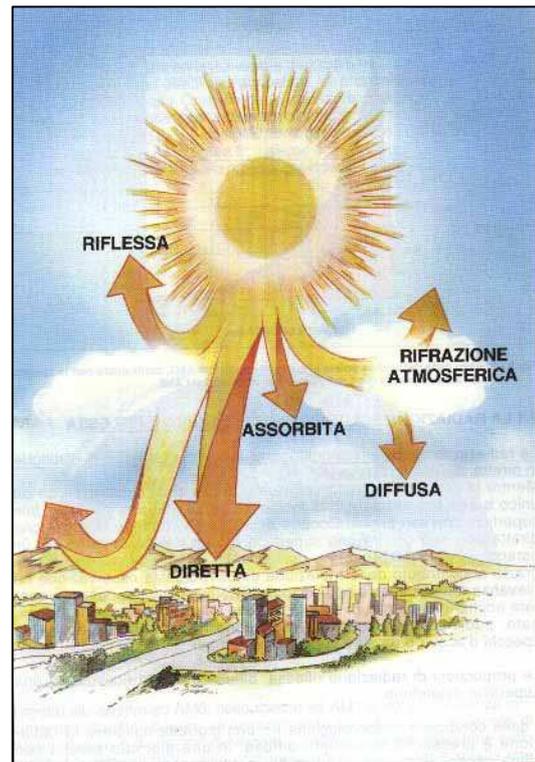


Figura 2.3: schema sulle varie parti che compongono la radiazione solare

2.3 - L'energia solare giornaliera emessa

Da un articolo degli Ingegneri Ali Assi e Mohammed Jama, della facoltà di Ingegneria Elettrica dell'università di Al Ain, negli Emirati Arabi, nel quale cercano di costruire dei modelli attraverso i quali prevedere la radiazione solare a livello globale sulla superficie, è stato ricavato il valore dell'insolazione ad Abu Dhabi nei vari mesi dell'anno. Per il dimensionamento dell'impianto è stato considerato il mese di Giugno, poichè è questo il mese in cui l'insolazione ha maggiore intensità, e solo tramite questa conoscenza è possibile comprendere quanto fluido può essere riscaldato. In figura 2.4 si può notare questo andamento: cresce fino ad

arrivare ai mesi estivi, per poi decrescere arrivando a minimi valori sul finir dell'anno.

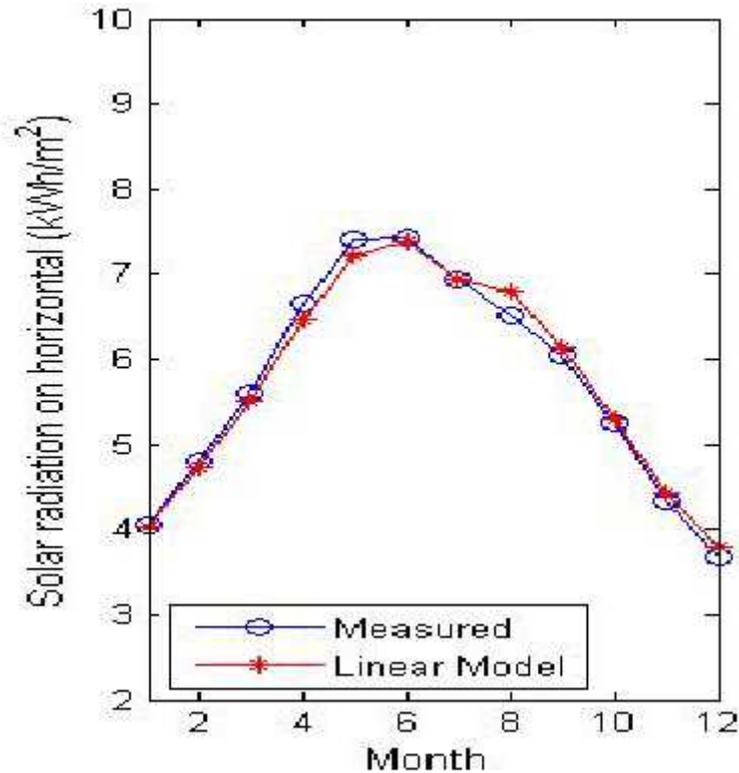


Figura 2.4: andamento dell'insolazione giornaliera media mensile ad Abu Dhabi, capitale degli Emirati Arabi.

Perciò, chiamando I_{day} l'insolazione giornaliera media mensile nel mese di Giugno, dal grafico si deduce che $I_{\text{day}} = 7,4 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$, oppure, considerando che $1\text{Wh} = 3,6 \text{ kJ}$, si può dire che $I_{\text{day}} = 26,64 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2}$. Sapendo inoltre che la superficie sviluppata dal sistema di specchi è di 229 m^2 , si può infine esprimere E_{sol} , ovvero l'energia solare assorbita dall'impianto dopo un'intera giornata di illuminazione:

$$E_{\text{sol}} = I_{\text{day}} \cdot 229 = 6,1 \text{ GJ}$$

Da questo principale valore è possibile esprimere, attraverso una integrazione, l'andamento della potenza istantanea. Supponendo che quest'ultima abbia un andamento sinusoidale nell'arco della giornata, con bassi valori all'alba e al tramonto, e un'intensità maggiore a mezzogiorno, possiamo esprimere la potenza istantanea in funzione del tempo, come $Q(t) = Q_a \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$, dove Q_a è l'ampiezza della funzione e T il periodo della funzione, ovvero $T = 2 \cdot t_{\text{luce}}$, dove t_{luce} sono i secondi di luce in una giornata.

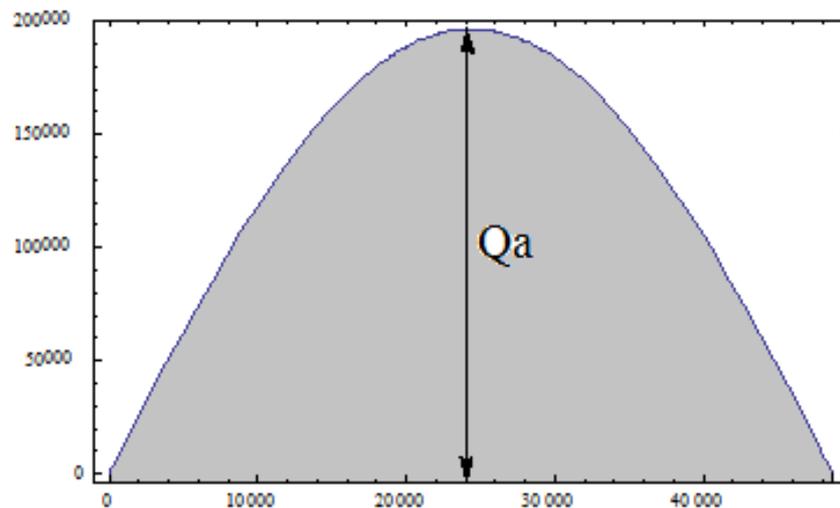


Figura 2.5: andamento della funzione $Q(t)$ nell'arco delle ore di luce

È stato detto nel paragrafo precedente che il mese scelto per i valori di insolazione termica è il mese di Giugno. Ebbene, il giorno che nel mese di Giugno possiede meno ore di luce è il primo. I dati sulle ore di luce, di tramonto e di luce totale sono raccolti dal sito www.timeanddate.com, gestito da una compagnia privata norvegese. Da questo sito si può quindi trovare che per il primo Giugno (dati dell'anno 2013) ad Abu Dhabi:

$$t_{\text{alba}} = 5:34$$

$$t_{\text{tramonto}} = 19:07$$

Perciò, compiendo un semplice calcolo, si possono trovare i secondi effettivi di luce all'interno della giornata: si esprime t_{alba} e $t_{tramonto}$ in secondi, dopodiché si può dire che t_{luce} è data dalla differenza delle due.

$$t_{alba} = (5 \cdot 3600) + (34 \cdot 60) = 20040 \text{ s}$$

$$t_{tramonto} = (19 \cdot 3600) + (7 \cdot 60) = 68820 \text{ s}$$

$$t_{luce} = t_{tramonto} - t_{alba} = 48780 \text{ s}$$

Se si osserva la figura 2.5, si può notare che l'area sottesa alla curva potenza istantanea (colorata in grigio chiaro) non è altro che l'energia solare assorbita dall'impianto nell'intera giornata di illuminazione. Perciò se si volesse trovare il valore di Q_a si potrebbe utilizzare l'equazione di integrazione della curva:

$$E_{sol} = \int_{t_{alba}}^{t_{tramonto}} Q \left(\frac{2\pi}{T} t \right) dt$$

Sostituendo $Q(t)$ e T si ottiene:

$$E_{sol} = \int_{t_{alba}}^{t_{tramonto}} Q_a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_{luce}} t\right) dt,$$

ed essendo Q_a una costante, possiamo tirarla fuori dall'integrale:

$$E_{sol} = Q_a \int_{t_{alba}}^{t_{tramonto}} \sin\left(\frac{\pi}{t_{luce}} t\right) dt, \text{ ottenendo quindi il valore di } Q_a$$

$$Q_a = \frac{E_{sol}}{\int_{t_{alba}}^{t_{tramonto}} \sin\left(\frac{\pi}{t_{luce}} t\right) dt},$$

per concludere si faccia coincidere t_{alba} con il valore zero, in modo che

$$t_{tramonto} = t_{luce}$$

$$Q_a = \frac{E_{sol}}{\int_0^{t_{luce}} \sin\left(\frac{\pi}{t_{luce}} t\right) dt}$$

L'integrale della funzione $\sin\left(\frac{\pi}{t_{\text{luce}}}t\right)$, calcolata tra 0 e t_{luce} , corrisponde a

$$\int_0^{t_{\text{luce}}} \sin\left(\frac{\pi}{t_{\text{luce}}}t\right) dt = -\frac{t_{\text{luce}}}{\pi} \left[\cos\left(\frac{\pi}{t_{\text{luce}}}t\right) \right]_0^{t_{\text{luce}}} =$$

$$= -\frac{t_{\text{luce}}}{\pi} [\cos(\pi) - \cos(0)] = -\frac{t_{\text{luce}}}{\pi} (-2) = \frac{2 \cdot t_{\text{luce}}}{\pi}$$

assumendo quindi un valore di 31054,3.

Questo valore permette infine di calcolare l'ampiezza della funzione potenza istantanea:

$$Q_a = \frac{E_{\text{sol}}}{\int_0^{t_{\text{luce}}} \sin\left(\frac{\pi}{t_{\text{luce}}}t\right) dt} = \frac{6,1 \cdot 10^9}{31054,3} = 196430 \text{ W} = 196,43 \text{ kW}$$

Perciò la funzione potenza istantanea è così espressa:

$$Q(t) = 196,43 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_{\text{luce}}}t\right) \text{ kW.}$$

2.4 - Funzionamento a 24 ore dell'impianto

Come è stato appena mostrato, la radiazione solare nell'arco della giornata non possiede un valore costante, ma ha un valore che aumenta fino ad arrivare ad un massimo di 196,43 kW a mezzogiorno, e poi diminuisce fino a raggiungere intensità nulla quando il sole tramonta. Quando si cerca di dimensionare un impianto è tuttavia sconsigliabile ragionare con delle potenze così variabili.

Quando si parla di impianti solare, nella sua più generale definizione (fotovoltaico oppure termosolare), è pensiero comune che essi abbiano un funzionamento intermittente, causato da principalmente due semplici motivazioni, di carattere atmosferico e planetario: condizioni metereologiche

avverse e la presenza della notte. È invece possibile, grazie ad un sistema di accumulo, conservare l'energia termica in serbatoi appositi sottoforma di fluido riscaldato, per poi liberarla durante la notte, quando il ricevitore non è più in funzione per via della mancanza di energia primaria (quella che proviene dal sole).

Seguendo questa soluzione l'impianto viene dimensionato per un valore di potenza tale che riesca, nell'arco delle 24 ore giornaliere, a produrre una energia termica pari a quella prodotta dal sole nelle ore di luce. Considerando che in una giornata ci sono 86400 secondi (60 secondi per 60 minuti per 24 ore), la potenza termica per il funzionamento a 24 ore si ottiene dalla divisione tra l'energia prodotta nelle ore di luce e il numero di secondi in una giornata:

$$P_{24h} = \frac{E_{sol}}{86400} = \frac{6,1 \cdot 10^9}{86400} = 70608,3 \text{ W} = 70,61 \text{ kW}$$

Da questo valore sarà possibile ricavare il valore della portata di fluido primario, che produrrà poi, andandosi a espandere nell'organo motore, l'energia elettrica.

CAPITOLO 3 - IL CICLO TERMODINAMICO

3.1 - Il ciclo Rankine

Il ciclo di Rankine è un ciclo termodinamico endoversibile, ed è composto da due trasformazioni adiabatiche e due isobare. Esso, che è alla base dei progetti dei motori a vapore, ha lo scopo di convertire il calore in lavoro.

Il suo nome deriva da William John Macquorn Rankine (5 luglio 1820 - 24 dicembre 1872), che era un ingegnere e fisico scozzese. Uno dei padri fondatori della scienza della termodinamica, Rankine ha sviluppato una teoria completa della macchina a vapore e di tutti i motori termici. I suoi manuali di ingegneria teorica e pratica sono stati utilizzati per molti decenni dopo la loro pubblicazione negli anni 1850 e 1860. Dal 1840 in poi ha pubblicato diverse centinaia di articoli e documenti in materia di scienza e ingegneria, e i suoi interessi in gioventù erano estremamente vari: botanica, teoria musicale, teoria dei numeri, oltre ai principali rami della scienza, della matematica e dell'ingegneria.

Questo ciclo sfrutta come fluido motore l'acqua, che prima dell'utilizzo viene opportunamente demineralizzata e degassata. All'interno del ciclo l'acqua si può trovare sia allo stato liquido che gassoso, e per questo vengono di solito utilizzate le cosiddette turbine a vapore.

Il ciclo Rankine può essere:

- aperto: il vapore che esce dalla turbina viene abbandonato in atmosfera (così era per le vecchie locomotive a vapore).
- chiuso: il fluido motore circola all'interno di tubature che non permettono in nessun caso scambi di massa con l'esterno. Per questa tipologia di solito vengono impiegati quattro principali componenti.

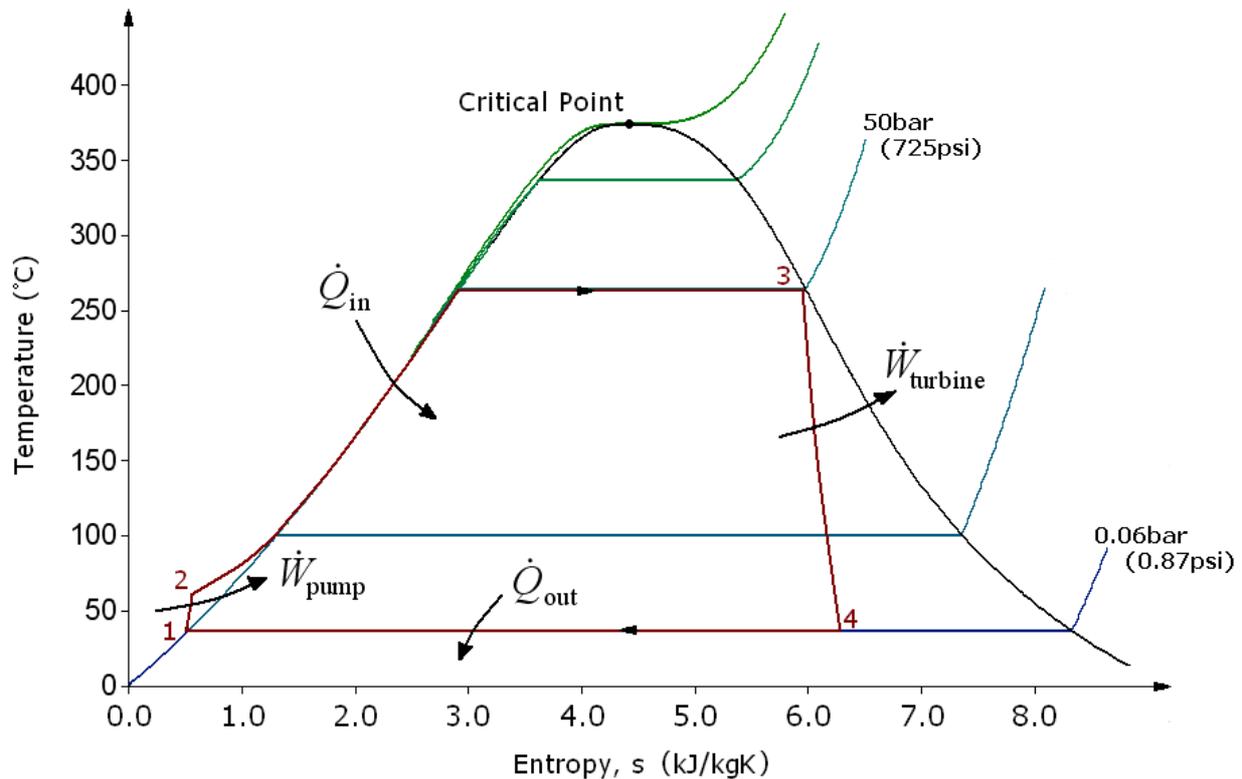


Figura 3.1: tipico ciclo Rankine tra la pressione di vaporizzazione di 50 bar e quella di condensazione di 0.06 bar.

Questi vengono di seguito elencati, indicando pure, facendo riferimento alla figura 3.1, le trasformazioni a essi associate:

- Pompa: (1-2) estrae il liquido saturo dal condensatore e lo porta al livello di pressione presente all'interno della caldaia, e lo invia ad essa. Essendo di solito le variazioni di entalpia, entropia e temperatura minima, questo passaggio è di solito trascurato quando si considera un diagramma T-s (temperatura-entropia): infatti le isobare a sinistra della curva critica sono molto ripide, e per questo la differenza tra le due pressioni non viene apprezzata.
- Generatore di vapore: (2-3) scambiatore di calore tra i fumi di combustione e il liquido saturo, che aumenta la temperatura fino a trasformarsi in vapore saturo secco. Questa trasformazione è isobara.

- Turbina: (3-4) è l'organo nel quale avviene la produzione di vapore. Il vapore saturo, ad elevata pressione ed entalpia, impatta contro le palettature del rotore collegate all'albero, che essendo collegato ad un alternatore permette la produzione di energia elettrica. In questa fase, il vapore si espande fino a raggiungere la minima pressione, con un aumento del volume specifico e una diminuzione di temperatura. Il titolo di vapore in uscita dalla turbina non può essere inferiore ad un valore minimo, di solito 86%, per evitare l'usura delle palette negli ultimi stadi e mantenere alto il rendimento di espansione. Si è soliti effettuare anche degli spillamenti di vapore per preriscaldare l'acqua in ingresso alla caldaia.
- Condensatore: (4-1) scambiatore di calore che condensa il vapore saturo in uscita dalla turbina, a pressione e temperatura costante. L'acqua alla quale viene ceduto il calore viene prelevata da un pozzo termico (lago o fiume nella maggior parte dei casi) e dovendo ad esso tornare, non può avere temperature troppo differenti da quelle di prelievo, per non causare danni a livello ambientale e biologico.

Il ciclo Rankine è di solito adottato nelle centrali termoelettriche per la produzione di energia elettrica. Si sta sviluppando ultimamente l'utilizzo di questo ciclo nella generazione elettrica o motrice con potenze limitate (dai 5 ai 500 kW), con motori a vapore alternativi di ultima generazione, poichè sono composti di materiali di alta tecnologia, come superleghe, ceramiche e compositi, che permettono di superare i limiti di motori a combustione esterna di questo tipo: scambio termico molto efficiente, avviamento estremamente veloce e struttura semplificata. Un sicuro punto

di vantaggio è il fatto che la sorgente di calore non è legata ad un combustibile specifico.

Il ciclo Rankine ad acqua possiede determinati limiti: il principale di essi è dovuto al fatto che l'acciaio utilizzato per le tubazioni di questi usi subisce alle temperature raggiunte dall'acqua in uscita dalla caldaia (generatore di vapore) una riduzione delle caratteristiche meccaniche; tale riduzione è particolarmente aggravata in presenza di ionizzazione del vapore, in particolare nelle centrali nucleari. Per questo sono stati prima ipotizzati e poi creati cicli Rankine con fluidi organici, che hanno temperature di cambiamento di stato più basse, che se da un lato permette una minor energia estraibile per via del minore salto termico, permette l'utilizzo di fonti termiche di minor livello, e evita tutti quei problemi causati dalle alte temperature dell'acqua nelle tubazioni.

3.2 - Gli ORC

3.2.1 - Definizione Generale

Per ORC (Organic Rankin Cycle) si intende un ciclo Rankine appositamente studiato e elaborato per permettere l'utilizzo di sostanze organiche ad alto peso molecolare. Questi fluidi possiedono nella maggior parte dei casi un punto di ebollizione (cambiamento di fase tra stato liquido e gassoso) a temperature più basse di quelle dell'acqua. Ciò permette di produrre energia elettrica anche da fonti di calore a temperature più basse rispetto a quelle presenti all'interno dei sistemi comuni (basti pensare che nei generatori di vapore si raggiungono temperature di 600°C), per esempio rifiuti di lavorazione di cicli industriali, pannelli solari, combustione delle biomasse ecc... . Il primo prototipo di ORC è stato sviluppato nel 1961, ed è al giorno d'oggi un

importante oggetto di studi, soprattutto nel campo delle energie rinnovabili.

Il principio di funzionamento del ciclo Rankine organico è lo stesso del ciclo Rankine: il fluido di lavoro viene pompato in una caldaia, nella quale viene riscaldato e fatto evaporare fino a raggiungere lo stato di vapore saturo secco, per poi attraversare una turbina con la produzione di energia meccanica, ed infine essere ricondensato.

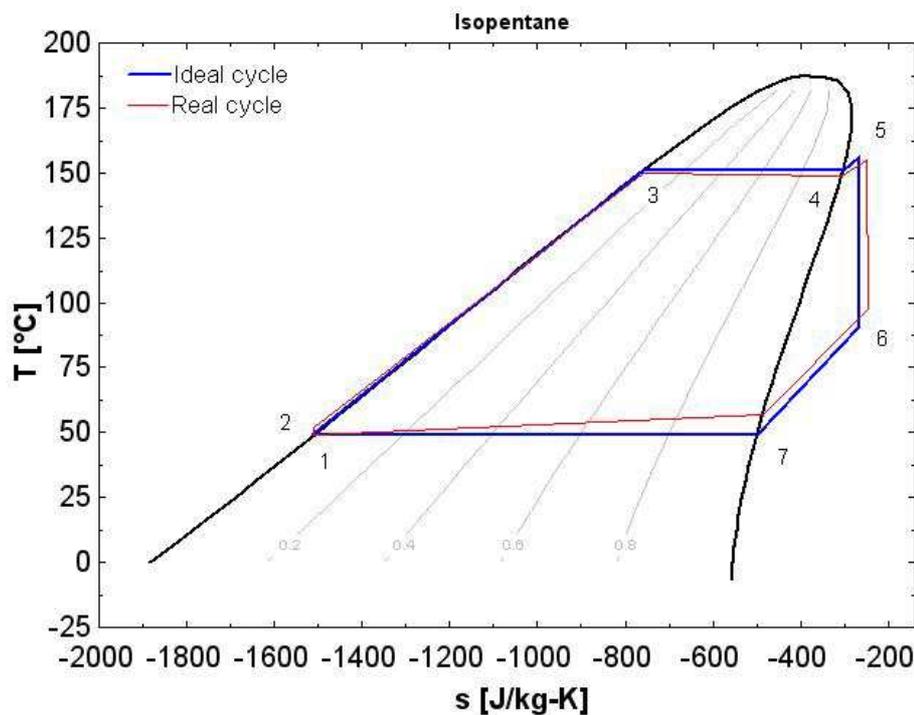


Figura 3.2: tipico ciclo Rankine Organico; trasformazioni ideali e reali

Le differenze tra il ciclo ideale e reale sono dovute alla presenza di irreversibilità, che abbassano l'efficienza del ciclo. Queste irreversibilità si verificano principalmente durante l'espansione, quando parte dell'energia di pressione viene completamente trasformata in lavoro mentre la restante parte viene convertita in calore e quindi persa; le perdite si verificano anche nello scambiatore di calore: infatti il fluido necessita di lunghe condotte che per problemi di ingombro vengono spesso ripiegate su loro stesse, ma questo provoca delle perdite di carico, concentrate nelle zone

dove sono presenti accidentalità e percorsi non rettilinei, e distribuite lungo le condotte.

3.2.2 - I principali utilizzi

La tecnologia del ciclo Rankine organico ha molte possibili applicazioni. Considerando che è una tecnologia abbastanza giovane se confrontata con le altre più mature, sapere che al giorno d'oggi sono individuate nel mondo più di 250 centrali elettriche che la utilizzano può aiutare a comprendere le grandi potenzialità che questa tecnica possiede. Sono in seguito citati i campi più diffusi e promettenti in cui questa tecnologia viene applicata:

- Unità di recupero di calore di scarto: è uno dei campi di sviluppo più importanti per il ciclo Rankine organico. Può essere applicato a impianti di alimentazione (per esempio un piccolo impianto di cogenerazione domestico) oppure a processi industriali e agricoli, come gas di scarico dei veicoli, scarichi caldi di fornaci ovvero condensatori di cicli a vapore.
- Centrali a biomasse: essendo la biomassa (per definizione "la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura, dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, comprese la pesca e l'acquacoltura, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti urbani e industriali", Direttiva Europea 2009/28/CE) disponibile in tutto il mondo in grandi quantità, può essere utilizzata per la produzione di energia elettrica su piccola e media scala. Il problema dei costi di investimento elevati specifici per macchine come le caldaie a vapore viene facilmente risolto dall'utilizzo di cicli Rankine organici che lavorano a pressioni nettamente inferiori. Un ulteriore vantaggio è

che i fluidi presenti nei cicli ORC non corrodono, a differenza del vapore, i palettamenti delle turbine e le sedi delle valvole.

- Impianti geotermici: le fonti di calore geotermiche variano da temperature di 50 a 350°C. I cicli Rankine Organici si adattano perfettamente per questi tipi di applicazione, tenendo presente che per sorgenti a bassa temperatura (inferiore a 100 °C) l'efficienza è molto bassa e dipende principalmente dal dissipatore di calore.
- Solare termico: gli ORC possono essere utilizzati nelle tecnologie a pannelli parabolici puntuali e lineari, permettendo la produzione di energia con livelli di potenza termica inferiori e con temperature al collettore inferiori, e quindi costi minori per i concentratori solari.

3.3 - Il ciclo per il progetto Fiore del Deserto

Le introduzioni effettuate sul ciclo Rankine prima, e sui cicli ORC dopo, sono state eseguite per anticipare il ciclo principale scelto per il progetto Fiore del Deserto. Infatti, il ciclo che il fluido primario segue consiste proprio in un ciclo Rankine: terminata la fase di riscaldamento il vapore si presenta alle condizioni di saturo secco, e viene portato ad espandere in un motore volumetrico, il quale sostituisce la turbina dei normali cicli Rankine, ma ottiene lo stesso effetto principale, ovvero la generazione di lavoro utile.

Come già anticipato nel precedente capitolo (paragrafo 2.4), per il progetto Fiore del Deserto è desiderato un funzionamento continuo, ventiquattro ore al giorno, sette giorni la settimana, 365 giorni l'anno. Per risolvere questo tipo di problema è necessario l'introduzione di un ulteriore ciclo di fluido secondario che abbia il compito di conservare l'energia termica assorbita nell'arco delle ore di luce, per poi consegnarla

al fluido primario durante la notte. In figura 3.3 possiamo vedere uno schema a blocchi semplificato dell'impianto.

Le linee colorate rappresentano le condotte all'interno delle quali sono presenti i vari fluidi: in rosso è rappresentato il fluido primario, mentre in blu il fluido secondario. Il fluido secondario, presente all'interno di un serbatoio, viene inviato all'interno del ricevitore, riceve energia dagli specchi e si riscalda, per poi tornare al serbatoio; lo stesso fluido secondario viene prelevato da un altro foro presente nel serbatoio e fatto

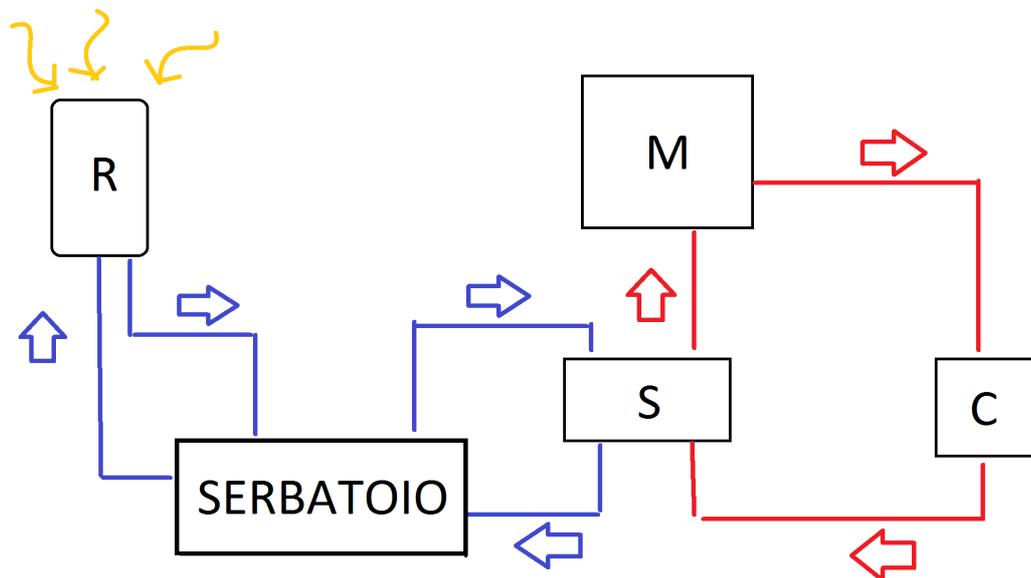


Figura 3.3: schema semplificato dell'impianto

circolare all'interno di uno scambiatore, cedendo potenza termica al fluido primario. Il fluido primario si riscalda fino a raggiungere i livelli entalpici richiesti; il gas in uscita dallo scambiatore finisce poi ad espandersi nel motore, producendo così una potenza meccanica che verrà poi convertita in potenza elettrica. Uscito dal motore, il gas viene inviato in un condensatore, raffreddandosi e raggiungendo lo stato di liquido puro (titolo uguale a zero), per poi riprendere il ciclo appena descritto.

Una volta scelti il fluido primario e quello secondario, fissati i parametri di funzionamento, ovvero il range di temperatura nel quale lavora il fluido

primario, e quello del fluido secondario, il ciclo Rankine compiuto dal fluido primario è totalmente definito. Infatti, come si potrà notare più avanti nella trattazione, le temperature di inizio e fine riscaldamento del fluido primario specificano l'energia termica in ingresso; conoscendo questa, ed essendo nota la potenza termica necessaria per produrre energia per 24 ore consecutive (vedi paragrafo 2.4) è evidente la portata del fluido primario. Dalla conoscenza della portata seguono poi la scoperta del valore della potenza meccanica prodotta, e successivamente della potenza elettrica.

Per effettuare un controllo sul riscaldamento del fluido secondario, è necessario l'utilizzo di un termostato collegato alla pompa di alimentazione del ciclo di riscaldamento. Infatti, come spiegato al paragrafo 2.3, la potenza termica generata dal Sole varia con un andamento crescente nell'arco della mattinata e decrescente nel pomeriggio. Questo comporta che, a parità di superficie del ricevitore, la portata del fluido secondario non può essere costante, in quanto la quantità di energia termica ceduta dai raggi solari al fluido non è costante, e l'obiettivo è raggiungere una determinata temperatura finale, che è un dato del progetto. Di conseguenza, è d'obbligo l'impiego di una pompa a portata variabile, che a seconda delle rivelazioni effettuate dal termostato sulla temperatura di uscita del fluido secondario dal ricevitore, aumenta o diminuisce la portata del liquido a seconda che la temperatura sia maggiore o minore.

3.4 - I fluidi per la trasmissione dell'energia

In questa parte verranno illustrati i due fluidi che, per le loro caratteristiche, sono stati scelti per la produzione di energia meccanica e

poi elettrica (fluido primario) e per la conservazione dell'energia termica (fluido secondario). Come verrà illustrato di seguito, come fluido primario è stato scelto il "1,1,1,3,3-pentafluoropropano", mentre come fluido secondario si è optato per una miscela composta da acqua e da glicole etilenico, che possiede un punto di ebollizione superiore, permettendo di raggiungere temperature più elevate senza cambiamenti di fase.

3.4.1 - Il fluido primario: il Genetron 245fa

L'energia messa a disposizione dal sole non è di certo paragonabile a quella che deriva da fluidi combustibili, utilizzati all'interno di generatori di vapore, sebbene essa sia gratuita. Per sfruttare al meglio questa energia di "basso livello", non si può quindi utilizzare l'acqua, che per produrre quantità di energia elettrica di livello apprezzabile ha bisogno di raggiungere temperature di 500-600 K, troppo alte per un ciclo alimentato da energia solare. Per poterla adoperare, è necessario un fluido che abbia temperatura di vaporizzazione più bassa, tali da permettere l'utilizzo di fonti termiche di minor livello, sebbene con l'estrazione di una minor energia per via del minore salto termico.

Il fluido scelto per eseguire il ciclo primario del progetto Fiore del Deserto è il: R245fa. Questa nomenclatura è quella data ai fluidi refrigeranti, e da essa possiamo comprendere la sua struttura molecolare. I vari refrigeranti infatti sono designati in base alle indicazioni della norma americana ASHRAE Standard 34, cioè da una sigla del tipo

R - I - II - III - IV - V - VI

dove i vari numeri romani hanno questi significati:

- I - Si pone una C in caso di derivati ciclici. Altrimenti 0 (in tal caso si omette).
- II - Numero di legami doppi meno uno. Se uguale a 0 si omette.
- III - Numero di atomi di carbonio meno uno. Quindi vale 1 per i derivati dall'etano e 0 per i derivati dal metano.
- IV - Numero di atomi di idrogeno più uno.
- V - Numero di atomi di fluoro.
- VI - Una o più lettere dell'alfabeto minuscole o una lettera maiuscola per indicare la struttura molecolare scelta tra le varie strutture possibili. Infatti dato che la maggior parte dei fluidi refrigeranti deriva dell'etano, propano, o butano per sostituzione di atomi di idrogeno con cloro, fluoro, bromo, possono avere uguale composizione chimica ma diversa struttura molecolare.

Perciò nel caso dell' R245fa, la molecola del fluido primario scelto possiede tre atomi di carbonio, tre atomi di idrogeno e cinque atomi di fluoro. La sua nomenclatura IUPAC è "1,1,1,3,3-pentafluoropropano", ma viene chiamato anche con diversi altri nomi commerciali. La compagnia americana Honeywell, produttrice di questo fluido, lo commercializza infatti con nomi quali "Enovate 3000" oppure "Genetron 245fa".

Il fluido R245fa si presenta come un liquido non infiammabile avente punto di ebollizione leggermente al di sotto della temperatura ambiente. Esso presenta proprietà termofisiche che lo rendono apprezzabile per l'utilizzo come fluido refrigerante per macchine frigorifere centrifughe, oppure come fluido motore oppure come fluido operativo negli scambiatori di calore. Le proprietà ambientali del Genetron 245 fa includono uno zero ODP (Ozone Depletion Potential) e un basso potenziale di riscaldamento globale. Inoltre non è considerato un composto organico volatile negli Stati Uniti.

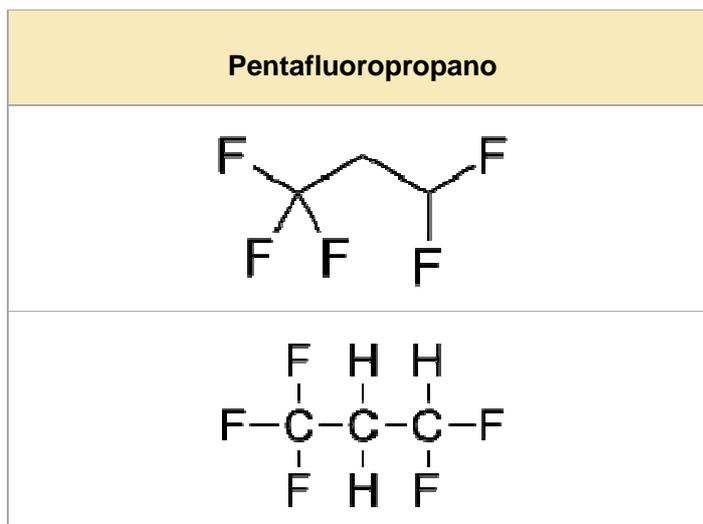


Figura 3.4: struttura chimica del 1,1,1,3,3-Pentafluoropropano.

Il Genetron 245fa è attualmente segnato nei principali registri di sostanze chimiche del mondo, quali l'americano TSCA US EPA, l'europeo EINECS e il giapponese METI. Svareti test svolti sulla tossicità indicano che l' R245fa possiede una bassa tossicità. I risultati complessivi di una serie di studi genetici svelano che non è mutageno; Non è neppure un

Properties of HFC-245fa			
Chemical Name	1,1,1,3,3-pentafluoropropane		
Molecular Formula	CF ₃ CH ₂ CF ₂		
Molecular Weight	134		
Flammability Limits in Air @ 1atm** (vol.%)	None		
Flash Point *	None		
Water Solubility in HFC-245fa	1600 ppm		
ASHRAE Safety Group Classification	B1		
<small>*Flashpoint by ASTM D 3828-87; ASTM D1310-86</small>			
<small>**Flame Limits measured at ambient temperature and pressure using ASTM E681-85 with electrically heated match ignition, spark ignition and fused wire ignition; ambient air.</small>			
Standard International Units*		English Units*	
Boiling Point °C @ 1.01 bar	15.3	Boiling Point (°F) @ 1 atm	59.5
Freezing Point °C @ 1.01 bar	<-107	Freezing Point (°F)	<-160
Critical Temperature** (°C)	154.05	Critical Temperature** (°F)	309.29
Critical Pressure** (bar)	36.4	Critical Pressure** (psia)	527.9
Critical Density** (m ³ /kg)	517	Critical Density** (lb/ft ³)	32.28
Vapor Density @ Boiling Point (lb/ft ³)	5.921	Vapor Density @ Boiling Point (lb/ft ³)	0.3697
Liquid Density (kg/m ³)	1339	Liquid Density (lb/ft ³)	83.58
Liquid Heat Capacity (kJ/kg K)	1.36	Liquid Heat Capacity (Btu/lb °F)	0.33
Vapor Heat Capacity @ constant pressure, 1.01 bar (kJ/kg K)	0.8931	Vapor Heat Capacity @ constant pressure, 1 atm (Btu/lb °F)	0.218
Heat of Vaporization at Boiling Point (kJ/kg)	196.7	Heat of Vaporization at Boiling Point (Btu/lb)	84.62
Liquid Thermal Conductivity (W/m K)	0.081	Liquid Thermal Conductivity (Btu/hr ft °F)	0.0468
Vapor Thermal Conductivity (W/m K)	0.0125	Vapor Thermal Conductivity (Btu/hr ft °F)	0.0072
Liquid Viscosity (mPa s)	402.7	Liquid Viscosity (lb/ft hr)	0.9744
Vapor Viscosity (mPa s)	10.3	Vapor Viscosity (lb/ft hr)	0.025
<small>*Properties at 77 °F / 25 °C unless noted otherwise</small>			
<small>**NIST Refprop v 7.0</small>			

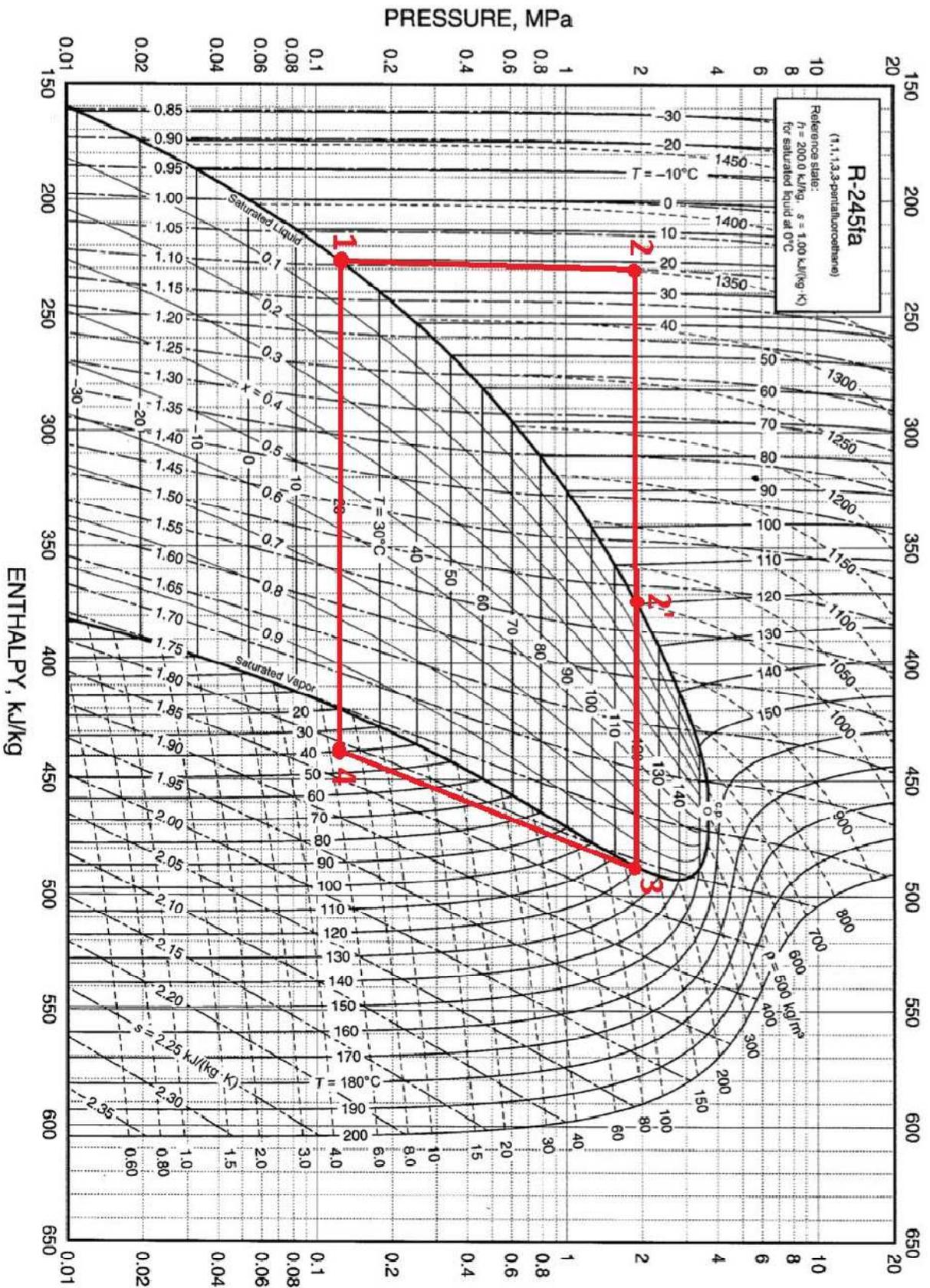
Tabella 3.5: Principali proprietà del Genetron 245fa.

teratogeno. L'American Industrial Hygiene Association ha stabilito un WEEL (Workplace Environmental Exposure Level) di 300 ppm (parti per milione).

I test di laboratorio indicano che l'R245fa possiede un elevato grado di stabilità termica e idrolitica. Inoltre sono state condotte prove di stabilità a 260 ° C per 4 settimane in tubi sigillati termicamente, ed al termine di questi studi la purezza del Genetron 245fa risultò invariata. Negli studi svolti facendo scorrere il fluido all'interno di tubi sigillati, il materiale non ha mostrato segni di decomposizione dopo 6 settimane di esposizione a temperature comprese fra 75 ° C a 200 ° C in presenza e in assenza di acqua (300 ppm) e in presenza e assenza di metalli (3003 alluminio e / o acciaio inossidabile 316). Uno studio separato è stato condotto anche con una lastra d'acciaio laminato a freddo esposta al Genetron 245fa in presenza e assenza di aria e acqua per un periodo da 2 a 6 settimane a temperature che vanno dai 25 ° C a 100 ° C. Anche in questo caso il Genetron 245fa non ha mostrato alcun segno di decomposizione. La presenza di metalli, aria, umidità e lubrificante possono influenzare la stabilità e di conseguenza, la stabilità termica vanno valutate per le condizioni di applicazione.

Per l'applicazione del Genetron 245fa nel ciclo indicato, sono state scelte come temperatura di condensazione quella di 20 °C, e come temperatura di evaporazione quella di 120 °C. Perciò, osservando il diagramma di figura 3.6, dove sono rappresentate tutte le curve caratteristiche del Genetron 245 fa (diagramma p-h con indicati gli andamenti della temperatura, densità, entropia e titolo), con fisse queste due temperature, si individua istantaneamente il ciclo.

Figura 3.6 (pagina seguente): diagramma pressione-entalpia del Genetron 245fa.



Pressure-Enthalpy Diagram for Refrigerant 245fa

3.4.2 - Il glicole etilenico, caratteristiche generali

Il glicole etilenico fu preparato per la prima volta nel 1859 dal chimico francese Charles Wurtz, facendo reagire 1,2 dibromoetano (nomenclatura IUPAC) e acetato d'argento, dai quali si ottiene un intermedio che viene successivamente sottoposto a idrolisi. Prodotto in piccole quantità durante la prima guerra mondiale e impiegato come liquido di raffreddamento e intermedio per la produzione di esplosivi, viene prodotto su larga scala a partire dal 1937, quando il suo precursore, l'ossido di etilene, diventa disponibile a prezzi convenienti.

Un primo effetto della sua introduzione fu lo snellimento dei radiatori dei motori degli aerei, in cui fu usato al posto dell'acqua ad alta pressione come liquido di raffreddamento; ciò consentì di ridurre l'ingombro e di modificare sensibilmente il profilo degli aeromobili. La motivazione è che il glicole etilenico ha una temperatura di ebollizione maggiore di 100 °C, ciò permette di alzare la temperatura del liquido refrigerante in ingresso al radiatore aumentando la sua efficienza (quantità di calore scambiato a parità di superficie).

Il glicole etilenico viene prodotto industrialmente a partire da ossido di etilene (a sua volta ottenuto dall'ossidazione parziale dell'etilene), tramite l'addizione di una molecola di acqua:

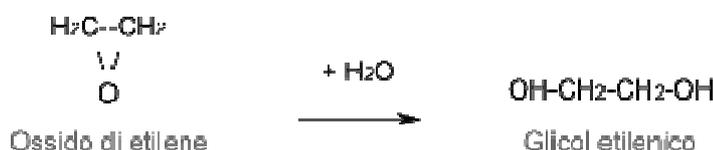


Figura 3.7: processo di produzione del glicole etilenico

È impiegato largamente come anticongelante, in soluzione o puro. L'elevato punto di ebollizione e l'elevata affinità con l'acqua rendono il glicole etilenico un ottimo agente disidratante nella produzione del gas

naturale, dove viene impiegato per rimuovere l'eccesso di vapore acqueo.

Il glicole etilenico è tossico per ingestione. I primi sintomi di intossicazione sono simili a quelli di un'ubriacatura da etanolo, confusione, difficoltà di parola, cattiva coordinazione dei movimenti; col tempo l'organismo metabolizza il glicole etilenico in acido ossalico che può provocare un blocco renale. Una dose di circa 30 millilitri può essere letale.

Caratteristiche generali	
<u>Formula bruta o molecolare</u>	C ₂ H ₆ O ₂
<u>Massa molecolare (u)</u>	62,07
Proprietà chimico-fisiche	
<u>Densità (g/cm³, in c.s.)</u>	1,11
<u>Solubilità in acqua</u>	1000 g/l a 20 °C
<u>Temperatura di fusione</u>	-13 °C (260 K)

Figura 3.8: proprietà generali del glicole etilenico

3.4.3 - Il fluido secondario: l'acqua glicolata

Come fluido secondario è stata scelta una miscela di acqua e di glicole etilenico: la presenza di quest'ultimo infatti produce un innalzamento totale del punto di ebollizione, permettendo così un riscaldamento a temperature che, a pressione ambiente, l'acqua raggiungerebbe solo dopo essere evaporata. Questa temperatura di ebollizione varia a seconda della percentuale di glicole etilenico presente nella miscela, secondo questa tabella:

		Boiling Point										
Ethylene Glycol Solution (% by volume)		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Temperature	(°F)	212	214	216	220	220	225	232	245	260	288	386
	(°C)	100	101.1	102.2	104.4	104.4	107.2	111.1	118	127	142	197

Tabella 3.9: variazione del punto di ebollizione a seconda della percentuale di glicole presente

Sapendo che il Genetron 245fa raggiunge una temperatura massima di 120°C, ci conviene scegliere una percentuale del Glicole Etilenico presente nella soluzione del 90%. Infatti, anche se può sembrare che basterebbe una percentuale dell'80% con punto di ebollizione di 127 °C, questa è altamente sconsigliata perchè, come si legge nella teoria degli scambiatori a superficie, due fluidi non possono mai raggiungere la stessa temperatura finale, poichè questo risultato si otterrebbe solo con uno scambiatore di lunghezza infinita. Perciò la soluzione al 90% di Glicole Etilenico permette di raggiungere temperature più alte, avendo punto di ebollizione pari a 142 °C.

Una volta scelta la percentuale di glicole etilenico presente nella soluzione, vengono fissate le temperature di inizio e di fine riscaldamento:

$$T_i = 30 \text{ °C}$$

$$T_f = 135 \text{ °C}$$

La densità del glicole etilenico in condizioni standard è di 1,11 g/cm³, corrispondente a 1110 kg/m³. Si può quindi notare che la densità del glicole è superiore a quella dell'acqua. Considerando infatti la densità dell'acqua distillata pari a 1000 kg/m³, si può calcolare la densità della soluzione finale come:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{acq-glic}} &= (0,9 \cdot \rho_{\text{glicole}}) + (0,1 \cdot \rho_{\text{acqua}}) = (0,9 \cdot 1110) + (0,1 \cdot 1000) \\ &= 1099 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \end{aligned}$$

Si passi ora al calcolo del calore specifico a pressione costante della soluzione (c_p). Dalla tabella ... si possono identificare i valori del calore specifico per alcune percentuali di glicole etilenico nella soluzione, ma per estrapolazione dei dati, supponendo delle variazioni lineari del calore specifico al variare della temperatura, si può calcolare il calore specifico medio della nostra soluzione. Con questo procedimento si può verificare che:

$$c_{p\ 30^{\circ}\text{C}} = 0,60 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$c_{p\ 135^{\circ}\text{C}} = 0,70 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

Perciò la media tra questi due valori è:

$$c_{p\ \text{medio}} = \frac{c_{p\ 135^{\circ}\text{C}} + c_{p\ 30^{\circ}\text{C}}}{2} = 0,65 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

che, considerando che $1\ \text{kcal} = 4,186\ \text{kJ}$, corrisponde a:

$$c_{p\ \text{medio}} = 2,72 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

Il valore del calore specifico medio della soluzione appena scoperto permetterà successivamente il calcolo della massa di acqua glicolata riscaldata in una giornata dall'energia solare.

Specific Heat - c_p - (Btu/lb. $^{\circ}F$)								
Temperature		Ethylene Glycol Solution (% by volume)						
($^{\circ}F$)	($^{\circ}C$)	25	30	40	50	60	65	100
-40	-40	1)	1)	1)	1)	0.68	0.703	1)
0	-17.8	1)	1)	0.83	0.78	0.723	0.7	0.54
40	4.4	0.913	0.89	0.845	0.795	0.748	0.721	0.562
80	26.7	0.921	0.902	0.86	0.815	0.768	0.743	0.59
120	48.9	0.933	0.915	0.875	0.832	0.788	0.765	0.612
160	71.1	0.94	0.925	0.89	0.85	0.81	0.786	0.64
200	93.3	0.953	0.936	0.905	0.865	0.83	0.807	0.66
240	115.6	2)	2)	2)	2)	2)	0.828	0.689
280	137.8	2)	2)	2)	2)	2)	2)	0.71

Figura 3.10: tabella dove è mostrata la variazione del calore specifico al variare della percentuale di glicole etilenico.

3.5 Il rendimento del ciclo

Il ciclo scelto per questo progetto stabilisce che la temperatura di condensazione dell' R245fa sia di 20°C, mentre quella di vaporizzazione sia di 120°C.

Dalla figura 3.6 , presentata al paragrafo 3.4.1, si può notare che, scelte le due temperature di massima e di minima tra le quali lavorerà il fluido primario, i punti funzionali del ciclo sono definiti. Considerando il caso ideale e facendo riferimento ai punti espressi nel diagramma pressione-entalpia, per ognuno dei punti funzionali è possibile esprimere il valore della temperatura, dell'entropia, della pressione e dell'entalpia, direttamente raccolti dallo stesso diagramma, il quale è molto dettagliato e presenta le curve isoterme, isoentropiche, isobare e isoentalpiche. Nella tabella ... sottostante, sono raccolti i valori dei quattro principali punti: il punto 1 è quello di fine condensazione, ovvero il fluido si presenta nello stato di liquido saturo. Il punto 2 è il punto che segna la fine della compressione, ovvero quando il fluido raggiunge la pressione di evaporazione. Il punto 3 coincide con lo stato di vapore saturo secco: il liquido è completamente evaporato e possiede un valore entalpico elevato, pronto ad espandersi nel motore. Il punto 4 invece è dovuto

all'intersezione della curva isoentropica di espansione nel motore, e quella isobara di condensazione: questo punto si trova ad una temperatura superiore a quella del punto 1, per il fatto che l'isoentropica di espansione non entra all'interno della campana, ma resta esterna ad essa; in un diagramma T-s si noterebbe che l'isobara, che all'interno della campana coincide con l'isoterma, superando la curva critica superiore ottiene una pendenza positiva, tale per cui mantenendo l'entropia costante l'isoentropica incontra l'isobara in un punto a temperatura elevata.

Quanto riassunto nella tabella 3.10 permette di conoscere, soprattutto grazie ai valori entalpici, il calore da introdurre affinché il fluido primario si riscaldi e poi evapori, il lavoro prodotto dal vapore quando si espande all'interno del motore, e il calore che viene liberato durante la condensazione. Si indichi con Q_{risc} il calore necessario al riscaldamento dell' R245fa, ovvero il calore necessario affinché la temperatura del fluido

Numero Punto	Pressione [Mpa]	Temperatura [°C]	Entropia [$\frac{kJ}{kg \cdot K}$]	Entalpia [$\frac{kJ}{kg}$]
1	0,12	20	1,09	228
2	1,88	23	1,09	232
3	1,88	120	1,81	490
4	0,12	38	1,81	437

Tabella 3.10: riassunto dei valori più importanti dei punti fondamentali del ciclo; l'entropia e l'entalpia sono specifiche, ovvero riferite all'unità di massa.

primario passi da 23 °C a 120 °C; il punto di fine riscaldamento è quello che nel diagramma 3.6 è indicato con 2', nel quale $h_{2'} = 378 \frac{kJ}{kg}$. Con Q_{evap} viene indicato il calore necessario per fare completamente evaporare il liquido, con L_{esp} il lavoro prodotto dall'espansione del gas in turbina, e con

Q_{cond} il calore liberato nella condensazione, equivalente al calore ceduto al liquido di raffreddamento, che può essere acqua prelevata da un fiume. I valori di Q_{risc} , Q_{evap} , L_{esp} e Q_{cond} sono così calcolati:

$$L_{\text{pompa}} = h_2 - h_1 = 232 - 228 = 4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{risc}} = h_{2'} - h_2 = 378 - 232 = 146 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{evap}} = h_3 - h_{2'} = 490 - 378 = 112 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$L_{\text{esp}} = h_3 - h_4 = 490 - 437 = 53 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{\text{cond}} = h_4 - h_1 = 437 - 228 = 209 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

dove con h_i si indica il valore dell'entalpia specifica riferita all' i -esimo punto del ciclo. I valori di Q_{risc} e Q_{evap} si possono sommare tra loro, poiché entrambi rappresentano una quantità di calore che è necessario introdurre all'interno del ciclo, ovvero cedere al fluido termovettore, affinché questo possa raggiungere livelli entalpici tali per poter espandere poi nel motore producendo una quantità significativa di lavoro. Perciò chiamando Q_{intr} il calore introdotto nel ciclo attraverso lo scambiatore, ovvero ceduto dal fluido secondario, si ha che:

$$Q_{\text{intr}} = Q_{\text{risc}} + Q_{\text{evap}} = (h_{2'} - h_2) + (h_3 - h_{2'}) = h_3 - h_2; \text{ per cui}$$

$$Q_{\text{intr}} = 258 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Cercando ora di calcolare il rendimento ideale del ciclo ORC previsto per il progetto Fiore del Deserto, si ricordi che in una conversione di energia il rendimento termodinamico, o efficienza termodinamica, è il rapporto tra il lavoro meccanico compiuto e l'energia fornita al sistema

(Q_{ass} , energia assorbita da parte del sistema dall'ambiente esterno verso l'interno del sistema):

$$\eta = \frac{L}{|Q_{ass}|}$$

Il rendimento è espresso come valore compreso tra zero e uno o sotto forma di percentuale, e rappresenta quindi la percentuale di calore che viene efficacemente convertita in lavoro meccanico. Il lavoro, presente a numeratore nell'espressione del rendimento, vale quanto la sottrazione tra il lavoro prodotto nel motore volumetrico e quello speso per alimentare la pompa per portare il fluido dalla pressione di condensazione a quella di evaporazione. Il calore assorbito nel ciclo equivale al calore introdotto, ovvero l'energia introdotta nella trasformazione isobara da 2 a 3.

Eseguendo questo semplice calcolo si ottiene il rendimento del ciclo ideale.

Si può quindi esprimere come:

$$\eta = \frac{L}{|Q_{ass}|} = \frac{L_{esp} - L}{Q_{intr}} = \frac{53 - 4}{258} = 0,1899$$

Il valore del rendimento ideale del ciclo Rankine organico è:

$\eta = 0.19$, che corrisponde a circa 19%.

CAPITOLO 4 - IL FIORE DEL DESERTO E I SUOI COMPONENTI

In questo capitolo verranno esposti tutti i componenti per la realizzazione dell'impianto relativo al progetto Fiore del Deserto e al suo corretto funzionamento.

4.1 - I serbatoi e il problema dell'accumulo

Come già visto nei capitoli precedenti, questo progetto non si basa semplicemente sulla produzione di energia elettrica in presenza di energia solare, ma si pone l'obiettivo di "mettere da parte" quest'ultima durante il giorno mentre l'energia elettrica viene prodotta, per poi rilasciarla durante la notte, quando la radiazione solare non è più disponibile, in modo tale da permettere un funzionamento continuo senza interruzioni. Per fare ciò un fluido (l'acqua glicolata) compie un ciclo secondario nel quale viene prelevato da un serbatoio e spedito al ricevitore, dove si scalda per via dei raggi solari riflessi dagli specchi fino alla temperatura finale di 135°C, e poi viene inviato all'interno di uno scambiatore, dove cede la sua energia al fluido primario, che produrrà poi attraverso l'espansione in un motore volumetrico, l'energia meccanica.

Dato che la potenza solare non è costante nell'arco della giornata, la portata di fluido che dal serbatoio finisce al ricevitore non è costante, ma varia nel tempo; invece, la portata che deve alimentare lo scambiatore a superficie, poichè deve cedere un determinato valore di energia termica determinata durante lo studio dell'impianto, non può essere diversa dal valore di progetto. In conseguenza del fatto vi sia una portata che è variabile da una parte e costante dall'altra, e che quella variabile prelevi il fluido a basse temperature e quella costante ad alte temperature, si è scelto di separare il serbatoio in due parti distinte: all'interno del primo viene raccolta l'acqua glicolata in uscita dallo scambiatore e inviata al ricevitore (serbatoio freddo), mentre nel secondo

viene conservato il fluido riscaldato in uscita dal ricevitore che poi viene prelevato per alimentare lo scambiatore (serbatoio caldo).

Lo schema di funzionamento è quindi il seguente:

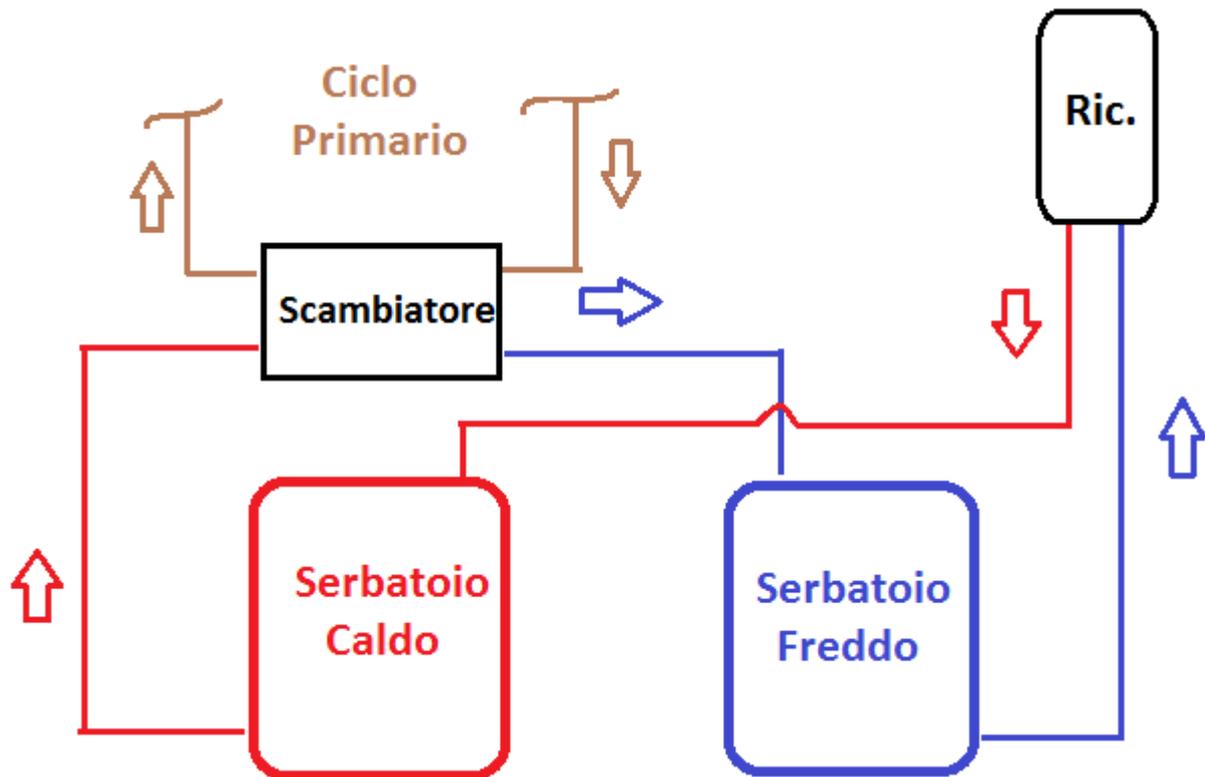


Figura 4.1: schema di principio rappresentante il ciclo secondario, legato ai serbatoi.

In rosso sono indicate le condotte in cui è presente il fluido caldo, in blu quelle del fluido freddo, e in marroncino quelle legate al Genetron 245fa, il fluido primario. La linea calda si trova ad una temperatura di 135 °C, mentre quella fredda ad una temperatura di 30 °C.

4.1.1 - Calcolo della quantità di fluido riscaldato

Prima di passare al dimensionamento dei serbatoi, è necessario calcolare quanta acqua glicolata viene riscaldata, passando dalla temperatura di 30 °C alla temperatura di 135 °C, nell'arco di una giornata di sole.

Si è visto che la quantità di energia prodotta dalla radiazione solare e concentrata dagli specchi è di $E_{sol} = 6,1 \text{ GJ}$. È noto che per innalzare la temperatura di 1 kg di acqua distillata di 1 °C è necessaria 1 kcal, equivalente a 4,186 kJ. Questo valore è dato dalla seguente formula:

$$E_r = m \cdot c_p \cdot \Delta T,$$

dove m equivale alla massa (che in questo caso è di 1 kg), c_p è il calore specifico dell'acqua distillata (pari a $4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$) e ΔT è la variazione di temperatura (1 °C).

Come si può notare il valore di E_r è dato, per unità di massa e di temperatura, dal valore del calore specifico. Ciò significa che conoscendo il calore specifico dell'acqua glicolata e la sua escursione termica, è possibile calcolare la quantità di energia necessaria per riscaldare 1 kg di acqua glicolata. Essendo poi nota la quantità di energia disponibile nell'arco della giornata, si calcola la massa riscaldata nelle ore di sole.

Il calore specifico dell'acqua glicolata è pari a $2,72 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$. Questo valore permette già di notare che la miscela, avendo un calore specifico inferiore rispetto quello dell'acqua distillata, necessita, a parità di massa, una minor energia per il riscaldamento. Si avrà quindi, a parità di energia disponibile, una massa riscaldata di acqua glicolata maggiore rispetto alla medesima di acqua distillata. Conoscendo la variazione di temperatura, pari a $\Delta T = 105 \text{ }^\circ\text{C}$, l'energia specifica di riscaldamento, necessaria a scaldare 1 kg di acqua glicolata, è pari a

$$e_r = c_{p \text{ acq-glic}} \cdot \Delta T = 285,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Se consideriamo un rendimento del ricevitore pari a 0,9, conseguenza del fatto che non è possibile che esso si comporti come un corpo nero, ma più come un corpo grigio con alto coefficiente di assorbimento, la massa m di acqua glicolata portata dalla temperatura di 30 °C a quella di 135 °C nell'arco di una giornata equivale a:

$$m = \frac{E_{\text{sol}} \cdot \eta_{\text{ric}}}{e_r} = 19218 \text{ kg}$$

Per poter compiere una scelta riguardo la capienza che i serbatoi devono possedere, si deve valutare il volume occupato dall'acqua glicolata. Questo si calcola come:

$$V = \frac{m \cdot 1000}{\rho_{\text{acq-glic}}} = 17487 \text{ l}$$

4.1.2 - Il problema dell'accumulo

Venga d'ora in poi considerato il serbatoio caldo. Da esso parte una portata di fluido costante che alimenta lo scambiatore, e giunge in esso una portata variabile dal ricevitore, dove l'acqua glicolata è stata scaldata. Considerando un determinato intervallo di tempo, il fatto che dal serbatoio parta una quantità fissa di fluido, e ne arrivi una che dipende dallo specifico orario della giornata, porta ad avere una quantità di fluido all'interno del serbatoio variabile e non fissa. Per scegliere la giusta capienza dei serbatoi, è obbligatorio valutare l'andamento del pelo libero all'interno del serbatoio considerato, andando a studiare la quantità di acqua glicolata riscaldata in ogni istante di tempo.

Nel capitolo 2.3, si è studiato l'andamento della potenza istantanea dovuta alla radiazione solare. Viene qui riportata nuovamente la curva che la descrive:

$$Q(t) = 196,43 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{t_{\text{luce}}} t\right) \text{ kW} \quad .$$

Tramite questa funzione è possibile conoscere il valore della potenza termica in un determinato istante di tempo. Se si considera un intervallo di tempo infinitesimo dt , e si ipotizza che il valore della potenza termica sia costante per tutto l'intervallo di tempo dt , l'energia ceduta al fluido nell'intervallo $[t, t + dt]$ vale

$E_{\text{ced } dt} = Q(t) \cdot dt \cdot \eta_{\text{ric}} \text{ kJ}$, dove η_{ric} è il rendimento del ricevitore. Per conoscere la massa del fluido riscaldato nell'intervallo dt , si deve eseguire questo calcolo:

$m_{in dt} = \frac{E_{ced dt}}{e_r}$ kg , per poi passare al volume riscaldato:

$$V_{in dt} = \frac{m_{in dt} \cdot 1000}{\rho_{acq-glic}} = \frac{Q(t) \cdot dt \cdot \eta_{ric} \cdot 1000}{e_r \cdot \rho_{acq-glic}} \text{ l}$$

Come si può notare, la presenza di un parametro dipendente dal tempo ($Q(t)$) implica che $V_{in dt}$ sia variabile: cresce quando cresce $Q(t)$ e decresce con esso. Perciò in ogni intervallo di tempo infinitesimo dt , $V_{in dt}$ rappresenta il volume di acqua glicolata riscaldata dal ricevitore che entra all'interno del serbatoio caldo. Il volume che invece esce per andare nello scambiatore per rilasciare energia termica al fluido primario è un valore costante, poichè non dipende da $Q(t)$, ma dal valore della potenza ceduta all'interno dello scambiatore che è un parametro di progetto già calcolato al capitolo 2.4, e vale $P_{24h} = 70,61$ kW. Per cui, considerando un rendimento dello scambiatore pari a 0,9 , il valore della massa inviata allo scambiatore per soddisfare tale potenza è $m_{out dt} = \frac{P_{24h} \cdot dt \cdot \eta_{sc}}{e_r}$; e_r , che corrisponde all'energia necessaria per riscaldare un chilogrammo di acqua glicolata da 30 a 135 °C, equivale pure all'energia liberata nella trasformazione opposta, ovvero il raffreddamento da 135 a 30 °C. Infatti è tra questi parametri che lavora l'acqua glicolata all'interno dello scambiatore, e ciò comporta che e_r sia una costante del sistema. Di conseguenza

$$V_{out dt} = \frac{m_{out dt} \cdot 1000}{\rho_{acq-glic}} = \frac{P_{24h} \cdot dt \cdot \eta_{sc} \cdot 1000}{\rho_{acq-glic} \cdot e_r} \text{ l}$$

Essendo noti ora i valori di $V_{in dt}$ e di $V_{out dt}$ è possibile valutare la variazione di volume di fluido all'interno del serbatoio caldo per ogni istante di tempo. Infatti:

$$V(t + dt) = V(t) + (V_{in dt} - V_{out dt})$$

dove $V(t)$ rappresenta il volume di fluido presente all'interno del serbatoio all'istante t e $V(t + dt)$ quello presente dopo un intervallo di tempo infinitesimo dt . Iterando questi calcoli, tramite l'utilizzo di un calcolatore virtuale, è possibile verificare questo andamento e riportarlo in un diagramma volume tempo. Considerando il volume

iniziale di fluido presente all'interno del serbatoio uguale a zero, in figura 4.2 è presentata la variazione di volume nell'arco di un'intera giornata di 24 ore: si noti che nella prima parte della curva il volume cresce, corrispondente alla parte di giornata in cui la potenza termica è superiore a quella richiesta nello scambiatore con il ciclo primario, e quindi il volume riscaldato e mandato nel serbatoio è maggiore di quello prelevato, mentre la seconda parte, decrescente con andamento lineare, corrisponde alla parte in cui l'energia solare non è più disponibile, ovvero la notte, ed il fluido messo da parte nell'arco del dì viene ora prelevato ed utilizzato per sfruttare la sua riserva di energia termica.

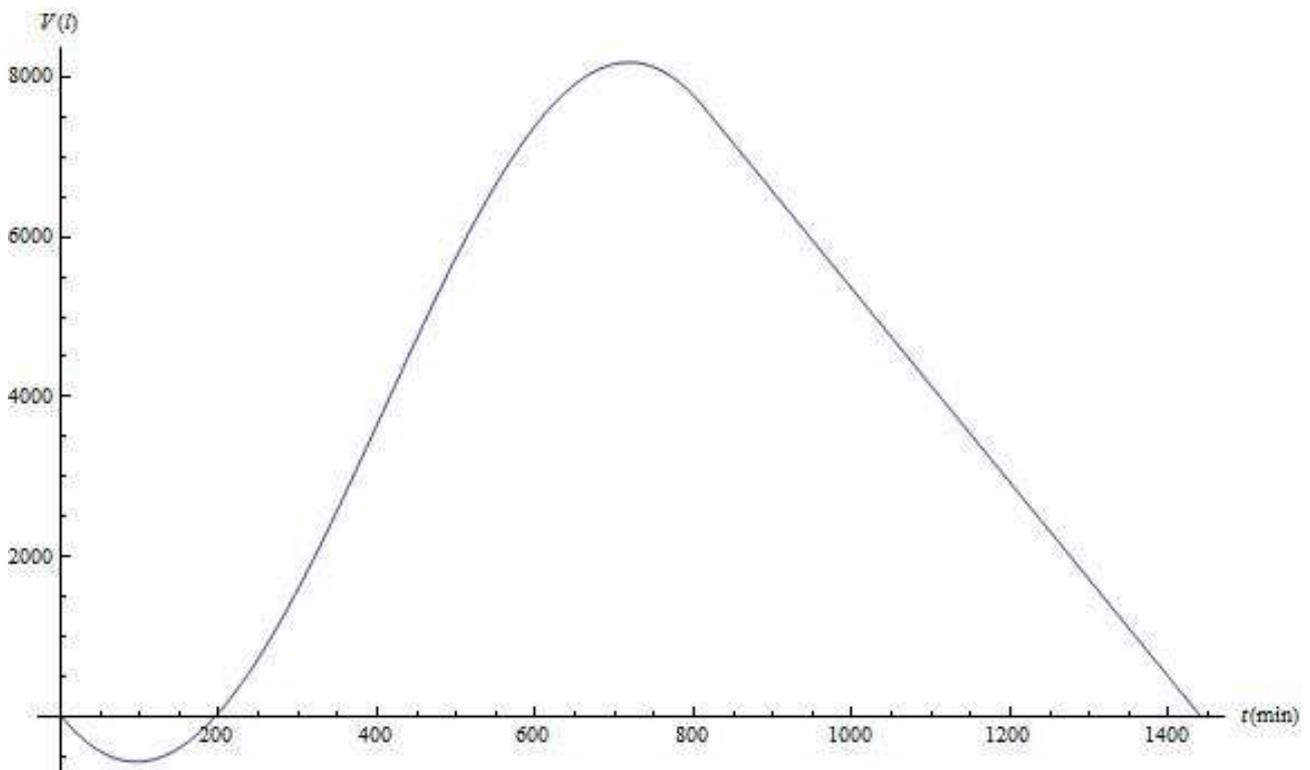


Figura 4.2: variazione del pelo libero di acqua glicolata a 135 °C presente nel serbatoio caldo.

Il valore massimo della curva corrisponde a 8192,19 litri, mentre il valore minimo a -564.3 litri. Perciò il serbatoio conterrà un volume massimo di fluido dato dalla somma dei valori assoluti del massimo e del minimo. Perciò:

$$V = |V_{\max}| + |V_{\min}| = 8756,49 \text{ l}$$

La curva di variazione del volume nel serbatoio freddo è simmetrica alla curva in figura 4.2 rispetto l'asse delle ascisse. Ciò è logico per via del fatto che ciò che entra

nel serbatoio caldo equivale a ciò che esce dal serbatoio freddo, e ciò che esce dal serbatoio caldo entra nel freddo. Quindi il valore di V coincide pure per il serbatoio freddo.

Per questo progetto sono quindi stati scelti due serbatoi da 9000 litri, uno per conservare il fluido alla temperatura di 135 °C, l'altro alla temperatura di 30°C. Se per esempio si considera il modello CD90 del gruppo "Righetto Serbatoi", le dimensioni del serbatoio sono: $\varnothing = 1900$ mm , $B = 3260$ mm



Figura 4.3: modello CD90 del gruppo Righetto Serbatoi.

4.2 - La pompa a portata variabile del ciclo secondario

A causa della variazione della potenza termica dovuta alla radiazione solare, varia anche la portata del fluido che si deve riscaldare. Questa portata ha un andamento proporzionale alla stessa potenza termica, poiché dipende da essa. Infatti la portata, calcolata per un periodo di un tempo infinitesimo, vale:

$G = \frac{m_{dt}}{dt}$, dove m_{dt} è la massa di fluido riscaldata nel tempo dt , ovvero

$$m_{dt} = \frac{E_{ced} dt}{e_r} = \frac{Q(t) \cdot dt \cdot \eta_{ric}}{e_r} = \frac{dt \cdot \eta_{ric}}{e_r} Q(t) \text{ kg}$$

Perciò G dipende da $Q(t)$, e come si può notare dal diagramma in figura 4.4, segue per questo lo stesso andamento. Andando a studiare la funzione $G(t)$ si calcola il massimo della portata in massa dell'acqua glicolata, ovvero $G_{max} = 0.62 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$.

Soddisfare questa portata è il compito della pompa a portata variabile che sarà posta al principio del condotto in uscita dal serbatoio freddo. Questa pompa sarà governata da un termostato posto all'uscita del ricevitore, il quale misurando la temperatura di uscita dell'acqua glicolata, comanderà l'aumento o la diminuzione della portata stessa. Questa pompa però non deve solo soddisfare la portata richiesta, ma deve possedere una potenza tale da inviare il fluido nel ricevitore, posto ad una determinata altezza.

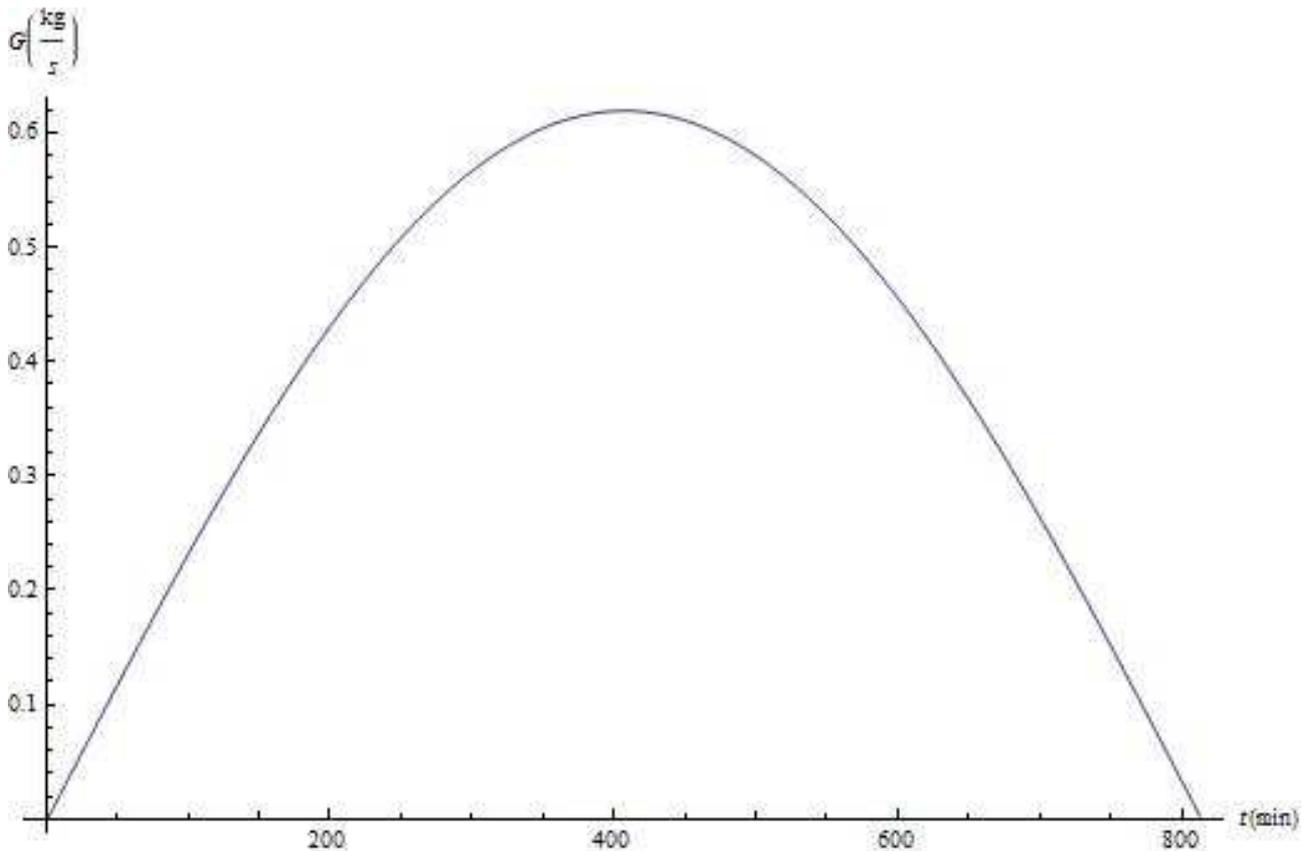


Figura 4.4: Andamento della portata al variare della potenza termica istantanea.

Infatti la tubazione che congiunge il serbatoio al punto più alto del ricevitore è composta da un tubo verticale lungo 8,5 metri, mentre il ricevitore, come visto al capitolo 1.5.1, è composto da un'elica, che possiede una altezza complessiva di 1,65 metri. Perciò l'altezza complessiva che la pompa deve poter soddisfare equivale a $h = 10,15$ m .

Si vuole ora calcolare in modo rigoroso la potenza richiesta alla pompa nella situazione peggiore, ovvero quando è richiesta la portata massima. Richiamando l'equazione generalizzata del moto dei fluidi, essa dice che:

$$L = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g \cdot h + \frac{p_2 - p_1}{\rho_{\text{acq-glic}}} + R_c + R_d$$

Le grandezze con il pedice 1 sono quelle riferite all'ingresso della pompa e quelle col pedice 2 sono quelle riferite al punto più alto del ricevitore ($h = z_2$, con $z_1 = 0$). I valori R_c e R_d sono rispettivamente le perdite di carico concentrate e distribuite. Nel nostro caso si possono trascurare i seguenti parametri:

- $c_1 = 0$, poichè il fluido all'ingresso della pompa ha velocità nulla, o comunque talmente bassa da essere considerata trascurabile.
- $p_2 - p_1 = 0$, in quanto non vi è differenza di pressione nei due rami.
- R_c trascurabile. Infatti gli unici punti dove potrebbero esservi sono nelle curve dell'elica del ricevitore, ma se chiamiamo r il raggio dell'elica ($=200$ mm) e d il diametro dei tubi ($=15$ mm), il rapporto r/d vale 13,3, per cui il coefficiente di perdita concentrata, che diminuisce all'aumentare di r/d , risulta trascurabile.

Perciò l'espressione del lavoro utile diventa:

$$L = \frac{c_2^2}{2} + g \cdot h + R_d$$

c_2 si può esprimere in funzione della portata: $c_2 = \frac{G_{\text{max}}}{\rho_{\text{acq-glic}} \cdot S}$, dove S è la sezione della condotta nella quale scorre il fluido. Se il diametro della condotta è pari a 15 mm, la sezione vale $S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 176,71 \text{ mm}^2 = 1,76 \times 10^{-4} \text{ m}^2$.

Perciò $c_2 = 3,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Quindi il termine cinetico vale: $\frac{c_2^2}{2} = 5,12 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

Il termine gravitazionale, essendo $h = 10,15$ m, vale $g \cdot h = 99,57 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$.

Le perdite distribuite possono essere calcolate separatamente sul tratto verticale e sull'elica che compone il ricevitore. Nel tratto verticale la temperatura del fluido resta circa di 30°C per il fatto che i raggi non vengono convogliati in quella zona. Dalla

tabella 4.5 si può notare come varia il coefficiente di viscosità dinamica al variare della percentuale di volume di glicole presente nella soluzione e della temperatura. Per una percentuale del 90%, a 30°C il valore di μ è circa di 7 centipoise, ovvero $7 \times 10^{-3} \frac{\text{Pa}}{\text{s}}$. Il numero di Reynolds in questa situazione risulta $Re = \frac{D \cdot c \cdot \rho_{\text{acq-glic}}}{\mu}$, e vale $Re = 7536$. Il flusso si trova quindi in regime turbolento e si calcola il coefficiente di attrito come $k_a = 0,316 \cdot Re^{-0,25} = 0.0339$. Il termine delle perdite distribuite lungo il tratto verticale vale quindi:

$$R_{d \text{ vert}} = k_a \cdot \frac{c_2^2 \cdot L}{2 \cdot D} = 98 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

dove L è la lunghezza del tubo verticale.

Dynamic Viscosity - μ - (centipoise)								
Temperature		Ethylene Glycol Solution (% by volume)						
(°F)	(°C)	25	30	40	50	60	65	100
0	-17.8	1)	1)	15	22	35	45	310
40	4.4	3	3.5	4.8	6.5	9	10.2	48
80	26.7	1.5	1.7	2.2	2.8	3.8	4.5	14
120	48.9	0.9	1	1.3	1.5	2	2.4	7
160	71.1	0.65	0.7	0.8	0.95	1.3	1.5	3.8
200	93.3	0.48	0.5	0.6	0.7	0.88	0.98	1.4
240	115.6	2)	2)	2)	2)	2)	2)	1.8
280	137.8	2)	2)	2)	2)	2)	2)	1.4

Tabella 4.5: viscosità dinamica per diversi valori di percentuale di volume di glicole presente e di temperatura. μ è espresso in centipoise, che corrispondono a $1 \times 10^{-3} \frac{\text{Pa}}{\text{s}}$. Dove è indicato 1) ci si trova sotto il punto di congelamento, e dove è segnato 2) si è sopra il punto di fusione.

Vengano svolti gli stessi calcoli ora per l'elica del ricevitore. In questa zona il fluido, subendo il riscaldamento da parte dei raggi riflessi, aumenta la sua temperatura da 30 a 135 °C. Viene perciò scelto un valore della viscosità dinamica medio tra i due estremi: mentre, come si è visto per il caso verticale, la viscosità dinamica alla temperatura di 30 °C vale $\mu_{30} = 7 \times 10^{-3} \frac{\text{Pa}}{\text{s}}$, nel caso di 135°C vale all'incirca $\mu_{135} = 1,4 \times 10^{-3} \frac{\text{Pa}}{\text{s}}$. La loro media vale $\mu_m = 4,2 \times 10^{-3} \frac{\text{Pa}}{\text{s}}$. Il calcolo del numero di Reynolds restituisce $Re = 12510$; il moto turbolento assegna al valore di

$k_a = 0.0299$. Perciò il valore delle perdite distribuite nell'elica del ricevitore è:

$$R_{d \text{ elica}} = k_a \cdot \frac{c_2^2 \cdot L}{2 \cdot D} = 141 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

dove L è la lunghezza dell'elica, che vale 13,92 metri.

Il lavoro specifico L vale quindi $L = 328,8 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$. Da questo valore è possibile calcolare la potenza massima richiesta dalla pompa di alimentazione.

$$P_{\text{max}} = L \cdot G_{\text{max}} = 203,5 \text{ W}$$

Perciò è sufficiente una pompa a portata variabile di 0,3 kW per alimentare il circuito di riscaldamento della acqua glicolata.

4.3 - La pompa a portata costante del ciclo primario

In modo più semplice a quello appena visto è descrivibile la potenza che la pompa assegnata al ciclo primario deve possedere. Questa pompa infatti non è variabile, ma deve mantenere una portata costante, che è quella scelta in sede di progetto. Si è visto che la energia termica specifica che il Genetron 245fa deve assorbire per innalzare la propria temperatura da 20 a 120 °C e per evaporare completamente, è di $258 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$. Da questo valore, conoscendo la potenza termica messa a disposizione dallo scambiatore, si ottiene la portata del fluido primario:

$$G_{R245fa} = \frac{P_{24h}}{Q_{\text{intr}}} = \frac{70,61}{258} = 0,27 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Dalla portata in massa del Genetron, conoscendo il lavoro specifico compiuto dalla pompa per portare il fluido primario dalla pressione di 0,12 Mpa a quella di 1,88 Mpa, si ottiene la potenza della pompa a portata costante:

$$P_{\text{pompa}} = L_{\text{pompa}} \cdot G_{R245fa} = 4 \cdot 0,27 = 1,08 \text{ kW}$$

Perciò, per permettere l'esistenza del ciclo ORC del fluido primario, è necessaria una pompa che trasferisca una potenza di 1,08 kW.

4.4 - Lo scambiatore a piastre

L'acqua glicolata cede il proprio calore al Genetron 245 fa tramite uno scambiatore a superficie. In questo paragrafo viene mostrato il tipo di scambiatore scelto per questo passaggio di energia termica, ovvero lo scambiatore a piastre.

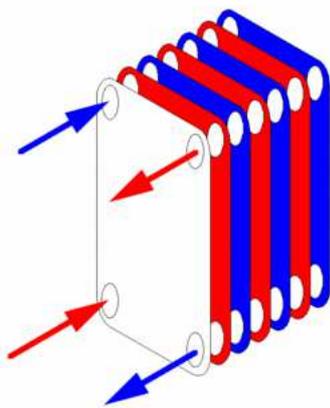


Figura 4.6: schema di funzionamento di uno scambiatore a piastre

Lo scambiatore a piastre è uno scambiatore a superficie in cui le due correnti fluide a temperatura diversa scambiano il loro contenuto termico attraverso delle superfici lavorate a rilievo e disposte l'una accanto all'altra, dove i fluidi entrano in interazione tra loro tramite flussi controcorrenti. Questo tipo di scambiatore è costituito da piastre corrugate (in modo da ottenere un aumento della superficie di scambio e della turbolenza) in successione, ognuna avente uno spessore che può andare dai 0,5 ai 3 mm. Le piastre sono separate tra loro attraverso guarnizioni in gomma o in un altro materiale, garantendo così la tenuta idraulica verso l'esterno e in torno ai fori di passaggio. Una coppia di piastre genera una camera di passaggio per il fluido caldo o per il fluido freddo, a seconda delle posizioni delle piastre: infatti, ciascuna piastra è a contatto da un lato con il fluido caldo e dall'altro lato con il fluido freddo. Ciascuna piastra presenta quattro fori (due di alimentazione e due di scarico) agli angoli della piastra. La forma dei rilievi può variare da costruttore a costruttore. Di solito per la



realizzazione delle piastre vengono utilizzati acciai inossidabili austenitici, con qualche eccezione per le piastre in titanio.

Figura 4.7: tipica piastra corrugata

Nel caso del progetto Fiore del Deserto, la potenza termica scambiata è di 70,61 kW. Il numero di piastre dipende dal valore della potenza termica. Infatti:

$$P_{24h} = \frac{S \cdot Dt_{ml}}{Rt}$$

dove S è la superficie dello scambiatore, Dt_{ml} è la variazione di temperatura media logaritmica e Rt è la resistenza termica dello scambiatore. Dato che nel caso di uno scambiatore a piastre $S = n \cdot S_0$, dove n è il numero di piastre e S_0 è la superficie della singola piastra, conoscendo tutti i valori dei parametri, è possibile ricavare il valore di n .

4.5 - Il condensatore

Per permettere al fluido primario di completare il suo ciclo Rankine, esso deve, una volta terminata la propria espansione all'interno del motore volumetrico, cedere la propria energia termica per poter ritornare alla condizione di liquido puro. In questi casi è necessario l'utilizzo di un condensatore, il quale preleva acqua da un fiume limitrofo all'impianto, la quale si riscalda, permettendo il cambiamento di fase del genetron 254fa. L'energia termica specifica indicata nella scelta del condensatore è quella trovata nei calcoli al paragrafo ... e vale $209 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

Considerando la portata di Genetron245fa, ovvero $0,27 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$, la potenza termica vale

$$P_{\text{cond}} = Q_{\text{cond}} \cdot G_{R245fa} = 56,43 \text{ kW}$$

4.6 - Il motore a palmole

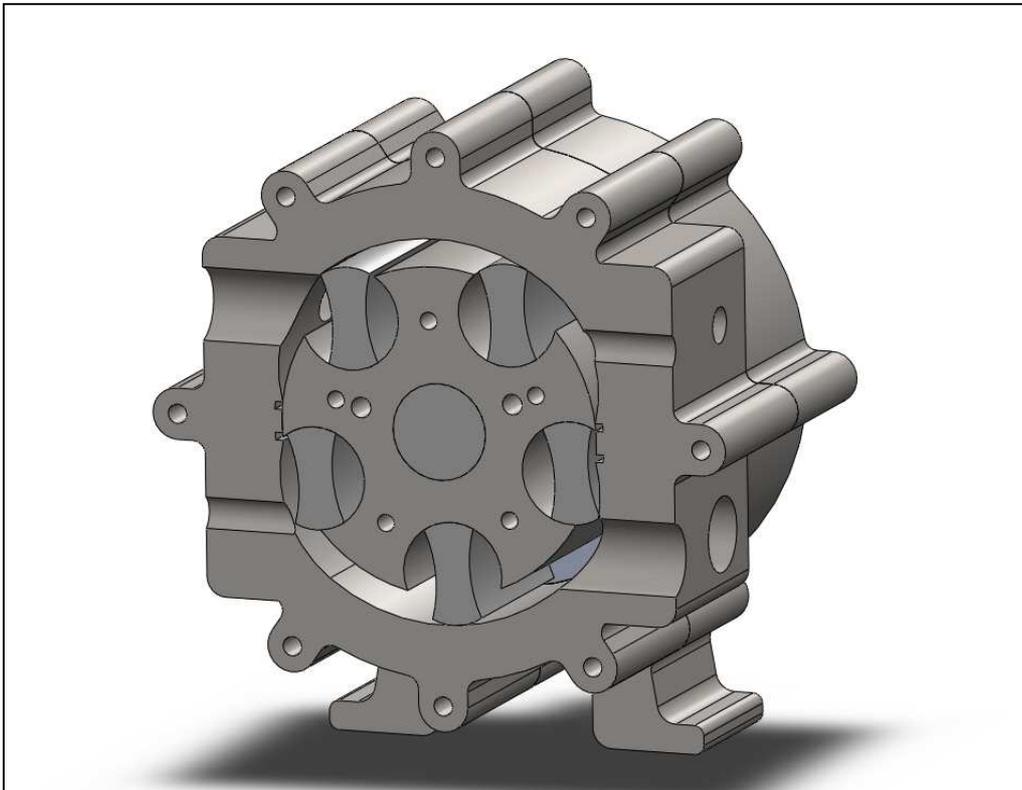


Figura 4.8: vista interna del motore a palmole.

Il fluido primario R245fa, una volta aumentata la propria entalpia, viene inviato in un motore a palmole per l'espansione. Questo motore è così composto: vi sono quattro sezione di passaggio, che uniscono l'interno del motore con l'esterno; due di queste sezioni sono di entrata (quelle di diametro inferiore) e due di uscita (quelle con il diametro maggiore). Il fluido, allo stato gassoso, impatta sulle palette che compongono il rotore, facendolo così ruotare. Esso è serrato all'albero, il quale gira con il rotore. All'albero poi è collegata una cinghia che permette successivamente il trasferimento del moto rotatorio all'alternatore per la produzione di energia elettrica.

Considerando la portata di fluido primario ed un rendimento del motore pari a 0,8 , la potenza meccanica prodotta nell'attraversamento da parte del fluido del motore è di:

$$P_{\text{mecc}} = G_{\text{R245fa}} \cdot L_{\text{esp}} \cdot \eta_{\text{mot}} = 11,45 \text{ kW}$$

Considerando un rendimento elettrico pari al 90%, si ottiene una potenza elettrica prodotta all'alternatore pari a:

$$P_{el} = P_{mecc} \cdot \eta_{mot} = 10,3 \text{ kW}$$

Una famiglia media composta da 3-4 persone consuma circa 3000 kWh all'anno. Considerando il valore di potenza elettrico calcolato, si può ottenere la quantità di energia elettrica prodotta in un anno:

$$E_{year} = P_{el} \cdot (365 \cdot 24) = 90228 \text{ kWh} , \text{ per un totale di famiglie pari a}$$

$$N_{fam} = \frac{90228}{3000} = 30,076$$

L'impianto Fiore del Deserto è in grado di soddisfare mediamente la copertura elettrica di una trentina di famiglie. Questo è un valore medio, perché dipendente dal periodo dell'anno, quindi dalle condizioni meteorologiche e dalla durata delle giornate.

CONCLUSIONE

In questa tesi è stato illustrato un progetto per la realizzazione di un impianto solare termodinamico, sviluppato con lo scopo di produrre continuamente energia elettrica, indipendentemente dalla presenza del Sole. Come si è visto, un circuito secondario affiancato a quello primario permette l'accumulo di energia termica, fino a riempire un serbatoio di 9000 litri con un fluido ad alta temperatura, consentendo un funzionamento di 24 ore al giorno. I calcoli effettuati mostrano che tramite l'impianto presentato è possibile soddisfare mediamente il fabbisogno energetico di 30 famiglie. La struttura ideata è stata inizialmente pensata per una produzione in serie, consentendo quindi di moltiplicare le potenze rese; tutto ciò è oltremodo permesso tramite il corretto posizionamento dello stesso impianto: in Medio Oriente e in Nord Africa, luoghi dove il livello di irraggiamento è tra i più alti in assoluto in tutto il mondo, sono presenti numerose e vaste zone desertiche, che si prestano perfettamente alla realizzazione di questo tipo di impianto. Vasti campi di "Fiori del Deserto", permetterebbero grandi generazioni di energia elettrica. In un mondo dove notizie riguardanti sovrappopolazione e problemi energetici sono all'ordine del giorno, risulta essenziale sfruttare tutto ciò che la natura ci offre: l'energia solare continuerà ad esistere per almeno altri cinque miliardi di anni, mentre i luoghi desertici sono tali da secoli e secoli. È proprio in questo spazio geografico che potrebbe verificarsi la prossima rivoluzione energetica.

BIBLIOGRAFIA

- G. Negri di Montenegro, M. Bianchi, A. Peretto, Sistemi Energetici e loro componenti, Pitagora.
- Marco Gentilini: "IMPIANTI MECCANICI" – Quarta Edizione, Pitagora Editrice Bologna 1999.
- Nicola Grillo: "Impianti termici alimentati da energia Solare, Geva edizione
- Ali Assi and Mohammed Jama, Estimating Global Solar Radiation on Horizontal from Sunshine Hours in Abu Dhabi – UAE
- Ethylene Glycol Heat-Transfer Fluid,
http://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html,
consultato il 03/12/2013
- Beatrice Pulvirenti, Termofluidodinamica applicata, Oltre i Portici, 2008
- Tadahmun Ahmed Yassen, Experimental and Theoretical Study of a Parabolic Trough Solar Collector, Anbar Journal for Engineering Sciences.
- Honeywell, Genetron 245fa. Applications Development Guide.