

Un generatore di vapore ad energia solare

R. De Luca

DIIMA - Università degli Studi di Salerno - 84084 Fisciano (SA), Italy

Riassunto. Viene presentato lo studio preliminare di una caldaia che genera vapore per mezzo di energia solare in modo diretto, ovvero senza l'ausilio di liquidi convettivi di norma utilizzati negli impianti solari termici tradizionali. Questo generatore di vapore viene concepito partendo dall'idea di trappola di energia solare, ovvero di un sistema composto da un collettore di luce solare e da un corpo perfettamente assorbente (corpo nero) costituito da una cavità, provvista di una piccola apertura, con pareti interne perfettamente riflettenti. Si fa notare che la quantità di vapore generato all'istante di tempo t dipende in modo diretto dall'energia radiante che il sistema riceve, istantaneamente, dal sole. Alcuni importanti vantaggi nell'utilizzo di questo sistema, piuttosto che quelli a concentrazione dei raggi solari, possono essere individuati.

Abstract. A preliminary study of a boiler generating superheated steam by means of solar power is presented. Steam generation in this system does not need convection fluids, which in general are utilized in traditional thermal solar systems. The apparatus is conceived by considering the idea of a sunlight trap, consisting of a sunlight collector and a black body. It is noticed that the quantity of steam generated at the instant of time t depends upon the instantaneous power delivered from the sun to the apparatus. Some important advantages in utilizing this system, rather than collectors which only concentrate sunlight, can be envisioned.

1. Introduzione

Nell'ambito di una prospettiva di sviluppo sostenibile dei paesi non ancora pienamente industrializzati e di una riconversione a metodi di produzione di energia meno inquinanti nei paesi ove ormai il grado di industrializzazione è elevato, l'energia solare gioca un ruolo importante. Tra tutte le tipologie di energie alternative, infatti, l'energia solare è quella massimamente disponibile sul pianeta. Si stima che sia tecnicamente possibile sfruttare una potenza di 60 TW [1] da parte dell'umanità nel futuro. La potenza da fonte solare attualmente prodotta è di circa 0.0051 TW, ovvero solo una piccola frazione della potenza che potremmo utilizzare per poter far fronte al sempre più crescente fabbisogno di energia elettrica. È ipotizzabile infatti che nel 2050 si potrebbe avere la necessità di 32 TW di potenza, contro l'attuale fabbisogno di 16 TW circa [2], a causa dello sviluppo industriale dei paesi non ancora pienamente industrializzati e dell'incremento della loro popolazione.

Di recente, varie tipologie di collettori solari sono stati proposti per concentrare la radiazione che promana dal sole e per convogliarla, o attraverso delle cavità riflettenti, o attraverso dei cavi di fibra ottica, all'interno di edifici per il risparmio energetico.

Un'applicazione su scala più grande della concentrazione dell'energia solare è la centrale solare termica proposta di recente da Rubbia [3]. La concentrazione della luce in una regione molto piccola dello spazio, tuttavia, presenta un ulteriore vantaggio: tale luce concentrata può essere intrappolata in una cavità con pareti interne perfettamente riflettenti. L'energia radiante, intrappolata in un corpo nero, può essere infine utilizzata per produrre acqua calda, così come recentemente riportato da De Luca *et al.* [4].

Nel presente lavoro si estende il concetto di trappola di energia solare ai generatori di vapore. Il sistema viene disegnato in modo da generare vapore ad una temperatura ed ad una pressione prefissate, in condizioni di irraggiamento variabile nel tempo dei collettori. Lo scopo del presente lavoro sarà pertanto non solo quello di illustrare in modo pittorico il sistema, ma anche di specificarne e studiarne il funzionamento. La particolarità del sistema, infatti, sta nel fatto che la sorgente di calore ha un carattere di variabilità nel tempo, di cui è opportuno tenere conto. Infatti, si fa vedere che la quantità di vapore, che dipende dalla potenza della radiazione assorbita dal sistema stesso, e che viene generata ad una data temperatura e ad una data pressione, è essa stessa una grandezza variabile nel tempo. Quest'ultimo aspetto costituisce una limitazione del campo delle applicazioni industriali del generatore di vapore descritto nel presente lavoro, senza tuttavia inficiarne possibili implementazioni in contesti diversi da quelli tradizionali.

2. Descrizione della caldaia solare

In questa sezione si vuole descrivere un modo per realizzare una caldaia che utilizzi la radiazione solare come fonte di energia e che generi vapore senza l'ausilio del liquido convettivo. Tale sistema può essere concepito, così come rappresentato in fig. 1, come una serie di collettori parabolici, disposti su di un cilindro cavo con pareti interne altamente riflettenti. All'interno di questa colonna cilindrica cava è posto un cilindro metallico coassiale (fig. 2) nel quale è racchiusa acqua, spinta al suo interno da una tubatura di ingresso posta alla sua base, e dove viene generato vapore.

L'acqua nel cilindro metallico viene riscaldata per mezzo della radiazione solare intrappolata all'interno del "corpo nero", così come possiamo definire la colonna cilindrica cava con pareti interne altamente riflettenti. I collettori solari parabolici, che possono essere disposti sulla colonna in numero opportuno, sono orientati da un sistema meccanico di inseguimento solare, guidato da un'antenna satellitare, in modo da ottenere, ad ogni istante di tempo, esposizione massima dei collettori alla radiazione luminosa. Il sistema di inseguimento solare deve essere quindi guidato da un dispositivo elettronico opportunamente tarato per la posizione della caldaia sulla superficie terrestre in modo tale che, attraverso dati rilevati attraverso l'antenna e provenienti da stazioni satellitari, le parabole assumano la posizione di massima esposizione ai raggi solari ad ogni istante di tempo. La radiazione solare viene pertanto concentrata dallo specchio parabolico primario su di uno specchio parabolico secondario, che si affaccia sul primario e che è posto proprio in prossimità del fuoco di quest'ultimo, così come mostrato in fig. 3.

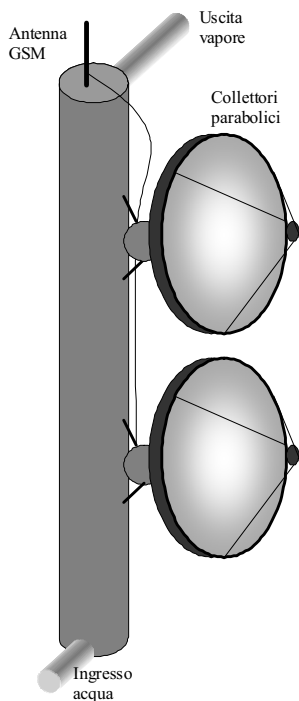


Fig. 1. – Una rappresentazione schematica dell'intero apparato in cui vengono mostrate le parti di esso e il modo in cui i collettori parabolici vengono disposti sul corpo nero cilindrico. All'interno del corpo nero viene posta la caldaia contenente acqua che entra dalla parte sottostante e fuoriesce, sotto forma di vapore surriscaldato, a pressione p_c e a temperatura T_f , alla sommità della colonna cilindrica. Un'antenna satellitare, che riporti la posizione del sole sulla volta celeste, serve a orientare le parabole nella direzione di massima esposizione alla luce solare.

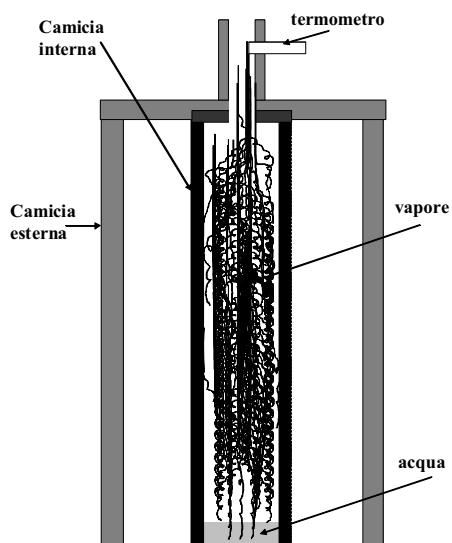


Fig. 2. – Una sezione verticale del corpo nero e del nucleo metallico.

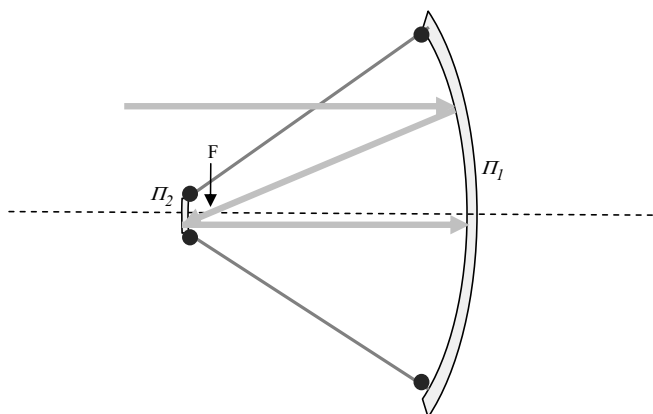


Fig. 3. – Raggi di luce che provengono dall'infinito vengono concentrati dalla parabola primaria Π_1 nel suo fuoco F . In prossimità di F viene posta una parabola secondaria Π_2 , affacciata alla prima, in modo che i raggi provenienti da F vengano riflessi all'infinito e rispediti in prossimità del vertice della parabola Π_1 dove viene collocata una fibra ottica cava.

I due specchi parabolici avranno punto focale coincidente, così che la radiazione riflessa dallo specchio primario venga ancora riflessa (all'infinito) dallo specchio secondario, questa volta in un fascio molto stretto, e rispedita in prossimità del vertice del primario. In quest'ultima regione viene posta una fibra ottica, che convoglia la radiazione all'interno della colonna cilindrica cava (corpo nero). La fibra ottica avrà un'apertura cava [5], come quella mostrata in fig. 4, in modo da rendere minime le perdite per riflessione.

L'energia termica intrappolata nel corpo nero viene così utilizzata per riscaldare l'acqua fino al suo punto di ebollizione T_b (corrispondente alla pressione della caldaia p_c) e per riscaldare il vapore fino alla temperatura di uscita dalla caldaia, rilevata da un termometro, così come mostrato in fig. 2. In effetti immaginiamo che un certo flusso di acqua venga immesso nel sistema, a seconda di quanto risulta essere

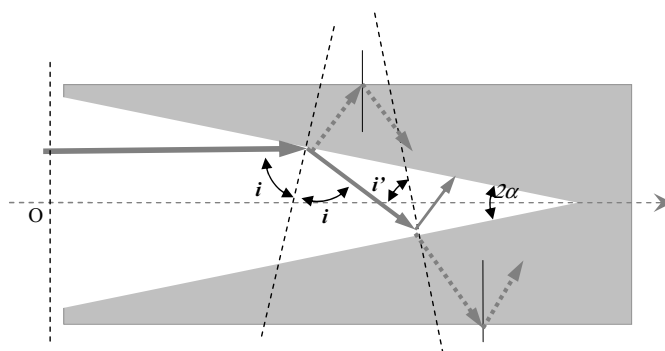


Fig. 4. – Raggi di luce che provengono dall'infinito incidono all'interno di una fibra ottica con apertura conica cava. Questi raggi subiscono riflessioni multiple sulle pareti della superficie conica. I raggi rifratti, rappresentati da linee tratteggiate, subiscono riflessioni totali interne alla fibra stessa.

la potenza assorbita dai collettori solari, in modo tale da poter sostenere un processo termodinamico che si svolga a pressione costante p_c in un sistema aperto che porti la quantità Δm d'acqua, immessa nell'intervallo di tempo Δt all'interno del cilindro metallico posto all'interno del corpo nero, proprio alla temperatura di uscita T_f desiderata e proprio nell'intervallo di tempo Δt . In questo modo, pur non generando vapore in una quantità fissa, ma con un flusso che dipende dalla potenza della radiazione intrappolata all'interno della colonna cilindrica cava, possiamo generare vapore con caratteristiche termodinamiche intensive (temperatura T_f e pressione p_c) fissate. Queste variabili termodinamiche potranno facilitare l'analisi di un sistema che produca, a partire da questa caldaia solare, energia meccanica dall'espansione del vapore così generato in una turbina, per esempio. È da notare, infine, che, per ottenere un buon accoppiamento nel trasferire l'energia trasportata dalla radiazione elettromagnetica all'acqua, il coefficiente di assorbimento della parete esterna del cilindro contenente acqua, posto all'interno del corpo nero, dovrebbe avere un coefficiente di assorbimento quanto più possibile alto, a differenza della parete interna del corpo nero, per la quale si ipotizza assorbimento prossimo allo zero.

3. Caratteristiche termodinamiche della caldaia solare

Una caldaia solare funziona nello stesso modo in cui funzionano le caldaie che ricevono calore da una sorgente tradizionale. Pur tuttavia, il sole brilla nel cielo esclusivamente nelle ore diurne e la luce solare ci giunge con maggiore o minore intensità a seconda dell'ora, del periodo dell'anno e delle condizioni meteorologiche locali. Vedremo che questa variabilità nel tempo della sorgente comporta una produzione di una quantità di vapore non costante nel tempo, qualora non si intervenga con sistemi di controllo sulla caldaia.

Partiamo dal considerare una trasformazione isobara, alla pressione p_C , che porti una massa d'acqua m , che entra nella caldaia ad una temperatura T_0 , alla temperatura di ebollizione T_b (corrispondente alla pressione p_C). Scriviamo pertanto che il calore Q_1 necessario per ottenere questa trasformazione sarà

$$(1) \quad Q_1 = mC_l(T_b - T_0).$$

Per far evaporare tutta l'acqua alla temperatura T_0 , sarà necessario il calore Q_2 , dato dalla seguente espressione:

$$(2) \quad Q_2 = m\lambda,$$

ove λ è il calore latente di ebollizione dell'acqua.

Per portare il vapore alla temperatura finale T_f sarà necessaria la quantità di calore Q_3 , che possiamo scrivere come segue:

$$(3) \quad Q_3 = m \int_{T_b}^{T_f} C_p(T) dT = m\bar{C}_p(T_f - T_b),$$

ove $C_p(T)$ è il calore specifico del vapore alla temperatura T , mentre \overline{C}_p è definito come la media di $C_p(T)$ sull'intervallo di temperature $[T_b, T_f]$, ovvero

$$(4) \quad \overline{C}_p = \frac{1}{T_f - T_b} \int_{T_b}^{T_f} C_p(T) dT.$$

Il calore necessario Q_T per poter portare a compimento le tre trasformazioni sarà pertanto

$$(5) \quad Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 = m [C_l(T_b - T_0) + \lambda + \overline{C}_p(T_f - T_b)].$$

Questo calore deve essere fornito dall'energia solare, cosicché, chiamata P la potenza efficace trasferita alla caldaia, avremo:

$$(6) \quad P = \dot{Q}_T = \dot{m} [C_l(T_b - T_0) + \lambda + \overline{C}_p(T_f - T_b)] = \dot{m} \alpha_T,$$

ove il punto sta ad indicare una derivata rispetto al tempo e, chiaramente, il parametro $\alpha_T = [C_l(T_b - T_0) + \lambda + \overline{C}_p(T_f - T_b)]$ è considerato costante, poiché prendiamo le temperature T_0 e T_f e la pressione p_C come prefissate. In questo modo, rilevata, attraverso un sensore fotometrico, la potenza istantanea $P(t)$ che la radiazione solare può fornire, la quantità di acqua che possiamo inserire, al tempo t , nella caldaia, affinché le tre trasformazioni termodinamiche descritte sopra possano avvenire, sarà

$$(7) \quad \dot{m} = \frac{P}{\alpha_T}.$$

Come detto prima, la variabilità della massa di vapore che possiamo produrre, direttamente legata alle condizioni dell'ambiente esterno, pone dei limiti alle applicazioni in campo industriale del sistema descritto. Pur tuttavia, in Paesi dove la densità di radiazione solare è elevata per la maggior parte della giornata, è plausibile pensare che si possa far funzionare a regime ($\dot{m} = \text{costante}$) la caldaia per un periodo di tempo abbastanza lungo. Alternativamente, si può accumulare l'energia prodotta (si pensi al sollevamento d'acqua ad una data quota) per poi utilizzarla in modo più controllato.

Per fissare le idee, ammettiamo che si possa, in una giornata in condizioni meteorologiche locali di cielo parzialmente coperto, captare un'intensità di energia pari a 500 W/m^2 circa. Si ricorda che, se il cielo è sereno, l'intensità di energia che promana dal sole e che arriva sulla superficie terrestre è di circa il doppio, ovvero 1 kW/m^2 , con variazioni negative di picco nei mesi invernali. Per una singola parabola con una superficie efficace $S_{eff} = 10 \text{ m}^2$, la potenza che possiamo trasferire alla caldaia è pari a 5 kW . Se montassimo 5 parabole per ogni postazione cilindrica, otterremmo 25 kW di potenza. Una centrale solare che sviluppi 2.5 MW di potenza termica in condizioni di cielo parzialmente coperto potrebbe dunque essere concepita come una serie di 100 cilindri, ognuno con cinque parabole di superficie efficace pari a 10 m^2 . In questa centrale, il valore di picco della potenza termica, in giornate di sole, è di

circa 5 MW. Queste figure dovrebbero poi essere moltiplicate per l'efficienza dei sistemi di conversione termico-elettrico, nel caso si volessero utilizzare come centrali di energia elettrica.

Le conclusioni alle quali siamo giunti in questa sezione sono valide fintanto che possiamo considerare le temperature T_0 e T_f , la pressione p_c e, di conseguenza, la temperatura T_b , come costanti. Infatti, nel calcolare la (7) abbiamo assunto che il sistema si trovasse già in uno stato stazionario. Nel caso non stazionario, il calcolo della dinamica del sistema non è semplice e dipende da vari fattori, tra i quali il materiale scelto per le varie componenti e la geometria di queste, nonché dalla forma del forzamento $P(t)$. Questi aspetti sono comuni ai sistemi a concentrazione solare attualmente in esame presso la "Plataforma Solar de Almeria", in Spagna [6]. Tuttavia, i vantaggi presentati dalle trappole di radiazione luminosa, rispetto ai sistemi a concentrazione, non sono trascurabili. Tra gli aspetti più rilevanti è da considerare la relativa libertà di scegliere la temperatura T_f , limitata, nei sistemi a concentrazione, dal flusso di calore dal tubo contenente il liquido di convenzione all'ambiente esterno. Nel caso di un corpo nero ideale, tutta l'energia radiante viene intrappolata nel sistema e utilizzata per generare vapore. Essendo l'energia una grandezza fisica estensiva ed essendo il sistema capace, almeno dal punto di vista concettuale, di immagazzinare calore con continuità in un certo intervallo di tempo, la temperatura del vapore surriscaldato dipende da quanta energia viene immessa nel sistema prima che la caldaia entri in funzione in modo stazionario e, al momento della produzione di vapore di una data qualità, da quanta potenza può essere trasferita al sistema stesso per mantenere le condizioni qualitative desiderate, pur avendo un flusso di vapore verso l'esterno. Questo aspetto non è presente nel caso del sistema a concentrazione, dove bisogna tener presente anche di un flusso di calore disperso nell'ambiente, dato che il fluido è posto in una camicia vitrea esterna al collettore. Un secondo vantaggio è dovuto al fatto che il sistema, così come è stato concepito, si sviluppa in tre dimensioni, a differenza di quanto avviene per i sistemi termici solari a concentrazione, occupando una superficie sul terreno relativamente bassa, a parità di superficie efficace delle parabole esposte al sole.

4. Conclusioni

Il concetto di trappola di energia solare [4], ovvero di un sistema costituito da un collettore di luce solare e da un corpo nero, è stato adoperato per ideare un generatore di vapore. In questa caldaia solare la quantità di vapore surriscaldato generato all'istante di tempo t dipende in modo diretto dall'energia radiante che il sistema riceve, istantaneamente, dal sole. Sebbene questa caratteristica restringa il campo di applicazione dell'apparato presentato, soprattutto per quanto concerne le applicazioni industriali tradizionali, è possibile individuare dei metodi di immagazzinamento dell'energia prodotta, preferibilmente anch'essi rispondenti alle caratteristiche di sostenibilità alle quali il concetto di caldaia solare si ispira, in modo da poter usufruire di questa stessa energia in maniera più controllata. Pur tuttavia, la presente proposta di caldaia termica offre dei vantaggi nel campo della generazione diretta del vapore da

fonte solare attualmente allo studio [6]. In questi sistemi, gli specchi parabolici, molto simili a quelli concepiti nel progetto Archimede di Carlo Rubbia [3], concentrano la luce del sole nel fuoco lineare, dove scorre un tubo in cui viene racchiusa acqua. Nelle centrali del progetto Archimede, al posto dell'acqua, si utilizza un liquido ad alta temperatura di ebollizione che possa trasferire calore, per convezione, ad una caldaia, nella quale viene prodotto vapore. Tra i vantaggi offerti dalla caldaia concettualmente ideata in questo lavoro, vi è quello che la temperatura del vapore surriscaldato non è limitata da effetti di dispersione del calore verso l'ambiente esterno, come avviene nei sistemi a concentrazione solare, sia che utilizzino un liquido convettivo sia che producano vapore in modo diretto. Inoltre, l'ingombro sul terreno di questi sistemi, che si sviluppano in altezza, è minimo rispetto ai tradizionali impianti a concentrazione, a parità di superficie efficace delle parabole esposte al sole.

Altre applicazioni del concetto di trappola di energia solare possono essere ideate, soprattutto nello sforzo di aiutare le popolazioni del Sud del Mondo, per le quali lo sfruttamento diretto della luce del sole potrebbe significare un inizio di un processo di sviluppo diverso da quello conosciuto dai paesi attualmente altamente industrializzati. Basti pensare alle possibili applicazioni nel campo della dissalazione dell'acqua marina, processo che potrebbe essere molto più efficace ed efficiente, se effettuato all'interno di una trappola solare. Proprio per uno strano destino di queste popolazioni, che sono molto ricche di energia solare, ma povere, in genere, di acqua, le applicazioni di questi sistemi potrebbero in parte alleviare le sofferenze prodotte da siccità cicliche o da quelle indotte dai mutamenti climatici in atto. Non sarebbe nemmeno troppo lontano dalla realtà ipotizzare, nel prossimo futuro, un processo di sviluppo industriale di queste aree completamente basato sulle energie rinnovabili, tra le quali l'energia solare.

Un'ultima applicazione del concetto di trappola solare potrebbe essere ipotizzata nell'utilizzo più razionale delle celle fotovoltaiche. Questi sistemi a semiconduttori non assorbono in tutto lo spettro del visibile, cosicché è del tutto inutile far incidere su di esse tutta l'energia radiante che promana dal sole. Se, per esempio, queste celle fossero racchiuse all'interno di una trappola solare semicilindrica, in cui la superficie piana interna fosse ricoperta di celle fotovoltaiche e la radiazione solare venisse convogliata all'interno del semicilindro, proprio con la stessa tecnica descritta sopra per la caldaia solare, allora si potrebbe ipotizzare l'utilizzo di filtri di luce per discriminare i raggi aventi lunghezze d'onda assorbibili dalle celle da quelli che solamente riscalderebbero le celle stesse, inficiandone l'efficienza. La parte residua dello spettro della radiazione solare potrebbe essere utilizzata per far funzionare una caldaia solare, mentre solo la parte utile al processo fotovoltaico verrebbe immessa nella trappola semicilindrica. Anche in questo caso, si prospettano ulteriori vantaggi: la distribuzione delle celle si sviluppa in verticale anziché in orizzontale, cosicché si ha la possibilità di risparmiare nell'ingombro del terreno, anche in previsione della costruzione di un'ipotetica centrale fotovoltaica che preveda una quantità molto elevata di celle; le celle stesse non sono esposte alle intemperie e quindi non necessitano di eccessive protezioni; infine, esse sono inaccessibili a eventuali malintenzionati che, in regioni poco frequentate, potrebbero tentarne l'asporto, visto il loro attuale elevato costo a metro quadrato.

In ultimo è da menzionare la valenza didattica del presente lavoro non solo per quanto riguarda il contenuto in sé, ma soprattutto per il tema trattato e per gli spunti che dalla lettura se ne potrebbero trarre. In questi anni in cui eventuali ulteriori sviluppi industriali di aree non urbanizzate possono essere considerati in contrapposizione con le richieste sempre più pressanti di una parte della società, sensibile agli equilibri ecologici delle aree in questione, la presa di coscienza da parte degli studenti di questi problemi è necessaria. Tuttavia, proprio perché questi temi possono e devono essere affrontati dai nostri giovani, non bisognerebbe limitarsi alla predizione di future condizioni ambientali catastrofiche, ma spronare gli stessi studenti a dare fiducia all'intelligenza dell'uomo, che, nel tempo, con il contributo di tutti, e soprattutto delle generazioni a venire, saprà trovare la soluzione anche al problema ambientale, senza abbandonare la strada dello sviluppo della tecnica e delle tecnologie, una volta che sarà definitivamente accantonato il modello attuale, basato principalmente sulla produzione di energia mediante l'utilizzo di combustibili fossili.

* * *

Si ringraziano F. ROMEO e P. ZOZZARO per le importanti preliminari discussioni sulle possibili applicazioni della trappola solare.

Bibliografia

- [1] BLANCO J. e ALARCÓN D., *Solar energy and the global water and energy problem: Advances in solar desalination. Proceedings of the CIERTA 2006 Conference, Almería (ES)*, a cura di BOSCH A. P. e GARCÍA M. P., Vol. II (2006) p.17.
- [2] International Energy Agency, *World energy outlook* (IEA, Parigi) 2004.
- [3] http://newton.corriere.it/PrimoPiano/News/2004/01_Gennaio/05/Energia.shtml.
- [4] DE LUCA R., ROMEO F. e ZOZZARO P., "Capturing sunlight", *Eur. J. Phys.*, **27** (2006) 347.
- [5] DE LUCA R., "An optical fibre with a conic aperture", *Eur. J. Phys.*, **27** (2006) 1233.
- [6] VALENZUELA L., ZARZA E., BERENGUEL M. e CAMACHO E., "Control scheme for direct steam generation in parabolic troughs under recirculation operation mode", *Solar Energy*, **80** (2006) 1.