

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi dell'impatto delle fonti rinnovabili sul
mercato dell'energia elettrica



Relatore
Prof. Carlo Cambini
Prof.ssa Chiara Ravetti

Candidata
Valentina Bergeretti

Anno Accademico 2020/2021

Sommario

L'energia elettrica è alla base di tutte le economie sviluppate, il cui consumo energetico è in continuo incremento. La produzione di energia elettrica contribuisce fortemente alla generazione di emissioni di gas serra ed è sempre più necessario un impiego di fonti rinnovabili per rendere tale sviluppo sostenibile.

Lo scopo del presente studio è quello di stimare l'impatto delle fonti rinnovabili sul consumo e sulla produzione di energia elettrica pro-capite, il metodo di stima dei modelli formulati è la regressione con effetti fissi su dati panel. L'analisi è stata effettuata su 92 paesi, utilizzando dati dal 1990 al 2019.

Variabili come il PIL, il mix energetico, il consumo e la produzione di energia, l'apertura verso il commercio internazionale dei vari stati, la capacità installata e i prezzi dell'energia, sono state impiegate per comprendere le implicazioni della sostituzione tra le fonti non rinnovabili e quelle rinnovabili nella produzione di energia elettrica.

Indice

Indice	1
1 Introduzione	2
2 Revisione della letteratura.....	4
2.1 Indicatori utilizzati nel mercato elettrico.....	4
2.1.1 Consumo energetico ed elettrico.....	5
2.1.2 Mix energetico.....	7
2.1.3 Capacità installata	9
2.2 Analisi empiriche.....	10
2.2.1 Impatto dell'elettricità sul benessere collettivo	11
2.2.2 Impatto delle fonti rinnovabili sull'elettricità nelle zone rurali	13
Ricerca empirica.....	18
3 Metodologia.....	18
3.1 Descrizione metodologia	18
3.1.1 Modello del consumo energetico rinnovabile	19
3.1.2 Modello di produzione elettrica rinnovabile	23
4 Dati.....	25
4.1 Banche dati utilizzate.....	26
4.2 Descrizione dei dati	27
4.2.1 Dati del modello dei consumi	29
4.2.2 Dati del modello di produzione.....	34
5 Analisi dei risultati.....	40
5.1 Impatti sul consumo energetico di rinnovabili	41
5.2 Impatti sulla produzione elettrica rinnovabile	48
Conclusioni.....	60
6 Appendice	63
7 Tabelle	67
8 Riferimenti	71

1 Introduzione

La migrazione verso le fonti rinnovabili è necessaria per garantire un futuro sostenibile e vede l'energia elettrica assumere un ruolo sempre più rilevante. Questa transizione implica delle ripercussioni sul mercato di questo bene indifferenziato, un mercato poco frammentato nel quale i principali player sono enti originariamente pubblici. A fine 2019, in termini assoluti, i maggiori produttori di elettricità in Terawattora (TWh) corrispondono alle maggiori potenze economiche, in oriente primeggiano la Cina e l'India, in Europa: Germania, Francia e Italia, nel continente americano gli Stati Uniti, Canada e Brasile, in Africa si distingue l'Egitto. Rapportando la produzione al PIL invece, spiccano tra tutti gli stati: il Vietnam, l'Islanda e di nuovo l'Egitto. In tutte le economie, in particolare per gli stati esportatori, il settore elettrico è una componente importante e la progressiva sostituzione dell'energie non rinnovabili con fonti pulire, potrebbe porre fine a degli equilibri che hanno caratterizzato il mercato per molti anni. Grandi produttori, la cui energia deriva per lo più da gas naturali e carbone rispettivamente, come Russia e Cina saranno affetti negativamente da questa tendenza. Lo sviluppo delle rinnovabili è ad uno stato differente per l'Europa, il centro America e il sud America, dove più della metà delle fonti per la produzione di energia elettrica sono rinnovabili (bp Statistical Review of World Energy 2020, Regional electricity generation by fuel 2019).

Quasi tutte le parti che compongono il sistema elettrico possono influenzare l'ambiente, la dimensione e gli impatti dipenderanno tanto dalla produzione, quanto dal consumo dell'energia elettrica.

Nel 2018, il consumo finale totale di elettricità nel mondo ha raggiunto i 22 315 TWh, il 4,0% in più rispetto al 2017 (Electricity information overview, IEA 2019). Nel 2019, la generazione globale di elettricità da fonti rinnovabili è aumentata di 440 TWh (6,5% su base annua), il secondo aumento più alto dopo il 2018. La crescita anno su anno della generazione di rinnovabili è stata del 6,5%, più veloce di qualsiasi altro combustibile, compresi carbone e gas naturale. La quota delle rinnovabili nella fornitura globale di elettricità ha raggiunto il

27% nel 2019, il livello più alto mai registrato. L'eolico, il solare fotovoltaico e l'idroelettrico insieme hanno costituito oltre l'85% della crescita delle rinnovabili, integrate principalmente dalle bioenergie. La generazione a basse emissioni di carbonio ha superato per la prima volta quella del carbone, fornendo il 37% della fornitura globale di elettricità nel 2019, con un forte incremento delle rinnovabili (440 TWh) e del nucleare (95 TWh) (IEA, 2019).

La crescita della popolazione, la crescita economica e l'aumento del consumo, assumono un ruolo sempre più incisivo. Il nostro pianeta sta risentendo, già da molto tempo, degli effetti di questi incrementi e uno scenario, ormai non più di lungo periodo, è quello che ci porta al cambiamento climatico.

Il modo in cui le persone vivono, deve adattarsi alla pressione ecologica, specialmente riguardo al consumo, alla produzione, comunicazione, alle attività industriali, al trasporto, etc.

I maggiori sviluppi tecnologici, la diversità dei prodotti, il commercio internazionale e la crescita della popolazione hanno aumentato notevolmente la domanda di energia dei paesi. È molto importante che questa domanda crescente sia soddisfatta con una fonte di energia sicura e accessibile. A causa di questo problema, si pensa che i paesi dovrebbero essere indirizzati verso fonti di RE in modo che possano soddisfare la loro crescente domanda di energia senza aumentare le loro importazioni di energia (Hasan Dincer et al. 2019).

2 Revisione della letteratura

L'elettricità è uno dei tre componenti che costituiscono la produzione totale di energia. Le altre due sono il trasporto e il riscaldamento.

Più di un terzo dell'elettricità proviene da fonti energetiche rinnovabili ma la percentuale di produzione energetica rinnovabile, nel mix totale, è decisamente ridotta (Our World in data, 2020).

Per comprendere il mercato elettrico è stato quindi necessario analizzare anche quello energetico, dal quale ne derivano molti indicatori e per questo motivo non è possibile trattare i due in modo distinto.

La revisione della letteratura è così suddivisa: capitolo 2.1 vengono analizzati gli indici elettrici.

2.1 Indicatori utilizzati nel mercato elettrico

Tali indicatori sono stati individuati considerando l'agenda del 2030 per lo Sviluppo Sostenibile, adottata da tutti i membri delle Nazioni Unite nel 2015, contiene una lista di 17 obiettivi (SDG: sustainable development goals), che coinvolgono differenti tematiche, tra cui l'eliminazione della povertà, il miglioramento della salute e dell'istruzione, la riduzione delle disuguaglianze e lo stimolo della crescita economica, ponendo una particolare attenzione al cambiamento climatico.

L'accesso all'energia e all'elettricità deve essere: economico, affidabile, sostenibile e moderno per tutti.

2.1.1 Consumo energetico ed elettrico

Consumo energetico

Il consumo energetico (abbreviato come EC) è chiaramente tra i principali indicatori energetici di una nazione.

Viene misurato in tonnellate equivalenti di petrolio e viene spesso associato ad alcuni indici di sviluppo.

Nella letteratura si trova frequentemente come EC_{pc} (Consumo Energetico per abitante) utile per poter confrontare paesi o aree geografiche differenti.

Da un punto di vista macroeconomico viene analizzato in relazione con il PIL (Prodotto Interno Lordo), indicatore dell'attività economica, adatto per misurare e mettere a confronto la situazione di sviluppo economico dei vari paesi Qiang Wang et al. (2020), Chien C. Lee et al. (2007), Dorota A. Janiszewska (2019).

Frequente è inoltre l'utilizzo del consumo energetico rinnovabile (REC), utilizzato per comprendere l'impatto di tali fonti sulla crescita economica, sul mix energetico e sulla produzione di CO₂. In linea anche con il SGD 7.2.1, che mira ad avere un'elevata percentuale di energia rinnovabile nel consumo finale di energia (Bhattacharya 2011; Menegaki et al. 2011; Roula Inglesi-Lotz 2016; Yiping Fang 2015; Taichen Chien et al. 2008; Apergis et al. 2010; Ito, K. 2017; Nicholas Apergis 2010; Omri et al. 2015; Hu et al. 2018; Amri, F. 2017; Annette Evans et al. 2009).

Innumerevoli studi trattano, poi, del tema del consumo energetico di uno Stato o area geografica, che è strettamente legato al suo livello di attività economica. Il rapporto tra le due grandezze - Consumo Interno Lordo di energia (CIL) e Prodotto Interno lordo (PIL) è definito intensità energetica (IE) ed è un indicatore, seppur grezzo e aggregato, dell'efficienza energetica di una economia. In generale, a parità di condizioni, una riduzione dell'indice implica una riduzione dei consumi di energia. È stato dimostrato, a livello globale, che un incremento dell'indice di intensità energetica porta ad una riduzione del PIL (Celil Aydin, Ömer Esen, 2018; Antonia Díaz et al. 2019). Tuttavia, l'intensità energetica è un indicatore fortemente collegato allo sviluppo economico di un paese e l'efficienza energetica non è l'unica

variabile che influenza l'intensità: altri fattori quali i cambiamenti nella struttura economica ed industriale, il tasso di urbanizzazione, gli stili di vita e le condizioni climatiche, hanno un impatto sull'andamento di questo indicatore. Quindi una riduzione dell'intensità energetica non sempre e non solo indica un miglioramento dell'efficienza energetica: ad esempio il passaggio da una struttura produttiva ad alto consumo di energia verso una a basso consumo di energia, a parità di condizioni, determina una riduzione dell'intensità energetica che non è associata necessariamente ad un incremento dell'efficienza energetica (Fengtao Guang et al. 2019; Ang, 2007, 2008; Marrero, 2010; Apergis et al., 2010; Antonia Díaz et al. 2019).

Consumo elettrico

La letteratura esistente analizza anche il consumo elettrico (ElC), misurato in KWh (kilowattora) o, nel caso in cui si analizzi il consumo di interi stati, viene espresso in TWh (terawattora). In molti studi viene analizzata la relazione causale tra il ElC e la crescita economica, spesso si trova nella forma pro capite (ElCpc) per operare un confronto tra stati (Jay Squalli 2007; Paresh K. Narayan et al. 2008; Jia-Hai Yuan et al. 2008; Nicholas M. Odhiambo 2009; Nicholas Apergis et al 2011; Boqiang et al. 2016; Shuwen Niu et al. 2013; Samuel A. Sarkodie et al. 2020).

Alcuni studi, Nadia S. Ouedraogo (2013), Samuel A. Sarkodie et al. (2020), rivolgono l'attenzione verso ElCpc e l'indice di sviluppo umano (ISU, in inglese: Human Development Index), che è un "un indice composito che misura i risultati medi in tre dimensioni fondamentali dello sviluppo umano - l'aspettativa di vita, il livello di educazione e il GNIpc (PPP)¹.

Nel punto 7.1.1 nel SDG, si stabilisce che per garantire l'accesso universale a servizi energetici si può fare riferimento all'indicatore di porzione di popolazione con accesso all'energia elettrica, noto come livello di elettrificazione (EL).

Il potenziale impatto dell'energia o dell'accesso all'elettricità sulla disuguaglianza, lo sviluppo

¹ In inglese il GNIpc (PPP) è il "Gross National Income per capita at Purchasing Power Parity". L'indicatore fornisce valori pro capite per il reddito nazionale lordo (RNL) espressi in dollari internazionali correnti, convertiti dal fattore di conversione della parità di potere d'acquisto (PPA).

umano e la qualità della vita ha attirato diversi studi empirici, molti dei quali sono stati analizzati nel capitolo 2.2.1, dedicato al fenomeno di elettrificazione rurale.

2.1.2 Mix energetico

Un indicatore molto importante per l'analisi del settore elettrico è quello relativo alla generazione elettrica (ElG) intesa come "quantità di elettricità che un generatore produce durante uno specifico periodo di tempo" (EIA 2021).

È definita come elettricità generata da combustibili fossili, centrali nucleari, centrali idroelettriche (escluso lo stoccaggio con pompaggio), sistemi geotermici, pannelli solari, biocarburanti, vento, ecc. Include l'elettricità prodotta in impianti di sola elettricità e in impianti di cogenerazione. Questo indicatore è misurato in Gigawattora (GWh) o terawattora (TWh) e in percentuale della produzione totale di energia.

Il mix energetico (in inglese conosciuto come Power Generation Mix) si riferisce alla combinazione delle varie fonti per la produzione di elettricità in una specifica area geografica, può essere misurato sia in termini assoluti che relativi (Wina Graus, Ernst Worrell 2009).

Tale indicatore è utile per comprendere il contributo delle fonti rinnovabili alla produzione di energia elettrica.

A livello globale vi è ancora un dominio da parte del carbone ma molti studi vedono la quota delle rinnovabili, nel mix energetico, in crescita e che garantirà nel 2050 il 63% della fornitura totale di energia primaria (Dolf Gielen et al, 2019).

Uno sviluppo veramente sostenibile può essere raggiunto con la diversificazione e la localizzazione delle fonti e dei sistemi energetici, che fornirebbero anche una sicurezza per l'approvvigionamento e la distribuzione dell'energia. Si promuove, quindi, la diversità energetica come l'unica sensata e fattibile via, per uno sviluppo sostenibile, (Xianguo Li, 2015).

Il processo di generazione di elettricità contribuisce, però, per più di un terzo alla produzione di emissioni CO₂ (Ang et al., 2011; Zhou et al., 2012) e molti studi ne analizzano le correlazioni (Ang 2007; Soytaş et al., 2007; Zhang et al., 2009; Apergis 2010; Shahbaz et al., 2014; Ahdi et al., 2015; Ahdi N Ajmi 2015; Danish 2018).

Le emissioni di gas serra, specialmente le emissioni di anidride carbonica (CO₂), sono considerate le cause principali del riscaldamento globale e sono un importante indicatore di sostenibilità ambientale di un paese (Ugur Soytaş, Ramazan Sari, Bradley T. Ewing 2007).

Raggiungere un'economia basata su zero emissioni nette richiede una trasformazione radicale nel modo in cui un'area geografica fornisce, trasforma e utilizza l'energia.

La rapida crescita delle energie rinnovabili ha mostrato il potenziale delle nuove tecnologie di energia pulita nella riduzione delle emissioni. Gli obiettivi di riduzione dell'anidride carbonica, richiederanno che queste tecnologie siano impiegate su una scala molto più grande, insieme allo sviluppo e alla diffusione massiccia di molte altre soluzioni di energia pulita che sono attualmente in una fase iniziale di sviluppo, come le numerose applicazioni dell'idrogeno e la cattura del carbonio (Energy Technology perspectives 2020 OECD/IEA).

Vi sono innumerevoli studi che affrontano l'argomento e che dimostrano come, nel lungo periodo, una riduzione del consumo energetico, soprattutto di quello legato ai combustibili fossili, sembri essere una possibile soluzione per la riduzione delle emissioni CO₂ (Ugur Soytaş et al. 2009).

Per contro, nello studio condotto da Menegaki (2011), si è visto che un aumento dell'1% delle emissioni di gas serra ha avuto un effetto positivo maggiore sul PIL rispetto a un aumento delle fonti energetiche rinnovabili e questo è dovuto all'elevato costo da affrontare negli investimenti in energie rinnovabili che non li rende driver competitivi nella crescita del PIL.

Inoltre, nello studio di (Apergis et al. 2010), condotto su 19 paesi - sviluppati e in via di sviluppo - sembrerebbe invece che, nel breve periodo il consumo di energia nucleare giochi un ruolo importante nella riduzione delle emissioni di CO₂ mentre il consumo di RE non contribuisce alla riduzione delle emissioni.

Se per gli indici hanno correlazioni più evidenti, il tema della riduzione di emissioni si identifica meno

La mancanza di un'adeguata tecnologia di immagazzinamento per superare i problemi di fornitura intermittente rimane un limite per l'impiego di soli fonti rinnovabili. Di conseguenza i produttori di elettricità, ad esempio, devono fare affidamento sui combustibili fossili per soddisfare il carico della domanda di picco (Apergis et al. 2010).

2.1.3 Capacità installata

La capacità installata (IC, in inglese nota come Installed Capacity), è una misura della potenza massima in uscita, si riferisce alla massima quantità di elettricità che un generatore può produrre a piena potenza.

L'unità di misura sono i megawatt (MW) o gigawatt (GW) e viene misurata considerando la capacità installata cumulata.

La capacità installata varia in base alla fonte e alla zona geografica.

Negli Stati Uniti, ad esempio, il contributo della capacità totale installata rinnovabile, di fonte eolica, fotovoltaica e solare dovrebbe raddoppiare dal 15% nel 2018 al 30% entro il 2030, raggiungendo un totale di 442,8 gigawatt (GW), (Reve 2019).

In Cina, invece, si è sperimentata negli anni una forte crescita della capacità installata di fonti eoliche, supportata e da policy e investimenti (Wang 2010).

Pertanto, è necessario introdurre, congiuntamente alla capacità installata, il tema degli investimenti pubblici. Nel 2017 e nel 2018, il solare fotovoltaico e l'eolico on-shore hanno consolidato il loro dominio nel mercato delle energie rinnovabili, rappresentando in media il 75% degli impegni finanziari totali nelle energie rinnovabili.

La natura altamente modulare di queste tecnologie, i loro brevi tempi di sviluppo dei progetti, la crescente competitività guidata dai miglioramenti tecnologici e produttivi, e le politiche e le misure appropriate giocano un ruolo importante nello spiegare l'ampia quota di investimenti globali in energie rinnovabili di queste tecnologie (IRENA 2020).

Sono inoltre aumentati gli investimenti nell'eolico off-shore, attirando, in media, 21 miliardi di dollari all'anno a livello globale tra il 2013 e il 2018, e rappresentando l'8% dell'aggiunta totale di capacità rinnovabile nel 2018.

In letteratura, congiuntamente alle dimensioni di capacità installata rinnovabile, vengono analizzati i costi livellati dell'elettricità, noti come LCOE (in inglese: Levelized Cost of Electricity). Il LCOE di una tecnologia viene determinato facendo riferimento a fattori legati alla generazione dell'energia attraverso una determinata fonte, includendo l'ammortizzazione del capitale finanziario iniziale, il ritorno sull'investimento, come anche il costo operativo, del combustibile, e della indispensabile manutenzione.

I costi della generazione di energia rinnovabile sono scesi bruscamente nell'ultimo decennio, spinti da tecnologie in costante miglioramento, economie di scala, catene di fornitura competitive e una crescente esperienza degli sviluppatori.

Per il fotovoltaico su scala industriale, sono scesi dell'82% tra il 2010 e il 2019.

Si affermano nuovi progetti solari ed eolici, che stanno battendo quelli più economici e meno sostenibili delle centrali a carbone esistenti. I risultati delle aste di energia confermano tale tendenza decrescente.

Sostituire 500 gigawatt di centrali a carbone esistenti (con i più alti costi operativi) con nuovo solare fotovoltaico ed eolico onshore potrebbe: produrre uno stimolo del valore di 940 miliardi di dollari, o circa l'1% del PIL globale; ridurre i costi annuali del sistema fino a 23 miliardi di dollari all'anno; portare ad una diminuzione delle emissioni annuali di CO₂ di circa il 5% del totale globale dell'anno scorso.

Il calo progressivo dei LCOE conferma che le rinnovabili sono una soluzione a basso costo per il clima e la decarbonizzazione che allinea le esigenze economiche a breve termine con gli obiettivi di sviluppo sostenibile a medio e lungo termine.

Le installazioni di energia rinnovabile potrebbero costituire una componente chiave dei pacchetti di stimolo economico sulla scia della pandemia COVID-19 (IRENA, Power Generation Costs, 2019).

2.2 Analisi empiriche

Per quanto concerne l'analisi sul mercato dell'energia elettrica, viene proposta di seguito una revisione degli articoli di maggior rilievo, che affrontano il tema dell'elettrificazione sotto il punto di vista delle zone rurali, che sono quindi caratterizzate da una domanda bassa di energia elettrica e da un elevato consumo di risorse non rinnovabili.

Si è visto che complessivamente le fonti rinnovabili hanno un impatto positivo sia sul benessere collettivo che sulla produzione di energia elettrica nelle zone in via di sviluppo. Sono infatti tra le fonti complessivamente più sostenibili nonostante si trovino risultati differenti in base alla regione analizzata.

2.2.1 Impatto dell'elettricità sul benessere collettivo

Nella prima parte viene analizzata la letteratura esistente relativa agli effetti socioeconomici legati all'elettrificazione. Nella seconda parte si affronta un'analisi in merito alla fattibilità di alcune tecnologie rinnovabili in zone in via di sviluppo e al loro impatto sulla produzione di energia elettrica.

La seguente letteratura contribuisce allo studio condotto solo in minima parte.

Servirà per comprendere l'impatto causale tra l'elettricità e alcune variabili economiche e per sottolineare l'importanza di un servizio che nelle zone sviluppate è ormai un bene idoneo a procurare agi ed opportunità che fuoriescono dal concetto di incoercibile necessità.

Per analizzare il contesto, innumerevoli studi, mirano a definire in modo generale, come l'elettrificazione contribuisce allo sviluppo rurale, conducendo analisi di regressione e applicando differenti metodi.

Molte delle analisi sono state condotte "sul campo", pertanto contengono dei dati relativi a interviste e sondaggi diretti.

Le variabili utilizzate più frequentemente sono: il reddito pro capite, il tasso di impiego e lo stato di salute della popolazione.

Tra i principali obiettivi della elettrificazione rurale vi è sicuramente, quello di incrementare il benessere collettivo della popolazione. I benefici economici diretti delle RE si verificano quando la fornitura di elettricità abbassa il costo dell'energia per l'utente, con un conseguente aumento del surplus del consumatore. Tuttavia, tali benefici tendono a favorire i benestanti, perché i costi di connessione e le tariffe sono spesso proibitivi per i più poveri (IEG-Independent evaluation group, 2008).

Nella maggior parte degli studi, i questionari domestici includono informazioni sulle caratteristiche della famiglia, sul consumo, sul reddito, sul modello di utilizzo dell'energia e sugli elettrodomestici. Per quanto concerne l'elettricità, sono presenti variabili relative alla connessione della rete e alla qualità del servizio percepito dalle famiglie, in termini di ore di interruzione al giorno.

Nello studio condotto da Shahidur R. Khandker et al. (2009), sono stati raccolti tali dati, per analizzare quale potesse essere l'impatto di una connessione alla rete elettrica sul welfare di una zona rurale del Bangladesh.

Il metodo più utilizzato è quello del PMS (Propensity Score Matching), che propone di sfruttare due gruppi distinti: uno definito "gruppo di controllo" al quale è stata fornita l'energia e un altro al quale non è stata fornita. Il risultato dimostra che l'elettrificazione ha un impatto significativamente positivo sul reddito, sulla spesa e sull'educazione. Per esempio, il guadagno nel reddito totale dovuto all'elettrificazione può aumentare dai 9 ai 30 punti percentuali.

Utilizzando congiuntamente il PMS e il DID (Difference in difference), Shahidur R.K et al. (2009), hanno condotto un'analisi in una comunità rurale vietnamita, i risultati sul reddito sono comuni allo studio precedente ma identificano un "punto di saturazione" dopo un'esposizione prolungata all'elettricità. Gli impatti sono più alti nei primi anni successivi all'elettrificazione, i benefici incrementali si stabilizzano dopo circa nove anni di utilizzo dell'elettricità. Durante questo lasso di tempo, l'uso dell'elettricità e l'adozione di elettrodomestici aumentano anno dopo anno.

Ujjayant Chakravorty et al. (2014), hanno invece condotto un'analisi sulle zone rurali indiane applicando il metodo dei minimi quadrati e delle variabili strumentali ad effetti fissi. Hanno trovato che, una connessione alla rete aumenta i redditi non agricoli delle famiglie rurali di circa 9 pp durante il periodo di studio (1994-2005). Tuttavia, una connessione alla rete e una maggiore qualità dell'elettricità (in termini di meno interruzioni e più ore di elettricità per giorno) aumentano i redditi non agricoli di circa 28,6 pp nello stesso periodo.

Molti studi analizzano, più nel dettaglio, come impattano i sussidi elargiti sulla domanda di energia elettrica e su dimensioni legate alla contribuzione femminile nel reddito familiare e alla partecipazione scolastica dei bambini.

L'allocazione casuale di incentivi per la connessione alla rete e l'utilizzo di stime con il metodo delle variabili strumentali, sono state portate avanti da Barron M. e Torero M. (2014), i quali, sempre facendo riferimento a dati raccolti da indagini sul campo, hanno dimostrato che: l'elettrificazione aumenta l'investimento nell'istruzione tra i bambini in età scolastica, la probabilità di studiare a casa e di svolgere altre attività scolastiche aumenta di 54 punti

percentuali. Il secondo risultato principale, riscontrato in letteratura è che l'elettrificazione supporta la partecipazione delle donne alle attività economiche, permettendo un uso più efficiente del loro tempo, una sostituzione delle ore trascorse in attività domestiche, Grogan Asha Sadanand (2013), Raul Jimenez (2017).

Taryn Dinkelman (2007) ha condotto uno studio nell'Africa del Sud, utilizzando dati panel tra il 1995 e il 2001, afferma che vi è un aumento nel tasso di impiego femminile pari a 13,5% nelle aree trattate, ma non riscontra effetti significativi sul tasso di impiego degli uomini.

Per quanto riguarda l'impatto dell'elettrificazione su aspetti legati alla salute; nelle zone rurali sono principalmente utilizzate fonti di energia non rinnovabili, come il kerosene che ha impatti negativi sulla salute.

Manuel Barron, Maximo Torero (2017), raccogliendo dati relativi alla presenza di infezioni acute legate all'apparato respiratorio, hanno dimostrato che: due anni dopo l'introduzione dell'elettricità, la concentrazione notturna di particolato fine (PM2.5), era diminuita in media del 66%, tra le famiglie che erano state incoraggiate a collegarsi alla rete elettrica rispetto alle altre.

2.2.2 Impatto delle fonti rinnovabili sull'elettricità nelle zone rurali

Da un punto di vista sociale l'elettrificazione nelle zone rurali ha un impatto complessivamente positivo.

Tuttavia, come affermato nello studio condotto da Tensay H. Meles (2020), che ha analizzato l'impatto delle interruzioni elettriche nelle città in via di sviluppo in Etiopia. È stato concluso che la connessione all'elettricità non è sufficiente per uno sviluppo sostenibile. L'affidabilità della fornitura elettrica nei paesi in via di sviluppo è cruciale per godere appieno dei benefici dell'accesso all'elettricità e per una transizione energetica sostenibile dall'uso dei combustibili tradizionali ai moderni servizi energetici.

Le analisi individuate nella letteratura si spostano, quindi, su aspetti relativi all'estensione della rete, alla dimensione delle abitazioni nelle zone rurali, alla domanda di energia e ai

picchi di richiesta.

Determinati questi fattori vengono poi analizzate le tecnologie di produzione più adatte per rendere tale sviluppo sostenibile.

Alcune definizioni base: la fornitura di energia elettrica collegata alla rete (on-grid) è definita come una fornitura di energia che è alimentata da elettricità generata da una centrale, e utilizza una rete di rete di distribuzione ad alta, media e bassa tensione. L'estensione della rete è invece un'espansione della rete dal sistema nazionale di trasmissione dell'energia a nuove aree e comunità. Mentre la fornitura di energia decentralizzata è intesa come la generazione di energia nel singolo villaggio, supportata da un sistema di generazione solare domestico o da una mini-rete alimentata da un generatore diesel/idroelettrico/eolico.²

L'elettrificazione rurale che prevede un collegamento alla rete (on-grid), permette la connessione di interi villaggi attraverso un'estensione della rete stessa, quindi attraverso la costruzione di nuove linee di trasmissione.

Nei vari studi, viene prima operata una valutazione legata alla fattibilità dell'estensione della rete che, quindi, consentirebbe l'accesso a tutte le zone al servizio elettrico.

Dalla simulazione condotta utilizzando i dati di un villaggio indiano, dati relativi alla stima dei costi dell'estensione della rete e all'analisi delle risorse disponibili (solare, idroelettrico eolico), viene mostrato che l'espansione delle linee di rete esistenti non è una scelta adatta sia dal punto di vista dell'efficacia dei costi che della protezione ambientale. La linea di estensione della rete ha anche alti costi iniziali di costruzione e di manutenzione.

La soluzione ottenuta mostra che una combinazione ibrida di solare/eolico/idrico/batteria è un'alternativa economica, sostenibile, tecnicamente ed è fattibile l'estensione della rete. Il sistema ibrido di energia rinnovabile combinato con impianti di stoccaggio dell'energia non solo soddisfa la domanda di carico, ma abbassa anche il costo dell'elettricità e le emissioni di carbonio.

Un risultato simile è confermato anche da Kiflom Gebrehiwot et al. (2019), i quali dimostrano che un sistema ibrido che integra il solare fotovoltaico e le fonti di energia complementari, come la generazione eolica e diesel, può migliorare l'affidabilità e ridurre il costo unitario

² Fonte: <https://www.lumi4innovation.it/smart-grid-cose-e-cosa-significa/>

della produzione di energia e può portare ad una riduzione 37,3 tonnellate di emissioni di anidride carbonica all'anno rispetto alla generazione di elettricità solo diesel.

Finché le densità della popolazione e/o i tassi di urbanizzazione non aumenteranno considerevolmente, l'estensione della rete non sarà probabilmente efficace dal punto di vista dei costi per fornire l'accesso all'elettricità a una gran parte della popolazione, a meno che non vengano elargiti dei sussidi adeguati.

Una soluzione alternativa all'estensione della rete viene analizzata nello studio di Khanh Q. Nguyen (2007), dove si porta in evidenza una maggiore fattibilità economica di impianti indipendenti (eolici e solari) nelle zone rurali del Vietnam.

Le tecnologie decentralizzate di energia rinnovabile hanno, infatti, diversi vantaggi rispetto all'estensione della rete. Possono essere situate più vicino alla domanda, quindi i costi di distribuzione e trasmissione e di conseguenza la perdita di energia e di capacità, sono ridotti. Nello studio citato è stato trovato, per tutte le regioni vietnamite analizzate, che i costi dell'energia fotovoltaica sono inferiori al costo dell'energia del gruppo elettrogeno a benzina, e sono competitivi in termini di costi rispetto all'estensione della rete, specialmente per le aree con bassa densità di carico e basso numero di famiglie da elettrificare.

Nella letteratura, i principali sistemi centralizzati incontrati, sono stati quelli basati su kit PICO PV e su tecnologie SHS.³

Le differenze tra questi sistemi dipendono principalmente dalla capacità che riescono a fornire:

- I sistemi PicoPV sono piccoli apparecchi indipendenti plug-and-play che forniscono luce e/o servizi elettrici aggiuntivi, come la ricarica di telefoni cellulari e lettori mp3 e l'alimentazione di radio, piccoli televisori, piccoli ventilatori ecc. Questi sistemi in ogni caso possono sostituire candele e lampade a cherosene.
- I sistemi SHS (Solar Home System) sono sistemi fotovoltaici autonomi che forniscono un

³ Fonte:

https://energypedia.info/wiki/Features_of_PicoPV_Systems#:~:text=PicoPV%20systems%20are%20small%20independent,replace%20candles%20and%20kerosene%20lamps.

quantitativo maggiore di servizi energetici in termini di TWh e riescono a fornire energia a centinaia di famiglie.⁴

La scelta di uno specifico impianto elettrico dipende da molti fattori e i risultati in letteratura sono eterogenei.

M. Juanpera et al. (2020), hanno indagato recentemente, su quale sia il sistema di elettrificazione più adatto per le zone occupate dalla comunità nigeriana, hanno utilizzato dati economici (costo degli investimenti per l'installazione, prezzo del diesel, tariffa di consumo della rete, ecc.), dati sulla domanda aggregata, sulla generazione solare e dati tecnici (disponibilità della rete nazionale). Lo studio è stato portato avanti in due fasi; fase 1: modello di ottimizzazione tecnico-economica per identificare diverse alternative per ogni realtà. La funzione obiettivo minimizza i costi annuali del progetto, considerando le spese di capitale e quelle operative relative all'installazione dell'asset e al funzionamento del sistema. Fase 2: valutazione con procedura multicriterio considerando gli aspetti tecnici, socio-istituzionali e ambientali.

Il risultato dimostra che, i sistemi basati sulla tecnologia solare fotovoltaica sono i progetti di elettrificazione più adatti alle comunità della Nigeria, mentre la fattibilità della connessione alla rete dipende dalle dimensioni della comunità e dalla distanza dal punto di consumo della rete nazionale più vicino. Anche se includere i generatori diesel nello scenario di elettrificazione può ridurre drasticamente i costi di investimento (52,3% in media con una deviazione standard del 10,7%), l'influenza di tutti i criteri insieme bilanciano questo a favore del solare fotovoltaico.

Per contro, Saule Baurzhan, Glenn P. Jenkins (2016), hanno condotto uno studio nell'Africa subsahariana, raccogliendo dati sui costi di capitale, di funzionamento e manutenzione, dei sistemi solari fotovoltaici nei mercati sviluppati di tutto il mondo. Hanno concluso affermando che: i sistemi solari fotovoltaici off-grid non sono fattibili finanziariamente o economicamente per le famiglie rurali dell'Africa subsahariana, a meno che queste tecnologie non siano sovvenzionate dall'estero. Si ricorda che gli indicatori che determinano il successo

⁴ Fonte: [https://energypedia.info/wiki/Solar_Home_Systems_\(SHS\)](https://energypedia.info/wiki/Solar_Home_Systems_(SHS))

di una tecnologia sono relativi alla velocità di connessione e al consumo di energia, entrambi generalmente bassi nell'Africa subsahariana. Bernard, T. (2012)

Se la politica di un paese fosse quella di incoraggiare l'elettrificazione rurale, dovrebbe realizzarla attraverso un'espansione sistematica delle reti locali o nazionali piuttosto che dei sistemi solari fotovoltaici a livello domestico.

Nella zona rurale vietnamita, invece, si è trovato che un sistema elettrico decentralizzato. Quindi, come sottolineato da Bas J. van Ruijven et al. (2012); la tendenza all'aumento dell'elettrificazione differisce considerevolmente tra le regioni del mondo: in America Latina e in Asia l'accesso all'elettricità avviene a livelli di reddito più bassi che in Africa. Gli investimenti per famiglia dipendono fortemente dalla densità della popolazione, il che implica costi relativamente bassi nella maggior parte delle regioni asiatiche. Il potenziale per le tecnologie mini-grid e off-grid dovrebbe essere alto in America Latina e nell'Africa subsahariana, e più basso in Asia. Questo è il risultato degli alti costi di elettrificazione della rete a basse densità di popolazione in ampie parti dell'Africa rurale e dell'America Latina.

Inoltre, una delle ragioni principali della debolezza delle RE in alcune aree è il costo elevato della sua implementazione. Infatti, le estensioni della rete o le soluzioni off-grid per le località disperse rappresentano investimenti ingenti. Inoltre, i bassi consumi di energia elettrica delle popolazioni servite e le politiche tariffarie volte a perequare i prezzi tra aree rurali e urbane (con un livello di servizio equivalente), consentono in genere di recuperare questi costi solo in parte. Nel complesso, mentre i programmi di RE di successo sono spesso quelli che sono riusciti a ridurre i costi e a garantire un minimo di redditività, resta il fatto che le RE richiedono generalmente livelli significativi di sovvenzione.

Ricerca empirica

3 Metodologia

3.1 Descrizione metodologia

L'analisi è focalizzata su due degli aspetti che caratterizzano il mercato energetico ed elettrico: la produzione e il consumo di energia.

L'intenzione è quella di analizzare nella prima fase come il consumo di energia rinnovabile impatta sulla crescita economica e successivamente, invertendo i fattori nella relazione causale, si è visto come il PIL pro-capite contribuisce al consumo di energia rinnovabile.

In una seconda fase si indaga su come le rinnovabili si inseriscano nella produzione di elettricità, si è ritenuto opportuno analizzare tale dimensione per distinguere il consumo dalla produzione e per verificare quali sono i fattori determinanti nella parte di generazione elettrica rinnovabile.

Per quanto riguarda l'eterogeneità dei dati, quando si tratta di metodologie di dati panel, si presume che le variazioni tra le unità trasversali siano catturate da costanti fisse, utilizzando effetti fissi o casuali. Tuttavia, non tutte le variazioni individuali osservate possono essere definitivamente escluse, e può esistere una certa variabilità individuale nelle pendenze delle sezioni trasversali. Se questa variabilità non viene presa in considerazione, può distorcere i risultati e causare inferenze errate, Tsangyao Chang et al. (2015).

Entrambi i modelli sfruttano la regressione ad effetti fissi, è un metodo di controllo delle variabili omesse nei dati panel, quando queste variano tra le entità (i.e. paesi) ma non nel tempo. La stima a effetti fissi utilizza dati su individui che possiedono osservazioni multiple, e stima gli effetti del cambiamento di una variabile e dell'impatto che ha su quella dipendenti a parità fattori.

Il modello di regressione impiegato può essere descritto dalla seguente equazione:

$$Y_{it} = \alpha + \beta_1 X_{1it} + \dots + \beta_k X_{kit} + \alpha_i + \varepsilon_{it} , \quad [3.1]$$

dove Y è la variabile dipendente, con $i = 1, \dots, n$ indicatore delle identità e $t = 1, \dots, T$ del tempo.

X_{1it} è il valore del primo regressore per l'entità i al tempo t , X_{2it} è il valore del secondo regressore, e così via. L'ultimo fattore dell'equazione esprime il termine d'errore specifico per un'entità. α rappresenta il valore di intercetta comune a tutte le regressioni ottenibili dal modello. β_1, \dots, β_k sono invece i coefficienti dei regressori individuati.

La stima di coefficienti ed intercetta nei modelli è stata realizzata mediante il software Stata®. Si utilizzeranno errori standard robusti all'eteroschedasticità con il comando `xtreg, robust fe`.

3.1.1 Modello del consumo energetico rinnovabile

Esiste una letteratura molto ampia che valuta l'impatto del consumo di rinnovabili sulla crescita economica.

La maggior parte degli studi analizza l'interazione tra il consumo di energia e la crescita economica partendo dalla costruzione di una funzione di produzione Cobb-Douglas, dove si individua nella quantità prodotta il valore di output domestico (gdp o gdp_pc), e nei fattori di input i valori di consumo di energia (rinnovabile e non rinnovabile), di lavoro (L) e capitale (K). La trasformazione della funzione in forma logaritmica e la successiva implementazione dei metodi di analisi di regressione, permettono di stimare gli effetti delle variabili di input sull'output. Si propone una panoramica degli studi alla Tabella 5.1.5.

Amri, F. (2017) propone invece un modello in cui analizza l'importanza di alcuni fattori sul consumo di elettricità rinnovabile in 72 paesi sviluppati e in via di sviluppo. Le variabili collezionate sono di consumo elettrico rinnovabile, gdp, variabile di commercio intesa come totale di importazioni ed esportazioni, lo stock di capitale e infine la popolazione e sono relative agli anni compresi dal 1990 al 2012.

Pengfei Sheng et al. (2017), criticano la mancanza di analisi in letteratura sull'impatto dell'urbanizzazione sull'efficienza energetica e propongono nella loro analisi un'estensione del modello STRIPACT.⁵

Essi adottano come variabile di controllo il consumo energetico e utilizzano il numero di residenti nelle aree urbane come proxy per la popolazione, oltre alla variabile di gdp per capita. Criticano l'utilizzo dell'intensità energetica come fattore di controllo tecnologico, considerando che tale indice può contenere fattori controfattuali diversi dalla tecnologia, utilizzano quindi l'indice di struttura industriale per misurare la tecnologia.

L'argomento del presente studio non verrà trattato partendo dalla funzione di produzione ma da una combinazione di variabili che sono state individuate negli studi già presenti in letteratura.

In un primo modello si indaga su come impatti il consumo energetico rinnovabile sul PIL pro-capite.

In un secondo modello si verifica l'esistenza di una relazione di interdipendenza tra il gdp e il consumo di energia rinnovabile, invertendo quindi il rapporto di causa effetto delle variabili. È opportuno specificare che non si intende stimare un modello di produzione, bensì tentare di individuare quali potrebbero essere i fattori che contribuiscono alla crescita del consumo energetico rinnovabile. Per il controllo sui consumi si è deciso di utilizzare la percentuale di consumo rinnovabile sul totale di energia consumata, (rinominata da qui in poi REC), impegnata nella spiegazione.

Per indagare sulle interazioni tra PIL e consumo energetico sono stati inseriti i fattori di controllo individuati negli studi.

Arrivati a questo punto si ritiene necessario precisare che il presente studio non analizza i dati relativi ai prezzi del mercato elettrico per due motivi principali: in primo luogo la carenza dei dati trovati e le possibili eterogeneità fra paesi, legate ad aspetti politici e geografici,

⁵ Ehrlich e Holdren¹ quantificano gli impatti delle attività umane sull'ambiente proponendo un quadro concettuale, il modello IPAT, dove (I) è l'impatto ambientale umano, il prodotto di tre fattori demografici ed economici: popolazione (P), benessere (A), e tecnologia (T), modello criticato da Dietz e Rosa che hanno sviluppato un modello IPAT stocastico (STRIPAT) introducendo un fattore di scala e una variabile di rumore bianco per consentire test di ipotesi.

rendono tale indicatore non adatto per la finalità dello studio. Se si fosse condotta un'analisi sul singolo stato o su un'area geografica precisa, sarebbe stato più semplice scorporare dalle variazioni di prezzo dinamiche comuni fra i vari stati, come l'adozione di policy, la distribuzione di sussidi o semplicemente aspetti culturali e sociali. In secondo luogo, si è identificato nel costo livellato dell'elettricità un indicatore, utilizzato dai produttori per la generazione dei prezzi, che è insito nella tecnologia della fonte rinnovabile stessa, e che può essere considerato mediamente uguale per tutti i paesi. Pertanto, l'analisi è condotta considerando tale misura e valutando come questa possa impattare sulle dimensioni del mercato elettrico legate alla produzione di energia rinnovabile. Lato consumi viene utilizzato l'indice di consumo dei prezzi con base 2010 (CPI: consumer price index, in inglese), come proxy dei prezzi dell'energia R. Mahadevan et al. (2007). L'interpretazione di lungo periodo della variabile è la seguente: l'indice dei prezzi del consumo riflette i cambiamenti nel costo per il consumatore medio di acquisire un paniere di beni e servizi che può essere fissato o cambiato a intervalli specifici, come ad esempio annualmente. La formula di Laspeyres è generalmente usata. I dati sono medi di periodo e provengono dalla Word Bank.

Tuttavia, gli indici dei prezzi al consumo dovrebbero essere interpretati con cautela. La definizione di famiglia, il paniere di beni e la copertura geografica (urbana o rurale) e del gruppo di reddito delle indagini sui prezzi al consumo possono variare ampiamente da paese a paese. Inoltre, i pesi sono derivati dalle indagini sulla spesa delle famiglie, che, per ragioni di bilancio, tendono ad essere condotte poco frequentemente nei paesi in via di sviluppo, compromettendo la comparabilità nel tempo. Sebbene siano utili per misurare l'inflazione dei prezzi al consumo all'interno di un paese, gli indici dei prezzi al consumo sono meno utili per confrontare i paesi.⁶

⁶ WorldBank. " Consumer price index (2010 = 100)". *Word Development Indicators*, The World Bank Group, 2019, <https://data.worldbank.org/indicator/FP.CPI.TOTL>.

L'interazione tra il PIL pro-capite e la percentuale di consumo di rinnovabili (PCR) può essere espressa come segue:

$$\begin{aligned} \text{gdp}_{pc_{it}} = & \alpha + \beta_1 PCR_{it} + \beta_2 \text{urbanpop}_{it} + \beta_3 \text{percentuale_accesso_elettrico}_{it} + \\ & \beta_4 \text{apertura_paese}_{it} + \alpha_i + \varepsilon_{it}, \end{aligned} \tag{3.2}$$

Il secondo modello di controllo sui consumi è costruito in modo simmetrico al primo ma invertendo le variabili di PIL_{pc} e PCR:

$$\begin{aligned} PCR_{it} = & \alpha + \beta_1 \text{gdp}_{pc_{it}} + \beta_2 \text{urbanpop}_{it} + \beta_3 \text{percentuale_accesso_elettrico}_{it} \\ & + \beta_4 \text{apertura_paese}_{it} + \alpha_i + \varepsilon_{it} \end{aligned} \tag{3.3}$$

3.1.2 Modello di produzione elettrica rinnovabile

L'approccio di costruzione del modello di produzione è partito da un confronto con le variabili adottate in letteratura.

$$PRP_{it} = \alpha + \beta_1 gdp_p c_{it} + \beta_2 capacità_elettrica_rinnovabile_{it} + \beta_3 apertura_paese_{it} + \alpha_i + \varepsilon_{it} \quad [3.4]$$

Nel modello [3.4] si vuole individuare quali sono i principali fattori che contribuiscono alla produzione di energia elettrica rinnovabile (PRP). La variabile di PIL pro-capite è usata per controllare la possibilità che i paesi più ricchi abbiano una percentuale più alta di produzione di energia elettrica poiché hanno una disponibilità all'investimento maggiore nel settore delle energie rinnovabili, Carley (2009); Dong (2012); Sapat (2004).

Collegata alla possibilità di finanziamento vi è la capacità installata in impianti di produzione di energia rinnovabile, che viene utilizzata per verificare se un incremento delle infrastrutture impatti positivamente sulla produzione, Qiang Wang (2010).

La variabile di importazioni di energia cattura il grado di dipendenza energetica dall'estero. Ci si aspetta che una maggiore dipendenza energetica dai mercati esteri stimoli lo sviluppo interno delle energie rinnovabili, Dong (2012). Tale variabile è stata sostituita con il valore complessivo di scambio commerciale per mancanza di dati, rappresentativo degli import energetici. È stato comunque effettuato comunque un controllo con il valore dei soli import energetici presente in appendice.

In letteratura viene spesso utilizzata la variabile legata allo sviluppo finanziario, misurato dal credito interno al settore pubblico come ammontare di investimenti pubblici in rinnovabili. La variabile controlla l'impatto dello sviluppo del settore finanziario sulla quota di energie rinnovabili nel settore energetico. Considerando i costi fissi relativamente più alti delle energie rinnovabili, l'accesso ai finanziamenti può creare maggiori opportunità per

l'impiego delle energie rinnovabili. (Huang 2009, Brunnschweiler 2010, Waldhier, 2010). Tale variabile è stata inserita in un'estensione al modello principale.

Nei risultati che seguiranno si evincerà che la capacità installata spiega quasi tutta la variabilità del modello, pertanto si è ritenuto opportuno indagare su quali fossero i fattori che impattassero su tale variabile esplicativa. Questa logica circolare è stata ipotizzata e verificata attraverso il secondo modello descrittivo, non è stata individuata molta letteratura a riguardo, pertanto l'ipotesi è stata testata con i dati a disposizione. Il concetto che ha guidato l'analisi e la creazione del modello è il seguente: siccome la variabile di capacità elettrica rinnovabile impatta positivamente sulla produzione di elettricità rinnovabile e cattura quasi tutta la variabilità del primo modello, è interessante individuare come altre variabili esplicative che non sono rientrate nel primo modello, possono impattare su tale variabile e di conseguenza sulla PRP.

Per questa verifica non si è adottato un modello teorico di riferimento, si è tentato di individuare una possibile relazione con le variabili utilizzate nel modello [3.4].

$$CIR_{it} = \alpha + \beta_1 gdp_pc_{it} + \beta_2 urbanpop_{it} + \beta_3 percentuale_accesso_elettrico_{it} + \beta_4 LCOE_rinnovabili_{it} + \alpha_i + \varepsilon_{it}$$

[3.5]

Le variabili comuni al primo modello possono essere interpretate allo stesso modo, mentre il LCOE è un indicatore che incide sulla determinazione dei costi di generazione dell'energia può essere utilizzato come proxy dei prezzi dell'elettricità, poiché gli sviluppatori usano queste informazioni durante le negoziazioni di vendita dell'elettricità per assicurarsi che il prezzo di acquisto superi il prezzo di generazione, Hansen (2019).

È stata inoltre inserita la variabile di popolazione urbana per verificare lo stato delle installazioni "private" dei singoli consumatori.

4 Dati

I dati statistici riguardanti l'energia devono essere trattati con molta cautela, essi hanno una provenienza geografica molto ampia e presentano una grande varietà di enti, associazioni e organizzazioni che si occupano a diversi livelli territoriali della raccolta, del trattamento e della diffusione di tali informazioni. Tale disponibilità implica l'aumento delle probabilità di utilizzo di metodologie statistiche eterogenee. Inoltre, non bisogna sottovalutare la possibilità dell'esistenza di interessi economico-politici o ideologici nell'aggregazione e diffusione delle cifre relative all'energia.

Per quanto attiene alle energie rinnovabili bisogna aggiungere che, a causa di peculiarità nella produzione e nell'utilizzo, possono esistere quote di produzione energetica che non entrano assolutamente nelle rilevazioni statistiche ufficiali.

È, tuttavia, stato riscontrato su più fronti che negli ultimi anni vi è stata una progressiva transizione del mercato energetico verso le fonti di energia rinnovabile e nel corso del 2019 il settore delle energie rinnovabili ha continuato a registrare segnali positivi.

È d'obbligo, sottolineare che nel bilancio energetico globale le diverse fonti hanno dimensioni e pesi differenti, il loro utilizzo presenta, per ciascuna di esse, problemi peculiari legati ai costi, alla disponibilità, alla sicurezza. Il dibattito sull'utilizzo e sullo sviluppo di alcune tecnologie è aperto e non univoco per i fattori indicati. Inoltre, non si può sottovalutare il tema dello sviluppo di tecnologie di conversione efficienti e, soprattutto, esistono ordini di grandezza che non possono essere ignorati nel momento in cui si pensa alla sostituzione di una fonte con un'altra.

4.1 Banche dati utilizzate

I dati impiegati nelle analisi sono selezionati da banche dati che gestiscono dataset completi di tutti i paesi e con coperture ampie in termini di anni.

La collezione e la gestione è condotta mantenendo una coerenza con gli indici presenti in letteratura, citati e descritti nel capitolo 2.1.

La banca dati principalmente utilizzata è quella della bp Statistical Review, dalla quale sono stati recuperati dati di: consumo elettrico ed energetico (EJ)⁷; Generazione energetica ed elettrica (TWh); Capacità installata (MW). Tali dati sono relativi sia alle fonti rinnovabili che a quelle non rinnovabili.

Dal sito di IRENA sono stati, invece, recuperati i dati di investimenti pubblici in rinnovabili (US\$); capacità elettrica delle varie fonti rinnovabili (MW); generazione elettrica delle varie fonti rinnovabili (MW); LCOE rinnovabile, ossia dei costi medi livellati dell'elettricità (UD\$/GWh).

Per quanto riguarda i dati tratti da tale fonte, è necessario puntualizzare che ricoprono un arco temporale ridotto, per la precisione dal 2000 al 2019, mentre i dati dei LCOE medi ricoprono solo dal 2010.

Il portale della WorldBank, infine, è stato utile per reperire informazioni relativi alle dimensioni economiche del paese; valori del PIL (US\$) o PIL pro capite; le emissioni di CO2 Mg(ton)/capita; l'indice dei prezzi del consumatore (CPI); la numerosità delle persone che vivono in aree urbane, popolazione totale e il livello di elettrificazione (% del totale); classificazione dei vari stati per valore di PIL, valore dello scambio di beni e servizi totale dei vari paesi e valori di import di energia (% di energia utilizzata). L'ultimo dato citato ha permesso la classificazione dei vari paesi in due sottogruppi: importatori ed esportatori di energia, tuttavia i dati per questa variabile sono presenti dall'anno 2014, coprendo così un periodo ristretto.

Per le variabili di interesse sono state effettuate operazioni di equivalenza per poterle

⁷ Exajoules: 1 tonnellata equivalente di petrolio (toe) = 41,868 milioni kJ.

confrontare ed utilizzare; per comodità si è stabilito che i dati di consumo dovessero essere in GWh.

4.2 Descrizione dei dati

I dati utilizzati nella seguente trattazione sono relativi a 86 paesi e ricoprono un arco temporale di 30 anni (dal 1990 al 2019).

Sono stati realizzati dei raggruppamenti nazionali e geografici seguendo la modalità adottata dalla bp, di cui si propone una panoramica alla Tabella 7.1, all'interno del capitolo 7.

Considerando anche le seguenti aggregazioni si raggiungono 92 paesi/regioni.

Alcune variabili, come descritto precedentemente, non sono disponibili per tutti gli anni, pertanto per ognuna si è valutato il numero di "missing values" (valori mancanti) e l'eventuale impatto di tale carenza sul risultato finale dello studio.

Il 70% delle variabili ha una copertura completa, il 20% presenta, invece, dati per il periodo 2000-2019, mentre la variabile dei LCOE delle rinnovabili copre solo gli ultimi 8 anni di analisi.

Non tutti i dati sono stati utilizzati per l'analisi di regressione, quelli citati sono comunque rientrati nell'elaborato per contribuirne alla redazione, un riassunto dei dati utilizzati è reperibile alla Tabella 7.2.

La variabile di PIL pro capita (o `gdp_pc`) proviene dalla World Bank Group, è il prodotto interno lordo diviso per la popolazione di metà anno. Il PIL è la somma del valore aggiunto lordo di tutti i produttori residenti nell'economia più le tasse sui prodotti e meno i sussidi non inclusi nel valore dei prodotti. È calcolato senza fare deduzioni per il deprezzamento dei beni fabbricati o per l'esaurimento e il degrado delle risorse naturali. I dati sono in dollari USA correnti.⁸

Il PIL pro capita (o `gdp_pc`) è basato sulla parità di potere d'acquisto (PPP), come proxy della crescita economica Ito, K. (2017), per questa ragione è stato inserito nell'analisi.

⁸ World Bank, "GDP per capita (current US\$)" *World Development Indicators*, The World Bank Group, 2019, <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>.

La stessa fonte è stata utilizzata anche per le variabili di popolazione urbana (appellata urbanpop), accesso elettrico (elec_acc) e investimenti pubblici (public_invest).

La popolazione urbana si riferisce alle persone che vivono nelle aree urbane come definite dagli uffici statistici nazionali. È calcolata usando le stime della popolazione della Banca Mondiale e i rapporti urbani del World Urbanization Prospects delle Nazioni Unite. L'aggregazione della popolazione urbana e rurale potrebbe non corrispondere alla popolazione totale a causa delle diverse coperture dei paesi.

L'accesso all'elettricità è, invece, la percentuale di popolazione alla quale è garantito l'accesso all'elettricità. I dati sull'elettrificazione sono raccolti dall'industria, da indagini nazionali e da fonti internazionali.⁹

Infine, le importazioni nette di energia sono in percentuale dell'utilizzo energetico e sono calcolate come l'uso di energia meno la produzione, entrambi misurati in equivalenti di petrolio. Un valore negativo indica che il paese è un esportatore netto. L'uso di energia si riferisce all'uso di energia primaria prima della trasformazione in altri combustibili per uso finale, che è uguale alla produzione interna più le importazioni e le variazioni delle scorte, meno le esportazioni e i combustibili forniti a navi e aerei impegnati nel trasporto internazionale.¹⁰

I dati World Bank sono complessivamente buoni, vi è tuttavia una percentuale di missing che raggiunge al massimo il 10%.

L'esame dei dati relativi alla capacità globalmente installata di impianti per la produzione di energia dalle diverse fonti rinnovabili, è stata ritenuta opportuna, al fine di individuare possibili percorsi emulativi attuabili in campo energetico nonché giungere a una valutazione degli eventuali impatti derivanti dallo sviluppo tecnologico e infrastrutturale nel rinnovabile. I dati di capacità installata, (identificati come elec_cap_ren), sono stati recuperati dalla fonte IRENA, che proponeva una classificazione per tipologia di fonte. I valori sono espressi in MW.

⁹ World Bank, "Access to electricity (% of population)", *World Development Indicators*, The World Bank Group, 2019, <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>.

¹⁰ World Bank, "Energy imports, net (% of energy use)", *World Development Indicators*, The World Bank Group, 2019, <https://data.worldbank.org/indicator/EG.IMP.CON.S.ZS>.

Sebbene si riconosca una necessità nel trattare separatamente le tipologie di capacità installate per individuare quali sono le tecnologie maggiormente implementate nei vari paesi, si è ritenuto ugualmente significativo considerare la variabile in termini aggregati.

Gli investimenti pubblici in rinnovabili, con il 70% di "missing values", limitano la costruzione dei modelli, pertanto non sono stati inseriti come variabile indipendente nei vari modelli (rinominata `public_invest`, unità di misura: milioni US\$, fonte: IRENA).

Il dataset propone una suddivisione degli investimenti per tecnologia (solare, eolica, termica, idroelettrica, biomassa, geotermica, etc).

Nel presente elaborato è stata effettuata un'aggregazione paese-anno senza differenziare le fonti, considerandole tutte "fonti rinnovabili".

Per poter analizzare eventuali relazioni di complementarità o di sostituzione tra le fonti rinnovabili e quelle non rinnovabili, si considera l'impatto derivante dalla produzione di elettricità da fonti fossili. I dati della bp non sono stati aggregati in quanto si vuole catturare l'eventuale incidenza di ogni fonte energetica.

I dati di costo livellato dell'elettricità sono stati recuperati dalla banca dati IRENA che proponeva un valore medio del costo di energie rinnovabili a livello mondiale, l'unità di misura sono i US\$/GWh.

È necessario in questo caso precisare che il costo livellato varia in base ai paesi e alle tecnologie impiegate, pertanto una media dei valori potrebbe compromettere l'esito delle analisi. Preoccupazione corroborata da una limitata presenza di dati, la copertura delle osservazioni va dal 2010 al 2019.

I dati di produzione elettrica da fonti non rinnovabili sono presenti per il 50% dei paesi. Gli investimenti pubblici e gli import di energia esistono per 70 paesi, tutte le altre variabili indipendenti hanno copertura totale, o quasi, dei paesi analizzati.

4.2.1 Dati del modello dei consumi

Come indice di consumo rinnovabile si è utilizzato il rapporto tra il consumo totale energia rinnovabile di un paese e la sua domanda totale di energia (conosciuta in inglese come, Primary Energy Consumption), Y. Fang (2015), R. Inglesi-Lotz (2016), A. Díaz et al. (2019). Il nome dell'indice verrà rinominato da qui in poi `Share_REC` o più semplicemente con

l'acronimo PRC.

L'energia primaria consumata è quella direttamente incorporata nelle risorse naturali, prima di essere convertita o trasformata per l'uso. Si riferisce all'uso diretto o alla fornitura della fonte di energia che non è stata sottoposta ad alcun processo di conversione o trasformazione.¹¹

$$PRC = \frac{\text{consumo energia rinnovabile}}{\text{consumo primario di energia}}, \quad [4.1]$$

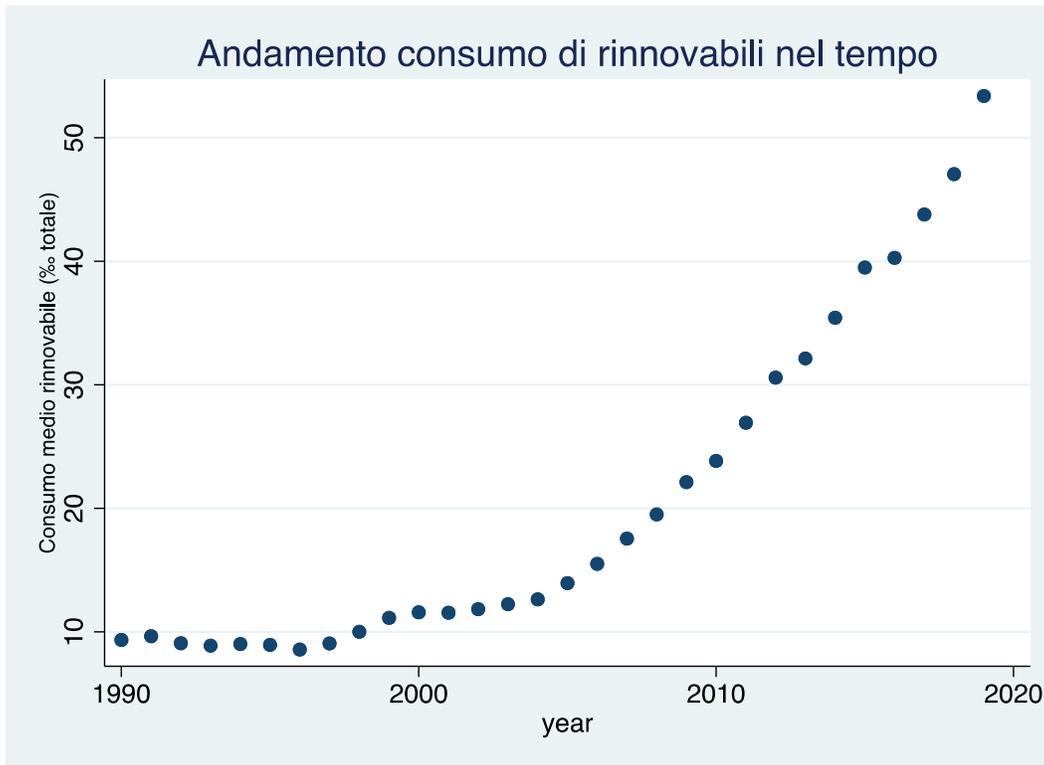
Entrambi i fattori sono relativi a dati della bp, la cui copertura è ampia.

I valori sono espressi in Exajoules (EJ) e si è ritenuto opportuno moltiplicare il rapporto per un fattore 1000, anziché 100, in quanto il risultato del rapporto è frequentemente molto basso. L'intervallo di appartenenza della variabile è [0,1000] e non sono presenti valori mancanti per tale variabile.

In Figura 4.2.1 si nota come il trend della variabile sia in costante aumento, nel 1990 il valore era intorno allo 1% mentre nel 2019 si arriva a toccare il 5%.

¹¹ Definizione di energia primaria consumata: Analysis and Design of Energy Geostrutures, 2020. Dictionary of Energy (Second Edition), 2015.

Figura 4.2.4.1 Andamento del consumo medio di rinnovabili nel tempo



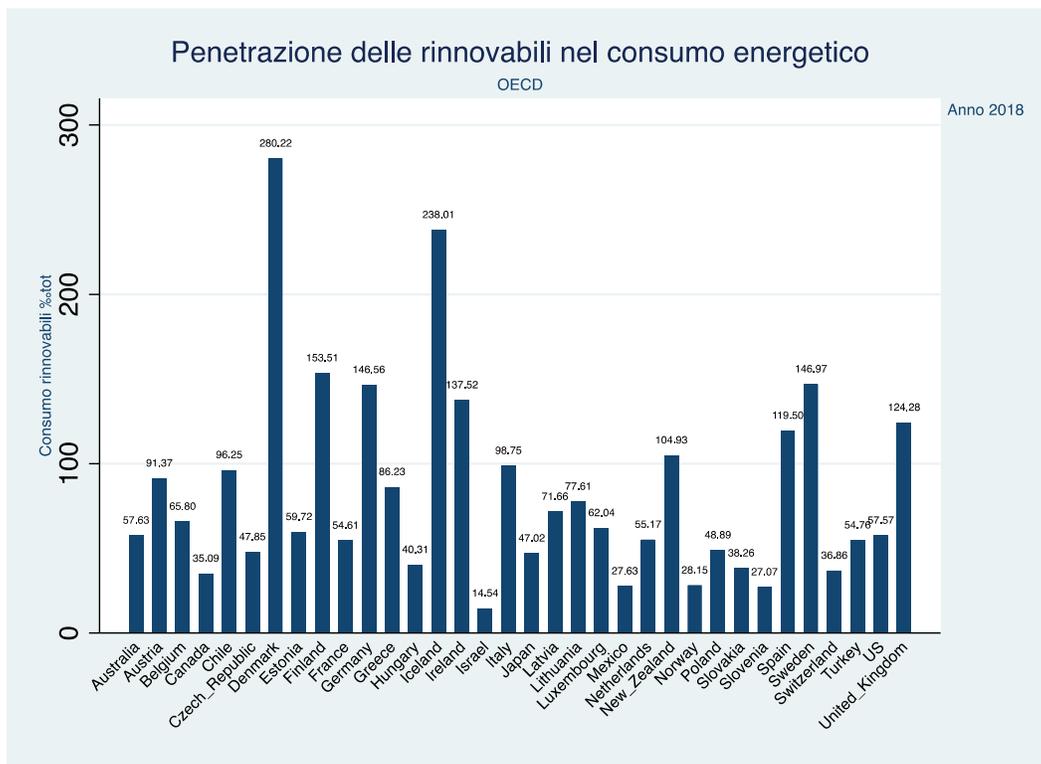
L'Islanda si conferma tra i leader nel panorama europeo, con una percentuale pari al 24% di energia consumata da fonti rinnovabili (vedi Figura 4.2.2). Vi precede la Danimarca con un 28%. A differenza di quanto si riscontra se si considera la produzione attraverso fonti rinnovabili, la Norvegia sembra essere al di sotto della media, con un 2,8%.

Analizzando il trade di energia (Figura 4.2.3), la Norvegia sembra essere un grande esportatore, con valori di percentuale di export sul totale utilizzato, che superano il 100%. Una prima conclusione può essere raggiunta individuando nella produzione del paese un surplus di energia, che si traduce in un export.

Le regioni nordiche sono leader mondiali nella connessione regionale delle reti e dei mercati elettrici. Tali interconnessioni uniscono i paesi attraverso la terra e il mare, mentre un mercato spot nordico comune assicura un commercio efficiente attraverso le zone di prezzo subnazionali. Questa cooperazione aumenta la sicurezza dell'approvvigionamento, abbassa i costi del sistema e facilita l'integrazione delle energie rinnovabili. Il sistema elettrico nordico, infatti, è uno dei più affidabili, accessibili e rinnovabili del mondo. I flussi commerciali bidirezionali intorno alla Danimarca enfatizzano il ruolo delle interconnessioni nel bilanciare

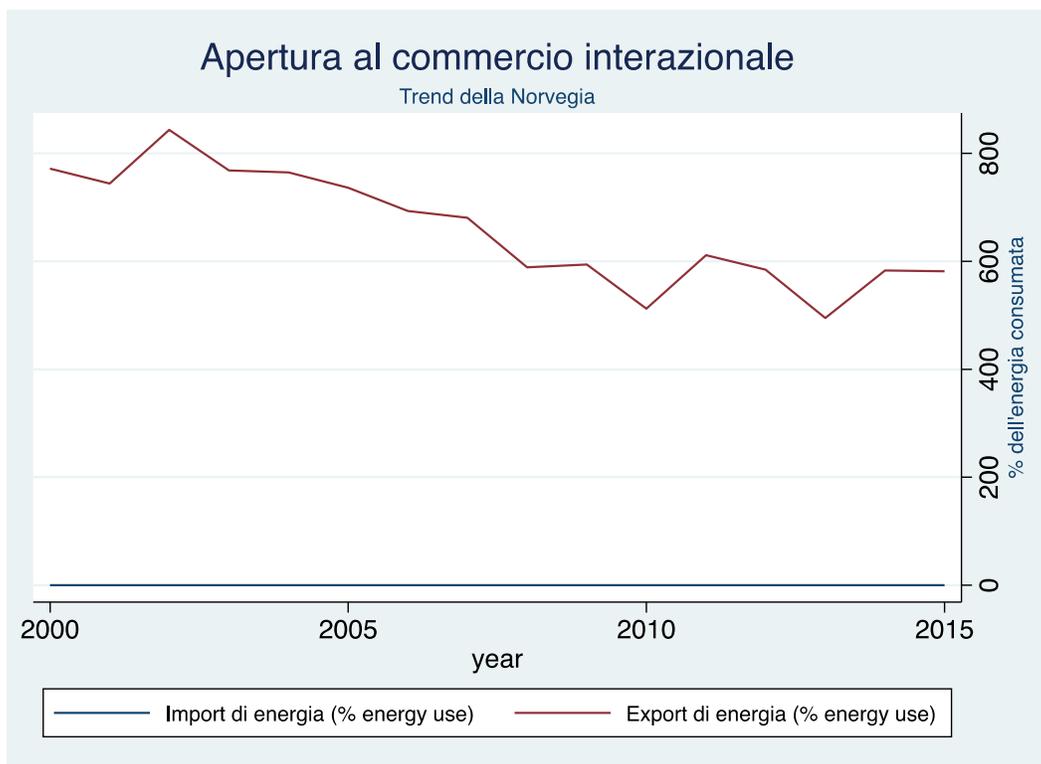
l'energia eolica variabile, insieme alla flessibilità locale. Le interconnessioni sono inoltre importanti per bilanciare l'energia idroelettrica della Norvegia negli anni di siccità.¹²

Figura 4.2.2 Consumo rinnovabile nei paesi OECD nel 2018



¹² IEA 2018, Electricity information; ENS.dk; Stat.fi (preliminary); NEA.is; SSB.no; SVK.se; NVE.no (trade); SEV fo; Nukissiorfiit.gl; Kraftnat.Åland.fi

Figura 4.2.4.3 Trend degli export in Norvegia

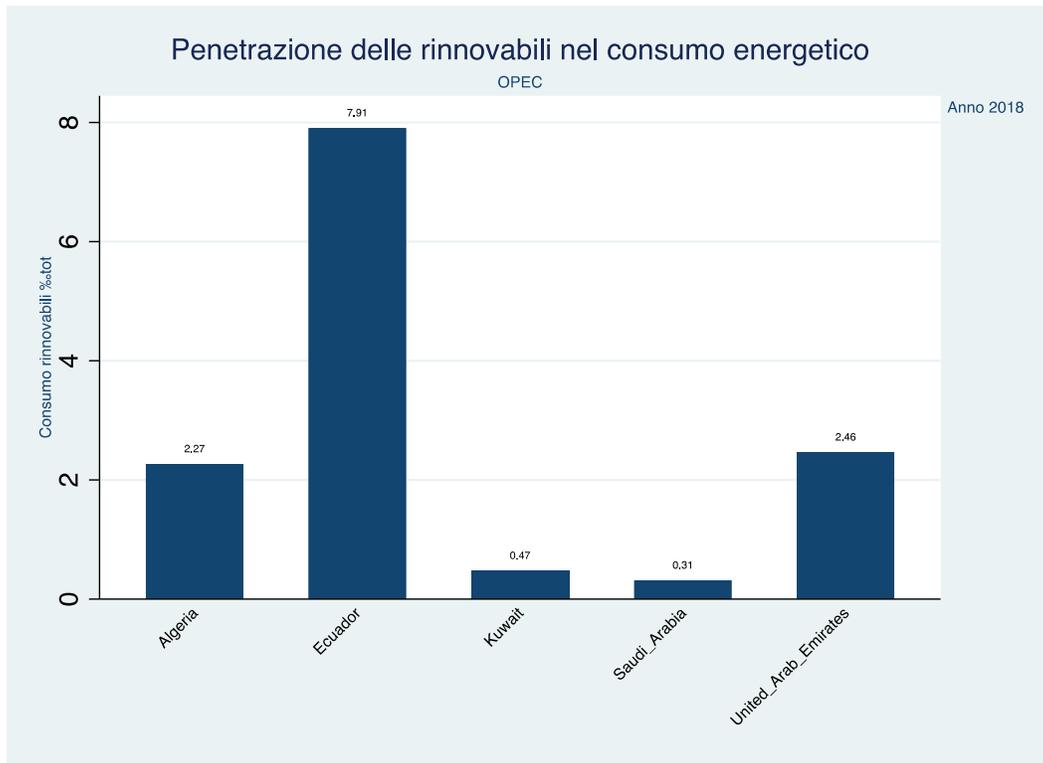


Tale conclusione risulta essere approssimata e necessita di ulteriori verifiche: pertanto, considerando il bilancio energetico del paese, si nota come il consumo di energia totale sia costituito per il 40% da energia idroelettrica, dal 39% da petrolio, il 6% da gas e per ultimi con percentuali ridotte la biomassa e il carbone.

Si conclude che il consumo di energia, considerando quindi anche i settori di trasporto e riscaldamento, è basato su una molteplicità di fonti che contribuiscono ad una riduzione della percentuale di energia prodotta da rinnovabili.

Nei paesi membri OPEC, l'Ecuador si distacca dagli altri stati (Figura 4.1.4).

Figura 4.2.4.4 Consumo di rinnovabili nei paesi OPEC



4.2.2 Dati del modello di produzione

La percentuale di elettricità prodotta tramite fonti rinnovabili (rinominata $Share_EIG_ren$ o più semplicemente con l'acronimo PRP), è il risultato del rapporto tra la generazione di energia da fonti elettriche e la generazione di elettricità totale:

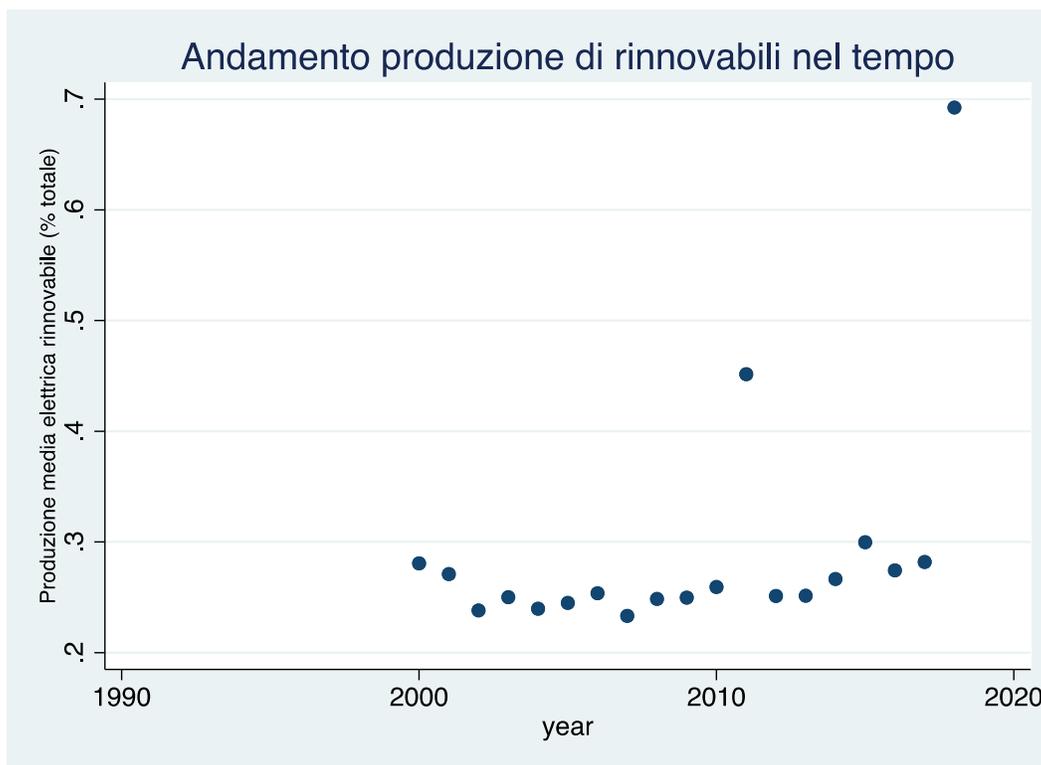
$$PRP = \frac{\text{generazione elettrica rinnovabile}}{\text{generazione elettrica totale}}, \quad [4.2]$$

Il numeratore proviene dalla banca dati IRENA, e l'unità di misura sono i GWh, mentre il denominatore, anch'esso in GWh, proviene dalla bp. All'interno della trattazione si troveranno i valori già moltiplicati per il fattore 100, pertanto il valore della variabile appartiene all'intervallo $[0, 100]$.

È necessario precisare che la percentuale di missing values per il presente indice è pari al

40%. I dati sono limitati a causa di una ridotta presenza di osservazioni del numeratore. Si faccia riferimento alla Figura 4.2.5 per valutarne l'andamento medio nel tempo.

Figura 4.2.4.5 Andamento della produzione media di rinnovabili nel tempo



L'andamento sembra essere stabile e inferiore mediamente al 30%, vi sono due picchi, uno relativo all'anno 2011 e l'altro al 2018. La carenza di dati riduce il time span di valutazione e giustifica i picchi, infatti, la quota stimata delle rinnovabili nella produzione globale di energia elettrica era superiore, ma intorno al 26% alla fine del 2018. Le capacità nette aggiunte di energia rinnovabile sono state superiori a quelle dei combustibili fossili e del nucleare messi insieme, e le rinnovabili nel 2018 costituivano più di un terzo della capacità globale di potenza installata.¹³

¹³ REN21. "Global Overview". *Renewables Now*. 2019. https://www.ren21.net/gsr-2019/chapters/chapter_01/chapter_01/

L'eterogeneità dei paesi necessita di un indicatore adatto al confronto, per questo motivo, nonostante la cospicua carenza di dati, si è ritenuto opportuno servirsi di tale variabile. Per supportare le asserzioni fatte, le figure 4.2.6 e 4.2.8 mostrano una panoramica dei principali paesi e come, nel 2018, la produzione di energia elettrica da rinnovabili sia eterogenea fra i vari di essi: l'Islanda e la Norvegia, ad esempio, si distaccano dal resto dei paesi europei con una produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili che copre quasi il 100% della produzione totale, si ricorda che sono tra i primi paesi ad aver introdotto la "Carbon Tax", si parla degli anni 1991-1992; altri paesi come il Kuwait, gli Emirati Arabi Uniti e l'Arabia Saudita, due tra i dodici stati membri dell'OPEC, non raggiungono l'1% di produzione da fonti rinnovabili (Figura 4.2.7). Tra questi si differenzia l'Ecuador, che nel 2020 ha terminato il programma nazionale "Matriz Energetica para 2020", avviato nel 2009, con cui intendeva diminuire la dipendenza dai combustibili fossili implementando nuove tecnologie e installando impianti per la produzione di energia idroelettrica.¹⁴

¹⁴ Rinnovabili.it "L'Ecuador verso il 100% di elettricità". 2009, <https://www.rinnovabili.it/energia/idroelettrico/l'ecuador-verso-il-100-di-elettricita-rinnovabile-6102/>.

Figura 4.2.4.6 Produzione rinnovabile nei paesi OECD nel 2018

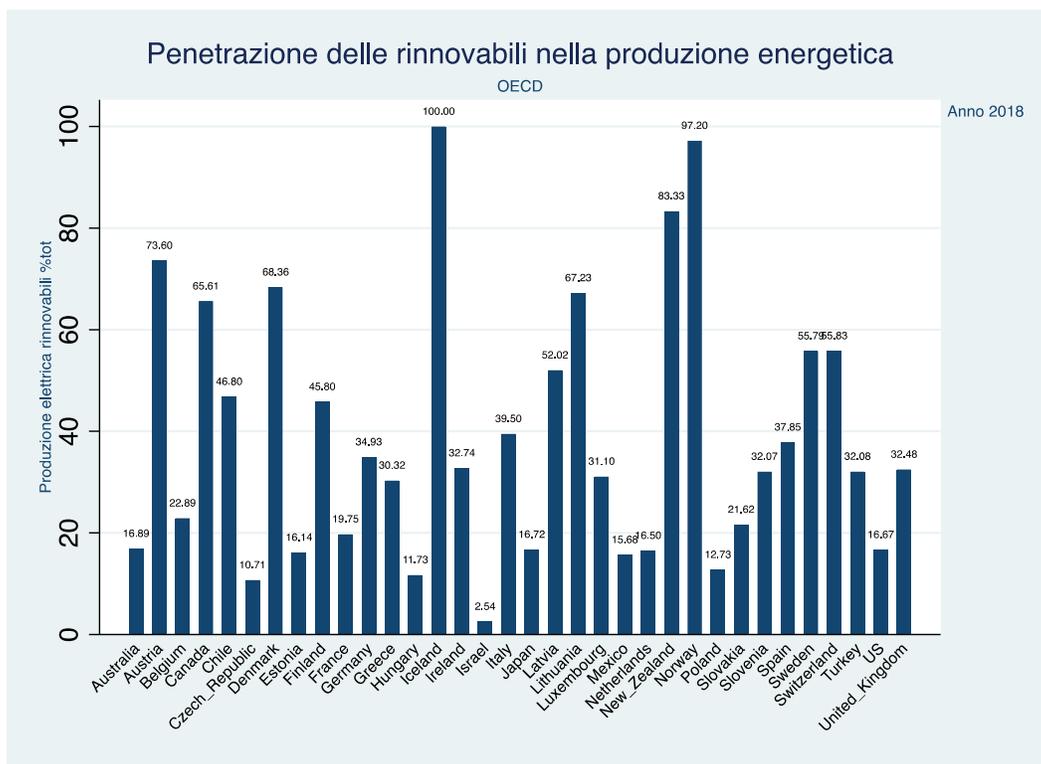


Figura 4.2.4.7 Produzione di rinnovabili nei paesi OPEC nel 2018

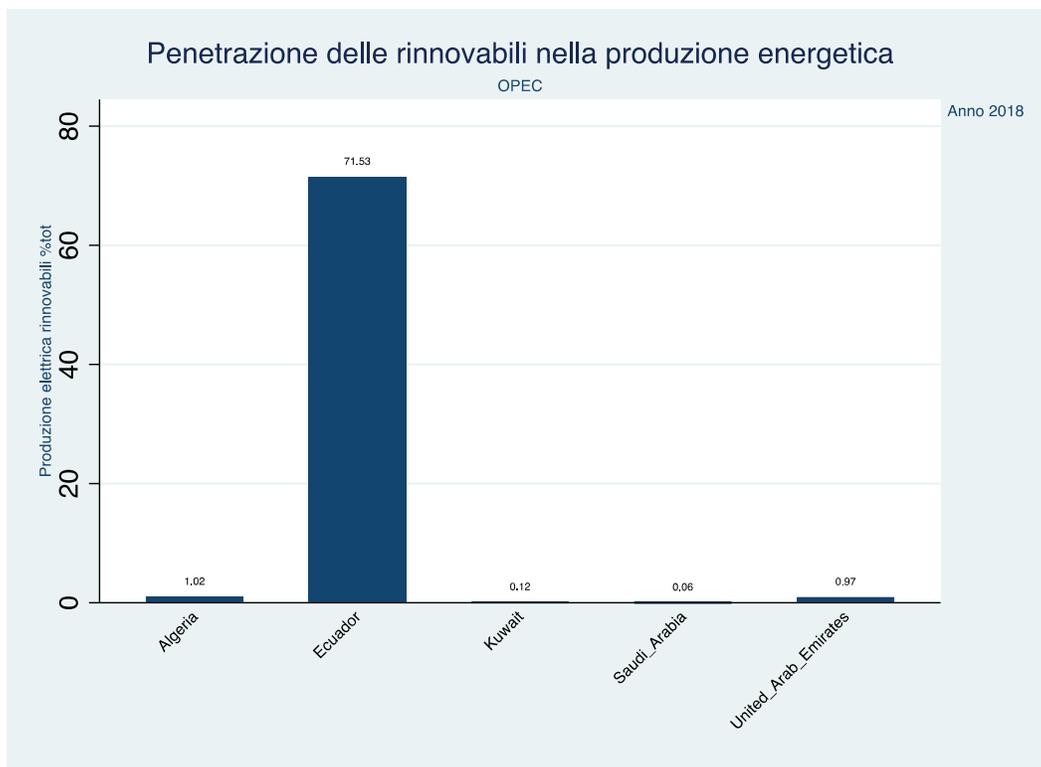
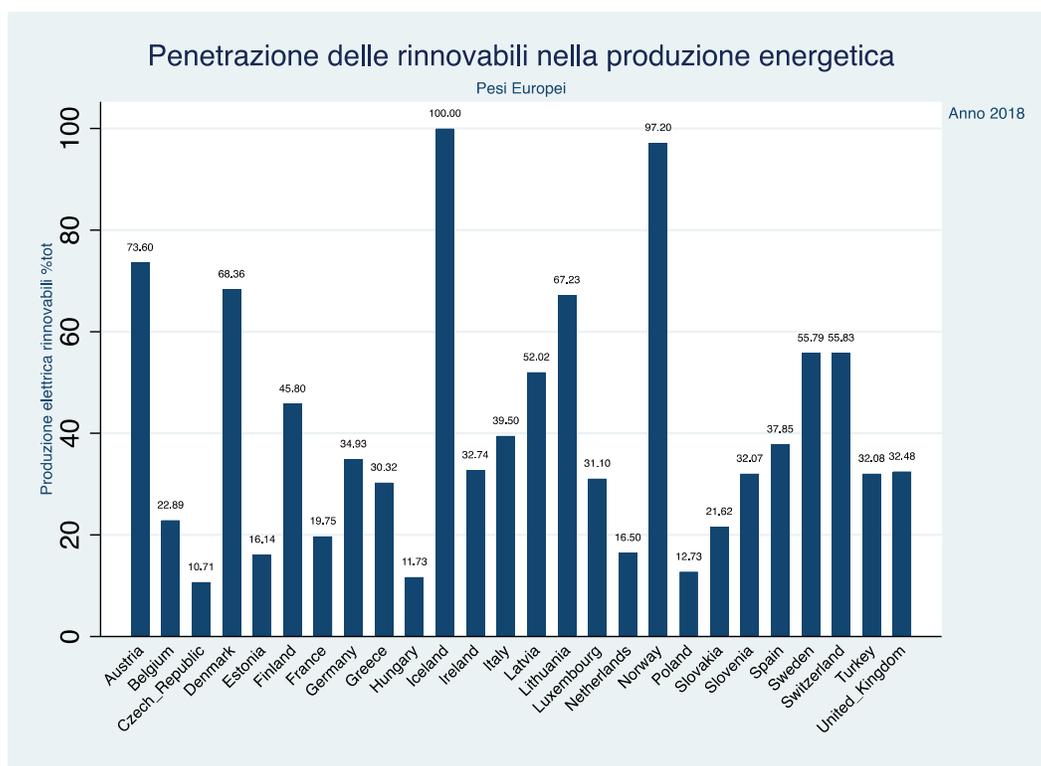


Figura 4.2.4.8 Produzione di rinnovabili nei paesi Europei nel 2018

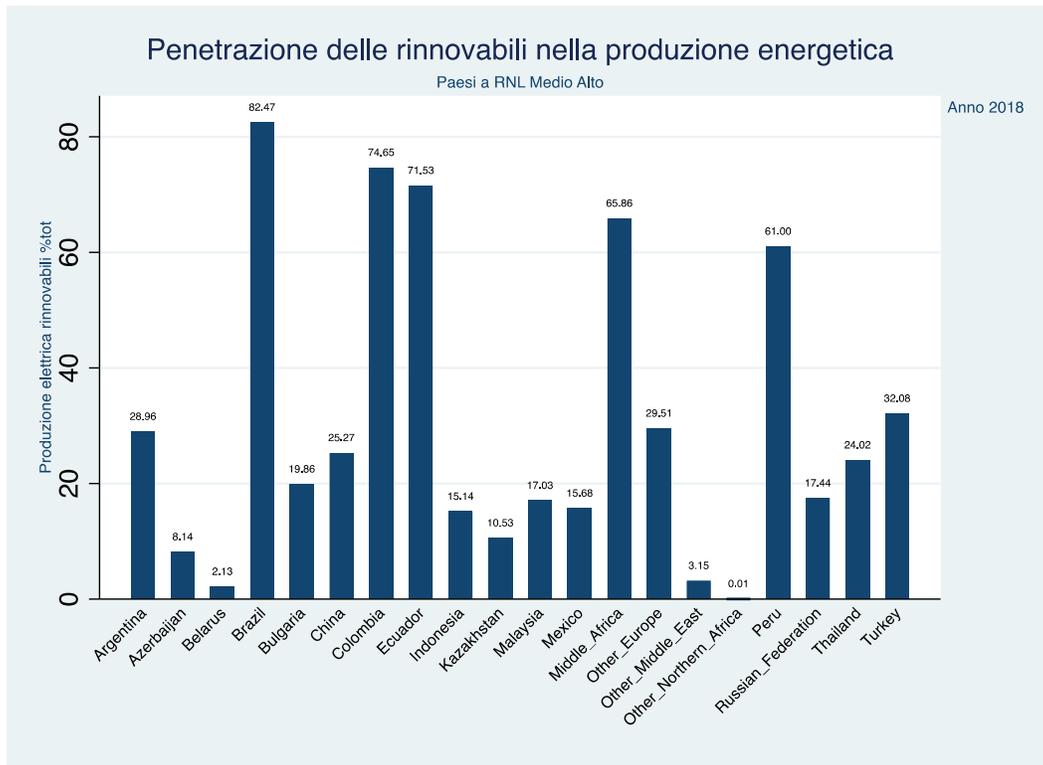


Rispetto a quanto analizzato nel capitolo 2.2.2, riassuntivo degli studi condotti nei paesi in via di sviluppo, è possibile inoltre confermare attraverso l'impiego dei dati, che le rinnovabili nel 2018 ricoprono un ruolo importante in molti paesi con un PIL medio alto. Come si evince dalla Figura 4.2.9, nell'Africa Centrale si raggiunge il 65% di elettricità prodotta con fonti rinnovabili.¹⁵

Solo il 20% dell'energia elettrica proviene da fonti rinnovabili come gas naturale, nucleare e carbone in Brasile, la restante parte viene prodotta da fonti rinnovabili, energia eolica, biomassa ed energia idroelettrica a seguire la Colombia con il 74% di elettricità rinnovabile.

¹⁵ Si utilizzano i dati relativi all'anno 2018 per uniformare il confronto fra gli stati, in quanto per i paesi con reddito medio alto non vi sono osservazioni per le due variabili dipendenti nell'anno 2019.

Figura 4.2.9 Produzione di rinnovabili nei paesi a reddito medio alto nel 2018



Pertanto, a fronte delle differenze riscontrate, per comprendere l'impatto che le energie rinnovabili hanno sul mercato elettrico, oltre ad un'analisi globale, si ritiene opportuno analizzare i paesi separatamente, raggruppandoli in sottogruppi, adottando metodi di classificazione e rispettando le aggregazioni proposte dalla bp.

La classificazione dei paesi è stata portata avanti principalmente attraverso due indicatori: l'intensità di scambio economico internazionale del paese e il livello del PIL.

Attraverso il primo indicatore è stato possibile classificare i paesi in importatori ed esportatori di energia.

Il livello di PIL invece ha permesso la classificazione dei paesi in quattro sottocategorie.

A partire dal 1° luglio 2019, le economie a basso reddito sono definite come quelle con un RNL (Reddito Nazionale Lordo) pro capite, calcolato con il metodo Atlas della Banca Mondiale, di 1.025 dollari o meno nel 2018; le economie a reddito medio-basso sono quelle con un RNL pro capite tra 1.026 e 3.995 dollari; le economie a reddito medio-alto sono quelle tra 3.996 e 12.375 dollari; le economie ad alto reddito sono quelle con un RNL pro capite di

12.376 dollari o più.¹⁶

Si propone alla Tabella 7.3 la composizione delle classificazioni in base al reddito.

Si è già incontrata un'ultima classificazione, che raggruppa i paesi in base alla loro eventuale partecipazione ad associazioni internazionali.

L'ultima suddivisione è volta a considerare anche aspetti geopolitici, con l'intenzione di inglobare dinamiche politiche e pratiche commerciali e di coordinamento internazionale, adottate dai paesi membri, che potrebbero essere portate avanti per uno sviluppo ecosostenibile.

5 Analisi dei risultati

In una fase preliminare all'analisi di regressione sono state verificate alcune caratteristiche delle variabili.

Poiché nella maggior parte dei casi le osservazioni sono valori continui, si è optato per effettuare trasformazioni polinomiali logaritmiche, per tutte le variabili utilizzate. Tale operazione è volta alla normalizzazione delle variabili stesse, soprattutto di quelle che non presentano una distribuzione asimmetrica, e alla riduzione degli effetti degli outliers. Inoltre, è stata analizzata la correlazione tra le coppie di variabili, evidenziando quelle che presentano un livello di significatività pari a 0,01.

Nelle tabelle 7.4 e 7.5 (capitolo 7) sono rappresentate due matrici di correlazione, nelle quali sono presenti le due variabili dipendenti, e quelle indipendenti, che sono state separate per ragioni grafiche.

Da una prima lettura delle matrici di correlazione, non sembrano esservi particolari relazioni tra le variabili, tranne nel caso della capacità elettrica di rinnovabili, che presenta

¹⁶ WorldBank. "Classifying countries by income". *World Development Indicators*, The World Bank Group, 2019, datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/stories/the-classification-of-countries-by-income.html.

correlazioni fortemente significative con le variabili dipendenti, rispettivamente dello 0,8181 con la variabile di percentuale di produzione rinnovabile e dello 0,5247 con la percentuale di consumo in rinnovabili. La capacità installata sembra presentare altre correlazioni significative, positive se consideriamo il PIL pro capite (`gdp_pc`) e gli investimenti pubblici, mentre negativa nei confronti degli import di energia. Il numero di osservazioni utilizzate per l'analisi negli ultimi due casi si riduce di circa il 60%.

Infine, sembra esservi una correlazione negativa tra la capacità installata e i costi dell'elettricità.

In generale oltre alla variabile di capacità installata, anche le variabili di LCOE rinnovabile, PIL pro capite e investimenti pubblici sembrano presentare un'interdipendenza positiva e significativa con le variabili dipendenti. Mentre gli import di energia sono legati negativamente.

La combinazione delle variabili precedentemente descritte e l'analisi degli output delle correlazioni hanno coadiuvato al raggiungimento dei modelli finali.

5.1 Impatti sul consumo energetico di rinnovabili

Le analisi confermano relazioni positive tra il consumo energetico rinnovabile (PRC) e la crescita economica (PIL pro-capite), si faccia riferimento al modello [3.2].

Come si evince dalla Tabella 5.1.1, la variabile esplicativa della percentuale di consumo rinnovabile è significativa all'1% e positiva.

Il numero di osservazioni si riduce in seguito all'inserimento dei controlli su altre variabili rimanendo comunque accettabile.

L'effetto positivo della variabile di consumo si rileva essere più importante nei paesi con alto reddito pro-capite, mentre nei paesi con reddito medio alto scende a 0,04 e perde di significatività, in Tabella 5.1.2.

La relazione positiva si mantiene anche in seguito all'inversione del confronto fra le variabili, modello [3.3].

In particolare, un aumento dell'1% della variabile di PIL pro-capite sembra comportare un incremento dell'1,44% della percentuale di consumo rinnovabile (4), Tabella 5.1.3.

Tali risultati sono confermati da innumerevoli studi, per comodità riassunti alla Tabella 5.1.5.

Mentre il regressore della variabile di popolazione urbana assume in modo costante (2), (3), (4), valori negativi e significativi all'1%. P. Sheng et al. (2017) indagano in questo senso sull'impatto che ha l'urbanizzazione sul consumo energetico, analizzando 78 paesi nel periodo tra il 1995 e il 2012. Essi individuano una relazione positiva tra l'urbanizzazione e il consumo energetico, mitigata da una riduzione di efficienza energetica. Anche Al-Mulali et al. esaminano l'effetto a lungo termine dell'urbanizzazione sul consumo di energia utilizzando i dati dei paesi di sette regioni nel periodo 1980-2008. Le loro stime mostrano una relazione positiva a lungo termine tra l'urbanizzazione e il consumo di energia nell'84% dei paesi. Coerentemente, Madlener e Sunak trovano che l'urbanizzazione porta ad un aumento del consumo di energia attraverso l'espansione delle infrastrutture. A fronte degli studi analizzati si possono interpretare i risultati ottenuti come segue: la costante crescita urbana porta ad un incremento dei consumi energetici che non prevede necessariamente il consumo di energia rinnovabile. Analizzando la Tabella 5.1.4 sembra che tale situazione sia confermata solo per le zone sviluppate e con alto PIL pro capite. Mentre il segno del regressore di popolazione urbana si inverte, diventando positivo, nelle aree geografiche a PIL medio alto e PIL basso, si perdono tuttavia la significatività e il numero di osservazioni. I dati non confermano in modo significativo di un contributo reale dell'elettrificazione nelle zone rurali. Il coefficiente del regressore di accesso elettrico è positivo nelle zone in via di sviluppo (4) ma non significativo, tuttavia i benefici derivanti dall'adozione di energia rinnovabile in tali zone, sono stati ampiamente discussi nel capitolo 2.2.2, dedicato all'impatto dell'elettrificazione rurale.

Tabella 5.1.1 - Percentuale di consumo di rinnovabili (PRC) e crescita economica

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	GDP/ capita	GDP/ capita	GDP/ capita	GDP/ capita	GDP/ capita
PRC	0.05 ^{***}	0.06 ^{***}	0.06 ^{***}	0.05 ^{***}	0.07 ^{***}
	(0.02)	(0.02)	(0.02)	(0.02)	(0.02)
CPI		0.06 ^{***}	0.06 ^{***}	0.09 ^{**}	0.08 ^{**}
		(0.02)	(0.02)	(0.04)	(0.03)
Popolazione urbana			0.01	0.19	0.38 ^{***}
			(0.13)	(0.17)	(0.13)
Accesso elettrico (% popolazione)				0.04	0.03
				(0.03)	(0.04)
Apertura paese (%PIL)					-0.28 ^{***}
					(0.09)
Constant	10.02 ^{***}	9.73 ^{***}	9.57 ^{***}	4.82	1.51
	(0.07)	(0.13)	(3.14)	(4.07)	(2.94)
Observations	2031	1876	1876	1706	1660
r2	0.786	0.823	0.823	0.826	0.839
country_F E	YES	YES	YES	YES	YES
year_FE	YES	YES	YES	YES	YES

*p<0.10,**p<0.05,***p<0.01

Tabella 5.1.2 Percentuale consumo di rinnovabili (PRC) e crescita economica
 (1= Paesi a RNL alto; 2= paesi a RNL medio alto; 3= paesi a RNL medio basso)

	(1)	(2)	(3)
	GDP/capita	GDP/capita	GDP/capita
PRC	0.08 ^{***}	0.04	0.02
	(0.02)	(0.03)	(0.02)
CPI	0.17 ^{***}	-0.02 [*]	0.18
	(0.06)	(0.01)	(0.19)
Popolazione urbana	0.41 [*]	8.99 ^{***}	2.16
	(0.22)	(2.45)	(1.70)
Accesso elettrico (% popolazione)	-0.02	-0.20	0.09
	(0.02)	(0.13)	(0.11)
Apertura paese (%PIL)	-0.42 ^{**}	-0.35 ^{**}	0.02
	(0.17)	(0.13)	(0.13)
Constant	1.81	-208.94 ^{***}	-46.17
	(5.77)	(60.05)	(41.89)
Observations	1037	360	170
r2	0.875	0.869	0.931
country_FE	YES	YES	YES
year_FE	YES	YES	YES

*p<0.10, **p<0.05, ***p<0.01

Tabella 5.1.3 Percentuale consumo di rinnovabili (PRC) e crescita economica

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	PRC	PRC	PRC	PRC	PRC
GDP/capita (US\$/capita)	1.02 ^{***}	1.25 ^{***}	1.25 ^{***}	1.16 ^{***}	1.44 ^{***}
	(0.29)	(0.29)	(0.29)	(0.34)	(0.31)
CPI		-0.05	-0.05	-0.06	-0.06
		(0.06)	(0.06)	(0.09)	(0.09)
Popolazione urbana			-3.08 ^{***}	-3.70 ^{***}	-4.33 ^{***}
			(0.55)	(0.62)	(0.46)
Accesso elettrico (% popolazione)				0.01	0.14
				(0.17)	(0.13)
Apertura paese (%PIL)					0.79 ^{**}
					(0.36)
Constant	-12.57 ^{***}	-14.59 ^{***}	60.81 ^{***}	76.42 ^{***}	85.01 ^{***}
	(2.80)	(2.88)	(13.40)	(14.67)	(11.38)
Observations	2031	1876	1876	1706	1660
r2	0.639	0.663	0.666	0.637	0.678
country_FE	YES	YES	YES	YES	YES
year_FE	YES	YES	YES	YES	YES

*p<0.10,**p<0.05,***p<0.01

Tabella 5.1.4 Percentuale consumo di rinnovabili (PRC) e crescita economica
 (1= Paesi a RNL alto; 2= paesi a RNL medio alto; 3= paesi a RNL medio basso)

	(1)	(2)	(3)
	PRC	PRC	PRC
GDP/capita (US\$/capita)	1.88 ***	0.80	1.40
	(0.47)	(0.50)	(1.69)
CPI	0.29 *	-0.12	-0.21
	(0.17)	(0.09)	(0.94)
Popolazione urbana	-2.64 **	9.10	9.19
	(1.08)	(11.71)	(11.77)
Accesso elettrico (% popolazione)	0.22 ***	-0.12	0.61
	(0.08)	(0.52)	(1.00)
Apertura paese (%PIL)	2.02 ***	-0.06	0.65
	(0.67)	(0.57)	(0.88)
Constant	30.90	-232.05	-243.32
	(29.18)	(282.99)	(282.30)
Observations	1037	360	170
r2	0.771	0.650	0.527
country_FE	YES	YES	YES
year_FE	YES	YES	YES

*p<0.10,**p<0.05,***p<0.01

Figura 5.1.5 Riassunto letteratura impatto delle rinnovabili sulla crescita

Article	Autori	Data	Methodology	Findings
Renewable energy: An efficient mechanism to improve GDP, Energy Policy Volume 36	Taichen Chien, Jin-Li Hu (2008)	116 economies in 2003	Structural Equation Modeling (SEM) approach	REC aumenta GDP
Renewable energy consumption and growth in Eurasia, Energy Economics	Nicholas Apergis, James E. Payne (2010)	13 countries within Eurasia over the period 1992–2007.	multivariate panel data framework	REC --> GDP
Growth and renewable energy in Europe: A random effect model with evidence for neutrality hypothesis, Energy Economics Volume 33, Pages 257-263	Menegaki, Angeliki N. (2011)	Annual data ranging from 1997 to 2007 for 27 European countries	Random effect model	REC --> GDP
Electricity consumption from renewable and non-renewable sources and economic growth: Evidence from Latin American countries, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 30, February 2014, Pages 290-298	Usama Al-mulali, Hassan Gholipour Fereidouni, Janice Y.M. Lee (2014)	Latin America countries period 1980–2010	Pedroni cointegration test	REC <--> GDP
Renewable energy and growth: Evidence from heterogeneous panel of G7 countries using Granger causality, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 52	Tsanyao Changa, Rangan Gupta, Roula Inglesi-Lotz, Beatrice Simo-Kengne, Devon Smithers, Amy Trembling	data for the G7 countries over the period 1990–2013.	Heterogeneity and cross-sectional dependence, Lagrange multiplier (LM hereafter) test of Breusch and Pagan	REC --> GDP
Economic welfare impacts from renewable energy consumption: The China experience, Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 15	Yiping Fang (2015)	Panel data of China REC, SREC from 1978 to 2008	Multivariate OLS	REC --> GDP
Modelling the causal linkages between nuclear energy, renewable energy and economic growth in developed and developing countries, Renewable and Sustainable Energy Reviews 42, pp. 1012-1022	Omri, A., Ben Mabrouk, N., Sassi-Tmar, A. (2015)	17 developed and developing countries	dynamic simultaneous-equation panel data models	REC --> GDP
The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries, Applied Energy Volume 162, Pages 733-741	Bhattacharya, Mita Paramati, Sudharshan Reddy Ozturk, Ilhan Bhattacharya, Sankar (2016)	38 top renewable energy consuming countries to explain the growth process between 1991 and 2012.	Heterogeneous panel estimation techniques	REC aumenta GDP
The impact of renewable energy consumption to economic growth: A panel data application, Energy Economics Volume 53, Pages 58-63	Roula Inglesi-Lotz (2016)	Panel data framework including all the OECD countries for the period from 1990 to 2010.	Pedroni cointegration test	REC --> GDP
CO2 emissions, renewable and non-renewable energy consumption, and economic growth: Evidence from panel data for developing countries, Volume 151, International Economics	Ito, K. (2017)	Panel data of 42 developed countries over the period 2002–2011.	GMM estimator	REC aumenta GDP
Intercourse across economic growth, trade and renewable energy consumption in developing and developed countries, Renewable and Sustainable Energy Reviews 69, pp. 527-534	Amri, F. (2017)	72 countries since 1990 until 2012	dynamic simultaneous-equation panel data approach	GDP aumenta REC
Does the level of energy intensity matter in the effect of energy consumption on the growth of transition economies? Evidence from dynamic panel threshold analysis, Energy Economics Volume 69	Celil Aydin, Ömer Esen (2018)	12 Commonwealth of Independent States countries over the period 1991–2013.	Threshold model	REC --> GDP
The role of renewable energy consumption and commercial services trade in carbon dioxide reduction: Evidence from 25 developing countries, Applied Energy 211, pp. 1229-1244	Hu, H., Xie, N., Fang, D., Zhang, X. (2018)	25 major developing countries during the years 1996–2012	Granger causality tests	REC <--> GDP
Economic growth, energy intensity and the energy mix, Energy Economics Volume 81	Antonia Díaz, Gustavo A. Marrero, Luis A. Puchc, Jesús Rodríguez (2019)	Sample of 134 countries over the period 1960 to 2010.	Multivariate OLS	REC --> GDP
Per capita income, trade openness, urbanization, energy consumption, and CO2 emissions: an empirical study on the SAARC Region	Muhammad Asim Afridi, Sampath Kehelwalatenna, Imran Naseem & Muhammad Tahir (2019)	South Asian Association for Regional Cooperation (SAARC), Annual data from 1980 to 2016	Kuznets curve (EK)	REC <--> GDP
Renewable energy consumption and economic growth in OECD countries: A nonlinear panel data analysis, Energy Volume 207	Qiang Wang, Lili Wang (2020)	Non linear panel data analysis from OECD country, threshold technique	Threshold model	REC aumenta GDP
The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from the renewable energy country attractive index, Energy Volume 207	Muhammad Shahbaz, Chandrashekar Raghutia, Krishna Reddy Chittedi, Zhilun Jiao, Xuan Vinh Vo (2020)	38 renewable-energy-consuming countries from 1990 to 2018	Dynamic ordinary least squares (DOLS), fully modified ordinary least squares (FMOLS) and heterogeneous non-causality	REC --> GDP
The dynamic links among energy transitions, energy consumption, and sustainable economic growth: A novel framework for IEA countries, Energy Volume 222	Irfan Khan, Fujun Hou, Abdulrasheed Zakari, Vincent Konadu Tawiah (2021)	38 states 1995 to 2015	Cross-sectional dependence test	REC aumenta GDP

5.2 Impatti sulla produzione elettrica rinnovabile

La prima regressione esaminata è quella relativa al modello [3.4], rappresentato alla Tabella 3.1 per il panel di 86 paesi su 30 anni.

Le variabili sono state inserite progressivamente, per misurare gli impatti marginali delle indipendenti sulla percentuale di produzione di elettricità da fonti rinnovabili (PRP).

Dalla prima analisi si individua la variabile di PRP come determinante per la spiegazione del modello. A seguito dell'inserimento di tale variabile (3) il valore di R^2 passa da 0,168 a 0,845.

Nel modello con soli effetti individuali del PIL pro capite, colonna (1), si nota che l'impatto della variabile è negativo, ma il modello incorpora poca variabilità.

Tuttavia, tale relazione rimane costante anche in seguito all'inserimento delle altre variabili, per questo motivo si sono effettuati dei controlli sui singoli paesi classificandoli in base al PIL e all'appartenenza ad organizzazioni di cui si propone un commento al termine del capitolo.

In Appendice al capitolo 6, sono presenti altri modelli: si è effettuato un controllo sugli import di energia e sugli investimenti pubblici in rinnovabili, in linea con quanto indicato nella descrizione del modello (Tabella 6.1), mentre l'impatto delle altre fonti energetiche sulla produzione rinnovabile è stato analizzato per verificare eventuali effetti sostitutivi o complementari di tali fonti (Tabella 6.2).

Per queste variabili è necessario precisare che la disponibilità di dati è molto scarsa e la conseguente riduzione delle osservazioni nel processo di inserimento può inficiare sull'esito dell'analisi stessa.

Per concludere e sintetizzare i risultati derivanti dall'analisi del modello principale [3.4], si possono elencare i seguenti punti:

- Il coefficiente legato alla variabile di crescita economica e sociale è sempre negativo, una riduzione dell'1% del `gdp_pc`, a parità di condizioni delle altre variabili, porta ad una riduzione dello 0,16% della variabile dipendente.

A tal proposito S. Silva et al. (2012), nello studio condotto su soli quattro paesi e su dati dal 1960 al 2004, analizzano come un incremento della percentuale di elettricità prodotta da fonti rinnovabili impatta sulla crescita economica. Secondo i loro risultati un aumento della quota di PRP porta a incrementi di costi economici in termini di PIL pro capite. Ciononostante, il cambiamento tecnico sta rendendo le fonti rinnovabili più economiche e il costo economico può scomparire man mano che queste fonti diventano economicamente competitive. Il controllo è invertito rispetto a quello analizzato nel presente studio e pertanto non può essere preso in considerazione per spiegare i risultati ottenuti. Per contro, Boqiang Lin et al. (2016) riscontrano che il PIL reale pro-capite promuove la quota di energie rinnovabili nella produzione totale di elettricità in Cina. Questo perché, come risultato dello sviluppo economico, il paese ha abbastanza capitale finanziario e umano per investire e adottare l'elettricità rinnovabile. Infine, Y Bayraktutan et al. (2011), in un modello panel su paesi appartenenti all'OECD nel periodo 1980- 2007, l'analisi indica che esiste una relazione positiva a lungo termine tra la generazione di elettricità rinnovabile e la crescita economica, e una causalità bidirezionale (reciproca) tra queste variabili. Un aumento della generazione di elettricità da fonti rinnovabili contribuisce allo sviluppo sostenibile, così come alla performance di crescita a lungo termine. Risultato confermato anche da M. Bello e S. Solarin (2021), che però analizzano solo gli Stati Uniti.

- La variabile di capacità elettrica installata per fonti rinnovabili contribuisce in modo determinante alla spiegazione del modello: aumentando dello 0,01 tale variabile si ottiene un aumento pari all' 1% della percentuale di elettricità rinnovabile nel mix di produzione.

La Figura 5.2.1 mostra una panoramica dell'andamento della variabile di produzione elettrica rinnovabile in relazione con la capacità installata per gli stati appartenenti all'organizzazione OPEC.¹⁷

¹⁷ Organization of the Petroleum Exporting Countries), fondata nel 1960, comprende dodici Paesi che si sono associati

- L'apertura del paese è statisticamente significativa al 10% e positiva.

Si ricorda che la variabile utilizzata nel presente studio, non considera solo le importazioni di energia bensì anche le esportazioni. È stato pertanto effettuato un controllo utilizzando la variabile di importazioni energetiche vera e propria, di cui si propone un risultato alla Tabella 6.1.

Prima dell'inserimento del controllo sugli investimenti pubblici (3) la variabile presenta un valore positivo ma non significativo, nella colonna (4) il segno del regressore diventa negativo.

Il numero di osservazioni si riduce di più dell'80% nel passaggio dal modello principale a quello con la variabile "pura".

Per questo motivo, anche se la variabile di "Apertura paese" risulta essere poco precisa, si è ritenuto opportuno prenderla in considerazione come proxy degli import. Y. Zhao et al. (2013) nello studio condotto su 122 paesi tra il 1980–2010, vede un incremento positivo e significativo del 5% della variabile di import sulla produzione elettrica rinnovabile, egli utilizza il metodo OLS (Ordinary Least Square) e non considera nella produzione la fonte rinnovabile idroelettrica. Questo dimostra che l'aumento della dipendenza energetica dall'estero, contribuire allo sviluppo del settore delle RE.

Dong, (2012), per contro in un'analisi su 53 paesi a breve termine (2005-2009), dove analizza come alcuni fattori impattino sulla capacità installata in energia eolica. Oltre alle variabili di import e PIL inserisce anche le emissioni di CO2. Egli commenta i risultati evidenziando nella produzione di energia eolica una possibile soddisfazione di parte della domanda elettrica, con una conseguente diminuzione della dipendenza dal petrolio importato e la riduzione delle emissioni di CO2. In conclusione, si individua che una maggiore dipendenza energetica dai mercati esteri stimoli lo sviluppo interno delle energie rinnovabili.

Tali impatti sono stati successivamente valutati differenziando i paesi in base al RNL, si conferma la significatività della variabile di capacità installata in tutti e tre i sottogruppi.

Sono stati poi effettuati altri controlli:

- Gli investimenti pubblici non contribuiscono in modo significativo, a differenza di quanto individuato in innumerevoli studi.

Tuttavia, tale risultato può essere giustificato da una scarsa presenza di dati, il numero di osservazioni scende fino a circa 300.

- Nel controllo su eventuali dinamiche sostitutive tra fonti rinnovabili e fonti non rinnovabili, si faccia riferimento alle Tabelle 6.2, 6.3, 6.4 in Appendice.

Nella prima tabella si propone una visione globale e si individuano possibili sostituzioni con carbone e petrolio, che impattano rispettivamente per (-0,30) e (-0,09), colonna (3). Si possono rifiutare le ipotesi nulle con livelli di significatività pari al 5% per il carbone e al 10% per il petrolio.

I risultati dello studio condotto da M. Bello e S. Solarin (2021), mostrano che esiste una sostanziale sostituzione tra l'energia pulita e i combustibili fossili di carbone e gas naturale nel settore dell'elettricità degli Stati Uniti. Questo dovrebbe essere integrato con vari strumenti politici come le disposizioni di crediti d'imposta e tariffe di alimentazione per l'energia pulita e l'imposizione di una tassa sul consumo di carbonio.

A fronte degli studi nelle zone rurali analizzati e considerando l'eterogeneità della produzione elettrica dei vari paesi, nelle tabelle successive è stata ripetuta l'analisi suddividendo le osservazioni in due sottoinsiemi.

La Tabella 6.3 rispecchia quasi fedelmente il risultato globale, questo perché 67 paesi su 86 rientrano nella classificazione analizzata in questo caso.

Interessante è il risultato ottenuto nella Tabella 6.4, dove rientrano i paesi con un RNL medio basso o basso.

Nel seguente caso l'effetto sostitutivo è significativo, per tutte le fonti non rinnovabili, all'1% ed è presente solo per le fonti di petrolio, e gas naturale (4), mentre il carbone e il nucleare sembrano essere risorse complementari e impattano quasi con la stessa

intensità. I valori dei regressori sono 0,11 e 0,15 rispettivamente.

La seconda specificazione esaminata è relativa al modello [3.5], dove si è cercato di individuare i fattori che impattassero maggiormente sulla variabile di capacità installata di impianti rinnovabili, ritenuta determinante del primo modello. Di seguito i risultati ottenuti:

- Il PIL pro-capite sembra non impattare significativamente su tale dimensione Tabella 5.2.3, se non quando si presenta singolarmente.
- La variabile di popolazione urbana sembra essere significativa all'1% con un andamento costante e con un valore del coefficiente di regressione pari a (-3.13) nell'ultima colonna. In generale, quindi, un aumento delle persone che vivono in area urbana induce ad una variazione negativa della percentuale di energia elettricità da fonti rinnovabili.

Questo aspetto può essere interpretato nel seguente modo: un incremento dell'urbanizzazione e della percentuale di accesso all'elettricità genera un incremento della domanda di elettricità ed energia, che non può essere soddisfatta da una maggiore produzione rinnovabile.

- Il passaggio da (2) a (3) prevede l'inserimento dei costi livellati dell'elettricità rinnovabile (LCOE), che si ricorda sono stati utilizzati come proxy dei prezzi dell'energia. Si individua una relazione significativa all'1% e negativa, per questo motivo il loro aumento costituisce un freno dello sviluppo di impianti e installazioni rinnovabili.
- Ancora una volta non si individua nella variabile di investimento pubblico un carattere esplicativo siccome riduce il numero delle osservazioni di circa il 50%.

A fronte della relazione negativa individuata tra la variabile esplicativa di PIL pro-capite e quella dipendente di PRP, sono state intraprese delle analisi grafiche per indagare sull'andamento.

Si faccia riferimento alla Figura 5.2.2, in cui sono stati individuati alcuni paesi appartenenti alle categorie di reddito medio basso e basso, dove si ricorda che la variabile di reddito ha un impatto maggiormente negativo (Tabella 5.2.1) sulla PRP.

Le due variabili sono invece correlate positivamente in alcuni stati ricchi: Stati Uniti, Inghilterra, Polonia, Paesi Bassi, Lituania, Ungheria, Germania, Estonia e Cina. Mentre sono correlate negativamente per gli stati come: Singapore, Perù, Lussemburgo, Kazakhstan, Chile e Argentina, Turchia, Svizzera, Norvegia, Kuwait e Indonesia. Durante l'analisi si è notato come effettivamente a fronte di una riduzione del PIL pro-capite si sia verificato un aumento della produzione da fonti rinnovabili. Tale trend è comune in molti paesi (Tabella 5.2.3a/b) e per gli anni successivi alla "Grande Recessione" del 2008, dove si è registrata una globale decrescita del PIL. Tuttavia, l'effetto dell'incremento non può essere spiegato dal solo verificarsi di tale evento esogeno. Si ricorda che altre variabili contribuiscono alla crescita della produzione di rinnovabili, infatti, il 2008 e il 2009 sono stati due anni molto importanti per lo sviluppo di rinnovabili, per due anni consecutivi la nuova capacità installata di fonti elettriche rinnovabili è stata superiore al 50% del totale delle nuove installazioni, soprattutto in UE superando quindi quella delle fonti tradizionali. Nel 2009 questa quota è stata del 61%.¹⁸

¹⁸ Wind in Power. European Wind Energy Association, 2010.

Figura 5.2.1 Andamento variabile generazione elettrica (PRP) e capacità installata

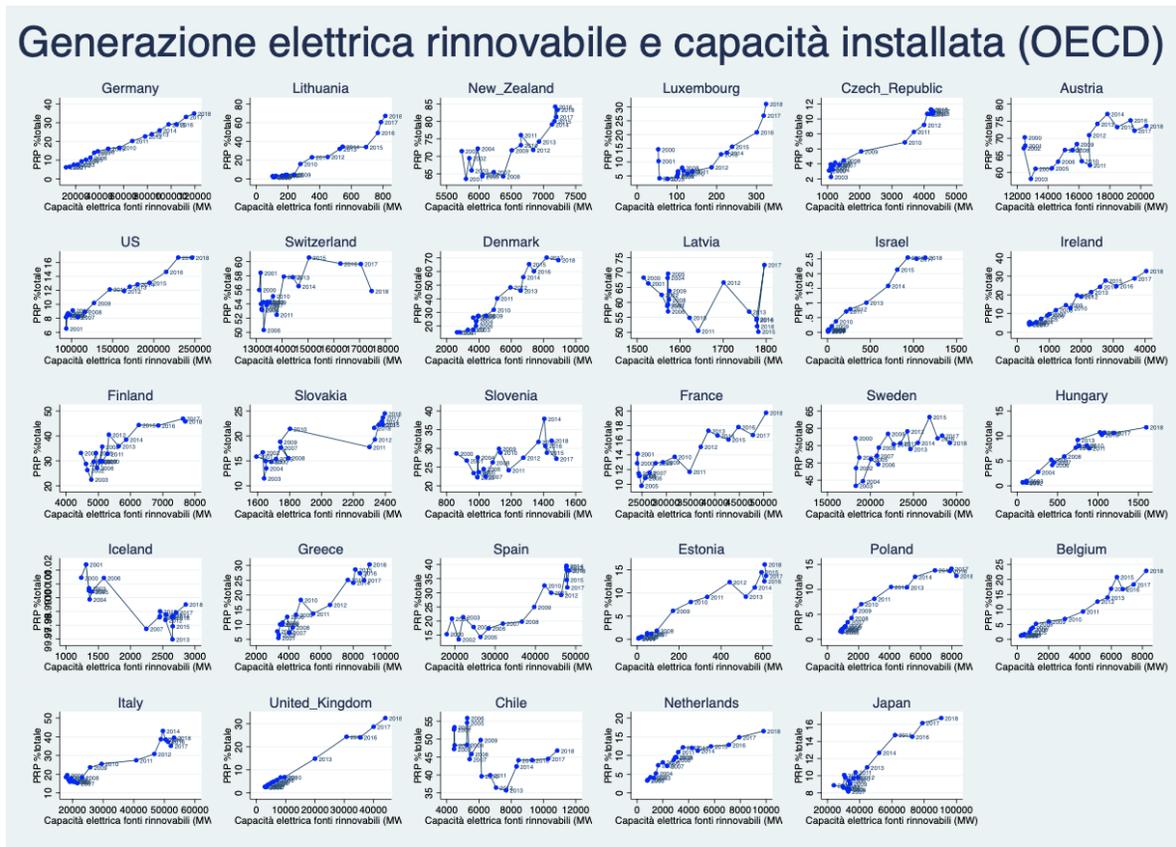


Figura 5.3.2 Andamento variabile generazione elettrica (PRP) e PIL pro-capite (RNL basso)

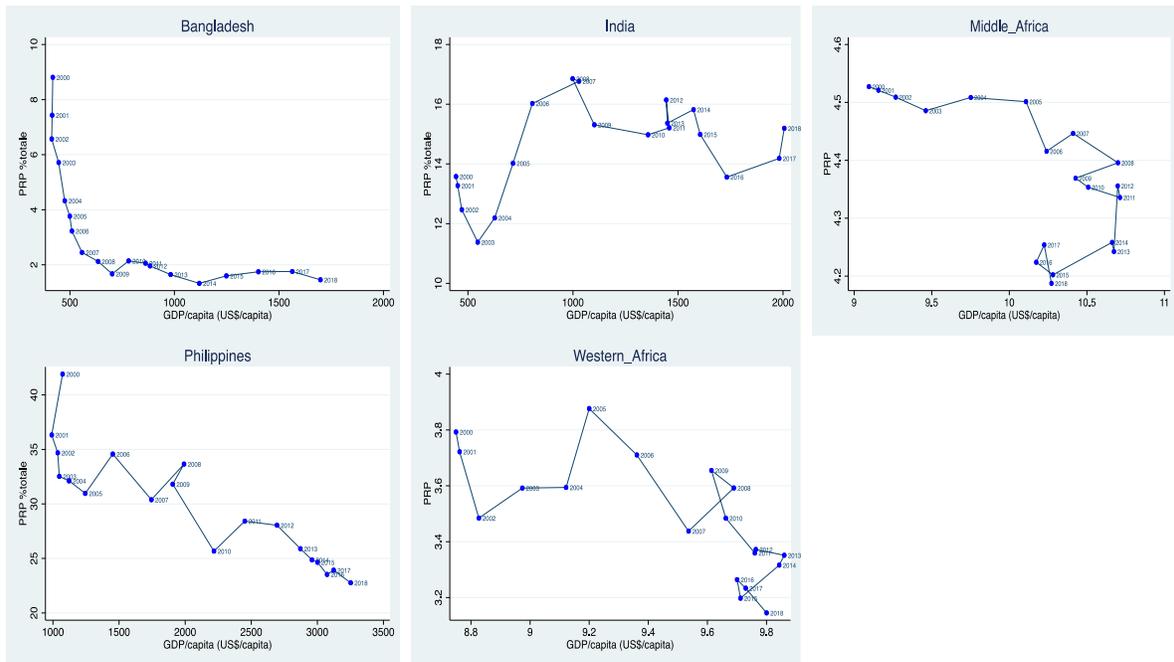


Figura 5.4.3.a Andamento variabile generazione elettrica (PRP) e PIL pro-capite (RNL alto)

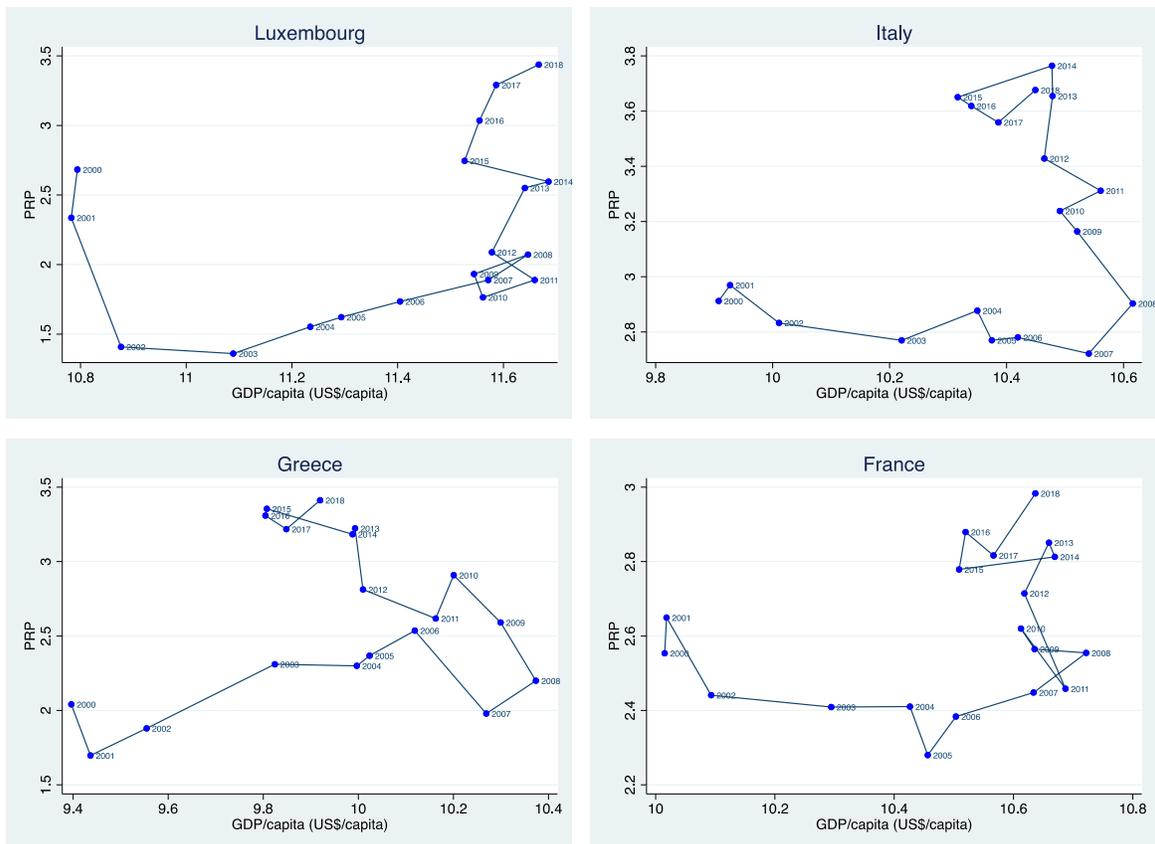


Figura 5.5.3.b Andamento variabile generazione elettrica (PRP) e PIL pro-capite (RNL alto)

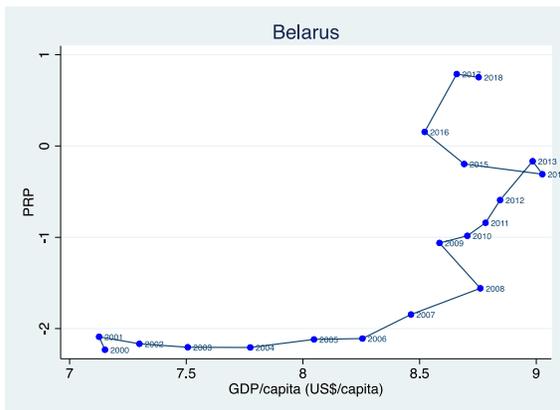
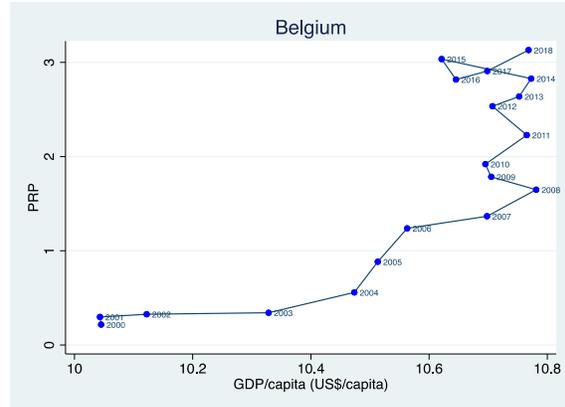
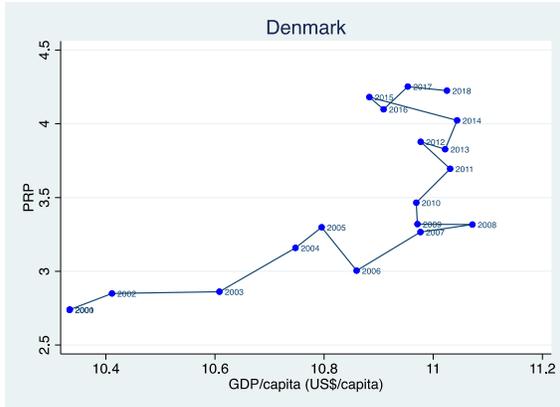


Tabella 5.2.1 Percentuale di produzione elettrica rinnovabile (PRP) e capacità installata

	(1)	(2)	(3)
	PRP	PRP	PRP
GDP/capita (US\$/capita)	-0.45 ^{***}	-0.17 ^{**}	-0.16 ^{**}
	(0.16)	(0.07)	(0.08)
Capacità elettrica fonti rinnovabili (MW)		1.00 ^{***}	0.98 ^{***}
		(0.03)	(0.03)
Apertura paese (%PIL)			0.13 [*]
			(0.07)
Constant	7.21 ^{***}	-4.04 ^{***}	-4.55 ^{***}
	(1.55)	(0.84)	(0.99)
Observations	1518	1518	1485
r2	0.168	0.840	0.845
country_FE	YES	YES	YES
year_FE	YES	YES	YES

*p<0.10, **p<0.05, ***p<0.01

Tabella 5.2.2 Percentuale di produzione elettrica rinnovabile (PRP) e capacità installata

(1= Paesi a RNL alto; 2= paesi a RNL medio alto; 3= paesi a RNL medio basso)

	(1)	(2)	(3)
	PRP	PRP	PRP
GDP/capita (US\$/capita)	-0.01	-0.03	-0.11
	(0.14)	(0.11)	(0.28)
Capacità elettrica fonti rinnovabili (MW)	0.96 ^{***}	0.87 ^{***}	0.45
	(0.03)	(0.10)	(0.25)
Apertura paese (%PIL)	0.19	0.10	-0.17
	(0.15)	(0.07)	(0.25)
Constant	-6.12 ^{***}	-5.00 ^{**}	0.34
	(1.73)	(1.87)	(2.21)
Observations	772	393	176
r2	0.921	0.688	0.0716
country_FE	YES	YES	YES
year_FE	YES	YES	YES

*p<0.10, **p<0.05, ***p<0.01

Tabella 5.2.3 Fattori determinanti della capacità installata in rinnovabili (CIR)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	CIR (MW)	CIR (MW)	CIR (MW)	CIR (MW)	CIR (MW)
GDP/capita (US\$/capita)	-0.26 *	-0.26 *	-0.39	0.00	0.26
	(0.15)	(0.15)	(0.40)	(0.15)	(0.31)
Popolazione urbana		-2.47 ***	-2.56 ***	-1.51 ***	-3.13 **
		(0.39)	(0.65)	(0.39)	(1.43)
LCOE Rinnovabili (US\$/GWh)			-2.14 ***	-1.79 ***	-1.45 *
			(0.58)	(0.53)	(0.76)
Investimenti pubblici in rinnovabili (milioni US\$)				-0.01	-0.01 **
				(0.01)	(0.00)
Import di energia (% energy use)					-0.05
					(0.06)
Constant	11.19 ***	71.60 ***	99.00 ***	66.26 ***	99.61 **
	(1.47)	(9.80)	(24.80)	(15.44)	(39.25)
Observations	1599	1599	732	384	173
r2	0.386	0.388	0.274	0.549	0.618
country_FE	YES	YES	YES	YES	YES
year_FE	YES	YES	YES	YES	YES

*p<0.10, **p<0.05, ***p<0.01

Tabella 5.2.4 Fattori determinanti della capacità installata in rinnovabili (CIR)
 (1= Paesi a RNL alto; 2= paesi a RNL medio alto; 3= paesi a RNL medio basso)

	(1)	(2)	(3)
	CIR (MW)	CIR (MW)	CIR (MW)
GDP/capita (US\$/capita)	0.37	0.49	-0.15
	(0.56)	(0.54)	(0.31)
Popolazione urbana	2.95 ^{***}	5.87 ^{***}	4.64 ^{**}
	(0.89)	(1.12)	(1.41)
LCOE Rinnovabili (US\$/GWh)	-0.17	-0.61	0.33
	(0.76)	(1.51)	(0.28)
Investimenti pubblici in rinnovabili (milioni US\$)	-0.02	-0.02	0.00
	(0.02)	(0.01)	(0.00)
Import di energia (% energy use)	0.01	-0.18 [*]	-0.23
	(0.06)	(0.10)	(0.21)
Constant	-64.52 ^{***}	-131.93 ^{***}	-106.84 ^{**}
	(20.90)	(40.15)	(34.60)
Observations	80	53	30
r2	0.652	0.686	0.819
country_FE	YES	YES	YES
year_FE	YES	YES	YES

*p<0.10,**p<0.05,***p<0.01

Conclusioni

La crescente domanda energetica e il conseguente incremento del consumo energetico che caratterizza le zone sviluppate, sono una sfida per la sostenibilità ambientale. Le fonti rinnovabili possono essere utilizzate per coprire parte dell'energia e dell'elettricità richieste ma vi sono molti fattori che entrano in gioco e che devono essere presi in considerazione.

Le disponibilità delle fonti rinnovabili è tra i principali fattori limitanti, non tutti i paesi hanno a disposizione la stessa quantità di risorse naturali e questo incide molto sulla produzione di energia pulita.

Nel presente studio è stata condotta un'analisi empirica su 92 paesi/aree geografiche nel periodo tra il 1990 e il 2019. L'obiettivo è quello di indagare sugli impatti delle rinnovabili sul mercato elettrico.

Le variabili di PIL pro-capite e consumo energetico rinnovabile, congiuntamente ad altre variabili di controllo, hanno permesso di analizzare l'interazione tra il consumo e la crescita, relazione positiva e confermata da un numero considerevole di studi presenti in letteratura. Gli effetti sono positivi nelle regioni sviluppate e con alto RNL, mentre nei paesi sottosviluppati o con reddito medio alto l'impatto positivo derivante dal consumo di rinnovabili non è così marcato.

In una seconda analisi si è effettuato un controllo invertendo la posizione delle variabili analizzate, adottando quindi come variabile dipendente la percentuale di consumo rinnovabile e come esplicativa il PIL pro-capite. I risultati empirici suggeriscono che un incremento del PIL pro-capite incentiva la crescita di consumo rinnovabile, soprattutto per i paesi sviluppati e che l'apertura nei confronti del commercio internazionale favorisca gli scambi di energia e di consumo di rinnovabili.

Riassumendo, sembra che lato consumi le rinnovabili siano atte ad incentivare la crescita sostenibile.

Tuttavia, la barriera più importante per ulteriori sviluppi è la riluttanza del settore privato ad intraprendere investimenti a causa delle spese considerevoli e del ritardo nel ritorno del capitale. I dati suggeriscono che l'incremento dei LCOE rinnovabili impatti negativamente sulla installazione di impianti rinnovabili, tuttavia si registra negli ultimi anni una loro diminuzione, giustificata da un continuo sviluppo tecnologico, che rende gli impianti produttivi sempre più efficienti. Inoltre, anche gli investimenti sul lato pubblico non risultano significativi per la crescita.

Lo studio si è concentrato quindi sul lato produttivo dell'energia, proponendo un focus sul mercato elettrico.

In un primo modello si riconosce nella variabile esplicativa di capacità installata una determinante per la produzione di energia, in particolare, come è normale attendersi, l'impatto sulla percentuale di elettricità generata da tale fonte aumenta all'aumentare della capacità installata.

L'incremento del prodotto interno lordo di un paese sembra, invece, non guidare la produzione elettrica rinnovabile, sia negli stati sviluppati che in quelli in via di sviluppo, il rapporto tra le variabili è sia significativo che negativo.

Mentre una maggiore dipendenza energetica dai mercati esteri stimola lo sviluppo interno delle energie rinnovabili.

Infine, si è voluto indagare su possibili sostituzioni tra le fonti rinnovabili e quelle non rinnovabili. Inserendo le variabili di produzione da fonti come carbone, petrolio gas naturale e nucleare, si vede che nei paesi ricchi l'energia pulita è in sostituzione con le altre fonti, la relazione è significativa per carbone e petrolio. Nei paesi a reddito medio basso, invece, sembra che il carbone e il nucleare siano in complemento con le rinnovabili.

Le limitazioni del presente studio sono relative alla mancanza di analisi per quanto riguarda alcuni aspetti legati alle politiche di regolamentazione del mercato energetico. Nelle analisi condotte da altri studi si evince però che oltre alla regolamentazione e alle politiche di incentivazione economica, le politiche che assicurano l'investimento finanziario, come le misure di riduzione del rischio di investimento, possono facilitare la crescita della capacità delle energie rinnovabili.

In conclusione, quando si tratta di progresso nella decarbonizzazione del settore elettrico è necessario ricordare che è solo una parte della storia dell'energia. Altre fonti energetiche vengono utilizzate per la produzione di elettricità e garantiscono una continuità di servizio non raggiungibile attraverso l'impiego di soli fonti rinnovabili. Negli stati in via di sviluppo, dove quindi la domanda di energia non è elevata, si può optare per soluzioni rinnovabili e per allacciamenti alla rete elettrica di tipo on o off-grid, che vadano quindi a coprire sia i picchi di richiesta che il normale consumo quotidiano. Nei paesi sviluppati, dove il tasso di urbanizzazione aumenta sempre di più e le infrastrutture per la produzione di elettricità non rinnovabile sono già installate, l'inserimento nel panorama produttivo delle rinnovabili non è semplice.

6 Appendice

Tabella 6.1 Percentuale di produzione elettrica rinnovabile (PRP) e controllo sugli import di energia e sugli investimenti pubblici in rinnovabili

	(1)	(2)	(3)	(4)
	PRP	PRP	PRP	PRP
GDP/capita (US\$/capita)	-0.45 ^{***}	-0.17 ^{**}	-0.03	-0.01
	(0.16)	(0.07)	(0.10)	(0.17)
CIR (MW)		1.00 ^{***}	0.99 ^{***}	0.60 ^{***}
		(0.03)	(0.05)	(0.17)
Import di energia (% energy use)			0.03	-0.03
			(0.10)	(0.05)
Investimenti pubblici in rinnovabili (milioni US\$)				0.00
				(0.01)
Constant	7.21 ^{***}	-4.04 ^{***}	-5.20 ^{***}	-1.78
	(1.55)	(0.84)	(1.49)	(2.11)
Observations	1518	1518	808	363
r2	0.168	0.840	0.826	0.248
country_FE	YES	YES	YES	YES
year_FE	YES	YES	YES	YES

*p<0.10, **p<0.05, ***p<0.01

Tabella 6.2 Percentuale di produzione elettrica rinnovabile (PRP) e controllo sulla produzione (EG) da fonti non rinnovabili

	(1)	(2)	(3)	(4)
	PRP	PRP	PRP	PRP
GDP/capita (US\$/capita)	-0.14	-0.16	-0.13	0.06
	(0.17)	(0.17)	(0.17)	(0.18)
Apertura paese (%PIL)	0.22	0.19	0.19	0.41 **
	(0.24)	(0.25)	(0.25)	(0.19)
EG Carbone (GWh)	-0.30 **	-0.30 **	-0.30 **	-0.48 ***
	(0.13)	(0.13)	(0.13)	(0.14)
EG Petrolio (GWh)		-0.09 *	-0.09 *	-0.07
		(0.05)	(0.05)	(0.06)
EG Gas Naturale (GWh)			-0.05	-0.03
			(0.12)	(0.12)
EG Nucleare (GWh)				-0.04
				(0.03)
Constant	6.98 ***	8.05 ***	8.34 ***	7.98 **
	(2.32)	(2.39)	(2.76)	(2.72)
Observations	499	499	499	277
r2	0.369	0.387	0.389	0.569
country_FE	YES	YES	YES	YES
year_FE	YES	YES	YES	YES

*p<0.10, **p<0.05, ***p<0.01

Tabella 6.3 Percentuale di produzione elettrica rinnovabile (PRP) e controllo sulla produzione (EG) da fonti non rinnovabili
(Sottogruppo di paesi a RNL alto e medio alto)

	(1)	(2)	(3)	(4)
	PRP	PRP	PRP	PRP
GDP/capita (US\$/capita)	-0.13	-0.14	-0.09	0.48
	(0.22)	(0.22)	(0.24)	(0.38)
Apertura paese (%PIL)	0.18	0.16	0.17	1.01 *
	(0.33)	(0.34)	(0.36)	(0.48)
EG Carbone (GWh)	-0.32 **	-0.31 **	-0.31 **	-0.48 **
	(0.14)	(0.14)	(0.14)	(0.16)
EG Petrolio (GWh)		-0.09 *	-0.10	-0.13
		(0.05)	(0.06)	(0.08)
EG Gas Naturale (GWh)			-0.07	-0.14
			(0.13)	(0.17)
EG Nucleare (GWh)				-0.05
				(0.06)
Constant	7.19 **	8.17 **	8.38 **	3.27
	(3.17)	(3.25)	(3.47)	(3.81)
Observations	418	418	418	213
r2	0.411	0.428	0.431	0.630
country_FE	YES	YES	YES	YES
year_FE	YES	YES	YES	YES

*p<0.10,**p<0.05,***p<0.01

Tabella 6.4 Percentuale di produzione elettrica rinnovabile (PRP) e controllo sulla produzione (EG) da fonti non rinnovabili

(Sottogruppo di paesi a RNL medio basso e basso)

	(1)	(2)	(3)	(4)
	PRP	PRP	PRP	PRP
GDP/capita (US\$/capita)	-0.14	-0.16	-0.14	-0.54 ^{***}
	(0.14)	(0.15)	(0.18)	(0.00)
Apertura paese (%PIL)	0.04	0.06	0.06	-0.05 ^{***}
	(0.06)	(0.05)	(0.08)	(0.00)
EG Carbone (GWh)	0.12 [*]	0.11 [*]	0.10	0.11 ^{***}
	(0.03)	(0.03)	(0.07)	(0.00)
EG Petrolio (GWh)		-0.02	-0.02	-0.10 ^{***}
		(0.03)	(0.02)	(0.00)
EG Gas Naturale (GWh)			0.07	-0.18 ^{***}
			(0.21)	(0.00)
EG Nucleare (GWh)				0.15 ^{***}
				(0.00)
Constant	3.35	3.64 [*]	2.80	8.82 ^{***}
	(1.23)	(1.20)	(3.54)	(0.02)
Observations	44	44	44	38
r2	0.550	0.558	0.565	0.797
country_FE	YES	YES	YES	YES
year_FE	YES	YES	YES	YES

*p<0.10,**p<0.05,***p<0.01

7 Tabelle

Tabella 7.1 Raggruppamenti regioni e aree geografiche fonte: bp Statistical Review of World Energy 2020.

Definitions

Statistics published in this review are taken from government sources and published data. No use is made of confidential information obtained by bp in the course of its business.

Country, regions and geographic groupings

Country and geographic groupings are made purely for statistical purposes and are not intended to imply any judgement about political or economic standings.

North America

US (excluding US territories), Canada, Mexico.

South & Central America

Caribbean (including Puerto Rico and US Virgin Islands), Bermuda, Central and South America.

Europe

European members of the OECD plus Albania, Bosnia-Herzegovina, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Georgia, Gibraltar, Latvia, Lithuania, Malta, Montenegro, North Macedonia, Romania, Serbia and Ukraine.

Commonwealth of Independent States (CIS)

Armenia, Azerbaijan, Belarus, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Moldova, Russian Federation, Tajikistan, Turkmenistan, Uzbekistan.

Middle East

Arabian Peninsula, Iran, Iraq, Israel, Jordan, Lebanon, Syria.

North Africa

Territories on the north coast of Africa from Egypt to Western Sahara.

West Africa

Territories on the west coast of Africa from Mauritania to Angola, including Cape Verde, Chad.

East and Southern Africa

Territories on the east coast of Africa from Sudan to Republic of South Africa. Also Botswana, Madagascar, Malawi, Namibia, Uganda, Zambia, Zimbabwe.

Asia Pacific

Brunei, Cambodia, China[†], China Hong Kong SAR*, China Macau SAR*, Indonesia, Japan, Laos, Malaysia, Mongolia, North Korea, Philippines, Singapore, South Asia (Afghanistan, Bangladesh, India, Myanmar, Nepal, Pakistan, Sri Lanka), South Korea, Taiwan, Thailand, Vietnam, Australia, New Zealand, Papua New Guinea, Oceania.

[†]Mainland China.

*Special Administrative Region.

Australasia

Australia, New Zealand.

OECD members

Europe: Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey, UK.

Other member countries: Australia, Canada, Chile, Israel, Japan, Mexico, New Zealand, South Korea, US.

OPEC members

Middle East: Iran, Iraq, Kuwait, Saudi Arabia, United Arab Emirates.

North Africa: Algeria, Libya.

West Africa: Angola, Equatorial Guinea, Gabon, Nigeria, Republic of Congo.

South America: Ecuador, Venezuela.

European Union members

Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, UK.

Non-OECD

All countries that are not members of the OECD.

Tabella 7.2 Panoramica dei dati utilizzati

<i>Nome variabile</i>	<i>Unità misura</i>	<i>Descrizione</i>	<i>Fonte</i>
elec_gen_coal	Gigawatt-hours	Generazione elettrica (Carbone)	BP
elec_gen_gas	Gigawatthours	Generazione elettrica (Gas Naturale)	BP
elec_gen_oil	Gigawatthours	Generazione elettrica (Petrolio)	BP
elec_gen_nuclear	Gigawatthours	Generazione elettrica (Nucleare)	BP
elec_gen	Gigawatthours	Generazione elettricità -TWh	BP
geo_bio_cons	Exajoules	Consumo energia termica-biomassa - EJ	BP
geo_bio_gen	Terawatthours	Generazione energia termica-biomassa - TWh	BP
primary_cons	Exajoules	Consumo energia primaria - EJ	BP
ren_cons	Exajoules	Consumo rinnovabili - EJ	BP
sol_cons	Exajoules	Consumo energia solare - EJ	BP
sol_gen	Terawatthours	Generazione energia solare - TWh	BP
wind_cons	Exajoules	Consumo energia eolica - EJ	BP
wind_gen	Terawatthours	Generazione energia eolica -TWh	BP
elec_acc	% population	Accesso elettrico - % pop	WB
FY_	/	Classificazione GDP	WB
CO2_emissionpc	Mg(ton)/capita	Emissioni CO2 - Mg/capita	WB
energy_imports	% energia utilizzata	Import di energia- % energia utilizzata	WB
CPI	/	Indice di prezzo dei consumatori	WB
gdp_pc	US\$/capita	GDP - USD/capita	WB
urbanpopulation	numero di persone	People living in urban area	WB
elec_cap_ren	MW	Capacità elettrica fonti rinnovabili-MW	IRENA
elec_gen_bio	GWh	Elettricità generata da fonte biogas - GWh	IRENA
elec_gen_geo	GWh	Elettricità generata da fonte geotermica - GWh	IRENA
elec_gen_hydro	GWh	Elettricità generata da fonte idro - GWh	IRENA
elec_gen_ren	GWh	Elettricità generata da rinnovabili - GWh	IRENA

elec_gen_solar	GWh	Elettricità generata da fonte solare - GWh	IRENA
elec_gen_wind	GWh	Elettricità generata da fonte eolica - GWh	IRENA
invest_publ_ren	million US\$	Investimenti Pubblici in Rinnovabili 2019 - million USD	IRENA
LCOE_ren	US\$/GWh	Costo livellato dell'elettricità rinnovabile	IRENA

Tabella 7.3 Composizione delle classificazioni in base al reddito

RNL alto		RNL medio alto	RNL medio basso	RNL basso
Australia	Latvia	Argentina	Algeria	Middle_Africa
Austria	Lithuania	Azerbaijan	Bangladesh	Other_CIS
Belgium	Luxembourg	Belarus	Eastern_Africa	Western_Africa
Canada	Netherlands	Brazil	India	
Chile	New_Zealand	Bulgaria	Morocco	
Croatia	Norway	Central_America	Pakistan	
Cyprus	Oman	China	Philippines	
Czech_Republic	Other_Asia_Pacific	Colombia	Sri_Lanka	
Denmark	Other_Caribbean	Ecuador	Uzbekistan	
Estonia	Poland	Indonesia	Vietnam	
Finland	Portugal	Kazakhstan		
France	Qatar	Malaysia		
Germany	Romania	Mexico		
Greece	Saudi_Arabia	Other_Europe		
Hungary	Singapore	Other_Middle_East		
Iceland	Slovakia	Other_Northern_Africa		
Ireland	Slovenia	Other_Southern_Africa		
Israel	Spain	Peru		
Italy	Sweden	Russian_Federation		
Japan	Switzerland	Thailand		
Kuwait	Trinidad_Tobago	Turkey		
	US			
	United_Arab_Emirates			
	United_Kingdom			

Tabella 7.4 Matrice di correlazione variabili modello di regressione (* livello di significatività)

Matrice correlazione		1	2	3	4	5	6	7
1	Percentuale_produzione_rinnovabile	1						
		1603						
2	Percentuale_consumo_rinnovabile	0.1798*	1					
		0.0000	1490	2388				
3	LCOE_rinnovabili	-0.0051	-0.1175*	1				
		0.8870	0.0006	859				
4	capacità_elettrica_rinnovabile	0.8181*	0.5247*	-0.0575	1			
		0.0000	0.0000	0.1085	1691			
5	gdp_pc	0.0939*	0.1162*	-0.0164	0.0901*	1		
		0.0002	0.0000	0.6316	0.0002	2848		
6	percentuale_accesso_elettrico	-0.1483*	0.1292*	-0.0455	-0.0351	0.1914*	1	
		0.0000	0.0000	0.2126	0.1787	0.0000	2150	
7	urbanpop	-0.0114	0.0845*	-0.0854	0.0036	0.1179*	0.1690*	1
		0.6477	0.0000	0.0123	0.8810	0.0000	0.00	0
		1603	2388	859	1691	2848	2150	2851

Tabella 7.5 Matrice di correlazione variabili modello di regressione (* livello di significatività)

Matrice correlazione		1	2	3	4	5
1	Percentuale_produzione_rinnovabile	1				
		1603				
2	Percentuale_consumo_rinnovabile	0.1798*	1			
		0.0000	1490	2388		
3	capacità_elettrica_rinnovabile	0.8181*	0.5247*	1		
		0.0000	0.0000	1691		
4	import_energia	-0.0117	-0.2664*	-0.1636*	1	
		0.7355	0.0000	0.0000	1424	
5	investimenti_publici	0.2849*	0.3238*	0.3934*	-0.1124	1
		0.0000	0.0000	0.0000	0.0284	744
		694	698	694	380	744

8 Riferimenti

- Bayraktutan, Y., Yilgör, M., & UÇak, S. (2011). Renewable electricity generation and economic growth: Panel-data analysis for OECD members.
- Ajmi, A. N., Hammoudeh, S., Nguyen, D. K., & Sato, J. R. (2015). On the relationships between CO2 emissions, energy consumption and income: the importance of time variation. *Energy Economics*, *49*, 629-638.
- Yumashev, A., Ślusarczyk, B., Kondrashev, S., & Mikhaylov, A. (2020). Global indicators of sustainable development: Evaluation of the influence of the human development index on consumption and quality of energy. *Energies*, *13*(11), 2768.
- Amri, F. (2017). Intercourse across economic growth, trade and renewable energy consumption in developing and developed countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *69*, 527-534.
- Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. J. (2009). Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, *13*(5), 1082-1088.
- Díaz, A., Marrero, G. A., Puch, L. A., & Rodríguez, J. (2019). Economic growth, energy intensity and the energy mix. *Energy Economics*, *81*, 1056-1077.
- Díaz, A., Marrero, G. A., Puch, L. A., & Rodríguez, J. (2019). Economic growth, energy intensity and the energy mix. *Energy Economics*, *81*, 1056-1077.
- Apergis, N., Payne, J. E., Menyah, K., & Wolde-Rufael, Y. (2010). On the causal dynamics between emissions, nuclear energy, renewable energy, and economic growth. *Ecological Economics*, *69*(11), 2255-2260.
- Ang, B. W., Zhou, P., & Tay, L. P. (2011). Potential for reducing global carbon emissions from electricity production—a benchmarking analysis. *Energy Policy*, *39*(5), 2482-2489.
- Bhattacharya, M., Paramati, S. R., Ozturk, I., & Bhattacharya, S. (2016). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy*, *162*, 733-741.
- Lin, B., Omoju, O. E., & Okonkwo, J. U. (2016). Factors influencing renewable electricity consumption in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *55*, 687-696.
- Aydin, C., & Esen, Ö. (2018). Does the level of energy intensity matter in the effect of energy consumption on the growth of transition economies? Evidence from dynamic panel threshold analysis. *Energy Economics*, *69*, 185-195.
- Chalvatzis, K. J., & Hooper, E. (2009). Energy security vs. climate change: Theoretical framework development and experience in selected EU electricity markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(9), 2703-2709.
- Lee, C. C., & Chang, C. P. (2007). The impact of energy consumption on economic growth: Evidence from linear and nonlinear models in Taiwan. *Energy*, *32*(12), 2282-2294.

- Zhang, B., Wang, Z., & Wang, B. (2018). Energy production, economic growth and CO₂ emission: evidence from Pakistan. *Natural Hazards*, *90*(1), 27-50.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, *24*, 38-50.
- Janiszewska, D. A. (2019). Diversification of energy production and consumption in European Union countries. *Polityka Energetyczna*, *22*.
- Dinçer, H., Yüksel, S., & Canbolat, Z. N. (2019). A strategic approach to reduce energy imports of E7 countries: use of renewable energy. In *Handbook of research on economic and political implications of green trading and energy use* (pp. 18-38). IGI Global.
- Hu, H., Xie, N., Fang, D., & Zhang, X. (2018). The role of renewable energy consumption and commercial services trade in carbon dioxide reduction: Evidence from 25 developing countries. *Applied energy*, *211*, 1229-1244.
- Ozturk, I., & Acaravci, A. (2013). The long-run and causal analysis of energy, growth, openness and financial development on carbon emissions in Turkey. *Energy Economics*, *36*, 262-267.
- Khan, I., Hou, F., Zakari, A., & Tawiah, V. K. (2021). The dynamic links among energy transitions, energy consumption, and sustainable economic growth: A novel framework for IEA countries. *Energy*, *222*, 119935.
- Ito, K. (2017). CO₂ emissions, renewable and non-renewable energy consumption, and economic growth: Evidence from panel data for developing countries. *International Economics*, *151*, 1-6.
- Ang, J. B. (2007). CO₂ emissions, energy consumption, and output in France. *Energy policy*, *35*(10), 4772-4778.
- Squalli, J. (2007). Electricity consumption and economic growth: Bounds and causality analyses of OPEC members. *Energy Economics*, *29*(6), 1192-1205.
- Yuan, J. H., Kang, J. G., Zhao, C. H., & Hu, Z. G. (2008). Energy consumption and economic growth: evidence from China at both aggregated and disaggregated levels. *Energy Economics*, *30*(6), 3077-3094.
- Ahn, K., Chu, Z., & Lee, D. (2021). Effects of renewable energy use in the energy mix on social welfare. *Energy Economics*, *96*, 105174.
- Wagner, L., Ross, I., Foster, J., & Hankamer, B. (2016). Trading off global fuel supply, CO₂ emissions and sustainable development. *PloS one*, *11*(3), e0149406.
- Menegaki, A. N. (2011). Growth and renewable energy in Europe: A random effect model with evidence for neutrality hypothesis. *Energy economics*, *33*(2), 257-263.
- Zhang, M., Liu, X., Wang, W., & Zhou, M. (2013). Decomposition analysis of CO₂ emissions from electricity generation in China. *Energy policy*, *52*, 159-165.
- Bello, M. O., & Solarin, S. A. (2021). Searching for sustainable electricity generation: The possibility of substituting coal and natural gas with clean energy. *Energy & Environment*, 0958305X20985253.
- Afridi, M. A., Kehelwalatenna, S., Naseem, I., & Tahir, M. (2019). Per capita income, trade openness, urbanization, energy consumption, and CO₂ emissions: an empirical study on the SAARC Region. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(29), 29978-29990.

- Ahmed, M. M., & Shimada, K. (2019). The effect of renewable energy consumption on sustainable economic development: evidence from emerging and developing economies. *Energies*, *12*(15), 2954.
- Shahbaz, M., Uddin, G. S., Rehman, I. U., & Imran, K. (2014). Industrialization, electricity consumption and CO2 emissions in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *31*, 575-586.
- Quedraogo, N. S. (2013). Energy consumption and human development: Evidence from a panel cointegration and error correction model. *Energy*, *63*, 28-41.
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2011). Renewable and non-renewable electricity consumption–growth nexus: evidence from emerging market economies. *Applied Energy*, *88*(12), 5226-5230.
- Apergis, N., & Payne, J. E. (2010). Renewable energy consumption and growth in Eurasia. *Energy Economics*, *32*(6), 1392-1397.
- Apergis, N., Payne, J. E., Menyah, K., & Wolde-Rufael, Y. (2010). On the causal dynamics between emissions, nuclear energy, renewable energy, and economic growth. *Ecological Economics*, *69*(11), 2255-2260.
- Odhiambo, N. M. (2009). Electricity consumption and economic growth in South Africa: A trivariate causality test. *Energy Economics*, *31*(5), 635-640.
- Omri, A., Mabrouk, N. B., & Sassi-Tmar, A. (2015). Modeling the causal linkages between nuclear energy, renewable energy and economic growth in developed and developing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *42*, 1012-1022.
- Zhou, P., Ang, B. W., & Wang, H. (2012). Energy and CO2 emission performance in electricity generation: a non-radial directional distance function approach. *European journal of operational research*, *221*(3), 625-635.
- Narayan, P. K., & Prasad, A. (2008). Electricity consumption–real GDP causality nexus: Evidence from a bootstrapped causality test for 30 OECD countries. *Energy policy*, *36*(2), 910-918.
- Wang, Q. (2010). Effective policies for renewable energy—the example of China's wind power—lessons for China's photovoltaic power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(2), 702-712.
- Wang, Q., & Wang, L. (2020). Renewable energy consumption and economic growth in OECD countries: A nonlinear panel data analysis. *Energy*, *207*, 118200.
- Rahman, S. M., & Miah, M. D. (2017). The impact of sources of energy production on globalization: Evidence from panel data analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *74*, 110-115.
- Inglesi-Lotz, R. (2016). The impact of renewable energy consumption to economic growth: A panel data application. *Energy economics*, *53*, 58-63.
- Sarkodie, S. A., & Adams, S. (2020). Electricity access, human development index, governance and income inequality in Sub-Saharan Africa. *Energy Reports*, *6*, 455-466.
- Yüksel, S., Dinçer, H., & Meral, Y. (2019). Financial analysis of international energy trade: a strategic outlook for EU-15. *Energies*, *12*(3), 431.
- Yüksel, S., Dinçer, H., & Meral, Y. (2019). Financial analysis of international energy trade: a strategic outlook for EU-15. *Energies*, *12*(3), 431.

- Niu, S., Jia, Y., Wang, W., He, R., Hu, L., & Liu, Y. (2013). Electricity consumption and human development level: A comparative analysis based on panel data for 50 countries. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *53*, 338-347.
- Chien, T., & Hu, J. L. (2008). Renewable energy: An efficient mechanism to improve GDP. *Energy policy*, *36*(8), 3045-3052.
- Chang, T., Gupta, R., Inglesi-Lotz, R., Simo-Kengne, B., Smithers, D., & Trembling, A. (2015). Renewable energy and growth: Evidence from heterogeneous panel of G7 countries using Granger causality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *52*, 1405-1412.
- Soytas, U., Sari, R., & Ewing, B. T. (2007). Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States. *Ecological Economics*, *62*(3-4), 482-489.
- Al-Mulali, U., Fereidouni, H. G., & Lee, J. Y. (2014). Electricity consumption from renewable and non-renewable sources and economic growth: Evidence from Latin American countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *30*, 290-298.
- Şahin, U. (2020). Projections of Turkey's electricity generation and installed capacity from total renewable and hydro energy using fractional nonlinear grey Bernoulli model and its reduced forms. *Sustainable Production and Consumption*, *23*, 52-62.
- Graus, W., & Worrell, E. (2009). Trend in efficiency and capacity of fossil power generation in the EU. *Energy Policy*, *37*(6), 2147-2160.
- Li, X. (2005). Diversification and localization of energy systems for sustainable development and energy security. *Energy policy*, *33*(17), 2237-2243.
- Zhang, X. P., & Cheng, X. M. (2009). Energy consumption, carbon emissions, and economic growth in China. *Ecological Economics*, *68*(10), 2706-2712.
- Fang, Y. (2011). Economic welfare impacts from renewable energy consumption: The China experience. *Renewable and sustainable energy Reviews*, *15*(9), 5120-5128.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, *24*, 38-50.
- Owusu, P. A., & Asumadu-Sarkodie, S. (2016). A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation. *Cogent Engineering*, *3*(1), 1167990.
- Taylor, P. (2010). Energy Technology Perspectives 2010. *Scenarios & strategies to, 2050*.
- Fay, M. (2012). *Inclusive green growth: The pathway to sustainable development*. World Bank Publications.
- Samad, H. A., Khandker, S. R., Asaduzzaman, M., & Yunus, M. (2013). *The benefits of solar home systems: an analysis from Bangladesh*. The World Bank.
- Chakravorty, U., Pelli, M., & Marchand, B. U. (2014). Does the quality of electricity matter? Evidence from rural India. *Journal of Economic Behavior & Organization*, *107*, 228-247.
- Barron, M., & Torero, M. (2014). Electrification and time allocation: experimental evidence from Northern El Salvador.
- Grogan, L., & Sadanand, A. (2013). Rural electrification and employment in poor countries: Evidence from Nicaragua. *World Development*, *43*, 252-265.
- Barron, M., & Torero, M. (2017). Household electrification and indoor air pollution. *Journal of Environmental Economics and Management*, *86*, 81-92.
- Meles, T. H. (2020). Impact of power outages on households in developing countries: Evidence from Ethiopia. *Energy Economics*, *91*, 104882.

- Nguyen, K. Q. (2007). Alternatives to grid extension for rural electrification: Decentralized renewable energy technologies in Vietnam. *Energy Policy*, *35*(4), 2579-2589.
- Juanpera, M., Blechinger, P., Ferrer-Martí, L., Hoffmann, M. M., & Pastor, R. (2020). Multicriteria-based methodology for the design of rural electrification systems. A case study in Nigeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *133*, 110243.
- Jenkins, G., & Baurzhan, S. (2014). *Off-grid Solar PV: Is it an affordable or an appropriate solution for rural electrification in sub-Saharan African countries?* (No. 2014-07). JDI Executive Programs.
- Bernard, T. (2012). Impact analysis of rural electrification projects in sub-Saharan Africa. *The World Bank Research Observer*, *27*(1), 33-51.
- Van Ruijven, B. J., Schers, J., & van Vuuren, D. P. (2012). Model-based scenarios for rural electrification in developing countries. *Energy*, *38*(1), 386-397.
- Chang, T., Gupta, R., Inglesi-Lotz, R., Simo-Kengne, B., Smithers, D., & Trembling, A. (2015). Renewable energy and growth: Evidence from heterogeneous panel of G7 countries using Granger causality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *52*, 1405-1412.
- Sheng, P., He, Y., & Guo, X. (2017). The impact of urbanization on energy consumption and efficiency. *Energy & Environment*, *28*(7), 673-686. doi:10.2307/90014163
- Mahadevan, R., & Asafu-Adjaye, J. (2007). Energy consumption, economic growth and prices: A reassessment using panel VECM for developed and developing countries. *Energy policy*, *35*(4), 2481-2490.
- Carley, S. (2009). State renewable energy electricity policies: An empirical evaluation of effectiveness. *Energy policy*, *37*(8), 3071-3081.
- Dong, C. G. (2012). Feed-in tariff vs. renewable portfolio standard: An empirical test of their relative effectiveness in promoting wind capacity development. *Energy Policy*, *42*, 476-485.
- Eissa, M., Hashim, Y. Z. H. Y., & Zainurin, N. A. A. (2018). Document details. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, *8*(4-2), 1625-1632.
- BRUNNSCHWEILER, C. (2010). Finance for renewable energy: An empirical analysis of developing and transition economies. *Environment and Development Economics*, *15*(3), 241-274. doi:10.1017/S1355770X1000001X
- Sapat, A. (2004). Devolution and innovation: The adoption of state environmental policy innovations by administrative agencies. *Public Administration Review*, *64*(2), 141-151.
- Liming, H. (2009). Financing rural renewable energy: a comparison between China and India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *13*(5), 1096-1103.
- Waldhier, M. (2010). *Financing Renewable Energy Projects: An Overview*. Penn State University. Working Paper.