



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE ECONOMICHE ED AZIENDALI

“M. FANNO”

CORSO DI LAUREA IN ECONOMIA

PROVA FINALE

EROI DEGLI IMPIANTI EOLICI

RELATORE:

CH.MO PROF. FULVIO FONTINI

LAUREANDO: DAVIDE GRIGGIO

MATRICOLA N. 1147400

ANNO ACCADEMICO 2019-2020

Sommario

Abstract.....	4
Capitolo 1: Energia, fonti energetiche ed energie rinnovabili.....	5
1.1 Energia, concetti e definizioni	5
1.2 Le fonti energetiche	8
1.3 Le energie rinnovabili.....	9
Capitolo 2: EROI ed impianti eolici	12
2.1 Cos'è l'EROI.....	12
2.2 Gli impianti eolici, la non controllabilità del vento.....	16
Capitolo 3: Impianti eolici in Italia.....	19
3.1 L'energia nello Stato italiano	19
3.1.1 Intensità energetica	19
3.1.2 Sistemi energetici	21
3.1.3 Produzione e consumo.....	22
3.2 Energia prodotta dagli impianti eolici italiani	23
3.3 Computazione EROI italiano degli impianti eolici medio/piccoli	25
3.3.1 I costi energetici.....	26
3.3.2 Ricavi energetici	28
Conclusioni.....	29
Bibliografia.....	31

Abstract

Suddiviso su tre capitoli, il seguente lavoro si propone lo scopo di determinare quale sia l'EROI degli impianti eolici italiani.

Iniziando dal primo capitolo, saranno introdotti e definiti i concetti principali che riguardano l'energia per spiegare il concetto di efficienza energetica. Si passerà successivamente alle fonti energetiche mostrando la loro suddivisione per poi spiegare in dettaglio le energie rinnovabili. Nel secondo capitolo si parlerà dell'EROI, verrà definito a livello teorico e sarà spiegato il parallelismo col ROI, infine verrà illustrata la sua funzionalità evidenziando i pro e i contro di questo indice. Nel secondo paragrafo si presenteranno gli impianti eolici, verrà mostrato in maniera esemplificata un impianto eolico con le sue principali componenti, sarà spiegato come questo crea energia e quali sono le problematiche collegate alla non controllabilità dell'energia eolica e perché questo porta a delle complicazioni nel calcolo dell'EROI.

Nell'ultimo capitolo verrà dato un quadro generale del sistema energetico nazionale, passando in dettaglio ai numeri che riguardano la produzione energetica da fonti rinnovabili e nello specifico la produzione energetica da energia eolica.

Infine, verranno presi i dati di costo e di ricavo degli impianti eolici italiani, verranno fatte delle assunzioni per effettuare delle stime e sarà calcolato l'EROI degli impianti eolici italiani; saranno poi scritte le conclusioni.

Capitolo 1: Energia, fonti energetiche ed energie rinnovabili

1.1 Energia, concetti e definizioni

Per una corretta comprensione del funzionamento dell'EROI è necessario conoscere i concetti che ne sono alla base, per questo inizieremo il capitolo con delle definizioni base dei concetti energetici. Spiegheremo cos'è l'energia primaria e cos'è un vettore energetico, per definire poi i concetti che riguardano i sistemi termodinamici per poter spiegare la ratio per la quale un sistema (o una macchina) non può produrre energia in quantità uguale a quella impiegata; saremmo così in grado di definire l'ultimo concetto che è quello di efficienza energetica. Le definizioni e i concetti che seguiranno sono stati presi dalle seguenti fonti: (Brunello, 2017; Cretì & Fontini, 2019; Morales, 2012).

LAVORO ED ENERGIA

Secondo Cretì e Fontini (2019, p.7) “L'energia è la capacità di compiere lavoro, cioè la capacità di spostarsi in opposizione a una resistenza.”

L'energia è misurata a partire dal prodotto (scalare) tra la forza applicata al corpo e lo spostamento che tale corpo subisce. L'unità di misura utilizzata dal S.I. (Sistema Internazionale di unità di misura) è il Joule.

Allo stesso modo Cretì e Fontini (2019, p.7) definisce il Joule come “l'energia trasferita (o lavoro compiuto) da un corpo quando una forza di un newton gli causa uno spostamento di un metro”.

Un esempio molto semplice di tali concetti nella pratica può essere il seguente: una persona al supermercato che, con una forza di 100N, spinge in avanti un carrello per 5 metri, compie un lavoro di 500 J tra la persona e il carrello.

Altro concetto importante legato alla trattazione di questo elaborato è quello di potenza.

POTENZA

La potenza è il rapporto tra il lavoro compiuto (o l'energia trasferita) e il quantitativo di tempo nel quale avviene tale scambio.

L'unità di misura della potenza è il Watt (W). In poche parole, la potenza è il lavoro che viene prodotto istante per istante, cioè quanta energia viene scambiata (lavoro prodotto) al secondo. Queste ultime definizioni ci permettono di giungere alla seguente equivalenza:

$$1\text{J} = 1\text{W}$$

Ovvero un joule equivale ad un watt-secondo.

Cerchiamo ora di capire per quali motivi non si potrà mai avere un rendimento del 100% quando si parla di macchine termiche; tali ragioni risiedono nei principi della termodinamica. Andiamo ad enunciarli, assieme al concetto di sistema termodinamico:

SISTEMA TERMODINAMICO

Un sistema termodinamico è una regione dello spazio individuata e definita da una superficie di controllo (una superficie chiusa), che costituisce la frontiera tra l'interno (che può essere costituito da qualsiasi cosa), e il contorno, cioè tutto ciò che sta al di fuori della superficie di controllo.

Attraverso la superficie di controllo un sistema termodinamico può effettuare delle interazioni con il contorno, cioè scambi di massa, lavoro e calore.

1° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

Il primo principio della termodinamica afferma che la variazione di energia totale di un sistema termodinamico è sempre associata agli scambi di lavoro e calore che tale sistema effettua con il contorno. Un'importante conseguenza di tale principio è che l'energia totale di un sistema termodinamico, per una trasformazione chiusa, rimane costante.

Si capisce quindi che, nel momento in cui vi sono degli scambi di lavoro, vi saranno inevitabilmente anche degli scambi di calore, tra il sistema termodinamico e l'ambiente esterno.

2° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

Il secondo principio della termodinamica prende forma dai due enunciati di Kelvin-Planck e Clausius dei quali, per la trattazione di questo elaborato, considereremo solamente il primo. L'enunciato di Kelvin-Planck afferma che “non è possibile realizzare una trasformazione il cui unico effetto sia l'assorbimento di calore e la sua trasformazione in lavoro”.

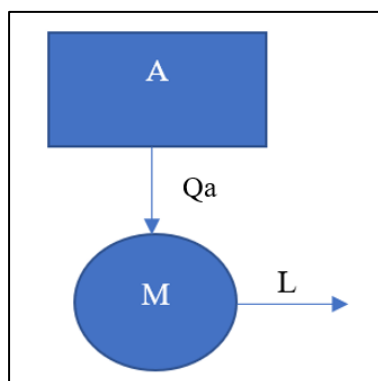


Fig 1.1

Immagini rielaborate da (Brunello, 2017).

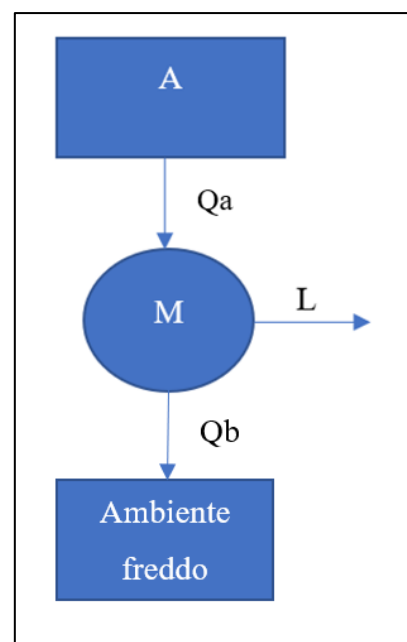


Fig 1.2

Le due figure sono una esemplificazione dei due principi della termodinamica elencati, dove M rappresenta il sistema termodinamico, A la macchina o fonte di calore e Q_a il calore che passa attraverso il sistema. La prima immagine (fig. 1.1) è solo un modello ideale che non può essere realizzato perché come spiegato nel secondo principio (Kelvin-Planck in fig. 1.2), non è possibile trasformare in lavoro tutto il calore di una macchina, infatti nella seconda immagine Q_b rappresenta un ambiente che assorbe parte del calore di Q_a , che fornisce alla macchina l'energia per produrre lavoro.

Di conseguenza da quanto enunciato nel 1° principio della termodinamica, si deduce che non è possibile concepire qualsivoglia macchina che sia in grado di operare con un rendimento pari a 1, cioè di convertire tutta l'energia fornitagli in lavoro utile.

EFFICIENZA ENERGETICA

La definizione di efficienza energetica è data dal rapporto tra l'energia prodotta e l'energia utilizzata, che come visto non può essere uguale ad 1; in tal senso è quindi un valore che serve a comprendere la dispersione energetica di una macchina in funzione.

La termodinamica studia i processi energetici con lo scopo di sviluppare macchinari sempre più efficienti in maniera da diminuire tale dispersione (Patterson, 1996).

A livello economico l'efficienza energetica permette di ottenere dei risparmi monetari: infatti un miglioramento nelle performance di un macchinario o in un impianto permette dei margini di risparmio significativi, e per questo è possibile paragonarla all'efficienza economica. Si è ormai diffuso in tutto il mondo l'uso razionale dell'energia. I paesi del G20 hanno confermato l'impegno preso con Agenda 2030 che è diventato un obbligo importante affrontato su due fronti: uno che è l'efficienza energetica, attraverso politiche di incentivazione, l'altro è lo sviluppo di energia da fonti rinnovabili che richiedono però investimenti più ingenti (Manzo I., 2019). In Italia ad esempio, grazie agli investimenti nell'efficienza energetica non è stato più raggiunto un consumo di energia come il picco avuto nel 2003 (Bessegghini, 2019).

L'importanza dell'efficienza energetica in quanto obiettivo politico è legata ad aspetti commerciali, competitivi, nonché ai benefici ambientali come la riduzione delle emissioni di CO₂ e dei gas serra che vedremo meglio nel prossimo paragrafo (Gillingham et al., 2009).

1.2 Le fonti energetiche

Come visto l'energia può essere trasformata dall'uomo grazie all'impiego di differenti macchinari che con l'avanzo della tecnologia tentano di ridurre le dispersioni energetiche.

Questi macchinari vengono costruiti però in base alle caratteristiche con la quale una determinata energia deve essere estratta o trasformata; esistono diverse fonti dalle quali è possibile fare questo, chiamate appunto fonti energetiche.

Sfortunatamente lungo il corso degli anni per ricavare l'energia sono state utilizzate delle fonti che hanno portato a una serie di criticità. In questo paragrafo parleremo delle fonti energetiche andando a descrivere quali sono queste problematiche e verso quali orizzonti si è deciso di muoversi per ovviare a tali problemi.

Le fonti energetiche sono quelle sorgenti dalle quali si possono ricavare le diverse forme di energia utilizzate dall'uomo per lo svolgimento di diversi compiti.

Esiste una sostanziale differenza tra le fonti energetiche: quelle che possono essere adoperate in maniera diretta senza una conversione che sono chiamate fonti di energia primaria e quelle che necessitano di una trasformazione prima di poter essere utilizzate, chiamate energie derivate.

Da un punto di vista economico le energie che derivano da fonti primarie possono essere viste come un prodotto finito che può essere adoperato, mentre le fonti derivate come un prodotto che deve essere prima trattato per poter poi essere utilizzato. Pensiamo ad esempio al petrolio: questo tramite la sua combustione genera energia sotto forma di calore, quindi il petrolio è una fonte primaria di energia. Un esempio di fonte derivata è la gasolina (combustibile liquido) perché è una fonte energetica che si ottiene dal trattamento del petrolio.

Presentiamo di seguito uno schema che cataloga le suddette fonti:

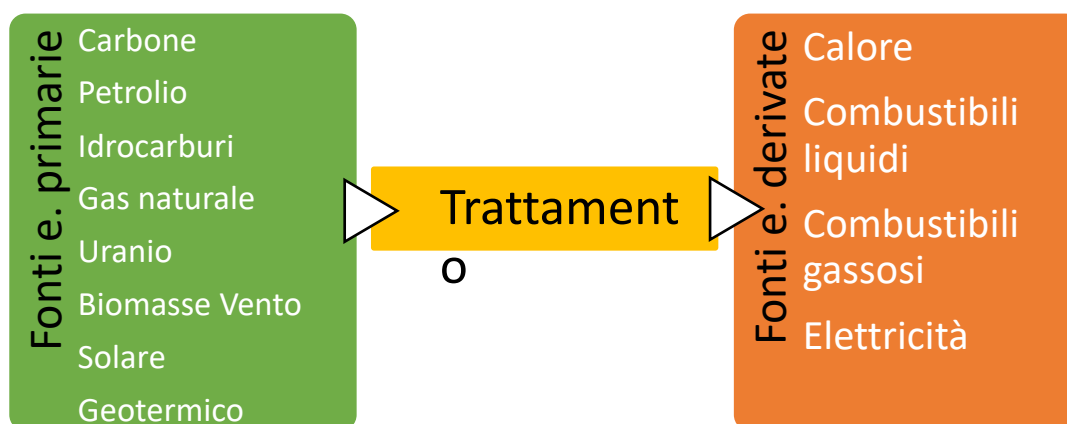


Fig. 1 Rielaborazione (Cretì & Fontini, 2019)

Tra le fonti primarie ci sono le risorse chiamate combustibili fossili, i quali sono una derivazione della decomposizione di materiale organico sotto una forte pressione per milioni di anni; ne fanno parte il petrolio gli idrocarburi, il carbone e i gas naturali.

Negli ultimi decenni lo sfruttamento di questi combustibili di origine fossile è andato via via aumentando, sono infatti utilizzati in tutto il mondo.

In Italia rappresentano ancora oggi il 79% circa dell'energia consumata, suddivisa tra le macroaree di maggiore impiego, quali: trasporti, agricoltura, riscaldamento, industria e strutture.(Politecnico di Milano, 2019)

L'uso continuato dell'energia prodotta tramite queste fonti ha però portato l'ineluttabile esaurimento delle riserve e l'inquinamento ambientale, problema quest'ultimo, di maggiore rilievo. Si sono infatti misurati negli ultimi anni aumenti della CO₂ (anidride carbonica) e cambiamenti a livello climatico causati dai gas serra (Bessegghini, 2019). Per queste ragioni è iniziata una "transizione energetica" verso l'utilizzo di energie che hanno risorse "illimitate" e un minore impatto ambientale, le cosiddette Fonti Energetiche Rinnovabili (FER).

Parleremo nel prossimo paragrafo di queste energie che verranno classificate e saranno mostrati i principali dati che dimostrano il loro sviluppo a livello globale e nazionale.

1.3 Le energie rinnovabili

Come detto precedentemente le energie rinnovabili sono quelle fonti di energia che hanno risorse inesauribili, o per meglio dire, che il loro consumo è inferiore rispetto al tempo con il quale si rigenerano. È possibile trovare una classificazione delle fonti energetiche rinnovabili nel Decreto Legislativo n. 387 del 2003 all'art 2 lettera a), nel quale vengono differenziate da quelle non rinnovabili. Nel diagramma 2.1, è presente una rielaborazione di tale articolo.

1. **Fonti non esauribili o rinnovabili**, che sono le biomasse (scarti dell'agricoltura e silvicoltura), idroelettrica, l'eolica, la geotermica e la solare.
2. **Fonti esauribili o non rinnovabili**, che hanno risorse finite sono oggi sostanzialmente i combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturale) e nucleari (uranio).

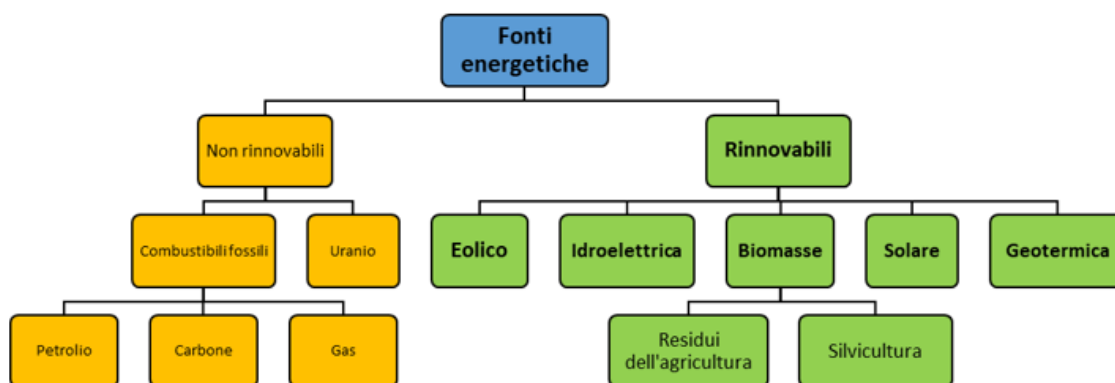


Diagramma 2.1, Elaborazione da: Decreto Legislativo n. 387, 2003, art. 2 lettera a)

L'importanza delle energie rinnovabili risiede nell'effetto che hanno sull'ambiente, sono infatti connesse al concetto di sostenibilità, poiché il loro impatto è considerevolmente inferiore a quello delle fonti energetiche non rinnovabili, difatti negli ultimi anni sono stati rilevati dei problemi sull'utilizzo intensivo dei combustibili fossili.

Per questo a livello mondiale e nazionale sono avanzate proposte per il passaggio a energie più pulite, ne sono un esempio il Protocollo di Kyoto e la Proposta di Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima; quest'ultima si prefigge l'obiettivo di ridurre del 37% le emissioni di CO2 da qui a dieci anni (Ministero dello Sviluppo Economico, 2018).

Composizione del mix iniziale nazionale utilizzato per la produzione dell'energia elettrica immessa nel sistema elettrico italiano nel 2017*		Composizione del mix iniziale nazionale utilizzato per la produzione dell'energia elettrica immessa nel sistema elettrico italiano nel 2018**	
Fonti primarie utilizzate	%	Fonti primarie utilizzate	%
- Fonti rinnovabili	36,42%	- Fonti rinnovabili	40,83%
- Carbone	13,69%	- Carbone	12,47%
- Gas naturale	42,63%	- Gas naturale	39,06%
- Prodotti petroliferi	0,76%	- Prodotti petroliferi	0,54%
- Nucleare	3,62%	- Nucleare	4,11%
- Altre fonti	2,88%	- Altre fonti	2,99%
<i>*dato consuntivo</i>		<i>**dato pre-consuntivo</i>	

Tabella 1.1 fonte (GSE, 2018).

La seguente tabella presa dal GSE (Gestore Servizi Energetici) società controllata dal Ministero dell'Economia e dalla Finanza, riporta le statistiche nella composizione nazionale per la produzione di energia elettrica, dai dati riportati è possibile confermare l'importanza che stanno assumendo le energie rinnovabili, le quali tra l'anno 2017 e 2018 hanno visto un aumento del 4,41% sul mix nazionale, mentre vi è stata una diminuzione di tutte le altre fonti di origine fossile.

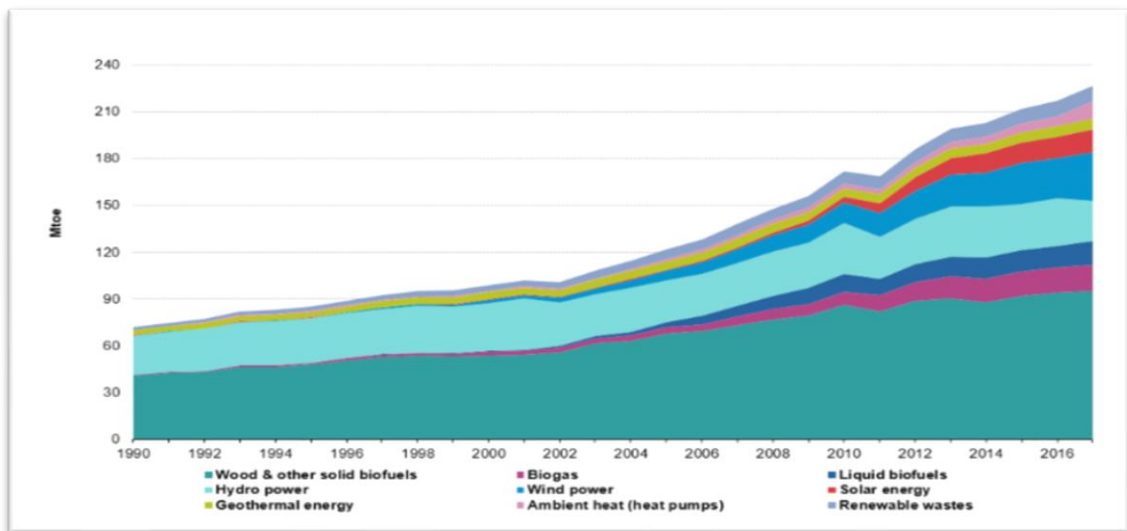


Grafico Eurostat, 2018

Il grafico preso da (Eurostat, 2018a), offre un quadro generale dell'evoluzione della produzione energetica primaria da fonti rinnovabili nell'Unione Europea dal 1990 al 2017, mostrando una costante crescita della produzione. L'unità di misura utilizzata nelle ordinate si chiama Mtoe (Millions of tonnes of oil equivalent) ed è l'unità di misura dell'energia rilasciata dalla combustione di una tonnellata di petrolio grezzo che viene usata per descrivere l'energia prodotta di una qualsiasi fonte energetica.

Secondo EUROSTAT la quantità di elettricità prodotta dall'energia idroelettrica è stata relativamente simile al livello registrato il decennio scorso mentre la quantità di energia elettrica derivante dall'energia solare e dalle turbine eoliche nell'Unione Europea era rispettivamente di 31,6 e 3,5 volte superiore nel 2017 in rapporto al 2007. Questo ha determinato un aumento delle quote dell'energia eolica e solare sul quantitativo totale di elettricità prodotta da fonti rinnovabili nel 2017, salite rispettivamente al 37,2 % e al 12,3 % (Eurostat, 2018b).

Determinato in questo sono stati determinati i concetti base che riguardano l'energia, abbiamo poi introdotto le diverse fonti energetiche e infine ci siamo soffermati sulle fonti energetiche rinnovabili. Siamo pronti a passare al secondo capitolo, che si sviluppa due argomenti collegati alle parti appena esposte.

Capitolo 2: EROI ed impianti eolici

Questo capitolo, sviluppato su due paragrafi, introduce l'EROI, che viene definito e spiegato nei dettagli mostrando quali sono le problematiche e i pregi di tale indice. Nel secondo paragrafo invece vengono presentati gli impianti eolici, viene data una descrizione delle principali componenti e del loro funzionamento, infine verrà spiegato per quali motivi questa energia è un'energia rinnovabile non controllabile.

2.1 Cos'è l'EROI

Abbiamo visto nel capitolo precedente che vi sono diverse tipologie di fonti energetiche e che per poter ricavare l'energia da una di esse è necessario l'utilizzo di specifici macchinari. Per poter costruire tali macchine, che costituiscono il core di un impianto (o centrale) è necessario effettuare degli investimenti i quali richiedono una disponibilità finanziaria.

Per decidere la miglior scelta da fare bisogna individuare quale sia l'esborso monetario più corretto nella fase preliminare, che comprende un lasso temporale abbastanza ristretto, questo per un futuro ritorno economico che superi l'esborso iniziale e poi successivamente quello complessivo. Abbiamo visto nel capitolo precedente che l'efficienza energetica, paragonabile all'efficienza economica, è un aspetto molto importante quando si valuta a livello energetico il rendimento di un macchinario o di un impianto, per poter avere un valore di tale aspetto si utilizzano degli indici. Di seguito sarà presentato l'indice economico/finanziario conosciuto come ROI, si discuterà poi l'indice specifico del settore energetico, l'EROI.

Il ROI (Return On Investment) è un indice che viene utilizzato in economia aziendale con il quale si è in grado di comprendere la redditività della gestione caratteristica di un'impresa, permettendo così di valutare l'efficienza di un investimento dal punto di vista finanziario. A livello matematico la formula per il suo calcolo è descritta come segue:

$$ROI = \frac{\text{Risultato Operativo}}{\text{Capitale Investito}}$$

Dove il risultato operativo, o reddito operativo, si ottiene dalla differenza tra ricavi e costi operativi e il capitale investito si ottiene dalla somma delle attività meno le passività (comprendendo solamente quei valori che hanno durata di medio o lungo termine) e il capitale circolante netto, noto anche come CCN (Favotto et al., 2016).

Una delle motivazioni per la quale il ROI viene utilizzato (oltre per la sua semplicità di calcolo), è la possibilità di poterlo comparare con il ROI di aziende somiglianti (Pearce, 2016). Allo stesso modo, l'EROI è uno strumento utilizzato per dare un valore all'efficienza complessiva in un investimento negli impianti energetici.

L'EROI, chiamato anche EROEI (Energy Return on Energy Investment) è uno dei sistemi più comunemente utilizzati per il calcolo dell'efficienza energetica di un impianto di produzione elettrica il quale si ottiene mettendo a rapporto il ritorno energetico dello stesso durante il suo ciclo di vita su unità di energia investita per creare tale impianto (Murphy & Hall, 2010).

Una prima formula indicativa è definita come segue:

$$EROI = \frac{\text{Energia Ricavata}}{\text{Energia Spesa}}$$

Fonte (Ghiassi-Farrokhfal et al., 2014)

Facciamo un esempio.

Nel LCA (life Cycle Assessment) di un impianto idroelettrico si è visto che l'energia ricavata è stata di: 12000J.

Inoltre è stato calcolato che il costo energetico di tale impianto ammonta a: 7500J.

Viene quindi calcolato l'EROI:

$$EROI = \frac{12000J}{7500J} = 1,6$$

Come si può notare il risultato (1,6) è adimensionale, questo perché l'unità di misura del numeratore e del denominatore sono solitamente la stessa. Nella realtà pur essendo un'equazione molto semplice, i dati necessari per poter eseguire tale calcolo sono complessi (Murphy & Hall, 2010).

Prendiamo ad esempio la pompa di calore di un impianto geotermico per il calcolo dell'energia impiegata: dovremmo tenere conto dell'energia che è stata spesa per produrre tale pompa, il costo di installazione e possibili spese di mantenimento, sommate lungo la vita media della pompa. Per l'energia ricavata invece, si dovrebbe tenere da conto della percentuale di energia con la quale tale pompa influisce nell'impianto stesso nel periodo di tempo per la quale viene utilizzata; inoltre questi costi e ricavi potrebbero essere variabili, poiché con l'avanzamento della tecnologia l'impianto potrebbe subire delle modifiche che andrebbero a modificare i valori ottenuti al momento del calcolo comportando un continuo monitoraggio.

Come è possibile notare dall'esempio precedente il tempo è un fattore importante per la computazione del calcolo dell'EROI, per questo una formula più adatta per il calcolo che include il fattore temporale si articola come segue:

$$EROI = \frac{\text{Energy Returned in } (0; Tlif)}{\text{Energy Invested in } (0; Tlif)}$$

Dove Tlif indica la durata di vita dell'impianto; in questo modo è possibile calcolare il tempo necessario affinché l'investimento venga ripagato (Ghiassi-Farrokhfal et al., 2014).

Va evidenziato altresì che non è stato ancora riconosciuto a livello internazionale un accordo sui criteri di calcolo dell'EROI.

Questa formula infatti manca di rigosità, poiché non vi è la presenza di un criterio oggettivo; in tal modo a seconda di che criterio viene adoperato per la valutazione delle spese energetiche i valori possono risultare differenti anche per impianti con dimensioni simili.

Col passare degli anni si è cercato di definire uno standard quanto più preciso possibile per il calcolo dell'EROI ma con scarso successo; difatti col passare del tempo si sono sviluppati diverse metodologie di calcolo che si basano su differenti principi (Murphy & Hall, 2010). Passiamo ora ad elencare le principali motivazioni per la quale l'EROI viene utilizzato nella valutazione di un impianto energetico, nonostante le sue criticità.

Fonti (Capellán-Pérez et al., 2019; Murphy & Hall, 2010).

- Da un punto di vista tecnico, l'EROI include fattori che influenzano l'intero sistema energetico che non vengono catturati dai costi monetari, come i costi aggiuntivi relativi alla distribuzione e l'intermittenza delle VER (Variable Energy Resources, di cui parleremo nel prossimo paragrafo). Per queste motivazioni quando si sviluppano i dati si cerca di imputare un fattore di conversione che riesca a dare una corretta valutazione del loro impatto.
- L'EROI considera l'energia necessaria per ottenere, fornire e utilizzare un'unità di energia, ovvero l'energia necessaria per produrre i macchinari e i dispositivi utilizzati per la costruzione, l'esercizio e la manutenzione della centrale elettrica o di una struttura di trasporto (cisterne, condutture, reti elettriche, ecc.), nonché l'energia necessaria per l'esplorazione, gli investimenti, la comunicazione, lavoro, ecc. nel sistema energetico. Vi sono metodi di calcolo per questi aspetti che esemplificano tale lavoro considerato che sarebbe altrimenti troppo dispendioso, ad esempio a componenti secondarie si può affidare il loro impatto ad un coefficiente.
- Il calcolo dell'EROI di ciascuna tecnologia consente di rilevare potenziali situazioni dannose, come un aumento della produzione lorda di energia ma con una riduzione netta, prevenendo così la cosiddetta "trappola energetica", aspetto è molto utile per poter evidenziare degli investimenti che non danno valore effettivo.

Dai punti appena elencati si cercherà successivamente di sviluppare le assunzioni che verranno fatte nell'ultimo capitolo per poter effettuare il calcolo dell'EROI degli impianti eolici italiani. Bisognerà quindi tenere presente delle problematiche e delle relative soluzioni a riguardo in modo da mitigare i possibili errori causati dal raggruppamento di alcuni costi, ad esempio in quelli legati ai fattori secondari come il trasporto.

Approfondiremo ora dando uno sguardo all'EROI delle principali fonti energetiche. Il grafico seguente, chiamato "net energy cliff" (che ha in ordinata l'energia in percentuale e in ascissa l'EROI), rappresenta l'energia ottenuta (grigio scuro) su energia usata per la produzione (grigio chiaro), per differenti fonti di energia, quali petrolio, gas, eolico, carbone, solare, biocarburanti, sabbie bituminose e scisto bituminoso.

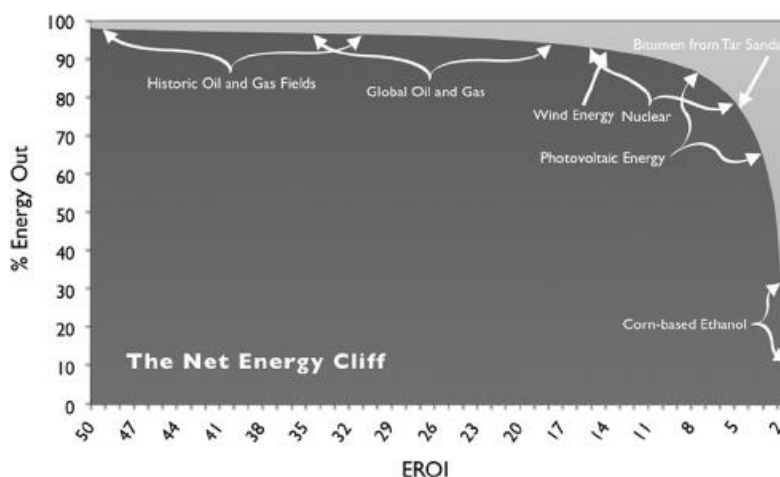


Grafico "net energy cliff", fonte Murphy & Hall, 2010

Nel grafico, preso dall'articolo di (Murphy & Hall, 2010), è possibile osservare la distribuzione delle differenti fonti energetiche suddivise lungo la linea che divide i due colori. Il valore più alto a livello di EROI è quello del petrolio e dei gas, segue con valori inferiori l'energia eolica che si posiziona prima dell'energia nucleare, la quale si trova insieme all'energia solare nel punto di "cascata". Nel punto che si aggira intorno al valore (8) si identifica una zona critica in quanto a valori minori di EROI la percentuale di energia prodotta (Energy Out %) varia significativamente (a causa di errori o differenze nella scelta dei dati).

È comunque importante evidenziare che il grafico riportato è risalente al 2010 e negli ultimi anni si è notata una discesa dell'EROI del petrolio, il quale tende a diminuire col tempo, a causa della difficoltà di estrazione che aumenta man mano che i giacimenti vengono sfruttati; decrescita che viene spiegata nella fenomenologia del picco di Hubbert, la quale definisce l'evoluzione temporale della produzione di una qualsiasi risorsa minerale o fonte fossile esauribile o fisicamente limitata, mostrando che i costi di estrazione aumentano col tempo.

In questo elaborato esamineremo in maniera approfondita l'EROI dell'energia eolica, di conseguenza nel prossimo paragrafo analizzeremo le componenti e le generalità di un impianto eolico e le caratteristiche dell'energia del vento.

2.2 Gli impianti eolici, la non controllabilità del vento

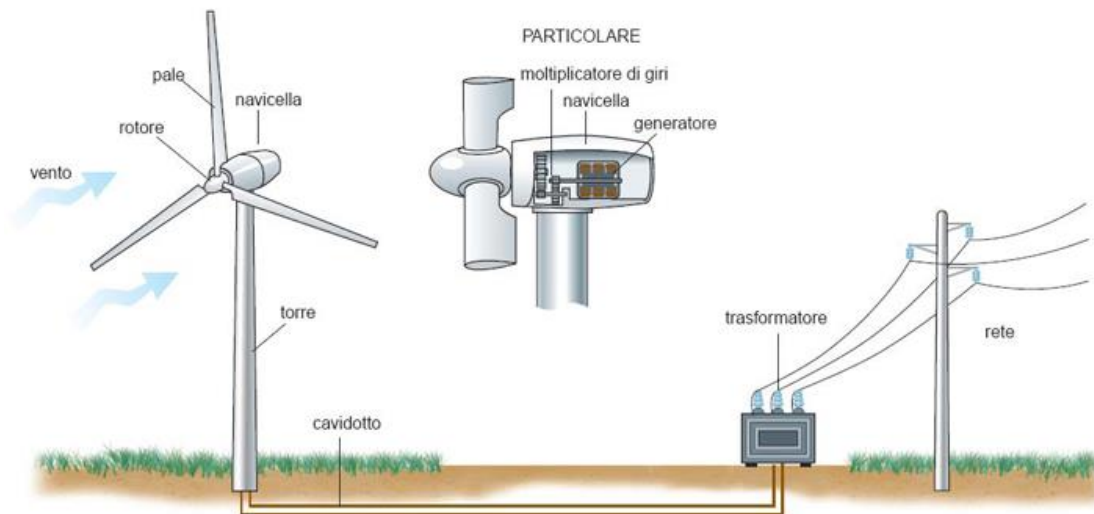
La maggior parte dell'energia rinnovabile (fatta eccezione per l'energia delle maree e quella geotermica) proviene dal sole e di questa solamente una minima parte (circa l'1 – 2%) viene convertita in energia eolica. L'energia eolica è l'energia che si ottiene dal vento, grazie al movimento di masse d'aria causate dalle differenti condizioni meteorologiche in prossimità della superficie della terra; più precisamente, l'energia cinetica di correnti d'aria è convertita, con l'uso di specifiche macchine eoliche, in energia elettrica (anticamente in energia meccanica). Oggi, l'energia del vento viene principalmente convertita per mezzo di impianti eolici (Kühtz, 2005).

Per dare un'idea delle dimensioni che gli impianti eolici hanno a livello globale, gli ultimi dati rilasciati dal Global Wind Energy Council mostrano che dal 2014 la crescita del mercato eolico globale è stata stabile, avendo installato oltre 50 GW di capacità produttiva ogni anno, e nel 2018 ne sono stati installati 51,3 GW. Si è raggiunta così una capacità eolica complessiva che si aggira attorno ai 591 GW alla fine del 2018. I primi tre stati a contribuire in tale settore sono stati in ordine Cina (21,200 MW), Stati Uniti (7,580 MW) e la Germania con (2,402 MW) (Thornton, 2019). Per meglio capire questi numeri si ipotizzi che una famiglia media (4 persone) ha una capacità di consumo installata di 3.5KW, ciò significa che la potenza degli impianti eolici sarebbe in grado di soddisfare:

$$N. di famiglie = \frac{51,3GW}{3,5KW/famiglia} = \frac{51,300,000KW}{3,5KW/famiglia} = 14,657,143 famiglie$$

Solo con l'energia prodotta dagli impianti eolici installati nel 2018 un numero considerevole di famiglie potrebbe alimentare la loro abitazione. Ovviamente questo calcolo non tiene conto di diversi ostacoli (partendo dal semplice aspetto di trasportare l'energia nelle diverse abitazioni e che queste ultime non sono l'unico settore che richiede energia, ad esempio).

Passiamo ora a presentare brevemente le componenti principali di un generatore eolico (chiamato anche aereogeneratore) attraverso il quale l'energia cinetica viene trasformata in energia elettrica, successivamente passeremo alle problematiche di alcune energie, di cui sicuramente fa parte l'energia eolica.



Fonte (Donatella Carboni et al., 2015)

1. Navicella o gondola; guscio metallico che contiene tutti gli apparati.
2. Torre; struttura metallica di sostegno.
3. Rotore; l'organo rotante costituito da un mozzo su cui sono fissate le pale.
4. Anemometro; strumento utilizzato per misurare la velocità o la pressione del vento.
5. Moltiplicatore di giri; serve ad aumentare i giri di rotazione che vengono trasmessi al generatore.
6. Generatore elettrico; alternatore di corrente collegato attraverso cavi elettrici che, scorrono dentro la torre fino a terra.
7. Sistema di controllo; strumenti elettronici controllati da un computer che hanno la funzione di monitoraggio.
8. Trasformatore; il trasformatore è una macchina elettrica capace di trasferire energia elettrica da un circuito (detto primario) in un altro circuito (detto secondario) modificando la tensione e la corrente.

Spesso, le fonti di energia rinnovabile vanno incontro a delle problematiche di "affidabilità" che le fonti di energia convenzionali non hanno, in quanto accade che le prime non sono sempre sfruttabili con continuità. Alcune di queste, come l'energia eolica, vengono definite come Variable Energy Resources (VER) che come dice (Cretì A. e Fontini F., 2019, p.320) "sono risorse di energia il cui output è variabilità, incertezza, localizzazione, modularità e con bassi costi di funzionamento".

Snoccioliamo le caratteristiche appena elencate nella definizione:

- Variabilità: gli output di potenza fluttuano, dipendendo dalla disponibilità della fonte stessa di energia, in quanto può essere alterata dalle condizioni atmosferiche (e.g. energia solare, energia eolica);
- Incertezza: a causa della variabilità, l'output di potenza di un impianto che si basa sulle energie rinnovabili non è prevedibile, e di conseguenza riduce la sua affidabilità;

- **Localizzazione:** le fonti di energia rinnovabile sono spesso localizzate in zone geografiche specifiche e non si possono, a differenza dei combustibili convenzionali, spostare in altri luoghi, diminuendo la loro praticità d'uso;
- **Modularità:** l'unità di energia prodotta dalle fonti rinnovabili è, in scala, molto minore di quella prodotta dalle fonti di energia convenzionale;
- **Bassi costi di funzionamento:** gli impianti di energia rinnovabile hanno bassi costi di funzionamento una volta avviati.

Le caratteristiche sopra citate, che come detto si possono applicare a differenti fonti di energia, sono difatti di carattere generale. Per quanto riguarda invece il vento, ciò che rende tale fonte di energia non sempre affidabile e che la fa rientrare nella definizione di VER è la sua non controllabilità, caratteristica che dipende da diversi fattori (Vindel & Polo, 2014):

Intermittenza: caratteristica riscontrabile nelle VER, è dovuta all'irregolarità della velocità causata da continue fluttuazioni di elementi di varia natura (e.g. pressione, densità, temperatura, ecc.), che vanno a rendere discontinuo il flusso del vento nelle diverse regioni geografiche. Questo incide sulla produzione di energia eolica in quanto non si ha, di conseguenza, un apporto regolare di energia cinetica dal vento.

Non prevedibilità: data la sua incostanza, è impossibile prevedere con accuratezza il suo comportamento, e quindi studiare quale potrebbe essere il suo apporto energetico nel lungo periodo.

Posizione geografica: il vento spira con più o meno forza e regolarità dipendentemente dalla regione terrestre nella quale ci si trova (vedi Intermittenza), e questo rende più arduo l'analisi dei benefici di un impianto eolico.

Tali cause di non controllabilità vengono prese in esame durante gli studi preliminari, la produzione energetica difatti riflette la non controllabilità, la quale determina una riduzione rispetto la produzione ideale.

Capitolo 3: Impianti eolici in Italia

Il presente capitolo da un quadro generale dell'energia nello Stato italiano, illustrando il sistema energetico italiano definendolo e mostrando i suoi trend energetici, e si passerà successivamente ad un'analisi più approfondita dell'energia eolica prodotta in Italia. Nell'ultimo paragrafo infine si mostrerà la metodologia e i dati con la quale si è calcolato l'EROI italiano degli impianti eolici di media dimensione.

3.1 L'energia nello Stato italiano

In economia la funzione che spiega la produzione economica di uno Stato, tradizionalmente utilizza come variabili il lavoro e il capitale. È stato visto però che non si riesce a spiegare completamente l'andamento che questa funzione descrive nella realtà, i modelli infatti presentano dei residui (o errori) molto elevati e spesso la variabile che è assunta come mancante viene definita come tecnologia. È stato visto però da alcuni fisici (Kümmel, 1982) o (Hall et al., 2007), che aggiungendo l'energia come variabile mancante nella funzione di produzione i residui diminuiscono considerevolmente (Murphy & Hall, 2010). Presentiamo di seguito l'indice che mette in relazione queste due grandezze.

3.1.1 Intensità energetica

Tramite il PIL (Prodotto Interno Lordo) e il CIL (Consumo Interno Lordo) è possibile ottenere un indice che viene chiamato Intensità Energetica (IE). Questo indice permette di dare una stima dell'efficienza energetica di uno Stato, così come viene detto nel sito dell'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA, n.d.) "Il consumo di energia di uno Stato o area geografica è strettamente legato al suo livello di attività economica."

$$\text{Intensità Energetica} = \frac{\text{Consumo Interno Lordo}}{\text{Prodotto Interno Lordo}}$$

Rielaborazione da (Dicembrino C., 2009)

Nell'equazione presentata è possibile notare che una maggiore intensità energetica, ovvero un maggior uso di energia a parità di altre condizioni, comporta una diminuzione dell'efficienza energetica. L'efficienza energetica non è però l'unico fattore che spiega l'IE, infatti lo stile di vita della popolazione, gli ambienti dove questa prospera e la sua organizzazione economica (se un paese è più o meno sviluppato), sono tutte determinanti dell'intensità energetica di uno Stato.

Dal sito di Terna ed Istat sono stati raccolti i dati necessari a calcolare l'intensità energetica italiana. I dati dimostrano che nel 2018 il CIL è stato di 156,9Mtoe (TERNA, 2019b) mentre il

PIL in quell'anno è ammontato a 1.753.949 milioni di euro (sito ISTAT). Possiamo quindi calcolare l'intensità energetica:

$$\text{Intensità Energetica (2018 Italia)} = \frac{156,9\text{Mtoe}}{1.753.949 \text{ milioni di euro}}$$

L'intensità energetica italiana nel 2018 è stata quindi di $8,946 \times 10^{-5}$ Mtoe/M€; questo valore quantifica l'efficienza energetica dell'Italia. Specifichiamo che questo indice non è sufficiente a spiegare l'efficienza energetica di uno stato in maniera dettagliata ma può darne solo un'indicazione complessiva generale, vi sono difatti altri fattori che possono influenzare questa efficienza, come la sua struttura economica (se è ad esempio uno stato agricolo o industriale), la distribuzione della ricchezza e le condizioni meteorologiche.

Dato che si è calcolata l'intensità energetica italiana per il 2018 vorremmo capire se questo valore è positivo oppure è un segnale di monito di un'inefficienza a livello energetico. Per fare ciò, viene mostrato di seguito un grafico (fonte Terna), che descrive l'andamento dell'intensità energetica italiana in confronto alla media Europea UE-28.

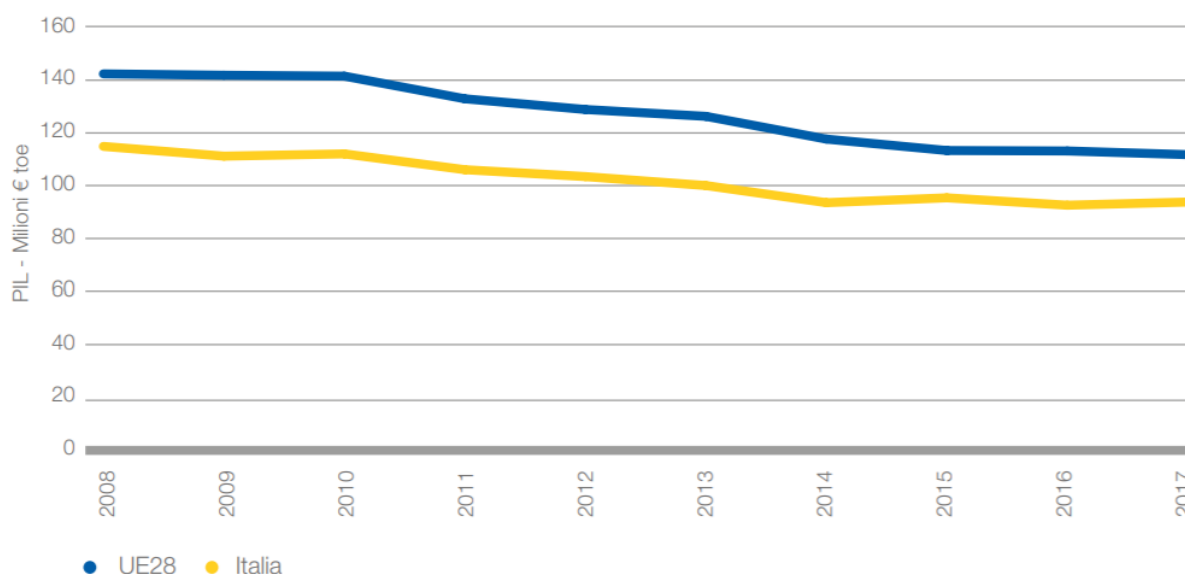


Grafico 3.1 Trend di intensità energetica nell'ultimo decennio (TERNNA, 2019a)

Il Grafico 3.1 mostra la serie temporale sotto forma di grafico a linee dell'evoluzione dell'intensità energetica, misurata in tep (il nominativo italiano del toe) su Milioni di euro fino al 2017.

È possibile notare come l'intensità energetica italiana sia minore rispetto alla media Europea, come detto prima un valore minore significa una maggiore efficienza energetica, ovvero che lo Stato è in grado di sfruttare in maniera più efficiente l'energia consumata.

Possiamo determinare dal grafico che l'Italia ha quindi una buona efficienza energetica ma che negli ultimi anni questo valore sembra aver assunto un punto di stallo. Aggiungiamo inoltre che il valore ottenuto dal calcolo fatto precedentemente rispecchia pienamente l'andamento presente nel grafico. Avendo ottenuto un valore in Mtoe nel nostro calcolo è sufficiente moltiplicare per 10^6 e si ottiene un valore di 89,46 toe/M€.

Mostrata l'importanza e la relazione che lega l'energia alla produzione economica di uno Stato passiamo ora a vedere come si compone la struttura che permette di trasportare l'energia in tutto il paese.

3.1.2 Sistemi energetici

Di seguito spiegheremo brevemente come è strutturato il sistema energetico dello Stato italiano e verrà mostrato in che percentuale le varie fonti energetiche discusse nel capitolo precedente, lo compongono.

Partendo da un impianto energetico qualsiasi (come può essere quello eolico) dobbiamo capire come l'energia che questo produce (ipotizzando che non abbia sistemi di stoccaggio e che sia on-shore), venga mandata nei vari punti finali di consumo (case, industrie, ecc...). Come visto nell'immagine (2.1) del secondo capitolo, un impianto eolico trasmette tramite un cavidotto l'energia ad un trasformatore, che poi passa nella rete elettrica ove esistono dei punti chiamati "nodi" che servono a collegare differenti elementi tra di loro in un circuito elettrico. Questi nodi quindi permettono di unire tutti gli elementi in un'unica grande rete elettrica. Secondo (Cretì A. e Fontini F. 2019, p.35) "Un **sistema elettrico** può quindi definirsi come l'insieme di tutte le componenti che sono interconnesse in un circuito elettrico"; nel complesso gli elementi che compongono il sistema elettrico sono:

1. Centrali elettriche, dove l'energia viene prodotta;
2. Le parti che consumano l'energia (abitazioni, negozi, ecc...);
3. Reti di trasmissione, che convogliano l'energia prodotta dalle centrali;
4. Reti di distribuzione, che portano l'energia nei punti di utilizzo.

Un sistema elettrico ha dimensioni notevoli e la sua amministrazione è molto complessa, per questo vi sono degli enti specifici i quali hanno la funzione di direzione e gestione. Gli organi preposti alla regolazione, gestione e trasmissione dell'energia elettrica vengono chiamati TSO (Transmission System Operator), in italiano Operatori di Trasmissione Energetica, sono enti che operano a livello nazionale e sono presenti in tutta Europa (Cretì & Fontini, 2019).

In Italia l'ente vigente è TERNA che gestisce oltre 74.000 km di reti elettriche di alta tensione. Le attività attribuite a terna sono state concesse dal Ministero dello Sviluppo Economico che ha dato a TERNA la responsabilità della pianificazione degli interventi di sviluppo della Rete Elettrica Nazionale, della realizzazione delle opere e della manutenzione delle infrastrutture elettriche (TERNA, 2019c). Presentiamo di seguito i dati di maggior rilievo che riguardano la produzione e il consumo di energia in Italia.

3.1.3 Produzione e consumo

In questo sotto paragrafo sono stati analizzati i valori di produzione e consumo più importanti per gli anni 2017 e 2018. I dati sono stati presi dal Bilancio Energetico Nazionale (BEN) che rappresenta lo strumento principale che tiene conto della quantità di domanda e offerta energetica di un paese (Ministero dello Sviluppo Economico, 2019).

ktoe 2017		Total	ktoe 2018		Total
Primary production		36,666.67	Primary production		37,342.13
Imports		157,930.13	Imports		152,946.38
Exports		33,366.29	Exports		31,022.93
Gross available energy		161,815.27	Gross available energy		159,714.33
Gross inland consumption		159,512.66	Gross inland consumption		156,993.06
Final energy consumption		113,611.22	Final energy consumption		114,421.60

Fig. 3.1 Rielaborazione propria da dati BEN Ministero dello Sviluppo Economico

La tabella 3.1 (Fonte BEN), è una piccola sintesi del bilancio energetico nazionale italiano degli anni 2017 e 2018 in cui sono stati riportati alcuni punti principali.

Per il terzo anno consecutivo sale la produzione primaria di energia che rimane comunque circa un terzo dell'energia consumata. Un dato che risalta è l'import, il quale sull'export ha un valore di circa cinque volte maggiore. In diminuzione il CIL (Gross inland consumption in inglese) il quale potrebbe rispecchiare un miglioramento dell'efficienza energetica. L'energia finale consumata rimane comunque stabile evidenziando un leggero aumento.

Dalla Fig 3.1 sviluppiamo quindi la seconda tabella con le variazioni percentuali che vi sono state tra un anno e l'altro.

ktoe	Variation
Primary production	1.84%
Imports	-3.16%
Exports	-7.02%
Gross available energy	-1.30%
Gross inland consumption	-1.58%
Final energy consumption	0.71%

Fig. 3.2 Rielaborazione propria da dati BEN Ministero dello Sviluppo Economico

Le analisi portano ai seguenti risultati:

Nell'anno 2018 vi è stato un aumento di produzione energetica primaria di energia del 1.84%, mentre l'import e l'export sono diminuiti rispettivamente del 3.16% e 7.02%.

È diminuito anche il CIL dell'1,58% mentre l'energia finale consumata è aumentata dello 0.71% tra il 2017 e 2018, questo potrebbe essere causato come visto precedentemente da un miglioramento nell'efficienza energetica che avrebbe quindi ridotto la perdita e incrementato il valore netto.

Nel prossimo paragrafo entreremo nel dettaglio degli impianti eolici italiani mostrando la realtà che determinano.

3.2 Energia prodotta dagli impianti eolici italiani

Questo paragrafo presenta la realtà italiana degli impianti eolici e come questi si stanno consolidando a livello nazionale.

Secondo i dati GSE (Agrillo et al., 2019) la presenza degli impianti eolici nel 2004 era di appena 120 impianti, con una potenza pari a 1.131 MW e una produzione di 1.847 GWh, durante il corso di 15 anni la produzione è cresciuta stabilmente fino a raggiungere nel 2018 circa dieci volte il valore iniziale. Il grafico sottostante rappresenta tale crescita mostrando la potenza prodotta per ogni anno in GWh.

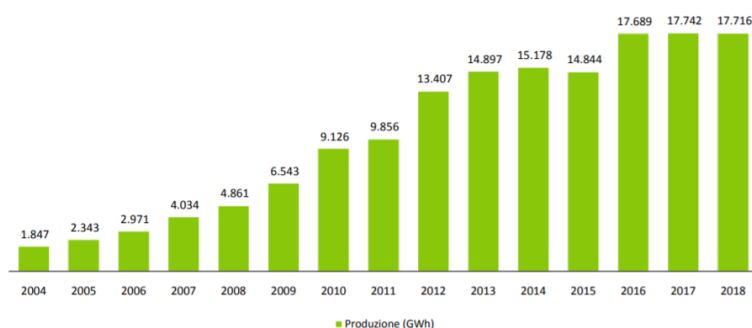


Grafico 3.2 Fonte GSE

Nel grafico 3.2 l'anno con maggiore produzione di energia eolica è stato il 2017 con 17.742 GWh prodotti ed evidenzia che negli ultimi anni la produzione si è stabilizzata intorno a tale valore con oscillazioni lievi tra il 2016 e il 2018. Dando uno sguardo ai dati presenti nel Rapporto Statistico del GSE degli anni 2017 e 2018 è possibile notare come tali impianti siano distribuiti nella penisola.

L'Italia meridionale contiene il maggior numero di impianti, a livello regionale la Basilicata e Puglia hanno una percentuale che arriva al 45,8% (di cui 25% della Puglia e 20,8% della Basilicata). Il contributo dell'Italia settentrionale è nettamente inferiore, questa non raggiunge nemmeno il 5% sommando tutte le sue aree (l'Emilia-Romagna che è la principale ha una

percentuale pari all'1,2%, il Veneto solamente il 0,5%). L'area centrale della penisola presenta un numero di impianti maggiore rispetto al settentrione ma comunque non comparabile con il sud, la quantità difatti non supera il 10%.

Secondo le stime raccolte da GSE si identifica una concentrazione di produzione eolica in alcune aree/regioni, dovuta oltre che al numero di impianti presenti, anche alle caratteristiche ambientali che questi territori assumono. Il vento infatti come visto nel capitolo precedente è soggetto a fluttuazioni, quindi vi sono aree che ricevono picchi di ventosità ottimali per la produzione di energia eolica. I dati riscontrano che il 58,1% di produzione di energia viene coperta dalle prime tre regioni, che sono rispettivamente: Puglia con 4.594 GWh segue Sicilia con 3.211 GWh e Campania 2.494 GWh.

Visti i livelli di produzione a livello geografico di seguito viene mostrata la potenza energetica installata in Italia per classe di potenza, le classi di potenza sono il principale strumento con la quale vengono divisi gli impianti.

I seguenti dati sono stati presi dal Rapporto Statistico del GSE 2017-2018 (Agrillo et al., 2018, 2019), da cui sono state raccolte le informazioni di maggior rilievo.

Numero e Potenza impianti eolici		2017		2018		2018/2017	
Dimensionamento	Classi di potenza (MW)	N°	MW	N°	MW	Variazione (%)	
Piccolo/Medio	$P \leq 1 \text{ MW} \geq$	5175	491	5209	507.6	0,7	3,4
Grande	$1 \text{ MW} < P \leq 10 \text{ MW}$	117	619.4	125	675.2	6,8	9,0
Offshore	$P > 10 \text{ MW}$	287	8655.5	308	9081.9	7,3	4,9
	Totale	5579	9765.9	5642	10264.7	1,1	5,1

Fig. 3.3. Rielaborazione propria, Fonte GSE dati TERNA

Secondo i dati del GSE alla fine del 2017 erano presenti 5.579 impianti eolici, suddivisi nelle tre macrocategorie: piccolo/medio (n. 5175), grande (n. 117) e offshore (n. 287, quegli impianti chiamati anche parchi eolici che sono posizionati a distanza dalla costa). La potenza totale installata è stata di 9.765,9 MW che è stata fornita in gran parte da impianti di grande dimensionamento (8.655,5 MW).

Nel 2018 il numero di impianti è aumentato per ogni categoria, con un aumento netto di 63 impianti, la potenza totale è aumentata di 498.8 MW, raggiungendo così 1 GW di potenza. In termini di percentuale l'incremento della potenza degli impianti eolici tra il 2017 e il 2018 è stata pari a 5,1%, legato in gran parte alla crescita degli impianti con potenza maggiore di 1 MW.

Passiamo ora alla seconda tabella che illustra l'energia prodotta da tali impianti suddivisi per le classi di potenza.

Numero Impianti ed energia prodotta		2017		2018	
Dimensionamento	Classi di potenza (MW)	N°	GWh	N°	GWh
Piccolo/Medio	$P \leq 1 \text{ MW} \geq$	5175	690	5209	746
Grande	$1 \text{ MW} < P \leq 10 \text{ MW}$	117	1114	125	1099
Offshore	$P > 10 \text{ MW}$	287	15938	308	15872
	Totale	5579	17741.9	5642	17716.4

Fig.3.4. Rielaborazione propria, Fonte GSE dati TERNA

Nel corso del 2017 la produzione degli impianti eolici è stata pari a 17.741,9 GWh, di cui la maggior parte, circa 89.8% è stata generata dai parchi eolici con potenza superiore a 10 MW, mentre circa il 6.3% da quelli di potenza compresa tra 1 e 10 MW e il restante 3.9% da impianti di potenza inferiore a 1 MW. Fonte (Agrillo et al., 2019).

Nell'anno successivo (2018) la produzione degli impianti è stata pari a 17.716 GWh, le percentuali con la quale hanno contribuito le rispettive classi di impianto sono rimaste pressoché invariate.

Ultimo dato importante è dato dalla differenza di energia prodotta nei due anni. Questa infatti è stata maggiore nel 2017 nonostante il numero di impianti sia aumentato e come illustrato in Fig. 3.3, la potenza totale installata è aumentata di 498,8 MW. Questo risultato potrebbe essere attribuibile alla variabilità con la quale il vento si presenta che come visto nel capitolo precedente (secondo paragrafo) è uno dei fattori che rende questa energia non controllabile.

Dato uno sguardo ravvicinato alla potenza e la produzione degli impianti eolici italiani passiamo all'ultimo paragrafo di questo paper dove verrà calcolato l'EROI degli impianti eolici italiani per la classe di potenza medio/piccola.

3.3 Computazione EROI italiano degli impianti eolici medio/piccoli

In questo ultimo capitolo è stato calcolato l'EROI degli impianti eolici italiani con un dimensionamento medio/piccolo per l'anno 2016, ovvero quelle classi di potenza che partono da 1KW fino a 1000KW, si è deciso di calcolare l'EROI per una classe di potenza definita, in modo da dare un valore più dettagliato di tale indice e una misura quindi più precisa di ciò che rappresenta.

Iniziamo dando le assunzioni utilizzate per il calcolo dell'EROI:

1. Per la determinazione del denominatore sono stati presi in considerazione i seguenti costi trovati nel sito del (GSE, 2017a) seguendo le indicazioni trovate in (Kubiszewski et al., 2010):

- I costi specifici di investimento sono suddivisi in: costo per il materiale dell'aerogeneratore, costo sviluppo dell'impianto, costo riguardante le opere elettriche, costi delle opere civili, costi di trasporto
 - Costi di O&M (Operation and Maintenance) ovvero quei costi che servono a mantenere l'impianto in funzione per la sua durata di vita, che per le FER sono generalmente bassi.
2. Per il calcolo dell'energia ricavata si è fatto riferimento al Rapporto Statistico del GSE (Agrillo & Dal Verme, 2017) e per ottenere un valore monetario riferito a tale ricavo energetico si sono trovati i prezzi di mercato dai documenti del GSE riferiti all'anno 2016 (GSE, 2017c) con incentivazione di 0.3 €/KWh (Morleo, 2017).
 3. La durata di vita di un impianto è di 20 anni.
 4. Numeratore e denominatore sono calcolati a livello energetico/monetario.

Nel valore finale ottenuto per ogni classe di potenza, non è stato possibile calcolare un coefficiente che tenga conto delle esternalità (e.g. l'inquinamento acustico), ovvero un criterio che dia un valore attendibile per un calcolo così specifico. Si è comunque visto che esistono due metodologie che vengono utilizzate per tenere conto degli impatti ambientali, la ReCiPe 2008 e l'energy payback analysis (Haapala & Prempreeda, 2014). Tali metodologie sono utilizzate per LCA (Life Cycle Assessment) che è uno strumento metodologico utilizzato per analizzare quantitativamente il ciclo di vita di prodotti ed attività (National Institute for Public Health & and the Environment, 2011).

3.3.1 I costi energetici

I risultati in Tab. 3.5 (Costi Specifici per sottoclasse) illustrano che il maggior contribuente al costo di produzione di un impianto eolico per tutte le sottoclassi di potenza è rappresentato dall'aerogeneratore, il cui contributo è compreso tra 51,4 e 67,1(%). Allo scopo di definire un corretto EROI, secondo la definizione data nel secondo capitolo, sono state comunque prese in considerazione anche le spese effettuate per trasporti e opere elettriche (allacciamento alle reti di alta tensione).

Nella Tab 3.6 (Costi Specifici Totali) viene messo in evidenza il Costo Specifico Totale dell'insieme delle sottoclassi in milioni di euro, che risulta essere per un totale di 2.757 impianti di 608.57 milioni di euro.

Nella penultima tabella (Tab 3.7 Costi Operation and Maintenance) sono rappresentate le spese relative alla manutenzione e alle operazioni che vengono effettuate mediamente in un anno negli impianti, queste sono state moltiplicate per la loro durata media (che è stata stimata di 20

anni), ottenendo un valore complessivo di 238.10 milioni di euro. Questo valore rispecchia quanto detto sul mantenimento di un impianto eolico, difatti il costo è un terzo dell'investimento iniziale e viene dilazionato su un periodo di venti anni.

L'ultima tabella Tab. 3.8 (Costi Finali Complessivi) somma le componenti trovate precedentemente dando il Costo Finale Complessivo, pari a 846.67 milioni di euro. Tale valore sarà utilizzato nella formula finale come denominatore.

TABELLE COSTI

Suddivisione dei costi Impianti da 1 a 20 kW	Ripartizione dei costi (%)	Valore a impianto (€mln/MW)	Valore Totale (€mln)	Suddivisione dei costi Impianti da 60 a 200 kW	Ripartizione dei costi (%)	Valore a impianto (€mln/MW)	Valore Totale (€mln)
Aerogeneratore	62.9	3.12	13.51	Aerogeneratore	51.4	1.35	108.15
Sviluppo	10.9	0.54	2.34	Sviluppo	9.6	0.25	20.20
Opere elettriche	9.1	0.45	1.95	Opere elettriche	15.1	0.40	31.77
Opere civili	12.1	0.60	2.60	Opere civili	18.6	0.49	39.13
Trasporto	4.9	0.24	1.05	Trasporto	5.3	0.14	11.15
Totale	100	4.96	21.47	Totale	100	2.63	210.40

Suddivisione dei costi Impianti da 20 a 60 kW	Ripartizione dei costi (%)	Valore a impianto (€mln/MW)	Valore Totale (€mln)	Suddivisione dei c. Impianti da da 200 a 1.000 kW	Ripartizione dei costi (%)	Valore a impianto (€mln/MW)	Valore Totale (€mln)
Aerogeneratore	67.1	2.59	348.82	Aerogeneratore	59.1	0.92	20.15
Sviluppo	9.2	0.36	47.83	Sviluppo	8.8	0.14	3.00
Opere elettriche	6.7	0.26	34.83	Opere elettriche	11.4	0.18	3.89
Opere civili	14	0.54	72.78	Opere civili	15.2	0.24	5.18
Trasporto	3	0.12	15.60	Trasporto	5.5	0.09	1.88
Totale	100	3.86	519.85	Totale	100	1.55	34.10

Tab. 3.5 Costi Specifici per sottoclasse

Sotto classi di potenza. Dimensioni medio/piccole	Numero Impianti	Potenza totale Inv. (MW)	Potenza Media ad Inv. (kW)	Costo Specifico a Inv. (€mln/MW)	Costo Specifico Totale (€mln)
Da 1 a 20 kW	333	4.33	13	4.96	21.47
Da 20 a 60 kW	2322	134.68	58	3.86	519.85
Da 60 a 200 kW	80	14.16	177	2.63	37.24
Da 200 a 1.000 kW	22	19.36	880	1.55	30.01
Totale	2757	114.5			608.57

Tab 3.6 Costi Specifici Totali

Sotto classi di potenza. Dimensioni medio/piccole	Potenza Totale (MW)	Costo O&M (€mln/MW)	Costo O&M vita media (€mln/MW)	Costo O&M Totale (€mln)
Da 1 a 20 kW	4.33	0.083337	1.67	7.22
Da 20 a 60 kW	134.68	0.075520	1.51	203.41
Da 60 a 200 kW	14.16	0.057955	1.16	16.41
Da 200 a 1.000 kW	19.36	0.028562	0.57	11.06
Totale	114.52			238.10

Tab 3.7 Costi Operation and Maintenance

Sotto classi di potenza. Dimensioni medio/piccole	Costo Specifico Totale (€mln)	Costo O&M Totale (€mln)	Costo Complessivo Totale (€mln)
Da 1 a 20 kW	21.47	7.22	28.69
Da 20 a 60 kW	519.85	203.41	723.26
Da 60 a 200 kW	37.24	16.41	53.65
Da 200 a 1.000 kW	30.01	11.06	41.07
Totale	608.57	238.10	846.67

Tab. 3.8 Costi Finali Complessivi

3.3.2 Ricavi energetici

Il calcolo effettuato per il ricavo energetico è stato preso dal Rapporto Statistico GSE 2016, il valore dell'incentivo medio è preso dal report "Meccanismi di remunerazione della produzione di energia elettrica da FER" del GSE (Morleo, 2017), mentre per il prezzo dell'energia elettrica è stato preso dal report "valore dell'energia rinnovabile sul mercato elettrico" (GSE, 2017b).

Componente	Dati	Unità di misura
N. impianti	2,757.00	/
Vita impianto	20	Anni
Potenza installata	114.50	MW
Energia prodotta	163,900.00	MWh
Costo unitario	42.85	€/MWh
Incentivi	270.00	€/MWh
Ricavi senza incentivi	140,46	€mln
Valore incentivi tot.	885,06	€mln
Ricavi totali	1025,52	€mln

Tab 3.9 Ricavi energetici in euro

Il valore finale della Tab 3.9 Ricavi energetici è di 1.025,52 milioni di euro, i quali sono stati ricavati in grande maggioranza dagli incentivi che vengono dati dallo Stato, confermando quanto l'impegno che Europa e Italia stanno assumendo nelle FER.

$$EROI (2016) \text{ impianti italiani} = \frac{1025,52 \text{ €mln}}{846,67 \text{ €mln}} = 1.21$$

Il risultato ottenuto per gli impianti eolici italiani nel 2016, con una classe di potenza da 1 KW fino a 1000 KW è stato di (1.21). Il risultato è come detto adimensionale e rappresenta un valore indicativo del rendimento di tali impianti.

Conclusioni

Il lavoro svolto ha potuto dare una visione generale introduttiva dell'energia e delle fonti energetiche. È stato presentato l'indice che viene definito come il rapporto tra energia ricavata su energia spesa, il quale è stato calcolato per la fonte energetica rinnovabile del vento.

Le analisi svolte nell'ultimo capitolo hanno portato in evidenza a livello nazionale italiano una concentrazione di impianti eolici in alcune regioni della penisola (principalmente nel sud). È stato visto che la maggior parte dell'energia viene prodotta da impianti di grandi dimensioni, pur essendo questi un numero di molto inferiore rispetto le altre classi.

Tramite i dati forniti del GSE si è calcolato il denominatore della formula dell'EROI (energia investita) degli impianti eolici italiani con una classe di potenza compresa tra 1KW e 1000 KW. I dati di costo mostrano che i costi energetici sono per la maggior parte imputabili alla produzione della pala eolica. Sono stati tenuti da conto comunque gli altri costi energetici che competono l'investimento complessivo per la produzione di tali turbine. I costi variabili sono stati moltiplicati per la vita media di un impianto ed aggiunti ai costi iniziali di investimento. Non è stato possibile trovare un coefficiente che tenesse conto dell'impatto in maniera specifica per tale classe di potenza, si è comunque visto che è stata presa una direzione per far sì che in futuro sarà possibile avere delle stime più affidabili per tale calcolo (Haapala & Prempreeda, 2014; National Institute for Public Health & and the Environment, 2011).

Sempre seguendo i dati GSE sono stati rilevati i ricavi del 2016 per la medesima classe di potenza. È stato notato come gli incentivi siano stati la parte principale del risultato finale, impattando l'86,3% sui ricavi totali, senza tali incentivazioni l'investimento in impianti con dimensionamento micro, piccolo e medio non darebbero un ritorno economico positivo.

L'EROI calcolato è stato pari a 1.21, non rispecchiando i valori trovati negli articoli di maggiore rilievo nel campo dell'EROI (Kubiszewski et al., 2010; Murphy & Hall, 2010). Si ritiene quindi che tale differenza sia dovuta ad una serie di fattori quali:

- Gli impianti eolici con tale classe di potenza, risultano essere quelli di minor rendimento economico, richiedono una maggiore spesa per MW di potenza installata i costi infatti vengono distribuiti in impianti di maggiore dimensionamento.
- I dati contengono delle assunzioni che potrebbero aver determinato una variazione nel calcolo del denominatore e del numeratore, soprattutto per il secondo il quale ha una maggiore variabile di fattori e una maggiore difficoltà nel reperimento.

- È stato visto che il problema comune dell'EROI è la mancanza di un criterio oggettivo per la sua computazione, questo ha comportato a delle scelte soggettive per i fattori compresi nel calcolo è quindi possibile che questi siano stati un'ulteriore causa di difetto.

In osservazione al grafico “net energy cliff” presente nel secondo capitolo, in cui vengono collocate le diverse fonti energetiche in base al valore del loro EROI, il valore ottenuto di 1,21 è uno dei valori più bassi, implicando quindi che per ogni unità di energia prodotta l'80-90% è stata spesa per poter produrre tale unità. Il valore ottenuto sottolinea un'insufficienza dell'eolico nel poter soddisfare il fabbisogno energetico globale e nazionale, implicando un'impossibilità di sostituzione alle fonti che causano problematiche ambientali (le quali sono principalmente di origine fossile). Rimane comunque da tenere presente che tali valori potrebbero essere variati nel tempo a causa delle difficoltà di estrazione e alla diminuzione delle risorse disponibili, nonché i valori dell'EROI potrebbero essere maggiori per gli impianti eolici con elevata potenza, poiché questi hanno una capacità di produzione che aumenta più che proporzionalmente. Infine la tecnologia e l'esperienza hanno comportato nella filiera dei combustibili fossili significative riduzioni nel tempo, in termini di costo ed efficienza. Tali riduzioni e miglioramenti potrebbero essere altrettanto importanti e fondamentali nello sfruttamento dell'energia del vento.

Bibliografia

- Agrillo, A., & Dal Verme, M. (2017). *RAPPORTO STATISTICO 2016, GSE*.
https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Rapporto%20statistico%20GSE%20-%202016.pdf
- Agrillo, A., Dal Verme, M., Liberatore, P., Lipari, D., Lucido, G., Maio, V., & Surace, V. (2019). *RAPPORTO STATISTICO 2018, GSE*.
- Agrillo, A., Dal Verme, M., Liberatore, P., Lipari, D., Maio, V., Surace, V., & Benedetti, L. (2018). *RAPPORTO STATISTICO 2017, GSE*. In *Gestore dei Servizi Energetici S.p.A.*
- Beseghini, S. (2019). *RELAZIONE ANNUALE STATO DEI SERVIZI, ARERA*.
<https://www.arera.it/it/stampa/ra19.htm>
- Brunello, P. (2017). *Lezioni di fisica tecnica*. Edises.
- Capellán-Pérez, I., de Castro, C., & Miguel González, L. J. (2019). Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. *Energy Strategy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399>
- Cretì, A., & Fontini, F. (2019). *Economics of Electricity, Markets, Competition and Rules*. Cambridge University Press.
- Dicembrino C. (2009). *Definizione Intensità Energetica*. Bankpedia, Redatto Da CFO Enel X.
<http://www.bankpedia.org/index.php/it/107-italian/i/20631-intensita-energetica>
- Donatella Carboni, Matteo De Vincenzi, & Gianni Fasano. (2015). *La produzione elettrica dall'Unità d'Italia ai giorni nostri*.
file:///C:/Users/Davide%20Griggio/Downloads/1_CapitoloPrimo.pdf
- ENEA. (n.d.). *Sito ENEA: L'Intensità energetica*. Retrieved February 19, 2020, from <https://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/fonti-rinnovabili-scenari-e-politiche/intensita-energetica>
- Eurostat. (2018a). *File:Figure 3-Primary production of energy from renewable sources EU-28 1990-2017.png - Statistics Explained*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Figure_3-Primary_production_of_energy_from_renewable_sources_EU-28_1990-2017.png
- Eurostat. (2018b). *Renewable energy statistics - Statistics Explained*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics
- Favotto, Francesco., Bozzolan, Saverio., & Parbonetti, Antonio. (2016). *Economia aziendale : modelli, misure, casi*. McGraw-Hill.
- Ghiassi-Farrokhfal, Y., Keshav, S., & Rosenberg, C. (2014). An EROI-based analysis of renewable energy farms with storage. *E-Energy 2014 - Proceedings of the 5th ACM*

- International Conference on Future Energy Systems*, 3–13.
<https://doi.org/10.1145/2602044.2602064>
- Gillingham, K., Newell, R. G., & Palmer, K. (2009). Energy Efficiency Economics and Policy. *Annual Review of Resource Economics*, 1(1), 597–620.
<https://doi.org/10.1146/annurev.resource.102308.124234>
- GSE. (2017a). *Author n.g. Il punto sull'eolico*.
https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Studi%20e%20scenari/Il%20punto%20sull'eolico.pdf
- GSE. (2017b). *Author n.g. Il valore dell'energia rinnovabile sul mercato elettrico*.
- GSE. (2017c). *Il valore dell'energia rinnovabile sul mercato elettrico*.
- GSE. (2018). *Fuel mix nazionale, dati e statistiche GSE*. <https://www.gse.it/servizi-per-te/news/fuel-mix-determinazione-del-mix-energetico-per-gli-anni-2017-2018>
- Haapala, K. R., & Prempreeda, P. (2014). ‘Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines’. In *Int. J. Sustainable Manufacturing* (Vol. 3, Issue 2).
- Hall, C. A. S., Lindenberger, D., Kümmel, R., Kroeger, T., & Eichhorn, W. (2007). The need to reintegrate the natural sciences with economics. In *Making World Development Work: Scientific Alternatives to Neoclassical Economic Theory* (Vol. 51, Issue 8, pp. 75–89). University of New Mexico Press. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0663:tntrtn\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0663:tntrtn]2.0.co;2)
- Kubiszewski, I., Cleveland, C. J., & Endres, P. K. (2010). Meta-analysis of net energy return for wind power systems. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.01.012>
- Kühtz, S. (2005). *Energia e sviluppo sostenibile. Politiche e tecnologie* (Rubbettino, Ed.).
- Kümmel, R. (1982). The impact of energy on industrial growth. *Energy*, 7(2), 189–203.
[https://doi.org/10.1016/0360-5442\(82\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0360-5442(82)90044-5)
- Manzo I. (2019). ASVIS I Paesi del G20 confermano l'impegno sull'Agenda 2030 e gli accordi di Parigi. *Alleanza Italiana per Lo Sviluppo Sostenibile*. <https://asvis.it/home/46-4306/i-paesi-del-g20-confermano-limpegno-sullagenda-2030-e-gli-accordi-di-parigi#.XksA2mhKg2w>
- Ministero dello Sviluppo Economico. (2018). *PROPOSTA DI PIANO NAZIONALE INTEGRATO PER L'ENERGIA E IL CLIMA*.
- Ministero dello Sviluppo Economico. (2019). *Author n. g. Analisi e statistiche energetiche e minerarie*. <https://dgsaie.mise.gov.it/ben.php>
- Morales, R. (2012). Thermodynamics - Fundamentals and Its Application in Science. In *Thermodynamics - Fundamentals and Its Application in Science*. InTech. <https://doi.org/10.5772/2615>

- Morleo, V. (2017). *Meccanismi di remunerazione della produzione di energia elettrica da FER*.
- Murphy, D. J., & Hall, C. A. S. (2010). Year in review-EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1185(1), 102–118. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05282.x>
- National Institute for Public Health, & and the Environment. (2011). *Author n.g. What is LCA? / RIVM*. Ministry of Health, Welfare and Sport. <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/what-is-lca>
- Patterson, M. G. (1996). What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377–390. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)
- Pearce, J. M. (2016). Return on investment for open source scientific hardware development. *Science and Public Policy*, 43(2), 192–195. <https://doi.org/10.1093/scipol/scv034>
- Politecnico di Milano. (2019). *Energy Efficiency Report*. <https://www.infobuildenergia.it/Allegati/17276.pdf>
- TERNA. (2019a). *Author n.g. / Documento di Descrizione degli Scenari Energetici 2019*. https://download.terna.it/terna/DDS%202019%2010%2015_8d7522176896aeb.pdf
- TERNA. (2019b). *Author n.g. DATI STORICI Energia in Italia*. https://download.terna.it/terna/8-DATI%20STORICI_8d736bdf116e207.pdf
- TERNA. (2019c). *Author n.g. Il ruolo di Terna - Terna spa*. <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/ruolo-terna>
- Thornton, O. (2019). *Global wind capacity installed in 2018*. Global Wind Council. <https://gwec.net/51-3-gw-of-global-wind-capacity-installed-in-2018/>
- Vindel, J. M., & Polo, J. (2014). Intermittency and variability of daily solar irradiation. *Atmospheric Research*, 313–327. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.03.001>