

Alcune semplici considerazioni sul futuro dell'economia dell'energia¹.

1. Economia dell'energia

Attualmente buona parte dell'energia proviene da sorgenti fossili, e per questo motivo molte unità comunemente utilizzate fanno riferimento a queste sorgenti:

1 kWh	= $3.6 \cdot 10^6$ J	
1 t carbone	$\approx 3.0 \cdot 10^{10}$ J	≈ 8300 kWh
1 kg petrolio	$\approx 4.4 \cdot 10^7$ J	≈ 12 kWh
1 m ³ gas naturale	$\approx 3.9 \cdot 10^7$ J	≈ 11 kWh
1 barile di petrolio (= 158.9873 litri, ≈ 135 kg dens. rel. ≈ 0.85)	$\approx 5.9 \cdot 10^9$ J	≈ 1650 kWh
1 tonnellate equivalenti di petrolio (tep)	$\approx 4.4 \cdot 10^{10}$ J	≈ 12000 kWh
1 BTU (British Thermal Unit)	≈ 1057 J	

Avendo in mente queste unità si possono allora analizzare le seguenti tabelle:

Consumi mondiali in fonti primarie (milioni di tep)

	1995	2000	2003	2004
Gas naturale	1.816	2.086	2.243	2.303
Carbone	2.232	2.320	2.578	2.731
Petrolio	3.356	3.660	3.798	3.922
Energia elettrica	856	946	957	999
Biomasse	1.020	1.094	1.138	1.155
Calore da geotermia	3	3	3	3
Calore da solare	2	4	4	4
TOTALE	9.285	10.113	10.722	11.118

Fonte: ENEA, Rapporto Energia – Ambiente 2005

¹ Lo schema di questa nota è basato in molti punti sul capitolo iniziale del libro *Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts*, di Peter Würfel (Wiley-VCH Verlag, 2005).

Consumo energetico medio pro-capite per macroregioni (tep/anno)

	1960	1970	1990	Previsioni 2020
America settentrionale	5,75	7,78	7,82	7,16
America Latina	0,74	0,91	1,329	1,95
Europa occidentale	1,78	2,63	3,22	3,53
Europa centrale e orientale	1,66	2,60	2,91	2,87
Paesi ex URSS	2,06	3,01	5,01	4,45
Medio Oriente e Nord Africa	0,30	0,47	1,17	1,59
Africa sub-sahariana	0,43	0,51	0,53	0,58
Pacifico (1)	0,49	0,62	1,02	1,43
- di cui PEP (2)	0,45	0,41	0,76	1,22
Asia Meridionale	0,22	0,27	0,39	0,52
MONDO	1,09	1,42	1,66	1,65

Tutte le cifre sono arrotondate

(1) Dati comprensivi dei Paesi ad economia pianificata

(2) PEP = Paesi ad economia pianificata

Fonte: World Energy Council

La prima tabella ci dice che il consumo totale di energia da fonti primarie in tutto il mondo nel 2004 è stato di $11118 \cdot 10^6$ tep $\approx 4.9 \cdot 10^{20}$ J e questo corrisponde ad un consumo medio di ~ 15600 GW = $1.56 \cdot 10^{13}$ W.

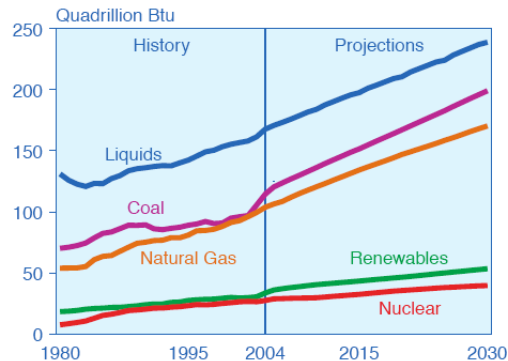
Ma questo numero è grande o è piccolo? Per capirlo possiamo confrontarlo con l'energia che arriva sulla Terra dal Sole: la cosiddetta *costante solare* è l'irradianza media della radiazione solare al di fuori dell'atmosfera, e vale 1366 W/m^2 , e quindi la potenza totale intercettata dalla Terra è $1.75 \cdot 10^{17}$ W, più di 10000 volte il consumo medio totale da fonti primarie.

Esercizio: si utilizzino i dati della seconda tabella per fare dei grafici dei consumi individuali per ciascuna macroregione. Cosa indicano questi grafici? È possibile trarre conclusioni sul benessere delle popolazioni delle macroregioni?

2. Consumo energetico e riserve di combustibili fossili

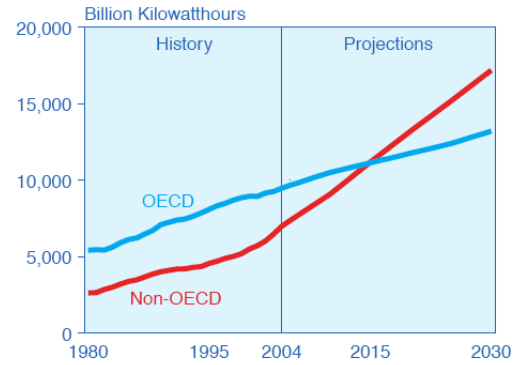
Il consumo energetico sta crescendo: le figure seguenti (tratte dall'International Energy Outlook 2007 – U.S. Department of Energy) mostrano l'andamento nel recente passato e quello previsto nel prossimo futuro di vari tipi di combustibile e dell'energia elettrica.

Figure 11. World Marketed Energy Use by Fuel Type, 1980-2030



Sources: **History:** Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2004* (May-July 2006), web site www.eia.doe.gov/iea. **Projections:** EIA, *System for the Analysis of Global Energy Markets* (2007).

Figure 13. World Electric Power Generation by Region, 1980-2030



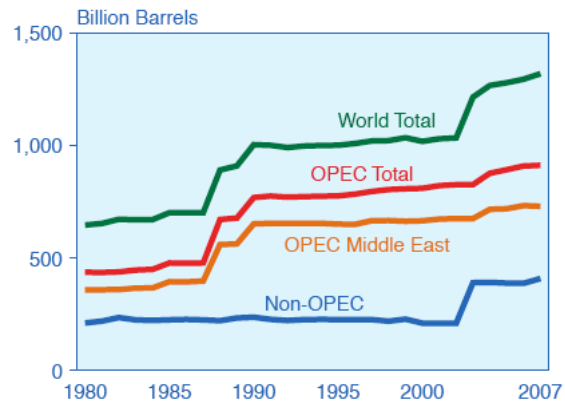
Sources: **History:** Energy Information Administration (EIA), *International Energy Annual 2004* (May-July 2006), web site www.eia.doe.gov/iea. **Projections:** EIA, *System for the Analysis of Global Energy Markets* (2007).

Table 3. World Oil Reserves by Country as of January 1, 2007
(Billion Barrels)

Country	Oil Reserves
Saudi Arabia	262.3
Canada	179.2
Iran	136.3
Iraq	115.0
Kuwait	101.5
United Arab Emirates	97.8
Venezuela	80.0
Russia	60.0
Libya	41.5
Nigeria	36.2
Kazakhstan	30.0
United States	21.8
China	16.0
Qatar	15.2
Mexico	12.4
Algeria	12.3
Brazil	11.8
Angola	8.0
Norway	7.8
Azerbaijan	7.0
Rest of World	65.5
World Total	1,317.4

"Worldwide Look at Reserves and Production," *Oil & Gas Journal*, Vol. 104, No. 47 (December 18, 2006), pp. 24-25.

Figure 38. World Crude Oil Reserves, 1980-2007



Note: Reserves include crude oil (including lease condensates) and natural gas plant liquids.

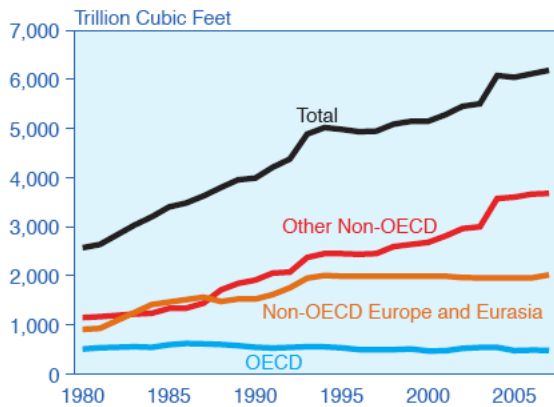
Sources: **1980-1993:** "Worldwide Oil and Gas at a Glance," *International Petroleum Encyclopedia* (Tulsa, OK: PennWell Publishing, various issues). **1994-2007:** *Oil & Gas Journal* (various issues).

Le riserve attualmente note di petrolio corrispondono a circa $7.8 \cdot 10^{21}$ J e poiché adesso i consumi di petrolio equivalgono a circa il 35% del totale dei consumi energetici, e quindi a circa $1.7 \cdot 10^{20}$ J all'anno, si vede che le riserve ora note saranno esaurite entro 45 anni, se il consumo di petrolio resta costante.

Si può fare un esercizio analogo con le altre sorgenti energetiche, per esempio il gas naturale. Dalla tabella riportata sotto si trova che le riserve attuali sono in totale di $1.8 \cdot 10^{14}$ m³ e quindi circa $6.8 \cdot 10^{21}$ J. Poiché il consumo di gas naturale è circa un quinto del consumo totale

attuale e corrisponde quindi a 10^{20} J all'anno, allora le riserve attuali saranno esaurite entro 68 anni al ritmo di consumo presente.

Figure 42. World Natural Gas Reserves by Region, 1980-2007



Sources: 1980-1993: "Worldwide Oil and Gas at a Glance," International Petroleum Encyclopedia (Tulsa, OK: PennWell Publishing, various issues). 1994-2007: Oil & Gas Journal (various issues).

Table 6. World Natural Gas Reserves by Country as of January 1, 2007

Country	Reserves (Trillion Cubic Feet)	Percent of World Total
World	6,183	100.0
Top 20 Countries	5,602	90.6
Russia	1,680	27.2
Iran	974	15.8
Qatar	911	14.7
Saudi Arabia	240	3.9
United Arab Emirates	214	3.5
United States	204	3.3
Nigeria	182	2.9
Algeria	162	2.6
Venezuela	152	2.5
Iraq	112	1.8
Turkmenistan	100	1.6
Kazakhstan	100	1.6
Indonesia	98	1.6
Norway	82	1.3
China	80	1.3
Malaysia	75	1.2
Uzbekistan	65	1.1
Egypt	59	0.9
Canada	58	0.9
Kuwait	55	0.9
Rest of World	581	9.4

Source: "Worldwide Look at Reserves and Production," Oil & Gas Journal, Vol. 104, No. 47 (December 18, 2006), pp. 22-23.

(nota 1 piede cubo ≈ 0.02832 m³)

Esercizio: per quel che riguarda il carbone il calcolo è un po' più complesso perché non tutto il carbone ha lo stesso potere calorico quando viene bruciato. Si considerino le due tabelle che seguono e si utilizzino i dati contenuti per stimare la durata delle riserve attualmente note di carbone (NB, 1 short ton = 2000 libbre = 907.18474 kg)

Fuel	State of Origin	Moisture	Analysis, Weight % Before Drying			Heat Content (kJ/g)
			Volatile Matter	Carbon	Ash	
Anthracite	PA	4.4	4.8	81.8	9.0	30.5
Bituminous						
Low volatile	MD	2.3	19.6	65.8	12.3	30.7
Medium volatile	AL	3.1	23.4	63.6	9.9	31.4
High volatile	OH	5.9	43.8	46.5	3.8	30.6
Sub-bituminous	WA	13.9	34.2	41.0	10.9	24.0
	CO	25.8	31.1	34.8	4.7	19.9
Lignite (brown coal)	ND	36.8	27.8	30.2	5.2	16.2
Peat	MS	—	—	—	—	13.
Wood**	—	—	—	—	—	10.4–14.1

Table 8. World Recoverable Coal Reserves as of January 1, 2003
(Billion Short Tons)

Region/Country	Bituminous and Anthracite	Subbituminous	Lignite	Total
World Total	528.8	298.1	170.9	997.7
United States ^a	123.7	110.3	33.5	267.6
Russia	54.1	107.4	11.5	173.1
China	68.6	37.1	20.5	126.2
India	99.3	0.0	2.6	101.9
Other Non-OECD Europe and Eurasia	50.1	18.7	31.3	100.1
Australia and New Zealand	42.6	2.7	41.9	87.2
Africa	55.3	0.2	*	55.5
OECD Europe	19.5	5.0	18.8	43.3
Other Non-OECD Asia	1.4	2.0	8.1	11.5
Brazil	0.0	11.1	0.0	11.1
Other Central and South America	8.5	2.2	0.1	10.8
Canada	3.8	1.0	2.5	7.3
Other ^b	1.8	0.4	0.1	2.3

^aData for the United States represent recoverable coal estimates as of January 1, 2006.

^bIncludes Mexico, Middle East, Japan, and South Korea.

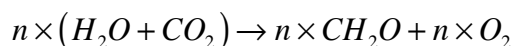
*Less than 0.05 billion short tons.

Sources: **United States:** Energy Information Administration, unpublished data from the Coal Reserves Database (April 2007). **All Other Countries:** World Energy Council, *2004 Survey of Energy Resources*, Eds. J. Trinnaman and A. Clarke (London, UK: Elsevier, December 2004).

3. Stima del totale delle riserve di combustibili fossili esistente

L'atmosfera terrestre primordiale era priva di ossigeno, che si trovava tutto in forma chimicamente legata a minerali della crosta terrestre. Ci sono parecchie evidenze di questo fatto: l'esistenza di tracce di metalli non ossidati nella crosta terrestre indica che questi minerali si sono formati in assenza di ossigeno. Inoltre i microorganismi del regno Archaea – discendenti di forme di vita molto antiche – hanno un metabolismo che non richiede la presenza di ossigeno. L'ossigeno atmosferico è stato prodotto dall'attività fotosintetica di batteri e piante, e dalla quantità totale di ossigeno libero possiamo quindi stimare la quantità totale delle riserve di combustibili fossili.

La fotosintesi è un processo complesso che avviene con modalità diverse nei vari organismi, ma che è costituito grossolanamente da un primo passo ad alta efficienza in cui l'acqua viene scomposta in protoni e ossigeno, e da una serie di passi ad efficienza molto più ridotta in cui i protoni vengono combinati con l'anidride carbonica per formare carboidrati, realizzando così la reazione generica



In questo modo si formano ad esempio il glucosio e tutti i suoi isomeri chimici: $6 \times (CH_2O) \rightarrow C_6H_{12}O_6$; l'efficienza globale del processo è circa 1%.

Dallo schema generico di reazione mostrato sopra si vede che per ogni mole di O_2 prodotto c'è una mole di carbonio legato sotto forma di carboidrati, e poiché ad una mole di ossigeno molecolare corrisponde ad una massa di 32 g e a una mole di carbonio corrisponde una massa di 12 g, si trova che la massa totale di carbonio immagazzinato è

$$M_c = \frac{12}{32} M_{O_2}$$

dove M_{O_2} è la massa totale di ossigeno libero. Per stimare quest'ultima massa trascuriamo l'ossigeno disciolto nell'acqua degli oceani e notiamo che la pressione atmosferica standard vale circa 10^5 N/m^2 , e quindi ad una massa totale di circa 10^4 kg/m^2 (qui prendiamo l'acc. di gravità al suolo $\approx 10 \text{ m/s}^2$). L'ossigeno molecolare corrisponde al 20% circa in volume dell'atmosfera standard: se trascuriamo la differenza tra percentuale in volume e massa, troviamo allora che ci sono 2000 kg/m^2 di ossigeno, e poichè la superficie terrestre ha un'area di circa $5 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$, e quindi la massa totale di ossigeno è 10^{18} kg , e la massa totale di carbonio immagazzinato è $\approx 4 \cdot 10^{17} \text{ kg} = 4 \cdot 10^{14} \text{ tonnellate}$. Finora sono state trovate circa 10^{12} tonnellate di carbone equivalente, e quindi una frazione molto piccola del totale; si deve però notare che la reazione di combustione inverte la reazione di fotosintesi e per questo motivo – anche se fosse recuperabile – non si potrebbe bruciare tutta questa riserva di carbone equivalente, perché esaurirebbe tutto l'ossigeno dell'atmosfera, e al posto dell'ossigeno l'atmosfera conterrebbe alla fine un ugual numero di moli di anidride carbonica.

4. Altre semplici considerazioni

La potenza che arriva su una superficie di 1 m^2 e che è normale alla direzione della radiazione solare è circa 1.2 kW sulla superficie terrestre. Supponiamo di poter trascurare gli effetti dell'angolo di incidenza dovuto al movimento apparente del Sole e che l'efficienza della fotosintesi sia circa 1%, allora in media le piante immagazzinano $\sim 500 \text{ kJ/m}^2$ al giorno sotto forma di carboidrati. In realtà questo valore va probabilmente aumentato di un fattore circa 10 a causa del fatto che la superficie del fogliame è frastagliata, quindi $\sim 5000 \text{ kJ/m}^2$ al giorno. La potenza media necessaria ad un essere umano è circa 100 W , quindi $\sim 8640 \text{ kJ}$ al giorno, e quindi per il metabolismo di un solo essere umano ci vogliono almeno un paio di metri quadrati di terreno coltivato, supponendo che TUTTI i carboidrati prodotti possano essere utilizzati, cosa che in realtà non è vera, ma che comunque ci dà una stima di ordine di grandezza.

Un litro di benzina ha un potere calorifico di circa 32000 kJ/l , e il consumo di un moderno motore a benzina è approssimativamente 7 km/l , quindi un'auto a benzina consuma mediamente circa $4000\text{-}5000 \text{ kJ/km}$, vale a dire l'output giornaliero di 1 m^2 di vegetazione.

Esercizio: molte cellule umane si possono approssimare geometricamente come palline con raggio di circa $5 \mu\text{m}$: si calcolino volume e massa di una cellula, assumendo ovviamente che la densità media sia poco diversa da quella dell'acqua. Si stimi quindi il numero di cellule in una persona di 70 kg e si calcoli la potenza media associata al metabolismo di una singola cellula.

5. L'effetto serra

L'ultima osservazione della sezione 3 è particolarmente rilevante, perché indica che dobbiamo fare attenzione alle modifiche ambientali che stiamo producendo con l'utilizzo dei combustibili fossili. In particolare il bilancio dell'anidride carbonica è critico perché modifica una caratteristica fondamentale della nostra atmosfera, il cosiddetto *effetto serra*.

Per capire come funziona l'effetto serra, notiamo anzitutto che la temperatura di un pianeta senza atmosfera viene determinata dall'emissione di corpo nero, infatti il bilancio termico è dato dall'equazione che dà la potenza W ricevuta dal pianeta e dove R è il raggio del pianeta, T_p è la sua temperatura media e a la sua emissività

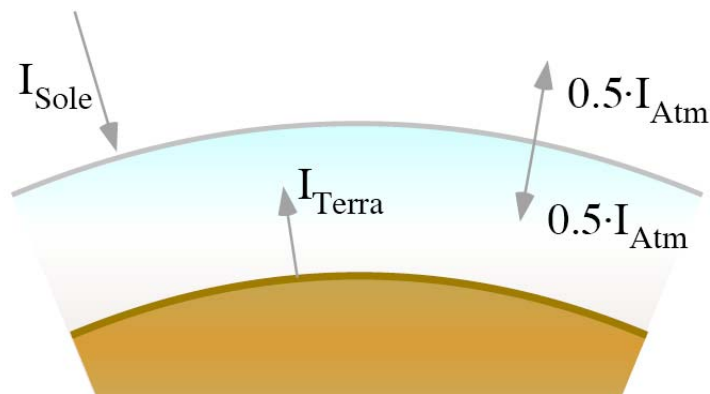
$$W = \pi R^2 a I_{Sole} - 4\pi R^2 a \sigma T_p^4$$

Troviamo quindi la temperatura all'equilibrio dall'equazione

$$I_{Sole} - 4\sigma T_p^4 = 0$$

$$T_p = \left(\frac{I_{Sole}}{4\sigma} \right)^{1/4} \approx 270K$$

dove si è preso $I_{Sole} \approx 1.3kW/m^2$, e come si vede questo non differisce tanto dalla temperatura media della Terra ($\sim 288 K$).



In realtà però il flusso termico è più complesso: l'atmosfera che circonda la Terra si riscalda e riemette, in parte verso lo spazio, in parte verso la Terra. Se assumiamo che l'assorbimento della radiazione solare avvenga tutto a terra, e che il flusso termico dal suolo vada tutto a scaldare l'atmosfera (schematizzata per mezzo di un unico strato assorbente-emettente), allora troviamo all'equilibrio

$$I_{Terra} = I_{Sole} + \frac{1}{2} I_{Atm}$$

$$I_{Sole} = \frac{1}{2} I_{Atm}$$

e da queste

$$I_{Terra} = I_{Atm} = 2I_{Sole}$$

Infine, tenendo conto come prima della superficie totale che assorbe e che emette, troviamo

$$2I_{Sole} - 4\sigma T_p'^4 = 0$$

$$T_p' = \left(\frac{2I_{Sole}}{4\sigma} \right)^{1/4} \approx 327K \approx 54^\circ C$$

Con questo effetto serra estremo (tutta la radiazione emessa da terra viene riassorbita e riemessa dall'atmosfera) la Terra sarebbe inabitabile.

Il ragionamento si può estendere a più strati assorbenti-emettenti; per esempio con due strati si hanno le relazioni all'equilibrio

$$I_{Pianeta} = I_{Sole} + \frac{1}{2}I_1 + \frac{1}{2}I_2$$

$$\frac{1}{2}I_1 = \frac{1}{2}I_2 = I_{Sole}$$

allora

$$I_{Pianeta} = 3I_{Sole}$$

Infine, tenendo conto come prima della superficie totale che assorbe e che emette, troviamo

$$3I_{Sole} - 4\sigma T_p'^4 = 0$$

$$T_p' = \left(\frac{3I_{Sole}}{4\sigma} \right)^{1/4} \approx 354K \approx 82^\circ C$$

Più in generale, per n strati si trova

$$(n+1)I_{Sole} - 4\sigma T_p'^4 = 0$$

$$T_p' = \left(\frac{(n+1)I_{Sole}}{4\sigma} \right)^{1/4} \approx (n+1)^{1/4} 270K$$

Esercizio: si consideri il caso di Venere (che si trova ad una distanza media di 0.723 unità astronomiche dal Sole) e si dimostri che l'elevata temperatura superficiale di Venere (~ 475 °C) si deve attribuire all'esistenza di più di uno strato assorbente.

6. La conversione diretta dell'energia solare

A lungo termine i combustibili fossili dovranno essere abbandonati e serviranno delle alternative. Una di queste è ovviamente l'energia solare, e dal punto di vista termodinamico è naturale chiedersi quanto può essere efficiente la conversione termica dell'energia solare/ Utilizzando i principi della termodinamica è abbastanza facile calcolare l'efficienza di un processo termico. Concettualmente la situazione non differisce dalla solita situazione con un motore termico che lavora con due sorgenti termiche a temperature diverse.

Ricapitoliamo velocemente il ragionamento che permette di calcolare l'efficienza di un motore termico. Anzitutto il calore trasferito da/verso le sorgenti termiche e il lavoro prodotto devono bilanciarsi: $Q_S = Q_A + L$ che è il solito primo principio della termodinamica.

Ovviamente le variazioni di entropia sono date da $\Delta S = \frac{Q}{T}$, e inoltre per un motore termico ordinario sappiamo che deve valere il secondo principio della termodinamica nella forma: $\Delta S_S + \Delta S_A \geq 0$ e quindi

$$Q_S = Q_A + L$$
$$\frac{Q_S}{T_S} + \frac{Q_A}{T_A} \geq 0$$

da cui

$$T_A Q_S + T_S Q_A = T_A Q_S + T_S (Q_S - L) \geq 0$$

e infine si trova l'efficienza di conversione

$$\eta = \frac{L}{Q_S} \leq 1 - \frac{T_A}{T_S}$$

Se potessimo prendere direttamente $T_A \approx 300$ K, $T_S \approx 6000$ K, troveremmo $\eta \approx 95\%$, però nel caso della radiazione solare si deve tenere conto di alcune differenze rispetto al solito ragionamento.

La radiazione solare ha una densità di energia integrata su tutte le frequenze che è proporzionale all'irradianza integrata:

$$u = \frac{4}{c} \sigma T_S^4$$

e quindi la variazione differenziale di entropia per unità di volume è

$$ds = \frac{du}{T_S} = \frac{4}{c} \cdot 4 \sigma T_S^2 dT$$

da cui si trova

$$\Delta s = \frac{4}{c} \frac{4}{3} \sigma T_s^3$$

Da queste formule troviamo che ad una potenza assorbita $A\sigma T_s^4$ corrisponde una variazione di entropia per unità di tempo della sorgente ad alta temperatura (la radiazione di corpo nero) uguale $\frac{4}{3} A\sigma T_s^3$.

La potenza associata all'energia libera di Helmholtz (l'energia disponibile per fare lavoro di un qualunque tipo) è allora

$$W = (A\sigma T_s^4) - T_A \left(\frac{4}{3} A\sigma T_s^3 \right)$$

e infine l'efficienza è

$$\eta = \frac{W}{A\sigma T_s^4} = 1 - \frac{4}{3} \frac{T_A}{T_s}$$

e quindi, prendendo come prima $T_A \approx 300$ K, $T_s \approx 6000$ K, troviamo $\eta \approx 93.3\%$.

Questa alta efficienza teorica non si riesce ad ottenere con tutti i processi di conversione, che sono caratterizzate da inefficienze loro proprie: la tabella seguente (tratta da G. W. Crabtree e N. S. Lewis: "Solar energy conversion", Phys. Today, marzo 2007, pp. 37-42) mostra le efficienze di alcuni processi di conversione fotovoltaici

Photovoltaic conversion efficiencies		
	Laboratory best*	Thermodynamic limit
Single junction		31%
Silicon (crystalline)	25%	
Silicon (nanocrystalline)	10%	
Gallium arsenide	25%	
Dye sensitized	10%	
Organic	3%	
Multijunction	32%	66%
Concentrated sunlight (single junction)	28%	41%
Carrier multiplication		42%

*As verified by the National Renewable Energy Laboratory. Organic cell efficiencies of up to 5% have been reported in the literature.