

Titolo “Metodo di dimensionamento di un generatore solare direttamente esposto alla radiazione solare e generatore solare ottenuto”

Campo della tecnica

La presente invenzione si riferisce ad un sistema di ricezione della radiazione solare riflessa da un concentratore solare ed al suo relativo metodo di dimensionamento e posizionamento. In particolare, il sistema di ricezione ha lo scopo di adattare la distribuzione di una radiazione solare riflessa da un riflettore primario su un assorbitore di un motore stirling.

Stato della tecnica

Il motore stirling è un motore termico a combustione esterna, a ciclo chiuso che utilizza un gas come fluido termodinamico, solitamente aria, azoto oppure elio nelle versioni ad alto rendimento: esso si dimostra molto versatile in relazione a differenti fonti di calore. Il motore stirling è costituito da uno o più cilindri in cui scorrono uno o più pistoni in seguito all'espansione ed alla contrazione del fluido termodinamico. Il gas scorre alternativamente da uno scambiatore caldo ed uno scambiatore freddo dopo essere passato da un rigeneratore di calore: il corrispondente movimento armonico dei pistoni può produrre, tramite un convertitore meccanico-elettrico, energia elettrica.

Il calore è generalmente fornito allo scambiatore di calore, che si trova ad un'estremità del/i cilindro/i, e provvede a riscaldare il fluido termodinamico interno che mette in moto il/i pistone/i.

Usualmente lo scambiatore di calore è formato da una pluralità di alette di materiale avente una buona conducibilità termica, oppure da una pluralità di piccoli condotti in cui scorre il fluido di lavoro.

Il rigeneratore assorbe e restituisce alternativamente calore dal/al fluido di lavoro ed aumenta l'efficienza di trasformazione. Lo scambiatore freddo, che costituisce la sorgente a bassa temperatura, è di solito uno scambiatore a flusso incrociato a

fascio tubiero in cui i tubi sono lambiti esternamente da acqua refrigerante, mentre all'interno dei tubi fluisce il fluido di lavoro.

Il fatto che il motore stirling sia a combustione esterna è vantaggioso perché il calore può essere fornito esternamente da una vasta gamma di combustibili, anche a basso potere calorifico.

Un'applicazione molto diffusa del motore stirling prevede di realizzare la sorgente calda bruciando gas naturale.

Un'altra applicazione prevede l'utilizzazione del motore stirling nella produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile ed in particolare mediante la captazione e l'eventuale accumulo di calore ricavato dalle radiazioni solari allo scopo di definire detto punto caldo all'interno del motore.

In tale ambito, l'impiego dei motori stirling si divide tra applicazioni in cui il calore è ceduto a un fluido vettore e da questo trasportato alla testa di uno o più motori stirling ed applicazioni in cui la testa del motore è direttamente esposto alla radiazione solare. Ciò comportando che il motore è allineato lungo un asse di focalizzazione di uno specchio riflettente, detto riflettore primario. Il sistema di ricezione, dunque comprende un assorbitore, direttamente montato sulla testa del motore stirling e un riflettore secondario, predisposto attorno all'assorbitore allo scopo di limitare le perdite dovute a radiazioni emesse dallo stesso assorbitore che può raggiungere temperature prossime ai 500 °C.

Esempi di questo tipo di applicazione sono dati in US6735946, US7026722 e WO2010/045269.

In particolare, in WO2010/045269 si evidenzia una problematica relativa al possibile surriscaldamento della testa del motore, risolta mettendo in rotazione il motore intorno all'asse di focalizzazione, in modo da distribuire la radiazione su una zona più ampia della testa.

Il problema fondamentale dei dispositivi noti deriva dal fatto che l'assorbitore non è dimensionato in modo opportuno. Ciò comporta un comportamento instabile del motore stirling.

Allo scopo di stabilizzare, tale comportamento, la tecnica nota tende a sovradimensionare il riflettore primario, per sopperire alla variabilità di soleggiamento, cosa che in condizioni di scarsa o media irradiazione permette un

discreto funzionamento del motore, ma in caso di eccessiva irradiazione, il motore tende a surriscaldarsi ed anche a danneggiarsi. Da qui i diversi sistemi per proteggere il motore dal surriscaldamento.

Al contrario, riducendo la superficie del riflettore primario, il motore tende a fermarsi appena la radiazione solare si riduce, anche temporaneamente, per esempio per il transito di nubi.

Secondo un altro aspetto, sono noti motori stirling, free-piston, di piccola taglia, ottimizzati per funzionare mediante la combustione di gas naturale, garantendo ottima efficienza. Un esempio di simili motori è dato nel brevetto WO2005/054654. Poiché tali motori hanno visto un grande sviluppo nell'ambito della combustione del gas, ciò ha comportato un inevitabile perfezionamento degli stessi, che risultano particolarmente affidabili ed efficienti.

Sommario dell'invenzione

La presente invenzione si propone di insegnare come dimensionare generatore solare direttamente esposto alla radiazione solare, in modo da superare i suddetti limiti della tecnica nota.

E' oggetto della presente invenzione un metodo di dimensionamento di un generatore solare direttamente esposto alla radiazione solare, conformemente alla rivendicazione 1.

Un ulteriore scopo della presente invenzione è quello di mostrare una vantaggiosa giustapposizione dell'assorbitore rispetto al riflettore primario di un sistema solare, in modo da superare i suddetti problemi della tecnica nota.

Forma pure oggetto della presente invenzione generatore solare direttamente esposto alla radiazione solare, conformemente alla rivendicazione 10.

Secondo una prima variante dell'invenzione, la totalità della radiazione solare riflessa dal riflettore primario colpisce direttamente, cioè senza riflessioni, l'assorbitore, essendo l'assorbitore posizionato in un primo intervallo di distanze rispetto al punto di focalizzazione del riflettore primario.

Secondo una seconda variante dell'invenzione, una porzione della radiazione solare riflessa dal riflettore primario colpisce direttamente l'assorbitore, mentre una restante porzione è riflessa mediante il riflettore secondario sull'assorbitore.

L'assorbitore allora risulta posizionato in un secondo intervallo di distanze rispetto al punto di focalizzazione del riflettore primario. Tale secondo intervallo di distanze può almeno parzialmente sovrapporsi a detto primo intervallo di distanze.

La presente invenzione, risulta particolarmente adatta, per il dimensionamento di sistemi adatti all'impiego di motori stirling di piccola taglia, cioè aventi bisogno di flussi di calore inferiori a 50 Watt/cm².

Le rivendicazioni descrivono realizzazioni preferite dell'invenzione, formando parte integrante della presente descrizione.

Descrizione delle figure

Ulteriori caratteristiche e vantaggi dell'invenzione risulteranno maggiormente evidenti alla luce della descrizione dettagliata di forme e di metodi, ma non esclusivi, di un sistema di ricezione della radiazione solare, illustrato a titolo esemplificativo e non limitativo, con l'ausilio delle unite tavole di disegno in cui:

la Figura 1 raffigura una sezione assiale schematica del sistema di ricezione oggetto della presente invenzione,

la Figura 2 raffigura le curve di funzionamento caratteristiche di un motore stirling di piccola taglia impiegato nell'invenzione,

la Figura 3 rappresenta una sezione assiale di una parte del sistema di figura 1,

la Figura 4 rappresenta due varianti del sistema di ricezione secondo la presente invenzione,

la Figura 5 rappresenta una costruzione schematica di una sezione assiale di figura 4.

La figura 6 rappresenta una sezione assiale di una delle varianti di figura 4.

Gli stessi numeri e le stesse lettere di riferimento nelle figure identificano gli stessi elementi o componenti, anche in varianti differenti.

Descrizione di dettaglio dell'invenzione

Con riferimento alla figura 1, il sistema di ricezione comprende un riflettore secondario 1 ed un assorbitore 2.

L'assorbitore 2 è direttamente associato ad una testa 31 di un motore stirling 3.

La testa 31 è generalmente cilindrica, risultando adatta ad essere associata ad un riflettore primario parabolicoide 4, che definisce un asse di focalizzazione ed una distanza focale F di focalizzazione.

L'assorbitore 2 ha il compito di captare la radiazione luminosa e trasferire il calore in una zona anulare, attorno alla testa 31 del motore, in corrispondenza di uno scambiatore di calore 32.

Secondo la presente invenzione, l'assorbitore 2 è dimensionato non solo come elemento di captazione di energia solare e convogliatore di energia termica.

Secondo la presente invenzione, l'assorbitore 2 è dimensionato in modo da garantire un funzionamento stabile al motore stirling, comportando una riduzione dell'intensità di radiazione riflessa necessaria al corretto funzionamento del motore. In particolare, esso è dimensionato in modo da funzionare da capacità termica, cioè in modo da fornire il calore necessario per lo spunto del motore e per mantenere stabile la temperatura dello scambiatore di calore anulare 32 della testa del motore.

Vantaggiosamente, l'assorbitore 2, a regime è in grado di sopperire a variazioni della radiazione solare captata dal riflettore primario e dunque dal sistema di ricezione.

Per determinare efficacemente la capacità termica dell'assorbitore, è necessario determinare empiricamente su banco di prova le curve caratteristiche di assorbimento e di produttività del convertitore al variare della temperatura presente all'interfaccia tra l'assorbitore 2 e lo scambiatore di calore 32 (o temperatura di esercizio).

Il convertitore termodinamico utilizzato nelle prove eseguite è un motore stirling free-piston prodotto dalla Microgen™ per funzionare bruciando gas naturale ed è atto a produrre sia potenza elettrica che potenza termica tramite il riscaldamento diretto dell'acqua refrigerante in ingresso al motore.

Mediante note tecniche matematiche di minimizzazione dell'errore quadratico medio tra i dati misurati di potenza elettrica prodotta P_e , di potenza termica prodotta P_t e di potenza termica assorbita P_{abs} in funzione della temperatura T di esercizio all'interfaccia tra assorbitore 2 e lo scambiatore di calore 32 del motore stirling 3 e le curve interpolanti dei dati misurati si ottengono:

- la curva di produzione elettrica $P_e(T)$;
- la curva di produzione termica $P_t(T)$;
- la curva di assorbimento termico $P_{abs}(T)$.

dove con T si indica la temperatura di esercizio del convertitore.

In figura 2 sono mostrate le relative curve per il convertitore della Microgen™ utilizzato come esempio. In particolare si evidenzia che:

- Il motore stirling necessita di assorbire una potenza termica P_{start} per avviarsi e necessita di assorbire una potenza di P_{steady} per erogare a regime la massima potenza elettrica e termica;
- la temperatura T_{start} è la temperatura presente all'interfaccia tra l'assorbitore 2 e lo scambiatore di calore 32 quando la potenza assorbita dal motore stirling è P_{start} ;
- la temperatura T_{steady} è la temperatura presente all'interfaccia tra l'assorbitore 2 e lo scambiatore di calore 32 quando la potenza assorbita dal motore stirling è P_{steady} ;
- alla temperatura T_{start} il motore eroga il minimo di potenza elettrica e termica.
- alla temperatura T_{steady} il motore eroga il massimo di potenza elettrica e termica

Quindi per avviare e mantenere in funzione il motore bisogna fornire una quantità di calore, dQ o una corrispondente potenza utile $P_u = dQ/dt$, in modo da:

- avviare e mantenere in funzione il convertitore termodinamico,
 - riscaldare a sufficienza l'assorbitore di calore tale che, in assenza di radiazione solare concentrata, la quantità di calore accumulata in eccesso riesca a mantenere in funzione il ciclo termodinamico per un intervallo di tempo predefinito.
- Secondo la presente invenzione una adeguata equazione di bilanciamento energetico del sistema di ricezione è la seguente:

$$P_{ric} = P_{iner} + P_{abs} + P_{loss} \quad (e1)$$

dove

- P_{ric} è la potenza che viene irradiata nel riflettore secondario,
- P_{iner} è la potenza termica accumulata dall'assorbitore di calore e
- P_{loss} sono le perdite termiche del sistema di ricezione.

Deriva che la potenza utile P_u per far funzionare il sistema termodinamico, è:

$$P_u = P_{ric} - P_{loss} \quad \text{cioè} \quad P_u = P_{abs} + P_{iner}$$

L'assorbitore di calore funziona da *capacità termica*, cioè, immagazzina l'energia necessaria per lo spunto di avvio del motore stirling e fornisce il calore necessario per mantenere in funzione il motore stirling quando la quantità di calore, dovuta alla radiazione solare concentrata, non è sufficiente per il funzionamento ottimale del convertitore. In particolare P_{iner} è espressa da:

$$P_{iner} = C_{termico} * dT/dt \quad (e2)$$

dove T è la temperatura di interfaccia tra assorbitore 2 e scambiatore di calore 32 e $C_{termico}$ è la capacità termica dell'assorbitore 2.

Utilizzando l'espressione (e2) ed imponendo che $P_u = P_{abs} + P_{iner} = 0$, cioè che la radiazione solare non è in grado di mantenere in funzione il ciclo termodinamico del motore, si ottiene che:

$$\frac{dT}{dt} = - \frac{P_{abs}}{C_{termico}} \quad (e3)$$

In particolare, risolvendo l'equazione differenziale non lineare (e3), si determina il valore di capacità termica $C_{termico}$ caratteristico dell'assorbitore tale per cui il sistema rimane acceso, per un intervallo di tempo definito δt , nonostante la radiazione solare sia nulla.

Secondo la presente invenzione si assume che la potenza assorbita dal convertitore termodinamico è approssimata da una curva lineare del tipo $P_{abs} = AT$, allora la (e3) può essere riscritta come segue:

$$\frac{dT}{dt} = - \frac{AT}{C_{termico}} \quad (e4)$$

la cui soluzione in forma chiusa è

$$T(t) = T_0 * e^{-\frac{A}{C_{termico}} * (t-t_0)} \quad (e5)$$

dove T_0 è la temperatura all'interfaccia tra lo scambiatore di calore 32 e l'assorbitore 2 all'istante $t = t_0$, istante in cui $P_u = 0$.

In un istante seguente $dt = \delta t + t_0$ la (e5) può essere riscritta come

$$T(dt) = T_0 * e^{-\frac{A}{C_{termico}} * \delta t} \quad (e6)$$

e dunque una riduzione di temperatura ΔT alla suddetta interfaccia dopo un intervallo di tempo δt vale:

$$\Delta T = T(t_0) - T(dt) = T_0 * \left(1 - e^{-\frac{A}{C_{\text{termico}}} * \delta t} \right) \quad (\text{e7})$$

E' implicito che quando la temperatura all'interfaccia tra l'assorbitore 2 e lo scambiatore di calore 32 raggiunge la temperatura $T(dt)$ il motore deve ancora essere in grado di funzionare, cioè $T(dt) \geq T_{\text{start}}$, per raggiungere lo scopo di garantire un funzionamento stabile del sistema di conversione.

Dalla formula inversa della (e7) si ricava la capacità termica dell'assorbitore pari a

$$C_{\text{termico}} = \frac{-A * \delta t}{\ln \left(1 - \frac{\Delta T}{T_0} \right)} \quad (\text{e8})$$

Al solo scopo di dimostrare che i passaggi mostrati conducono a risultati concreti si mostra un esempio di scelte preliminari funzionali al dimensionamento dell'assorbitore:

- $\delta t = 300 \text{ sec (5 minuti)}$
- $P_{\text{steady}} = 4500 \text{ Watt}$
- $P_{\text{start}} = 2550 \text{ Watt}$
- $T_0 = 530 \text{ }^\circ\text{C};$
- $\Delta T = 270 \text{ }^\circ\text{C};$
- $A = \frac{P_{\text{steady}} - P_{\text{start}}}{\Delta T} \approx 8.0 \text{ Watt/}^\circ\text{C}$

con A che rappresenta il coefficiente angolare della retta interpolante P_{abs} , rappresentata in figura 2, si ottiene che la capacità termica dell'assorbitore di calore è $C_{\text{termico}} \approx 3000 \text{ J/}^\circ\text{C}$. Se si sceglie, per esempio, che il materiale di cui è composto l'assorbitore 2 è il rame si ottiene una massa dell'assorbitore $m_{\text{assorbitore}} \approx 8 \text{ Kg}$.

Dagli esperimenti eseguiti, si è potuto riscontrare che la suddetta assunzione, cioè che la potenza assorbita dal convertitore termodinamico è approssimata da una curva lineare del tipo $P_{\text{abs}} = AT$ è verificata.

Il riflettore secondario 1 ha un forma rastremata verso la testa del motore, definendo un asse X di sviluppo.

Esso comprende una parete 11, preferibilmente piana, avente un'apertura 12 baricentrica, attraverso cui entra la radiazione solare concentrata dal riflettore primario 4. Tale parete 11 di chiusura è situata in corrispondenza della sezione trasversale massima del riflettore secondario.

Esso comprende inoltre una seconda apertura 14, in corrispondenza di una sua sezione trasversale minima in cui si innesta l'assorbitore 2.

Come sarà più chiaro in seguito, l'assorbitore 2 ha una forma a simmetria cilindrica comprendente una prima base 21 ed una seconda base 24. Nella seconda base 24 è ricavata una cavità in cui si innesta la testa del motore stirling 31. Per cui la seconda base definisce una corona circolare avente un diametro interno d_{24_i} ed uno esterno d_{24_e} .

Il diametro della superficie frontale, definente la prima base 21, può variare a seconda delle caratteristiche di progetto, meglio descritte di seguito, tra un diametro d_{21} minimo e massimo. Ciò è evidentemente analogo per la seconda base 24. In particolare il diametro minimo d_{21} della prima base 21 ed il diametro interno d_{24_i} della seconda base 24 devono essere maggiori o uguali del diametro d_{testa} della testa del motore stirling.

Secondo un particolare aspetto della presente invenzione, risulta che la parete 11 è nel fuoco della riflessione del riflettore primario. Dunque, l'assorbitore 2 e dunque la testa del motore 31 risultano fuori fuoco, in particolare oltre la distanza del fuoco F misurata dalla superficie convessa del riflettore primario 4, cioè ad una distanza maggiore di F sull'asse di focalizzazione del riflettore primario.

La radiazione solare, dunque, colpisce l'assorbitore 2 distribuendosi almeno sull'intera superficie frontale 21 dello stesso, risolvendo i problemi della tecnica nota.

Se invece l'assorbitore fosse disposto ad una distanza inferiore di F dal riflettore primario, l'apertura 12 sarebbe maggiore comportando una maggiore dispersione di radiazioni.

In relazione a quanto è fuori fuoco l'assorbitore 2, la radiazione colpisce solo l'assorbitore 2 oppure anche la superficie interna 13 del riflettore secondario 1.

Questo riflette sulla superficie laterale dell'assorbitore 2 la porzione di radiazione che non ha colpito l'assorbitore 2 direttamente.

Dunque, l'assorbitore è illuminato direttamente e/o indirettamente, dopo una o più riflessioni sulla superficie interna 13 del riflettore secondario 1.

L'apertura di ingresso 12, preferibilmente di forma circolare, e di diametro $DF_{min} \leq d_{ric} \leq DF_{max}$, è posta preferibilmente alla distanza focale F dal riflettore primario 4 ed ha lo scopo di far entrare la potenza concentrata P_{ric} riducendo le perdite termiche P_{loss} .

DF_{min} e DF_{max} rappresentano i diametri minimo e massimo della regione focale alla distanza focale. Tali parametri dipendono dalla cura con cui è realizzato il riflettore primario 4.

Vantaggiosamente, poiché le perdite termiche sono dovute a perdite convettive e radiative e sono direttamente proporzionali all'area dell'apertura 12, posizionando la parete 11, in cui l'apertura è praticata, nel fuoco F , si ottiene un'apertura più piccola possibile.

Un ulteriore vantaggio, risulta nel fatto che l'apertura 12, avendo un diametro predefinito, permette di filtrare eccessi di illuminazione dovuti ad imperfette realizzazioni del riflettore primario 4, proteggendo il motore dal sovrariscaldamento. Secondo una prima variante dell'invenzione, risulta vantaggioso inserire delle termocoppie in apposite fessure 23, parallele alla superficie laterale della testa del motore stirling 31, per misurare la temperatura all'interfaccia tra l'assorbitore 2 e lo scambiatore di calore 32 in modo da controllare in ciclo chiuso il sistema di inseguimento della traiettoria solare per ottenere un migliore centramento della radiazione solare all'interno dell'apertura 12.

Un ulteriore vantaggio di inserire le termocoppie in fessure 23 risulta nel fatto che, non essendo direttamente esposte alla radiazione solare, i sensori non sono sollecitati ad intensi stress termici aumentandone, quindi, la loro vita media.

Preferibilmente il riflettore secondario 1 è realizzato tramite un concentratore parabolico composto (cpc), cioè un solido di rotazione avente una forma che si rastrema a partire dalla parete 11 verso il motore stirling 3. In particolare esso comprende in un estremo detta parete 11 e nell'altro estremo un'apertura 14 di

innesto dell'assorbitore 2. Esso, con riferimento alla figura 3, ha un rapporto di concentrazione C uguale a:

$$C = 1/\sin(\theta_{cpc})^2 = (D_{in} / D_{out})^2 \quad (e9)$$

in cui θ_{cpc} , D_{in} e D_{out} sono rispettivamente l'angolo di accettazione, il diametro della parete 11 ed il diametro dell'apertura 14 di innesto dell'assorbitore 2. Nell'assorbitore 2 si innesta la testa 31 del motore stirling 3. Il riflettore secondario 1 è disposto perpendicolarmente ad un punto baricentrico alla superficie parabolica del riflettore primario 4, cioè assialmente rispetto all'asse X.

L'apertura 12, come detto sopra, è posta ad una distanza F, coincidente con la lunghezza focale della superficie parabolica del riflettore primario 4.

Preferibilmente il riflettore secondario 1 ottimizza il trasferimento della radiazione solare concentrata riflettendo internamente e quindi riconcentrando efficacemente, i raggi entranti dall'apertura 12 sull'assorbitore di calore 2 posto a diretto contatto con la testa del motore stirling 31.

Come sarà chiaro in seguito, l'assorbitore 2, anch'esso a simmetria cilindrica comprende almeno una parte anulare 24 che si innesta nell'apertura 14 di innesto dell'assorbitore 2, opposta alla superficie 21. Nella parte anulare si innesta la testa 31 del motore stirling.

Secondo la presente invenzione per il dimensionamento del riflettore secondario si scelgono θ_{cpc} , D_{out} in modo tale che vengano rispettate contemporaneamente le seguenti condizioni:

- $\theta_{refl1^\circ} \leq \theta_{cpc} < \frac{\pi}{2}$ cioè che θ_{cpc} sia maggiore dell'angolo di accettazione del riflettore primario θ_{refl1° e minore di $\frac{\pi}{2}$, in modo da convogliare tutti i raggi riflessi dal riflettore primario verso l'apertura d'innesto 14;

- $D_{out} \geq$ del diametro della parte anulare 24.

D_{in} risulta dipendente da θ_{cpc} e D_{out} tramite la relazione $D_{in} = D_{out} / \sin(\theta_{cpc})$.

Secondo una realizzazione preferita si impone $\theta_{cpc} = \theta_{refl1^\circ}$ e che D_{out} sia circa pari al diametro esterno d_{24_e} della superficie anulare 24 dell'assorbitore.

Risulta dunque, $D_{in} = d_{24_e} / \sin(\theta_{refl1^\circ})$.

Il riflettore secondario 1 è un oggetto tridimensionale ottenuto dalla rotazione della sezione, raffigurata in figura 3, attorno all'asse X.

L'angolo di accettazione θ_{cpc} è ottenuto dall'intersezione dell'asse X con una retta che congiunge due punti opposti rispetto a X alle estremità opposte del solido di rotazione.

La forma della sezione è descritta dalle seguenti due equazioni parametriche in funzione del comune parametro φ , che è un angolo:

$$x = \frac{2 * z * \sin(\varphi - \theta_{cpc})}{1 - \cos(\varphi)} - \frac{D_{out}}{2} \quad (e10)$$

$$y = \frac{2 * z * \cos(\varphi - \theta_{cpc})}{1 - \cos(\varphi)} \quad (e11)$$

dove

$$z = \frac{D_{out}}{2} * (1 + \sin(\theta_{cpc})) \quad (e12)$$

$$2 * \theta_{cpc} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} + \theta_{cpc} \quad (e13)$$

Definita la forma del riflettore secondario 1, la sua lunghezza massima L_{cpc_max} è

$$L_{cpc_max} = \frac{D_{out} + D_{in}}{\tan(\theta_{cpc})} \quad (e14)$$

Un riflettore secondario 1 avente sviluppo assiale pari a L_{cpc_max} è rappresentato in figura 4(A).

Secondo la presente invenzione risulta possibile limitare la lunghezza dello sviluppo assiale del riflettore secondario 1 senza che l'efficienza ottica del riflettore secondario 1 diminuisca: cioè a parità di D_{in} , D_{out} e θ_{cpc} è possibile ottenere dei

riflettori con lunghezze L_{cpc} inferiori a $\frac{D_{out} + D_{in}}{\tan(\theta_{cpc})}$ di comparabile efficienza ottica.

Quando si riduce la lunghezza dello sviluppo assiale L_{cpc} del riflettore secondario si impone di limitare il numero delle riflessioni, possibilmente realizzando il riflettore e l'assorbitore in modo che non vi siano riflessioni.

Allora si deve verificare la seguente equazione:

$$L \leq L_{cpc} \leq L + L_h \quad (e15)$$

dove, con riferimento alla figura 5,

L è la lunghezza assiale dell'assorbitore di calore, Lcpc la lunghezza assiale del riflettore secondario ed Lh la differenza tra i primi due:

$$Lh = Lcpc - L \quad (e16)$$

Allora affinché l'assorbitore venga illuminato senza riflessioni il diametro d21 della superficie frontale 21, deve verificarsi che

$$\frac{d21}{2} = Lh * \tan(\theta_{refl1} \text{ °}) \quad (e17)$$

Inoltre poiché l'assorbitore 2 è inserito all'interno del riflettore secondario 1 è necessario che il diametro esterno massimo d21, che può assumere la superficie frontale 21, è delimitato dalla larghezza interna del riflettore secondario 1 corrispondente alla lunghezza assiale L dell'assorbitore 2. In particolare utilizzando la formula parametrica (e11) si esprime la lunghezza assiale dell'assorbitore come

$$L = \frac{2 * z * \cos(\varphi_L - \theta_{cpc})}{1 - \cos(\varphi_L)} \quad (e18)$$

dove φ_L è l'angolo parametrico corrispondente all'altezza L dell'assorbitore secondo l'equazione (e11).

Quindi il raggio del riflettore secondario 1 corrispondente ad una lunghezza assiale L dell'assorbitore è $x_L = d21/2$ ed utilizzando le formule parametriche (e10) e (e11) si ottiene tale dimensione massima che la superficie 21 può assumere:

$$d21 = 2 * L * \tan(\varphi_L - \theta_{cpc}) - D_{out} \quad (e19)$$

Tale equazione occorre a definire il massimo valore di Lh, per cui si ha solo illuminazione diretta dell'assorbitore, dunque sostituendo la (e19) nella (e17) si ha:

$$Lh = \frac{L * \tan(\varphi_L - \theta_{cpc}) - D_{out}/2}{\tan(\theta_{refl1} \text{ °})} \quad (e20)$$

Dunque, sostituendo la (e20) nella (e15), si ottengono due valori limite che Lcpc può assumere, appunto, affinché l'assorbitore venga irradiato solo sulla superficie frontale 21, così come è illustrato dalla figura 4(B):

$$L \leq Lcpc \leq L + \frac{L * \tan(\varphi_L - \theta_{cpc}) - D_{out}/2}{\tan(\theta_{refl1} \text{ °})} \quad (e21)$$

Quando invece L_{cpc} supera il valore massimo ottenuto dalla (e21), è evidente che considerando la (e14) si ottiene un'altra situazione descritta dalla seguente

$$L + \frac{L * \tan(\varphi_L - \theta_{cpc}) - D_{out}/2}{\tan(\theta_{refl1}^\circ)} < L_{cpc} \leq \frac{D_{out} + D_{in}}{\tan(\theta_{cpc})} \quad (e22)$$

in cui l'irraggiamento dell'assorbitore di calore 2 avviene come segue: una porzione dei raggi solari riflessi dal riflettore primario 4 colpiscono direttamente l'assorbitore 2, mentre un'altra porzione lo colpiscono mediante almeno una riflessione sul riflettore secondario 1, così come mostrato in figura 4(A).

Dunque, definita la lunghezza L_{cpc} del riflettore secondario 1 si possono ottenere due modi differenti di irraggiamento dell'assorbitore 2. Ciò comporta anche variazioni nella forma dell'assorbitore 2, così come sarà illustrato in seguito.

Una volta scelta la lunghezza dello sviluppo assiale L_{cpc} del riflettore secondario 1 risulta necessario ottimizzare la forma dell'assorbitore allo scopo di

- ottimizzare l'assorbimento della radiazione su una o più superfici dell'assorbitore;
- trasferire l'energia assorbita, sotto forma di calore, da dette superfici alla zona di contatto con lo scambiatore di calore del motore stirling, che, nel caso in esempio, ha una forma anulare.

D'altra parte è necessario garantire che lo spessore dell'assorbitore non si riduca troppo in alcune zone per consentire una sufficiente trasmissione di calore dalla/dalle superfici captanti verso la zona di cessione del calore allo scambiatore 32, affinché il motore stirling 3 possa funzionare correttamente. Tale vincolo risulta in contrasto con la necessità di rendere l'assorbitore il più compatto possibile per ridurre le perdite termiche.

Tale dimensionamento è ulteriormente vincolato dalla capacità termica dell'assorbitore, cioè dalla sua massa.

Si assume, come detto sopra, che il diametro minimo d_{21} della prima base 21 ed il diametro interno d_{24_i} della corona circolare 24 è maggiore o uguale al diametro d_{testa} della testa del motore.

La (e19) indica quale può essere il diametro massimo della prima base 21, resta dunque da ricavare il diametro esterno d_{24_e} della seconda base 24.

In figura 6 è raffigurata una sezione assiale di una variante dell'assorbitore di calore oggetto della presente invenzione.

Si considera l'equazione generale della conduzione termica (legge di Fourier). La presente invenzione insegna anche, come scegliere i parametri da sostituirsi in detta equazione così come mostrato di seguito:

$$W = \lambda \times \frac{(T_{irr} - T_{int})}{L} \times S \quad (e23)$$

in cui:

- W è la potenza trasmessa dalla zona esposta alla radiazione solare alla zona a diretto contatto con lo scambiatore di calore dello stirling;
- λ è la conducibilità termica del materiale dell'assorbitore, per esempio rame, ed è nota;
- T_{irr} è la temperatura media della superficie esposta alla radiazione solare;
- T_{int} è la temperatura media dell'interfaccia tra assorbitore e scambiatore di calore del cilindro del motore;
- S rappresenta l'area della corona circolare definita dalla seconda base 24 e dalla cavità in essa inclusa, attraverso cui si contatta lo scambiatore di calore 32 della testa 31 del motore stirling 3;
- L è l'altezza dell'assorbitore di calore;

Per risolvere analiticamente ed in forma chiusa la (e23) si impone:

- T_{int} pari a T_{steady} ,
- L è almeno pari alla distanza tra il cielo del cilindro 31 e la posizione dello scambiatore di calore anulare 32 del motore stirling,
- T_{irr} si impone pari a T_{max} che è la massima temperatura che il materiale prescelto, per esempio il rame, può sopportare senza danneggiarsi.

I parametri specifici del motore hanno i seguenti valori, con specifico riferimento al suddetto motore della Microgen™:

$W = 4500$ Watt, cioè pari alla potenza di regime P_{steady}

$\lambda = 400$ W/m*K

$L = 80$ mm,

$T_{int} = 823$ °K (550°C)

T_{max} del rame è 1100 °K (827°C) e

$$S = \left(\frac{d_{24_e}^2 - d_{testa}^2}{4} \right) \pi$$

che è l'area della corona circolare S, cioè la superficie di scambio tra l'assorbitore 2 e lo scambiatore di calore 32 del motore stirling, il cui diametro d_{testa} della testa 31 del motore stirling 3, è $d_{testa}=116$ mm.

Quindi sostituendo i suddetti parametri nell'equazione (e23) si calcola il diametro minimo di d_{24_e} per trasmettere la potenza di regime P_{steady} al motore stirling:

$$d_{24_e} = 2 \times \sqrt{\frac{W \times L}{\lambda(T_{max} - T_{int}) \times \pi} + \frac{d_{testa}^2}{4}} \approx 130 \text{ mm} \quad (e24)$$

Per cui, scelta una capacità termica e quindi il materiale costituente l'assorbitore si ricava la sua massa e si raccorda la superficie frontale 21, che definisce la prima base dell'assorbitore con la seconda base 24 dell'assorbitore, ottenendo un solido a simmetria cilindrica, in cui la prima base 21 è piana e ha un diametro d_{21} e la seconda base è sostanzialmente una corona circolare, per via della cavità in essa ricavata allo scopo di innestarvi la testa 31 motore stirling 3.

In particolare, tale solido a simmetria cilindrica si rastrema dalla prima base 21 verso la seconda base 24 quando il riflettore secondario ha sviluppo assiale compreso nei limiti definiti dalla (e21). Tale prima base 21 assume un diametro di valore compreso tra quelli ricavati dalla (e17) e dalla (e19). Imposta la massa e l'altezza L dell'assorbitore, scelto il diametro d_{21} tra quelli appena citati, risulta che d_{24_e} deve assumere una dimensione inferiore a d_{21} ottenendosi la forma sopra descritta.

Al contrario, tale solido a simmetria cilindrica si rastrema dalla seconda base 24 verso la prima base 21 quando l'assorbitore ha sviluppo assiale compreso nei limiti della (e22); e d_{24_e} assume un valore maggiore o uguale di quello ricavato mediante la (e24). Poiché la massa e l'altezza L dell'assorbitore sono imposte, scelto il valore d_{24_e} , il diametro d_{21} è ottenuto come conseguenza di tale limitazione della massa dell'assorbitore. Ciò, appunto, impone che l'assorbitore, in questo secondo esempio, si rastrema dalla seconda base 24 verso la prima 21.

Secondo una sezione assiale dell'assorbitore, detto assorbitore può dunque presentare profili laterali 22 rettilinei, concavi o convessi in relazione alla suddetta operazione di raccordo.

Secondo una realizzazione l'assorbitore di calore può essere ricoperto da un film sottile di materiale avente proprietà selettiva in grado di aumentare l'assorbimento

della radiazione solare e quindi diminuire le emissioni termiche dovute al riscaldamento dell'assorbitore. L'utilizzo di questo rivestimento permette quindi ridurre sensibilmente le perdite radiative del riflettore secondario.

Preferibilmente il riflettore secondario 1 è ricoperto internamente da una superficie riflettente che può essere preferibilmente vetro o altro materiale riflettente con riflettanza speculare almeno maggiore del 90% e resistente a temperature maggiori di 200 °C. Inoltre il riflettore secondario 1 è ricoperto esternamente da materiale refrattario in modo tale da minimizzare le perdite termiche convettive e radiative del riflettore secondario.

Sono chiari i vantaggi derivanti dall'applicazione della presente invenzione:

- mediante la presente invenzione si rende possibile migliorare il funzionamento di un generatore solare direttamente esposto alla radiazione solare basato su un motore stirling, la cui testa, mediante un opportuno assorbitore è esposta alla radiazione solare,
- l'assorbitore protegge la testa del cilindro garantendo di mantenere la temperatura della testa entro i limiti di funzionamento del motore, la presente invenzione insegna a conferire una opportuna forma all'assorbitore in dipendenza della forma del riflettore secondario,
- la presente invenzione insegna come dimensionare la capacità termica dell'assorbitore di calore in modo tale che riesca sia ad immagazzinare l'energia necessaria per lo spunto di avvio del motore stirling, che fornire il calore necessario per mantenere in funzione il motore stirling anche quando la quantità di calore, dovuta alla radiazione solare concentrata, non è sufficiente per il suo funzionamento ottimale;
- la presente invenzione insegna anche a dimensionare il riflettore secondario in modo da ottimizzarne il funzionamento,
- la presente invenzione insegna anche ad adattare un motore stirling preesistente, originariamente impiegato per la produzione di energia elettrica dalla combustione di gas naturale, insegnando a ricavarne le curve caratteristiche e ad utilizzarle secondo gli scopi della presente invenzione,
- viene, inoltre, presentato un metodo analitico di dimensionamento di assorbitori ed un esempio concreto di applicazione del metodo.

I differenti aspetti dell'invenzione, benché illustrati secondo un coerente e progressivo procedimento, possono essere considerati anche singolarmente come indipendenti tra loro in relazione agli scopi di utilizzo delle singole parti.

Il tecnico del ramo non necessita di ulteriori informazioni per attuare l'invenzione, le cui parti, componenti e procedimenti possono essere combinati tra loro senza per altro uscire dall'ambito della presente invenzione.