

SOLARE TERMOELETTTRICO VS SOLARE FOTOVOLTAICO, OVVERO: CULTURA METALMECCANICA VS CULTURA QUANTOMECCANICA

Alcuni commenti all'articolo: "Keeping the Energy Debate Clean: How Do We Supply the World's Energy Needs?" di Derek Abbott, Proceedings of the IEEE, Vol.98, N.1, January 2010.

Domenico Coiante – 14 Marzo 2010

Publicato su www.aspoitalia.it

Nel lavoro, citato nel titolo e pubblicato negli atti della prestigiosa associazione degli ingegneri elettrici statunitensi, Derek Abbott passa in rassegna le diverse opzioni energetiche disponibili per soddisfare il fabbisogno d'energia dell'umanità. Egli arriva alla conclusione che l'energia solare è l'unica via praticabile nel lungo periodo per fronteggiare i crescenti consumi d'energia. Mentre concordo pienamente su questa conclusione e su altri argomenti della sua analisi, in particolare su quelli relativi al nucleare, non posso però accettare le sue considerazioni negative riguardo al fotovoltaico. Provo, pertanto, a ragionare sopra tali considerazioni, mettendone in evidenza le imprecisioni e contraddizioni logiche.

La tesi sostenuta è che il solare termoelettrico a concentrazione, con grandi impianti ubicati nei deserti subtropicali, debba essere indicato come la tecnologia più conveniente per le necessità energetiche future dell'umanità. Il solare fotovoltaico è scartato per una serie d'argomenti negativi che lo renderebbero inappropriato a questo compito.

Il documento merita alcuni commenti, di metodo e di merito, qui di seguito riportati.

1 – Nel metodo

A – La potenza

Classificare, come fa l'autore, i diversi livelli energetici presenti nel nostro mondo in termini di potenza, cioè in watt (W) e suoi multipli (terawatt = TW = 10^{12} W), può essere comodo per i confronti relativi, ma è poco aderente alla realtà energetica. Ad esempio, nel testo si afferma che l'umanità consuma oggi 15 TW e poi, a più riprese, si va a vedere se e come tale consumo potrebbe essere soddisfatto da 15 TW d'impianti nucleari, eolici o solari. In tal modo si dà al lettore un'informazione ambigua e fuorviante. Infatti, non è mai detto che quello che l'umanità consuma è l'**energia** generata dalla potenza di 15 TW nel corso dell'intero anno, cioè $15 \text{ TW} \times \text{anno}$ corrispondenti a $(15 \text{ TW} \times 8760 \text{ ore}) = 131400 \text{ TWh} \cong 11300 \text{ Mtep}$ (milioni di tonnellate di petrolio equivalente). Anche se nei conti successivi l'autore tiene implicitamente conto di questo fatto, tuttavia per i lettori non specialisti passa l'idea che bastino 15 TW di potenza dei vari impianti per soddisfare il fabbisogno energetico odierno dell'umanità. Nella realtà le cose sono notevolmente differenti. Ogni fonte energetica è caratterizzata dal fattore di capacità degli impianti, definito come il rapporto tra la durata del loro funzionamento annuale e le 8760 ore presenti in un anno, cioè circa 0,87 per il nucleare, 0,25 per l'eolico, 0,25 per il fotovoltaico e per il solare termodinamico (nelle condizioni d'insolazione dei deserti cui qui ci riferiamo). Quindi, per fronteggiare il consumo annuo di 131400 TWh, sarebbe necessaria la produzione annuale, non di 15 TW, ma di 17 TW d'impianti nucleari, o di 60 TW eolici, o di 60 TW solari, ammesso di aver risolto il problema dell'accumulo dell'energia.

Pertanto, fare i confronti tra le varie scelte energetiche sulla base della potenza è fuorviante rispetto alla reali dimensioni del problema energetico.

B – La soluzione

Vedere in prospettiva, come soluzione del problema energetico mondiale, soltanto l'opzione del solare termoelettrico appare molto riduttivo rispetto alla complessa articolazione che presenta l'argomento. L'uomo da sempre ha imparato a sfruttare tutta la gamma delle opzioni energetiche disponibili a mano a mano che esse divengono accessibili al livello dello sviluppo tecnologico raggiunto e continuerà a farlo in futuro. Pertanto, è poco credibile che si vada tutto a solare, mentre appare più probabile che le esigenze energetiche future continuino ad essere soddisfatte da un gamma d'opzioni, la cui composizione e i pesi relativi

varieranno nel tempo rispetto alla situazione attuale. Quello che si può ragionevolmente ipotizzare è che il quadro di riferimento, come già è avvenuto in passato e sta accadendo al presente, si evolverà in continuazione e comprenderà sempre più le diverse tecnologie rinnovabili, tra le quali sarà sempre più presente il solare in tutte le sue articolazioni: solare termico, solare termoelettrico e fotovoltaico.

2 – Nel merito

A – Fotovoltaico

L'autore esamina la possibilità di soddisfare il fabbisogno energetico mondiale con i pannelli fotovoltaici e cerca di dimostrare che ciò è praticamente impossibile a causa della scarsità dei materiali. In questo tentativo, l'analisi del solare fotovoltaico appare molto approssimativa, confusa e viziata da pregiudizio in favore del solare termodinamico. Infatti, si conclude affermando che *“le celle solari non sono idealmente adatte per sfruttare il sole concentrato”* e che, viceversa, *“il solare termoelettrico è il metodo che sfrutta ottimamente quest'opzione”*. Sembra perciò scontato per l'autore che la via obbligata per produrre l'energia elettrica dal sole sia quella dei concentratori e che i sistemi fotovoltaici a pannelli piani non siano in grado di sfruttare adeguatamente la radiazione solare.

Senza enunciarla esplicitamente, si parte dall'ipotesi ottimistica, poi ripresa anche per il solare termodinamico, che già esista una tecnologia affidabile e a basso costo per l'accumulo dell'elettricità. Infatti, per calcolare l'area dei pannelli sulla base della necessità di produrre 15 TW (all'anno), si utilizza un valore medio annuale per l'insolazione di 300 W/m² ed un'efficienza di conversione pari al 20%. Questo livello medio della radiazione solare è assunto considerando che nel deserto del Mojave, preso come sito di confronto, l'insolazione annuale totale è di circa 2650 ore equivalenti (contro le 1900 della nostra Sicilia), il che corrisponde a dire che le cose vanno come se avessimo a disposizione appunto una potenza di circa 300 W/m² per l'intero anno, giorno e notte, estate e inverno.

Tutto ciò sarebbe vero se fossero già risolti tutti i problemi connessi all'accumulo energetico, sia per le variazioni giorno/notte, sia per quelle, molto più ardue, stagionali. Purtroppo, nell'odierna realtà tecnologica, siamo molto lontani da questa situazione, sia per il fotovoltaico, sia per il solare termoelettrico. In ogni caso, l'autore, nella sua gran bontà futuribile, fa proprie queste ottimistiche condizioni per arrivare a calcolare la superficie dei pannelli fotovoltaici necessaria a produrre il fabbisogno energetico. Il risultato esatto del conto dà un'area dei moduli pari a 250000 km², cioè un quadrato di 500 km x 500 km. Qui il Dr. Abbott fa un'ulteriore sconto al fotovoltaico prendendo solo l'ordine di grandezza: egli si accontenta di un'area minore, assumendo come necessaria una superficie pari a 100 km x 100 km. Quest'area di 10000 km² è abbastanza piccola se confrontata con l'estensione dei vari deserti assolati presenti nel mondo.

Come mai tanto ottimismo?

Come vedremo, tanto ottimismo costa poco perché l'area fissata è più che sufficiente per dimostrare la tesi preconcepita dell'inadeguatezza del fotovoltaico rispetto al termodinamico.

A questo punto, si comincia a calcolare la quantità dei vari materiali che sarebbero necessari a produrre i 10000 km² di moduli fotovoltaici.

- **Acqua**

Si parte con il consumo dell'acqua per arrivare a quello dei vari composti chimici e si fa vedere l'insostenibilità di tali consumi. In particolare l'autore batte in modo ossessivo sul consumo dell'acqua durante la fase di produzione delle celle, che ammonta, secondo i suoi calcoli a 2 x 10¹⁷ grammi (si noti l'unità di misura: se lo avesse misurato in microgrammi sarebbero stati 2 x 10²³ e la cifra avrebbe fatto ancor più impressione). Come usuale per i liquidi, misuriamo il consumo in litri: otteniamo 2 x 10¹⁴ litri. Indubbiamente è una gran quantità, tuttavia, prima di valutare il significato di questa cifra, poniamoci questa domanda:

– Che cosa significa “consumo d'acqua”?

Una sostanza è “effettivamente consumata” in un processo quando essa è distrutta, o decomposta, in modo che essa scompare dal bilancio come tale, rimanendo soltanto presente come massa dei diversi prodotti finali del consumo. Ad esempio, prendiamo la benzina. In questo caso, l'uso del termine consumo è appropriato, perché quando la consumiamo nelle nostre automobili, essa sparisce e alla fine del processo

rimangono solo i noti residui d'anidride carbonica, acqua e altri composti chimici, che non hanno più alcuna somiglianza con la benzina originale. Il nostro consumo fa diminuire in modo irreversibile le riserve naturali della sostanza consumata.

Una sostanza è invece "impropriamente consumata" quando essa è usata in un processo per compiere una o più azioni su altre sostanze e alla fine è restituita alle riserve da cui era stata prelevata. Le condizioni chimico-fisiche della sostanza restituita possono essere degradate, ma essa rimane presente nel bilancio finale delle risorse e può sempre essere riusata dopo opportuno trattamento. Ad esempio, prendiamo l'acqua del rubinetto di casa. Quando si lava l'insalata, si dice che si consuma l'acqua, nel senso che il contatore gira e registra come consumo la quantità di liquido usato. In realtà, il nostro è stato un uso dell'acqua e non un consumo. Dopo il lavaggio, l'acqua è rimasta tale e quale. E' solo stata sporcata e, qualora si volesse, potrebbe facilmente essere depurata e riportata alle sue condizioni iniziali. Si tratterebbe soltanto di una questione di costi. In ogni caso, l'acqua sporca va a finire in fogna e poi s'inserisce di nuovo nel ciclo naturale della riserva da cui era stata attinta. In definitiva, l'acqua è stata usata e non consumata.

Torniamo allora al nostro argomento del consumo di 2×10^{14} litri d'acqua. In base alla precedente precisazione, se esaminassimo in dettaglio e con competenza l'intero processo produttivo delle celle e dei moduli fotovoltaici al silicio, vedremmo che nella fase di fabbricazione non si può applicare all'acqua la definizione di "consumo", ma solo quella di "uso" e che, alla fine, la nostra acqua è restituita al suo ciclo naturale.

Nell'applicazione dei sistemi fotovoltaici, c'è solo una fase in cui l'acqua è propriamente consumata: è quella dell'attrezzatura del terreno per l'ancoraggio delle strutture meccaniche di sostegno dei pannelli. In questo caso, qualora si adottasse la soluzione dei cordoli di cemento interrati come basamenti, l'acqua sarebbe effettivamente consumata nelle reazioni chimiche d'indurimento del calcestruzzo. Ma, a parte il fatto che si tratta di una quantità relativamente più bassa, tale consumo, come vedremo, è presente anche nel solare termoelettrico ed in ragione più grande.

Ciò precisato, non abbiamo difficoltà ad ammettere che si tratta d'uso di una gran quantità d'acqua, che può fare spavento dal punto di vista della disponibilità. Per avere un'idea della sua grandezza, consideriamo che la piovosità annuale media delle regioni centrali italiane si aggira intorno ai 2000 mm d'acqua per m^2 , cioè 2000 litri/ m^2 all'anno. Allora, per raccogliere 2×10^{14} litri in un anno sarebbe necessaria una superficie pari a 100000 km^2 , cioè circa 1/3 del territorio italiano. E' senza dubbio un dato impressionante, ma non dimentichiamo che stiamo trattando della produzione energetica per soddisfare l'intero fabbisogno energetico mondiale, cioè del benessere di circa 6,5 miliardi di persone. A questo livello d'importanza, nessuno ci vieta di andare a raccogliere l'acqua in zone della Terra dove l'acqua piovana abbonda. Basta pensare alla portata dei grandi fiumi per considerare la necessità idrica fotovoltaica del tutto irrilevante. Sarebbe molto difficile sostenere che tale fabbisogno non troverebbe riscontro nelle riserve idriche del pianeta, o che le possa mettere in crisi.

Certo, anche l'acqua ha un costo economico, ma esso, come già avviene ora, sarà conteggiato nel bilancio d'impresa. Forse, però, l'autore vuole adombrare il concetto che, se si fa il fotovoltaico, si mette in crisi l'umanità per sete. Entriamo allora nel gioco e cerchiamo di rispondere in modo tecnico. Già oggi, nell'industria dei circuiti elettronici integrati ed anche in quella delle celle al silicio, l'acqua usata per i numerosi lavaggi (che è la parte di gran lunga maggiore) è considerata preziosa perché si tratta d'acqua purissima ottenuta per deionizzazione a stadi successivi e quindi costosa. E' chiaro che l'acqua residua dei lavaggi non è scaricata in fogna, ma sempre strettamente riciclata. Rimane l'acqua delle varie soluzioni chimiche, che può essere considerata consumata, nel senso che essa, dopo adeguata depurazione, è nuovamente immessa nel ciclo idrico esterno alla fabbrica. A maggior ragione, tali provvedimenti di recupero saranno più rigorosamente praticati nel caso si dovesse andare tutto a fotovoltaico.

- **Arsenico**

E veniamo all'altro argomento chiave: la scarsità dei materiali fotovoltaici in natura.

Notiamo subito che l'autore trascura completamente il silicio, che è l'elemento su cui oggi è basato oltre il 90% del fotovoltaico a pannelli piani, e passa con un volo logico a citare l'arsenico, che invece oggi è impiegato soltanto nelle applicazioni spaziali di nicchia estrema.

Appare chiaro che, essendo il silicio l'elemento solido più abbondante nella crosta terrestre, discutere di una sua eventuale carenza sarebbe stato controproducente e allora si va sull'arsenico. Facciamo pure, come fa l'autore, di considerare che la tecnologia fotovoltaica futura si sviluppi tutta con le celle multigiunzione ad arseniuro di gallio e fosforo d'indio. Si tratta di celle ad alta efficienza (circa 40%) molto costose sia per i

materiali sia per la tecnologia di realizzazione. Tutti sanno che per tali motivi queste celle **devono** essere usate in eliostati a specchi ad alta concentrazione (500 soli) e pertanto una cella da 1 cm² è posta nel fuoco di una parabola a specchio d'apertura pari a 500 cm². Di conseguenza la superficie totale delle celle, necessaria per captare la radiazione che cade sulla nostra area di 10000 km², è pari ad 1/500, cioè 20 km². L'area 100 km x 100 km è ora quella dell'apertura degli specchi e non quella delle celle fotovoltaiche, che è 500 volte più piccola. Pertanto, pur rimanendo una cifra notevole, tuttavia il conto fatto dall'autore circa la quantità d'arsenico necessaria per le celle, come pure quella degli altri materiali, è completamente sbagliato.

- **Deriva termica**

Sono poi discussi due aspetti, che l'autore ritiene molto negativi per il fotovoltaico a concentrazione: la deriva termica e l'invecchiamento per danno da radiazioni. Entrambi gli argomenti appartengono alla categoria delle mezze verità ed appaiono abbastanza pretestuosi. Infatti, riguardo al primo argomento, si può dire che è vero che l'innalzamento di temperatura delle celle durante il funzionamento produce una riduzione dell'efficienza di targa, ma l'entità di questa riduzione è ben confinata entro i limiti di specifica e di essa si tiene conto nella progettazione degli impianti. Per gli impianti ad alta efficienza a concentrazione le celle ad arseniuro di gallio sono dotate di un dissipatore termico in aria che ne stabilizza la temperatura a circa 65 °C. A questo valore corrisponde ancora un'efficienza superiore al 30%, che è comunque ben al di sopra dell'efficienza mostrata dai sistemi solari termoelettrici a concentrazione (oggi intorno al 15%).

- **Danno da radiazioni**

Il danno da radiazioni luminose è ancora una mezza verità. Infatti, esso è presente in misura rilevante soltanto nei moduli al silicio amorfo, (che nessuno pensa possano costituire la soluzione tecnologica definitiva), mentre è praticamente assente per gli impianti a terra sia al silicio cristallino, che all'arseniuro di gallio. Anzi quest'ultimo è preferito in tutte le applicazioni spaziali proprio per la sua resistenza anche al danno da radiazioni ionizzanti. Mezzo secolo di sperimentazione delle celle fotovoltaiche al silicio e all'arseniuro di gallio nelle condizioni severe di radiazioni nello spazio non hanno insegnato nulla al nostro autore, che persiste nella denigrazione. Non si capisce inoltre perché non abbia fatto riferimento per l'affidabilità ai numerosi GW al silicio cristallino, ormai in funzione da decine di anni in tutto il mondo.

Esiste indubbiamente per le celle il fenomeno di lenta riduzione dell'efficienza di conversione nel tempo, effetto che è genericamente imputato all'invecchiamento delle celle. Esso è dovuto per la maggior parte all'aumento della resistenza serie parassita causato dall'ossidazione della griglia metallica di raccolta delle cariche fotogenerate e dall'opacizzazione della resina d'incapsulamento. Si tratta comunque di un'azione limitata e molto lenta nel tempo, tanto è vero che per quest'effetto la garanzia dei moduli prevede una potenza ancora pari all'80% di quella originale dopo 20-25 anni di funzionamento ininterrotto.

B - Solare termoelettrico con specchi a concentrazione

Per converso, secondo il Dr. Abbott, per il solare termoelettrico la strada è tutta in discesa e lastricata di rose e fiori. Uno si sarebbe aspettato un'analisi puntuale rispetto agli stessi argomenti affrontati per il fotovoltaico. Invece, niente. Sono argomenti così irrilevanti che non vale la pena nemmeno di accennarli. Allora lo facciamo noi.

- **Deserti come siti**

Rimaniamo nel deserto del Mojave in California. Diciamo subito che solo in siti simili a questo è possibile pensare ad un'applicazione estesa della tecnologia degli specchi a concentrazione per due ordini di motivi.

Il primo è che soltanto in questi siti desertici la componente diretta della radiazione solare, (la sola sfruttabile dagli specchi), ha un valore molto elevato che raggiunge circa il 90% della radiazione globale. Per confronto nei migliori siti italiani, in Sicilia, la radiazione diretta annuale vale circa il 70% della globale, cosa che rende molto meno consigliabile l'uso di questa tecnologia. La necessità di disporre di una così alta percentuale di radiazione diretta è da mettere in relazione con la possibilità di raggiungere nel fuoco dei

concentratori valori di temperatura sufficientemente elevati da permettere poi di ottenere un'apprezzabile efficienza di conversione.

Il secondo è che, a parità di apertura della superficie captante degli specchi, occorre occupare un'area estesa circa 3,5 volte contro 2,5 volte per il fotovoltaico a pannelli piani fissi, ciò per evitare l'ombreggiamento reciproco tra gli specchi. Allora conviene il deserto, perché lì non si pongono problemi di occupazione territoriale (costo del terreno e disponibilità).

In conclusione, anche l'autore concorda sul fatto che il solare termoelettrico risulta conveniente solo se gli impianti si collocano nei deserti molto assolati.

- **Generazione centralizzata della potenza**

Le circostanze sfavorevoli, che i deserti si trovino molto lontani dalle utenze e il trasporto dell'energia elettrica sia dispersivo e costoso, non vengono per nulla prese in considerazione. Nel caso dell'Europa, tra il deserto del Sahara e le utenze maggiori, oltre alla distanza di migliaia di km, c'è anche il mare di mezzo con tutte le difficoltà che questo comporta. La conclusione che possiamo trarre è che il solare termoelettrico non si concilia affatto con il modello, ritenuto oggi più efficiente, della generazione elettrica diffusa con impianti collocati in prossimità delle utenze, per la quale il fotovoltaico appare ideale. Per rendere accettabile il solare termoelettrico come opzione energetica occorre far ricorso ad un'altra tecnologia, quella della produzione dell'idrogeno in prossimità degli impianti e la relativa catena di stoccaggio, trasporto e distribuzione, le cui problematiche sono ancora da risolvere.

- **Polvere, riflettanza degli specchi e manutenzione**

Inoltre, il deserto pone un altro problema: la polvere in genere e quell'abrasiva in particolare. La riflettanza di uno specchio nuovo appena installato è sopra al 90%. Basta la deposizione di un sottile strato di polvere che il valore scende all'80%. Questo infine decresce nel tempo in relazione alla deposizione successiva di polvere. Di conseguenza l'efficienza dell'impianto si riduce fortemente nel tempo. Bisogna correre al riparo lavando periodicamente gli specchi con getti d'acqua a pressione. Ed ecco che appare il primo inconveniente di cui il nostro autore non fa alcuna menzione: l'approvvigionamento dell'acqua. Siamo nel deserto dove non piove mai e quindi l'acqua deve essere portata con autocisterne. Tralasciamo il costo energetico di questo trasporto e del pompaggio e limitiamoci ad una sola considerazione. Se era tanto importante per il fotovoltaico l'aspetto del consumo d'acqua, come mai non lo è più per il lavaggio degli specchi?

Qui, per l'autore, il problema non esiste.

Il secondo inconveniente è che i frequenti lavaggi e le tempeste di polvere provocano l'abrasione del vetro degli specchi, riducendo permanentemente la riflettanza. Per un impianto che deve funzionare per almeno 20-25 anni, ciò si traduce in una perdita sistematica di efficienza nel tempo. Quindi gli specchi devono essere periodicamente sostituiti e questo costa, sia per i componenti, sia per il lavoro di sostituzione.

A questo proposito si deve anche considerare la presenza dei meccanismi di movimentazione degli specchi per l'inseguimento della posizione apparente del sole. E' una parte che richiede continua manutenzione per mantenere lubrificati ed efficienti gli ingranaggi.

Dobbiamo poi considerare gli elementi del sistema a valle degli specchi, cioè i km di tubazioni dei circuiti termoidraulici e relative coibentazioni, gli scambiatori di calore, le numerose valvole e relativi attuatori, il generatore di vapore e il gruppo turbina-alternatore e, qualora sia presente, il sistema di accumulo termico in sali fusi con i suoi grandi silos coibentati. Tutte cose che richiedono continua sorveglianza e manutenzione e che non sono presenti nei sistemi fotovoltaici.

In definitiva, a parità di apertura della superficie captante, il solare termoelettrico richiede una spesa di esercizio e manutenzione più alta del fotovoltaico. Ciò ha un peso notevole nel costo dell'energia generata.

Ma di tutto questo il nostro autore non fa alcun cenno.

- **Consumo d'acqua**

Potremmo affrontare il discorso dell'efficienza di conversione, dalla radiazione all'elettricità, dove il ciclo teorico di Carnot ci permetterebbe di fare molte considerazioni circa il valore effettivamente raggiungibile in relazione alle temperature ottenibili nel fuoco degli specchi. Ma ciò richiederebbe un intero trattato e lo lasciamo da parte.

Torneremo invece ancora sull'argomento del consumo d'acqua in fase di costruzione dei componenti e dei sistemi, perché il nostro solerte autore nel caso in questione lo ha completamente tralasciato.

L'acqua, come si usa per la fase della fabbricazione delle celle fotovoltaiche, è usata in tutti i processi di costruzione dei componenti dei sistemi sia fotovoltaici che solari termoelettrici. In particolare l'acqua si usa abbondantemente per i lavaggi della sabbia silicica con cui si realizza il vetro degli specchi. Notevoli quantità d'acqua si usano anche per la fabbricazione dei componenti metallici con cui sono realizzate le strutture di sostegno degli specchi e dei pannelli fotovoltaici ed ovviamente per tutte le tubazioni di acciaio inossidabile dei circuiti termoidraulici. Anche la fabbricazione dei materiali per la coibentazione termica dà il suo contributo e così via.

In totale, quanta acqua si consuma?

Onestamente non lo sappiamo, però l'autore, a cui questo argomento stava particolarmente a cuore per il fotovoltaico, avrebbe dovuto indagare e quantificare tale consumo. Perché non lo ha fatto?

La risposta è che avrebbe trovato un forte sbilanciamento gravante sul solare termoelettrico per il motivo fondamentale che, sempre a parità di superficie per la cattura della radiazione solare, la quantità di materiali presente nei sistemi termoelettrici è di gran lunga maggiore rispetto a quella dei sistemi fotovoltaici. Per tutto, basti considerare uno dei materiali più significativi: il vetro. Esso è presente sulla faccia anteriore dei moduli fotovoltaici e negli specchi dei concentratori e nei tubi ricevitori posti nel fuoco degli specchi. In tutti i casi non si è ancora trovato un materiale sostitutivo con le stesse caratteristiche e costo minore. Supponiamo, per comodità, che lo spessore del vetro dei moduli fotovoltaici sia lo stesso che negli specchi concentratori. Fissiamo l'attenzione sugli specchi paraboloidi cilindrici, che il nostro autore indica in prospettiva come i componenti di maggiore diffusione. Per semplicità considereremo la sezione trasversale degli specchi come se fosse propriamente semicircolare. A parità di area tra la superficie dei moduli e l'apertura degli specchi, la superficie del vetro degli specchi è $\pi/2$ (= 1,57) volte superiore a quella dei moduli fotovoltaici. Aggiungendo poi tutti i km dei tubi di vetro che costituiscono i ricevitori posti nella linea focale degli specchi, arriviamo alla conclusione che la quantità di vetro usato nel solare termoelettrico è molto maggiore di quella usata per un'uguale superficie captante di moduli fotovoltaici. Di conseguenza, la quantità d'acqua, usata nella fabbricazione del vetro è molto sbilanciata verso il solare termoelettrico.

Riprendiamo infine il discorso del consumo dell'acqua per la realizzazione dei basamenti a terra degli impianti. Vista la relativa leggerezza delle strutture di sostegno dei pannelli fotovoltaici in impianti fissi e la bassa resistenza offerta al vento, gli ancoraggi a terra sono costituiti da piccoli cordoli di cemento parzialmente interrati, o anche soltanto poggiati sul terreno. Nel caso degli eliostati e dei collettori a concentrazione, è invece necessario ricorrere a veri e propri plinti di cemento, immersi in profondità nel terreno ed aventi massa notevole. Ciò è necessario per offrire adeguata resistenza alle sollecitazioni meccaniche provenienti dall'impatto del vento sulle pesanti ed ampie strutture mobili, a cui inoltre occorre garantire continuamente il corretto allineamento ottico con la posizione apparente del sole. E' pertanto un dato di fatto che, a parità d'area di apertura dei moduli fotovoltaici e degli specchi, la quantità di cemento impiegata per il solare termoelettrico è molto più grande e, di conseguenza, il consumo d'acqua risulta maggiore.

3 – Considerazioni conclusive

Mi pare molto difficile condividere le conclusioni del Dr. Abbott circa la maggiore adeguatezza del solare termoelettrico per fronteggiare il fabbisogno energetico dell'umanità. Ho cercato di portare alcuni argomenti critici alla sua visione "termoelettrica" e non è la prima volta che mi capita di affrontare questa questione. Purtroppo ciò accade abbastanza spesso ed ogni volta mi trovo a pensare: "Come è possibile che qualcuno possa razionalmente arrivare alla conclusione di considerare il solare termoelettrico come unica opzione strategica risolutiva dei problemi energetici?"

Nella lunga storia dell'energia solare, questa opinione era stata enunciata nel XIX secolo da alcuni grandi scienziati. Ad esempio, il nostro Antonio Pacinotti, nel 1870 intratteneva l'Assemblea della Società Agraria di Bologna con una dotta dissertazione "Sull'utilizzazione del calore solare" in cui egli riportava "*il resoconto di varii tentativi sperimentali incominciati nel 1864 e proseguiti ininterrottamente con lo scopo di studiare il problema della diretta utilizzazione del calore solare*". (Pacinotti Antonio, Annali della Società Agraria di Bologna, Vol. X, 1870,p 159). La convinzione era basata sulle conoscenze scientifiche dell'epoca ed era figlia della cultura tecnica delle macchine termodinamiche, allora in grande sviluppo. La storia è costellata di numerose iniziative, anche a livello preindustriale, per produrre potenza termica e meccanica con lo sfruttamento dell'energia solare raccolta in concentratori a specchi. Questa linea si è riproposta più

volte nel corso del tempo anche nel XX secolo, avendo aggiunto nel frattempo la generazione di elettricità, ma non è mai approdata alla produzione industriale su scala significativa. Discutere i motivi dell'insuccesso, sarebbe molto interessante, ma ci porterebbe molto lontano. A noi basta riconoscere il fatto che questa tecnologia solare, nelle sue diverse varianti, poteva essere proposta all'epoca come unica praticabile perché essa non aveva concorrenti: se si voleva ottenere energia elettrica dalla radiazione solare, bisognava per forza passare per uno dei tanti cicli termodinamici studiati e messi a punto in quegli anni.

Tutto questo è stato vero fino al 1954, quando è stata inventata la cella fotovoltaica.

Lo sviluppo impetuoso di questa nuova tecnologia, basata sulla fisica quantistica dell'effetto fotoelettrico, ha raggiunto, verso la fine del secolo scorso, uno stato di adeguatezza tecnica e di affidabilità operativa, che ha fatto cambiare completamente il paradigma dell'energia solare. Oggi il solare fotovoltaico costituisce un'opzione alternativa al solare termoelettrico tradizionale e, a guardare le prospettive di miglioramento tecnologico, lo sarà sempre più in futuro.

Il confronto tra le due opzioni, fatto a parità di produttività energetica rispetto al suolo occupato dagli impianti, mette in risalto la semplicità dei sistemi fotovoltaici rispetto alla complessità di quelli termoelettrici. Nel primo caso l'elettricità è generata direttamente dalla radiazione solare in un solo stadio di conversione, mentre nell'altro occorre passare per uno stadio di raccolta e trasformazione in energia termica, in un secondo stadio di trasformazione del calore in potenza meccanica e in un terzo stadio di conversione della potenza meccanica in elettricità. La visione di un impianto solare termoelettrico a concentrazione rende subito l'idea della sua maggiore complessità rispetto a quella di un impianto fotovoltaico a pannelli piani fissi al suolo. Infatti, il primo appare con i suoi (relativamente) alti specchi, i km di grosse tubazioni coibentate, valvole, scambiatori di calore, serbatoi per i fluidi termoidraulici ed infine il gruppo turbina-alternatore (e i relativi edifici d'alloggiamento), mentre il secondo mostra soltanto i pannelli piani poggiati su strutture leggere fisse al suolo, da cui escono i cavi elettrici di collegamento, posti in canalette interrato confluenti nei piccoli armadi contenenti gli inverters.

Eppure ciò non basta a convincere i sostenitori del solare termoelettrico ad accettare il fotovoltaico come degno competitore. A parte la situazione in evoluzione dei conti economici, su cui si può discutere, quale è il motivo profondo di tale atteggiamento?

Le mie riflessioni portano ad azzardare una risposta: si tratta di un fatto culturale.

Nei secoli scorsi si è affermata la cultura tecnica della generazione di potenza, rappresentata sempre nel panorama industriale fatto di grandi macchine e di ciminiere fumanti, dove il rumore assordante e i fumi prodotti dai grandi motori termici regnano sovrani. Basta pensare ad una sferragliante e sbuffante locomotiva a vapore per avere un'idea del concetto. Non fanno eccezione le centrali idroelettriche, anche se non hanno ciminiere. Chiunque ne abbia visitata una, ha potuto sperimentare il rombo dell'acqua, il grande rumore delle turbine e il fischio degli alternatori e soprattutto le impressionanti vibrazioni del pavimento percepite attraverso i piedi. Tali percezioni restano profondamente impresse nella memoria dei visitatori.

Appare quindi ormai acquisito nella cultura diffusa il concetto che la generazione di potenza si accompagna sempre a qualche ciclo termodinamico e relativi fluidi termici, a parti meccaniche in movimento, a grande rumore e ad emissione di fumi. E' in fondo il mito di Prometeo incatenato per aver rubato il fuoco agli dei. Il mito cioè della natura selvaggia domata dall'uomo e imprigionata nelle macchine per produrre potenza a comando. Nei due secoli precedenti al nostro questa visione si è fortemente radicata nel senso comune, tanto da divenire un paradigma culturale del concetto di generazione di potenza. Il solare termoelettrico a concentrazione risponde in pieno a tutti i requisiti del paradigma: ci sono i cicli termodinamici, i fluidi termici, le impressionanti file di tubazioni e i rumorosi gruppi turbina-alternatore. Manca solo la ciminiera, ma per il resto il sistema dà la garanzia classica visiva di generare potenza.

Il fotovoltaico invece non risponde affatto a questi canoni e non fa scena. La conversione della potenza solare in potenza elettrica avviene in modo completamente silenzioso, senza parti meccaniche o fluidi in movimento. Al visitatore non si offre alcuna prova acustica, visiva o tattile del processo di generazione di potenza in corso. E' necessario dimostrare il fatto attraverso la lettura degli amperometri e dei voltmetri, che purtroppo pochi sanno leggere. Ci si deve fidare delle parole della guida. Alla fine della visita, non resta altro che la percezione visiva dei pannelli fotovoltaici, che in genere è resa poco appariscente per questioni d'impatto ambientale. Poco rimane impresso nella memoria delle persone comuni.

A questo proposito, voglio raccontare un fatto capitato negli anni '80 quando ero in servizio all'ENEA. Venne allora in visita alla Casaccia il Ministro dell'Industria, Valerio Zanone, assieme ad una delegazione della Commissione Attività Produttive della Camera ed io fui incaricato d'illustrare il funzionamento del nostro impianto fotovoltaico da 10 kWp. Era una giornata di sole pieno in tarda primavera ed era all'incirca mezzogiorno. L'impianto funzionava a piena potenza, alimentando l'illuminazione ed alcune utenze di un

modello di abitazione, tra cui spiccavano la pompa di sollevamento dell'acqua dal pozzo, alcuni elettrodomestici, un computer da tavolo e l'apparecchio radio-televisivo. Dopo la mia spiegazione del funzionamento delle celle fotovoltaiche, dei moduli e dei pannelli, feci constatare attraverso la lettura degli strumenti che l'impianto in quel momento stava alimentando la casa simulata. Ci fu subito una serie di battute scettiche del tipo: "Ci dica dove passano i cavi della rete elettrica. Li ha messi sotto terra per non farceli vedere?" E così via. Più di tutti era molto scettico il Ministro, da cui dipendevano i fondi della ricerca per l'Ente. Il Vice Presidente dell'ENEA, che accompagnava la delegazione era a dir poco terrorizzato e mi guardava con occhi di fuoco, lasciandomi chiaramente intendere: "Rispondi subito e bene, oppure sono c... tuoi." A quel punto aprii rapidamente il quadro generale di raccolta dei cavi provenienti dai pannelli, staccai l'interruttore e collegai ai morsetti due grossi fili che erano connessi ad un reostato di potenza, usato nelle prove di carico. Poi invitai il Ministro stesso a riattaccare l'interruttore e lo pregai di osservare il colore della resistenza del reostato. Questa, quasi subito, divenne incandescente e finì per bruciarsi con una bella fumata sotto l'azione della potenza fotovoltaica. Solo allora egli si convinse che dai pannelli fotovoltaici effettivamente fluiva potenza elettrica in misura notevole. E i fondi all'ENEA per la ricerca fotovoltaica furono salvi.

In definitiva, mentre la cultura metalmeccanica è ormai radicata e diffusa ampiamente nell'opinione pubblica, la novità delle applicazioni della fisica quantomeccanica, sebbene accettata senza riserve nel settore dell'elettronica e delle telecomunicazioni, incontra ancora difficoltà ad essere considerata concettualmente valida nel settore della generazione di potenza.