

La transizione ecologica.

Introduzione.

La transizione ecologica è diventata, finalmente, uno degli argomenti di discussione nell'opinione pubblica. L'espressione è usata come sinonimo di una transizione energetica che ci porti da un modello incentrato prevalentemente sulle fonti fossili di energia, ad un modello energetico interamente decarbonizzato. Cioè a zero emissioni di Gas Serra (GS) in grado cioè di affrontare la "cura" di quello che è considerato il più serio problema ecologico globale: il Cambiamento Climatico (CC).

Questa non è la sola ragione per cui si deve lavorare alla sostituzione delle fonti fossili di energia. Queste sono infatti strettamente non rinnovabili e soggette ad esaurimento. Su questo tema la nostra associazione ha fondato per ormai oltre quindici anni la propria attività e sul nostro sito si possono trovare tutte le informazioni necessarie.¹⁻³

Naturalmente parlando più in generale di transizione ecologica, si dovrebbero considerare anche tutto l'insieme correlato di fenomeni complessi che costituiscono le componenti della crisi ecologica della nostra specie.⁴ In questo documento, tuttavia, ci limiteremo a svolgere un discorso limitatamente al tema energetico.

Eviteremo in questo documento le lamentazioni sulle carenze della politica nell'indirizzare la società verso un progetto credibile di sostenibilità ambientale e sociale e sull'azione degli interessi conclamati legati al vecchio modello fossile che determinano questa inerzia. Tali interessi e tale inerzia sono evidenti, ma non sono il focus di questo documento che, piuttosto, si rivolge a tutti coloro che si impegnano o si vogliono impegnare per scuotere la società ad agire, a passare da un generico ed impotente grido di allarme che suona come un "dovete fare qualcosa!", ad un più concreto; "questo è quello che vogliamo e dobbiamo fare".

Speriamo che la lettura sia di ispirazione, ma che sia anche uno stimolo ad affrontare il tema con realismo e senza le facilonerie che spesso caratterizzano le parole d'ordine anche nel campo ambientalista. La sfida che abbiamo di fronte sarebbe tale da far tremare le vene e i polsi anche in assenza di una forte ed organizzata resistenza al cambiamento da parte dei sostenitori del paradigma fossile e, soprattutto, degli interessi [economici](#), [politici](#) e [militari](#) ad esso legato.

La transizione, per essere ecologica, deve portarci dal modello energetico basato sulla combustione delle fonti fossili ad uno interamente elettrico basato sulle fonti rinnovabili.

Vogliamo subito sgombrare il campo da possibili equivoci, la nostra opinione è che **biocombustibili e biomassa non dovrebbero essere in generale inclusi fra le rinnovabili**. Il suolo fertile dovrebbe essere lasciato alla produzione di cibo e, per la parte restante, lasciato a disposizione delle altre specie vegetali e animali che costituiscono la biosfera. Si possono immaginare deroghe locali a questo principio, ma

non una generale inclusione delle bioenergie fra le fonti rinnovabili di energia. Nella nostra analisi considereremo fra le Nuove Fonti di Energia Rinnovabile (NFER) solo quelle che attualmente hanno maggiore impatto, l'eolico e il fotovoltaico (per un quadro generale delle FER Vedi BOX1*) alle quali si aggiungono quelle tradizionali: l'idroelettrico e il geotermico. Siamo consci del fatto che nella transizione sarà ancora

BOX 1. Le fonti rinnovabili di energia

Tecniche che permettono lo sfruttamento e la conversione di diversi flussi di energia o di vettori energetici rinnovabili in: • **energia secondaria** o finale **vettori energetici ed energia utile**

Non tutte le opzioni sono possibili per ogni sito e ogni condizione al contorno. Opportunità correntemente più **applicate e promettenti**:

- **Calore solare da sistemi passivi** (misure **architettiche** per utilizzare l'energia solare),
- **Calore solare da sistemi attivi** (collettori **solari termici**),
- **Energia Elettrica da solare termica**: torri solari, **solare termodinamico** (collettori accoppiati a motori Stirling e cicli Brayton/Rankine), impianti a camino solare
- **Conversione della radiazione solare in energia elettrica** (impianti **fotovoltaici**),
- **Sfruttamento dell'energia oceanica**: energia delle **maree** a dalle **correnti**, eventuale **gradiente termico** superficie – profondità (di origine solare)

Principi produttivi e di sfruttamento

Efficienza

è il rapporto tra potenza utile (ad esempio energia elettrica, calore) e quella in ingresso (ad esempio la radiazione solare, l'energia geotermica ...)

Coefficiente di utilizzazione (capacity factor)

il rapporto x/y tra la produzione di energia elettrica effettiva "x" fornita da un impianto di potenza durante un periodo di tempo, solitamente un anno, e la fornitura teorica di energia "y" che avrebbe potuto offrire se avesse operato alla piena potenza nello stesso periodo di tempo". I periodi di tempo osservati possono comprendere periodi di carico parziale e le interruzioni, nonché di avvio e di arresto di solito l'efficienza è minore rispetto a quella valutata in funzione della potenza al punto di progetto a pieno carico

Disponibilità tecnica

Periodo di tempo all'interno del quale un impianto è stato *effettivamente disponibile* e considera quindi i periodi di indisponibilità a causa di malfunzionamenti.

necessario l'uso degli idrocarburi e, nei paesi in via di sviluppo, dei combustibili solidi che vanno sotto il nome collettivo di carbone, come pure siamo consci del fatto che è impossibile chiedere a paesi che hanno una produzione nucleare di rinunciare di colpo a tale risorsa, ma crediamo che sia ipocrita ridefinire la sostenibilità delle fonti a seconda delle convenienze politiche ed economiche.

Abbiamo anche forti dubbi sulla praticabilità delle tecniche di Cattura e Stoccaggio dell'Anidride Carbonica (CCS) come soluzione temporanea al problema delle emissioni.

Consumi energetici globali.

La statistica energetica racconta una storia che andiamo ripetendoci da anni: il cuore di questa storia dice che da decenni le fonti fossili non scendono al di sotto

dell'80-85% del totale dell'energia primaria. Ma questa storia offusca in gran parte la nostra percezione dell'uso dell'energia nella società e tende a presentare un panorama

* Appunti tratti dalle lezioni del corso "Energie Rinnovabili" del prof. Daniele Fiaschi (Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Firenze)

scoraggiante a chi vuole agire sul tema della transizione. Come fare a sostituire queste quantità enormi di energia fossile? L'energia primaria consiste nella somma di tutti i contributi che vengono dalle fonti energetiche che si trovano in natura prima di qualsiasi trasformazione da parte dell'industria energetica. Quindi il petrolio ed il gas che fuoriescono dai giacimenti di idrocarburi (misurati in unità di volume, ad esempio il barile di petrolio o il metro cubo di gas) e il carbone (misurato in tonnellate) estratto dalle miniere sono energia primaria, dopo che sono stati puliti dalle impurezze insieme alle quali essi vengono raccolti, ad esempio acqua e solfuro di idrogeno per il petrolio, vari tipi di materiali indesiderati per il carbone ecc.

Ma quando si passa alle fonti alternative le cose si complicano. Da un punto di vista strettamente scientifico per la fonte nucleare sembrerebbe naturale considerare l'energia contenuta nell'uranio (prima o dopo l'arricchimento?). Per le rinnovabili si potrebbe pensare che l'energia primaria sia quella trasportata dalla radiazione solare che incide sull'impianto fotovoltaico o termico, o l'energia cinetica del vento che attraversa le pale eoliche, o l'energia gravitazionale della massa d'acqua imbrigliata in uno sbarramento alpino. Ma non è così che procedono praticamente coloro che compilano le statistiche energetiche e, in particolare, l'IEA (International Energy Agency).[†] In pratica quella che viene definita energia primaria, non è costituita dagli accumuli di energia fossile o fissile e i flussi di energia solare o geotermica che si raccolgono o intercettano in natura, ma le quantità di energia prese in qualche stadio intermedio della trasformazione verso gli usi finali. Così mentre petrolio e gas vengono misurati in barili e metri cubi quando vengono usati come tali, per quanto riguarda le fonti che producono energia elettrica si procede in modo diverso. Per le fonti fossili si prende il loro potere calorifico. Mentre per le rinnovabili si prende direttamente l'energia elettrica che esce dall'impianto. Questo porta ovviamente a delle controversie, primo perché non si rispetta la definizione scientificamente rigorosa di fonte primaria, secondo perché così facendo si sottovaluta il contributo delle fonti rinnovabili che vengono prese, per quanto riguarda la produzione energetica, un passo a valle nel flusso verso gli usi finali, rispetto alle fossili.⁵

Nel rapporto annuale della British Petroleum ⁶ e nel relativo database, si fa un'operazione diversa; nel presentare il quadro d'insieme della produzione di energia da fonti primarie, le fonti elettriche rinnovabili e quella nucleare vengono prese come l'equivalente di energia fossile che produrrebbe la stessa quantità di energia elettrica.

Per la definizione dei vettori energetici fra fonti primarie, secondarie ecc si veda l'Appendice 1.

In pratica i numeri che l'IEA stima, fonte per fonte, misurano il **contributo delle diverse fonti energetiche primarie al flusso di energia scambiabile sul mercato**. Definiti come Offerta Totale di Energia (TES: Total Energy Supply). Questa è una cosa sostanzialmente diversa dalla definizione formale di energia primaria. Basta saperlo!^{7,8} La cosa più semplice per risolvere il problema è lasciar perdere le controversie

[†] L'Agenzia Internazionale per l'Energia (IEA) è un'agenzia intergovernativa dei paesi OCSE alla quale hanno aderito come paesi associati numerosi paesi in via di sviluppo come la Cina, l'India e il Brasile.

e chiedersi a cosa serve l'energia e come la usiamo praticamente. Cioè chiederci **quali sono i consumi finali e quale è la loro entità**.

A cosa serve l'energia?

Una tanica di benzina è un concentrato di energia chimica, ma non ti serve a nulla se non hai un motore per trasformarla in lavoro meccanico che svolge la sua funzione nel tempo, cioè, parlando in termini fisici, potenza (vedi BOX2 ⁹). La potenza è il flusso di energia nel tempo che ci serve per mettere in moto le nostre macchine e per illuminare e riscaldare gli ambienti in cui lavoriamo e viviamo.

Il movimento ordinato delle macchine ha un'infinità di applicazioni che sono quelle che ci interessano. Impossibile fare un elenco completo. Abbiamo gli usi industriali: la trasformazione delle materie prime, la sintesi dei composti chimici, la metallurgia, e la produzione di tutti i beni d'uso, nei quali le macchine, fin dalla macchina a vapore e ancora prima con i mulini azionati dalla forza animale, dal vento e dalle cadute d'acqua, la fanno da padrone. Poi abbiamo gli usi legati alla mobilità delle persone e al trasporto merci (automobili, camion, treni, navi, aeroplani), gli usi nel settore primario: per l'estrazione mineraria e nell'agricoltura (escavatori, trattori, altre macchine agricole ecc.), infine gli usi civili nel settore privato domestico, pubblico e nel terziario (ascensori, scale mobili, computer). Infine, come detto, quello che potremmo considerare forse i più antichi bisogni, quello di calore per riscaldarci e per cucinare e quello dell'illuminazione che fin dal tempo profondo della nostra storia ci hanno permesso di estendere la nostra attività sociale alle ore notturne.¹⁰

Come generiamo l'energia che usiamo?

La maggior parte dell'energia che usiamo, viene generata oggi dalla combustione di combustibili fossili. Cioè dalla conversione dell'energia chimica in essi contenuta in energia termica, usata come tale, o trasformata ulteriormente in energia cinetica come avviene nei motori a scoppio (tecnicamente motori a combustione interna), o usata per generare vapore che mette in moto una turbina (energia cinetica) di un alternatore che a sua volta genera energia elettrica.

BOX 2. La potenza

Se una forza esterna viene applicata a un oggetto (che assumiamo agisca come una particella) e se il lavoro svolto da questa forza nell'intervallo di tempo t è L , allora la potenza media applicata durante questo intervallo di tempo è definita come:

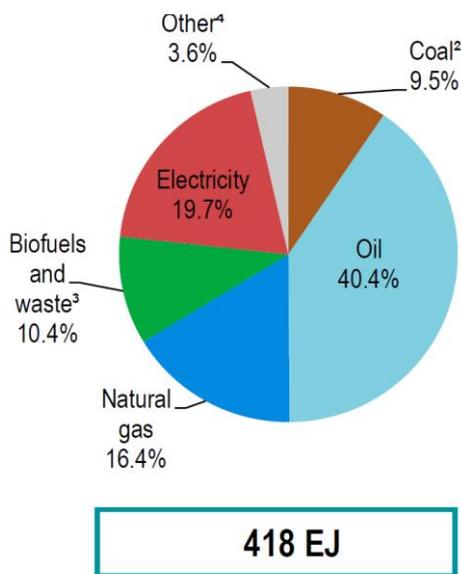
$$\bar{P} = \frac{L}{\Delta t}$$

Il lavoro svolto sull'oggetto contribuisce all'aumento dell'energia dell'oggetto. Pertanto, in una definizione più generale **la potenza rappresenta la velocità di trasferimento dell'energia**. Possiamo definire la potenza istantanea come il valore limite della potenza media quando t si avvicina a zero: dove abbiamo rappresentato l'incremento di lavoro svolto come dL .

$$P = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{L}{\Delta t} = \frac{dL}{dt}$$

Unità di misura dell'energia Joule, J. Unità di misura della potenza Watt, W = 1 J/s. 1 Wh è l'energia dissipata o generata da un dispositivo della potenza di 1 W che agisce per 1 ora. 1 Wh = 1 J/s * 3600 s = 3600 J. Esempio: in un'ora una lampadina da 100 W dissipa in calore ed energia radiante 100 Wh cioè 360 kJ di energia.

Figura 1. Consumo Finale Totale di energia per fonti nel Mondo per l'anno 2019 (ref 10).



Il calore rappresenta circa il 50% degli usi finali di energia a livello globale. Circa il 50% di questo calore, viene usato in processi nel settore industriale, il 46% per il riscaldamento ambientale degli edifici e in misura minima per cucinare, mentre il restante 4% è usato in agricoltura per il riscaldamento delle serre ([dati IEA](#)). Il 90% del calore viene prodotto da combustibili fossili ed è responsabile del 40% delle emissioni di CO₂. Ma del 10% di calore, che viene considerato come prodotto da rinnovabili, circa il 60% viene da biomassa, in gran parte legna bruciata in stufe a bassa efficienza.

I dati di TES tabulati dall'IEA per il 2019 ammontano a 606 EJ (vedi BOX 3 per le unità di misura dell'energia) mentre il consumo

finale totale (TFC: Total Final Consumption) dello stesso anno, in virtù di perdite sofferte lungo il processo di produzione e distribuzione, è di 418 EJ.¹¹

Per avere una stima del cammino che dobbiamo percorrere ci dobbiamo porre il problema di trovare l'energia necessaria per alimentare gli impieghi finali (TFC) a livello globale, sovranazionale, nazionale e locale. Ci accingiamo perciò a considerare questi ultimi. Prendiamo momentaneamente per buono il dato di 418 EJ che, secondo l'IEA, sono distribuiti fra le fonti come rappresentato in figura 1.

Questo dato corrisponde a quello di una macchina della potenza di circa 13 TW che lavora in continuo. Pari, come potenza totale, a circa 20 miliardi di cavalli da tiro o 70 miliardi di schiavi umani che lavorano 24/24, 365 giorni all'anno (vedi sotto). Ma con in più la versatilità delle fonti moderne di energia che va ben al di là della fonte muscolare animale.¹²

Il quadro degli usi finali di energia del 2019 secondo l'IEA è riportato in Figura 2 e in Tabella 1.¹³

Si deve convenire sul fatto che il diagramma di Sankey dell'IEA non sia molto chiaro per i non addetti ai lavori. Il [Lawrence Livermore National Laboratory](#) (LLNL) da una rappresentazione leggermente diversa, ma più chiara dei flussi energetici nazionali, basati sui dati del Ministero per Energia del governo statunitense (EIA- DoE). Sfortunatamente il LLNL non riporta i dati globali e non li riporta per tutti gli anni, per cui non abbiamo un riferimento preciso per fare un confronto con il diagramma dell'IEA, ma quello, riportato in figura 3 relativo agli Stati Uniti nel 2019, mostra in modo chiaro, come vengono utilizzate le fonti primarie nei paesi avanzati. E, fatto ancora più interessante, stima esplicitamente le perdite totali che soffre il sistema attuale (*Rejected energy* in figura 3) e l'energia effettivamente convertita in servizi: cioè il calore, l'energia

meccanica e la corrente elettrica che usiamo per le macchine e per l'illuminazione degli ambienti.

Dalla figura 3 si capisce meglio anche il diagramma di Sankey dell'IEA. Facciamo il confronto voce per voce:

1. Il solare indicato nel diagramma dell'IEA insieme a geotermico e altre rinnovabili è solo quello prodotto direttamente per usi domestici o industriali ed è una frazione di quello totale. La maggior parte del solare fotovoltaico del geotermico dunque, viene conteggiato nella produzione elettrica.
2. Nucleare, idroelettrico ed eolico rientrano per l'IEA interamente nella voce "electricity" del bilancio.
3. L'uso del gas naturale si suddivide in produzione elettrica e produzione di calore

BOX 3. Unità di misura dell'energia

Acronimo inglese	Acronimo Italiano	Joule	Inglese	Italiano
1 cal =	cal	4,186	Calorie	caloria
1 BTU =	-	1,055 10 ³	British Thermal Unit	-
1 kWh =	kWh	3,60 10 ⁶	Kilowatthour	Chilovattora
1 m ³ gas nat. =	-	3,64 10 ⁷	-	Smc Metro cubo standard
1 ton TNT =	-	4,19 10 ⁹	-	-
1 boe =	bep	6,12 10 ⁹	Barrel of oil equivalent	Barile equivalente di petrolio
1 TCE =	TEC	29,31 10 ⁹	Ton of Coal Equivalent	Tonnellata equivalente di carbone
1 TOE =	Tep	41,87 10 ⁹	Ton of Oil Equivalent	Tonnellata equivalente di petrolio

Nome (inglese)	suffisso	Nome del suffisso	Potenza di 10	Potenza di 1000
	f	femto	10 ⁻¹⁵	1000 ⁻⁵
	p	pico	10 ⁻¹²	1000 ⁻⁴
	n	nano	10 ⁻⁹	1000 ⁻³
	μ	micro	10 ⁻⁶	1000 ⁻²
	m	milli	10 ⁻³	1000 ⁻¹
	-	-	10 ⁰	1000 ⁰
	k	Kilo	10 ³	1000 ¹
Million	M	Mega	10 ⁶	1000 ²
Billion	G	Giga	10 ⁹	1000 ³
Trillion	T	Tera	10 ¹²	1000 ⁴
Quadrillion	P	Peta	10 ¹⁵	1000 ⁵
Quintillion	E	Exa	10 ¹⁸	1000 ⁶
Sextillion	Z	Zetta	10 ²¹	1000 ⁷
Septillion	Y	Yotta	10 ²⁴	1000 ⁸

per riscaldare gli ambienti (nel residenziale, nell'industria e nel commercio) e per usi industriali. Una minima parte va nel trasporto e in usi non energetici (fertilizzanti azotati ecc).

4. Il carbone viene usato prevalentemente per la produzione di energia elettrica, e in minima parte per altri usi.

5. La biomassa si suddivide fra produzione elettrica, nelle centrali a biomassa, e per il riscaldamento residenziale (legna, pellet) ed altri usi.

6. I prodotti petroliferi sono usati prevalentemente per il trasporto e, in parte per usi non energetici (plastiche, petrolchimica ecc)

Si deve tener conto anche del fatto che nella voce "calore" dell'IEA sono incluse tutte le forme di calore commerciabile. Quindi oltre al gas fornito, ad esempio, alle utenze familiari e industriali per il riscaldamento, si conteggia anche il calore fornito via teleriscaldamento dalle centrali termoelettriche che forniscono questo servizio.

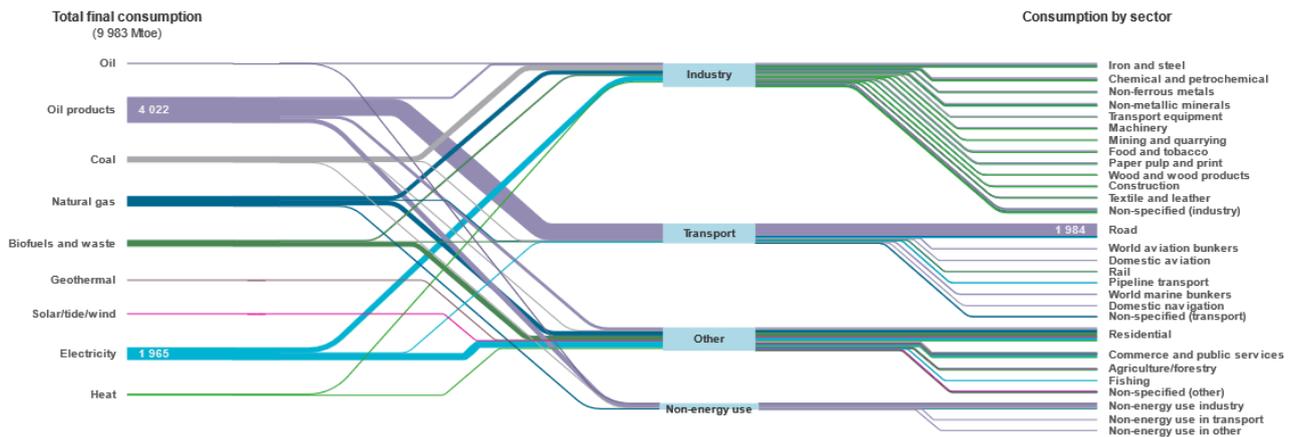


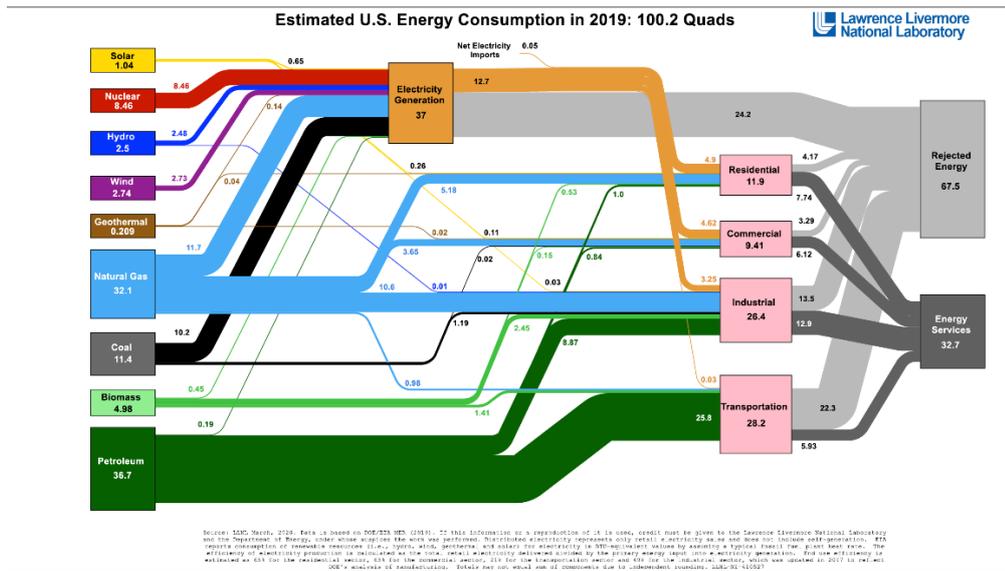
Figura 2. Il diagramma di Sankey degli usi finali di energia dell'IEA per il 2019, mostra i flussi energetici delle diverse forme commerciali di energia ed è la base dei bilanci statistici forniti dall'IEA. Per una versione più leggibile del diagramma si consiglia di andare alla pagina web.

Tabella 1. Usi finali di energia per fonti nel 2019 (dati IEA) in TWh. 1 Mtep = 1 Milione di tonnellate equivalenti di petrolio = 11,63 TWh. U.N.E. corrisponde all'uso non energetico delle fonti. I valori sono tratti dal diagramma interattivo riportato nel riferimento n.13).

TWh	Industria	Trasporti	Altro	U.N.E.	Totale	%fonti
Petrolio	23,3	0,0	0,0	151,2	174,5	0,2%
Prodotti petroliferi	3396,0	30691,6	4931,1	7757,2	46775,9	40,3%
Carbone	9048,1	11,6	1418,9	581,5	11060,1	9,5%
Gas Naturale	7140,8	1384,0	8222,4	2267,9	19015,1	16,4%
Biocombustibili-rifiuti	2744,7	1104,9	8199,2	0,0	12048,7	10,4%
Geotermico	0,0	0,0	255,9	0,0	255,9	0,2%
Solare, eolico, etc	0,0	0,0	383,8	0,0	383,8	0,3%
Energia elettrica	9571,5	418,7	12862,8	0,0	22853,0	19,7%
Calore	1686,4	0,0	1872,4	0,0	3558,8	3,1%
Totale	33610,7	33610,7	38146,4	10757,8	116125,6	100,0%
%impieghi	28,9%	28,9%	32,8%	9,3%	100,0%	

Possiamo analizzare graficamente i consumi finali per le diverse fonti riportate. Ad esempio in figura 4 riportiamo il consumo di petrolio e prodotti petroliferi nei diversi settori. Da questa figura si vede che il 65% dei prodotti petroliferi, benzina, gasolio ed

altri prodotti della raffinazione, vengono consumati prevalentemente nel settore del trasporto.



In questo settore fa la parte del leone il trasporto su gomma che è responsabile di circa tre quarti dei consumi totali, il restante quarto è attribuito alla navigazione internazionale e a quella all'interno delle acque territoriali, al

Figura 3. Diagramma dei flussi energetici negli USA nel 2019. Le unità sono Quads pari a 1,055 EJ.

trasporto aereo e a quello su ferrovia.

In figura 5 e 6 riportiamo i consumi finali per il carbone e il gas.

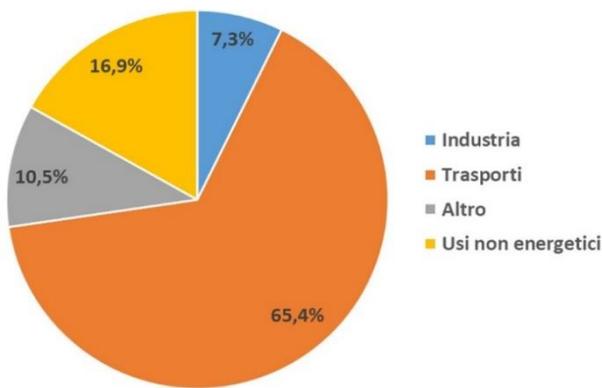


Figura 4. Consumi finali di petrolio e prodotti petroliferi.

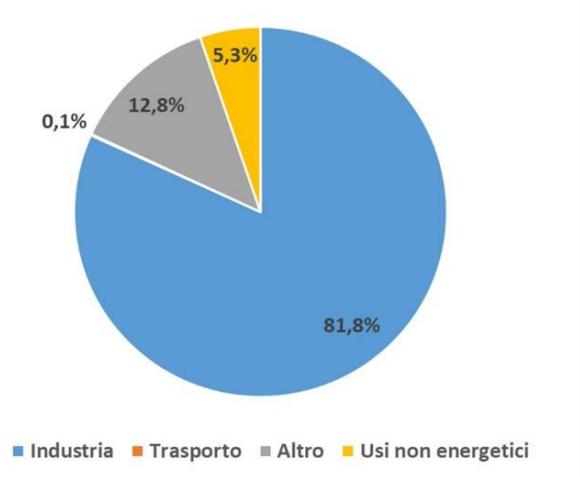


Figura 5. Consumi di

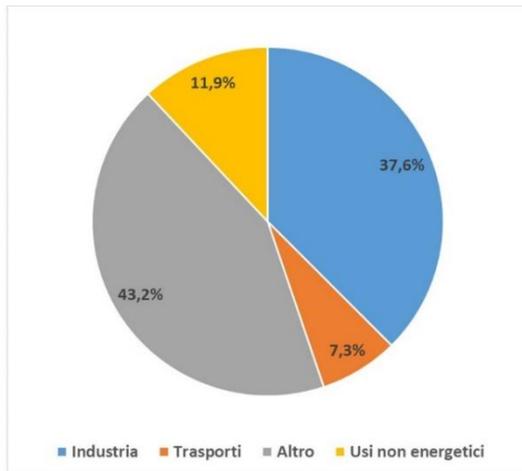


Figura 6. Consumi di gas per settore.

Diseguaglianze.

In termini di consumi di energia pro-capite la situazione globale è caratterizzata, come si può immaginare, da forti diseguaglianze fra aree geografiche e stati, e all'interno degli stati fra diverse classi sociali. La povertà energetica rispecchia direttamente quella economica.

Per l'anno 2019, cioè prima della pandemia, l'energia pro-capite disponibile (ed il corrispondente numero di schiavi) in una serie di paesi campione è riportata in tabella 2.

Tabella 2. Energia e potenza procapite per alcuni paesi campione e per il Mondo.

Paese	Energia (TWh)	Potenza (TW)	Popolazione (milioni ab.)	Potenza pro-capite (kW)	N. schiavi
Bangladesh	384	0,04	167	0,3	1
Rep.Dem. Congo	221	0,03	90	0,3	1
India	7.327	0,84	1400	0,6	3
Africa	15.910	1,82	1340	1,4	7
Mondo	116.102	13,25	7500	1,8	9
Cina	24.458	2,79	1450	1,9	10
Brasile	4.350	0,50	215	2,3	12
Italia	1.372	0,16	60	2,6	13
Germania	2.582	0,29	84	3,5	18
Russia	6.059	0,69	146	4,7	24
USA	18.468	2,11	334	6,3	32

Nella tabella 2 si è scelto di usare come unità di misura i TWh (10^{12} Wh, si veda il BOX3 per le unità energetiche e i prefissi) perché in vista della transizione ad un mondo elettrico la conversione da questa unità ai valori di potenza elettrica in Watt è più agevole. Quindi nella seconda colonna abbiamo i valori dei consumi finali di energia per il corrispondente paese in TWh (riferirsi al BOX3 per le unità di misura e i loro multipli),

nella terza colonna abbiamo la potenza corrispondente (che corrisponde a dividere il valore totale in TWh per il numero di ore in un anno che sono 8760). L'utilità di questo valore dipende dal fatto che tutti noi abbiamo generalmente un contratto di fornitura di alcuni kW, generalmente 3 kW, e abbiamo quindi un'idea più o meno precisa di cosa voglia dire avere a disposizione tale potenza come flusso di energia elettrica.

Nella quarta colonna troviamo la popolazione approssimativa dei paesi presa da [internet](#).¹⁴ Dividendo la potenza totale per la popolazione si ottiene la potenza pro-capite. L'ultima colonna mostra, indicativamente, a quanti schiavi umani corrisponde questa potenza pro-capite, assumendo che la potenza sostenibile da un maschio in salute di *Homo sapiens* sia pari a 200 W. In realtà tale potenza è sostenibile per poco più di 1 ora, qui invece i nostri schiavi eseguono un lavoro ininterrotto 24/24 365 giorni all'anno.

Come si vede mentre in alcuni paesi, incluso il nostro, si gode di una notevole o discreta abbondanza di energia, ci sono paesi come il Bangladesh e gran parte dell'Africa, i quali cittadini, mediamente, hanno l'energia per tenere accese alcune lampadine, o fare un pieno di benzina all'anno. E siccome anche questi sono dati medi sulla popolazione dei paesi, e siccome anche nei paesi più poveri non manca chi ha risorse sufficienti e perfino abbondanti, si capisce perché in Bangladesh e nell'Africa sub-sahariana ci sono vasti strati della popolazione che vive nell'indigenza economica, alimentare la cui causa ultima è quella energetica.

Il potenziale produttivo delle rinnovabili.

Ora passiamo a considerare la produzione da rinnovabili. La prima cosa che si deve considerare quando si parla delle fonti energetiche o, meglio, degli impianti che forniscono energia a partire da una data fonte, è il cosiddetto fattore di capacità. Il fattore di capacità di un impianto che fornisce energia è definito come¹⁵:

il rapporto x/y tra la produzione di energia elettrica effettiva " x " fornita da un impianto di potenza durante un periodo di tempo, solitamente un anno, e la fornitura teorica di energia " y " che avrebbe potuto offrire se avesse operato alla piena potenza nello stesso periodo di tempo".

Per un impianto fotovoltaico la produzione reale x corrisponde ad una frazione non molto grande della produzione potenziale. Intanto perché c'è l'intermittenza giorno-notte, poi perché nei giorni nuvolosi l'impianto produce meno che nei giorni di sole, infine perché anche durante il giorno non tutte le ore sono egualmente produttive. Ovviamente siccome il vento soffia anche di notte il fattore di capacità dell'eolico è superiore.

Nei calcoletti che seguono assumiamo un fattore di capacità del 15% per il fotovoltaico e del 25% per l'eolico.

In tal caso in un anno ogni GWp di potenza fotovoltaica genera 1,3 TWh di energia (dove come detto la p a deponente significa che la potenza indicata è quella massima in condizioni ottimali, cioè la potenza di "picco").

Il calcolo è semplice. Prima calcoliamo l'energia che produrrebbe l'impianto se lavorasse tutte le ore dell'anno alla massima potenza:

$$10^9 \text{ W} * 365 \text{ giorni/anno} * 24 \text{ ore/giorno} = 10^9 \text{ W} * 8760 \text{ ore/anno} = \mathbf{8,760 \cdot 10^{12} \text{ Wh/anno}}$$

Questa è l'energia che produrrebbe un impianto FV da 1 GW di potenza massima, se lavorasse tutto l'anno alla potenza di picco. Il che ovviamente non succede a causa dell'intermittenza circadiana (notte- giorno), dell'aleatorietà meteorologica e della variabilità stagionale. Ed è qui che interviene il fattore di capacità. Moltiplicando l'energia massima possibile per il fattore di capacità si ha una stima della produzione di un impianto di energia rinnovabile con una determinata potenza di picco. Con il dato dei fattori di capacità indicati si ha:

$$\mathbf{8,760 \cdot 10^{12} \text{ Wh/anno} * 0,15 = 1,314 \cdot 10^{12} \text{ Wh/anno}} \quad [1]$$

Per un impianto fotovoltaico di 1 GW di potenza di picco (1 GW_p) il quale produce quindi mediamente in 1 anno 1,3 TWh di energia. **Tenetelo a mente.**

$$\mathbf{1 \text{ GW}_p \rightarrow 1,3 \text{ TWh/anno}}$$

Prendiamo il TFC globale nel 2020. Si tratta come abbiamo detto di $\mathbf{418 \text{ EJ} = 418 \cdot 10^{18} \text{ J}}$ che corrispondono a:

$$\frac{418 \cdot 10^{18} \text{ J}}{3600 \text{ J/Wh}} = \mathbf{1,16 \cdot 10^{17} \text{ Wh}}$$

Ci chiediamo: quanta potenza fotovoltaica si dovrebbe installare per coprire questo consumo energetico globale, nell'ipotesi che l'energia prodotta potesse essere immagazzinata e distribuita in tutto il mondo?

Il problema si risolve con una semplice equivalenza, tenendo conto della [1] quella che ci dice che per il fotovoltaico con un GW_p di potenza di ottengono circa 1,3 TWh/anno (ve l'avevamo detto di tenerlo a mente).

$$10^9 \text{ W}_p : 1,314 \cdot 10^{12} \text{ Wh/a} = x \text{ W}_p : 1,16 \cdot 10^{17} \text{ Wh/a}$$

$$x = \frac{1,16 \cdot 10^{17} * 10^9}{1,314 \cdot 10^{12}} = \mathbf{8,84 \cdot 10^{13} \text{ W}}$$

Per produrre l'energia consumata nel 2019 nel mondo ci vorrebbero quindi circa 90 TW di potenza di picco fotovoltaica o rifacendo il calcolo con il fattore di capacità dell'eolico, circa 53 TW di potenza di picco da impianti eolici.

Ovviamente si può immaginare un mix con un po' di fotovoltaico ed un po' di eolico. Attualmente la potenza rinnovabile di eolico e fotovoltaico nominale installata nel mondo corrisponde a circa **1500 GW, cioè 1,5 TW**. C'è ancora parecchia strada da fare per arrivare a 90 TW

Ci chiediamo ora che superficie dovrebbe coprire un'unica centrale fotovoltaica che produca tutti l'energia mondiale del 2019. Per fare una stima ci dobbiamo prima

chiedere quanta superficie di territorio occupa un impianto a parità di potenza installata? Solitamente si stima la quantità di energia installabile su un ettaro (ha) di superficie terrestre e si riporta il dato in ettari per MWp. (ha/MWp). Questo dato ha avuto una rapida evoluzione negli ultimi anni di sviluppo del fotovoltaico. Se dieci anni fa¹⁶ erano riportati valori medi intorno ai 3 ha/MWp, oggi questo valore si è dimezzato e per il futuro possiamo immaginare un ulteriore miglioramento delle cifre. Facciamo un calcoletto per un intervallo che va da 3 a 1 ha/MWp e vediamo quanto territorio dobbiamo occupare per produrre tutta l'energia consumata nel 2019 usando solo la fonte fotovoltaica. Si tratta solo di una stima che ci serve per avere un ordine di grandezza e una misura delle potenzialità dell'energia solare e delle fonti rinnovabili in generale nel prossimo futuro.

Il MW corrisponde a 1 milione di W = 10^6 W quindi:

$$\text{Superficie} = \frac{X \text{ ha} * 90 \cdot 10^{12} \text{ W}}{10^6 \text{ Wp}} = X * 9 \cdot 10^8 \text{ ha} \quad [2]$$

Dove $X = 1 - 3$ ha/MWp. Corrispondentemente l'area sarebbe di 90 o 270 milioni di ettari rispettivamente per i due estremi dell'intervallo scelto. 1 ha è pari a diecimila metri quadrati o 0,01 km² quindi l'impianto unico mondiale fotovoltaico sarebbe nell'intervallo fra 2.700.000 e 900.000 Km² pari ad una percentuale delle terre emerse che va da 1,8% (la superficie del Kazakistan) a 0,6% (la superficie del Venezuela).

In tabella 3 riportiamo il calcolo per i paesi campione di tabella 2 con i valori dei TFC dell'anno 2019. Nell'ultima colonna abbiamo riportato anche il numero di pale eoliche da 5 MWp necessarie per produrre il fabbisogno indicato supponendo che il fattore di capacità dell'eolico sia 0,25. La potenza delle pale eoliche è andata aumentando nel corso degli anni ed oggi non è irrealistico pensare che nei prossimi anni possano essere sviluppate torri eoliche da 10 MWp il che implicherebbe un dimezzamento delle cifre di tabella 3 per quanto riguarda il numero di tali torri.

Ovviamente nessuno immagina di accentrare la generazione del fabbisogno energetico globale o di un intero paese, in un unico impianto con superficie di milioni o di centinaia di migliaia di km², ma **il calcolo da un'idea del potenziale del fotovoltaico e delle rinnovabili in generale.**

Come sempre il diavolo sta nei dettagli. **Il fattore di capacità che abbiamo scelto è solo indicativo ed è molto dipendente dalla produttività solare ed eolica dei singoli siti, ci sono luoghi in cui il fotovoltaico è più produttivo e luoghi dove il vento spira praticamente in continuazione.** Ma questo non vuole essere un lavoro analitico, ma semplicemente dare degli ordini di grandezza quantitativi di quello che "deve essere fatto", che è ovviamente molto più di quanto stiamo facendo, ma forse non impossibile.

Tabella 3. Superficie impegnata da un ipotetico impianto fotovoltaico della potenza di picco tale da coprire il fabbisogno del 2019 dei consumi finali totali (TFC) di alcuni paesi campione e del Mondo intero. Per ogni paese o gruppo di paesi i dati relativi alla superficie impegnata nella produzione di energia fotovoltaica hanno i due valori limite dell'intervallo scelto 3-1 ha/MWp. ^{a)} Potenza di picco. ^{b)} Lato di un quadrato con la superficie richiesta.

Anno di riferimento 2019 (dati IEA 2021)	Consumo (TWh)	P ^{a)} (TWp)	Superficie (km ²)	% superficie	L (km) ^{b)}	n. pale eoliche da 5 MWp (migliaia)
Bangladesh	384	0,29	9.000 3.000	6 2	94 54	35
R. Dem. Congo	221	0,17	5.000 1.680	0,22 0,07	71 41	20
India	7.330	5,6	167.000 55.800	5,0 1,7	409 236	700
Africa	15.910	12,1	363.000 121.000	1,2 0,4	600 350	1.400
Mondo	116.102	88,0	2.650.000 880.000	1,77 0,59	1600 940	11.000
Cina	24.458	18,6	560.000 186.000	5,82 1,94	750 430	2.200
Brasile	4.350	3,31	99.300 33.100	1,17 0,39	315 182	400
Italia	1.372	1,04	31.000 10.400	10,38 3,46	177 102	125
Germania	2.582	1,96	58.900 19.600	16,49 5,5	409 140	235
Russia	6.059	3,85	116.000 38.500	0,67 0,22	340 196	460
USA	18.468	14,1	422.000 141.000	4,29 1,43	650 375	1.700

Ricordiamoci anche che siamo partiti da un presupposto su cui torneremo, e cioè **l'esistenza di un sistema di distribuzione e di accumulo dell'energia che permetta di utilizzare tutta l'energia elettrica prodotta dalle fonti rinnovabili.** In assenza di adeguati sistemi di distribuzione e di accumulo, una parte l'energia prodotta andrebbe irrimediabilmente perduta mentre, negli inevitabili periodi di mancata o bassa produzione, la domanda non potrebbe essere soddisfatta. Se la situazione si prolunga nel tempo si verifica una caduta verticale di ogni azione legata alla disponibilità di energia, una specie di letargo antropico obbligato. Succede già che si debba "buttar via" una parte dell'energia che produciamo, anche se l'energia che produciamo è due ordini di grandezza meno di quella, *carbon free*, di cui avremmo bisogno. Ad esempio durante l'anno nei momenti di massima insolazione o di vento

abbondante le autorità per l'energia sono costrette a distaccare alcuni impianti. In Belgio durante la notte le autostrade sono illuminate anche nei tratti extraurbani perché c'è un eccesso di energia prodotta dalle centrali termonucleari, che non si sa come usare.

Il potenziale futuro delle fonti rinnovabili è aumentato da almeno altri due fattori, il primo è strettamente fisico e il secondo demografico. Il primo fattore è legato all'efficienza.

Efficienza.

Come visto in figura 3, il LLNL stima le perdite energetiche che si accumulano nel processo che va dalla produzione delle fonti primarie, agli usi finali e, infine, all'energia che effettivamente utilizziamo nelle nostre attività che nella figura del LLNL è definita come “servizi energetici” e che potremmo semplicemente definire “energia utile”. Si tratta dell'energia che effettivamente muove le ruote o l'elica del nostro mezzo di trasporto, il calore che regola la temperatura dei nostri ambienti, la potenza elettrica che ci fornisce l'illuminazione degli ambienti e fa funzionare i nostri elettrodomestici e mille altre macchine che usiamo quotidianamente a casa o al lavoro, inclusi i computer, i cellulari ecc.

Nel nostro sistema energetico in cui prevalentemente convertiamo in energia utile l'energia chimica contenuta nelle fonti fossili noi perdiamo ossia trasformiamo in calore circa il 50% dell'energia.

In tabella 4 riportiamo i dati di alcuni paesi significativi, tratti dalla pagina dedicata ai diagrammi di flusso energetici del [LLNL](#).

I dati riportati sono completi soltanto per gli Stati Uniti dal 2011 al 2020. Per gli altri stati sono lacunosi. Prendiamo i dati relativi all'anno 2017 per il quale c'è una certa completezza dei dati globali.

Poiché l'IEA conteggia le perdite a carico della produzione elettrica, ma non, almeno non esplicitamente, altre perdite a livello di usi finali ci dobbiamo accontentare dei dati parziali del LLNL, questo comunque ci permette di fare un discorso sugli ordini di grandezza dell'energia di cui abbiamo bisogno.

I dati di tabella 4 ci dicono che a livello globale l'energia utile è circa il 50% degli usi finali, poiché anche le perdite del

settore elettrico sono di questo ordine di grandezza possiamo dire che **l'energia utile è circa il 50% del valore di TFC indicato dall'IEA**. Anche in questo caso non vogliamo

EJ (anno 2017)	E. utile	perdite	%
Italia	2,500	2,710	48%
Germania	4,700	5,080	48%
USA	31,000	44,300	43%
Cina	45,000	46,000	49%
India	13,000	12,150	52%
Media 2017			48%

Tabella 4. Energia utile e perdite per alcuni paesi campione nel 2017.

essere precisi, ma fornire un ordine di grandezza dell'energia utile di cui abbiamo bisogno.

Quindi per l'anno 2019 globalmente avremmo bisogno di 210 EJ (la metà approssimata alla decina dei 418 EJ). Nell'ipotesi di una transizione a tutto elettrico e tutto rinnovabile, l'efficienza energetica cambierebbe in modo sostanziale perché i motori elettrici hanno efficienze molto maggiori di quelli a scoppio. Cioè convertono l'energia loro fornita con una efficienza che raggiunge oltre il 90%. **Se si fa l'ipotesi che sia possibile fornire a tutti gli utenti nei diversi settori, energia elettrica tale da soddisfare gli usi indicati sarebbe possibile, in principio, ridurre l'input di energia** di un fattore che stimiamo qui di seguito.

Supponiamo che il nostro fabbisogno di energia utile sia dunque 210 EJ, Questo dovrebbe essere sostenuto da un flusso di energia totale X, che, nel "Mondo elettrico e rinnovabile" dei nostri sogni, avrebbe un'efficienza di conversione del 90%. Dunque i nostri 210 EJ sarebbero il 90% di X:

$$X = \frac{100 * 210}{90} = 233 EJ$$

Poco più della metà del TFC attuale e ad emissioni estremamente basse. Un vero sogno. Facendo riferimento alla tabella 3, l'estensione degli ipotetici impianti fotovoltaici ed il numero di torri eoliche da 5 MWp potrebbe essere ridotta alla metà. Quindi, ad esempio, per il mondo intero basterebbe lo 0,3% delle terre emerse coperto a fotovoltaico per produrre l'energia necessaria, per l'Italia la superficie si ridurrebbe a 5000 km², pari alla superficie della provincia di Palermo da distribuire sui tetti di case e capannoni industriali e, in parte, sui terreni agricoli marginali.



Figura 7. La provincia di Palermo 4492 Km²

Tutto molto bello. Manca qualcosa? Sì, manca qualcosa! La capacità di immagazzinare l'energia solare ed eolica in modo da compensare il fatto che esse non sono costanti.

Tutto il discorso fatto fino a qui infatti si basa sull'ipotesi che esista un sistema di stoccaggio e distribuzione dell'energia che funzioni sia a livello micro (locale, intra-nazionale), meta (ad esempio Europa, e paesi limitrofi) e macro (livello globale). Di tutto questo purtroppo c'è ancora troppo poco anche se le tecnologie sono già tutte disponibili.

Stoccaggi e rete.

Come abbiamo già accennato i principali problemi delle nuove rinnovabili sono l'intermittenza circadiana delle fonti solari, oltre alla variabilità stagionale e all'aleatorietà meteorologica. Quest'ultima attenuata dal fatto che il tempo meteorologico è largamente prevedibile nelle 48 ore. Per regolare questo problema si deve ricorrere a sistemi di accumulo di breve durata, e per questo ci sono, ad esempio, le batterie e i sistemi di accumulo di più lunga durata come le stazioni di pompaggio idroelettriche. I più complessi e attualmente inesistenti, sono quelli che prevedono l'accumulo stagionale. Gran parte della popolazione umana vive in zone con forti differenze di insolazione fra inverno ed estate. Per questa ragione si rende necessario l'accumulo dell'energia solare in eccesso in estate per riutilizzarla in inverno.

Per quanto riguarda gli stoccaggi a breve medio periodo possiamo contare sulle batterie, sia quelle associate agli impianti fotovoltaici domestici sia quelle, ad esempio, della flotta di mezzi elettrici. Ovviamente questi sistemi servono a coprire in parte le necessità circadiane, ma non sono sufficienti a compensare tutta la variabilità delle rinnovabili. L'energia mancante per soddisfare la domanda viene prodotta con le centrali termoelettriche a gas (turbogas) e, in misura molto limitata, dai sistemi di accumulo idroelettrico che, tuttavia, sono stati dimensionati a suo tempo e vengono gestiti per fini diversi, principalmente per aumentare il valore economico dell'energia. Si acquista energia notturna o nucleare per pompare acqua in quota e scaricarla (con una perdita del 25-30% di efficienza) nelle ore di punta della domanda, durante il giorno. Operazione che si fa all'occorrenza, ripetutamente, per momenti di breve durata. L'insieme della loro capacità di accumulo è molto limitata, di ordini di grandezza inferiore a quella che servirebbe per uno stoccaggio di energia in grado di supplire a una quota importante di mancata produzione rinnovabile che si protrae per mesi.

La tecnologia necessaria è più che matura da tempo, ma per affrontare in questo modo quel tipo di problema sarebbe indispensabile accumulare in quota una quantità molto più elevata di acqua, da poter scaricare pressoché in continuo, durante i periodi di poca produzione delle fonti rinnovabili. Si tratterebbe di realizzare, distribuita su tutto il territorio nazionale, una serie molto numerosa (credibilmente almeno diverse centinaia) di sistemi a doppio bacino, a monte e a valle delle turbine, in modo da conservare l'acqua una volta scaricata. Un sistema di stoccaggio gigantesco che sarebbe utilizzato una o, al massimo, due volte all'anno per periodi di settimane o anche di qualche mese.

Oggi per gli stoccaggi stagionali non esiste praticamente nulla se non gli stoccaggi di gas naturale, ma noi siamo partiti dal presupposto di eliminare l'uso del gas fossile.

Quindi andrebbero creati, quasi dal nulla, accumuli di “combustibili verdi” cioè generati interamente da fonti rinnovabili.

I prototipi industriali esistenti sono l'idrogeno verde generato da elettrolisi dell'acqua utilizzando la potenza elettrica fornita dalle rinnovabili e il metano prodotto attraverso il processo Sabatier.¹⁷ Non entriamo nei dettagli tecnici dei due sistemi. Sul primo ci sono grandi aspettative,¹⁸ il secondo permetterebbe di utilizzare immediatamente l'infrastruttura esistente almeno nei paesi in cui esiste un sistema di distribuzione del gas metano e anche una parte delle centrali elettriche a ciclo combinato.

È molto difficile anche solo immaginare sistemi di stoccaggio globali validi per qualsiasi area geografica e paese. In effetti le differenze climatiche e di latitudine rendono una simile stima molto incerta. Ci limiteremo perciò ad una stima delle necessità che lo stoccaggio imporrebbe ad un sistema come quello dell'Italia e dell'Europa in un'ottica di transizione completa.

Facciamo una stima di massima per l'Italia. Partiamo dal valore stimato del fabbisogno annuale di tabella 3 ricalcolato tenendo conto dell'efficienza della conversione. Quanta energia solare abbiamo bisogno di stoccare in estate per l'inverno? Diciamo 1-2 mesi. Il fabbisogno attuale è 1400 TWh ma l'abbiamo ridotto a 780 TWh (facciamo 800 TWh tutto incluso) con il completamento della magica transizione a tutto elettrico. Questa energia è fornita da un parco FV (dove, ricordate? 1 GWp produce 1,3 TWh/anno) della potenza di picco data dalla formula seguente:

$$\frac{800 \text{ TWh/anno}}{1,3 \text{ TWh/GWp}} = 615 \text{ GWp}$$

Il fabbisogno di 2 mesi è 130 TWh. Supponendo che l'efficienza totale dell'accumulo (sole-elettricità-gas-elettricità) sia del 30-40%, prendiamo 30 per essere conservativi, ci vuole un surplus di $130 * (100/30) = 434$ TWh. Facciamo 450 TWh per semplicità. La potenza fotovoltaica che produce questo accumulo corrisponderebbe a circa 350 GWp, da aggiungere ai 615 GWp di cui sopra. Questo a regime di transizione a tutto elettrico-tutto rinnovabile completata.

Vi sono buone ragioni per pensare che questo scoglio, non insuperabile ma arduo, possa essere superato o reso meno oneroso. Ad esempio si può immaginare disposizioni degli impianti tali da compensare la produzione inverno –estate. Secondo alcuni infatti disponendo i pannelli fotovoltaici verticalmente si avrebbe una minore produzione estiva, ma una maggiore produzione invernale rispetto alla normale disposizione a 45 o 60° rispetto alla verticale. Su questo tema della variabilità delle rinnovabili, comunque, si sta lavorando intensamente ed è possibile immaginare che dal cappello possa nascere qualche soluzione praticabile.¹⁹

Il sogno transnazionale. (eliminati i conflitti in corso e quelli potenziali)

Si può immaginare una rete di distribuzione mondiale in cui le aree a oriente alimentano le necessità notturne delle aree verso occidente. Durante le 24 ore, prima Asia e Australia alimentano Europa e Africa, poi Europa e Africa alimentano le Americhe, infine le Americhe alimentano Asia e Oceania, e ricomincia il ciclo. Le necessarie linee trans-continentali in corrente continua sono una possibilità tecnologica già possibile oggi.

Le produzioni settentrionali di energia eolica, e meridionali di energia solare, assieme ai collegamenti est-ovest che collegano produzione e domanda sfasate per orario, servirebbero da bilanciamento in continuo di domanda e offerta tra paesi diversi. Come gli eventuali stoccaggi potrebbero supplire a sbilanciamenti stagionali.

Ovviamente tutti questi cambiamenti sono impensabili senza un profondo cambiamento dell'assetto geopolitico e della struttura della società umana a livello globale e nei singoli paesi. Un sistema di dorsali intercontinentali concepito per scambiare energia rinnovabile sarebbero anche la migliore garanzia per la pace mondiale. Oggi per motivi tecnici che non stiamo ad approfondire, la potenza elettrica viene trasportata attraverso linee in corrente alternata che soffrono di perdite non indifferenti. Le dorsali intercontinentali dovrebbero funzionare in corrente continua per minimizzare queste perdite. Non c'è nulla di fantascientifico in questa idea (a parte le considerazioni geopolitiche) le tecnologie per realizzare un'infrastruttura del genere sono già disponibili sia per le tratte in terraferma che per quelle oceaniche. Vogliamo aggiungere che queste considerazioni smentiscono la visione delle rinnovabili come fonti autarchiche legate ad un improbabile ritorno ad una totale rilocalizzazione delle attività umane. Non tutti i vantaggi della globalizzazione andrebbero perduti e, forse, rimarrebbero in piedi proprio quelli più desiderabili: l'interscambio dell'energia solare e quello culturale.

Giustizia energetica.

Come visto nelle tabelle 2 e 3 il mondo è affetto da una grave forma di ingiustizia energetica che è alla base di quella economica e sociale. Come si può migliorare questa condizione? In attesa che la popolazione inizi a scendere, fenomeno che dovrebbe iniziare intorno alla metà di questo secolo, si deve permettere alle società meno sviluppate di disporre di maggiori quantità di energia pro-capite. Questa sarebbe anche una salvaguardia nei confronti degli scenari più catastrofici di collasso della popolazione. Una popolazione che si riduce lentamente, in un processo di aumento medio del benessere, può stabilizzarsi, specialmente nei paesi a più alta fertilità, ad un livello più basso senza andare incontro all'estinzione.

La società dei 2 kW pro-capite.

Progetto della società 2 kW. Questa dovrebbe essere l'energia utile di ciascun cittadino del mondo. Secondo il progetto sviluppato al Politecnico di Zurigo tale disponibilità potrebbe essere la base di un ragionevole benessere per tutti.



Per una popolazione di 8 miliardi di persone 2 kW pro-capite significa un totale di 504 EJ, sembra un'utopia. Tale potenza necessaria totale, in un'economia globalmente stazionaria, quindi più sobria soprattutto per chi oggi tende a sprecare molto, ed una popolazione in declino, dovrebbe calare costantemente dal 2050 alla fine del secolo. Affinché il rientro della popolazione umana non sia catastrofico possiamo assumere che la popolazione scenda raggiungendo il livello di 4 miliardi (come nel 1974) nel 2100. A quel punto, supponendo costanti le altre variabili, consumeremo la metà della potenza indicata. L'idea ottimistica di base è che avendo tutti una quantità equa di energia si possa attenuare anche il rientro della popolazione evitando il collasso e la possibile estinzione.

Cambiamento climatico e fattori demografici.

Anche con un programma di cambiamento radicale del sistema energetico globale sarà inevitabile affrontare gli effetti del cambiamento climatico con aumenti di temperatura ben superiori a quelli proposti come limite massimo nelle varie COP: 1,5 e 2 °C di anomalia rispetto ai livelli preindustriali. Non raccontiamoci favole: la realizzazione dell'auspicio è molto improbabile. In tabella 5 sono riportate le variazioni di temperatura riportate nel rapporto dell'IPCC del 2021²⁰ per diversi scenari di emissioni ipotizzati.

Tabella 5. Scenari (SSPs: Shared Socio-economic Pathways) di aumenti di temperatura (°C rispetto il periodo 1850-1900). Durante il 21° secolo un aumento di $T > 2^{\circ}\text{C}$ sarebbe estremamente probabile nello scenario intermedio (SSP2-4.5), mentre negli scenari di emissioni elevate (SSP3-7.0) e molto elevate (SSP5-8.5) sarebbe raggiunto già nel medio termine (ca 2050).

Scenario	Near term, 2021–2040		Mid-term, 2041–2060		Long term, 2081–2100	
	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7

Una parte del pianeta, nella fascia equatoriale, rischia di diventare inabitabile per l'uomo. Dovremo affrontare fenomeni di migrazione di massa verso zone climatiche

più vivibili, ma meno estese (ricordarsi della fallacia di Mercatore).‡ Forse quattro miliardi di persone potranno adattarsi a vivere in una fascia climaticamente accogliente a nord del Tropic del Cancro e, per quel poco che c'è, a sud del Tropic del Capricorno. Questa ridotta popolazione ancora in lenta riduzione (verso i due miliardi nel 2150), in possesso di tecnologie avanzate e adottando sistemi ecologicamente e socialmente sostenibili, potrà ancora vivere in un mondo drasticamente mutato rispetto a quello che conosciamo, ma evitando scenari distopici alla Mad Max. Scenari che restano possibili se non affronteremo i problemi subito abbandonando l'illusione che tutto possa essere lasciato alla legge di mercato.

Conclusioni.

Abbiamo semplificato. Volevano farci un'idea generale degli ordini di grandezza delle sfide energetiche e ambientali che proponiamo quando parliamo di urgenza della transizione. Questo non è un programma energetico, è un quadro generale di quello che potrebbe e dovrebbe essere fatto a partire da subito per completare la transizione, cioè l'uscita dai combustibili fossili, entro il 2050 a partire dalle e nei limiti delle informazioni in nostro possesso. Per fare programmi energetici dettagliati ci vogliono risorse, anche economiche, che noi non abbiamo e non possiamo avere. Il nostro intento è mettere in forma comprensibile gli aspetti quantitativi della transizione che sono i primi che debbono essere affrontati quando si parla di energia e ambiente: di quanta energia abbiamo bisogno e di quanta possiamo fare a meno.

Un ragionamento generale e perfino generico che lascia solo parzialmente risolti problemi non indifferenti del sistema industriale in cui viviamo. Il trasporto aereo e quello marittimo.

Un altro problema che deve essere affrontato è quello delle attività industriali che necessitano alte temperature: siderurgia, metallurgia, chimica ecc, tutte lavorazioni che oggi fanno uso dei combustibili fossili e dei loro prodotti. In parte le alte temperature possono essere generate usando proprio l'idrogeno o il metano verdi, di cui abbiamo parlato nel paragrafo sull'accumulo. Ma, da un punto di vista generale quello di cui abbiamo bisogno è chiederci di quanto acciaio, cemento, alluminio, plastica ecc abbiamo realmente bisogno in un'ottica di conservazione delle risorse e della biosfera e oltre la logica dello sperpero.

Resta fuori anche un altro problema: quello della disponibilità di altre risorse geologiche, oltre i combustibili fossili, che sono indispensabili in generale, come i fosfati per l'agricoltura, e in particolare per la transizione energetica: i metalli delle terre rare, il rame ecc.

Ciascuno di questi problemi può essere attenuato uscendo da un modello che assume acriticamente l'idea che "di più sia anche meglio". Ma non vogliamo ingenerare

‡ Nella proiezione di Mercatore le zone alle alte latitudini appaiono molto più estese di quello che sono in realtà, per cui si genera nell'immaginario collettivo l'idea che tutto sommato lo spazio vivibile sia molto più ampio di quello che è. Si veda la [mappa globale interattiva](#).

illusioni che sono poi la base di future delusioni: la transizione non sarà facile. Abbiamo un obiettivo e siamo in grado di ragionarci sopra in modo quantitativo. Le stime si aggiusteranno in corso d'opera, è sempre stato così, nella storia si naviga a vista. Una cosa che non possiamo permetterci oggi è di rimandare oltre il momento in cui adottare la rotta che porta all'obiettivo che ci siamo prefissati: tutto elettrico- tutto rinnovabile da qui al 2050.

Politicamente, da oggi in poi, quello che si deve fare è spingere i governi e le amministrazioni pubbliche a convertire tutti gli usi energetici in modo da favorire l'uso delle fonti rinnovabili. Per questo è necessario sviluppare rapidamente e in modo massiccio un'infrastruttura di produzione e accumulo basata su di esse, superando i molti impedimenti burocratici e legislativi che ancora ne rallentano lo sviluppo.

Le scelte politico/economiche nazionali, opportune e tempestive, possono risultare decisive per sviluppare rapidamente la produzione. Per gli accumuli esse rischiano di avere valenza limitata e saper supplire solo alle carenze circadiane o di breve periodo. Le compensazioni transnazionali (linee in Corrente Continua) necessitano anzitutto di accordi tra Stati che, a loro volta, dovrebbero integrare i loro sistemi con strutture di stoccaggio a dimensione stagionale. Per una soluzione nazionale (ma non solo) di questa ultima esigenza, è urgente destinare le necessarie risorse e costituire un gruppo dedicato di esperti e scienziati che metta a punto delle proposte tecniche percorribili all'altezza del problema che stiamo segnalando.

Noi capiamo benissimo le preoccupazioni di alcuni ambientalisti sull'impatto degli impianti fotovoltaici ed eolici. Purtroppo è un prezzo che si deve pagare per azzerare l'impatto, assai più importante, delle fonti fossili. Non è possibile perseguire la transizione predicando la povertà energetica perché nessuno ci seguirebbe e questa sarebbe la via assicurata verso un disastro ecologico e sociale. Nessuna attività è priva di impatti (a dire il vero neppure quella di altre specie viventi). Il bello della transizione che noi auspichiamo in questo documento, è che con nuovi, limitati, impatti ci libereremmo di tutta un'infrastruttura legata alle fossili che ha letteralmente devastato il nostro paesaggio e il nostro ambiente. Vaste aree dedicate alla produzione ed alla distribuzione di energia di origine fossile sarebbero restituite ad un uso sociale o restituite al resto della biosfera. Per le generazioni future, non solo umane, ci sarebbe tutto da guadagnare e pochissimo da perdere.

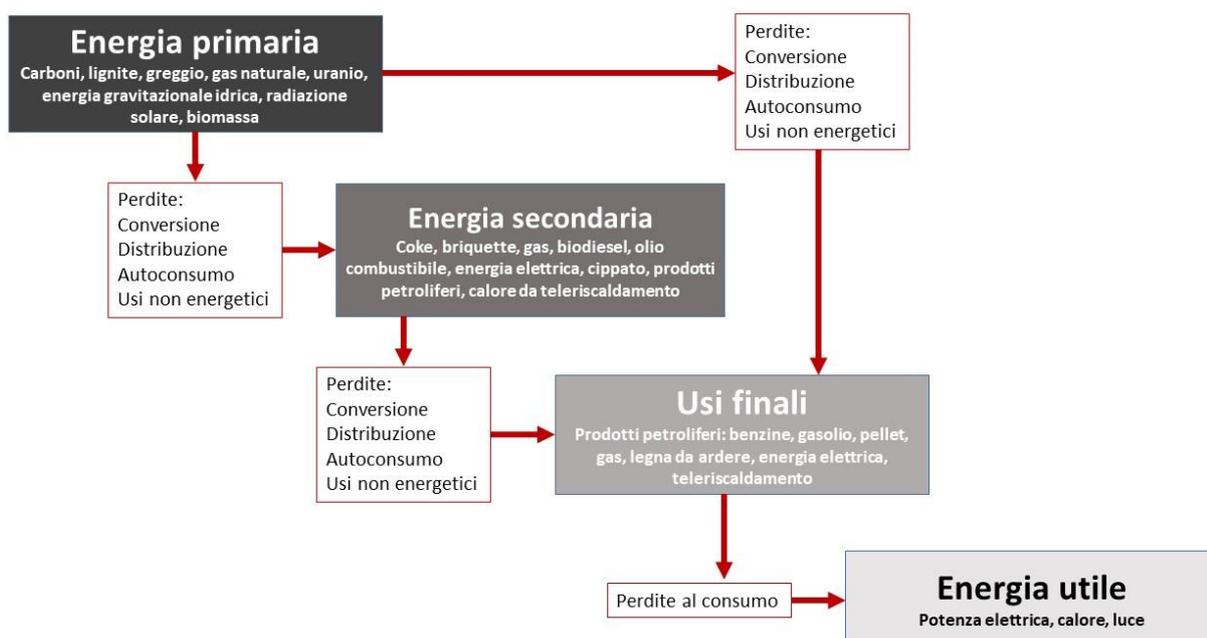
Appendice 1. Vettori energetici.

Sostanze e flussi che possono essere utilizzati per produrre energia utile, direttamente o tramite uno o più processi di conversione.

• **Primari:** sostanze e flussi che *non hanno ancora subito alcuna conversione tecnica*; il termine energia primaria si riferisce al contenuto energetico dei vettori primari e dei flussi di energia primari. *Dall'energia primaria* (eolica, solare ecc.) o *vettori di energia primaria* (carbone, lignite, petrolio greggio, biomassa) può essere prodotta energia secondaria o un vettore di energia secondaria

Secondari: vettori energetici prodotti *da primari o da altri vettori energetici secondari*, direttamente o da uno o più processi tecnici di conversione (benzina, gasolio, biodiesel, energia elettrica). L'energia secondaria si riferisce al contenuto di energia del vettore di energia secondaria e al corrispondente flusso di energia. Questa trasformazione di energia primaria è soggetta a perdite di conversione e/o di distribuzione

• **Finali:** flussi di energia *consumati direttamente dall'utente finale* (olio combustibile pronto all'uso all'interno di un serbatoio, trucioli di legno davanti al forno di combustione, teleriscaldamento alla sottostazione dell'edificio, energia elettrica al contatore, gas al contatore ecc). Risultato della conversione dei vettori secondari ed



eventualmente primari sottratte le perdite di conversione e distribuzione. Disponibili per la conversione in energia utile. • **Energia utile:** quella *a disposizione del consumatore* dopo l'ultimo passo di conversione per soddisfare i rispettivi requisiti o richieste di energia (riscaldamento, preparazione dei cibi, trasporti, utensili).

ASPO Italia, 23/3/2022

Bibliografia.

- (1) Bellanca, N.; Pardi, L. *O La Capra o i Cavoli: La Biosfera, l'economia e Il Futuro Da Inventare*, 1st ed.; Studi e saggi; Firenze University Press: Florence, 2020; Vol. 215. <https://doi.org/10.36253/978-88-5518-195-2>.
- (2) Bellanca, N.; Pardi, L. Quale transizione ecologica in un mondo basato sulle fossili? *Micromega*, 2021.
- (3) Bardi, U. Peak Oil, 20 Years Later: Failed Prediction or Useful Insight? *Energy Research & Social Science* **2019**, *48*, 257–261. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.09.022>.
- (4) Lade, S. J.; Steffen, W.; de Vries, W.; Carpenter, S. R.; Donges, J. F.; Gerten, D.; Hoff, H.; Newbold, T.; Richardson, K.; Rockström, J. Human Impacts on Planetary Boundaries Amplified by Earth System Interactions. *Nat Sustain* **2020**, *3* (2), 119–128. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0454-4>.
- (5) IEA Underreports Contribution of Solar and Wind to World Energy Mix. *Energy Post*, 2017.
- (6) Statistical Review of World Energy | Energy economics | Home <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (accessed 2019 -12 -14).
- (7) Understanding and using the Energy Balance – Analysis <https://www.iea.org/commentaries/understanding-and-using-the-energy-balance> (accessed 2022 -02 -14).
- (8) International Energy Agency. *Energy Statistics Manual*; OECD, 2004. <https://doi.org/10.1787/9789264033986-en>.
- (9) Halliday, D.; Walker, J.; Resnick, R. *Fondamenti di fisica. [3], [3]*; CEA: Milano, 2015.
- (10) Chazan, M. Toward a Long Prehistory of Fire. *Current Anthropology* **2017**, *58* (S16), S351–S359. <https://doi.org/10.1086/691988>.
- (11) Birol, D. F. Key World Energy Statistics 2021. 81.
- (12) Smil, V. *Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems*; MIT Press: Cambridge, Mass., 2008.
- (13) IEA Sankey Diagram <https://www.iea.org/sankey/#?c=World&s=Balance> (accessed 2022 -02 -16).
- (14) Population - Worldometer <https://www.worldometers.info/population/> (accessed 2022 -02 -21).
- (15) Fattore di capacità. *Wikipedia*; 2022.
- (16) Fotovoltaico e consumo del suolo: per un GWh servono 1,6 ettari. *QualEnergia.it*, 2013.
- (17) Reazione di Sabatier. *Wikipedia*; 2019.
- (18) Hydrogen https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-system-integration/hydrogen_en (accessed 2022 -03 -17).
- (19) The transition to clean energy is accelerating <https://www.tsungxu.com/clean-energy-transition-guide/> (accessed 2022 -03 -21).
- (20) Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, Ö., Yu, R., Zhou, B., Eds.; Cambridge University Press, 2021.