

Laboratorio di.  
(Risorse- Economia- Ambiente)

Lezione 8

Martedì 24 marzo 2020

**EROEI ed energia netta.  
Una stima della qualità delle fonti  
energetiche.**

Totale ore: 18/24

Qualsiasi organismo per vivere deve spendere dell'energia. Questa energia gli organismi la prendono dall'ambiente in cui vivono. Facciamo l'esempio di un semplice predatore come il ghepardo (cfr figura seguente). Esso vive uccidendo e nutrendosi di altri animali (generalmente erbivori, cioè consumatori primari). Per sopravvivere il ghepardo deve assumere dai corpi delle prede più energia di quella che spende per catturarle ed ucciderle.

Più in generale nel bilancio energetico di un qualsiasi organismo le spese energetiche non possono superare i ricavi. Nel bilancio energetico di un singolo organismo c'è l'energia minima che abbiamo definito "metabolismo basale" (vedi Lezione 4), l'energia necessaria per difendersi dai predatori, l'energia necessaria per procurarsi il cibo e l'energia per la riproduzione e la cura della prole. La somma di queste spese energetiche in un certo periodo di tempo non può superare le entrate. Ci sono due parametri che definiscono un bilancio energetico di un organismo e quindi anche di una società (vista come un organismo complesso, o struttura dissipativa), questi due parametri sono l'Energia Netta e l'EROEI. Le definizioni di Energia Netta e Ritorno energetico sull'energia investita (EROEI acronimo dell'inglese: Energy Return on Energy Invested, sono semplici: l'Energia Netta è la differenza fra ricavi energetici  $E_R$  e costi energetici  $E_C$  e l'EROEI è il rapporto fra ricavi (o ritorno) e costi energetici. È il ritorno sull'investimento misurato in unità energetiche invece che monetarie.

$$\text{Energia netta} = E_R - E_C$$

$$\text{EROEI} = E_R / E_C$$

Dove  $E_R$  rappresenta l'insieme delle entrate energetiche ed  $E_C$  l'insieme dei costi.

$$\text{Energia netta} = E_R - E_C$$

$$\text{EROEI} = E_R / E_C$$

Energy Return On Energy Invested  
Ritorno Energetico sull'Energia Investita

**Ritorno energetico**



$E_R$



$E_C$

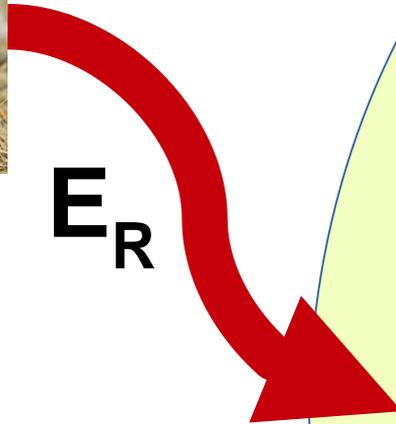


**Costo energetico**

Abbiamo fatto l'esempio del ghepardo che è un predatore isolato. Prendiamo il caso di un predatore che ha una certa socialità, il leone (*Felis leo*). Il leone vive in piccoli branchi familiari con un unico maschio adulto, diverse femmine e un certo numero di cuccioli a diversi stadi di maturità. Le femmine collaborano fra loro nella caccia per procurare cibo al branco e sono perciò i procacciatori di energia per la piccola società leonina. Il maschio e i cuccioli sono generalmente meri consumatori della caccia femminile (episodicamente anche il maschio partecipa alla caccia). Il risultato è riassunto nella figura che segue. Le "produttrici di energia" riforniscono l'intera società leonina (di energia alimentare) che sostiene un costo energetico totale dato dalla somma dei costi di ciascun individuo (metabolismo basale, difesa, caccia). Anche in questo caso i costi del branco non possono essere per lungo tempo superiori ai ricavi altrimenti i membri della società iniziano a morire d'inedia.



$E_R$



$E_C$



**Costo**

Prendiamo ora il caso della società umana. Qui le risorse energetiche **non sono solo il cibo** e alimentano un metabolismo sociale ed economico che in dimensione e obiettivi supera di diversi ordini di grandezza quello della somma del metabolismo biologico dei suoi individui. Le risorse vengono in genere estratte da accumuli o da flussi naturali da parte di produttori che nella società industriale capitalistica sono organizzati in aziende, queste aziende nel loro insieme producono una quantità di energia  $E_R$ . Per produrre energia questi produttori devono spenderne una parte (esattamente come il ghepardo e le leonesse negli esempi precedenti), le definizioni di energia netta ed EROEI sono pertanto le stesse proposte negli esempi precedenti. L'Energia Netta, in particolare, è l'energia che la società umana può spendere per alimentare il proprio metabolismo sociale ed economico ed è la differenza fra l'energia estratta  $E_R$  e il costo energetico del processo di estrazione  $E_C$ .

Dunque affinché un sistema, sia esso un organismo singolo o una società, possa mantenersi in vita occorre che l'Energia Netta sia positiva e l'EROEI maggiore dell'unità. L'energia netta è l'origine del surplus economico e quest'ultimo è ad essa direttamente proporzionale. Una società primitiva di ominidi è prossima ad una società animale e si limita essenzialmente ad estrarre dall'ambiente risorse alimentari. Come abbiamo detto l'umanità fa il primo passo in una direzione diversa dal resto del mondo animale con l'adozione del fuoco. La prima fonte energetica non alimentare.

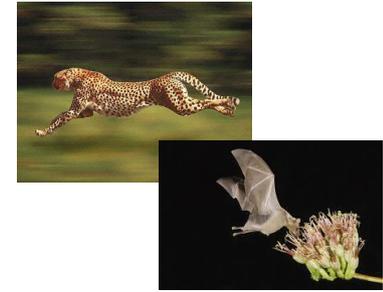
Nelle società industriali questo meccanismo di procacciamento di energia ed il suo bilancio è nascosto dalla complessità del sistema per cui solo recentemente è stato reso esplicito grazie, soprattutto, al lavoro di scienziati che vengono dalle scienze naturali (fisica, chimica e scienze della vita), che hanno dato gettato le fondamenta dell'economia bio-fisica (Biophysica economics).

EROI < 2

Cibo  
(energia  
alimenti)



Metabolismo

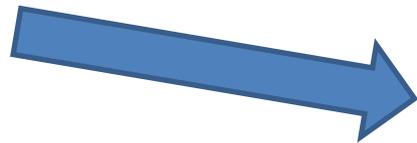


EROI = 5- 10

Cibo  
(energia  
alimenti)



Metabolismo

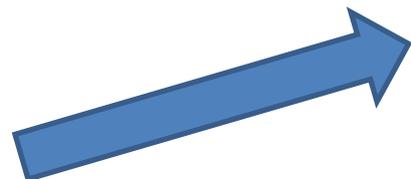


Socialità



EROI = 10

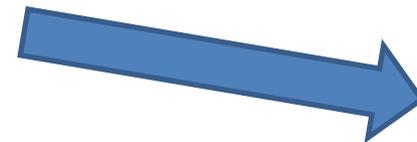
Cibo  
(energia  
alimenti)



Metabolismo



Biomassa  
(energia  
termica)



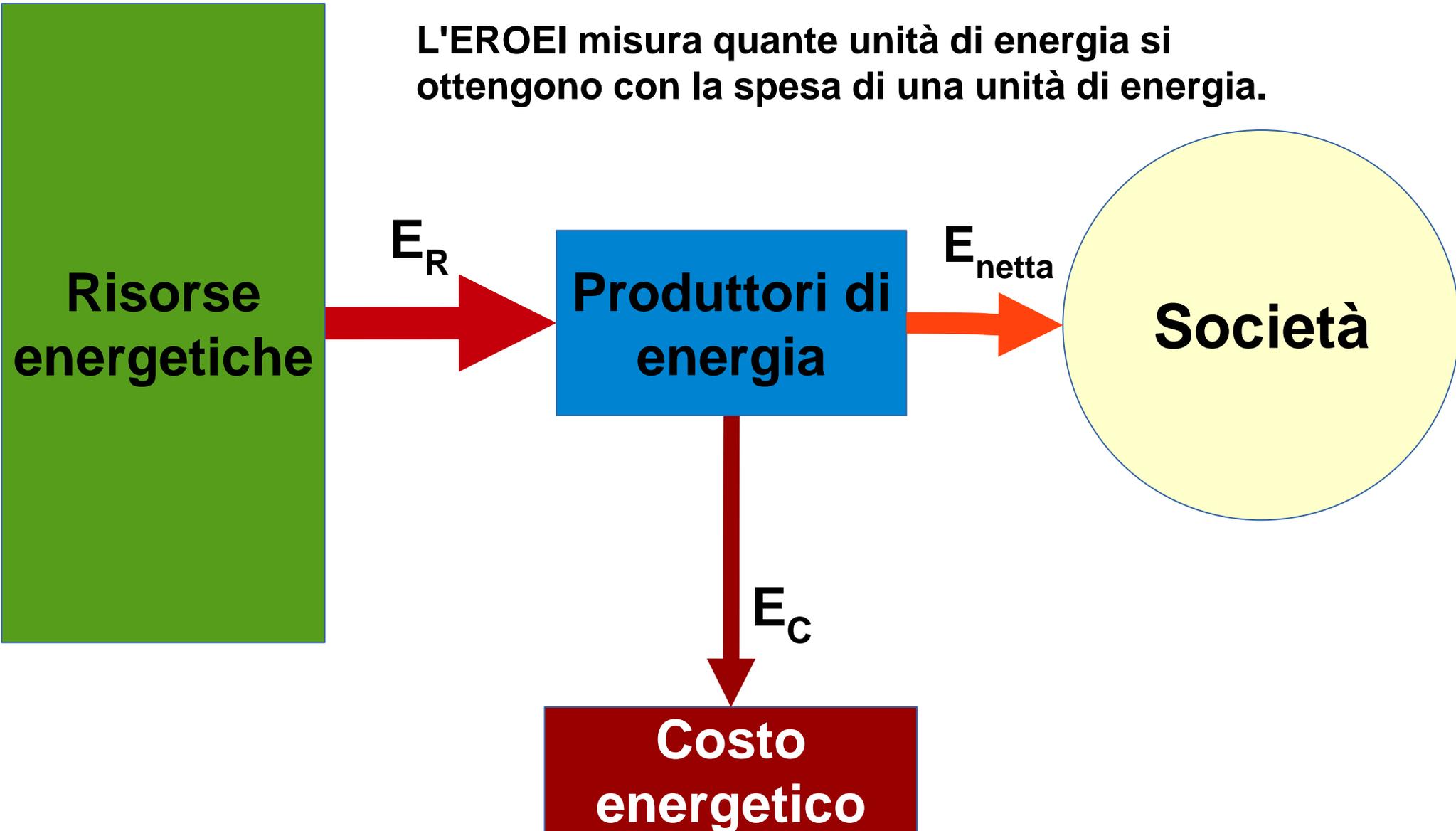
Socialità



$$E_{netta} = E_R - E_C$$

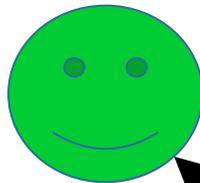
$$EROEI = \frac{E_R}{E_C}$$

L'EROEI misura quante unità di energia si ottengono con la spesa di una unità di energia.



$$EROEI = \frac{\text{Ricavi energetici}}{\text{Costi energetici}} > 1$$

*EnergiaNetta > 0*



Questo filmato esemplifica e riassume i concetti espressi.

Con un minimo di algebra è possibile esprimere l'Energia Netta in funzione dell'EROEI. Partiamo dalla definizione di Energia Netta:

$$E_{netta} = E_R - E_C$$

Dividendo ambedue i membri della precedente equazione per  $E_R$  otteniamo:

$$\frac{E_{netta}}{E_R} = \frac{E_R}{E_R} - \frac{E_C}{E_R}$$

Prendendo la definizione di EROEI la precedente espressione diventa:

$$\frac{E_{netta}}{E_R} = 1 - \frac{1}{EROEI}$$

Questa espressione permette di calcolare il rapporto fra Energia Netta e ricavi energetici in funzione dell'EROEI. Il rapporto  $E_{netta}/E_R$  moltiplicato per 100 dà la percentuale di Energia Netta estratta dai ricavi data come differenza fra l'unità e l'inverso dell'EROEI che rappresenta la percentuale dei costi energetici rispetto ai ricavi.

$$E_{netta} = E_r - E_c$$

1

$$\frac{E_{netta}}{E_r} = 1 - \frac{E_c}{E_r}$$

3

$$EROEI = \frac{E_r}{E_c}$$

$$\frac{E_{netta}}{E_r} = 1 - \frac{1}{EROEI}$$

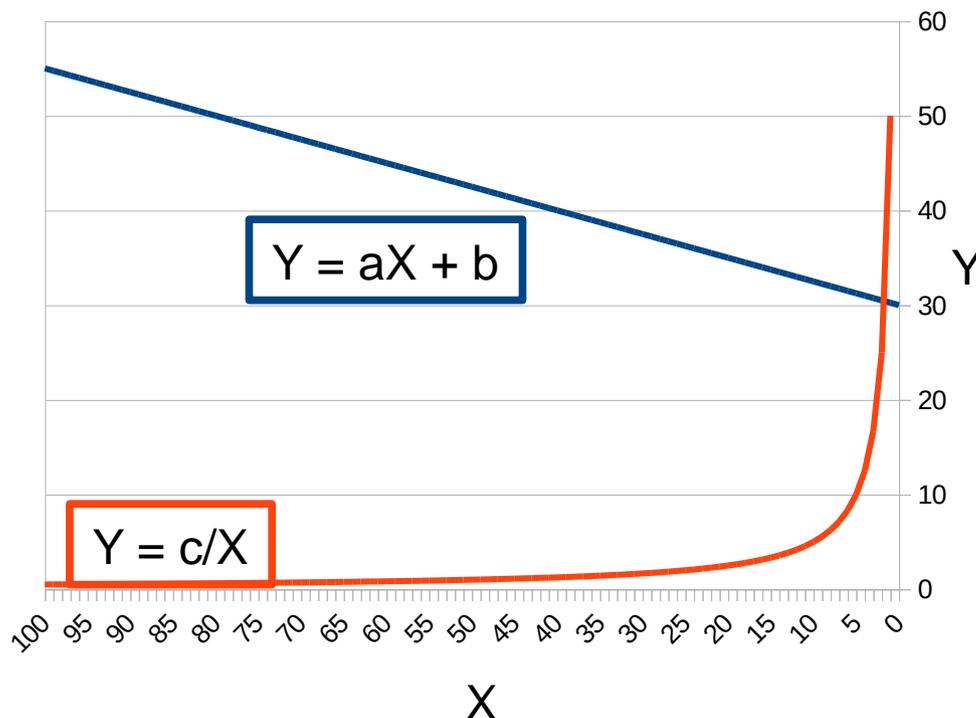
2

$$\frac{E_c}{E_r} = \frac{1}{EROEI}$$

3

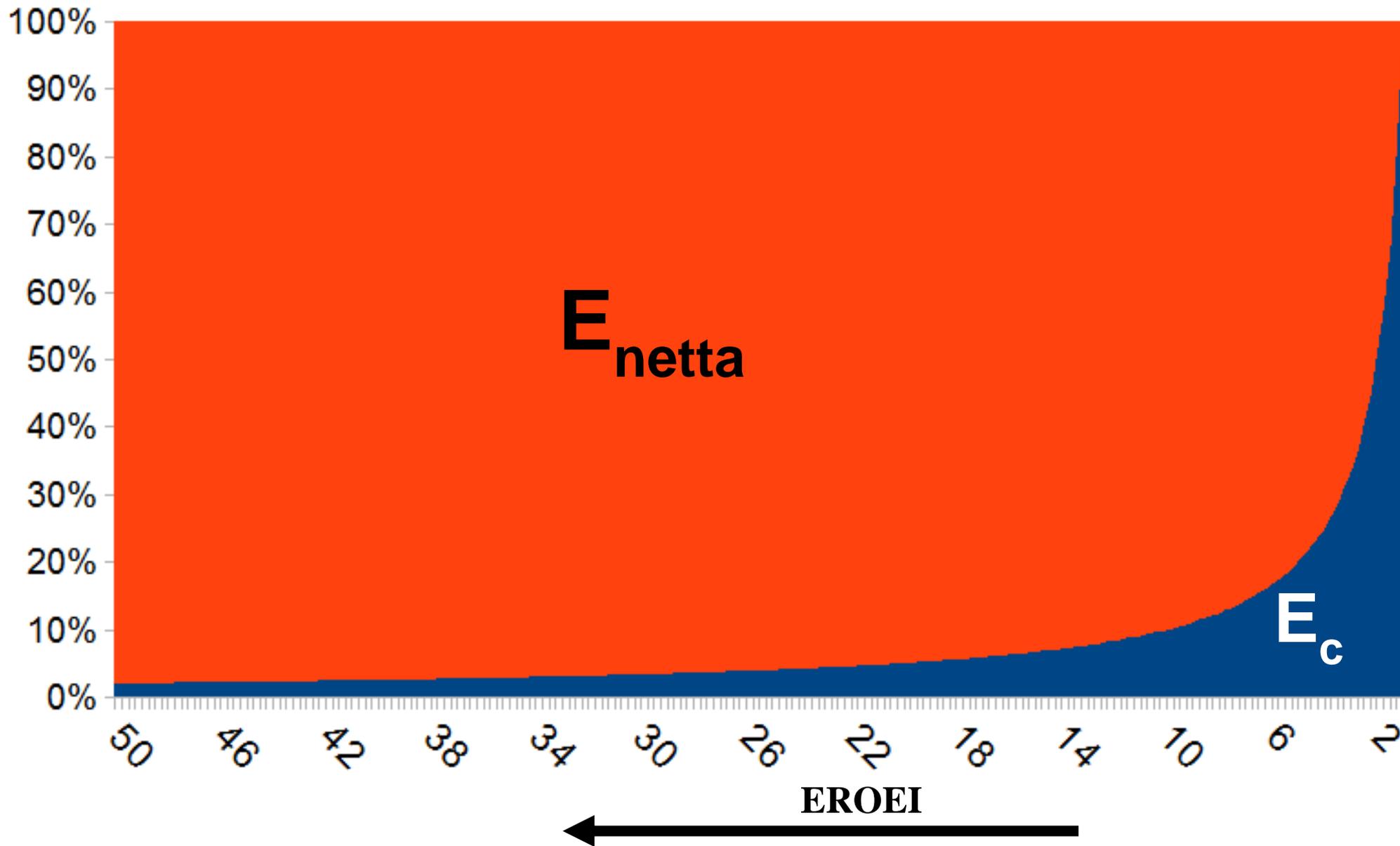
Diagrammando il rapporto  $E_{\text{netta}}/E_R$  al decrescere dell'EROEI (vedi figura seguente) si rivela la natura non lineare della relazione. Una relazione fra due variabili è lineare quando al variare della variabile indipendente quella dipendente aumenta o diminuisce seguendo una retta nel piano cartesiano. Nel grafico che segue è riportato il confronto fra una retta (blu: con  $a = 0,25$  e  $b = 30$ ) e un'iperbole (rossa: con  $c = 10$ ). La variabile indipendente  $X$  diminuisce verso destra.

Nel caso in esame i costi energetici variano secondo  $1/\text{EROEI}$  e, quindi, al diminuire di EROEI aumentano in modo iperbolico. Un valore di EROEI inferiore a 1 non ha praticamente senso per una fonte energetica perché quando l'EROEI scende al di sotto dell'unità la fonte energetica cessa di essere tale e diventa una perdita energetica.



Dal grafico della pagina seguente si può apprezzare il fatto che al diminuire dell'EROEI i costi energetici crescono in modo accelerato seguendo l'andamento dell'iperbole descritta mentre parallelamente l'energia netta diminuisce secondo la stessa legge. Il fatto che la relazione si non lineare ha una grande importanza sugli effetti sociali ed economici del declino dell'EROEI.

$$\frac{E_{netta}}{E_r} = 1 - \frac{1}{EROEI}$$



<b>EROEI</b>	<b>Energia Netta</b>
100 = 100:1	100 - 1 = 99
50 = 100:2	100 - 2 = 98
25 = 100:4	100 - 4 = 96
20 = 100:5	100 - 5 = 95
10 = 100:10	100 - 10 = 90
5 = 100:20	100 - 20 = 80
2 = 100:50	100 - 50 = 50
1 = 100:100	100 - 100 = 0

Il declino dell'EROEI è difficilmente apprezzabile da parte della società perché quello che la società "sente" è la riduzione dell'Energia Netta come percentuale dell'energia totale prodotta (o di quello che abbiamo chiamato reddito energetico  $E_R$ ). E quando l'EROEI diminuisce da un valore di 100 ad uno di 50 (quindi un dimezzamento) l'Energia Netta come percentuale di  $E_R$  decresce dal 99% al 98%. Una quantità irrilevante. Ma l'effetto continua per successive riduzioni. Se, ad esempio, l'EROEI declina ulteriormente a 20, l'Energia Netta è ancora il 95% di  $E_R$ . Riducendo ancora l'EROEI a 10 (un valore che è 1/10 di quello iniziale dell'esempio) l'Energia Netta scende al 90% di  $E_R$ . E' solo dopo questa soglia che ulteriori riduzioni dell'EROEI diventano catastrofiche dal punto di vista dell'Energia Netta. La tabella della pagina seguente riporta i valori numerici di cui stiamo parlando.

L'osservazione che questo esempio ci permette di fare è che, siccome l'EROEI delle fonti fossili decresce nel tempo, l'Energia Netta che queste fonti rendono disponibile per la società, decresce nel tempo in un modo che può essere apprezzato solo quando si sia superato una soglia critica che possiamo identificare in un  $EROEI = 10$ . Al di sotto di questa soglia infatti ogni ulteriore riduzione comporta una forte riduzione dell'Energia Netta.

Quando l'EROEI di una fonte giunge al valore 1, la fonte cessa di essere tale. Ciò non vuol dire, in principio che la fonte viene abbandonata. Ad esempio se una società ha un'altra fonte di energia con un EROEI molto alto, ma con caratteristiche meno desiderabili, può scegliere di dissipare l'energia di questa fonte ad alto EROEI per ottenere l'energia nella forma voluta. Supponiamo, ad esempio, che il petrolio con  $EROEI > 1$  sia interamente consumato. Il fatto è che l'unica fonte di combustibili liquidi resta quasi esclusivamente il petrolio per cui se avessimo una fonte favorevole (fissione, fusione, solare, eolico) con un alto EROEI e disponibilità quasi illimitata, potremmo continuare ad estrarre petrolio e, detto per inciso i minerali utili, da giacimenti sempre più difficili e rarefatti. Da un punto di vista economico questo potrebbe in principio avere senso anche se non lo avrebbe da un punto di vista ecologico.

EROEI	$E_{netta}/E_R$	%
100	0,9900	99,0
90	0,9889	98,9
80	0,9875	98,8
70	0,9857	98,6
60	0,9833	98,3
50	0,9800	98,0
40	0,9750	97,5
20	0,9500	95,0
10	0,9000	90,0
9	0,8889	88,9
8	0,8750	87,5
7	0,8571	85,7
6	0,8333	83,3
5	0,8000	80,0
4	0,7500	75,0
3	0,6667	66,7
2	0,5000	50,0
1	0,0000	0,0

$$\frac{E_{netta}}{E_R} = 1 - \frac{1}{EROEI}$$

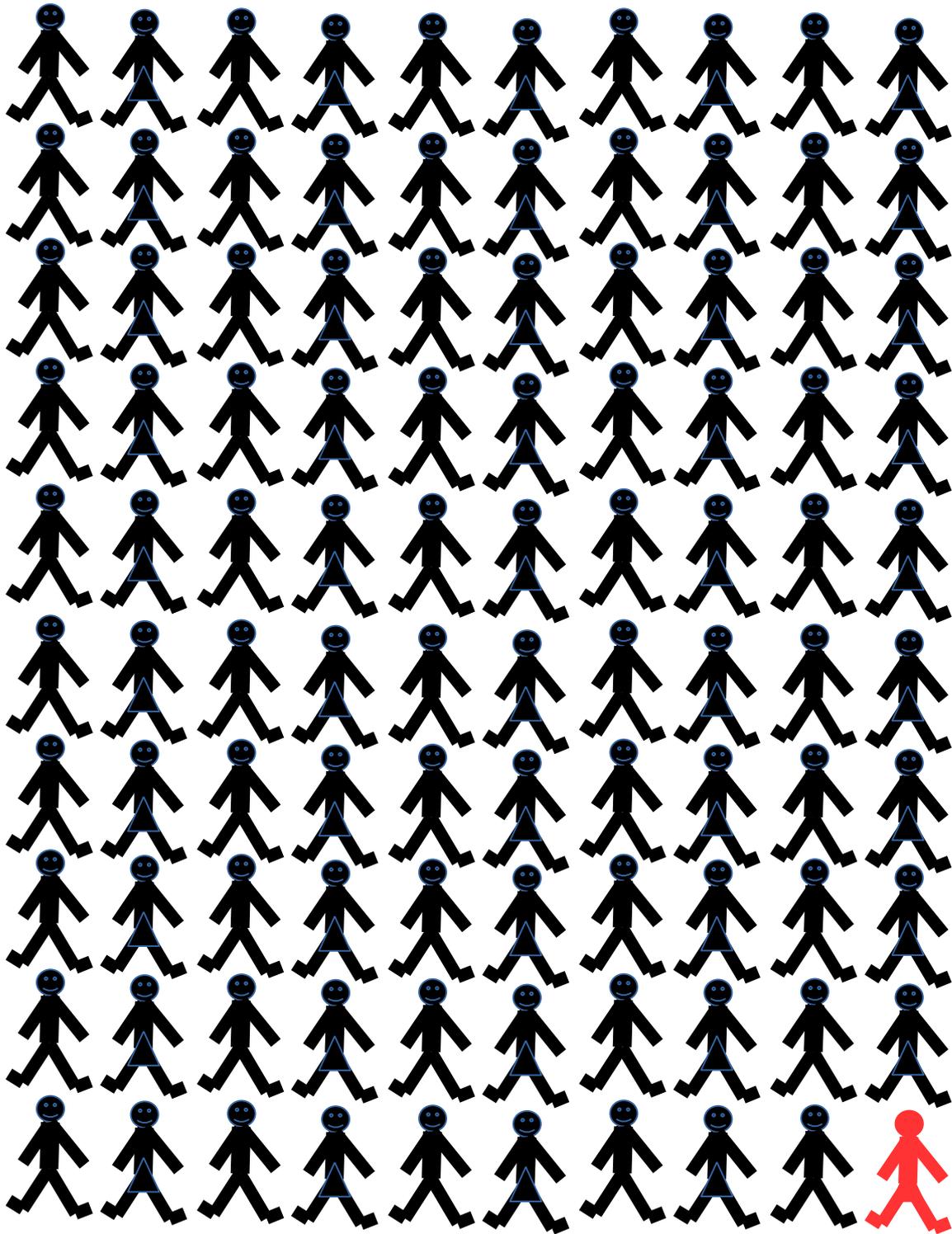
1) Il rapporto fra Energia Netta ed Energia Prodotta ( $E_R$ ) ci da la percentuale di energia prodotta che è effettivamente usabile dalla società (o dall'organismo in esame).

2) Generalmente l'EROEI di una fonte energetica non rinnovabile decresce nel tempo.

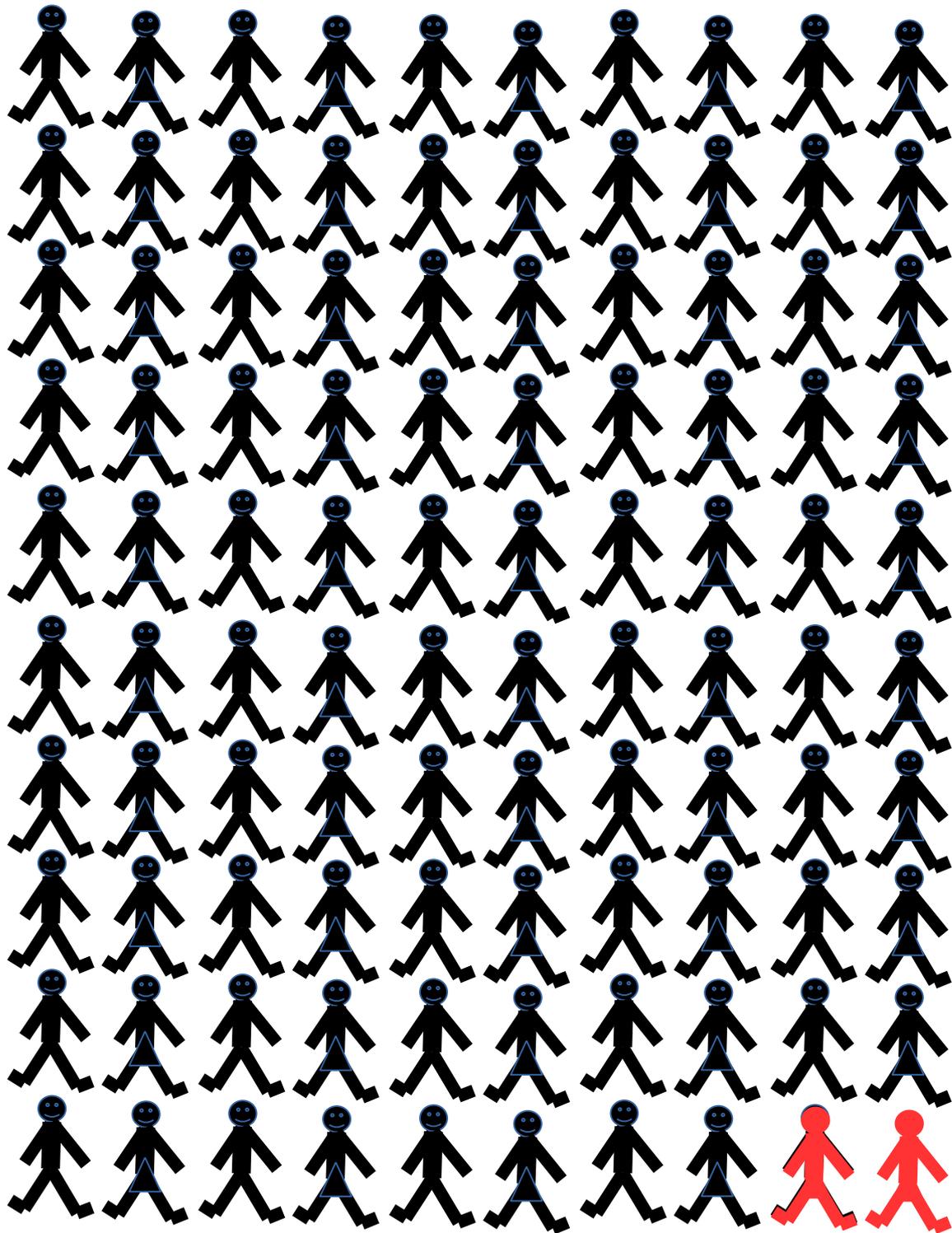
3) Quando l'EROEI è uguale all'unità la fonte energetica cessa di essere tale perché il costo energetico è uguale al guadagno energetico.

Lo stesso concetto può essere visto in un modo leggermente diverso. Possiamo vedere il vincolo posto allo sviluppo dell'economia in una società dal valore dell'Energia Netta come il numero di persone che, nella data società, si devono occupare di produrre energia. In una società con un EROEI di 100, una sola persona su 100 si dedica alla produzione di energia per gli altri 99 i quali possono svolgere altre attività discrezionali, da quelle amministrative a quelle culturali, artistiche e di ricerca scientifica o sviluppo tecnologico. La situazione non varia molto fino al momento in cui le persone che producono energia sono al di sotto delle 10 su 100. Quando questo numero cresce il surplus energetico sociale si riduce rapidamente e sempre più persone si devono dedicare alle funzioni basilari che assicurano l'energia. Quando l'EROEI è uguale all'unità tutta la società è impegnata nel procurarsi energia che, necessariamente, sarà energia alimentare. La società è quindi nelle condizioni del predatore singolo come il ghepardo.

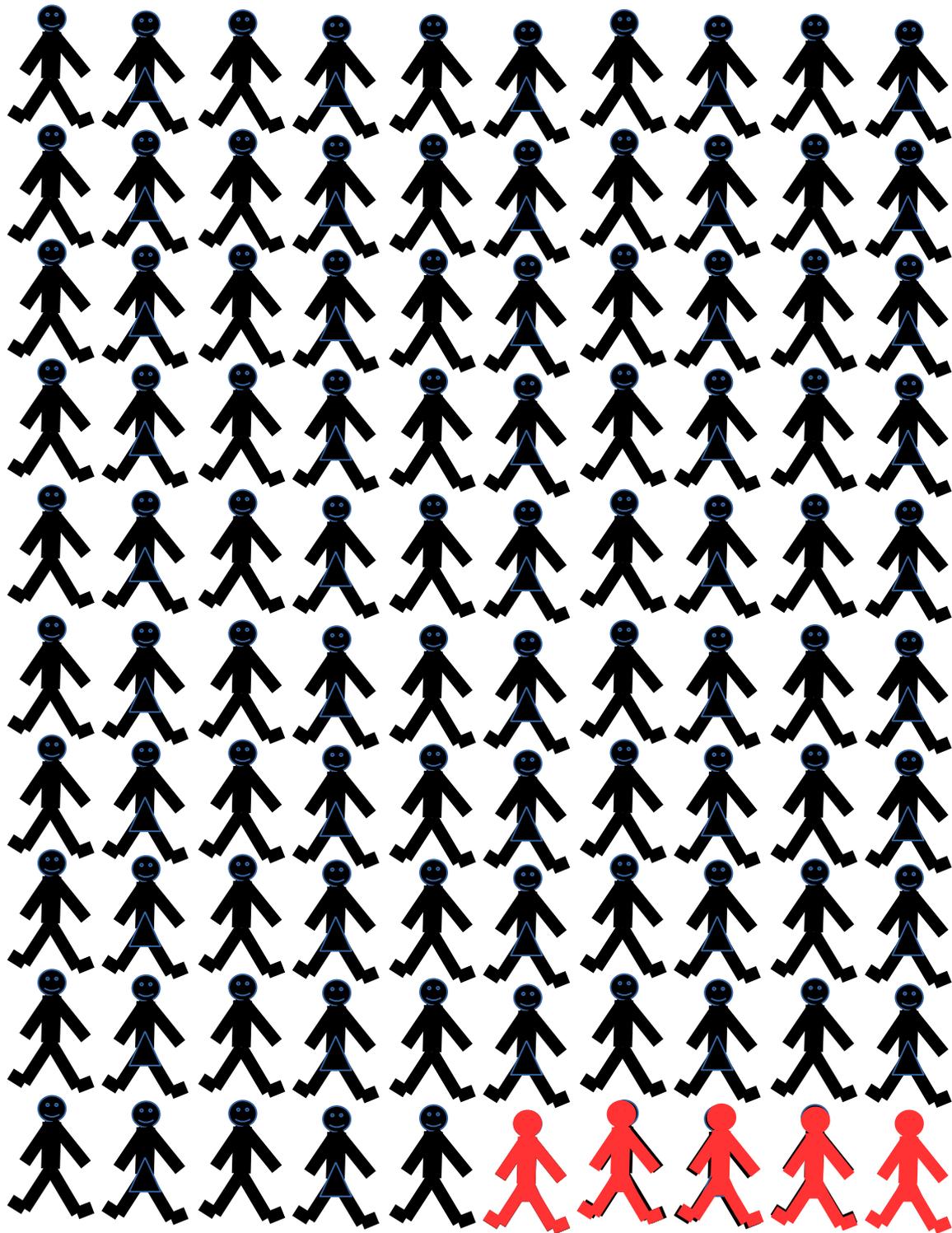
La realtà delle società costituite nella sua storia da Homo sapiens è sempre basata su EROEI considerevolmente superiori ad 1 e spesso anche superiori a 10. Si stima che le società di cacciatori raccoglitori abbiano un EROEI sociale di almeno 10 (Energia Netta 90%) il che permette loro di dedicare un tempo limitato al procacciamento di cibo e lascia molto tempo ad attività di socializzazione.



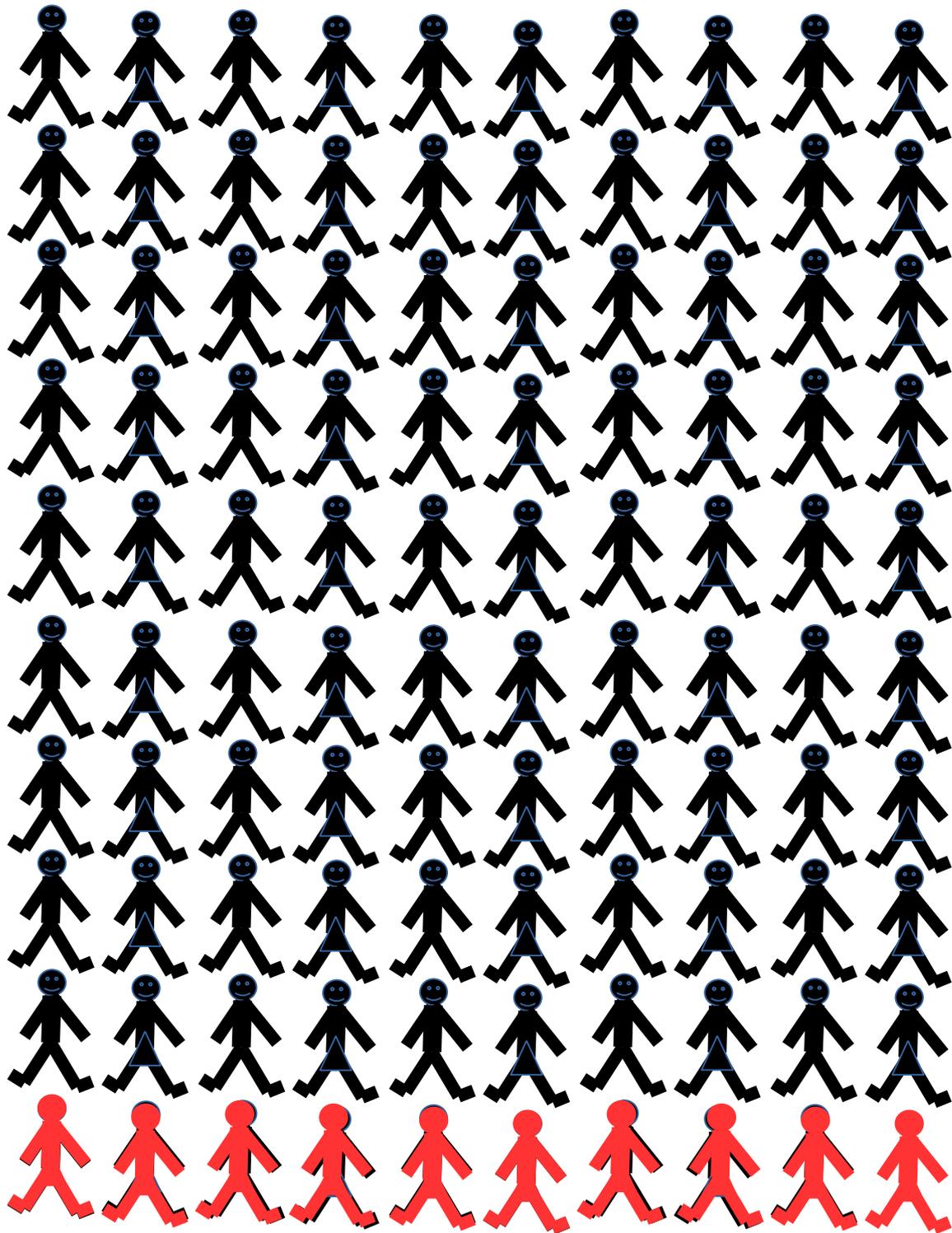
EROEI  
100



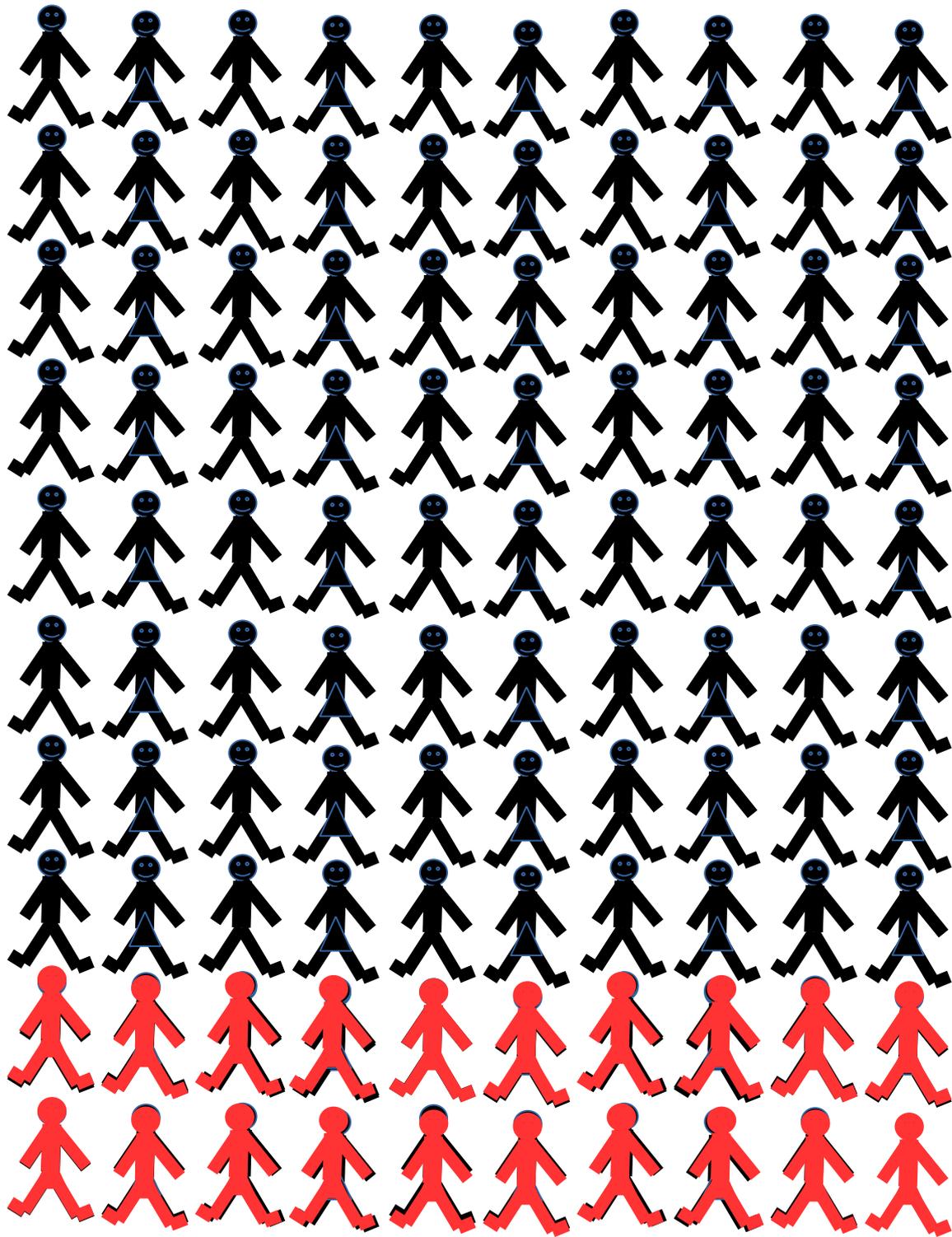
EROEI  
50



EROEI  
20

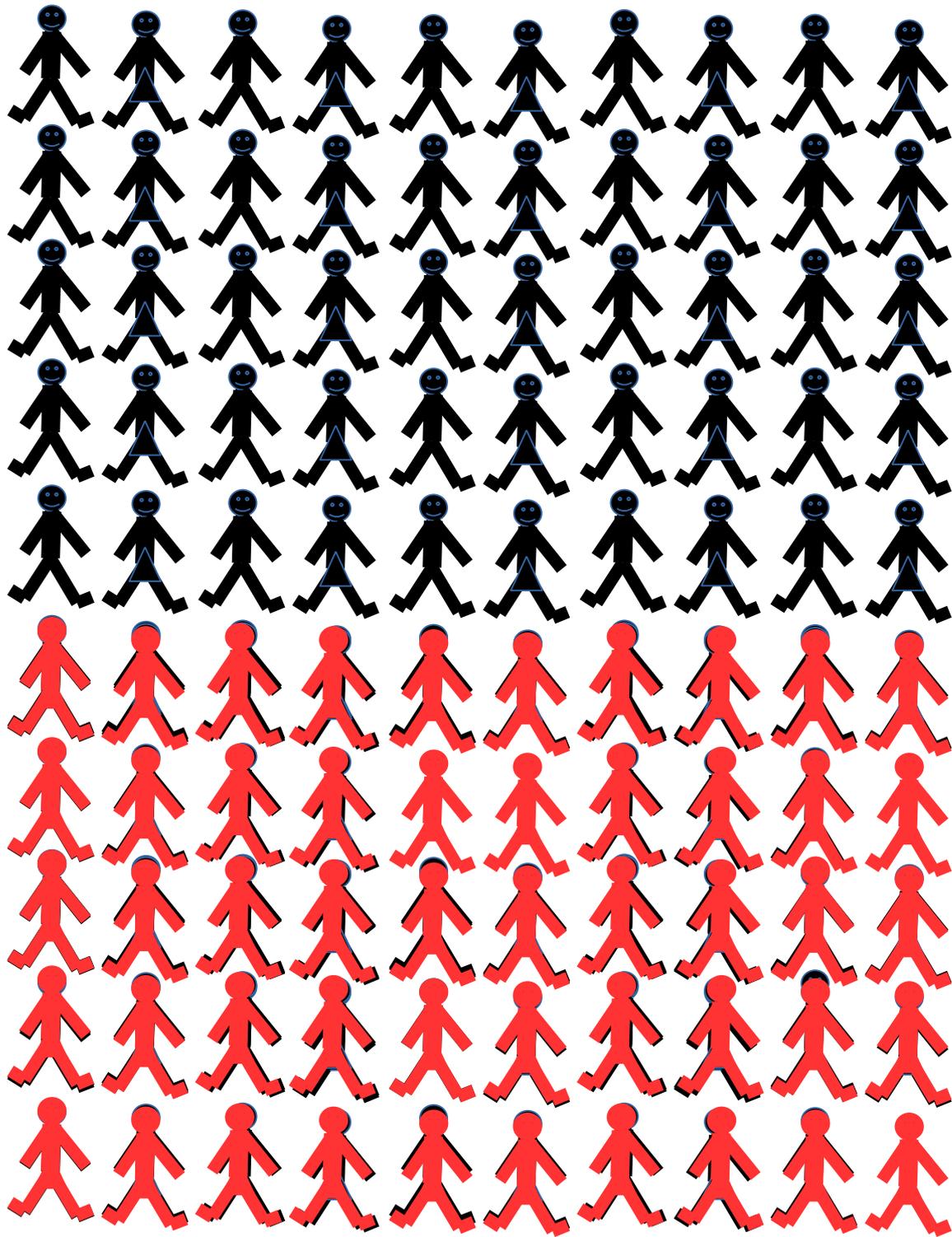


EROEI  
10

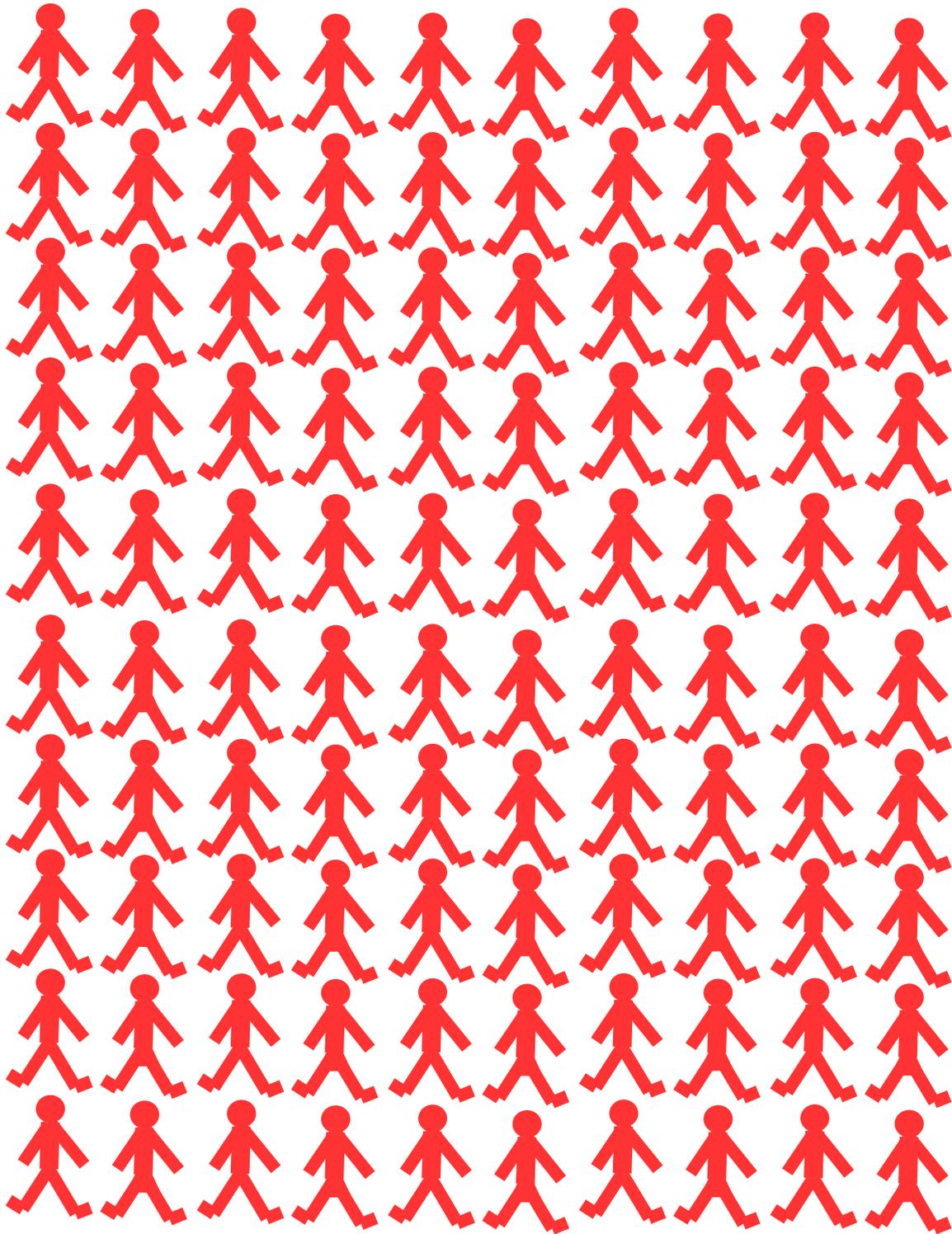


EROEI

5



EROEI  
2



**EROEI**

**1**

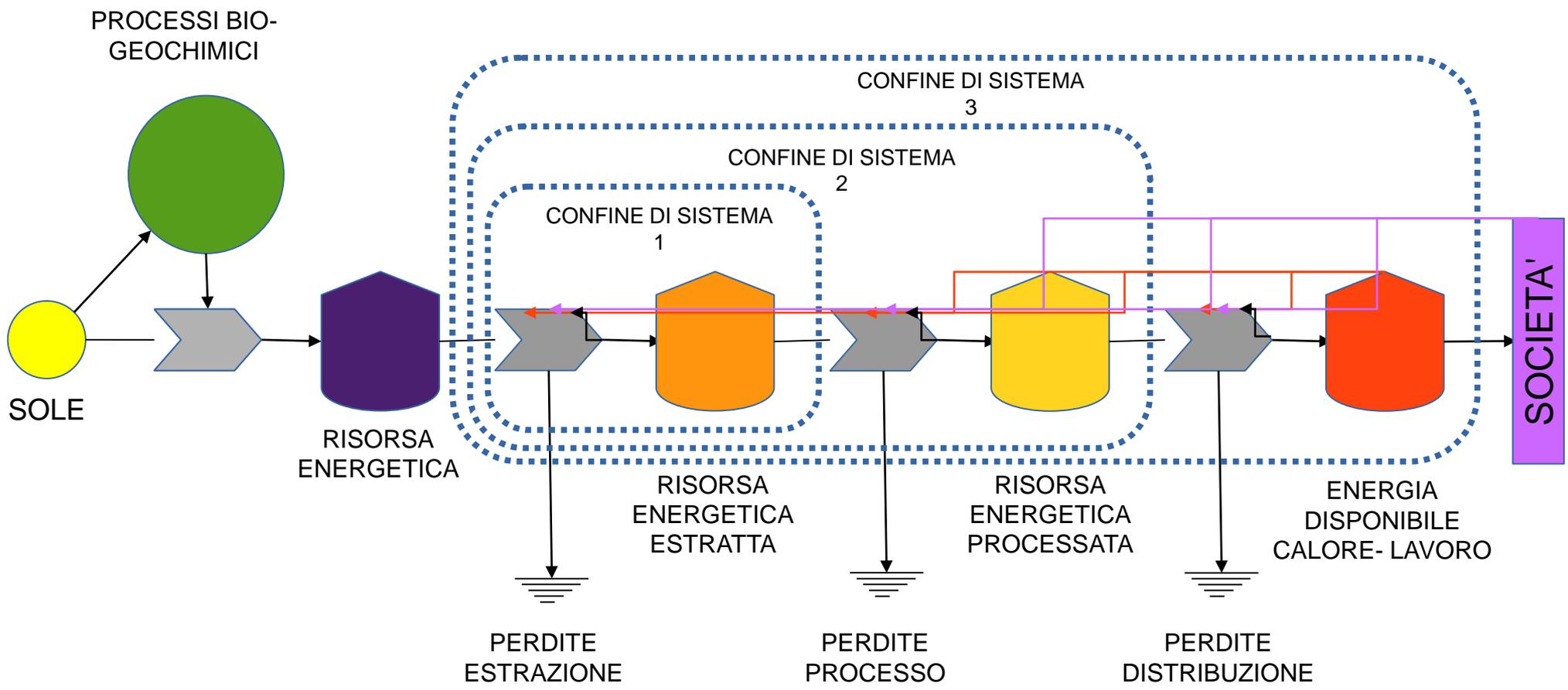
# Come si determina l'EROEI di una fonte energetica.

L'EROEI e l'Energia Netta sono probabilmente i criteri migliori per la stima della qualità e della convenienza sociale ed economica di una fonte energetica. Tuttavia il calcolo dell'EROEI è lungi dall'essere una procedura facile e sulla quale si trova un generale accordo. Per calcolare l'EROEI di una fonte si dovrebbe prima stimare (o misurare) tutti i costi energetici di quella fonte. Ad esempio per stimare l'EROEI del gas naturale nella produzione di energia elettrica per mezzo di una centrale termoelettrica si dovrebbe stimare i costi energetici di ognuno dei seguenti passaggi: 1) ricerca dei giacimenti di gas 2) estrazione del gas 3) separazione del gas da altre componenti (ad esempio i giacimenti di gas contengono altri gas di interesse commerciale come l'elio che conviene separare dal metano) 4) trasporto (il gas può essere trasportato via tubo o via navi gasiere e nei due casi i costi sono diversi e vanno stimati per l'intero ciclo di vita del gasdotto o della flotta di navi gasiere) 5) costi di costruzione della centrale 6) costi di gestione e manutenzione della centrale 7) costo di smantellamento della centrale a fine vita. Ognuno di queste componenti può avere dei costi energetici nascosti e altri imprevisti. Inoltre non è sempre semplice stabilire a che punto fermarsi nella stima dei costi. Si deve stimare il costo energetico delle trivelle che sono servite ad estrarre il gas, o anche sommare il costo energetico per l'estrazione del ferro e la sua trasformazione in acciaio usato per costruire le componenti dei macchinari, incluse le trivelle, usati sul campo? E come si divide il contributo della trivella nel tempo? A causa della complessità del problema spesso l'EROEI, che è e rimane un concetto utile, viene utilizzato per promuovere una fonte rispetto ad un'altra omettendo dei costi e/o stimandone generosamente la produttività. Quello di cui ci sarebbe bisogno è un organismo internazionale sopra le parti che si occupi di queste stime. Ma con le varie agenzie che si occupano di energia, a cominciare dall'IEA (International Energy Agency), siamo bel lontani da questo fine. Tale agenzia infatti è un'agenzia intergovernativa inevitabilmente soggetta a pressioni politiche le quali sono determinata a loro volta da lobby che rappresentano interessi particolari. Alcuni dei principi cardine per la stima dell'EROEI delle fonti sono stati messi nero su bianco in alcuni articoli scientifici. Fra questi quello citato nella prossima pagina.

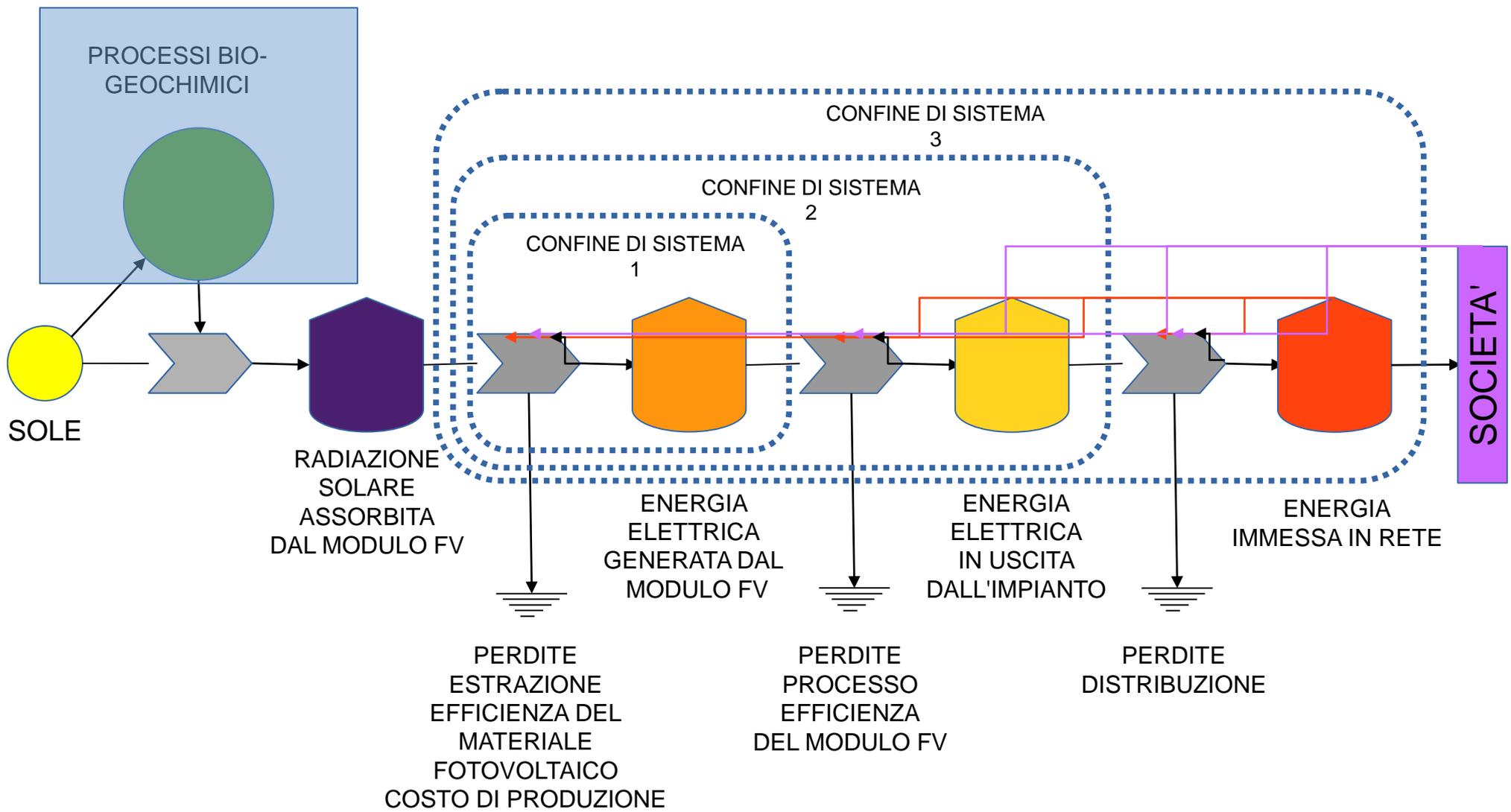
# I confini di sistema.

Una tecnologia di produzione di energia è individuata da un sistema che sfrutta una certa fonte energetica presente in natura (fonte primaria). Tale sistema può in genere essere suddiviso schematicamente in una serie di sottosistemi che, come mostrato nelle figure che seguono, sono individuati da dei confini di dimensioni e contenuto crescenti. Fatta eccezione per il nucleare ed il geotermico, l'origine delle fonti è sempre il sole. Nel caso delle fonti fossili l'energia solare è passata attraverso una serie di processi bio-geo-chimici che hanno trasformato la materia organica contenuta nei sedimenti in idrocarburi o carbone. Questi processi bio-geo-chimici non hanno per l'uomo costi energetici. Il giacimento così costituito deve essere trovato, valutato e messo in produzione attraverso le tecniche estrattive.

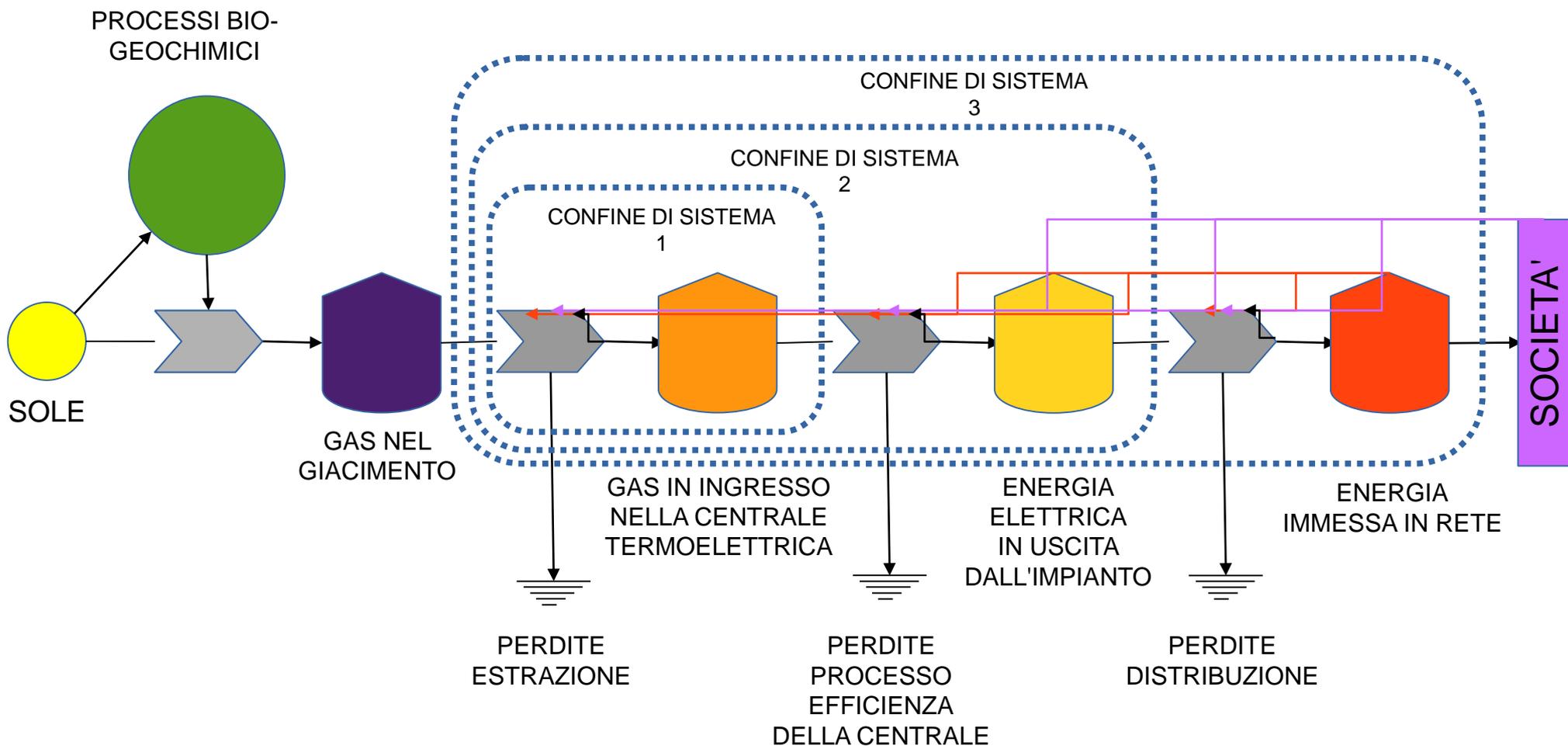
Il primo confine di sistema per una fonte fossile è dunque quello relativo all'estrazione dal sottosuolo. Questa componente dei costi (confine 1) include ovviamente anche i costi relativi a ricerca e sviluppo e, insieme alla vera e propria estrazione, costituisce il cosiddetto *upstream* dell'attività mineraria delle compagnie petrolifere e del carbone. Questa componente definisce l'EROEI a bocca di pozzo o bocca di miniera. Il confine susseguente include i costi energetici di processo cioè tutte le operazioni che rendono utilizzabile la fonte per scopi specifici: la raffinazione dei prodotti petroliferi, la depurazione del gas, la separazione del carbone dalla parte inorganica del materiale estratto dal giacimento (confine 2). Il terzo confine include le operazioni di distribuzione della materia prima (confine 3). Al termine del processo descritto nel diagramma di flusso della prossima pagina si ha un EROEI che include i costi spesi dai produttori di energia a monte degli usi sociali. Questi costi sono rappresentati dalle perdite di ciascun passaggio e dai flussi di energia dalle fasi successive del flusso totale rappresentate dalle frecce colorate che rientrano nel diagramma di flusso dalla parte superiore.



CONFINI INTERNI AL SISTEMA DI PRODUZIONE DELL'ENERGIA PER IL CALCOLO DELL'EROEI DI UNA FONTE.



ESEMPIO FOTOVOLTAICO.



ESEMPIO CENTRALE A TURBOGAS

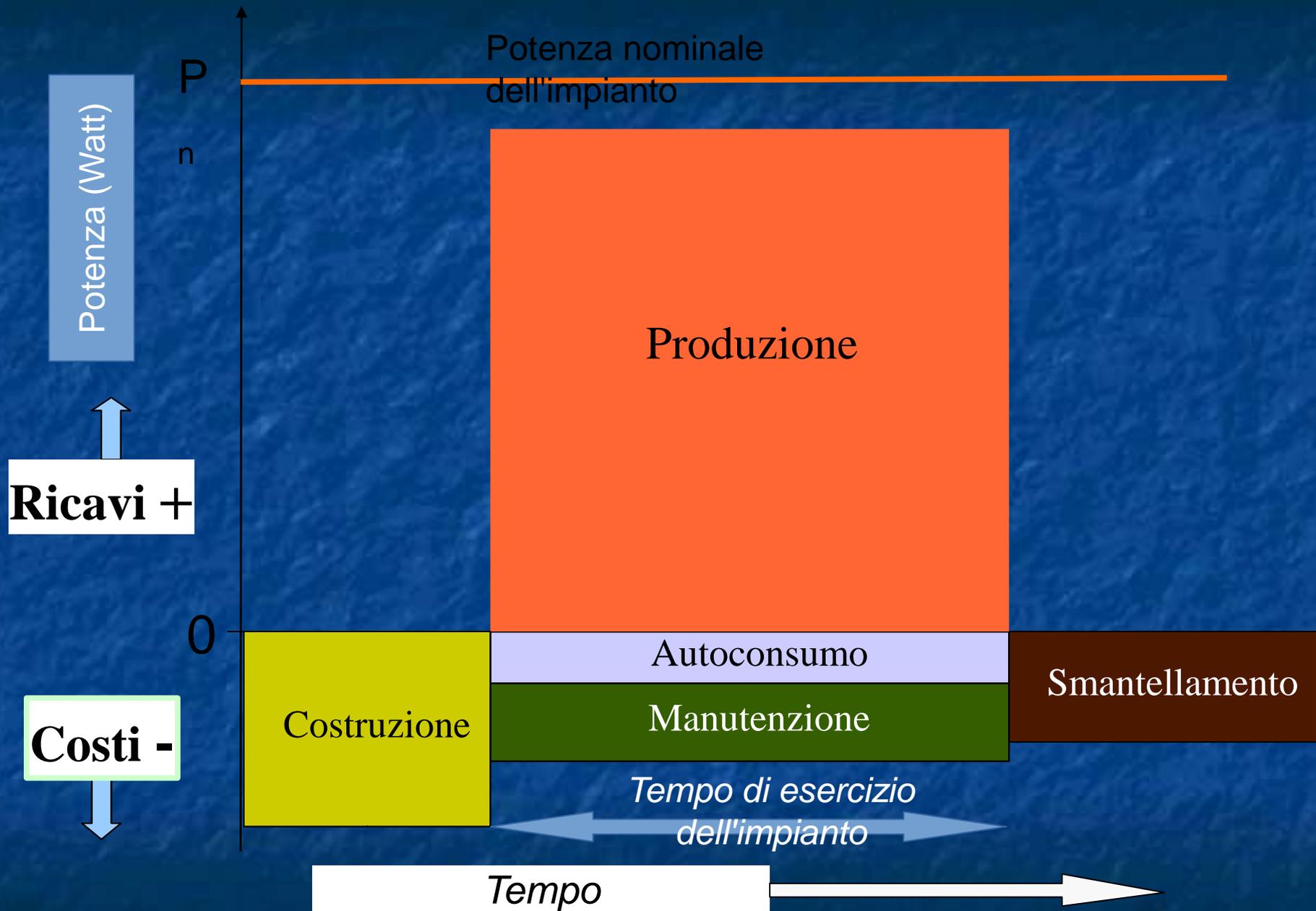
# Il ciclo di vita di un impianto. LCA (Life Cycle Analysis)

Una tecnologia di produzione di energia è costituita da impianti di cui è possibile analizzare il ciclo di vita. Il ciclo di vita, a sua volta, è definito come il tempo che intercorre fra l'inizio della progettazione dell'impianto fino al suo smantellamento. Le fasi principali sono la fase di costruzione, quella di esercizio e quella di smantellamento (decommissioning).

Il processo è schematizzato nella figura che segue. In un diagramma cartesiano in cui si riporta l'energia spesa o prodotta nell'unità di tempo (ad esempio semplicemente la potenza consumata o erogata in Joule/secondo) nelle varie fasi, si individuano i costi ed i ricavi. I ricavi sono semplicemente le quantità di energia erogate dall'impianto nel periodo in cui è in esercizio. I costi sono rappresentati da quelli di costruzione, di manutenzione, di autoconsumo e, infine, di smantellamento. Il rapporto dell'energia prodotta con la somma dei costi ci fornisce l'EROEI dell'impianto. L'energia prodotta è, nel caso semplificato della figura di pag 31, semplicemente il prodotto della potenza per il tempo di esercizio dell'impianto.

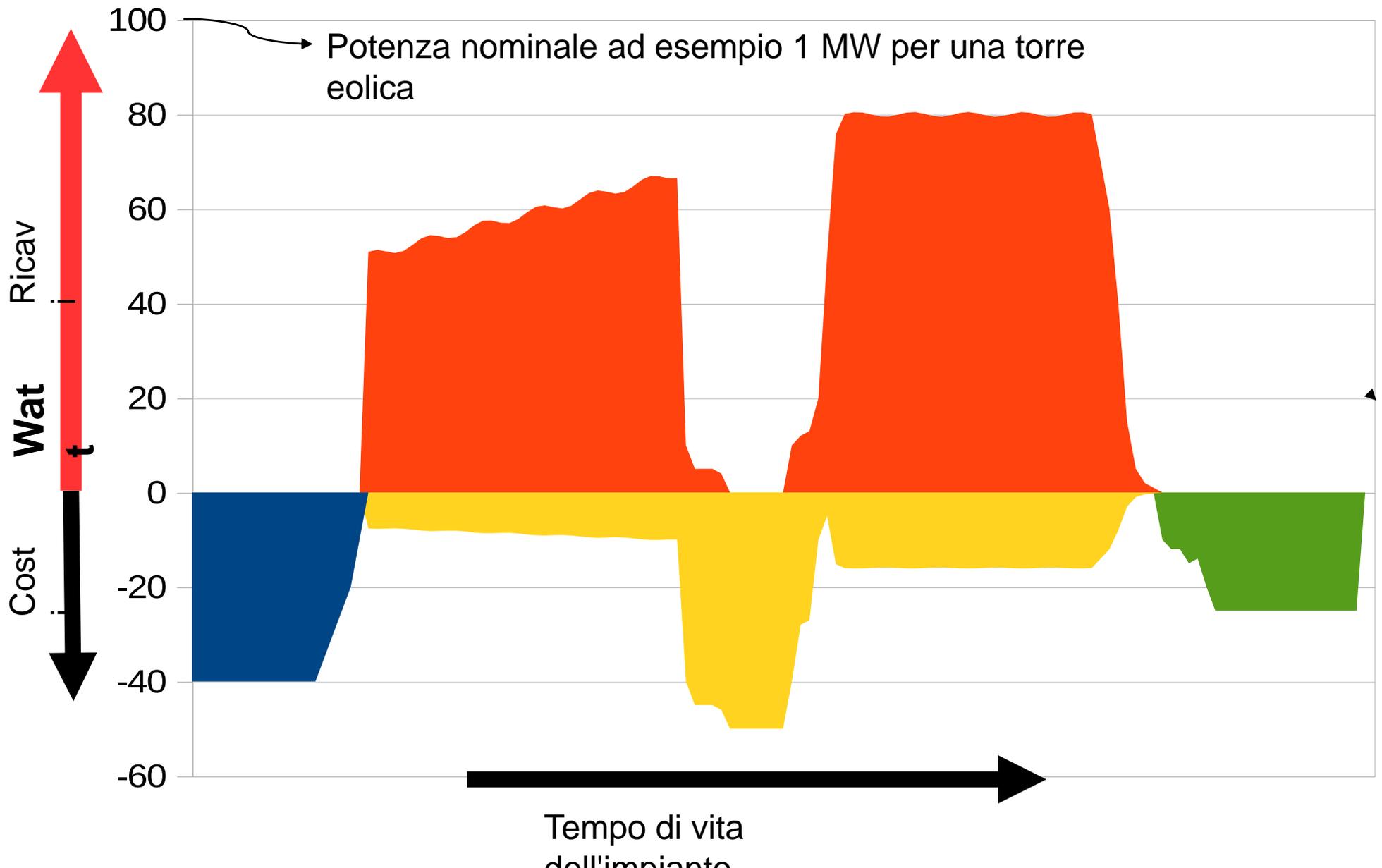
Nella figura di pag 31 abbiamo schematizzato un caso più aderente alla realtà. I costi di costruzione hanno una dinamica più complessa di quella schematizzata precedentemente con una graduale discesa verso il momento in l'impianto viene fatto partire. La produzione nel periodo di esercizio non è costante e prossima al valore nominale, ma piuttosto oscillante e variabile ed eventualmente influenzata da possibili guasti ed incidenti che in una data fase possono portare la produzione a zero e moltiplicare i costi di manutenzione (cfr le aree colorate in rosso e in giallo che sono relative alla produzione ed alla manutenzione rispettivamente)

# Ritorno energetico sull'energia investita



$$\text{Ritorno energetico} = \text{ricavi} / \text{costi}$$

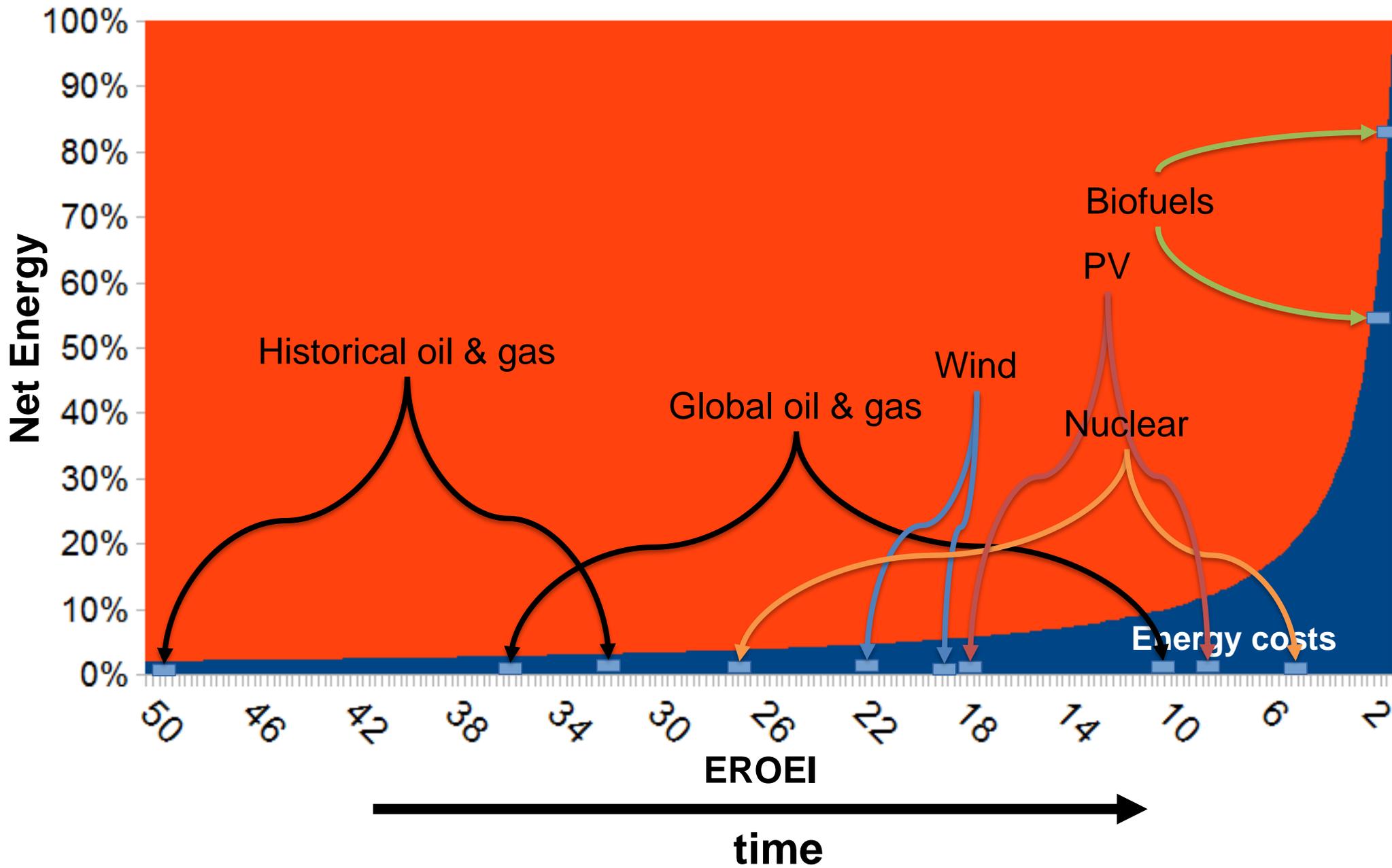
# Ciclo di vita di un impianto di produzione di energia



# EROEI di diverse fonti energetiche

Pur con le difficoltà accennate si possono fare confronti fra diverse fonti in modo da stilare una specie di classifica delle stesse. L'EROEI deve necessariamente essere indicato da una forbice e si deve sempre diffidare di valori molto stretti dell'EROEI di una fonte e anche di valori estremamente alti od ottimistici. Spesso quando si ottengono valori molto superiori a qualche decina si sono sottovalutati i costi e sopravvalutati i ricavi energetici dell'intero processo.

Il dato che comunque resta costante è che l'EROEI a bocca di pozzo (o di miniera per il carbone) dei combustibili fossili è in costante, anche se irregolare, declino dall'inizio della storia estrattiva di queste fonti energetiche. E non può che essere così dato che tali risorse sono generalmente estratte iniziando a sfruttare i giacimenti più facili e redditizi per poi passare a giacimenti più problematici e meno redditizi. Una regola che conosciamo come regola del "Prima i frutti più bassi". La regola si avvale della metafora del raccoglitore di frutti che per prima cosa raccoglie i frutti dai rami bassi dell'albero e poi si dedica (se ne ha bisogno e lo ritiene utile) a raccogliere quelli dei rami alti e meno accessibili.



# EROEI. Il caso del petrolio e del gas

N.B. l'acronimo EROI (Energy Return on Investment) ha lo stesso significato di EROEI.

Lo schema di suddivisione del sistema di produzione di energia basato sugli idrocarburi è rappresentato nella prossima pagina. La suddivisione porta alla definizione di quattro diversi EROEI. Quello a bocca di pozzo, definito qui standard,  $EROEI_{ST}$ , è quello che viene spesso riportato come EROEI tout court per il petrolio ed il gas.

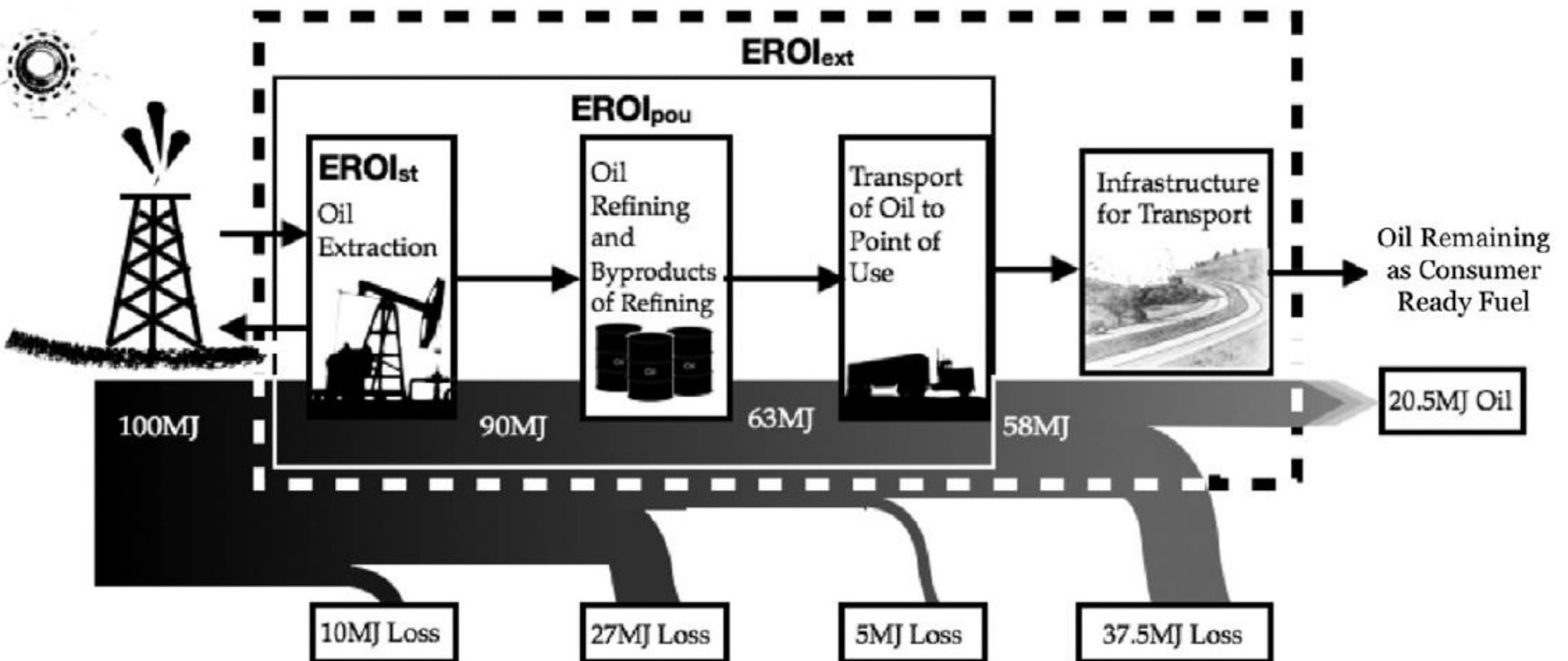
L'andamento storico dell'EROEI di petrolio e gas negli USA, dove le informazioni sulla geologia e l'ingegneria dei pozzi sono molto dettagliate e, dunque, questo genere di calcoli sono più abordabili e rigorosi, mostra una tendenza pluridecennale al declino dell'EROEI relativo all'estrazione della materia prima e un vero e proprio crollo secolare dell'EROEI relativo alle scoperte. Quest'ultimo può essere semplicemente definito come il rapporto fra il numero di barili di petrolio scoperti e il numero di equivalenti di barili di petrolio spesi in ricerca e prospezione geologica. Nella figura di pag 36 sono riportati l'evoluzione storica dell'EROEI della produzione (scala di destra, in blu) e quello delle scoperte (scala di sinistra, in rosso). Nella pagina 37 l'EROEI delle scoperte viene ripetuto assieme al dettaglio riguardante l'andamento dopo il 1950 (riquadro). A pagina 38 i dati dell'EROEI della produzione sono sovrapposti a quelli dell'intensità di trivellazione per gli anni indicati (numero di pozzi trivellati nell'anno, o metri trivellati nell'anno). Come si vede l'aumento del numero di trivellazioni dopo la fine degli anni '50 porta ad una logica riduzione dell'EROEI. Lo sforzo di ricerca ed estrazione aumenta infatti i costi energetici dell'impresa estrattiva. (I dati sono presi da Charles Hall. 2013)

**EROI standard:**  $EROI_{ST}$  quello convenzionale alla testa del pozzo (wellhead), a bocca di miniera (Mine's mouth) o al cancello della fattoria (Farm's gate, per i biofuels).

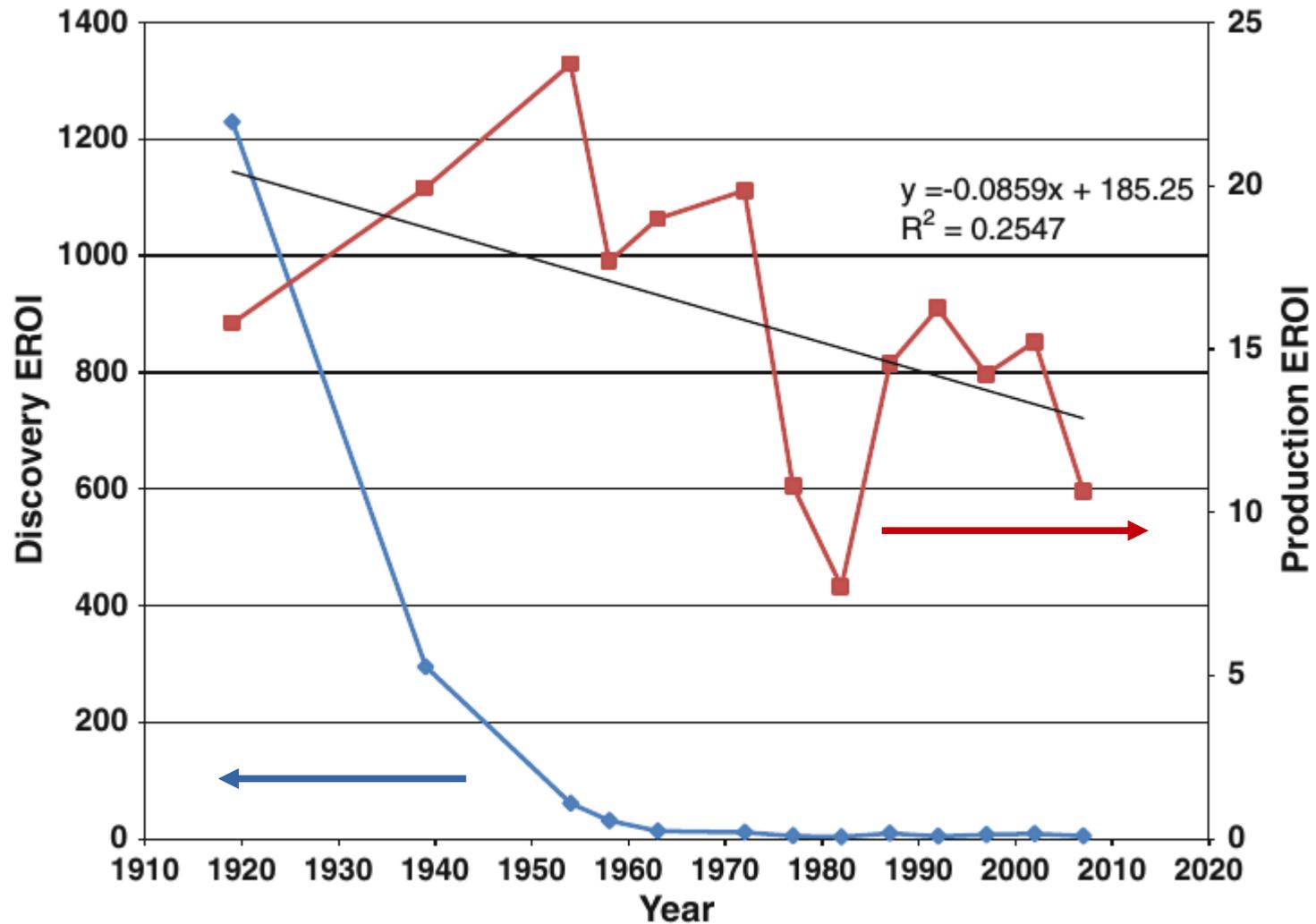
**EROI al punto di utilizzo** (point o fuse):  $EROI_{POU} = EROI_{ST} +$  i costi di raffinazione e separazione dei sottoprodotti (bitume, elastomeri).

**EROI esteso:**  $EROI_{EXT} = EROI_{POU} +$  infrastrutture necessarie per portare il prodotto raffinato al consumatore.

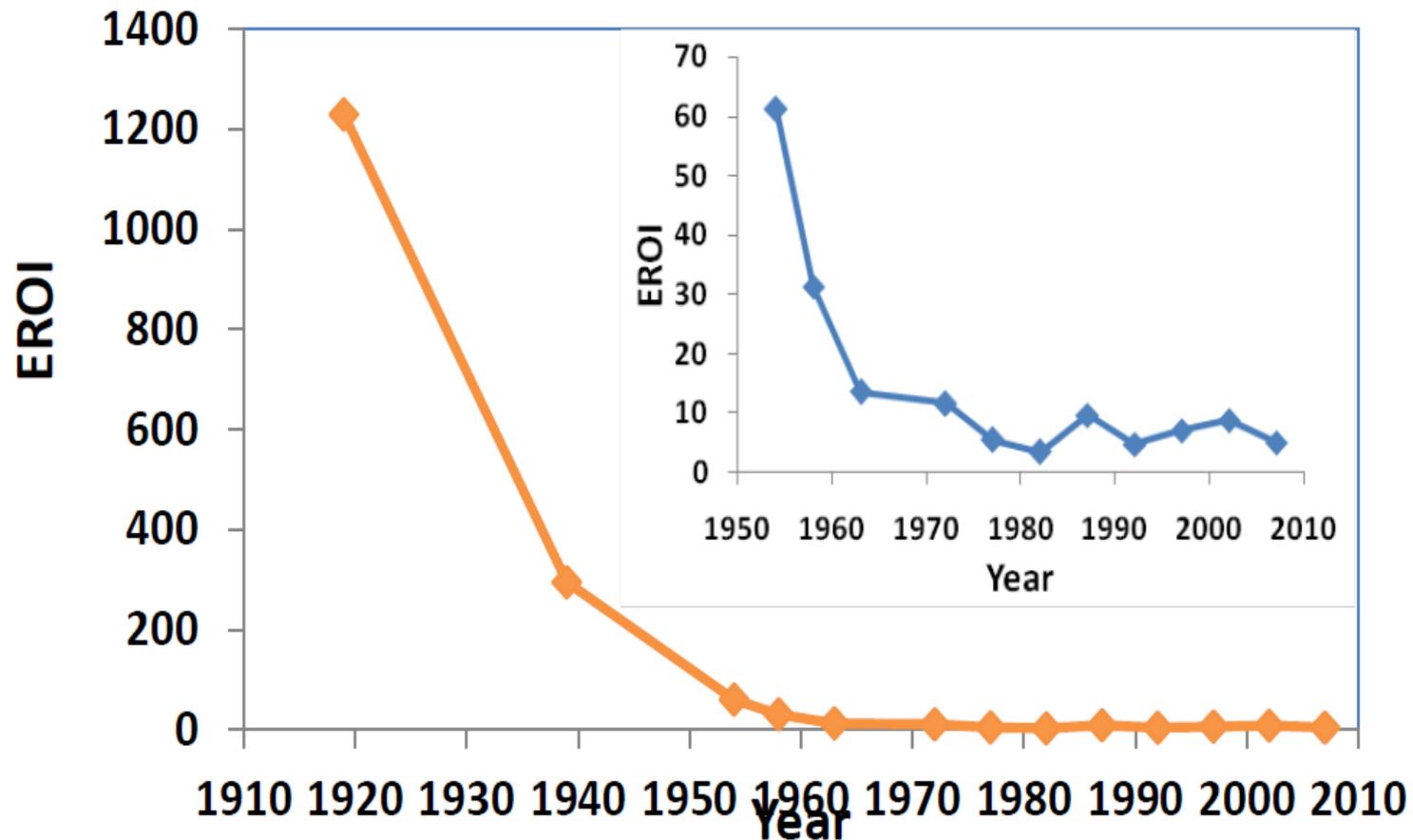
**EROI sociale:**  $EROI_{SOC}$  è quello che include tutti gli altri costi intercorsi prima dell'uso sociale dell'energia contenuta nei prodotti petroliferi.



# Storia dell'EROEI relativo alla scoperta e alla produzione di petrolio e gas negli Stati Uniti d'America.



**Figure 1.** EROI for discoveries for the U.S. Oil and Gas Industry. The inset is the same data plotted on a different scale.



Energy Policy 64 (2014) 153–167



Contents lists available at [ScienceDirect](http://ScienceDirect)

Energy Policy

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/enpol](http://www.elsevier.com/locate/enpol)

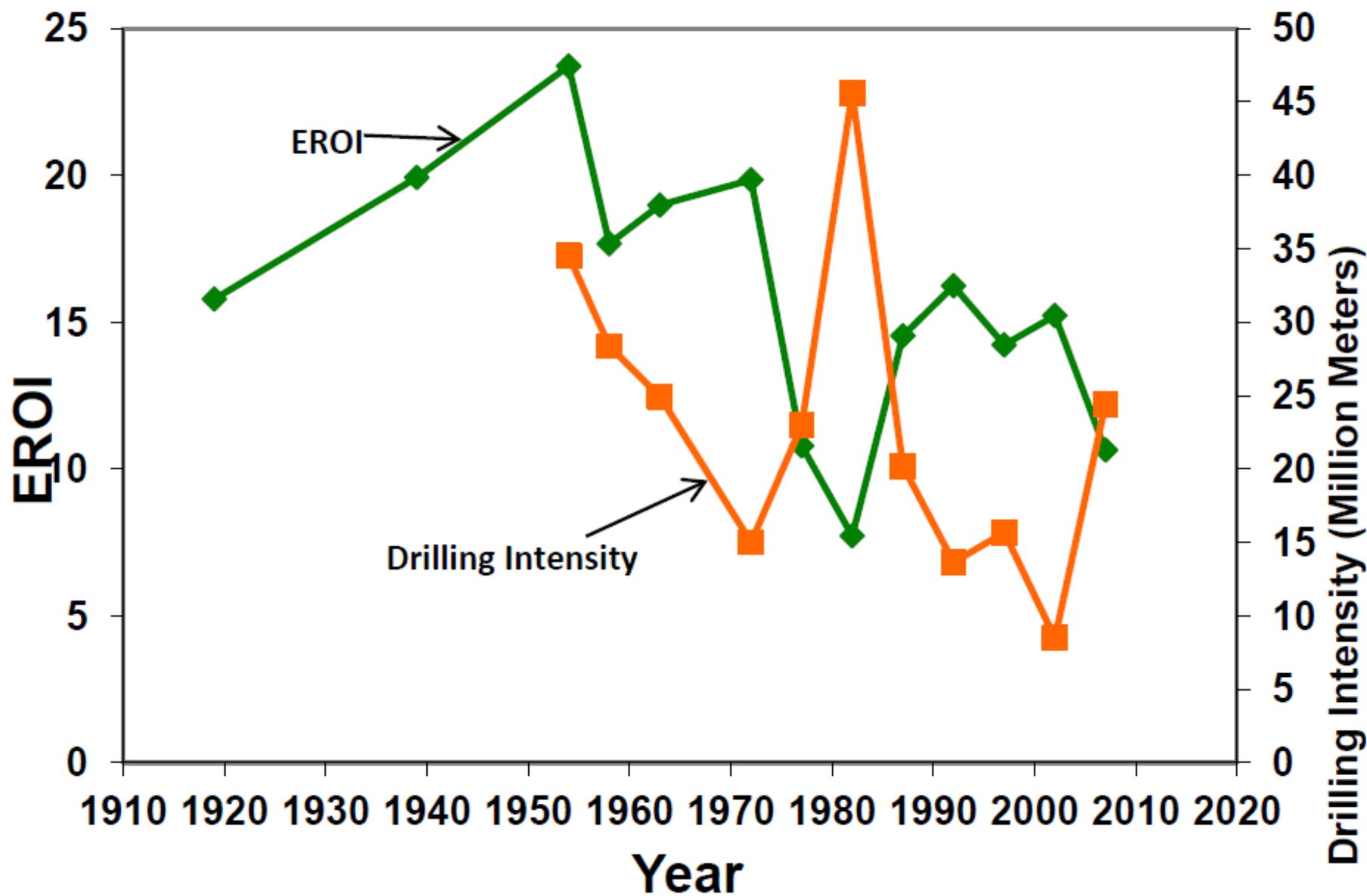


Energy, EROI and quality of life <sup>☆</sup>

Jessica G. Lambert\*, Charles A.S. Hall, Stephen Balogh, Ajay Gupta, Michelle Arnold



**Figure 3.** EROI and drilling intensity for same year. Note inverse relation, especially after 1957 between drilling rate and EROI. Increased drilling does not necessarily generate more oil produced because the EROI decreases with high drilling efforts after 1958.



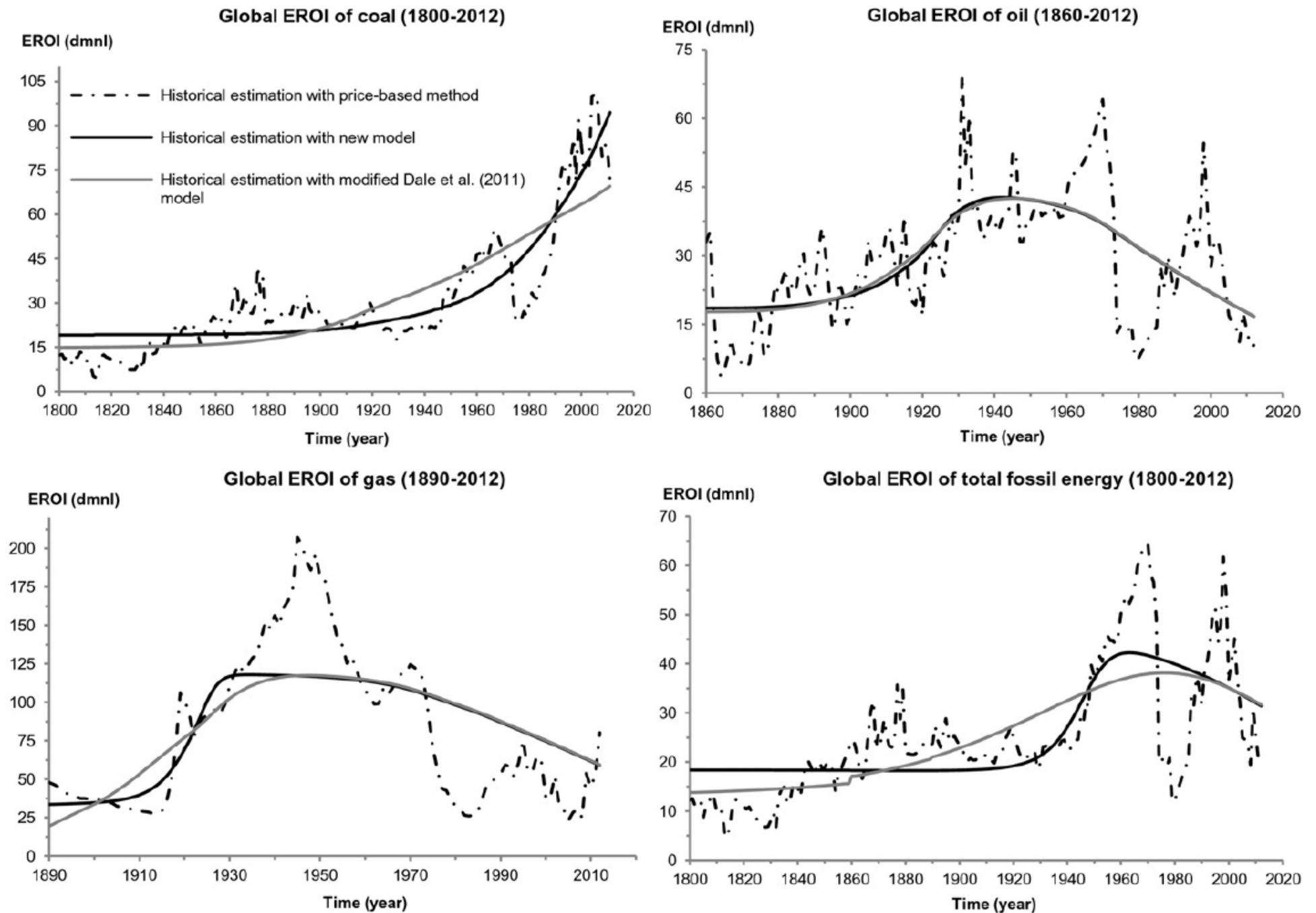
# EROI delle fonti fossili stimato in base al prezzo di mercato della fonte.

$$EROI_i = \frac{MROI_i}{(P_i * EI_i)}$$

*MROI = Monetary Return On Investment*  $i = \text{coal, oil \& gas}$

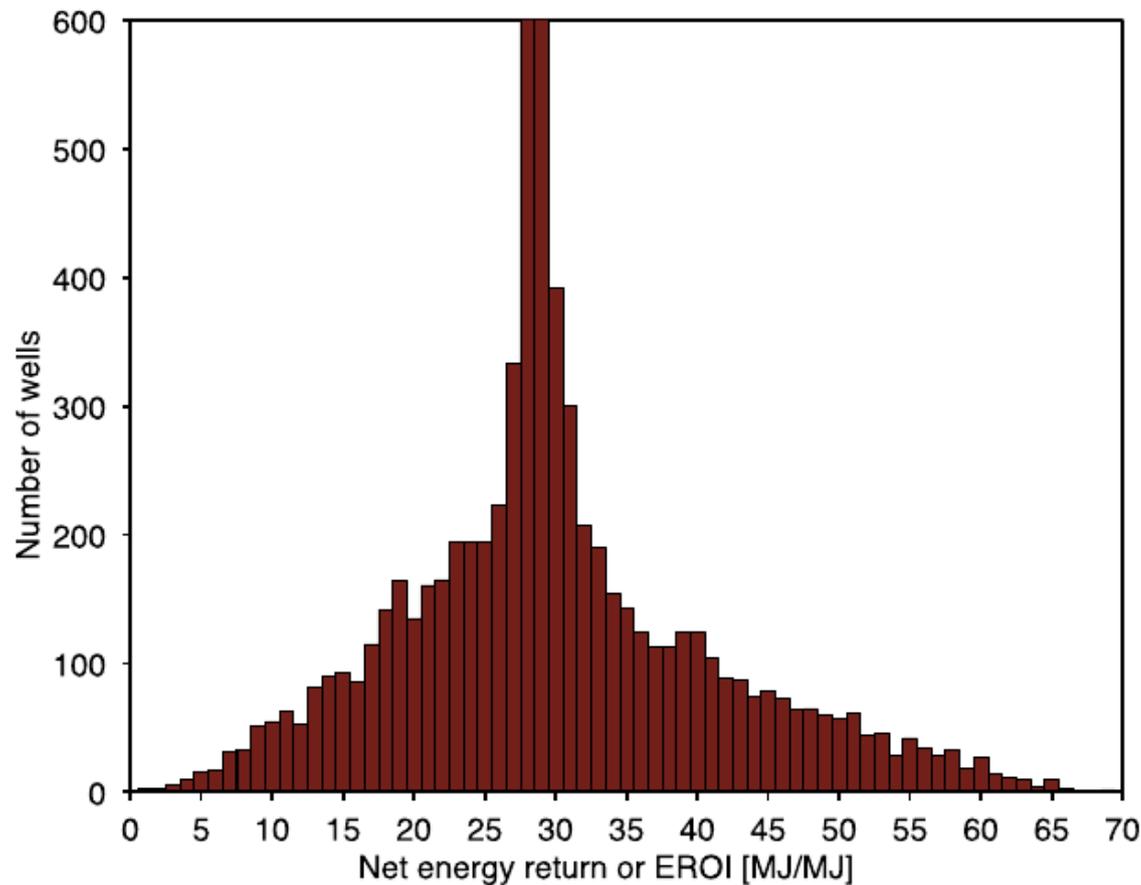
*EI = Energy Intensity. MJ/\$1990*

International Geary- Khamis 1990  
dollar



**Fig. 9.** Historical estimates of the global EROI of coal, oil, gas, and all fossil fuels with the price-based methodology and the two theoretical models.

Un esempio di stima dell'EROEI con un approccio Bottom-Up. Cioè dall'analisi ingegneristica pozzo per pozzo di una regione petrolifera. Il caso dello shale-oil del Bakken (ND).



**Fig. 1.** Distribution of net energy return from all analyzed Bakken wells.

# Un metodo diverso di calcolare l'EROI delle compagnie petrolifere

Nota dalle statistiche economiche e dai bilanci della aziende

$$EROI_{inc} = \frac{\textit{Produzione totale}}{\textit{Consumo energetico}} = \frac{[CO_2]_{prd}}{[CO_2]_{cns}}$$

Dato difficile da reperire. Noi assumiamo che sia indirettamente indicato dalle emissioni di CO2 dichiarate dalle aziende (tutte, quindi anche quelle produttrici di energia) nei Sustainability Reports che sono rapporti annuali che le aziende sono consigliate di redigere anche se non sono ancora obbligatori.

***BioPhysical Economics and Resource Quality*** (2018) 3:15

<https://doi.org/10.1007/s41247-018-0048-1>

**A New Approach to Calculating the “Corporate” EROI**

Luciano Celi · Claudio Della Volpe · Luca Pardi · Stefano

company [sigla]	EROI-2014	EROI-2015	EROI-2016	EROI-2017	EROI-2018
01. Saudi Aramco [SA]	8,68	33,40	28,53	32,22	42,25
02. Sinopec [SI]	9,00	11,18	8,08	7,00	37,20
03. CNPC/Petrochina [CNPC]	10,44	7,36	6,21	6,15	5,24
04. Exxon [EX]	16,09	7,59	5,16	5,16	4,82
05. Shell [SH]	9,84	7,75	8,24	7,89	8,20
06. Kuwait PC [KPC]	12,36	19,86	21,95	28,17	26,20
07. British Petroleum [BP]	12,21	11,23	10,36	11,21	12,02
08. Total SA [TOT]	15,14	10,81	7,56	8,07	10,49
09. Lukoil [LO]	8,88	12,06	11,05	11,62	12,06
10. ENI [ENI]	10,31	10,43	6,90	6,72	6,72
11. Valero [VA]	16,57	14,23	13,99	14,33	14,33
12. Petrobras [PBR]	12,68	5,65	6,60	6,50	6,70
13. Chevron [CH]	11,28	9,70	6,91	6,74	7,73
14. PDVSA [PDVSA]	11,19	14,09	15,14	10,85	10,01
15. Pemex [PX]	6,87	7,88	8,26	11,13	10,89
16. NIOC Iran [NIOC]	7,94	4,22	4,36	15,46	13,32
17. Gazprom [GP]	11,90	11,65	13,63	13,05	12,31
18. Petronas [PT]	6,03	7,74	7,41	6,82	7,53
19. CNOOC [CNOOC]	25,27	26,70	28,88	25,88	27,36
20. Marathon [MT]	14,83	11,38	7,80	14,70	14,56
21. PTT [PTT]	10,43	14,12	11,89	11,17	13,68
22. Rosneft [RN]	9,88	21,14	21,80	18,25	18,24
23. JX Holdings [JXH]	9,11	2,68	1,06	3,28	0,19
24. Equinor (Statoil) [EQ]	33,24	30,02	29,99	31,78	32,23
25. Indian OC [IOC]	10,71	3,70	15,01	12,97	13,71
26. Sonatrach [ST]	3,84	2,94	1,15	2,98	2,89
27. Reliance Industries [RL]	27,20	20,35	16,93	13,80	13,06
28. Pertamina [PE]	6,47	8,09	7,10	8,71	13,01
29. (Conoco)Phillips 66 [CP66]	9,25	10,23	9,31	10,51	9,94
30. ONGC India [ONGC]	14,34	12,43	12,59	13,95	10,63
weighted mean EROI	11,76	16,23	16,79	14,39	17,25

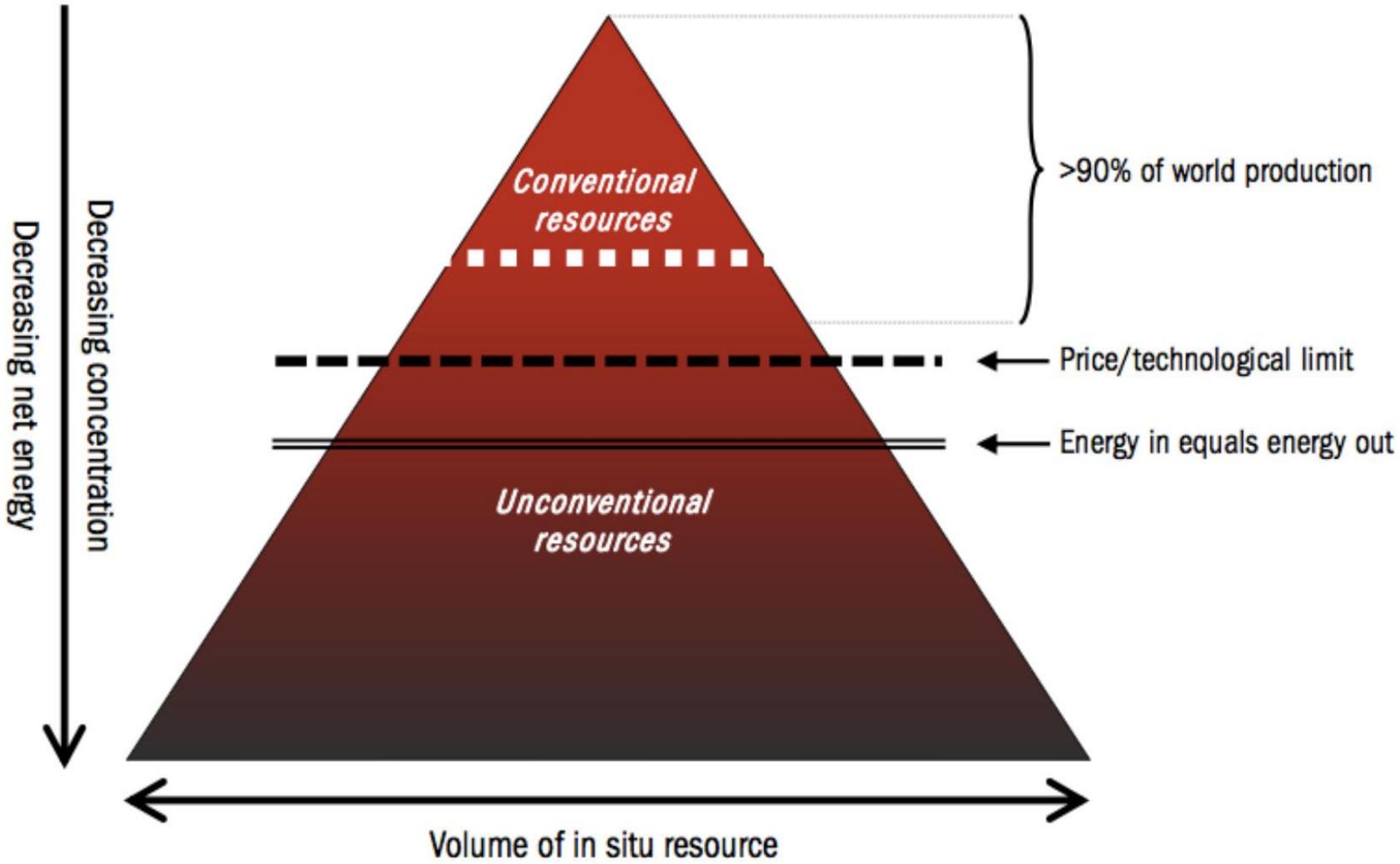
	2014	2015	2016	2017	2018
EROI	11,76	16,23	16,79	14,39	17,25
Price (\$2018)	104,95	55,5	45,76	55,52	71,31



# EROEI. La piramide delle risorse.

La riduzione dell'EROEI di una risorsa può essere vista anche da un altro punto di vista, quello della piramide delle risorse (modo grafico di visualizzare la quantità di risorse minerarie in funzione della loro qualità). Il grafico di pagina 43 rappresenta la piramide delle risorse petrolifere. L'asse orizzontale rappresenta i volumi della risorsa in situ. L'asse verticale la qualità della risorsa in termini di ritorno energetico (o energia netta) decrescente (o, per le risorse minerali, di concentrazione decrescente). Secondo questa rappresentazione semi-quantitativa, al diminuire della qualità delle risorse, cioè scendendo verso il basso, i volumi disponibili aumentano.

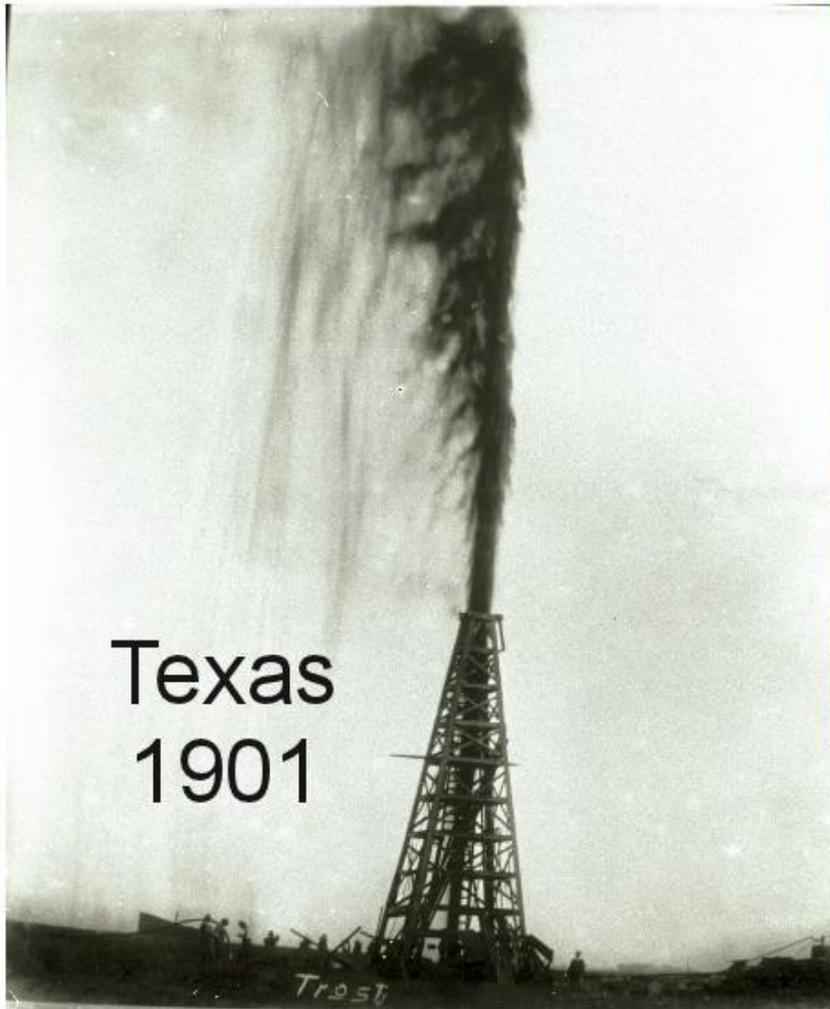
Questo ha fatto dire a qualche ottimista che la riduzione della qualità aumenta la quantità. L'affermazione è in principio corretta. Il problema è economico e tecnologico. Vi è infatti un limite tecnologico ed economico che impedisce di produrre risorse la cui estrazione ha difficoltà crescenti. Inoltre vi è un confine fra le risorse che hanno un EROEI maggiore dell'unità e quelle in cui i costi energetici superano i ricavi. Si stima che la maggior parte delle risorse petrolifere non-convenzionali siano al di sotto di questi due limiti e perciò resteranno nel sottosuolo.



# EROEI. Un secolo di petrolio. Spindletop vs Deep Water Horizon.

La Figura che segue illustra visivamente l'evoluzione dell'industria estrattiva del petrolio in oltre un secolo presentando i due estremi dell'evoluzione tecnologica. Il pozzo storico raffigurato a sinistra è lo storico "Spindletop" in Texas, una struttura che sostiene una trivella simile a quelle che si usano per battere i pozzi artesiani. E' chiara la differenza, in termini economici, tecnici ed energetici, fra lo Spindletop e una piattaforma della generazione Deepwater Horizon raffigurata a destra. E' chiaro anche che un barile estratto dalla Deepwater Horizon implica una spesa energetica molto maggiore di uno estratto da un pozzo tradizionale. Detto per inciso il solo affitto della piattaforma petrolifera Deepwater Horizon costava alla BP una cifra dell'ordine di 497.000 dollari al giorno per tre anni, è abbastanza naturale, anche se eticamente discutibile, che a fronte di spese non comprimibili così ingenti, si cercasse di risparmiare dove possibile, probabilmente anche a spese della sicurezza dei lavoratori (11 morti nell'incidente del 2010) e ambientale, con scelte tecniche spericolate.

## The energy cost of energy



Gulf of Mexico  
2010

Spindletop vs Deep Water Horizon

# Quanta energia ci possono ancora dare petrolio e gas?

A partire dalla seconda metà degli anni 2000, l'IEA ha iniziato a pubblicare nelle sue proiezioni sulla produzione (estrazione) di petrolio nel mondo dati che riconoscono il problema del declino della qualità delle risorse petrolifere. Nella pagina seguente è riportato il grafico preso dal rapporto annuale dell'IEA del 2013. Le proiezioni si estendono fino al 2035. Esso presenta la quantità totale di liquidi combustibili di natura petrolifera distinti per diverse classi. Il primo dato che salta gli occhi è il fatto che ormai l'IEA dà per appurato il superamento del Picco delle fonti di petrolio provenienti dai giacimenti "attualmente in produzione". Questa categoria di petrolio è quella che viene variamente definita come: convenzionale, greggio o *legacy oil*. Si tratta, appunto, del lascito, dell'eredità petrolifera, che il mondo contemporaneo ha ricevuto dalle aziende e dai loro operai, tecnici, geologi e ingegneri che nel XX secolo hanno cercato, scoperto e portato in produzione la maggior parte dei grandi bacini petroliferi del mondo. Si tratta del petrolio che ha alimentato il nostro metabolismo sociale ed economico per più di un secolo. Quello che Colin Campbell e Jean Laherrere definirono nel 1998 *cheap oil*, il petrolio a buon mercato, nel loro famoso articolo, uscito anche sulla rivista italiana Le Scienze con il titolo, appunto di: "La fine del petrolio a buon mercato".

Ma se l'energia netta è diversa per le diverse categorie di liquidi combustibili che senso ha riportare la produzione globale come mera somma dei volumi estratti delle diverse categorie come fa l'IEA? Che senso ha, ad esempio, sommare al petrolio convenzionale la categoria dell'NGL e dei condensati il cui contenuto energetico per barile è stimato essere il 70% di quello del petrolio convenzionale? Che senso ha sommare al tutto la categoria indicata come guadagni di processo che altro non è che un aumento di volume della somma delle componenti ottenute attraverso la raffinazione, ma che non corrisponde ad alcun aumento di energia?

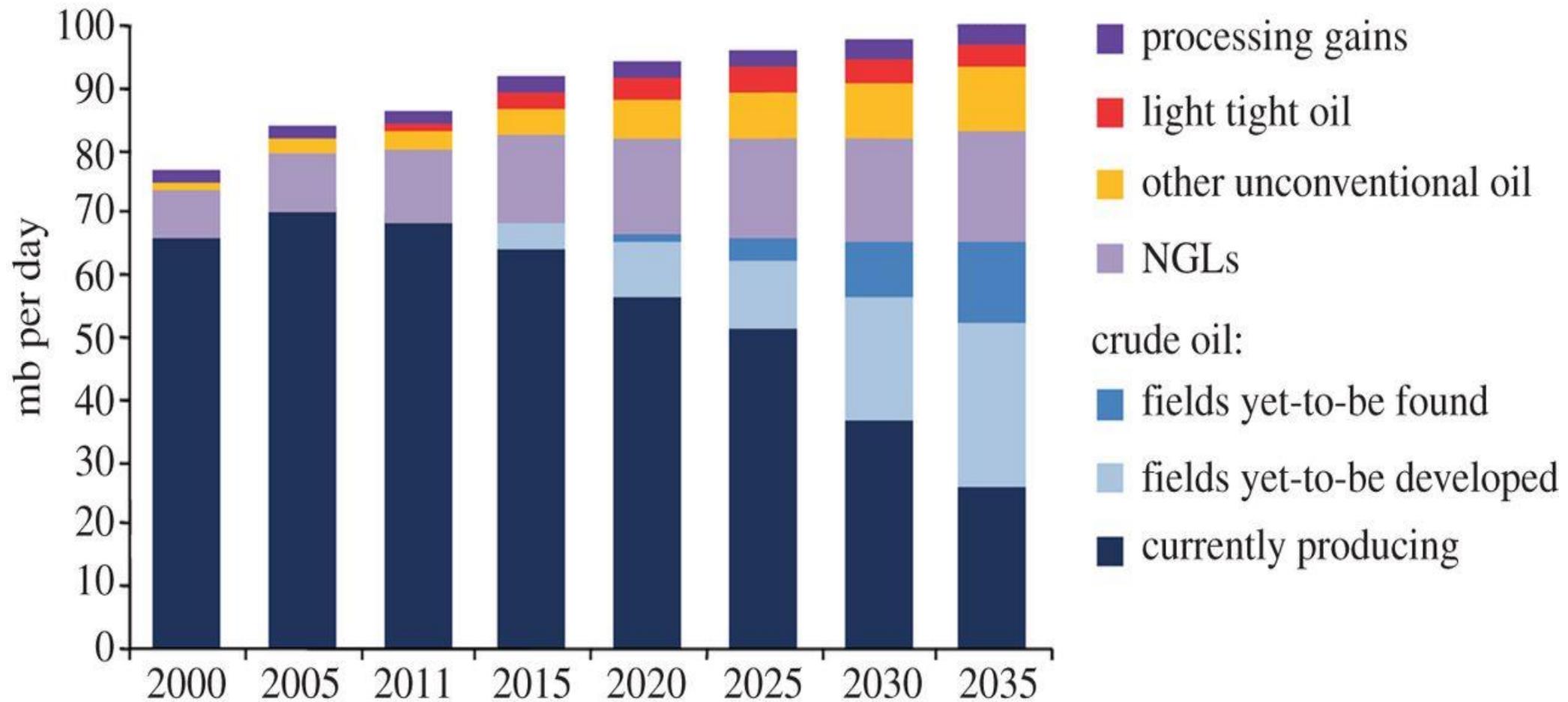
Come ha giustamente notato Antonio Turiel quello che l'IEA dovrebbe fare per dare un'informazione corretta ai governi è tener conto dell'EROEI delle diverse fonti fossili, e in particolare di quelle liquide, e sommare non i volumi, ma l'energia in essi contenuta. Turiel ha fatto una sua stima dell'energia netta del barile delle diverse categorie ed è arrivato alla conclusione che il Picco dell'energia fornita dai combustibili liquidi è già stato superato. Con la sua usuale onestà intellettuale Turiel afferma anche che la sua stima non può che essere grossolana e che questo dovrebbe essere il lavoro dell'IEA.

Per una trattazione completa dell'argomento si veda:

**A. Turiel (2012).** Antonio Turiel. *Il Tramonto del Petrolio*. Dal blog Effetto Risorse. 6 dicembre 2012.

<http://ugobardi.blogspot.it/2012/12/il-tramonto-del-petrolio.html>

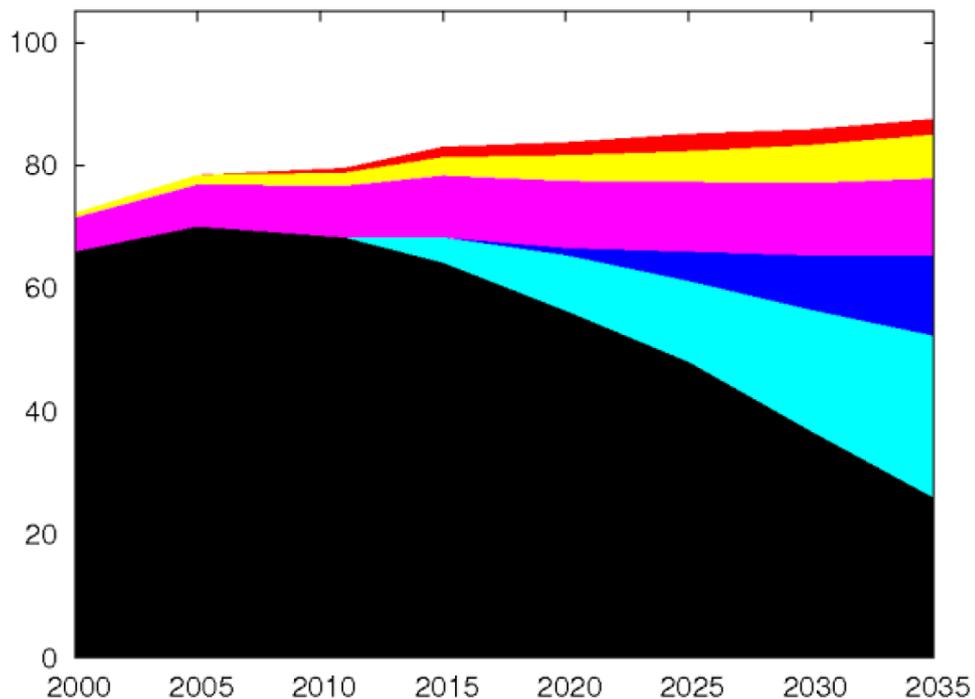
WEO (2013). International Energy Agency. *World Energy Outlook 2013*. 12 novembre 2013.  
<http://www.worldenergyoutlook.org/publications/weo-2013/> (consultato il 15 giugno 2014).



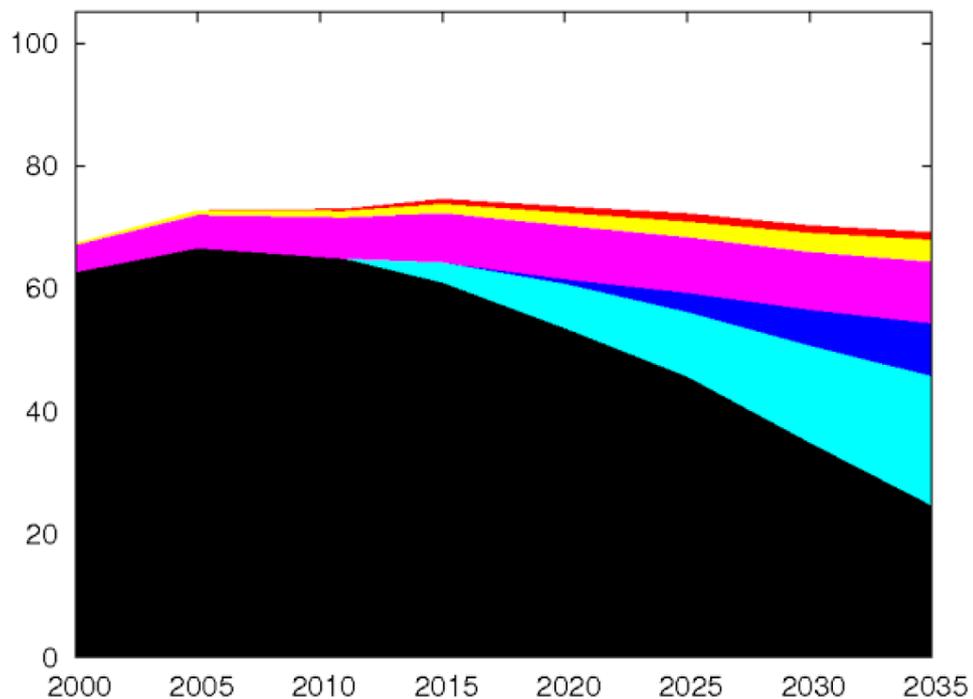
Turiel divide il lavoro in due parti. In primis considera il contenuto energetico delle diverse categorie di liquidi combustibili ottenuti dall'industria petrolifera. Così, ad esempio, come abbiamo detto la categoria indicata come NGL (Natural Gas Liquid) ha un contenuto energetico che è circa il 70% di quello contenuto in un pari volume di petrolio. Successivamente Turiel stima l'energia netta fornita dalle diverse categorie di petrolio e giunge alla conclusione che pur in presenza di un continuo aumento dei volumi di liquidi combustibili, il contenuto in energia di questi liquidi, come da lui stimato, potrebbe essere già in declino dal 2015.

**A. Turiel (2012).** Antonio Turiel. *Il Tramonto del Petrolio*. Dal blog Effetto Risorse. 6 dicembre 2012.

<http://ugobardi.blogspot.it/2012/12/il-tramonto-del-petrolio.html>



Volumi aggiustati sulla base del **contenuto energetico** delle diverse categorie di petrolio considerate dall'IEA.



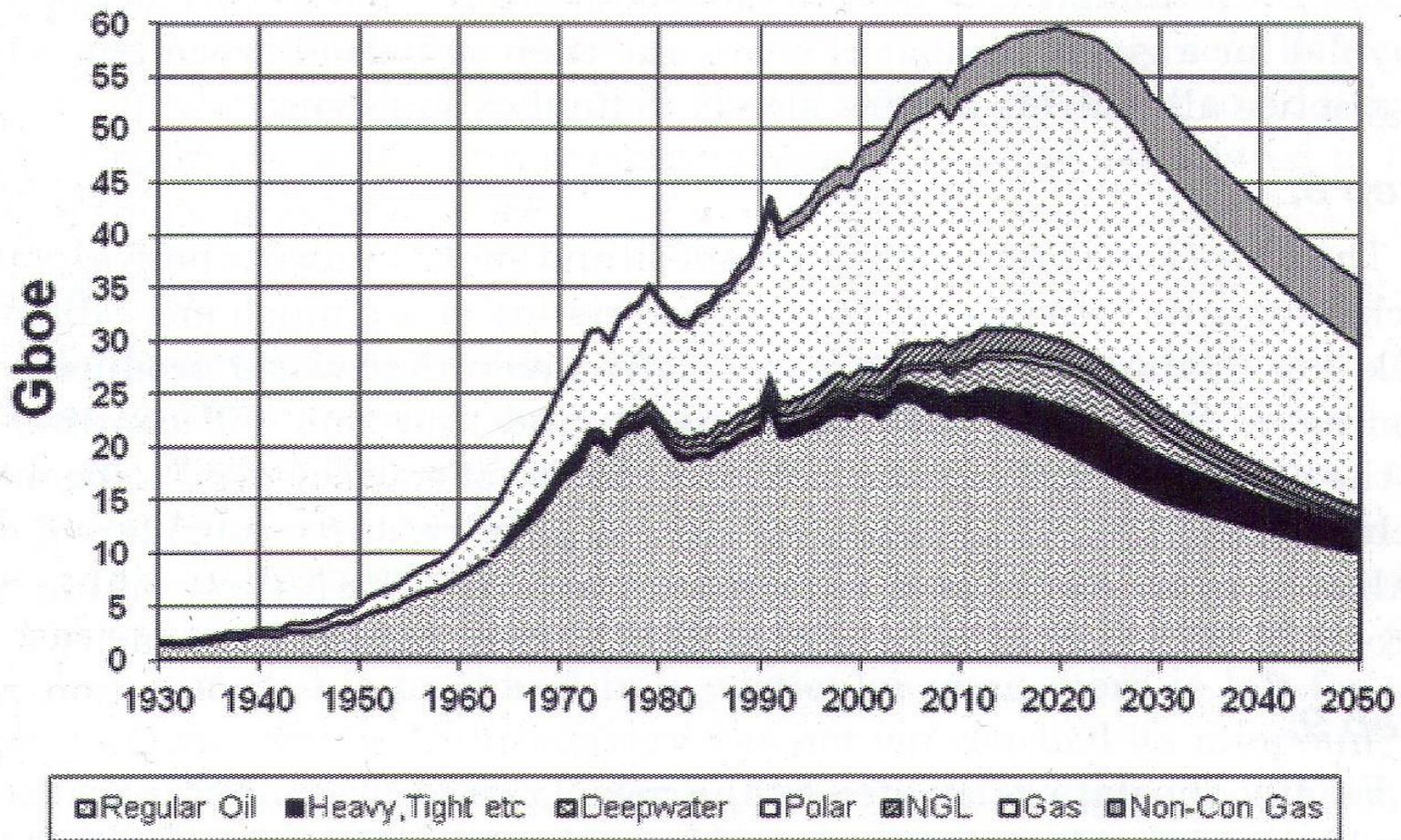
Volumi aggiustati sulla base del **energia netta** delle diverse categorie di petrolio considerate dall'IEA.

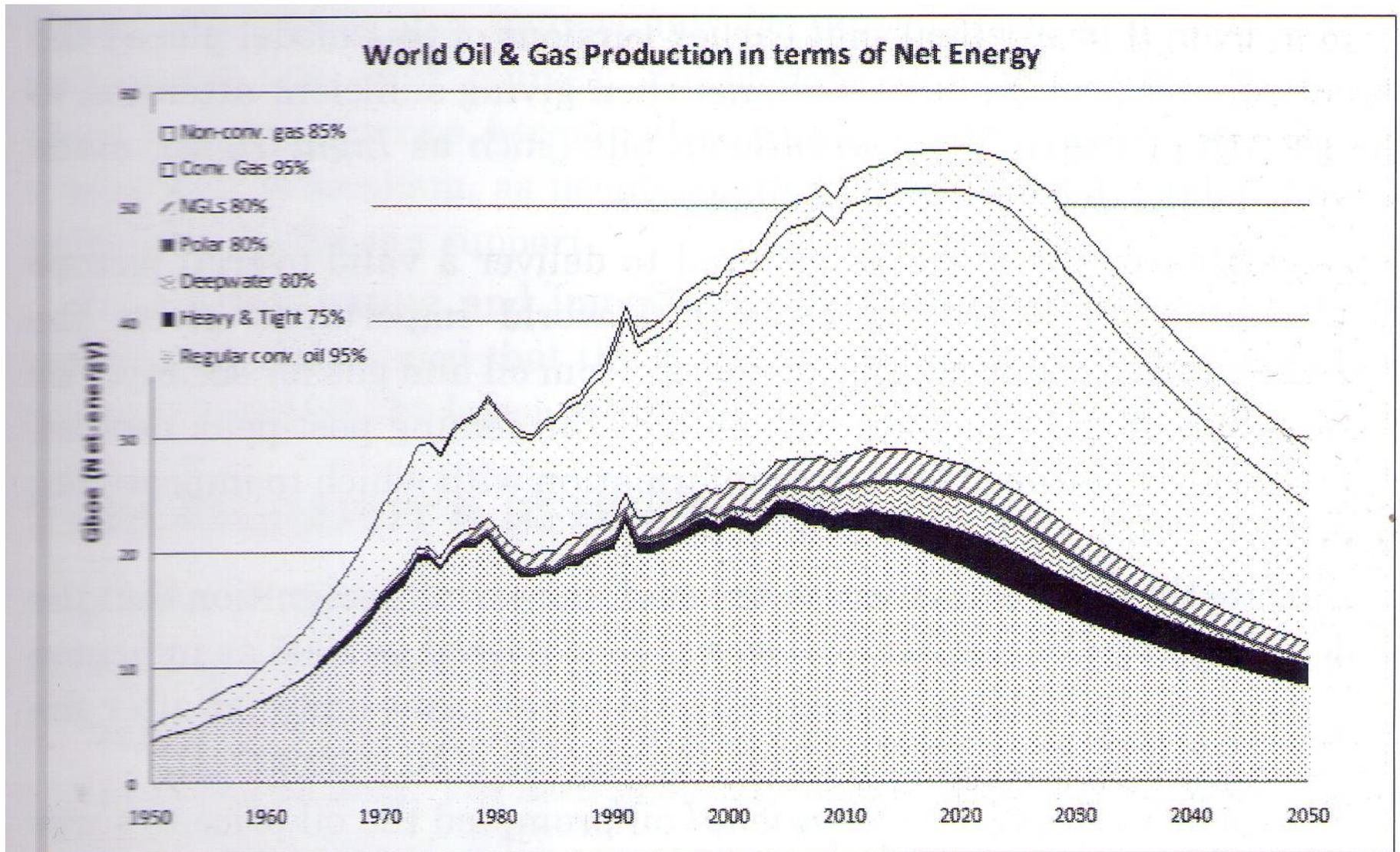
Calcoli simili sono stati ripetuti in tempi recenti sulla rivista The Oil Age in un articolo di Colin Campbell del 2015 in cui sono riportati i grafici che seguono nelle prossime due pagine.

Il primo riporta i volumi di tutte le categorie di liquidi combustibili prese in considerazione che differiscono in parte da quelle dell'IEA, ma possono essere ad esse confrontate. Nella seconda si riporta i liquidi normalizzati per contenuto energetico.

Campbell non si avventura nella stima dell'energia netta.

## OIL & GAS PRODUCTION PROFILES 2012 Base Case





**Figure 2:** The same data as Figure 1, but now expressed in terms of 'net-energy barrels of oil equivalent' (i.e., barrels of useful energy delivered to society), once the energy used in the production of the oil and gas is subtracted off.

# Altri criteri di stima della qualità delle fonti energetiche

I criteri per stimare la qualità delle fonti energetiche non si limitano alla stima dell'EROEI e dell'Energia Netta anche se tutti i metodi sono ad esse riconducibili. Criteri economici e di convenienza pratica sono spesso considerati importanti.

Il primo criterio è quello del prezzo del kWh elettrico delle diverse fonti elettriche. Qui si confronta il prezzo dell'energia prodotta, ad esempio, dalle fonti rinnovabili e dalle fonti fossili. Quando le rinnovabili possono vendere energia elettrica all'utente ad un prezzo uguale a quello delle fonti fossili si parla di raggiungimento della *grid parity*.

Torneremo su questi argomenti quando parleremo delle fonti rinnovabili.

Altri criteri riguardano le densità volumetriche ( $J/m^3$ ) e gravimetriche ( $J/Kg$ ) (Tabella a pagina 53) oppure la densità spaziale ( $J/m^2$ ) (Tabella a pag 54).

Anche nel caso della stima delle densità si usano in genere criteri non ancora sufficientemente standardizzati per cui, come si dice, "ognuno tira l'acqua al suo mulino" producendo risultati discordanti. Una delle controversie più comuni è, ad esempio, quella sui possibili usi multipli dell'area destinata ad un impianto che ridurrebbe l'area effettiva degli impianti da fonti rinnovabili la cui densità spaziale in  $Mwh/Km^2$  è nettamente inferiore a quella degli impianti basati sulle fossili. Il problema è stimare la superficie realmente occupata ad esempio da una wind farm. Si deve prendere l'intera area o fare la somma delle aree occupate dalle basi delle torri eoliche e dalle vie di accesso agli impianti? Dato che negli spazi liberi si può continuare, come spesso avviene, ad usare il territorio per l'agricoltura e il pascolo. Le controversie su questo aspetto devono convincere lo studente a considerare cum grano salis, la tabella di pagina 54 ed il grafico di pagina 55. In quest'ultimo le densità superficiali riportate, tendono a dimostrare la totale inadeguatezza delle fonti rinnovabili in un sistema industrializzato. Un atteggiamento che il prof. Vaclav Smil mantiene da tempo e che è oggetto di polemiche e controversie non ancora risolte.

# Criteri razionali (bio-fisici e socio-economici) di valutazione delle fonti energetiche

- Fattori economici. (€/kWh) (grid parity, incentivi)
- Densità energetica gravimetrica. (MJ/Kg)
- Densità energetica territoriale (Mtep/Kmq)
- Ritorno energetico (EROEI).
- Tempo di ritorno energetico (energy payback time).
- Trasportabilità.
- Rinnovabilità – Consistenza della risorsa.
- Tempi di riconversione del sistema socio-economico.
- Dipendenza dalle fonti fossili.
- Costi ambientali non contabilizzati (economici ed ecologici).

# Densità di energia di diversi combustibili

<b>Materiale</b>	<b>Volumetrica</b>	<b>Gravimetrica</b>
<b>Gasolio</b>	<b>10,942Wh/l</b>	<b>13,762Wh/kg</b>
<b>Benzina</b>	<b>9,700 Wh/l</b>	<b>12,200 Wh/kg</b>
<b>LNG</b>	<b>7,216 Wh/l</b>	<b>12,100 Wh/kg</b>
Propano (liquido)	7,500 - 6,600 Wh/l	13,900 Wh/kg
Etanolo	6,100 Wh/l	7,850 Wh/kg
Idrazina	5,426 Wh/l	5,373 Wh/kg
Metanolo	4,600 Wh/l	6,400 Wh/kg
<b>Idrogeno Liquido</b>	<b>2,600 Wh/l</b>	<b>39,000* Wh/kg</b>
<b>Legno</b>		<b>1,600 - 4,709 Wh/kg</b>
Idrogeno compresso a 150 bar	405 Wh/l	39,000* Wh/kg
<b>Carbone</b>		<b>83.333 Wh/kg</b>
<b>Ruote di automobile</b>		<b>97.222 Wh/kg</b>
<b>Spazzatura</b>		<b>22.000- 30.000 Wh/kg</b>
<b>Sterco secco</b>		<b>41.000 Wh/kg</b>

# Densità territoriale di energia

**Esempio: quanta superficie terrestre è necessaria per produrre l'equivalente di 1 milione di tonnellate di petrolio in un anno?**

**Superficie dell'Italia: 301.338 km<sup>2</sup>**

<b>Solare termico</b>	<b>48 Km<sup>2</sup></b>
<b>Fotovoltaico</b>	<b>50</b>
<b>Solare termodinamico</b>	<b>70</b>
<b>Eolico convenzionale</b>	<b>80</b>
<b>Biomasse</b>	<b>1000</b>
<b>Biocombustibili</b>	<b>13000</b>

Confronto fra la densità di potenza (in  $W/m^2$ ) dell'estrazione di combustibili fossili e gli impianti di conversione basati sulle fonti rinnovabili di energia. (V. Smil. Energy in nature and society. 2010)

