

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare



**Politecnico
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

Il fattore di energia primaria (PEF) dinamico dell'energia
elettrica per l'anno 2022 in Italia: applicazioni ed
implicazioni per il settore edilizio

RELATORE

Prof. Fabrizio Enrico

CORRELATORE

Ing. Bilardo Matteo

CANDIDATO

Oldini Riccardo

Matricola: 301706

Anno Accademico 2022/2023

Abstract

L'energia primaria è una grandezza di fondamentale importanza in molte applicazioni e rappresenta l'energia derivata da fonti rinnovabili e non rinnovabili che non ha subito processi di trasformazione e lavorazione.

Il fattore di energia primaria (PEF) è l'indicatore che consente di passare dalle quantità di energia vettoriale, fornite dai vettori energetici, a quella primaria. L'uso di questi fattori è ampiamente diffuso in molti settori, tra cui quello edilizio, dove essi consentono di ricavare le prestazioni energetiche di un edificio, evidenziando la quantità di energia primaria necessaria per il sostentamento di quest'ultimo. Questa tesi si pone come obiettivo il calcolo dei fattori di energia primaria (PEF) reali per il vettore energetico elettricità per l'anno 2022 in Italia, quelli con il maggior impatto sul consumo di energia, cercando di verificare l'obsolescenza di quelli attualmente in uso, indicati nel DM Requisiti Minimi del 2015, ed introducendo il concetto di dinamicità, attualmente non presente.

Tutti i calcoli effettuati applicano quanto prescritto dalla norma di riferimento per il calcolo dei PEF, la UNI EN 17423. Grazie all'utilizzo delle formulazioni presenti in questa normativa e ai dati riguardanti la produzione, l'import, l'export e il consumo di energia, resi disponibili da Terna, si ottengono i risultati desiderati.

Questi risultano essere alla base di diverse analisi portate avanti nell'elaborato, tra cui l'analisi di clusterizzazione con l'obiettivo di individuare diversi profili tipici dei PEF e come essi possano essere distinti in funzione di variabili influenzanti, un'analisi predittiva con l'obiettivo di valutare la precisione nel prevedere i profili dei PEF sfruttando i risultati della clusterizzazione rispetto alla loro determinazione analitica e l'applicazione ad un caso studio di un edificio ad uso residenziale, con l'obiettivo di valutare il risparmio di energia primaria scaturito dall'adozione dei PEF appena determinati.

I risultati evidenziano come il contributo costantemente in crescita delle fonti rinnovabili degli ultimi anni, abbia modificato pesantemente i valori dei PEF, rendendo necessaria la loro più celere sostituzione, a favore di valori aggiornati e dinamici, in grado di valorizzare la produzione di energia, cercando di diminuire lo sfasamento tra domanda e offerta e premiando le energie provenienti da fonti rinnovabili, ancor più se autoconsumate.

Indice

1. Introduzione	9
1.1. Obiettivi e struttura della tesi	13
2. Fattore di energia primaria	15
2.1. Metodologie di calcolo per il fattore di energia primaria	17
2.1.1. Metodo della conversione zero equivalente	18
2.1.2. Metodo diretto equivalente.....	18
2.1.3. Metodo del contenuto energetico fisico	19
2.1.4. Metodo dell'efficienza tecnica di conversione.....	21
2.2. L'importanza del metodo da utilizzare	22
3. Problematiche legate ai PEF	27
4. Normativa UNI EN-17423	31
4.1. PEF per il vettore energetico “delivered”	32
4.2. PEF per il vettore energetico esportato	34
4.3. Ipotesi per il calcolo dei PEF	35
4.3.1. Perimetro geografico	35
4.3.2. Risoluzione temporale.....	36
4.3.3. Fonte dei dati utilizzati.....	36
4.3.4. Scelta del potere calorifico.....	37
4.3.5. Fonti energetiche da considerare.....	37
4.3.6. Convenzioni relative alla conversione dell'energia.....	37
4.3.7. Convenzioni per i PEF relativi all'energia esportata.....	38
4.4. Metodologie di calcolo per la valutazione dei PEF	38
4.4.1. Scambi di energia con altri confini geografici	38
4.4.2. Approccio di calcolo per un sistema con fonti multiple.....	40
4.4.3. Allocazione di un sistema energetico con più output.....	40
4.4.4. Metodo life cycle.....	41
5. Calcolo del PEF dinamico per il vettore elettricità	42
5.1. Metodologie per il calcolo del PEF	42
5.2. Calcolo del PEF	46
5.3. Analisi sui dati relativi alla produzione di energia nazionale	50
6. Risultati	54
6.1. Risultati preliminari: importanza della quota di importazione sul totale	54
6.2. Risultati riguardanti i pef dinamici per il 2022	60
6.2.1. Analisi in frequenza	62

6.2.2.	Analisi con curva cumulativa	64
6.2.3.	Analisi con box plot	65
6.3.	Risultati dell'analisi di correlazione	70
6.3.1.	Analisi attraverso heatmap	73
6.4.	Risultati dell'analisi di clusterizzazione	79
6.4.1.	Preparazione del set di dati per l'analisi.....	80
6.4.2.	Metodologia alla base dell'analisi di clusterizzazione	82
6.4.3.	Risultati della clusterizzazione.....	83
6.5.	Risultati dell'analisi predittiva.....	89
7.	Caso studio.....	97
8.	Conclusioni.....	106
9.	Limiti e sviluppi futuri del lavoro	109
	Bibliografia	110

Indice delle tabelle

Tabella 1:	presentazione dei capitoli e relativi contenuti	14
Tabella 2:	Fonti energetiche rinnovabili e non rinnovabili per il metodo diretto equivalente [9]	19
Tabella 3:	Definizioni di efficienza tecnica di conversione per diverse fonti energetiche [9]	22
Tabella 4:	Efficienza di conversione dei quattro metodi presentati dalla UNI EN- 17423 [9].....	23
Tabella 5:	Valori dei PEF ottenuti dai modelli del report sopracitato [13]. Errore. Il segnalibro non è definito.	
Tabella 6:	Annex A della normativa UNI EN-17423: scelte per il calcolo del PEF dell'energia elettrica	43
Tabella 7:	PEF totale medio mensile del 2022	94
Tabella 8:	tabella riassuntiva dei risultati ottenuti per il risparmio di energia primaria.....	103

Indice delle figure

Figura 1: Schema esplicativo del fattore di energia primaria [8].....	15
Figura 2: Schema dei flussi di energia in ingresso e uscita dal volume di controllo [8]	25
Figura 3: Fattori di energia primaria per due sorgenti, una rinnovabile e l'altra non rinnovabile [8]	33
Figura 4: Schema esplicativo per i diversi perimetri geografici della norma UNI EN ISO 52000-1 [8]	34
Figura 5: Schema riassuntivo per la procedura di calcolo per il PEF totale orario	49
Figura 6: Ripartizione della produzione nazionale di energia elettrica.....	50
Figura 7: Share medio nel 2022 delle fonti energetiche per la produzione di energia elettrica.....	51
Figura 8: Share medio (ore diurne) nel 2022 delle fonti energetiche per la produzione di energia elettrica	52
Figura 9: Peso dell'import sul totale di energia finale prodotta nel Paese	55
Figura 10: Grafico cumulativo del peso dell'import sul totale di energia finale prodotta	56
Figura 11: Peso dell'import sul totale di energia primaria	57
Figura 12: Grafico cumulativo del peso dell'import sull'energia primaria	58
Figura 13: Valore del PEF per l'import mediato sull'import dai diversi Paesi ...	59
Figura 14: Andamento dei PEF per tutto l'anno 2022	61
Figura 15: Distribuzione in frequenza dei valori dei PEF rinnovabili e non rinnovabili nel 2022.....	62
Figura 16: Grafico cumulativo per PEF rinnovabile e non rinnovabile per l'anno 2022	64
Figura 17: Box plot del PEF non rinnovabile per l'anno 2022	66
Figura 18: Box plot del PEF rinnovabile per l'anno 2022	68
Figura 19: Confronto tra box plot dei PEF rinnovabile e non rinnovabile per l'anno 2022	70

Figura 20: Correlazione tra PEF rinnovabile e PEF non rinnovabile per l'anno 2022	71
Figura 21: Correlazione tra PEF rinnovabile e PEF non rinnovabile con suddivisione stagionale.....	72
Figura 22: Heatmap per il PEF rinnovabile dell'anno 2022	74
Figura 23: Heatmap per il PEF non rinnovabile dell'anno 2022	74
Figura 24: Heatmap per il PEF rinnovabile per aprile e maggio 2022	75
Figura 25: Heatmap per il PEF non rinnovabile per aprile e maggio 2022	76
Figura 26: Profili di carico per il 18 aprile 2022 (a) e il 19 aprile 2022 (b)	77
Figura 27: PEF rinnovabile e non rinnovabile del 18 aprile 2022 (a) e 19 aprile 2022 (b).....	78
Figura 28: Percentuali PEF rinnovabile e non rinnovabile rispetto a quello totale	80
Figura 29: Percentuali del PEF rinnovabile e non rinnovabile con media oraria	81
Figura 30: Cluster per il PEF non rinnovabile per l'anno 2022	84
Figura 31: Albero di classificazione per il PEF non rinnovabile del 2022	85
Figura 32: Cluster per il PEF rinnovabile per l'anno 2022	87
Figura 33: Albero di classificazione per il PEF rinnovabile dell'anno 2022	88
Figura 34: Profili medi percentuali del PEF non rinnovabili dall'analisi di clusterizzazione, cluster 1 (a) e cluster 2 (b)	89
Figura 35: Profili medi percentuali del PEF rinnovabile dall'analisi di clusterizzazione, cluster 1 (a) e cluster 2 (b)	90
Figura 36: Errore percentuale dei PEF non rinnovabile (a) e rinnovabile (b) con il valore del DM Requisiti Minimi 2015	91
Figura 37: Errore percentuale dei PEF non rinnovabile (a) e rinnovabile (b) con il valore del DM Requisiti Minimi 2015 (curve cumulate).....	91
Figura 38: Errore percentuale dei PEF non rinnovabile (a) e rinnovabile (b) con il valor medio del PEF totale del 2022	92
Figura 39: Errore percentuale dei PEF non rinnovabile (a) e rinnovabile (b) con il valor medio del PEF totale del 2022 (curve cumulate).....	93

Figura 40: Errore percentuale dei PEF non rinnovabile (a) e rinnovabile (b) con media mensile del PEF totale del 2022	94
Figura 41: Errore percentuale dei PEF non rinnovabile (a) e rinnovabile (b) con media mensile del PEF totale del 2022 (curve cumulate)	94
Figura 42: Prelievo medio di un edificio ad uso residenziale in Piemonte	98
Figura 43: Energia primaria consumata con valori DM Requisiti Minimi 2015	99
Figura 44: Energia primaria consumata con PEF medi del 2022	100
Figura 45: Energia primaria consumata con PEF orari del 2022	102

1. Introduzione

Negli ultimi anni ci si è resi conto di essere di fronte ad un cambiamento climatico a livello mondiale. Per questo motivo molte politiche, a partire dal protocollo di Kyoto del 1997, hanno cercato di guidare i Paesi verso un consumo minore e sempre più rinnovabile di energia rispetto al passato. Queste politiche spingono principalmente verso la riduzione della CO_2 emessa, l'incremento della frazione di fonti rinnovabili per la generazione di energia e il miglioramento dell'efficienza energetica, rendendo questi tre punti i cardini su cui uno Stato deve fare perno per cercare di limitare gli effetti del cambiamento climatico.

Per molti Paesi, tra cui l'Italia, l'obiettivo più complesso da rispettare nel corso degli anni è stato la diminuzione del consumo di energia e l'incremento dell'efficienza energetica di tutta la filiera energetica, dalla generazione all'utilizzo finale dell'energia. Tutto ciò è evidenziato dalla politica contro il cambiamento climatico adottata dal 2009 in sostituzione del protocollo di Kyoto, denominata come "20-20-20 by 2020" che mirava alla riduzione delle emissioni di gas serra del 20% rispetto al 1990, l'incremento della produzione di energia da fonti rinnovabili del 20% e un incremento dell'efficienza energetica pari al 20%. L'ultimo di questi target, come evidenziato dall'articolo dell'European Environment Agency (EEA) [1], è stato raggiunto solamente per la condizione di lockdown scaturita dal propagarsi della pandemia di Covid-19.

L'incremento dell'efficienza energetica continua a rappresentare la problematica maggiore anche per gli obiettivi futuri, presentati all'interno del pacchetto proposto dall'Unione Europea per la limitazione dei cambiamenti climatici "Fit for 55" che racchiude diversi target da raggiungere entro il 2030, in modo da arrivare al 2050 nella situazione di "carbon neutrality", cioè con emissione di gas serra pari a zero.

Tra i diversi obiettivi presentati dal "Fit for 55" che devono essere conseguiti è presente la riduzione del consumo di energia primaria pari al 40,6% [2] rispetto al 2007, valore non di facile realizzazione.

Per fare in modo che gli obiettivi comuni vengano rispettati, ogni Paese all'interno dell'UE ha target differenti, assegnati in funzione delle possibilità che ogni Stato possiede nel contribuire al risultato finale. Attraverso la stesura del PNIEC (Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima) e la sua approvazione nel gennaio 2020, l'Italia si impegna a rispettare gli obiettivi imposti dalla comunità europea e, di conseguenza, a ridurre il consumo di energia primaria del 43% rispetto allo scenario presente nel 2007 [3].

Questo obiettivo, non di facile raggiungimento, deve essere realizzato riducendo il consumo di energia primaria, definita come l'insieme delle "fonti presenti in natura prima di subire una qualunque trasformazione" [4]. Queste fonti possono essere sia fonti energetiche esauribili come carbone fossile, petrolio greggio, gas naturale e combustibili nucleari sia fonti energetiche rinnovabili come quella solare, idraulica, eolica, geotermica e la biomassa.

All'interno della maggior parte dei calcoli e delle analisi per la valutazione del risparmio energetico si fa riferimento proprio al concetto di energia primaria poiché consente di confrontare tra di loro diverse fonti energetiche destinate alla generazione di un unico vettore energetico. L'energia primaria differisce dall'energia utilizzata per il consumo finale in quanto vengono considerati tutti i processi relativi alle trasformazioni che essa può subire. Questi variano a seconda della tipologia di fonte energetica che si considera; abitualmente si possono trovare le fasi di estrazione, lavorazione, stoccaggio, trasporto, generazione, trasmissione, distribuzione. Ad ognuna di queste fasi sono associate delle perdite che possono avere entità maggiore o minore ma, per quanto possano essere ridotte, non sono mai nulle. Ed è proprio per questa motivazione che per effettuare valutazione sul risparmio energetico, negli ultimi anni, l'energia primaria è sempre più divenuta una grandezza fondamentale, in quanto, per definizione, considera tutte le perdite presenti nei processi di generazione dell'energia finale pronta per il consumo.

Per risalire dal valore in energia finale a quello in energia primaria è necessario utilizzare il Fattore di Energia Primaria (PEF, Primary Energy Factor), che indica la quantità di energia utilizzata per generare una singola unità di energia pronta per

il consumo finale. In particolar modo, nell'elaborato, si fa riferimento al PEF relativo all'energia elettrica, in quanto rappresenta il vettore energetico preso in considerazione per le analisi. A tal proposito, diverse direttive europee, tra cui la direttiva del 2012 sull'efficienza energetica [5], negli anni passati hanno fissano il valore del PEF per questo vettore energetico pari a 2,5, che rappresentava l'efficienza media europea per la conversione dell'energia primaria in elettrica, pari al 40%. Con la direttiva emanata nel 2018 dal Parlamento europeo [6] questo valore è stato aggiornato a 2,1, lasciando in aggiunta la possibilità di utilizzare valori differenti, calcolati eseguendo le corrette ipotesi e le giuste valutazioni. Negli ultimi mesi il fattore relativo al vettore energetico elettricità è stato nuovamente aggiornato da una direttiva europea, che consente agli Stati membri dell'UE di assumere un valore pari a 1,9 [7].

Nonostante questo ultimo aggiornamento, nell'elaborato si farà riferimento al valore prescritto dalla direttiva precedente, in quanto tutte le valutazioni e i calcoli vengono effettuati per il 2022, anno in cui vigeva ancora la direttiva emanata nel 2018.

Legate al valore prescritto nella direttiva del 2018 si possono trovare diverse problematiche e incongruenze che portavano a sovrastimare il quantitativo di energia primaria utilizzata, facendo sì che il consumo energetico di un Paese risultasse superiore rispetto a quello che realmente era. Quanto affermato è dovuto a diversi aspetti, partendo dal fatto che il valore di 2,1 è stato calcolato e adottato nel 2018 ed è rimasto come valore di riferimento fino alla fine del 2022. Questo quindi non tiene in considerazione i diversi progressi tecnologici che sono stati apportati negli ultimi anni che, sicuramente, hanno portato alla sua diminuzione. Un altro problema è legato al fatto che questo valore del PEF viene proposto come valore unico che può essere adottato da tutti i Paesi facenti parte dell'Unione Europea, ipotizzando che tutte le nazioni abbiano lo stesso grado di avanzamento dal punto di vista tecnologico e non evidenziando le differenze di mix energetico tra queste; assunzione non propriamente corretta.

Infine, un ulteriore problema scaturisce dal fatto che il PEF viene dato come fattore statico, cioè costante nel tempo. Questa affermazione può essere ritenuta errata in quanto a seconda del periodo dell'anno, della stagione e dell'orario della giornata, questo fattore assume valori che possono essere sostanzialmente differenti tra loro.

Per evidenziare l'importanza correlata ai PEF dinamici si può presentare un esempio relativo al settore residenziale, che ha un ruolo determinante all'interno del bilancio finale dei consumi, sia a livello mondiale sia a livello italiano, portando al consumo di un grosso quantitativo di energia. Questo esempio è stato scelto in quanto uno degli scopri principali dell'elaborato è proprio legato alla valutazione del consumo di energia primaria di un edificio ad uso residenziale, con l'obiettivo di evidenziare come l'utilizzo dei fattori corretti possa portare ad una diminuzione del consumo di energia primaria rispetto all'applicazione dei valori prescritti dalle normative.

In particolar modo la valutazione delle prestazioni degli edifici, secondo la normativa UNI-TS 11300-5 del 2016, deve essere effettuata calcolando due indicatori differenti, rispettivamente l'indice di energia primaria globale totale e l'indice di energia primaria globale non rinnovabile, entrambi espressi in kWh/m^2 .

Per arrivare a questi risultati finali, si deve fare affidamento al fattore di energia primaria totale e al fattore di energia primaria non rinnovabile. Quindi si intuisce l'importanza dell'utilizzo di PEF più aggiornati possibili e che rispecchino istante per istante la realtà, al contrario di quanto accade al giorno d'oggi dove questi, essendo datati e statici, non consentendo di effettuare valutazioni corrette sul reale consumo degli edifici. Basti pensare che l'energia consumata da un determinato edificio varia nel tempo, in quanto dipende da diverse variabili, come la temperatura esterna, la radiazione solare, la presenza di occupanti, il funzionamento delle apparecchiature interne o dell'illuminazione, etc.

Considerando che le grandezze influenzanti appena citate sono variabili nel tempo, anche i fattori di energia primaria, dovrebbero essere considerati ed utilizzati come dinamici, in quanto essi cambiano nel tempo e non rimangono costanti,

modificando in alcuni casi anche pesantemente il risultato relativo al consumo in energia primaria di un edificio.

1.1. Obiettivi e struttura della tesi

Per quanto appena detto, nel paragrafo 6.2, si andranno a calcolare i PEF dinamici durante l'anno 2022 per l'Italia e si confronteranno i risultati ottenuti con i valori proposti sia a livello europeo, presenti nella direttiva 2018/2002, sia a livello italiano, come previsto dal DM Requisiti Minimi del 2015, scoprendo che la valutazione dipendente dal tempo fa ottenere consumi decisamente più bassi rispetto a quanto imposto dalle normative. Tutto ciò è effettuato sfruttando le metodologie di calcolo proposte dalla normativa più recente che fornisce sia la possibilità di valutare fattori di energia primaria su base oraria sia di calcolare i coefficienti di emissione della CO_2 . Questa normativa è la UNI EN-17423, approvata nell'ottobre del 2020 e pubblicata il mese successivo, con lo scopo di rendere più chiaro e supportare quanto prescritto dalla normativa ISO 52000-1.

Quindi, lo scopo di questa tesi è il calcolo dei fattori di energia primaria dinamici per il vettore energetico che ha maggior peso, cioè l'elettricità, durante il corso del 2022. Questo viene effettuato adottando una delle metodologie di calcolo della UNI EN-17423, che verrà presentata nei capitoli 2 e 4, sfruttando i dati a disposizione su generazione, import, export e di carico orari raccolti da Terna durante il corso dell'anno passato. Questo permetterà di effettuare un confronto tra i valori ottenuti attraverso i calcoli e quelli prescritti dalle normative.

Inoltre, con i valori dei PEF ottenuti, attraverso l'impostazione di diverse analisi presentate nei paragrafi 6.3, 6.4 e 6.5, si cercheranno di analizzare i risultati per andare a caratterizzarli e scoprire come questi possano cambiare nel corso dell'anno in studio, cercando una correlazione tra i diversi profili giornalieri dei PEF ottenuti e come questi possano essere suddivisi in gruppi di profili tipologici differenti tra loro, in modo da scoprire anche quali variabili influenzanti siano alla base di queste distinzioni.

In conclusione, nel capitolo 7, si vedrà come i valori dei fattori di energia primaria orari ottenuti possano essere utilizzati in applicazione ad un edificio tipo, come questi portino ad un consumo di energia primaria più corretto rispetto a quello ottenibile utilizzando il fattore statico del DM Requisiti Minimi del 2015.

La struttura e gli argomenti trattati da qui in avanti sono riassunti nella Tabella 1.

Tabella 1: presentazione dei capitoli e relativi contenuti

Capitolo	Argomento
Capitolo 2	Fattore di energia primaria e metodologie per la sua determinazione
Capitolo 3	Problematiche legate al fattore di energia primaria
Capitolo 4	Descrizione della normativa UNI EN 17423
Capitolo 5	Metodologie e ipotesi effettuate per la determinazione dei fattori di energia primaria
Capitolo 6	Analisi dei risultati ottenuti
Capitolo 7	Applicazione dei risultati ad un caso studio
Capitolo 8	Conclusioni
Capitolo 9	Possibili sviluppi futuri basati sull'elaborato

2. Fattore di energia primaria

Come enunciato nell'introduzione alla tesi, il fattore di energia primaria (*Primary Energy Factor*, PEF) è un indice che consente di associare l'energia primaria al consumo finale di energia, in quanto esprime la quantità di energia che è necessaria a fornire all'utente finale una singola unità di energia pronta per essere consumata. Dal punto di vista matematico questo valore può essere calcolato come il rapporto tra l'energia primaria e l'energia che, secondo la normativa UNI EN ISO 52000-1, viene definita come *delivered* (consegnata) all'utente finale, come descritto dall'equazione 1. L'energia primaria viene vista come l'energia finale alla quale devono essere sommati tutti i contributi legati alle trasformazioni che essa deve subire per diventare tale, cioè tutte le perdite che avvengono durante i processi di estrazione, lavorazione, stoccaggio, trasporto, trasmissione, distribuzione e conversione. Per chiarire il concetto viene riportato lo schema nella Figura 1:

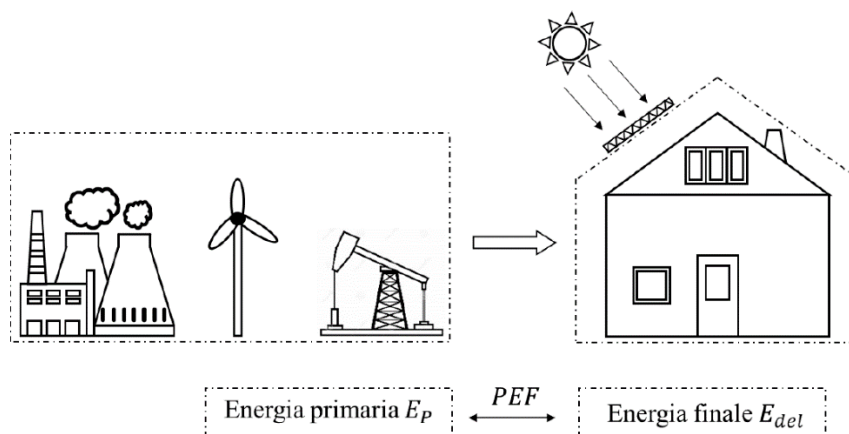


Figura 1: Schema esplicativo del fattore di energia primaria [8]

$$PEF = \frac{E_p}{E_{del}} \quad (1)$$

Dove:

- E_p rappresenta l'energia primaria
- E_{del} rappresenta l'energia finale consegnata (*delivered*)

Si deduce che, per arrivare all'identificazione dell'energia primaria di un sistema, che da questo punto in avanti verrà valutata per il vettore energetico elettricità, in quanto argomento dell'elaborato, si debba conoscere il valore del fattore di energia primaria, ipotizzando di essere a conoscenza della quantità di energia finale. Ed è proprio questo fattore che, secondo quanto prescritto dalla direttiva 2018/2002 del Parlamento europeo, dovrebbe essere assunto pari a 2,1 e che, secondo quanto descritto all'interno del Decreto Ministeriale Requisiti Minimi del 2015, è pari a 2,42. Questo ultimo valore, come tutti i fattori di energia primaria, viene scomposto in una frazione attribuita alla generazione dell'energia elettrica da fonti energetiche non rinnovabili $f_{p,nren}$ e ad una frazione invece prodotta da fonti rinnovabili $f_{p,ren}$. Questi due fattori assumono rispettivamente i valori di 1,95 e 0,47.

Come già detto in precedenza questi valori racchiudono diverse problematiche, sia per il fatto d'essere ormai desueti in quanto calcolati ormai più di un lustro fa, sia per il fatto di imporre una staticità nella valutazione dell'energia primaria utilizzata da un qualsiasi sistema.

Nonostante i fattori di energia primaria siano dettati dalle sopracitate normative, queste fanno sì che, attraverso ipotesi e assunzioni corrette, si possano andare a calcolare valori differenti di PEF e con passi temporali più brevi, in modo tale da poter studiare un sistema non più come statico ma con un approccio dinamico.

Per quanto appena detto, secondo quanto descritto dalla normativa UNI EN 17423, che illustra le diverse modalità di calcolo per i fattori di energia primaria e del coefficiente di emissione di CO_2 , si andrà a valutare la dinamicità del fattore di energia primaria e si dimostrerà come questo porti ad una valutazione maggiormente corretta dell'energia primaria che è realmente utilizzata.

2.1. Metodologie di calcolo per il fattore di energia primaria

Come premessa bisogna dire che per arrivare alla definizione del valore per il fattore di energia primaria totale, si deve procedere attraverso il calcolo di due indici differenti, cioè il fattore di energia primaria rinnovabile $f_{p,ren}$ e il fattore di energia primaria non rinnovabile $f_{p,nren}$. Questa suddivisione è necessaria perché il vettore energetico elettricità è prodotto attraverso diverse fonti energetiche, alcune delle quali rinnovabili e altre non rinnovabili. La somma di queste due grandezze renderà possibile ottenere il fattore di energia primaria totale, come evidenziato nell'equazione 2.

$$f_{p,tot} = f_{p,ren} + f_{p,nren} \quad (2)$$

Dopo aver chiarito questo concetto ci si può concentrare su come ricavare e calcolare questi due valori; tutto ciò grazie a quanto descritto dalla normativa UNI EN 17423 che, al suo interno, racchiude e spiega diverse metodologie che possono essere applicate per arrivare al risultato desiderato. Queste sono riassunte e spiegate anche all'interno di un report sulla domanda di energia primaria pubblicato nel 2014 da A. Stoffregen e O. Schuller [9].

Le metodologie che vengono proposte sono quattro ed alla base di ognuna sono presenti diverse ipotesi che quindi portano ad ottenere risultati differenti tra loro. Alcuni di questi metodi, attraverso l'applicazione di ipotesi più semplificative, sono di più facile applicazione rispetto ad altri che invece richiedono un'ampia conoscenza del sistema impiegato per la generazione dell'energia, attraverso la conoscenza di una mole maggiore di dati.

2.1.1. Metodo della conversione zero equivalente

È un metodo che raramente viene applicato per la valutazione del PEF, in quanto è utilizzabile solamente per le fonti di energia rinnovabili, associando un'energia primaria pari a 0 per queste fonti energetiche. Questo significa, ad esempio, che 1 MJ di energia elettrica prodotta da una qualsiasi fonte rinnovabile viene considerata come 0 MJ di energia primaria. Tutto ciò comporta che, nella generazione di qualsiasi vettore energetico per il consumo finale, l'incremento dell'energia primaria associata cresca solo per la frazione costituita da fonti energetiche non rinnovabili.

Riprendendo quanto descritto nell'Annex C (C.3.) della normativa UNI EN 17423, viene attribuito un PEF per le energie rinnovabili pari a 0, esplicitando che il rendimento di generazioni di queste fonti possa essere assunto come non rilevante. Questo porta alla conclusione che l'energia primaria derivata da fonti rinnovabili per la generazione di quel vettore energetico sia imposta forzatamente pari ad un valore nullo.

2.1.2. Metodo diretto equivalente

Questo metodo introduce un'equivalenza del 100% tra l'energia primaria e il vettore energetico, elettricità o calore, che deriva da fonti energetiche rinnovabili con processi che non prevedono la combustione (eolico, geotermico, solare...) e dal nucleare. Questo implica che ad 1 MJ di energia elettrica prodotta dalle fonti sopracitate corrisponda 1 MJ di energia primaria.

Tutto ciò significa che nei processi che sfruttano fonti energetiche non rinnovabili e in quelli rinnovabili, ma che sfruttano la combustione, come nel caso delle biomasse, non si possa applicare questa assunzione.

Quindi, riprendendo quanto enunciato nella normativa di riferimento, il PEF di queste fonti energetiche viene imposto pari a 1, al quale corrisponde un rendimento di generazione pari al 100%, che quindi esclude qualsiasi perdita nel processo di generazione dell'energia finale pronta al consumo.

Nella Tabella 2 viene visualizzata la distinzione effettuata dal report sopracitato [9] per quanto riguarda fonti rinnovabili e non rinnovabili e quindi a quali tra queste possa essere applicato questo metodo di valutazione.

Tabella 2: Fonti energetiche rinnovabili e non rinnovabili per il metodo diretto equivalente [9]

Fonti energetiche non rinnovabili		Fonti energetiche rinnovabili	
<i>Combustibili</i>	<i>Non combustibili</i>	<i>Combustibili</i>	<i>Non combustibili</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Carbone • Lignite • Petrolio • Gas naturale • Rifiuti (parte solida) 	<ul style="list-style-type: none"> • Nucleare 	<ul style="list-style-type: none"> • Biomasse (solide, liquide, gassose) • Rifiuti (parte biogenica) 	<ul style="list-style-type: none"> • Energia solare • Energia eolica • Energia geotermica • Energia idraulica • ...

2.1.3. Metodo del contenuto energetico fisico

Questo metodo è quello maggiormente utilizzato da Eurostat, importante ente a livello europeo che pubblica statistiche con lo scopo di effettuare confronti tra i diversi Paesi e le diverse regione dell'Europa, per determinare i valori da riportare all'interno dei loro report annuali. Il metodo si basa sulla definizione che l'energia primaria è la prima forma di energia in un processo di produzione che può portare ad ottenere diverse forme di energia. Per esempio, partendo dai prodotti di combustione si ha come prodotto principale il calore; di conseguenza l'energia primaria sarà valutata e calcolata proprio a partire dal calore.

Nella normativa UNI EN 17423, sempre nella sezione Annex C.3, si va a differenziare la valutazione in funzione della fonte, distinta tra fonti combustibili e tra fonti non combustibili.

Per le prime si valuta il fattore di energia primaria direttamente a partire dal potere calorifico di quel combustibile (Net Calorific Value). Quindi il PEF è ottenuto come rapporto tra il prodotto potere calorifico-quantità di materia e l'energia elettrica e/o termica che si ottiene in output al termine del processo di combustione, come riportato nell'equazione 3.

$$PEF = \frac{PC_f \cdot Input_{f,t}}{Output_t} \quad (3)$$

Dove:

- PC_f è il potere calorifico del combustibile
- $Input_{f,t}$ è la quantità di combustibile in input per il tempo fissato t
- $Output_t$ è l'energia in output per lo stesso tempo fissato t

Per i prodotti che invece non derivano da combustione si effettua una seconda distinzione. Si considera infatti il calore come forma di energia primaria per il geotermico, il solare termico, l'energia nucleare e il calore prelevato dall'ambiente, cioè tutte le forme di energia che inizialmente sono state tramutate in calore. Si considera invece l'elettricità come forma di energia primaria quella che deriva dal solare fotovoltaico, dall'eolico, dall'idroelettrico e dal moto ondoso. In entrambe le casistiche è necessario conoscere un rendimento di generazione per arrivare all'individuazione dei PEF.

Nel caso in cui però non siano reperibili dati sufficienti per applicare queste valutazioni, secondo Eurostat, si possono effettuare delle assunzioni semplificative per ottenere comunque risultati validi:

- L'elettricità proveniente dalla geotermia viene considerata con un'efficienza di conversione del 10% alla quale corrisponde un fattore di energia primaria di 10.
- L'energia termica proveniente dalla geotermia viene considerata con un'efficienza di conversione pari al 50% alla quale corrisponde un fattore di energia primaria di 2.
- L'elettricità proveniente dalle centrali nucleari viene considerata con un'efficienza di conversione del 33% alla quale corrisponde un fattore di energia primaria di 3.

2.1.4. Metodo dell'efficienza tecnica di conversione

Questo metodo considera l'energia primaria come il contenuto energetico intrinseco ad un vettore energetico prima che questo abbia subito qualsiasi processo di trasformazione. Quindi per ogni fonte energetica sarà calcolata con modalità differenti. Questi calcoli dipendono da molti fattori influenzanti e dalla disponibilità di dati per effettuare la valutazione. In funzione di ciò si possono ottenere delle efficienze di conversione dalle quali si ricavano i reciproci fattori di energia primaria.

Per arrivare a ciò è necessario rispettare le definizioni riportate nella Tabella 3.

Tabella 3: Definizioni di efficienza tecnica di conversione per diverse fonti energetiche [9]

Fonte energetica	Calcolo dell'efficienza di conversione
Idraulica	Rapporto tra elettricità netta generata e energia potenziale dell'acqua definita da altezza del battente e portata d'acqua
Eolica	Rapporto tra elettricità netta generata e energia cinetica che attraversa l'area del rotore
Solare fotovoltaica	Rapporto tra elettricità netta generata e energia solare che impatta sull'area del modulo fotovoltaico
Rifiuti	Calcolo basato su potere calorifico e quantità di combustibile (del tutto analogo al calcolo dei combustibili fossili)
Biomasse	Calcolo basato su potere calorifico e quantità di combustibile (del tutto analogo al calcolo dei combustibili fossili)
Nucleare	Uso di un valore di default pari al 33%

2.2. L'importanza del metodo da utilizzare

Partendo da quanto si evince dal paragrafo precedente, si riesce ad intuire come la scelta di una modalità di calcolo rispetto ad un'altra possa portare ad ottenere risultati sostanzialmente differenti relativi al consumo di energia primaria, rendendola una decisione importante. Tutto ciò è evidenziato dai valori della tabella sottostante (Tabella 4).

Tabella 4: Efficienza di conversione dei quattro metodi presentati dalla UNI EN-17423 [9]

Fonte energetica	Metodo zero equivalente	Metodo equivalente diretto	Metodo del contenuto energetico fisico	Metodo dell'efficienza tecnica di conversione
Idroelettrica	-	100%	100%	85%
Eolica	-	100%	100%	40%
Solare (fotovoltaico)	-	100%	100%	13.4%
Solare (termoelettrica)	-	100%	33%	12.4%
Geotermica	-	100%	10%	22.4%
Biomassa (solida)	-	28.6%		
Biogas e Bioliquidi	-	26.2%		
Rifiuti	-	17.7%		
Nucleare	-	100%	33%	33%

L'adozione di diverse tecniche di valutazione ha portato gli Stati europei a formulare ipotesi differenti alla base della valutazione dei PEF, come viene evidenziato nel report pubblicato dalla Commissione Europea nell'aprile del 2019 sugli edifici nZEB (Nearly Zero Energy Building) in cui vengono presentati i fattori di energia primaria di diversi vettori energetici per l'Italia e per altri cinque Paesi parte dell'Unione Europea [10]. Sfruttando quanto riportato da questo studio, possono essere evidenziate le differenti scelte che vengono portate avanti da questi Paesi.

L'Italia, ad esempio, per quanto riguarda l'elettricità prelevata dalla rete, effettua una distinzione tra l'energia che viene prodotta attraverso fonti rinnovabile e non rinnovabili, come proposto dalla normativa UNI EN 17423; al contrario la Francia considera questa quota come se derivasse interamente da fonti non rinnovabili, arrivando, di conseguenza, ad un consumo di energia primaria maggiore rispetto al nostro Paese. Altri Paesi invece, non forniscono dati sufficienti per differenziare il prelievo di elettricità rinnovabile da quella non rinnovabile.

Un'altra disparità tra questi Paesi si basa su come considerare la frazione di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili (fotovoltaico, eolico e idroelettrico) che viene autoconsumata. In Italia questa parte viene considerata, attraverso il metodo equivalente diretto, con un fattore di energia primaria pari a 1, essendo prodotta attraverso fonti rinnovabili. Questo fa sì che due edifici con lo stesso consumo finale di energia, di cui uno alimentato attraverso energia prodotta in loco e autoconsumata, abbia un consumo di energia primaria nettamente inferiore rispetto al secondo che preleva esclusivamente energia dalla rete, soggetta a tutte le varie perdite di trasmissione, trasporto, stoccaggio, distribuzione... Al contrario Paesi come Francia e Paesi Bassi contabilizzano l'energia elettrica autoconsumata prodotta da fonti rinnovabili esattamente come quella prelevata dalla rete, facendo sì che nel conteggio complessivo per arrivare al PEF totale non ci sia differenza tra i due edifici presentati nell'esempio soprastante. Questa modalità di valutazione si può dire che non tiene minimamente in considerazione l'evoluzione tecnologica del settore della produzione dell'energia elettrica, rendendo intrinsecamente statica la valutazione del PEF.

Quanto detto finora sono solo alcune delle differenze di valutazione che diversi Paesi hanno; si pensi ad esempio alla problematica legata alla scelta del fattore da attribuire all'energia che viene esportata. Infatti questa è fondamentale nella valutazione dell'energia primaria in quanto, secondo quanto descritto all'interno della normativa UNI TS 11300-5, questo valore è calcolato effettuando la differenza tra l'energia consegnata (*delivered*) e l'energia esportata, presentati

dalla Figura 2, pesando entrambi i valori con i corretti fattori, come evidenziato nell'equazione 4.

$$E_p = E_{del} \cdot f_{p,del} - E_{exp} \cdot f_{p,exp} \quad (4)$$

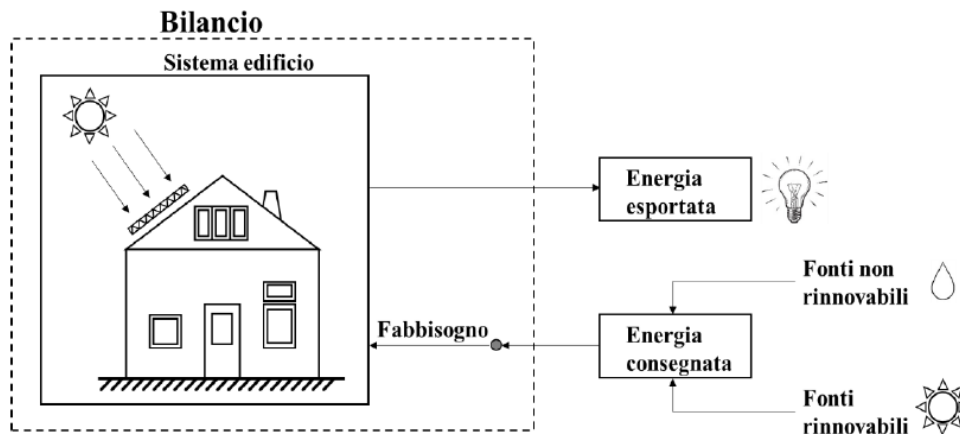


Figura 2: Schema dei flussi di energia in ingresso e uscita dal volume di controllo [8]

Quindi il valore dell'energia primaria è influenzato dal fattore relativo all'energia esportata. Tutto ciò viene considerato in maniera differente a seconda del Paese; ad esempio in Italia la frazione rinnovabile di energia immessa nella rete viene pesata con lo stesso fattore della produzione rinnovabile destinata all'autoconsumo, facendo sì che non ci sia un beneficio nell'esportare energia di questo tipo. Questo sta a significare che l'energia prodotta da fonti rinnovabili ed immessa in rete non andrà ad alleggerire il conteggio dell'energia primaria totale, valorizzando l'autoconsumo.

Altri Paesi invece, come i Paesi Bassi, usano un fattore di peso per l'energia esportata uguale a quello dell'energia prelevata dalla rete e quello dell'energia autoconsumata, meccanismo che non invoglia l'autoconsumo ma incoraggia l'esportazione dell'energia prodotta in loco. I Paesi Bassi sono l'unico Stato di quelli presenti nel report che adotta questa modalità di valutazione, in quanto viene presa molto in considerazione l'energia prodotta dai singoli edifici, andandone a

valorizzare la loro produzione di energia e la possibile esportazione. Infatti assegnando lo stesso fattore di energia primaria all'energia esportata e a quella prelevata dalla rete, nel momento in cui si preleva dalla rete lo stesso quantitativo di energia che precedentemente vi era stato immesso, non si incrementa il consumo di energia primaria.

Quindi le sostanziali differenze presentate tra i diversi Paesi dell'Unione Europea nella valutazione dei PEF possono essere riassunte in quattro punti:

- Scelta del metodo di conversione
- Distinzione della quota rinnovabile e non rinnovabile dell'elettricità prelevata dalla rete
- Valutazione dell'autoconsumo della quota rinnovabile
- Valutazione dell'esportazione della quota rinnovabile

Da queste poche differenze evidenziate si può quindi arrivare facilmente a capire come nella valutazione dei consumi di energia primaria di un edificio siano fondamentali determinate scelte, non solo per arrivare al consumo più veritiero possibile, ma anche per la classificazione dell'edificio nella corretta classe energetica, la possibilità di accedere a bonus economici e benefici fiscali. Quindi a seconda delle scelte e delle ipotesi che vengono effettuate nella fase preliminare si possono andare a valorizzare o a svalutare la produzione dell'energia attraverso un determinato meccanismo, l'esportazione, l'importazione o l'autoconsumo.

3. Problematiche legate ai PEF

Oltre alle problematiche che sorgono nel momento in cui devono essere fatte delle ipotesi e delle scelte per il metodo più corretto per andare a determinare i vari fattori necessari al calcolo dei PEF, ne sono presenti altre di natura temporale e spaziale.

Come detto nell'introduzione di questa tesi, l'Unione Europea nello scorso decennio ha proposto un valore del PEF a livello europeo pari a 2,1 per tutti i Paesi dell'unione. Successivamente molti Paesi, come l'Italia, nelle normative nazionali hanno effettuato valutazioni differenti che portano ad evidenziare come questo dato sia a volte limitante e altre volte agevolante. Nel caso dell'Italia nel DM Requisiti Minimi del 2015 viene riportato che il valore del PEF nazionale è pari a 2,42, scomponibile in due contributi differenti, il primo relativo alla quota non rinnovabile $f_{p,nren}$ di 1,95 e il secondo alla quota rinnovabile $f_{p,ren}$ di 0,47. Diversi studi effettuati negli anni seguenti, effettuando scelte più consone sul calcolo dei PEF, hanno evidenziato che il valore proposto dalla normativa del 2015 sia troppo elevato, mostrando di conseguenza un consumo di energia primaria superiore rispetto a quello che realmente sussiste. Tra questi studi sono presenti quelli svolti rispettivamente da Noussan [11], centrato sulla variabilità dei PEF in Italia, e da Marasso [12], sulla variabilità del rendimento elettrico italiano. Questi due studi evidenziano come i valori di questi due parametri varino nel tempo, in quanto la percentuale di energia derivata da fonti rinnovabili non sia costante nel corso degli anni, delle stagioni e della singola giornata, evidenziando la necessità di effettuare una valutazione dinamica e maggiormente accurata per arrivare a risultati variabili nel tempo e che copino la reale situazione del momento.

Nonostante questi due studi evidenzino ciò, senza effettuare calcoli dinamici, arrivano comunque alla conclusione che il valore racchiuso nel DM del 2015 sia eccessivamente elevato in quanto i PEF totali ottenuti sono rispettivamente compresi tra 1,92-2,00 e 1,92-1,95.

La stessa conclusione si può trarre analizzando un altro studio svolto da S. Galatà [8], effettuato con l'intento di verificare l'obsolescenza dei PEF prescritti sia a livello europeo sia a livello nazionale. Nell'elaborato sono determinati i valori dei PEF per diversi vettori energetici di più Paesi. Di interesse è andare ad evidenziare il risultato ottenuto per il PEF totale dell'elettricità in Italia, pari a 1,93. Questo valore va a rafforzare quanto evidenziato dai due studi precedenti, rendendo chiaro come i valori presenti nel DM Requisiti Minimi 2015 siano ormai obsoleti.

Altri Stati, adottando quanto prescritto a livello europeo o nazionale, sono ancor più svantaggiati rispetto all'Italia. Questi sono Paesi in cui la quota di rinnovabili è molto elevata e, di conseguenza, con una produzione complessiva che dovrebbe presentare meno perdite rispetto a Paesi che sono ancora maggiormente legati al sostentamento fossile. Un esempio di quanto detto si trova all'interno di un altro studio effettuato per diversi Paesi europei sulla variabilità dei PEF e sulla loro corretta valutazione pubblicato da Constantinos alla fine del 2022 [13].

All'interno di questo articolo, attraverso un approccio di calcolo semplificato, si arriva a valutare per molti Paesi europei l'andamento dei PEF dal 1990 (primi dati disponibili) al 2019. Un Paese che, se utilizzasse il PEF prescritto dalla normativa europea 2018/2002, sarebbe fortemente svantaggiato, è la Danimarca che nel 2019 produce energia elettrica per il 42% con centrali cogenerative e la restante quota attraverso fonti energetiche rinnovabili; questo porta ad avere un PEF totale per l'anno 2019 che si attesta intorno al 1,8-1,9, valore inferiore rispetto al 2,1 della direttiva europea.

Un altro Paese analizzato nell'articolo è la Grecia che, per normativa nazionale, utilizza un PEF pari a 2,9. Lo studio elaborato da Constantinos evidenzia come il valore corretto del PEF per questo Stato sia pari a 2,1, che porterebbe ad un 30% di risparmio sul consumo di energia primaria.

Ovviamente sono presenti alcuni Paesi che si troverebbero agevolati dall'utilizzo del parametro fisso di 2,1. L'esempio più lampante è rappresentato dalla Francia che, producendo la maggior parte della propria energia attraverso centrali nucleari, avendo un contributo di FER molto basso, dovrebbe avere ed utilizzare un valore

del PEF pari a circa 3,3, valore nettamente superiore rispetto a quello che prescritto dalla direttiva europea.

Questa considerazione presenta una problematica di carattere differente. Si pensi appunto ai Paesi che per politiche agevolanti, sia a livello europeo sia a livello nazionale, utilizzano valori dei PEF che sono inferiori rispetto a quelli reali. Queste scelte di carattere legislativo derivano dal fatto che molti Stati antepongono l'aspetto politico ed economico a quello energetico e sostenibile, cercando di favorire determinate tecnologie e risorse rispetto ad altre. Si pensi che, come già detto nell'introduzione, un edificio, a parità di tutte le variabili influenzanti legate al consumo di energia, possa evidenziare un utilizzo di energia primaria molto differente a seconda del fattore di energia primaria che viene adoperato. Se si ipotizza che due edifici identici e con le stesse condizioni al contorno si trovino in due Paesi differenti, uno dei quali ha un PEF reale superiore rispetto all'altro, si otterrebbe un consumo di energia primaria diverso tra i due edifici. Considerando però che il Paese con il PEF più elevato possa sfruttare quanto previsto da direttive europee o nazionali, abbassando il valore del suo PEF fino ad essere simile a quello del Paese più virtuoso, la differenza riscontrata relativa al consumo di energia primaria non sussisterebbe più.

Quanto detto serve sicuramente ad evidenziare due aspetti principali. Il primo, rifacendosi fortemente all'ultima problematica proposta, legato al fatto che quanto proposto a livello europeo con un PEF di 2,1 è ormai obsoleto, evidenziando la necessità di rivedere e calcolare distintamente questo valore per ogni Paese in quanto è presente troppa disparità tra una nazione e l'altra per quanto concerne il mix energetico. Il secondo è legato al fatto che all'interno dello stesso Paese i PEF hanno una variabilità eccessivamente alta a seconda della stagione e dell'ora della giornata; imponendo un calcolo dinamico orario, si ottengono valori che possono essere sfruttati per ottenere risultati relativi al consumo di energia primaria maggiormente accurati.

Questo ultimo aspetto sarà analizzato nel prossimo capitolo, attraverso le ipotesi e le scelte che possono essere effettuate seguendo quanto prescritto dalla norma UNI EN 17423, in modo da arrivare a capire i vantaggi derivanti dall' approccio dinamico nel momento in cui si andranno ad applicare i risultati ottenuti al caso studio di un edificio.

In ultima istanza, si presentano nella Tabella 5 i risultati ottenuti attraverso i modelli di regressione lineare costruiti su dati storici del report proposto da Constantinos [13], per avere il quadro generale dei valori assunti dai PEF in alcuni Stati europei e come questi si pongano rispetto al valore proposto dalla direttiva 2018/2002 di 2,1.

Tabella 5: Valori dei PEF ottenuti dai modelli del report sopracitato [13]

Stato	PEF su dati storici	Inferiori rispetto alla direttiva 2018/2002?
Austria	1.54	Sì
Belgio	2.58	No
Bulgaria	3.93	No
Croazia	1.40	Sì
Cipro	2.73	No
Rep. Ceca	3.00	No
Danimarca	1.25	Sì
Estonia	3.99	No
Finlandia	2.21	No
Francia	3.27	No
Germania	2.67	No
Grecia	2.54	No
Ungheria	2.52	No
Irlanda	1.90	Sì
Italia	1.90	Sì
Lituania	1.44	Sì
Lussemburgo	1.61	Sì
Malta	2.00	Sì
Polonia	2.46	No
Portogallo	1.94	Sì
Romania	2.98	No
Slovacchia	2.44	No
Slovenia	2.54	No
Spagna	2.26	No
Svezia	2.03	Sì
Paesi Bassi	1.95	Sì

4. Normativa UNI EN-17423

Questa normativa, esponendo le modalità di calcolo implementabili per il calcolo dei PEF, già presentate in precedenza, e le scelte relative a diversi importanti aspetti, è alla base di quanto verrà effettuato nella sezione successiva di questa tesi. Quindi la normativa “Prestazione energetica degli edifici-Determinazione e rendicontazione dei fattori di energia primaria (PEF) e del coefficiente di emissione di CO_2 -Principi generali”, viene approvata a livello europeo il 4 ottobre del 2020 ed entra ufficialmente in vigore il mese successivo, nel novembre 2020, imponendosi come chiarimento ed approfondimento di quanto già presentato nella normativa UNI EN ISO 52000-1.

La sezione della normativa di maggiore interesse per l’analisi che deve essere effettuata è quella relativa alle formule e alle valutazioni che devono essere compiute per arrivare alla definizione dei PEF, in modo tale che questi risultati possano essere comparabili tra i vari Paesi europei, in quanto redatti seguendo la stessa linea guida.

La normativa dopo aver presentato il capitolo in cui sono riassunte tutte le possibili definizioni necessarie per la comprensione di quanto riportato successivamente, inizia a proporre diverse valutazioni che possono essere adottate per il calcolo dei fattori di energia primaria.

4.1. PEF per il vettore energetico “*delivered*”

Il fattore di energia primaria per un determinato vettore energetico consegnato (*delivered*) si ottiene dal rapporto tra la quantità di energia primaria che è necessaria per produrre l’energia da consegnare e l’energia *delivered* stessa, come riportato nell’equazione 5.

Questo calcolo deve essere scomposto in uno che considera solo la frazione rinnovabile e l’altro che prende in considerazione solo la frazione non rinnovabile. La loro somma restituirà il fattore di energia primaria totale.

$$f_{p,del,cr} = \frac{\sum_j E_{p,del,j}}{E_{del,cr}} \quad (5)$$

Nella formula soprastante *cr* indica il vettore energetico preso in considerazione (*carrier*), come ad esempio l’elettricità, e *j* tiene conto che per produrre quel determinato vettore energetico *cr* si possano utilizzare diverse fonti energetiche e che quindi l’energia primaria complessiva sia ottenuta dalla somma di tutti le fonti contribuenti.

Questo calcolo, come già detto, può essere separato per la quota rinnovabile e non rinnovabile, oppure andando a considerare tutte le fonti energetiche allo stesso tempo in modo tale da ottenere il fattore di energia primaria totale, come evidenziato nella UNI EN ISO 52000-1, ripreso nella UNI EN 17423 e riportato in Figura 3.

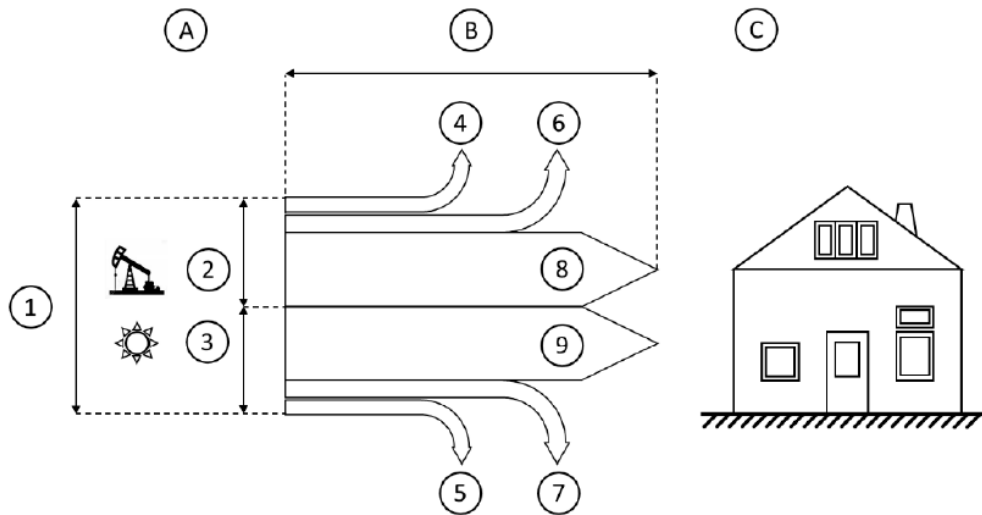


Figura 3: Fattori di energia primaria per due sorgenti, una rinnovabile e l'altra non rinnovabile [8]

Dove:

- A Fonte energetica
- B Catena a monte dell'energy supply
- C Interno al confine di valutazione
- 1 Energia primaria totale
- 2 Energia primaria non rinnovabile
- 3 Energia primaria rinnovabile
- 4 Perdite di energia non rinnovabile
- 5 Perdite di energia rinnovabile
- 6 Energia non rinnovabile per estrarre, raffinare, convertire e trasportare
- 7 Energia rinnovabile per estrarre, raffinare, convertire e trasportare
- 8 Energia non rinnovabile consegnata
- 9 Energia rinnovabile consegnata

Quindi la normativa definisce i tre fattori di seguito riportati:

$$f_{ptot} = \frac{1}{8+9} \quad f_{pnren} = \frac{2}{8+9} \quad f_{pren} = \frac{3}{8+9}$$

4.2. PEF per il vettore energetico esportato

Successivamente la normativa propone due differenti interpretazioni che possono essere seguite per la valutazione del fattore di energia primaria del vettore energetico generico cr che viene esportato.

- Nella prima casistica si va ad effettuare un calcolo del tutto analogo a quello per il fattore di energia primaria delivered, effettuando un rapporto tra energia primaria e energia prodotta che poi verrà esportata.
- Nel secondo caso, seguendo quanto proposto dalla normativa UNI EN ISO 52000-1, si considera la frazione di energia da esportare come una risorsa evitata alla rete esterna; quindi il fattore di energia primaria in questo caso assume lo stesso valore di quello dell'energia che va a sostituire. Questa modalità di valutazione può essere considerata solamente nel caso in cui il confine del sistema da analizzare sia a livello locale e non a livello Paese.

Per questa ultima considerazione vengono anche introdotte delucidazioni sui diversi perimetri che possono essere utilizzati durante la valutazione dei PEF, come evidenziato nella Figura 4.

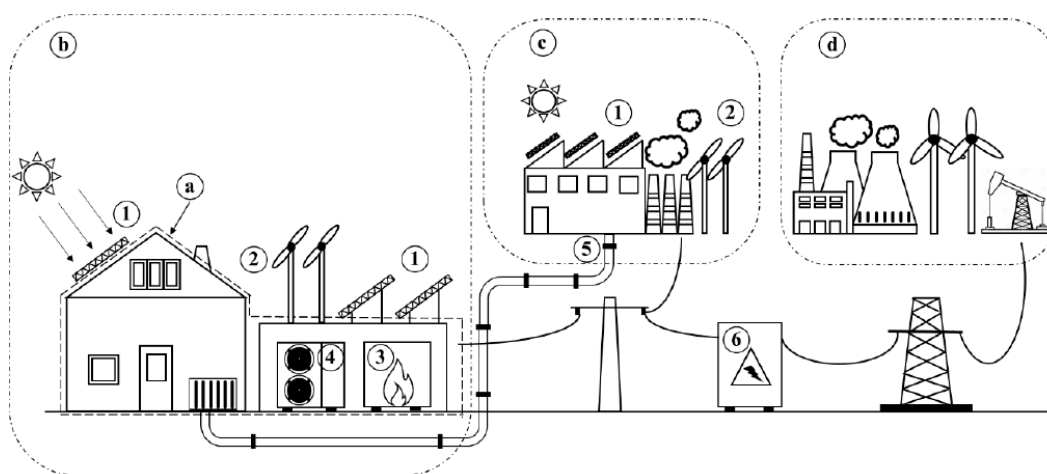


Figura 4: Schema esplicativo per i diversi perimetri geografici della norma UNI EN ISO 52000-1 [8]

Le possibili scelte sono tre:

- In loco (b): si riferisce al limite che va a racchiudere la produzione all'interno di un edificio, che questa possa essere rinnovabile o meno.
- Nelle vicinanze (c): si riferisce al limite entro il quale viene prodotta energia localmente, nuovamente che essa sia rinnovabile o non rinnovabile.
- Distante (d): normalmente si riferisce al massimo limite che può essere imposto all'interno di un Paese, cioè i confini geografici che delimitano il Paese stesso.

4.3. Ipotesi per il calcolo dei PEF

Successivamente, nella normativa, si apre un intero capitolo dedicato alle possibili scelte che possono essere effettuate per il calcolo dei PEF; queste sono di diversa natura.

4.3.1. Perimetro geografico

Il perimetro geografico rappresenta i limiti entro i quali si possono applicare i PEF ed il confine entro il quale si decide di utilizzare determinati set di dati rispetto ad altri. Come scritto nella normativa, ogni vettore energetico può avere dei perimetri geografici differenti. Le opzioni che possono ritenersi percorribili sono:

- Perimetro a livello europeo
- Perimetro a livello nazionale, cioè corrispondente ai confini geografici di quel determinato Paese
- Perimetro a livello regionale, quindi ad un livello sub-nazionale
- Perimetro a livello locale

Dopo di che, a seconda del caso preso in considerazione, la normativa concede anche di imporre altri perimetri geografici adattati alla valutazione da effettuare.

4.3.2. Risoluzione temporale

Come già detto più volte, questo è uno degli aspetti di maggior importanza all'interno della valutazione dei PEF. La risoluzione temporale con cui possono essere calcolati i PEF è molto variabile, infatti si può valutare con:

- Risoluzione annuale, quella utilizzata nella maggior parte degli studi e ricerche
- Risoluzione mensile
- Risoluzione oraria, una valutazione che consente di spostare i PEF da statici a dinamici, essenziale per sfruttare al meglio le informazioni che ne derivano

L'ultima opzione è quella su cui si concentrerà lo studio riportato nella tesi, in modo da poter sfruttare questo dato con alta risoluzione per le applicazioni proposte.

4.3.3. Fonte dei dati utilizzati

Per ognuno dei vettori energetici di cui si vuole effettuare il calcolo del PEF, bisogna fare sì che la fonte dei dati rientri in una delle seguenti opzioni:

- Dati storici reali, cioè utilizzando dati reali disponibili nelle banche dati
- Dati storici simulati, cioè quando determinati dati del passato non sono disponibili ma sono ottenuti attraverso simulazioni attendibili
- Dati futuri simulati, cioè un'analisi basata su dati simulati per il futuro

4.3.4. Scelta del potere calorifico

I risultati del PEF di un determinato vettore energetico sono influenzati dalla scelta della tipologia di potere calorifico dei combustibili utilizzati. La scelta deve essere coerente e uguale per tutti i vettori energetici studiati all'interno dello stesso sistema, in modo da effettuare uno studio con la modalità corretta. La scelta deve ricadere o sul potere calorifico inferiore (PCI) o sul potere calorifico superiore (PCS).

4.3.5. Fonti energetiche da considerare

Secondo quanto prescritto dalla normativa UNI EN ISO 52000-1 l'energia che viene prodotta in loco può essere inclusa nel conteggio dell'energia autoconsumata. In questo caso questa frazione di energia non deve essere presa in considerazione all'interno del calcolo del fattore di energia primaria.

Quindi all'interno della normativa vengono concesse due principali opzioni che possono essere seguite:

- Includere nella valutazione del PEF tutti i vettori energetici presenti all'interno del perimetro geografico stabilito in precedenza
- Escludere l'energia autoconsumata prodotta in loco dal calcolo del PEF
-

4.3.6. Convenzioni relative alla conversione dell'energia

La normativa specifica che, se disponibili, è meglio definire tutte le efficienze dei vari processi di conversione per arrivare ad ottenere un determinato vettore energetico. In caso contrario, in mancanza di dati, vengono proposti quattro metodi semplificati alternativi, già presentati nel paragrafo 2.1. Tra questi vengono enunciati il metodo zero equivalente, quello dell'equivalenza diretta, quello dell'efficienza tecnica di conversione e quello del contenuto fisico energetico.

4.3.7. Convenzioni per i PEF relativi all'energia esportata

Riprendendo quanto già detto nel paragrafo in cui si chiariva come calcolare e considerare il fattore di energia primaria per l'energia destinata all'export, sono presenti due opzioni che possono essere seguite:

- Considerare il fattore di energia primaria dell'energia esportata esattamente come quello del fattore di produzione all'interno del perimetro geografico individuato
- Considerare il fattore di energia primaria dell'energia esportata uguale al fattore che evita l'import dalla rete esterna

4.4. Metodologie di calcolo per la valutazione dei PEF

Dopo aver effettuato tutte le scelte dei paragrafi precedenti, quindi avendo ottenuto dati utile alla valutazione, impostato il perimetro geografico su cui effettuare lo studio ed aver specificato le varie assunzioni fatte, la norma procede ad elencare tutte le possibili modalità di valutazione che possono essere adottate.

4.4.1. Scambi di energia con altri confini geografici

Con scambi di energia si intende una quantità di energia che è importata e/o esportata rispetto a quello che è il perimetro geografico stabilito per la valutazione.

La normativa presenta due diverse opzioni che possono essere seguite:

- La prima è che, se valutati come non rilevanti, si possono ignorare gli scambi di energia rispetto al perimetro geografico, considerando quindi solo l'energia che viene prodotta all'interno del limite imposto per il calcolo dei PEF.
- La seconda prevede invece di tenere conto di questi scambi in modo tale da effettuare una valutazione più corretta.

Nel caso in cui si scelga di intraprendere questa seconda strada, alla quantità di energia che viene esportata si deve attribuire il PEF relativo alla produzione di energia all'interno del perimetro geografico, in quanto è il luogo in cui essa viene prodotta prima di essere esportata oltre il perimetro geografico.

Invece, il PEF per la quantità di energia che viene importata deve essere uguale a quello del Paese dal quale proviene quella determinata quantità di energia o, nel caso in cui il perimetro sia di grosse dimensioni, come nel caso in cui racchiuda un intero Paese, si può utilizzare il PEF medio europeo, anche se è preferibile seguire il primo approccio.

Seguendo questa strada, per arrivare a definire il fattore di energia primaria di un generico vettore energetico cr , bisognerà applicare l'equazione 6, che tiene in considerazione quanto enunciato fino ad ora:

$$f_{p,del,cr} = \frac{\sum_j(E_{in,cr,j})f_{p,in,cr,j} - \sum_j(E_{exp,cr,j})f_{p,exp,cr,j} + \sum_j(E_{pr,cr,j})f_{p,pr,cr,j}}{E_{del,cr}} \quad (6)$$

Dove:

$E_{in,cr,j}$ indica l'energia che viene importata da un altro perimetro geografico

$E_{exp,cr,j}$ indica l'energia che viene esportata verso un altro perimetro geografico

$E_{pr,cr,j}$ indica l'energia che viene prodotta all'interno del perimetro geografico

$E_{del,cr}$ è l'energia *delivered*, destinata al consumo finale

Le restanti parti dell'equazione sono i vari fattori che vengono scelti con la logica descritta in questo paragrafo.

4.4.2. Approccio di calcolo per un sistema con fonti multiple

Nel caso in cui siano presenti più fonti energetiche differenti per il soddisfacimento della richiesta di energia finale di un determinato vettore energetico, esistono due diverse opzioni che possono essere perseguite per arrivare al risultato finale:

- Approccio del calcolo medio: Il PEF del generico vettore energetico cr viene calcolato andando a pesare il valore dei vari PEF delle fonti energetiche in input al sistema, come riportato dall'equazione 7.

$$f_{p,del,cr} = \frac{\sum_j E_{in,cr,j} * f_{p,in,cr,j}}{E_{del,cr}} \quad (7)$$

Quindi il generico vettore energetico cr sarà generato da diverse fonti energetiche, ognuna delle quali avrà un contributo sul valore finale di $f_{p,del,cr}$.

- Si possono andare ad individuare diversi scenari possibili e per ognuno dei quali si va a valutare come la domanda di energia possa crescere o diminuire, attraverso l'introduzione di un coefficiente marginale.

4.4.3. Allocazione di un sistema energetico con più output

Si tratta del caso in cui all'interno del perimetro geografico considerato siano presenti degli impianti di cogenerazione o trigenerazione che quindi producono contemporaneamente più di un vettore energetico in output. Ci si potrebbe anche trovare nella situazione in cui non tutti i vettori energetici generati da questi sistemi vengano utilizzati all'interno del perimetro geografico di competenza, ma che alcuni di questi possano essere esportati. In questo caso per arrivare a definire il PEF relativo all'energia in input al sistema bisognerà andare a considerare i diversi vettori energetici generati e pesarli attraverso il loro corrispondente fattore di energia primaria che, al suo interno, contiene già tutte le perdite da dover tenere in considerazione.

4.4.4. Metodo life cycle

L'ultima opzione è quella di utilizzare un approccio di Life Cycle Assessment (LCA) da applicare all'intero processo di produzione dell'energia finale partendo dall'energia primaria. Questo metodo ha l'intento di contabilizzare tutti i consumi di energia ausiliari e le perdite indotte durante le fasi di trasformazione dell'energia. Questo, sicuramente, tra i metodi proposti, è il più complesso in quanto prevede una conoscenza approfondita del sistema in analisi; risulta quindi più facilmente applicabile nel caso il perimetro geografico in studio sia di dimensioni ridotte e non ad uno studio su scala nazionale.

5. Calcolo del PEF dinamico per il vettore elettricità

In questo capitolo si andranno in primo luogo a riportare tutte le scelte che sono state effettuate tra quelle disponibili nella normativa UNI EN 17423 e descritte nel capitolo 4, per poter arrivare al calcolo del PEF dinamico del vettore energetico elettricità in Italia nel 2022. Dopo di che sfruttando i dati statistici orari di Terna, società operatrice della rete di trasmissione italiana dell'elettricità ad alta e altissima tensione, sull'energia generata per fonte energetica, su import ed export con i vari Paesi europei e sui carichi finali, si proseguirà con la valutazione del fattore di energia primaria dinamico orario per l'intero anno 2022. Tutto ciò facendo ipotesi ed approssimazioni in modo tale da ottenere valori coerenti.

5.1. Metodologie per il calcolo del PEF

Come previsto dalla normativa UNI EN 17423 si è deciso di compilare le tabelle presenti nell'Annex A della normativa stessa in cui si sono effettuate le scelte relative alle varie assunzioni e ai metodi di calcolo che verranno applicati per il calcolo del PEF relativo all'elettricità, riportate nella Tabella 6.

All'interno di queste tabelle, per ogni punto riportato nella prima colonna, che rappresentano le categorie su cui devono essere applicate delle scelte, sono presenti più opzioni, già descritte nel capitolo 4. Per ognuno dei punti, è quindi indicata la relativa scelta, evidenziata in grigio. L'insieme di queste scelte va a rappresentare le ipotesi che saranno utilizzate per andare ad effettuare la determinazione del PEF dinamico.

Tabella 6: Annex A della normativa UNI EN-17423: scelte per il calcolo del PEF dell'energia elettrica

Scelte relative al perimetro della valutazione					
Perimetro geografico	Europeo	Nazionale	Regionale	Locale	Altro

Scelte relative alle conversioni di calcolo				
Risoluzione temporale	Orari	Mensili	Annuali	Altro
Origine dei dati	Dati storici	Simulazioni storiche	Dati previsionali	Altro
Potere calorifico	Potere calorifico inferiore		Potere calorifico superiore	

Scelte relative ai dati					
Fonti energetiche considerate	Include tutte le fonti energetiche	Esclude l'energia autoconsumata generata in loco	Esclude quote energetiche coperte da contratti dedicati		Altro
Convenzioni di conversione fonti energetiche fossili	Zero equivalente	Equivalente diretto	Efficienza tecnica	Contenuto fisico	Altro
Convenzioni di conversione fonti energetiche rinnovabili	Zero equivalente	Equivalente diretto	Efficienza tecnica	Contenuto fisico	Altro
Convenzioni PEF per energia esportata	Risorse utilizzate per produrre il vettore energetico		Risorse evitate alla rete esterna		Altro

Scelte relative alle modalità di valutazione					
Scambi energetici	Ignora scambi	Considera scambi netti	Considera scambi con associati i differenti PEF		Altro
Generazione multi-input	Approccio calcolo medio		Altro (calcolo marginale)		
Sistema energetico multi-output	Metodo potenza persa	Metodo di Carnot	Metodo della produzione alternativa	Metodo della potenza persa di riferimento	Altro
LCA	No LCA		LCA completa		Altro

In prima battuta è stato quindi scelto il perimetro geografico, che è stato imposto a livello nazionale, in modo da ottenere un valore del PEF per tutta l'Italia. Questa scelta è stata effettuata principalmente per la disponibilità di dati su scala nazionale e non presente con distinzioni regionali o locali.

Dopo di che, come riportato nella tabella, si è proseguito imponendo la risoluzione temporale che, per cercare di ovviare alla staticità del calcolo ed alle altre problematiche già presentate, è stata impostata come oraria, in modo da avere la massima risoluzione possibile.

Per quanto riguarda la fonte dei dati, come già detto nei capitoli precedenti, sono stati utilizzati i dati statistici raccolti da Terna che vengono adoperati nello stilare i report annuali. In particolar modo, sono stati quindi utilizzati un set di dati storici che comprendono valori orari per la generazione di energia elettrica per tutte le diverse fonti energetiche, i dati orari relativi agli scambi al di fuori del perimetro nazionale sia in import sia in export e i valori orari dei carichi, cioè la quantità di energia che viene richiesta per l'utilizzo finale. Tutti questi dati sono relativi all'ultimo anno disponibile, cioè il 2022.

Per completare la seconda sezione si è deciso di riportare l'utilizzo del potere calorifico inferiore, cioè senza considerare la frazione di calore che deriva dalla condensazione dell'acqua presente durante la combustione. Questa scelta è fatta per concordare con il metodo di calcolo utilizzato per la determinazione del PEF che sarà utilizzato nella sezione dei calcoli e non determinato direttamente in questo elaborato.

Dopo di che, dove si richiede di specificare le scelte relative ai dati di input utilizzati, per le fonti energetiche considerate sono state incluse tutte le fonti, andando quindi a tenere conto anche della quantità di energia autoconsumata, in quanto nei dati di Terna è presente anche una voce specifica che indica questa quantità.

Per quanto concerne invece la scelta di conversione delle fonti fossili e il nucleare si è scelto di utilizzare il metodo del contenuto fisico, considerando il rendimento di generazione delle fonti energetiche non rinnovabili.

Per la conversione delle fonti energetiche rinnovabili si è optato per il metodo equivalente diretto, assegnando a queste fonti un PEF di 1, che corrisponde ad un rendimento di generazione pari al 100%, in quanto queste forme di energia non producano perdite. Infine, per il PEF relativo all'energia che viene esportata si è utilizzato il PEF di produzione del vettore energetico che viene esportato. In questo modo, essendo il perimetro geografico a livello nazionale, si utilizza il PEF della produzione nazionale.

Per quanto riguarda l'ultima sezione, che riguarda le scelte relative alla modalità di valutazione, si è scelto di considerare gli scambi con altri perimetri geografici con PEF differenti, differenziando import ed export. Dopo di che, essendo il sistema considerato un sistema multi input, cioè che sfrutta più fonti energetiche per produrre il vettore energetico in output, si è adottato il metodo più utilizzato cioè quello del calcolo medio, in cui vengono pesati i vari fattori di energia primaria di ogni fonte energetica per arrivare al PEF totale.

Come ultimo aspetto bisogna dire che, essendo il calcolo del PEF relativo ad un unico vettore energetico (elettricità), non sussiste la necessità di andare ad individuare una modalità di valutazione per i sistemi multi output. Questo perché nel valore del PEF relativo alla produzione interna di energia elettrica che verrà utilizzato nella sezione successiva, i sistemi di cogenerazione sono già inclusi nel valor medio di efficienza di generazione italiana, necessario per la determinazione del PEF appena citato. Inoltre, si specifica che non viene effettuata una valutazione di LCA in quanto la mole di dati necessari per effettuare questa valutazione sono impossibili da ricavare su una scala temporale così bassa.

5.2. Calcolo del PEF

Dopo aver elencato le scelte effettuate e aver compilato le tabelle dell'Annex A della normativa UNI EN 17423, si prosegue eseguendo i calcoli per arrivare al fattore di energia primaria totale, andando a calcolare in modo distinto i due contributi dati dalle fonti energetiche rinnovabili e non rinnovabili. Quindi si otterranno i due PEF con le seguenti formulazioni 8 e 9:

$$f_{p,nren,el} = \frac{\sum_j(E_{in,el,j})f_{p,nren,in,el,j} - \sum_j(E_{exp,el,j})f_{p,nren,exp,el,j} + \sum_j(E_{pr,el,j})f_{p,nren,pr,el,j}}{E_{del,el}} \quad (8)$$

$$f_{p,ren,el} = \frac{\sum_j(E_{in,el,j})f_{p,ren,in,el,j} - \sum_j(E_{exp,el,j})f_{p,ren,exp,el,j} + \sum_j(E_{pr,el,j})f_{p,ren,pr,el,j}}{E_{del,el}} \quad (9)$$

Per quanto riguarda i vari fattori da dover utilizzare nelle formulazioni sono state effettuate determinate assunzioni in modo da poter svolgere i relativi calcoli.

In primo luogo, per quanto concerne i fattori riguardanti l'energia che viene importata all'interno del perimetro geografico, provenendo da diversi Stati europei, si è deciso di sfruttare i valori presenti all'interno del report stilato e pubblicato da Constantinos [13]. In questo modo si è effettuata una valutazione che assegnava ad ogni Paese che fornisce energia all'Italia il valore corrispondente del PEF. Le uniche due eccezioni sono state fatte per il PEF della Svizzera, ricavato da un altro elaborato [14], e per quello del Montenegro, assunto dalla media europea, in quanto Paese non dettagliatamente analizzato nel report. Nel caso del Montenegro è quindi stato assunto il valore pari alla media europea calcolata con il modello di regressione, presente nell'articolo di Constantinos.

Bisogna aggiungere che, non essendo possibile scindere la quota rinnovabile da quella non rinnovabile, si è deciso di effettuare l'ipotesi che l'energia importata dall'estero sia unicamente di origine non rinnovabile.

Dopo di che si fa la stessa ipotesi per quanto riguarda l'export, non essendo possibile dividere la quota rinnovabile da quella non rinnovabile dai dati resi disponibile da Terna. Quindi è stato imposto il fattore di energia primaria relativo all'esportazione per le fonti rinnovabili pari a 0, non dando peso a questa parte dell'equazione.

$$\sum_j (E_{exp,el,j}) f_{p,ren,exp,el,j} = 0$$

Questa assunzione si può appunto ritenere valida solo per il fatto che la percentuale di energia esportata di origine rinnovabile è molto bassa.

Per quanto riguarda invece il PEF relativo all'esportazione di natura non rinnovabile, questo avrà un valore pari a quello della produzione di elettricità a livello nazionale.

$$f_{p,nren,exp,el} = f_{p,nren,pr,el}$$

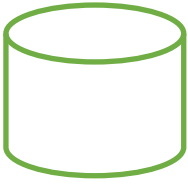
Dopo di che il fattore di energia primaria relativo alla produzione da fonti rinnovabili $f_{p,ren,pr,el}$, utilizzando il metodo equivalente diretto, viene posto pari a 1 ed è utilizzato per tutte le fonti rinnovabili, cioè solare, eolico, geotermico, idroelettrico e la frazione di energia autoconsumata.

Per quanto riguarda invece il PEF relativo alla produzione non rinnovabile $f_{p,nren,pr,el}$ si assume come valore di riferimento, che sarà imposto per quanto ipotizzato anche al fattore per l'esportazione non rinnovabile, quello ricavato dalla direttiva europea che va ad aggiornare nel 2018 il valore del PEF totale relativo all'elettricità, pari a 2,1, in quanto, come già detto, l'analisi e la determinazione del PEF dinamico è effettuata sul 2022, anno in cui vigeva ancora questa direttiva [6].

Con tutti questi dati a disposizione è stato possibile ottenere i valori orari dei PEF relativi a fonti rinnovabili e non durante il corso del 2022.

Nella Figura 5, per chiarimento, è riportato un breve schema riassuntivo relativo al calcolo dei due fattori di energia primaria, con la relativa legenda.

Legenda dello schema e riferimenti al testo della tesi



Con questo simbolo sono indicati i dati relativi a tutte le informazioni necessarie per quanto riguarda l'energia; quindi quella riguardante la produzione rinnovabile e non rinnovabile, l'import dai Paesi esteri, l'export verso l'estero e i carichi relativi all'energia fornita ai consumatori finali. Tutti i dati sono presi con risoluzione oraria e relativi all'anno 2022.



Con questo simbolo sono indicati i dati in input relativi ai vari PEF da utilizzare per ricavare quello totale per il vettore energetico elettricità. Partendo da sinistra sono importati il PEF per la produzione non rinnovabile dalla direttiva 2018/2002, i PEF relativi all'import calcolati secondo quanto riportato nel report di Constantinos [11] (presentato nel capitolo 3 e 5.2), i PEF riguardanti l'export verso i Paesi esteri (paragrafi 5.1 e 5.2), il PEF relativo alla produzione rinnovabile con il metodo diretto equivalente (paragrafi 2.1.2 e 5.2)



Con questo simbolo sono indicati i prodotti tra l'energia e i relativi PEF, in modo tale da ottenere i vari contributi che andranno a strutturare l'equazione n°8 e n°9



Con questo simbolo sono riportate le equazioni presenti nella norma UNI EN 17423 per il calcolo dei PEF non rinnovabile e rinnovabile che corrispondono alle equazioni n°8 e n°9 del paragrafo 5.2



Con questo simbolo è rappresentato l'output che si vuole ottenere come risultato finale, cioè il PEF finale, calcolato come somma dei contributi rinnovabile e non rinnovabile come definito dall'equazione n°2 (paragrafo 2.1)

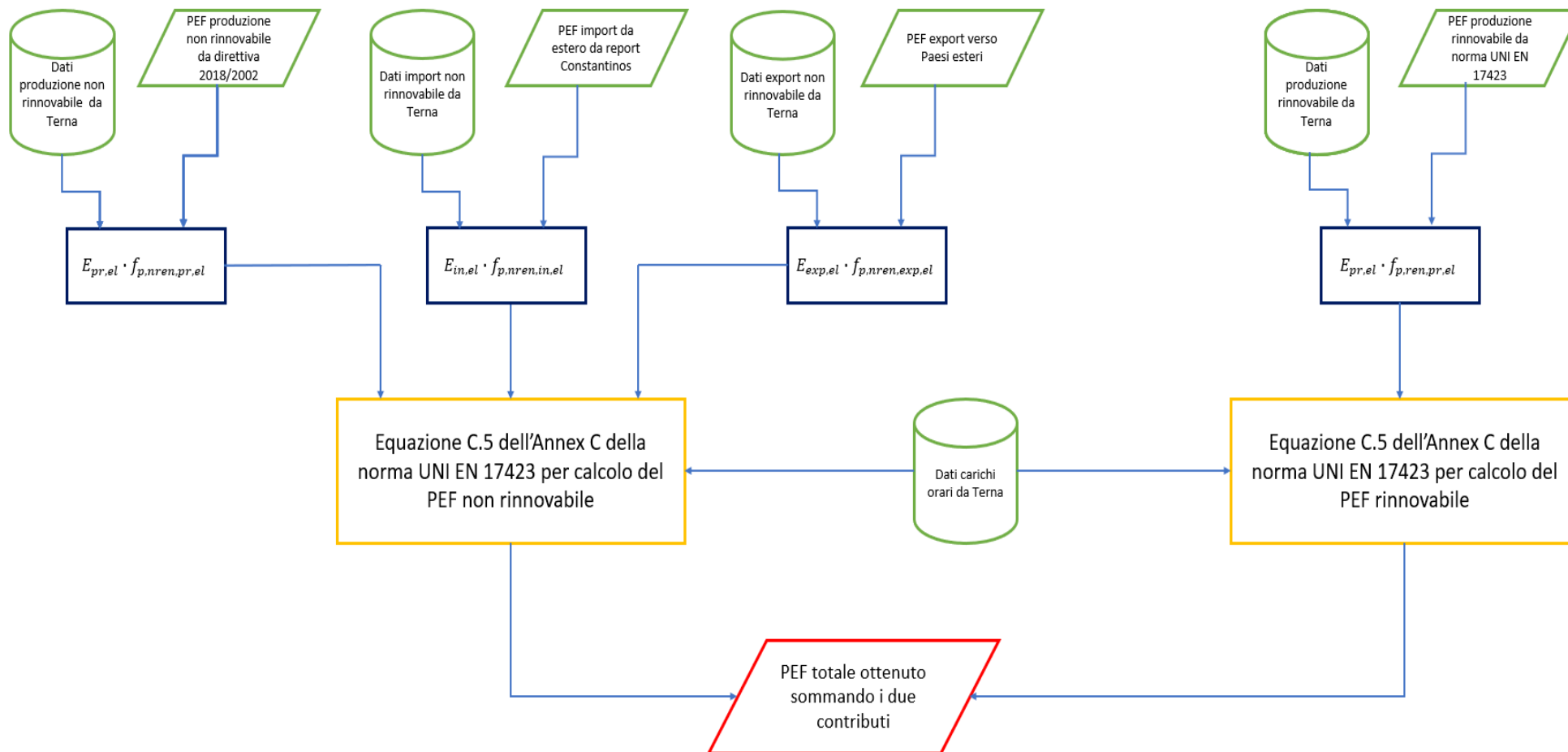


Figura 5: Schema riassuntivo per la procedura di calcolo per il PEF totale orario

5.3. Analisi sui dati relativi alla produzione di energia nazionale

Prima di entrare nel vivo dell'analisi dei risultati ottenuti, è di interesse andare a fare qualche considerazione sui dati relativi alla produzione nazionale di energia resi disponibili da Terna, andando a studiare i valori orari per quanto riguarda la produzione sia rinnovabile che non rinnovabile.

In prima istanza si cerca di comprendere come nel corso delle varie ore dell'anno sia ripartita la produzione di energia elettrica tra le fonti rinnovabili e non rinnovabili. Infatti i dati raccolti da Terna differenziano la produzione termica (non rinnovabile) da quella rinnovabile, suddividendo quest'ultima per le varie fonti impiegate (eolica, idrica, geotermica, autoconsumata, fotovoltaica). Da qui si sono ricavati i seguenti valori riportati nelle Figure 6 e 7.

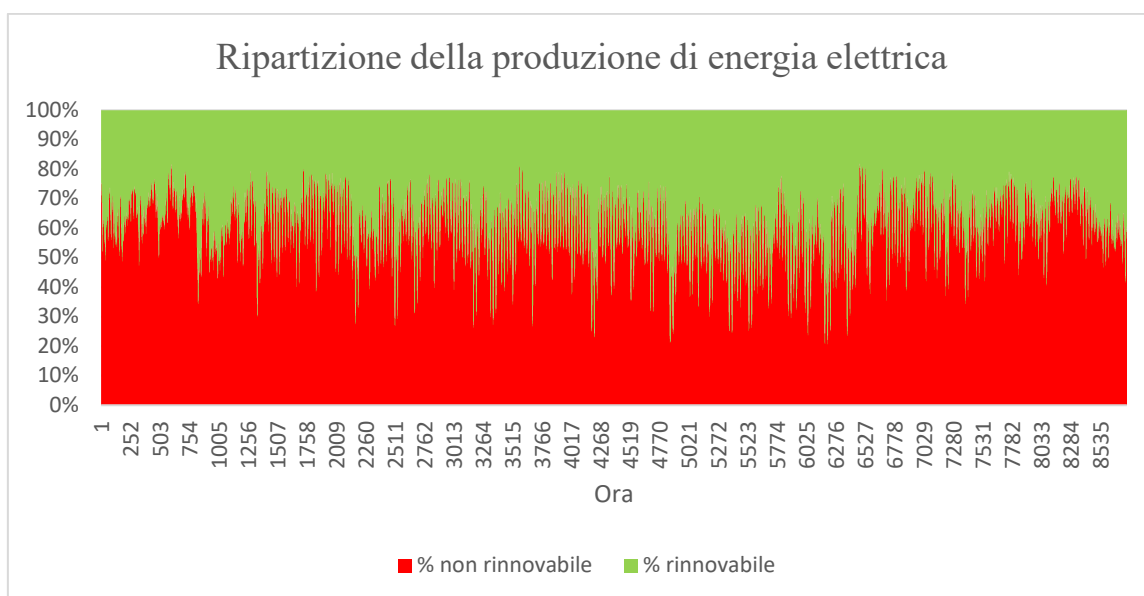


Figura 6: Ripartizione della produzione nazionale di energia elettrica

Come si può osservare in Figura 6, la ripartizione tra rinnovabile e non rinnovabile non è costante nel corso dell'anno ma varia in funzione del carico che è necessario soddisfare.

La variazione della richiesta di energia elettrica porta alla variazione della quantità di energia da generare e, di conseguenza, la ripartizione tra fonti rinnovabili e non rinnovabile. Tuttavia si può comunque andare ad individuare un valore medio per la producibilità da fonti rinnovabili del 38,9% con il conseguente 61,1% attribuito alle fonti non rinnovabili.

In aggiunta si può dire che, pur essendoci una ampia variabilità giornaliera e stagionale, una notevole quota di energia rinnovabile è sempre presente, anche nelle ore notturne e durante la stagione invernale. Questo è dato dal mix energetico delle fonti rinnovabili, in cui tutte, nonostante contribuiscano con percentuali differenti, risultano importanti per il raggiungimento della quota di energia necessaria.

Per dimostrare questo concetto si procede l'analisi effettuando una distinzione tra le varie fonti rinnovabili, senza considerarle come un unico insieme. Questo porta ad individuare la produzione media annua del 2022, caratterizzata dalle percentuali proposte in Figura 7.

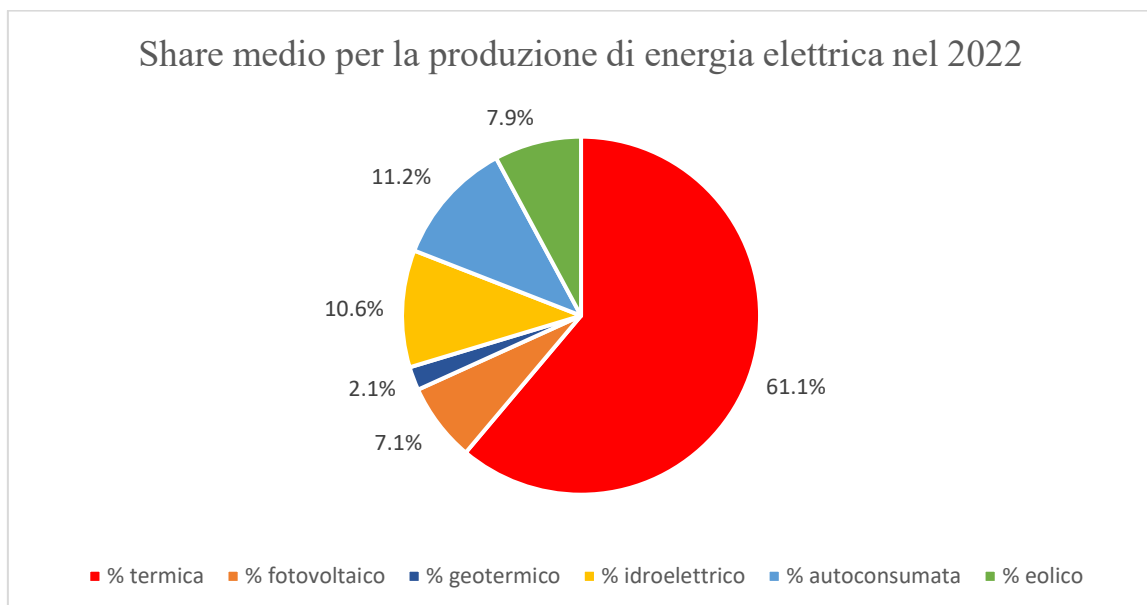


Figura 7: Share medio nel 2022 delle fonti energetiche per la produzione di energia elettrica

Come detto in precedenza, si ritrova la percentuale del 61,1% del contributo termico, ma in aggiunta si può notare come la restante parte sia spartita tra le diverse fonti rinnovabili. Si può osservare come la percentuale maggiore del 11,2% è da attribuire all'energia che viene autoconsumata direttamente dai produttori, di cui la gran parte è costituita dal fotovoltaico. In questo modo si intuisce che la frazione di questo contributo nell'energia autoconsumata più la produzione nazionale derivata dal fotovoltaico la rendano la fonte rinnovabile con la percentuale maggiore.

Detto ciò si può fare una considerazione aggiuntiva, andando a diagrammare lo share medio annuo nelle ore in cui il fotovoltaico è produttivo, cioè nelle ore diurne. In questo modo si riesce a rendere più chiaro lo share nelle ore di maggior rilevanza della giornata di questa fonte rinnovabile, essendo durante le ore notturne non è in funzione. Tutto ciò è riportato nella seguente figura, la Figura 8.

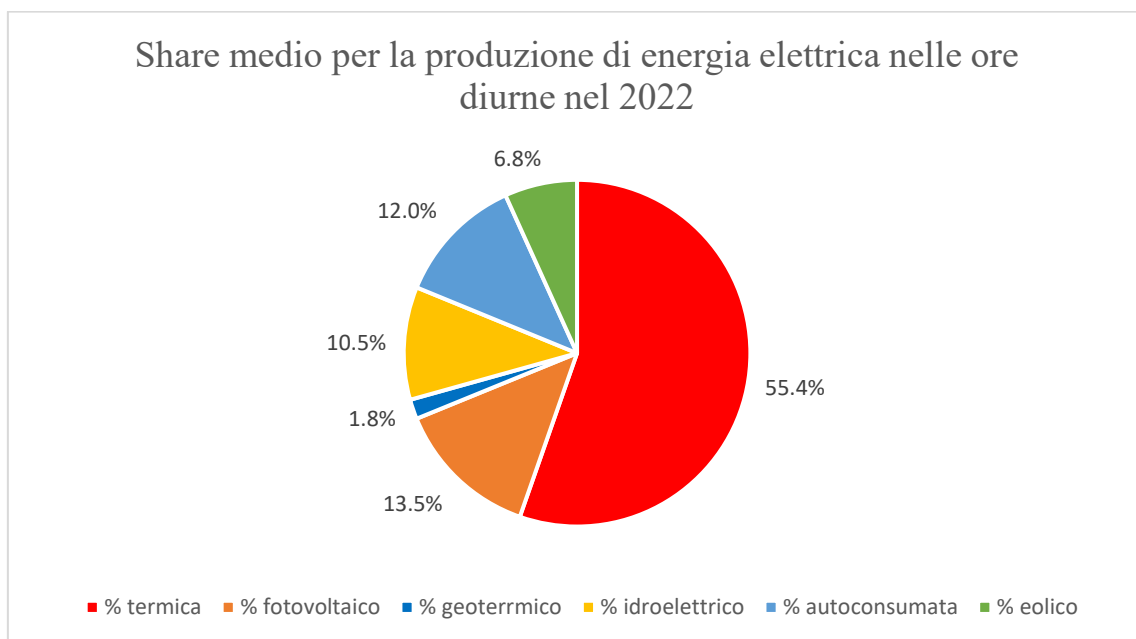


Figura 8: Share medio (ore diurne) nel 2022 delle fonti energetiche per la produzione di energia elettrica

Come si riesce a notare dalla Figura 8, lo share del contributo termico è sceso al 55,4%. Questa diminuzione è dovuta all'incremento della rilevanza assunta dal fotovoltaico che, considerando solamente le ore in cui esso è produttivo, fa sì che

abbia un valor medio di producibilità maggiore rispetto alla valutazione riportata in Figura 7 dove venivano considerate anche le ore notturne. Si arriva quindi ad evidenziare come l'aumento sia del contributo fotovoltaico sia del contributo autoconsumo, al cui interno si ricorda esserci anche la quota di fotovoltaico autoconsumata direttamente da chi possiede gli impianti, faccia sì che questo sia la fonte rinnovabile con lo share più alto, non solo considerando una media su tutte le ore del giorno, ma soprattutto andando a considerare le ore di producibilità di questa fonte.

Si ricorda infine che i valori analizzati nelle Figure 7 e 8 sono i valori medi calcolati sull'intero anno, che non includono il concetto di variabilità. Infatti, come tutte le altre fonti energetiche, il fotovoltaico presenta una variabilità elevata nel corso dell'anno con valori relativi alla percentuale di producibilità massima prossimi al 43% in alcune ore dell'anno, rendendo questa fonte ancora maggiormente rilevante in queste ore.

6. Risultati

In questo capitolo saranno analizzati i risultati ottenuti riguardanti i PEF dinamici determinati seguendo quanto prescritto dalla norma UNI EN 17423 e le ipotesi presentate e motivate nel capitolo 5. I risultati ottenuti saranno di natura differenti e saranno distinti in cinque punti differenti:

- Risultati preliminari, nel paragrafo 6.1
- Risultati dei PEF dinamici per l'anno 2022, nel paragrafo 6.2
- Risultati dell'analisi di correlazione, nel paragrafo 6.3
- Risultati dell'analisi di clusterizzazione, nel paragrafo 6.4
- Risultati dell'analisi predittiva, nel paragrafo 6.5

6.1. Risultati preliminari: importanza della quota di importazione sul totale

Prima di analizzare i risultati ottenuti per i PEF si è scelto di dedicare una sezione alla rilevanza che assume l'importazione di energia sul valore del PEF non rinnovabile.

Questo confronto è stato effettuato, in prima istanza, tra l'energia finale generata internamente al Paese, quindi ottenuta dalla somma del contributo rinnovabile e di quello non rinnovabile, e l'energia finale importata dall'estero, attraverso la rappresentazione presente in Figura 9.

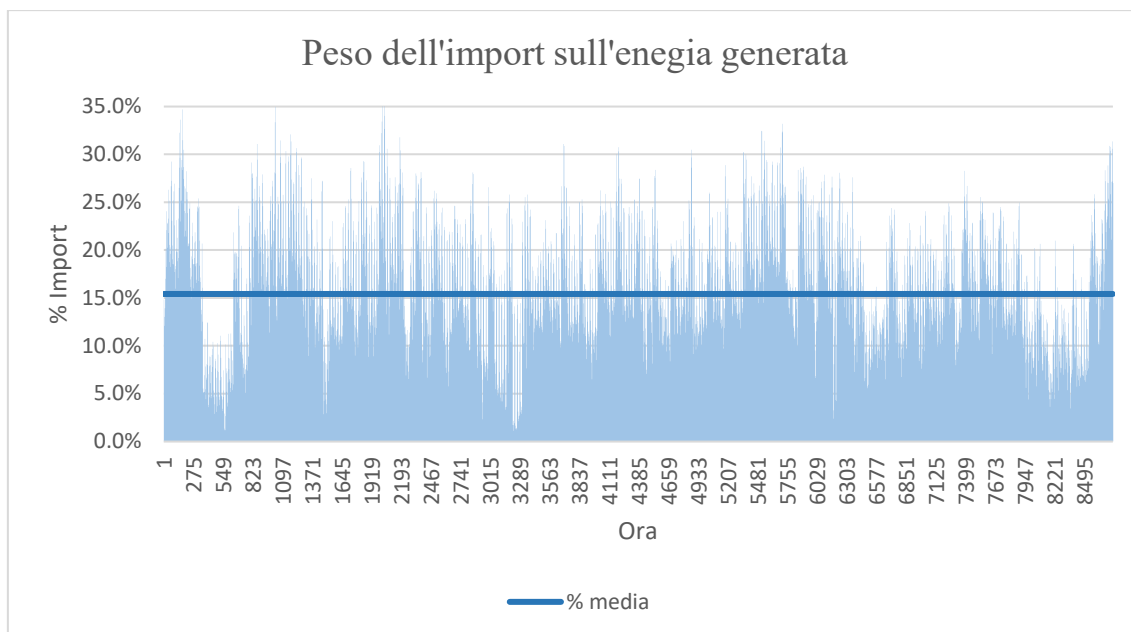


Figura 9: *Peso dell'import sul totale di energia finale prodotta nel Paese*

Osservando il grafico nella Figura 9 si nota una variabilità del valore in studio abbastanza elevata, dalla quale si ottiene un valor medio del 15,4% nel corso dell'intero anno considerato. Questo significa che mediamente l'importazione di energia elettrica dall'estero ha un'incidenza del 15,4% su quella complessiva necessaria a soddisfare il carico richiesto dagli utenti finali.

La forte variabilità è confermata se si rappresentano gli stessi risultati in un grafico cumulativo che ordina i valori ottenuti dal maggiore al minore, come riportato nella Figura 10.

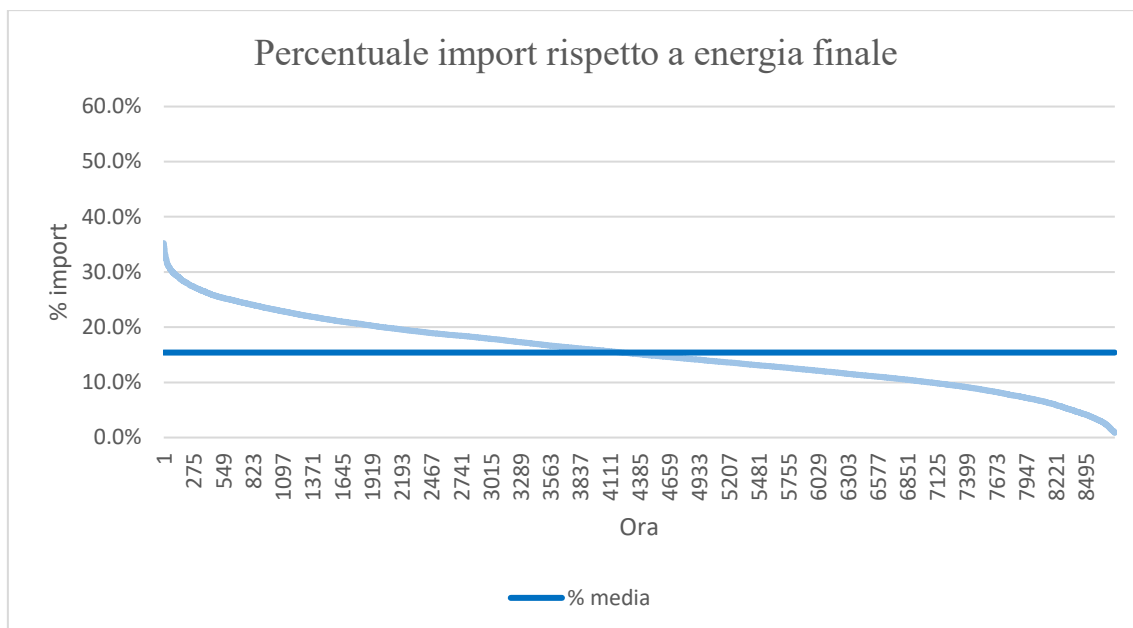


Figura 10: Grafico cumulativo del peso dell'import sul totale di energia finale prodotta

I valori percentuali rappresentati nella Figura 10 evidenziano come l'import nel corso dell'anno in studio possa assumere valori che si discostano notevolmente dal valor medio sopracitato. Infatti, osservando il grafico, si può notare come siano presenti valori molto alti, assunti nel corso dell'anno durante le ore notturne, con il massimo pari a circa il 35%, per arrivare a valori prossimi al valore nullo che si verificano principalmente durante le ore centrali della giornata nella stagione estiva, ore in cui il Paese si ritrova quasi totalmente autosufficiente. Tra questi valori si nota come il peso dell'import sull'energia finale assuma valori molto vari tra loro, non riuscendo a riscontrare un valore maggiormente presente nell'anno 2022.

Dopo di che ci si chiede se con i valori ricavati per i PEF dei Paesi che forniscono energia all'Italia questa percentuale possa rimanere simile ai risultati appena ottenuti se invece di effettuare una valutazione sull'energia finale si riporta il tutto in energia primaria, attraverso la rappresentazione della Figura 11. Questo significa che per l'energia prodotta internamente sarà applicato il fattore 2,1 e per gli altri Paesi si utilizzerà il fattore relativo a quel determinato Stato esportatore.

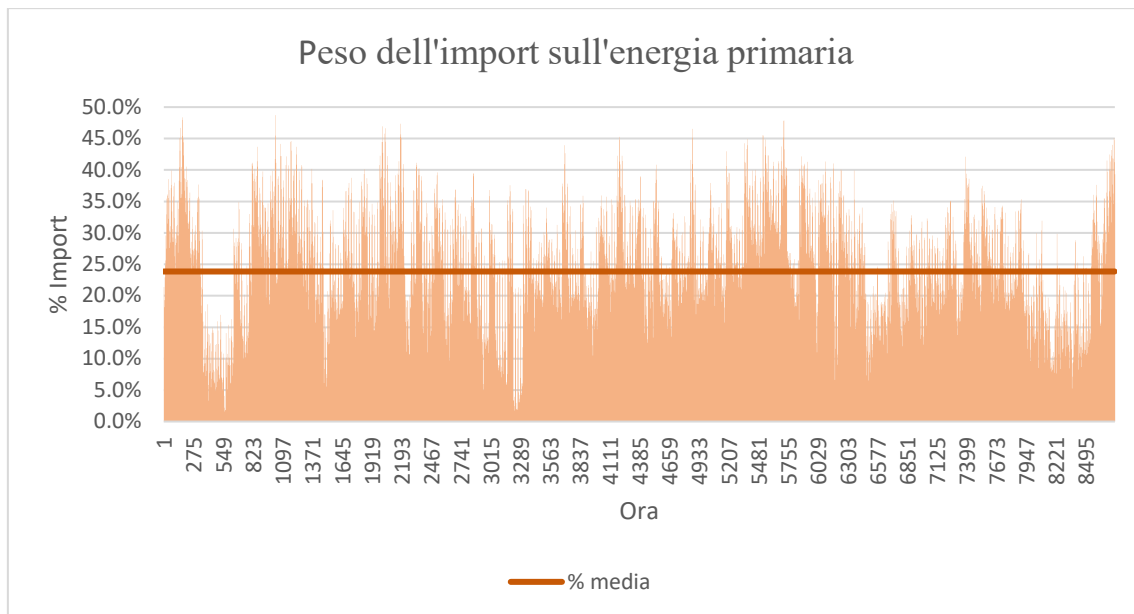


Figura 11: *Peso dell'import sul totale di energia primaria*

Si può notare che la variabilità mostrata nella Figura 9 è ancora presente ma che le percentuali sono decisamente cresciute. Questo sta a significare che anche il valor medio è cresciuto, rendendo l'import sempre più rilevante sul risultato finale ottenuto; il valore medio infatti assume una percentuale del 23,9%.

Allo stesso modo di quanto fatto per la valutazione import-energia finale può essere costruito un grafico cumulativo anche per la correlazione tra import e energia primaria, come rappresentato nella Figura 12.

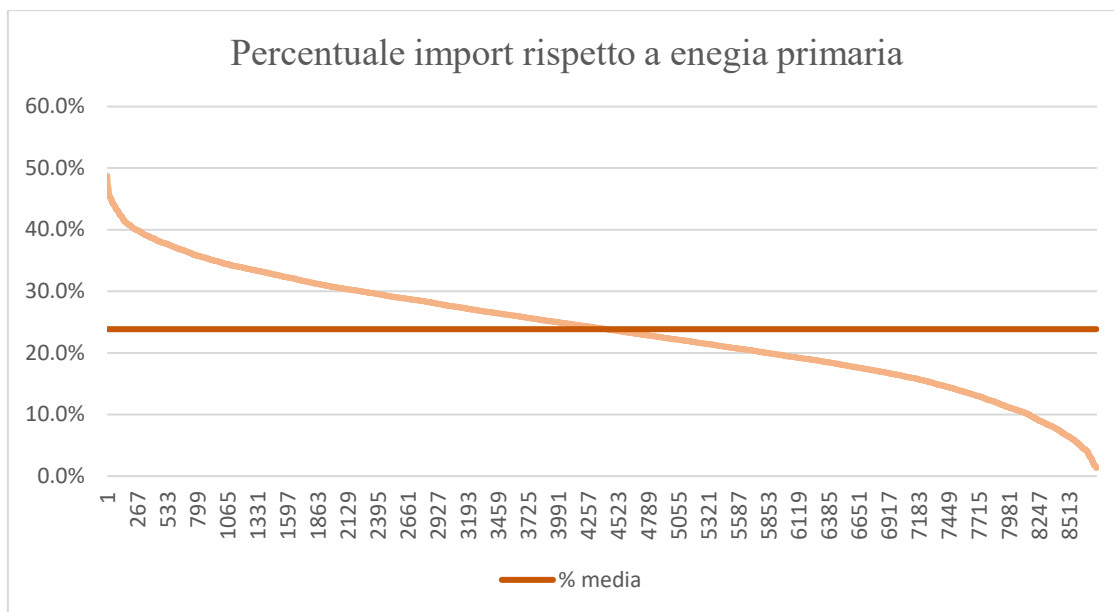


Figura 12: Grafico cumulativo del peso dell'import sull'energia primaria

Come si può notare, l'andamento dei valori assunti dalle percentuali dell'import con la valutazione in energia primaria è simile a quella effettuata per l'energia finale, evidenziando una forte variabilità. L'aspetto che cambia notevolmente è la magnitudine dei risultati, evidenziando come in alcune ore dell'anno la rilevanza dell'import arrivi ad avere un peso pari quasi al 50% sull'energia primaria complessiva; questi valori sono riscontrabili durante le ore notturne, come evidenziato già dai valori massimi ottenuti durante l'analisi precedente sull'energia finale riportata nella Figura 10.

Questo aumento riscontrato nell'analisi effettuata con l'energia primaria è determinato dal fatto che il PEF medio relativo all'import dagli altri Paesi è superiore rispetto a quello della produzione italiana, come è possibile notare dalla Figura 13.

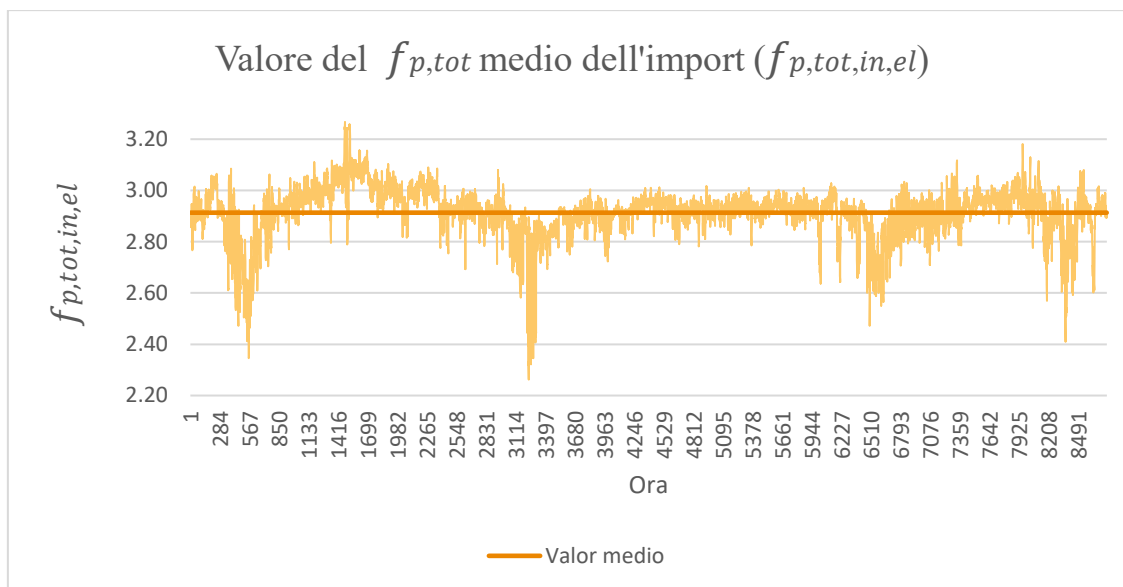


Figura 13: Valore del PEF per l'import mediato sull'import dai diversi Paesi

Come già detto, il valore del PEF medio per i Paesi esportatori di energia elettrica non è costante in quanto esso cambia in funzione della percentuale di energia che viene esportata da ogni Paese; quindi, essendo il PEF di ogni stato differente dagli altri, fa variare il risultato relativo al PEF medio.

Considerando ciò, si nota comunque come durante l'intero anno non ci sia alcun valore che sia al di sotto del PEF per la produzione italiana di 2,1, rendendo l'impatto dell'import di energia maggiormente rilevante sul risultato in energia primaria rispetto a quello effettuato sull'energia pronta per il consumo finale. Il valor medio nel corso dell'anno 2022 per il PEF relativo all'import è pari a 2,91 che è nettamente superiore a quello proposto dalla norma UNI EN ISO 52000-1 nella tabella B.16 nell'Annex B di 2,5.

Questa valutazione effettuata differenziando i diversi PEF dei Paesi che cedono energia all'Italia risulta quindi più veritiera rispetto all'assunzione derivata dalla norma di riferimento, nonostante questo vada ad accrescere il valore del PEF totale.

6.2. Risultati riguardanti i PEF dinamici per il 2022

Dopo le considerazioni effettuate nel paragrafo 6.1, sfruttando quanto riportato all'interno delle tabelle dell'Annex A, si sono ricavati i valori orari per i fattori di energia primaria rinnovabili e non rinnovabili per tutto l'anno 2022, per poi ricavare il PEF totale. Prima di entrare nel dettaglio dell'analisi per osservare come l'andamento e i valori dei PEF possano cambiare nel corso dell'anno prescelto, si può subito dire che i valori medi che sono stati ottenuti evidenziano valori nettamente inferiori a quelli previsti dalla normativa italiana. Infatti il valore di $f_{p,ren,el}$ assume un valor medio di 0,34, decisamente minore rispetto a 0,47 previsto dalla normativa. Allo stesso modo il valore di $f_{p,nren,el}$ ha un valore di 1,51 che è notevolmente più basso di 1,95 previsto dal DM Requisiti Minimi del 2015. Questo porta ad avere un valore del PEF medio annuo totale per l'elettricità di 1,85 che non si avvicina minimamente né a quanto proposto dalla normativa sopracitata di 2,42 né al PEF proposto dalla direttiva 2018/2002/EU di 2,1. Questo evidenzia come il valore utilizzato, al giorno d'oggi, risulti più che obsoleto, andando a sfalsare tutti le valutazioni correlate a questo dato.

Dopo di che, l'obiettivo principale è di andare a calcolare dei valori che possano essere dinamici e non statici, per evidenziare come questi siano a volte superiori o inferiori rispetto ai valori prescritti dalla norma appena citati. Infatti, analizzando i risultati ottenuti nella Figura 14, si può riscontrare come questi abbiano una fluttuazione abbastanza elevata, non solo nel corso dell'anno, ma anche all'interno della stessa giornata. Questo lascia spazio alla possibilità di poter effettuare diverse analisi dai risultati ottenuti in modo da poter sfruttare le conoscenze aggiuntive che ne scaturiscono.

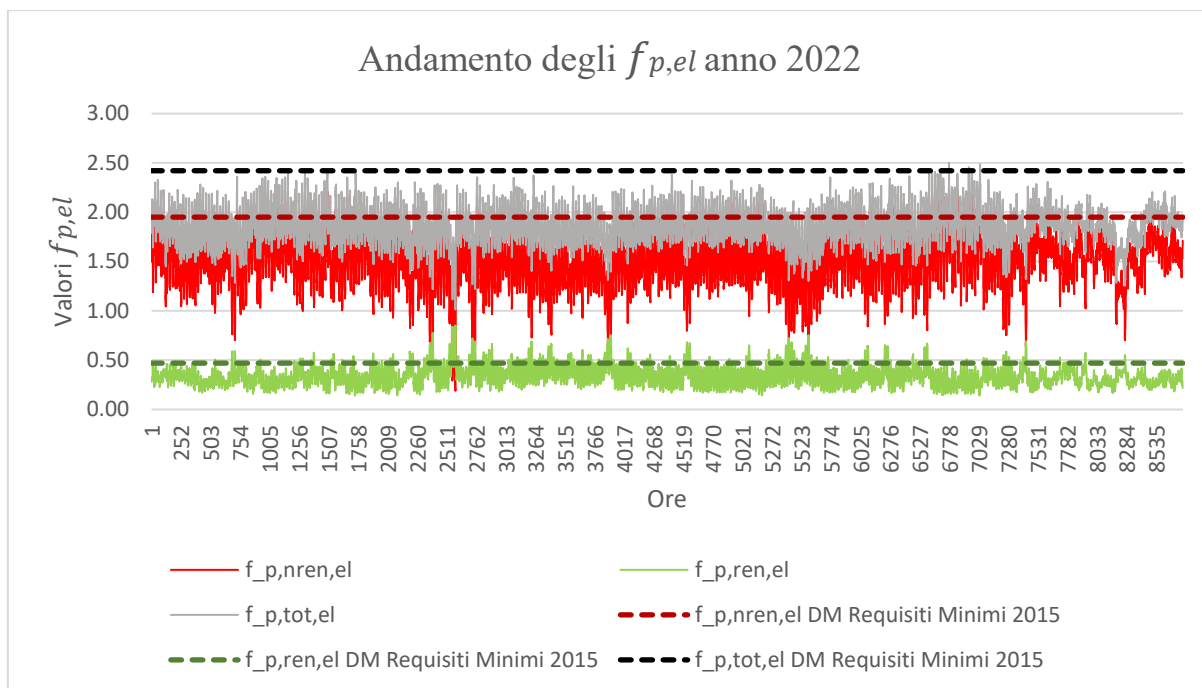


Figura 14: Andamento dei PEF per tutto l'anno 2022

Dal grafico della Figura 14 si può notare che non solo i valori medi stanno al di sotto del valore proposto dal DM Requisiti Minimi del 2015 per il PEF totale ma, durante il corso dell'anno, sono pochi i risultati che superano questo limite. Infatti i valori calcolati relativi al PEF totale che assumono un risultato superiore a 2,42 sono solamente 3, pari allo 0,03%. Una considerazione simile può essere effettuata per quanto concerne il PEF non rinnovabile con solamente 265 risultati che assumono un valore superiore a 1,95. Per quanto riguarda invece il PEF rinnovabile, sono presenti ben 953 risultati nel corso dell'anno che superano il valore imposto da normativa di 0,47, corrispondente al 10,88% sul totale di risultati calcolati delle 8760 ore dell'anno.

Questo ultimo risultato può essere spiegato dal fatto che negli ultimi otto anni la percentuale di fonti rinnovabili è cresciuta notevolmente, facendo sì che l'impatto del PEF rinnovabile diventasse sempre più importante. Questa considerazione è utile anche per spiegare i pochi valori di PEF non rinnovabile oltre il limite di 1,95.

Infatti, diventando sempre più predominante il contributo rinnovabile, si è ridotto, nel corso degli anni, quello relativo alle fonti energetiche non rinnovabili. In aggiunta, come enunciato nella scelta dei metodi utilizzati per eseguire i calcoli, il fattore di energia primaria per la produzione rinnovabile risulta nettamente minore rispetto a quello per la produzione non rinnovabile. Tutto ciò ha portato ad una diminuzione dei valori assunti dal PEF totale, facendo sì che quasi tutti i valori orari ottenuti si trovino al di sotto del valore di 2,42.

6.2.1. Analisi in frequenza

Dopo aver effettuato un'analisi preliminare sui risultati ottenuti, si è deciso di scendere nello specifico attraverso diverse valutazioni effettuate sui dati a disposizione. Come primo passo si è svolta un'analisi in frequenza, in modo da visionare la distribuzione dei risultati ottenuti, suddividendo la banda di valori in intervalli di ugual larghezza, pari a 0,1, come riportato nella Figura 15.

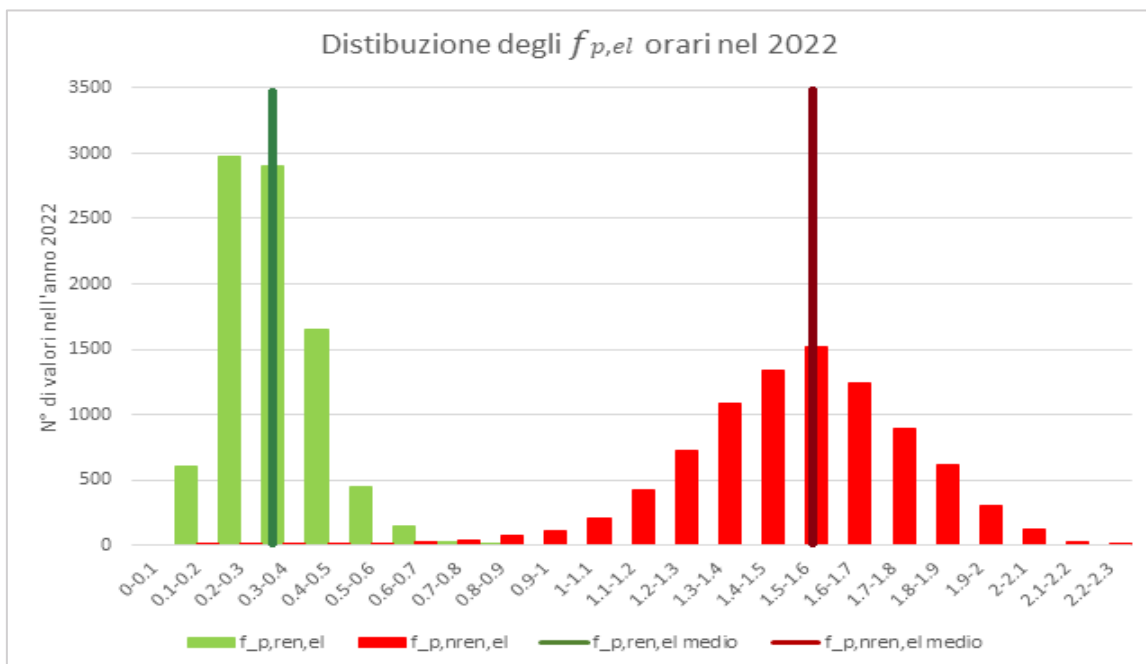


Figura 15: Distribuzione in frequenza dei valori dei PEF rinnovabili e non rinnovabili nel 2022

Come si può notare dalla Figura 15 le due distribuzioni in frequenza dei PEF rinnovabili e non rinnovabili sono quasi totalmente distinte l'una dall'altra. Infatti, esclusi pochi valori del PEF non rinnovabile, i valori del PEF rinnovabile si distribuiscono tra gli intervalli compresi tra 0 e 0,9 e i valori del PEF non rinnovabile tra i valori 0,9 e 2,3.

I valori del PEF non rinnovabile che sono minori dell'unità, sono spiegabili dal fatto che, se la percentuale di energia derivata da fonti rinnovabili assume valori molto alti rispetto alla produzione totale, si avranno valori più bassi del PEF non rinnovabile che, in alcuni casi può scendere al di sotto di 1.

Oltre a ciò si evidenzia come la maggioranza dei valori assunti dal PEF rinnovabile nel corso dell'anno 2022 si distribuiscono negli intervalli 0,2-0,3 e 0,3-0,4, in concordanza con il valor medio nell'intero anno solare, pari a 0,34. Allo stesso modo, nonostante la distribuzione copra un'ampiezza di intervalli maggiore, si può dire per i valori assunti dal PEF non rinnovabile; infatti, si ha come intervallo con maggior frequenza quello di 1,5-1,6, esattamente dove è situato il valor medio assunto nell'anno 2022 di 1,51.

Si può concludere la descrizione del grafico notando come i valori del PEF non rinnovabile assumano una distribuzione quasi a campana di Gauss (distribuzione normale), con il numero di "popolazione" di ogni intervallo che decresce progressivamente all'allontanamento dal valor medio che, come già detto, è situato nell'intervallo con frequenza di dati maggiore.

6.2.2. Analisi con curva cumulativa

Il passo successivo è stato quello di individuare le due curve cumulative per il PEF rinnovabile e per il PEF non rinnovabile durante il corso del 2022, rappresentate nella Figura 16, in modo tale da iniziare a cercare una possibile correlazione tra questi due dati.

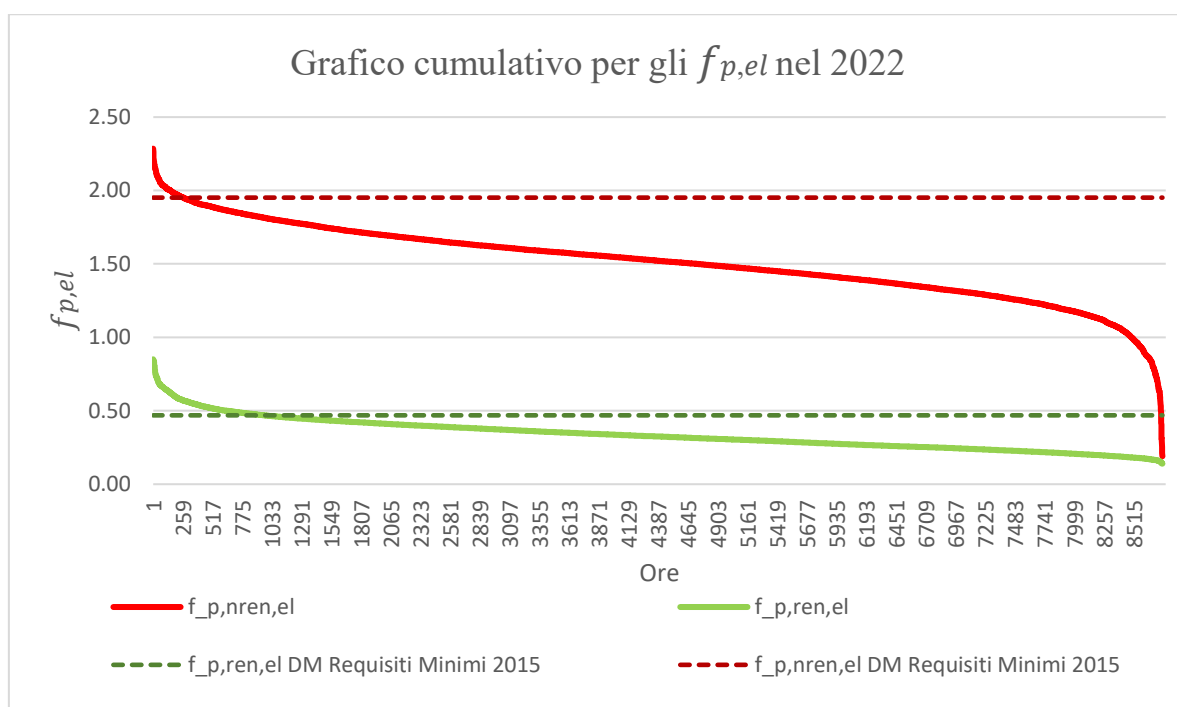


Figura 16: Grafico cumulativo per PEF rinnovabile e non rinnovabile per l'anno 2022

Il grafico proposto nella Figura 16 serve ad evidenziare i valori assunti dai due PEF nel corso dell'anno ordinandoli dal valore maggiore a quello minore. Lo stesso serve anche per indicare sia la distribuzione dei due valori che, come si evince, è per la maggior parte delle ore dell'anno costante per entrambi i set di dati, sia per ribadire quanto già enunciato discutendo la Figura 14, cioè il fatto che siano presenti più valori che oltrepassano il limite imposto dal DM Requisiti minimi del 2015 del PEF rinnovabile rispetto al PEF non rinnovabile.

Da questo grafico si può appunto notare come nel corso dell'anno 2022 assumano valori più simili tra loro i risultati relativi al PEF rinnovabile rispetto a quello non rinnovabile, andando a confermare quanto detto nel commento dell'analisi in frequenza effettuata nel paragrafo precedente, cioè il fatto che i valori del PEF non rinnovabile si distribuiscano su un range di intervalli maggiore rispetto a quello rinnovabile, evidenziando di conseguenza una maggiore variabilità nel corso dell'anno.

In ultima istanza, nonostante non sia esplicitamente mostrato dal grafico, si può iniziare ad intuire una sorta di relazione tra i valori assunti dal PEF rinnovabile e da quello non rinnovabile, in quanto a valori minori di PEF rinnovabile è probabile che corrispondano valori maggiori di quello non rinnovabile e viceversa. Per cercare di confermare questa ipotesi si sono dovute effettuare altre analisi e rappresentazioni in modo da rendere chiara questa relazione.

6.2.3. Analisi con box plot

Successivamente si è proseguito effettuando un'analisi attraverso la creazione di box plot, costruiti andando ad effettuare la media dei risultati ottenuti per ogni ora della giornata, in modo da ottenere il valor medio annuale e la variabilità assunta dai dati nel corso dell'intero anno per ogni ora. Questa valutazione serve anche per evidenziare quanto detto nel paragrafo precedente, cercando quindi una correlazione tra i valori assunti dai due PEF.

La Figura 17 rappresenta i box plot della variazione oraria del PEF non rinnovabile.

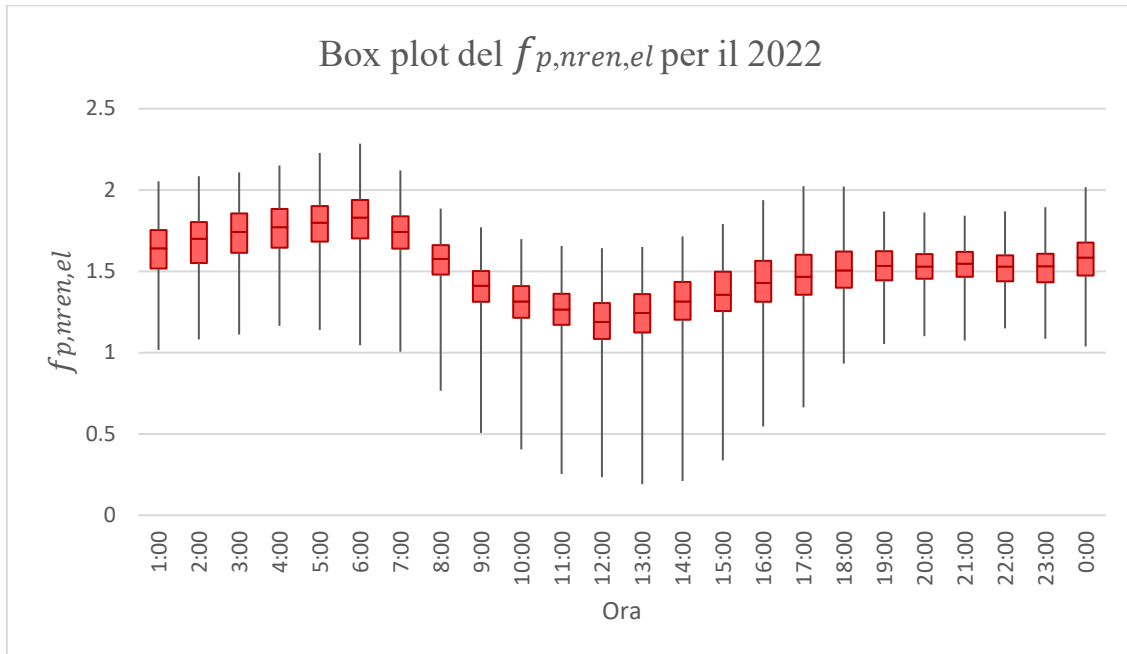


Figura 17: Box plot del PEF non rinnovabile per l'anno 2022

In primo luogo, nel grafico riportato nella Figura 17, si possono notare alcuni elementi di interesse. Infatti, si può osservare il valor medio annuo del PEF non rinnovabile per ogni ora del giorno, evidenziato dalla linea all'interno dei vari box, il limite superiore di ogni box, che corrisponde al 3° quartile, cioè il valore al di sotto del quali si trovano il 75% dei valori facenti parte del set di dati su cui il modello è costruito, il limite inferiore di ogni box, che corrisponde al 1° quartile, cioè il valore al di sotto del quale si trovano il 25% dei dati e due barre di errore per ogni box che rappresentano rispettivamente la distanza tra il 3° quartile e il valore massimo del PEF assunto in quell'ora durante il corso dell'anno e la distanza tra il 1° quartile e il valore minimo assunto dal PEF.

Si può osservare come l'andamento dei box plot nel corso della giornata crei una concavità con il culmine nel punto di minimo individuato nel mezzogiorno; questo è dovuto al fatto che nelle ore centrali della giornata il contributo delle fonti rinnovabili è maggiore, prevalentemente dato dalla grande quota prodotta attraverso il solare fotovoltaico. Questo porta le fonti non rinnovabili a poter produrre di meno e di conseguenza a far abbassare il valore del PEF non rinnovabile.

Dopo di che si può osservare come dalle ore 18 fino alla mezzanotte il valore medio assunto dal PEF non rinnovabile sia pressoché costante per poi incrementare il suo valore progressivamente fino al massimo raggiunto alle ore 6 del mattino. Questa crescita del valore è da attribuire al fatto che le fonti non rinnovabili vedono crescere la loro quota, seguendo le curve di carico tipiche italiane, dovendo sopperire alla mancanza della fonte rinnovabile con le percentuali di producibilità maggiori, cioè il solare fotovoltaico. Il valore massimo viene raggiunto con due ore di anticipo rispetto al picco presente nei profili di carico tipologici italiani. Questo può essere dovuto allo shift tra la generazione e l'utilizzo di energia elettrica e all'effetto che possono avere gli storage.

Sempre dipendente dalla producibilità da fotovoltaico si può attribuire anche la differente variabilità dei dati assunti nel corso dell'anno per ore differenti; si può infatti notare come nelle ore centrali della giornata la variabilità assunta dal PEF non rinnovabile sia molto più ampia rispetto a quelle delle ore mattutine e serali. Tutto ciò è da imputare alla percentuale di produzione legata al fotovoltaico.

Dopo di che si procede con la stessa analisi ma per i valori del PEF rinnovabile, riportando i risultati ottenuti nella Figura 18.

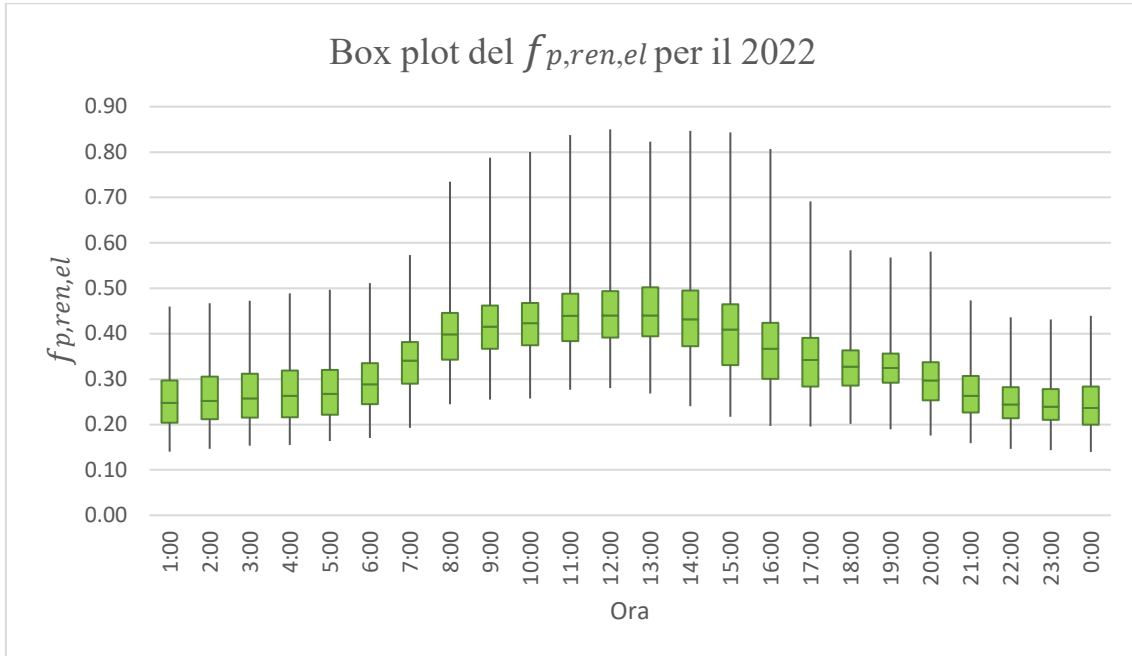


Figura 18: Box plot del PEF rinnovabile per l'anno 2022

Allo stesso modo di quanto evidenziato per i box plot del PEF non rinnovabile, si possono evincere dal grafico in Figura 18 il valor medio annuo assunto dal PEF rinnovabile per ogni ora della giornata, i valori del 1° e del 3° quartile e le due barre di errore per arrivare al valore minimo e massimo assunti durante l'anno in analisi.

Dopo di che, esaminando più nel dettaglio i risultati ottenuti, si può notare come quanto detto per il PEF non rinnovabile si rispecchi su quello rinnovabile. Infatti, si può notare come la curva abbia una convessità nelle ore centrali della giornata, con un massimo situato nel mezzogiorno. Questo è sempre da imputare alla producibilità crescente del fotovoltaico dalle prime ore di luce della giornata fino a che il sole non raggiunge il punto di massima altezza nel cielo alle ore 12. Per quanto riguarda gli altri valori orari riportati si può osservare come si rilevi la

stessa costanza dei valori assunti nelle ore conclusive della giornata ma come questa sia presente anche nelle prime ore del giorno.

Questo è dovuto al fatto che il progressivo aumento di richiesta di elettricità nelle prime ore della giornata sia colmata quasi totalmente dalle fonti non rinnovabili e dall'import estero, rendendo più costante la produzione da fonti rinnovabili. Si può invece effettuare la stessa considerazione fatta per la variabilità differente assunta dai PEF medi orari enunciata in precedenza, evidenziando un maggiore range di variazioni nelle ore diurne rispetto a quelle notturne. La spiegazione data è legata alla producibilità fotovoltaica. Ad esempio in una giornata soleggiata estiva il fotovoltaico andrà a produrre una quantità maggiore di energia, facendo sì che le fonti non rinnovabili da impiegare per colmare il gap tra domanda e offerta abbiano entità minore, rendendo minore il valore del PEF non rinnovabile e maggiore quello del PEF rinnovabile; al contrario in una giornata invernale nuvolosa, si avverte un crollo della produzione fotovoltaica, rendendo essenziale l'utilizzo di una percentuale maggiore di fonti non rinnovabili, facendo aumentare il valore assunto dal PEF non rinnovabile, a discapito di quello rinnovabile.

Per concludere l'analisi si sono rappresentati i box plot di entrambi i PEF in modo da ricercare una correlazione, come si evince dalla Figura 19.

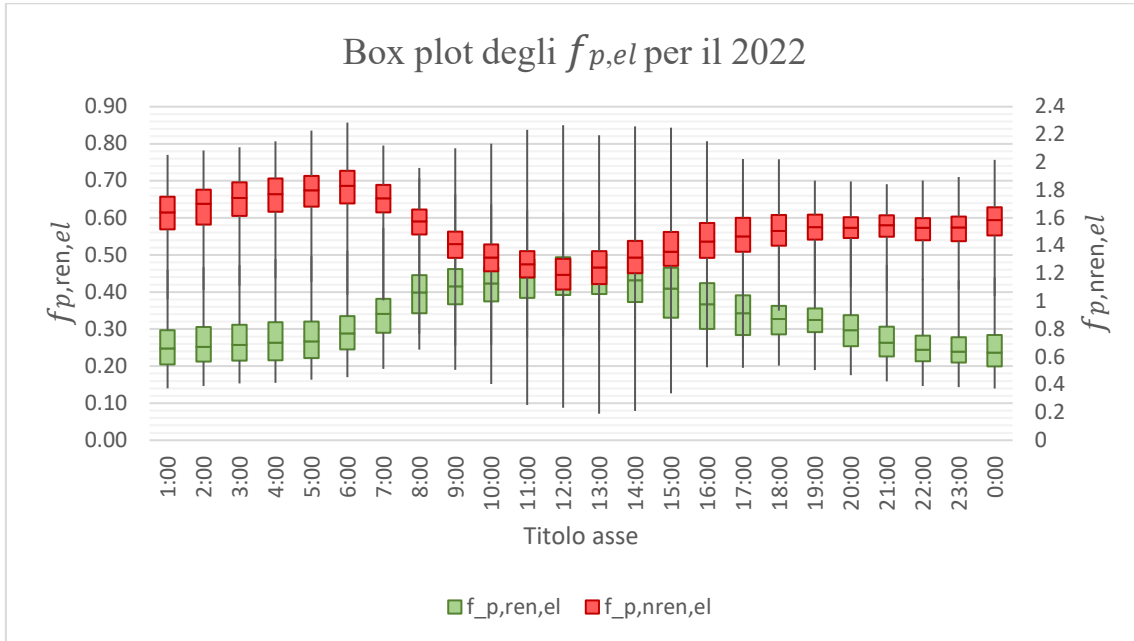


Figura 19: Confronto tra box plot dei PEF rinnovabile e non rinnovabile per l'anno 2022

Questa correlazione tra i due valori risulta evidente se si confrontano i box plot dei due PEF nel grafico della Figura 19; infatti, si riesce a notare come nel lasso temporale in cui il PEF non rinnovabile mostra un andamento decrescente ci sia un rispettivo incremento progressivo del PEF rinnovabile, arrivando al punto di massimo alle ore 12.

6.3. Risultati dell'analisi di correlazione

Per cercare di trovare una correlazione vera e propria tra i valori assunti dal PEF rinnovabile e quello non rinnovabile è stato necessario rappresentare i dati all'interno dello stesso grafico in modo da ottenere il risultato riportato nella Figura 20.

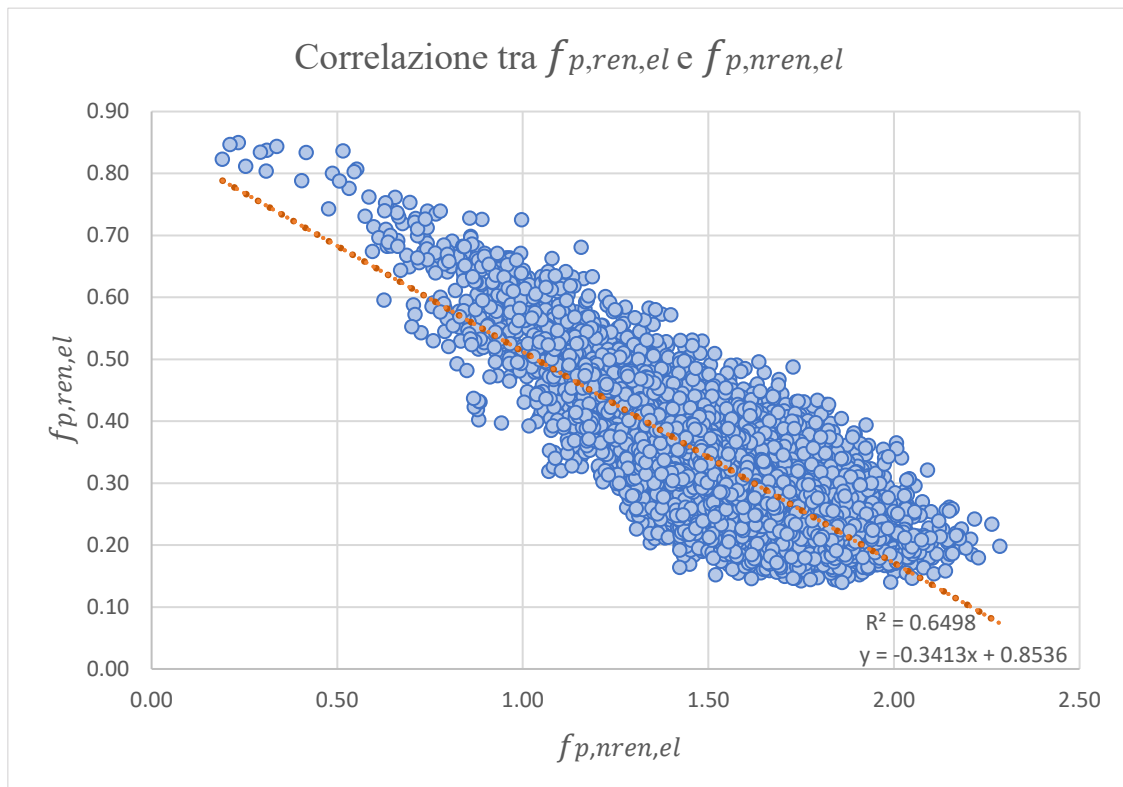


Figura 20: Correlazione tra PEF rinnovabile e PEF non rinnovabile per l'anno 2022

Come si può notare sull'asse delle ascisse sono situati i valori del PEF non rinnovabile e su quello delle ordinate quelli del PEF rinnovabile.

I punti presenti nel grafico vanno ad individuare tutte le coppie di valori tra $f_{p,ren,el}$ e $f_{p,nren,el}$ delle 8760 ore dell'anno, dimostrando una certa correlazione.

Se si osserva il grafico, è presente anche una retta di regressione che, nella sua rappresentazione lineare, cerca di fittare al meglio la relazione tra PEF rinnovabile e non rinnovabile. La bontà della relazione tra la retta citata e la dispersione dei punti è data dall'indicatore statistico R^2 , chiamato anche coefficiente di determinazione, che viene calcolato attraverso la formulazione 10:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (10)$$

Dove:

- y_i sono i valori reali rappresentati sul grafico
- \hat{y}_i sono i valori calcolati attraverso la retta di regressione
- \bar{y}_i è il valor medio di tutti i valori

Quindi, attraverso il rapporto della differenza tra valori reali e valori stimati dalla retta e della differenza tra i valori reali e il valor medio, è possibile ricavare questo indicatore che, più è vicino a 1, meglio la retta rappresenta il set di dati. In questo caso esso assume un valore di circa 0,65.

Per poter comprendere meglio la correlazione tra i due PEF, si è diviso il set di dati a disposizione in quattro subset in modo che ognuno di essi contenesse esclusivamente i valori dei due PEF relativi alla stagione corrispondente, rappresentando i risultati nella Figura 21.

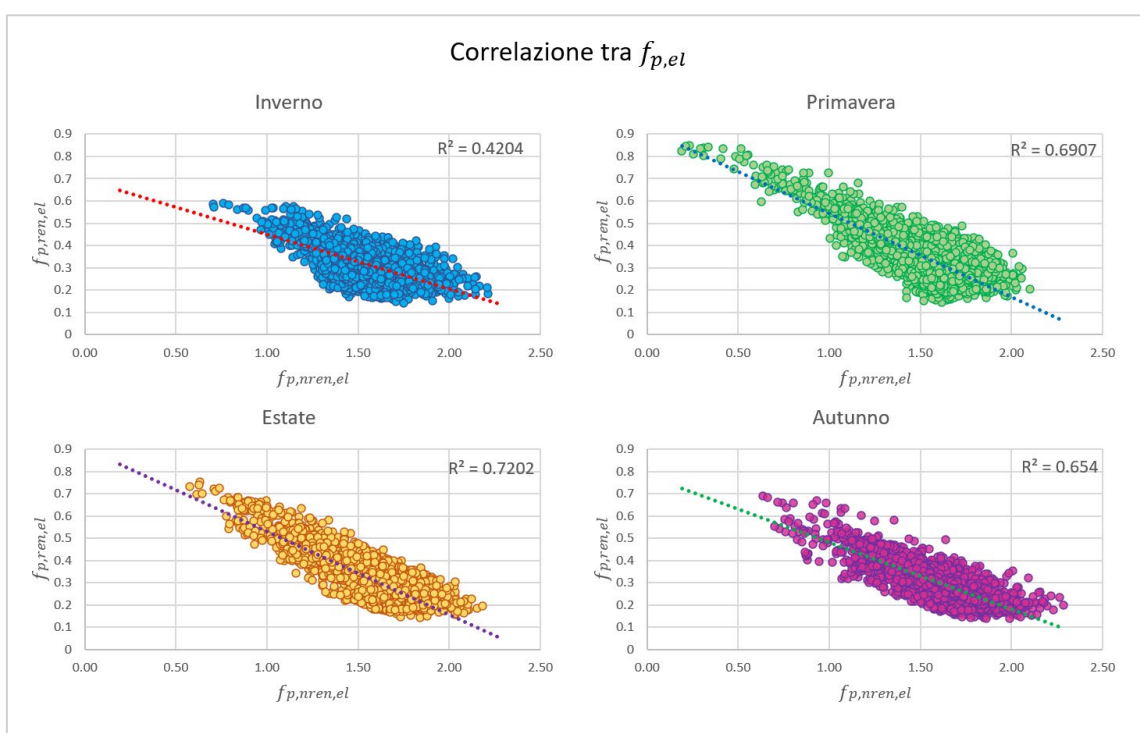


Figura 21: Correlazione tra PEF rinnovabile e PEF non rinnovabile con suddivisione stagionale

Come si evince dai grafici della Figura 21 il valore del fattore di determinazione cambia, in alcuni casi sostanzialmente, a seconda della stagione presa in considerazione per la creazione del modello di regressione lineare. Si osserva che durante l'inverno la correlazione tra il PEF rinnovabile e quello non rinnovabile mostra un coefficiente di determinazione basso, pari a 0,42. Invece durante la stagione estiva i risultati mostrano un R^2 molto alto con un valore di 0,72. Per quanto concerne le stagioni intermedie della primavera e dell'autunno si evincono risultati buoni e che si avvicinano al risultato conseguito dal modello costruito sulla stagione estiva.

La possibile motivazione di risultati così differenti tra loro è probabilmente da attribuire al contributo dato dalla produzione fotovoltaica. Questa ha un impatto maggiore delle altre fonti rinnovabili sulla produzione di energia elettrica, come si evince dalla Figura 8. Inoltre bisogna considerare anche che il fattore climatico è sicuramente più stabile e costante nella stagione estiva rispetto alle altre.

Tutto ciò porta, nel momento in cui la produzione dal solare fotovoltaico è maggiore ed il fattore climatico è più stabile, cioè nella stagione estiva, ad avere maggior correlazione tra fonti rinnovabili e non rinnovabili, rendendo quindi la costruzione di un modello di regressione lineare su questa stagione più veritiero rispetto alle altre.

6.3.1. Analisi attraverso heatmap

Dopo aver verificato che è presente una correlazione generale tra il PEF non rinnovabile e quello rinnovabile si è deciso di effettuare un'analisi più dettagliata andando a rappresentare, attraverso heatmap create con il software Rstudio, i valori di entrambi i PEF per tutti i giorni dell'anno, cercando di trovare giorni che potessero esprimere al meglio questa corrispondenza.

Come primo passo sono stati rappresentati i valori dei due PEF per l'intero arco temporale del 2022, ottenendo i risultati riportati nelle Figure 22 e 23.

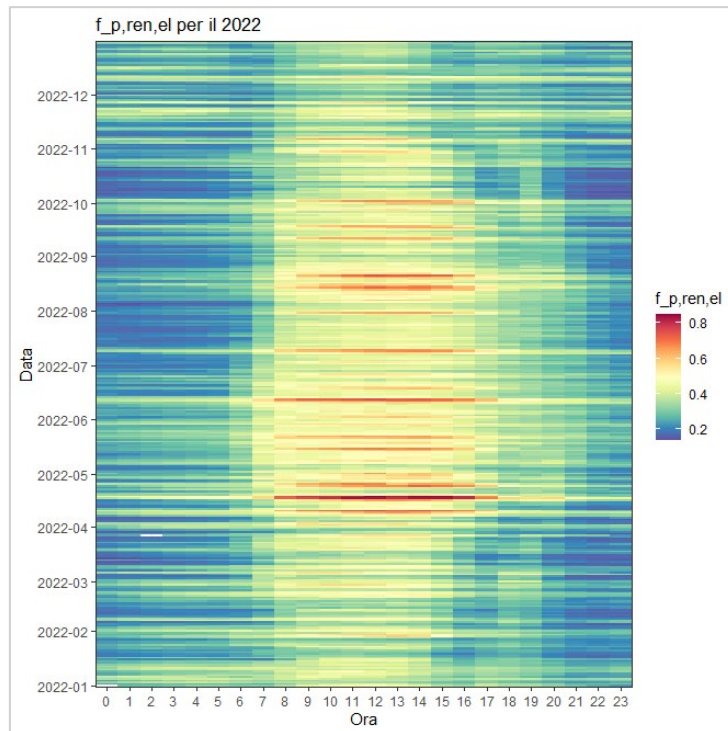


Figura 22: Heatmap per il PEF rinnovabile dell'anno 2022

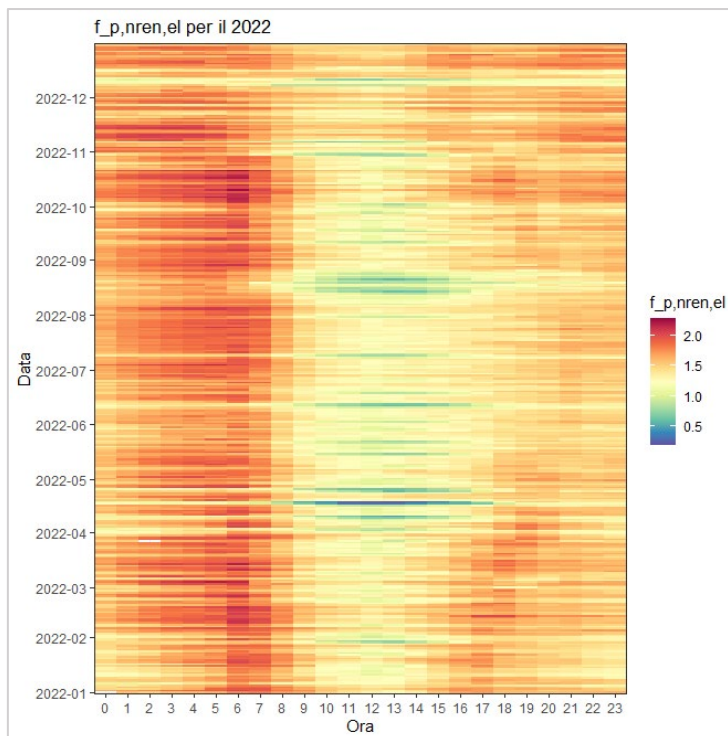


Figura 23: Heatmap per il PEF non rinnovabile dell'anno 2022

Osservando i due grafici nelle figure 22 e 23, si nota come riescano ad evidenziare le diverse informazioni fino ad ora presentate, dando un punto di vista più chiaro

sulla variazione oraria e stagionale dei PEF. Inoltre, si possono iniziare a fare due considerazioni generali: la prima riguarda i valori assunti dal PEF non rinnovabile, maggiori di quello rinnovabile durante la maggior parte delle ore dell'anno; la seconda, di maggior interesse, è legata alla relazione tra questi valori. Infatti si nota che, come già evidenziato durante il commento dei box plot, i valori maggiori assunti dal PEF non rinnovabile si riscontrano durante le ore notturne e in particolar modo nelle prime ore della mattinata (intorno alle ore 6 e 7) e ai quali corrispondono valori relativamente bassi del PEF rinnovabile. Se si osservano invece i massimi del PEF rinnovabile, sono raggiunti durante le ore centrali della giornata, sempre dovuti alla quota fotovoltaica che raggiunge il massimo della propria producibilità elettrica, evidenziando la presenza di giorni in cui si arriva ad avere valori molto alti del PEF rinnovabile.

Cercando di indagare meglio su questi valori si è scelto di rappresentare solamente i mesi di aprile e maggio nelle Figure 24 e 25, in quanto sono ricchi di valori di PEF rinnovabili molto elevati.

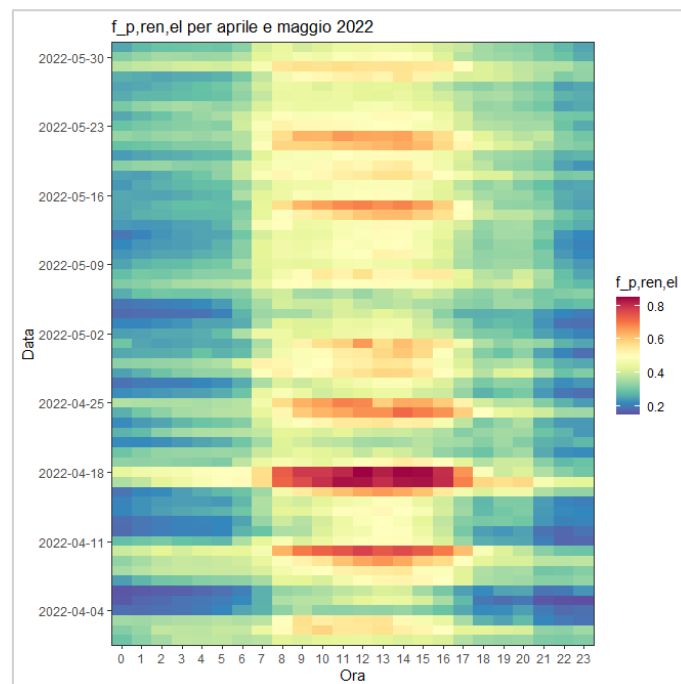


Figura 24: Heatmap per il PEF rinnovabile per aprile e maggio 2022

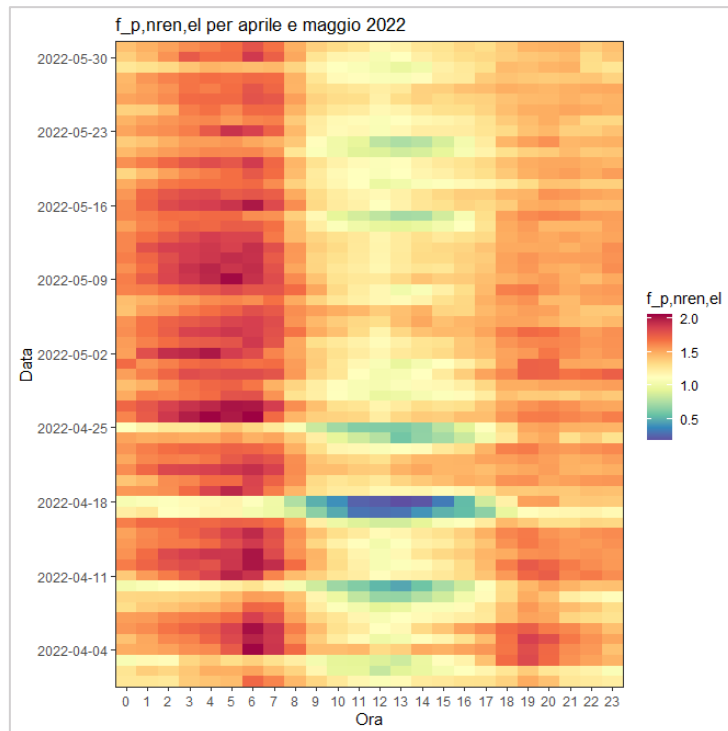


Figura 25: Heatmap per il PEF non rinnovabile per aprile e maggio 2022

Osservando i due grafici si nota come siano presenti due giorni in cui quanto detto precedentemente sembra verificarsi in maniera molto evidente. Si tratta dei giorni del 17 e del 18 aprile in cui si hanno i valori più alti relativi al PEF rinnovabile e quelli più bassi per il PEF non rinnovabile. Questi due giorni corrispondono rispettivamente a Pasqua e Pasquetta del 2022. Quindi da qui in avanti, scegliendo come riferimento il giorno del 18 aprile 2022 e il giorno lavorativo successivo, si cercherà di trovare una corrispondenza tra i valori assunti dai PEF e i profili di carico degli stessi giorni, resi disponibili dai dati raccolti da Terna e rappresentati nella Figura 26.

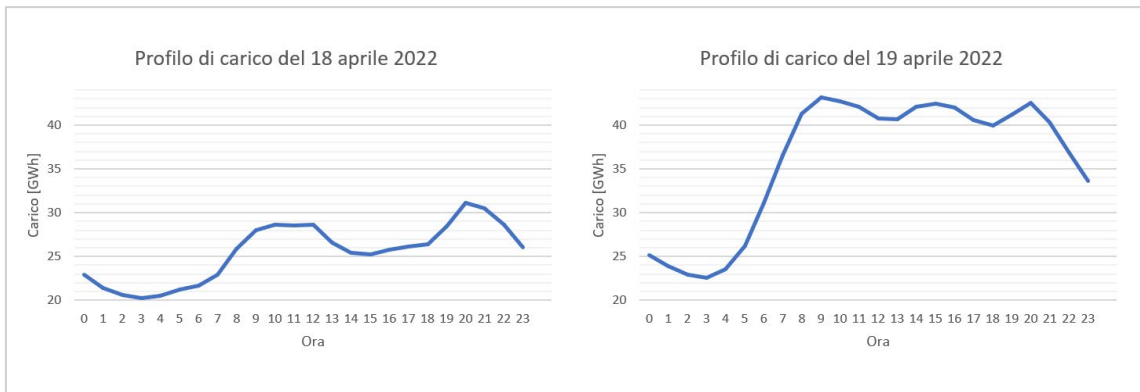


Figura 26: Profili di carico per il 18 aprile 2022 (a) e il 19 aprile 2022 (b)

Come prima cosa si riportano i due profili di carico relativi ai giorni presi in considerazione per l'analisi. Si può notare subito come sia la magnitudine sia la forma dei profili di carico siano sostanzialmente differenti; nel caso del 18 aprile (a) ci si trova, come già detto, davanti ad un giorno festivo, al contrario del 19 aprile (b) che è un giorno feriale. Tutto ciò implica il fatto che la maggior parte dei grandi consumatori di energia elettrica il 18 aprile non richiedano un grosso quantitativo di energia, contrariamente di ciò che accade il giorno 19. Questo spiega sia l'andamento differente assunto dalle due curve sia la quantità di energia che viene utilizzata.

Infatti durante il giorno 18 aprile vengono consumati complessivamente 611 GWh di energia, decisamente minori degli 864 GWh consumati il 19 aprile.

Dopo aver osservato le differenze sostanziali che vi sono tra i due profili di carico si riportano nella Figura 27 i valori dei PEF assunti nel corso delle giornate prese in considerazione.

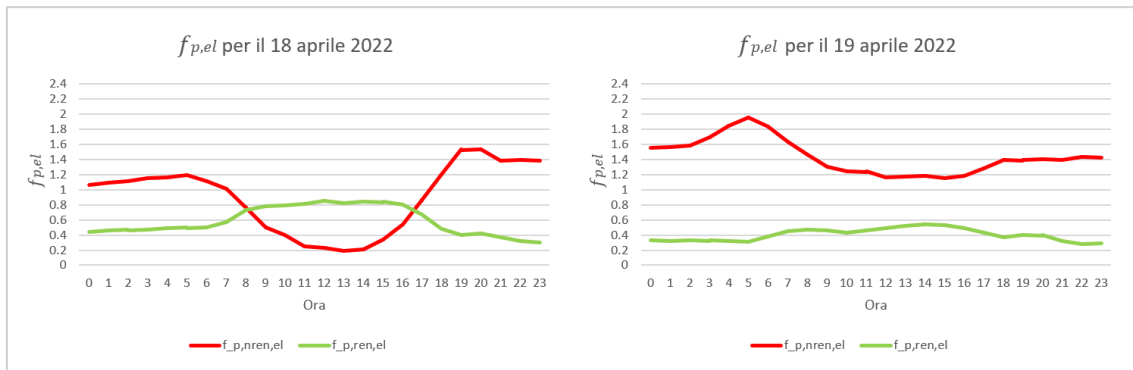


Figura 27: PEF rinnovabile e non rinnovabile del 18 aprile 2022 (a) e 19 aprile 2022 (b)

Anche guardando gli andamenti dei PEF rinnovabile e non rinnovabile nel corso del 18 (a) e 19 aprile (b) si può notare come essi assumano valori e andamenti completamente differenti tra loro. Tutto ciò è collegato con quanto detto per quanto concerne i profili di carico. Infatti, prendendo in considerazione il giorno di Pasquetta, si osserva come i valori assunti dal carico siano relativamente bassi, per i motivi già spiegati in precedenza. Questo fa sì che la produzione di energia elettrica da parte delle fonti rinnovabili riesca a coprire quasi totalmente la domanda energetica nel corso delle ore centrali della giornata, rendendo necessaria una bassa partecipazione delle fonti non rinnovabili nel processo di generazione elettrica. Tutto ciò comporta che la percentuale maggiore di energia prodotta venga da fonti rinnovabili, facendo sì che la maggior parte del carico sia coperto da questo contributo, portando ad incrementare il valore del PEF rinnovabile.

Per quanto riguarda quello non rinnovabile invece si hanno valori molto bassi nel corso della parte centrale della giornata, in quanto non è necessaria una grossa produzione di energia proveniente da queste fonti rendendo basso il valore del PEF corrispondente.

Se si osserva invece il giorno del 19 aprile, essendo i valori assunti dal carico maggiori rispetto a quelli del giorno precedente, si hanno valori dei PEF nettamente differenti. Infatti, nelle ore diurne l'energia richiesta assume valori più alti, facendo sì che la produzione delle fonti rinnovabili non riesca a raggiungere la stessa percentuale di copertura del 18 aprile, rendendo necessaria una grossa

produzione di energia da fonti non rinnovabili. Di conseguenza si osserva un valore del PEF rinnovabile più costante nell'arco dell'intera giornata ma con valori più bassi rispetto a quelli del giorno precedente; invece, il PEF non rinnovabile assume valori maggiori, in quanto su di esso ricade la necessità di produrre il gap di energia per colmare il divario tra energia prodotta da fonti rinnovabili e il carico richiesto.

6.4. Risultati dell'analisi di clusterizzazione

Dopo aver visualizzato e studiato il legame che è presente tra il PEF rinnovabile e quello non rinnovabile, si prosegue l'analisi dei risultati ottenuti cercando di capire da quali fattori dipendano i valori dei PEF nel corso dell'anno preso in studio. Questo è possibile applicando un'analisi di clusterizzazione per ricercare cluster differenti, ognuno dei quali contiene profili di PEF giornalieri simili tra loro.

L'obiettivo di tale analisi è proprio quello di andare ad analizzare i profili giornalieri dei PEF di tutto il 2022 ricavati nel paragrafo 6.2 in modo tale da distinguere profili simili tra loro, che apparterranno ad un cluster, da quelli dissimili, che saranno collocati in altri cluster.

Di notevole importanza è capire su quale base questi profili possano essere affiliati ad un cluster rispetto ad un altro, attraverso la costruzione di un albero di classificazione. In questo modo, semplicemente essendo a conoscenza di alcune variabili influenzanti, si riesce a capire dove poter collocare un nuovo profilo giornaliero di PEF. Tutto ciò risulta essere importante nel caso in cui si decida di usare i risultati ottenuti per un'analisi predittiva, come svolto nel paragrafo successivo 6.5, in cui semplicemente essendo a conoscenza delle variabili influenzanti su cui è costruito l'albero di classificazione, si riesce a prevedere un profilo giornaliero di PEF.

6.4.1. Preparazione del set di dati per l'analisi

Prima di entrare nel vivo dell'analisi, è stato calcolato con dettaglio orario il valore percentuale di PEF rinnovabile e non rinnovabile che vanno a costituire quello totale, riportando il tutto nella Figura 28. In funzione dei valori in percentuale sono stati valutati i cluster tipologici che rappresentano al meglio i risultati ottenuti.

Questo passaggio viene svolto per andare a normalizzare i profili giornalieri dei PEF, in modo tale che per ogni ora dell'anno la somma della percentuale del PEF rinnovabile con quella del PEF non rinnovabile sia sempre pari al 100%. In questo modo si ottiene che ogni profilo giornaliero del PEF rinnovabile sarà complementare a quello del PEF non rinnovabile. Facendo così un cluster ottenuto dall'analisi dei profili dei PEF rinnovabili conterrà tutti i profili complementari di un cluster ottenuto dalla clusterizzazione dei profili dei PEF non rinnovabili. Questo risultato non sarebbe ottenibile se invece non fosse effettuata questa normalizzazione.

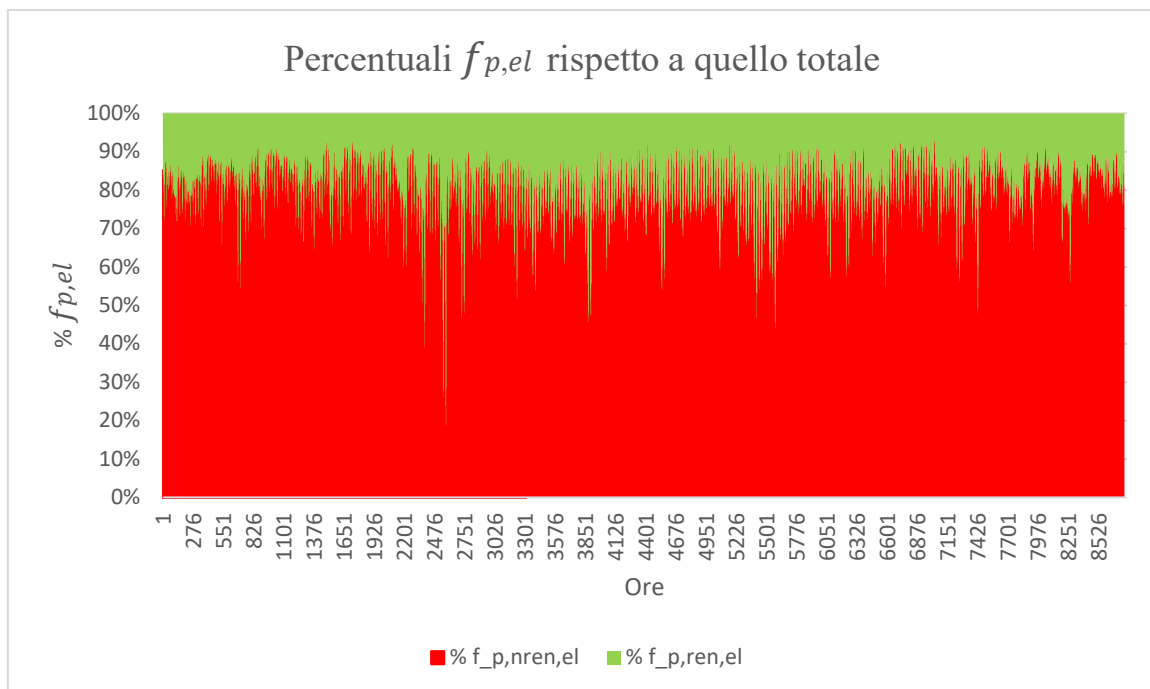


Figura 28: Percentuali PEF rinnovabile e non rinnovabile rispetto a quello totale

Osservando il grafico nella Figura 28 si nota come, nel corso dell'intero anno, la percentuale del PEF orario rinnovabile e, di conseguenza, di quello non rinnovabile è variabile. Detto ciò si è deciso comunque di andare a ricavare un valore medio sull'intero anno, scoprendo che il contributo medio del PEF rinnovabile su quello totale è pari al 18,8% e che, conseguentemente, quello del PEF non rinnovabile è pari al 81,2%.

Dopo aver effettuato questa valutazione preliminare, che tornerà utile durante l'analisi dei cluster, si è deciso di ricavare un grafico simile, rappresentando però la media per ogni ora al posto di tutti i valori annuali, riportato nella Figura 29.

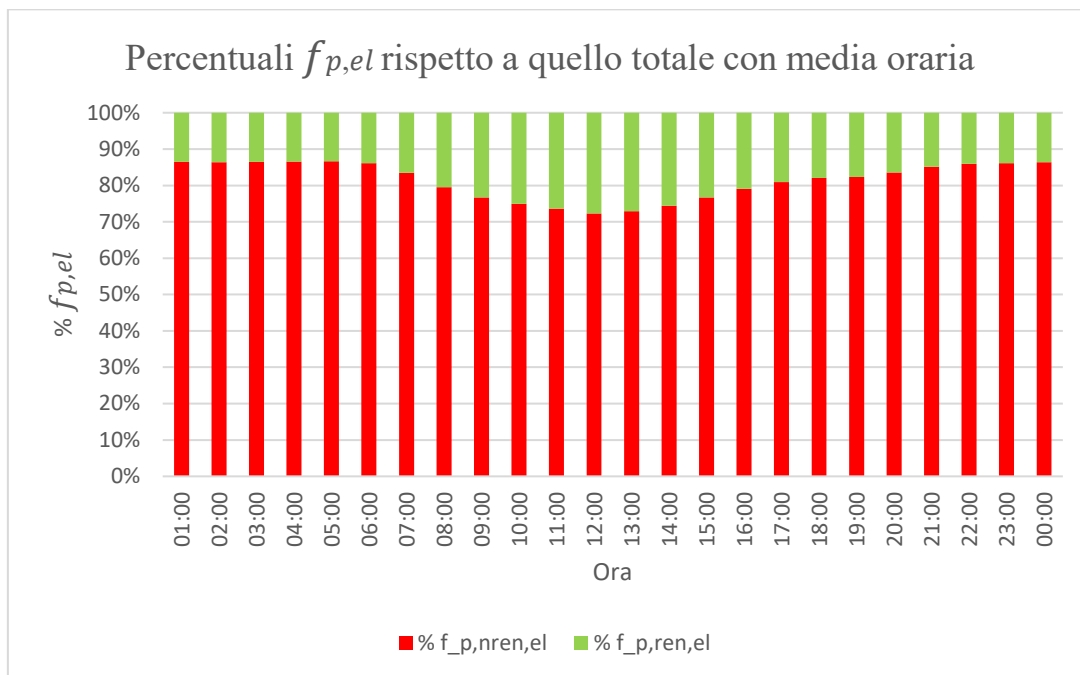


Figura 29: Percentuali del PEF rinnovabile e non rinnovabile con media oraria

Da questo grafico nella Figura 29, pur non essendo più visibile la variabilità stagionale, si riesce a intuire meglio come sia l'andamento medio delle percentuali già citate precedentemente. Infatti, come ci si aspetta e come già visto dal grafico precedente, la percentuale maggiore che compone il PEF totale è da attribuire al contributo non rinnovabile. Inoltre, si può notare come la percentuale del PEF rinnovabile sia maggiore nelle ore diurne con un picco massimo alle ore 12 del

27,7% mentre sia poi quasi costante durante le ore notturne. Tutto ciò è nuovamente spiegabile sapendo che la producibilità delle fonti rinnovabili aumenta sensibilmente nel momento in cui è presente la radiazione solare, che consente alla produzione fotovoltaica di contribuire alla generazione rinnovabile complessiva.

Terminata la preparazione del set di dati, si può quindi effettuare l'analisi per cercare di individuare profili tipologici delle percentuali dei PEF nel corso dell'anno in studio.

6.4.2. Metodologia alla base dell'analisi di clusterizzazione

I dati appena ricavati nella sezione 6.4.1 saranno alla base dell'analisi di clusterizzazione, svolta grazie all'utilizzo del software Rstudio. Questa ha come scopo quello di analizzare e divide un determinato set di dati in gruppi differenti, in modo tale che siano raggruppati in un cluster "oggetti" simili tra loro e che quelli dissimili finiscano in altri cluster. Nel caso in studio l'obiettivo è quello di creare gruppi di profili giornalieri dei PEF simili tra loro.

Con i dati a disposizione sarà necessario creare una matrice di dimensioni $m \times n$ dove le righe m rappresenteranno tutti i giorni dell'anno 2022 e le colonne n saranno le varie ore della giornata. Partendo da qui, per capire se due profili possano considerarsi simili o meno, è necessario andare a ricavare una matrice delle distanze euclidee che quindi conterrà le distanze che ogni profilo ha dagli altri.

Successivamente, attraverso l'adozione di un clustering gerarchico di tipo aggregativo, sarà possibile trovare dei cluster senza doverne imporre a priori il numero. Inizialmente tutti i profili apparterranno ad un cluster differente, dopo di che questi saranno aggregati progressivamente fino ad avere un unico cluster che conterrà tutti i profili dei PEF del 2022. Questa aggregazione è effettuata utilizzando il metodo ward.D2 che va a minimizzare l'incremento della devianza

standard mano a mano che i profili si aggregano nello stesso cluster. Il raggruppamento progressivo viene descritto da un dendogramma, un albero rappresentativo di come si uniscono i vari cluster.

Il passo successivo ricade nell'individuare il punto migliore in cui effettuare il "taglio" del dendogramma, cioè la ricerca del numero di cluster migliore per il problema in analisi. L'operazione di taglio deriva dalla valutazione di più indici, alcuni grafici ed altri numerici, che individuano il numero ottimale di cluster.

Questi danno risultati differenti, rendendo necessario scegliere come numero di cluster corretto quello che viene indicato da più indici.

È quindi ora possibile assegnare ad ogni profilo giornaliero dei PEF il suo cluster di appartenenza. Con questa informazione si prosegue costruendo un albero di classificazione in modo da capire su che base un profilo giornaliero dei PEF sia assegnato ad un cluster rispetto ad un altro. Questo è possibile assegnando ad ogni giorno del 2022 le sue variabili influenzanti, informazioni sulle quali viene costruito l'albero. Perché la costruzione dell'albero sia corretta si deve inserire un criterio di controllo in modo tale che arrivato ad un determinato punto esso non si sviluppi più. In questo caso viene fissato il numero minimo di profili che possono essere presenti in un nodo dell'albero a 10.

6.4.3. Risultati della clusterizzazione

Avendo a disposizione i dati e avendo compreso il meccanismo della clusterizzazione, si sono innanzitutto analizzati i dati riguardanti i PEF non rinnovabili. A partire dai profili percentuali giornalieri del PEF non rinnovabile, seguendo quanto descritto nel paragrafo precedente, il paragrafo 6.4.2, si è ottenuto che, per la maggior parte degli indici calcolati, il numero ideale di cluster è pari a 2, individuati dai due seguenti profili nella Figura 30.

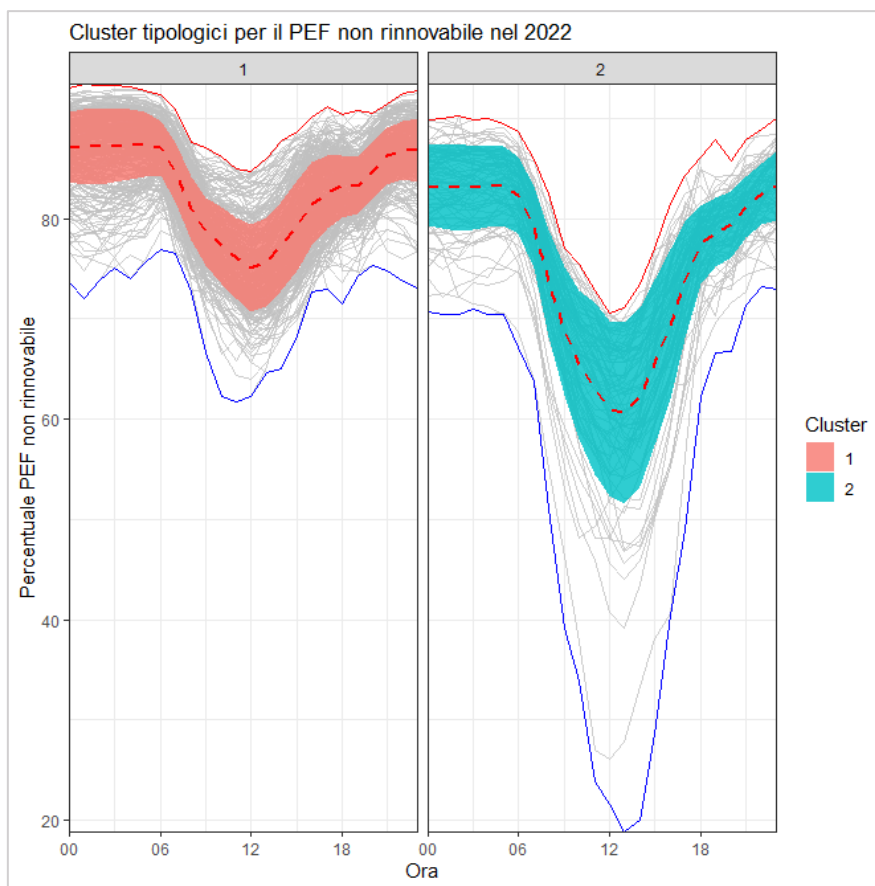


Figura 30: Cluster per il PEF non rinnovabile per l'anno 2022

Dalla figura 30 si possono notare diversi elementi, tra cui le linee rappresentate in grigio che sono tutti i profili delle percentuali del PEF non rinnovabile che appartengono a quel determinato cluster, le linee tratteggiate che indicano il profilo del PEF medio (il centroide), calcolato a partire da tutti i profili appartenenti a quel cluster, i valori minimi che sono indicati attraverso la curva di colore blu, i valori massimi che sono indicati dalla linea di colore rosso e le due bande colorate che stanno ad indicare le deviazioni standard calcolate sulla base dei dati a disposizione.

Dopo aver inquadrato il significato di cosa è rappresentato nel grafico, si può andare ad osservare come i profili individuati siano sostanzialmente differenti tra loro, con il cluster 1 che raccoglie profili delle percentuali con una variazione dei valori nel corso della giornata nettamente minore rispetto a quella che è presente nel cluster numero 2.

Di interesse ora è andare a capire su che base sia stato valutato il numero di cluster ideali e sulla base di quali variabili è possibile eseguire la distinzione tra i vari profili percentuali del PEF non rinnovabile. Per questo motivo è stato realizzato un albero di classificazione che in input riceve le variabili influenzanti relative alla tipologia del giorno, feriale o festivo, e la stagione di tutti i giorni del 2022 e, conoscendo l'output desiderato, cioè i cluster ottenuti in precedenza, gli si chiede sulla base di quale variabile conviene eseguire uno split per ottenere la distinzione finale con la minimizzazione dell'errore. L'albero ottenuto viene riportato nella seguente Figura 31.

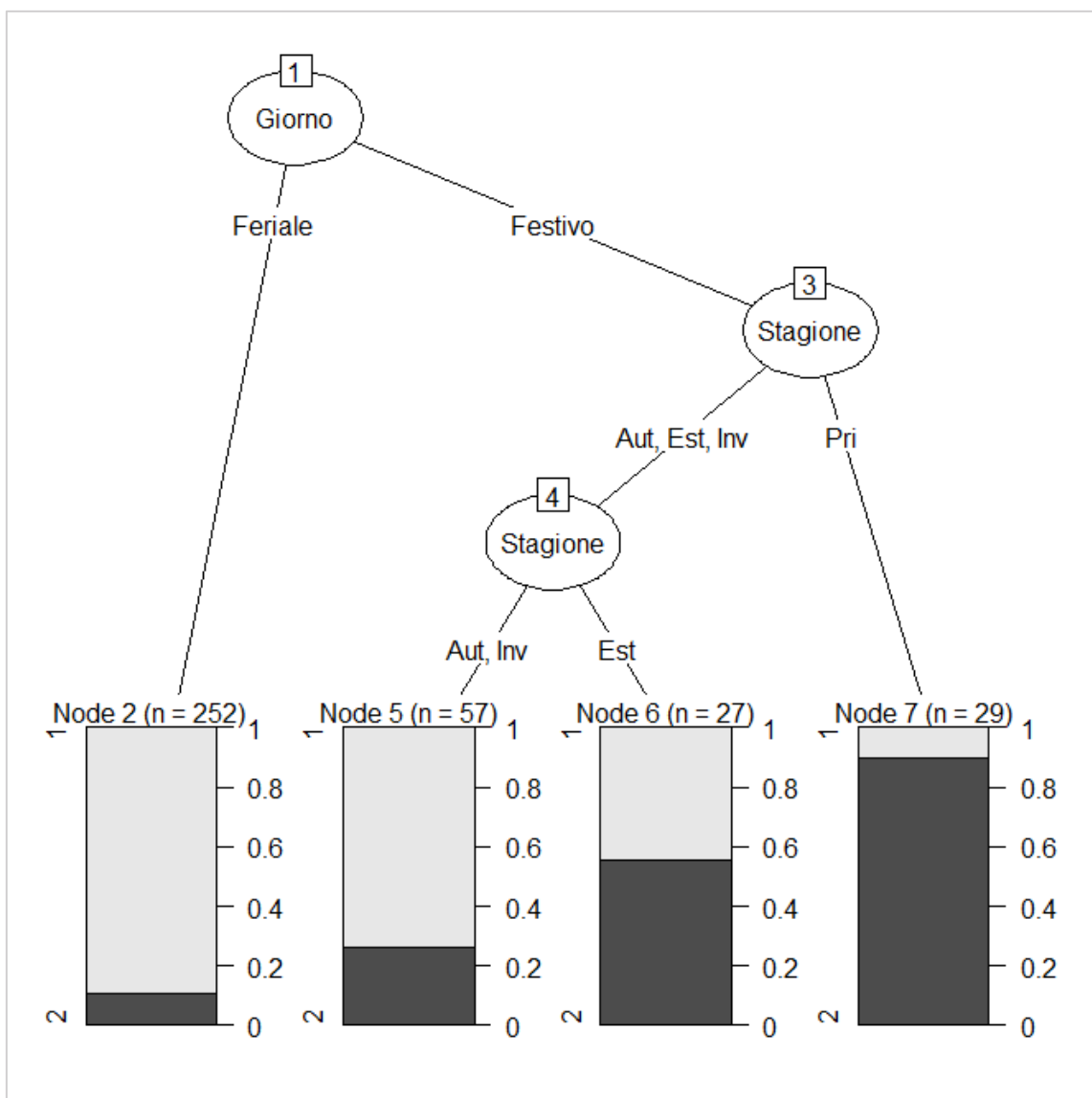


Figura 31: Albero di classificazione per il PEF non rinnovabile del 2022

Osservando l'albero di classificazione ottenuto si può notare che il primo split viene effettuato rispetto alla tipologia del giorno, individuando quindi come caratteristico dei giorni feriali il cluster numero 1, con una minore variabilità, come era già emerso dal paragrafo 6.3.1 per il giorno del 19 aprile (Figura 27). Dopo di che l'albero prevede invece altri due split per quanto riguarda i giorni festivi, individuando che, durante la stagione della primavera il profilo tipologico sia quello presentato dal cluster numero 2; per quanto riguarda invece le altre tre stagioni il modello presenta un'incertezza nell'attribuire il corretto cluster, in quanto alla stagione autunnale e a quella invernale attribuisce circa il 75% dei profili al cluster numero 1 e la restante parte al cluster 2. Contrariamente per la stagione estiva attribuisce circa il 55% dei profili al cluster 2 e la frazione rimanente al cluster 1.

Queste incertezze sono dovute alla bassa quantità di variabili influenzanti su cui è costruito l'albero che non riesce ad avere precisione massima in quanto non ha sufficienti informazioni.

Detto ciò il modello costruito si può comunque ritenere buono in quanto è caratterizzato da un'accuratezza del 84% e una precisione nel collocare i profili nei cluster corretti del 95%.

Dopo di che ci si sposta ad effettuare la stessa analisi per le percentuali del PEF rinnovabile, che saranno complementari rispetto ai risultati appena presi in considerazione. La procedura seguita è la stessa che è già stata descritta per il PEF non rinnovabile. Anche in questo caso, essendo i valori complementari, il modello restituisce un numero di cluster ideale per minimizzare l'errore pari a due, come si può evincere dalla Figura 32.

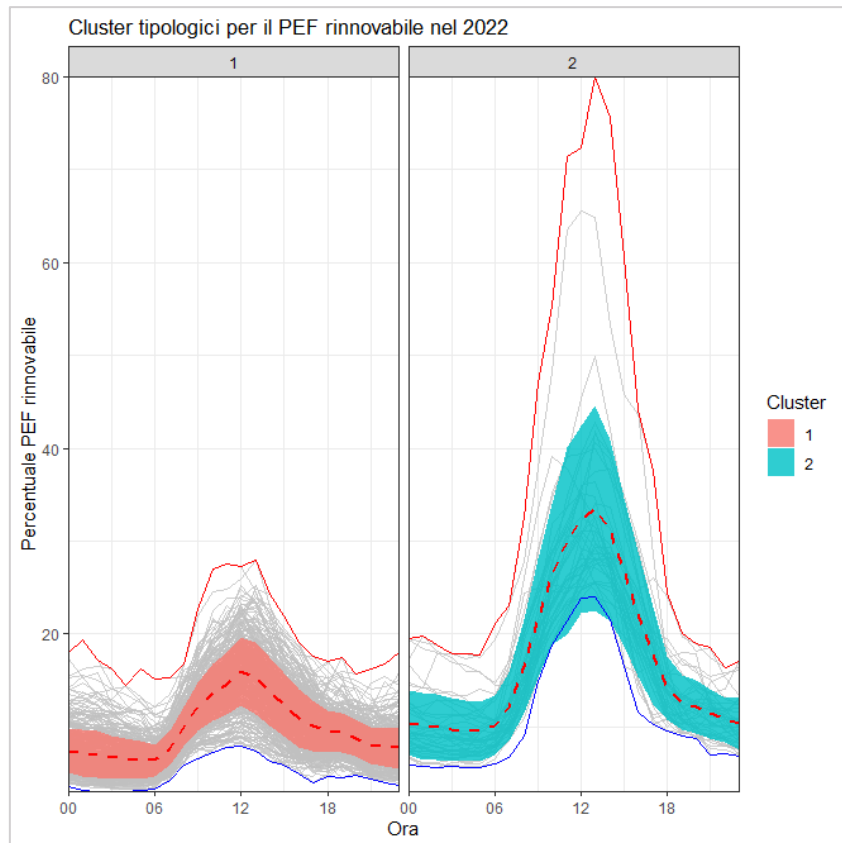


Figura 32: Cluster per il PEF rinnovabile per l'anno 2022

Quindi, come previsto, i due cluster ottenuti rappresentano la stessa situazione precedentemente vista per il PEF non rinnovabile, individuandone quindi uno con una variabilità nel corso della giornata più bassa e l'altro con variabilità decisamente maggiore. Avendo questi cluster a disposizione si ricostruisce nuovamente un albero di classificazione con le stesse variabili influenzanti e come output i cluster appena trovati, rappresentato nella Figura 33.

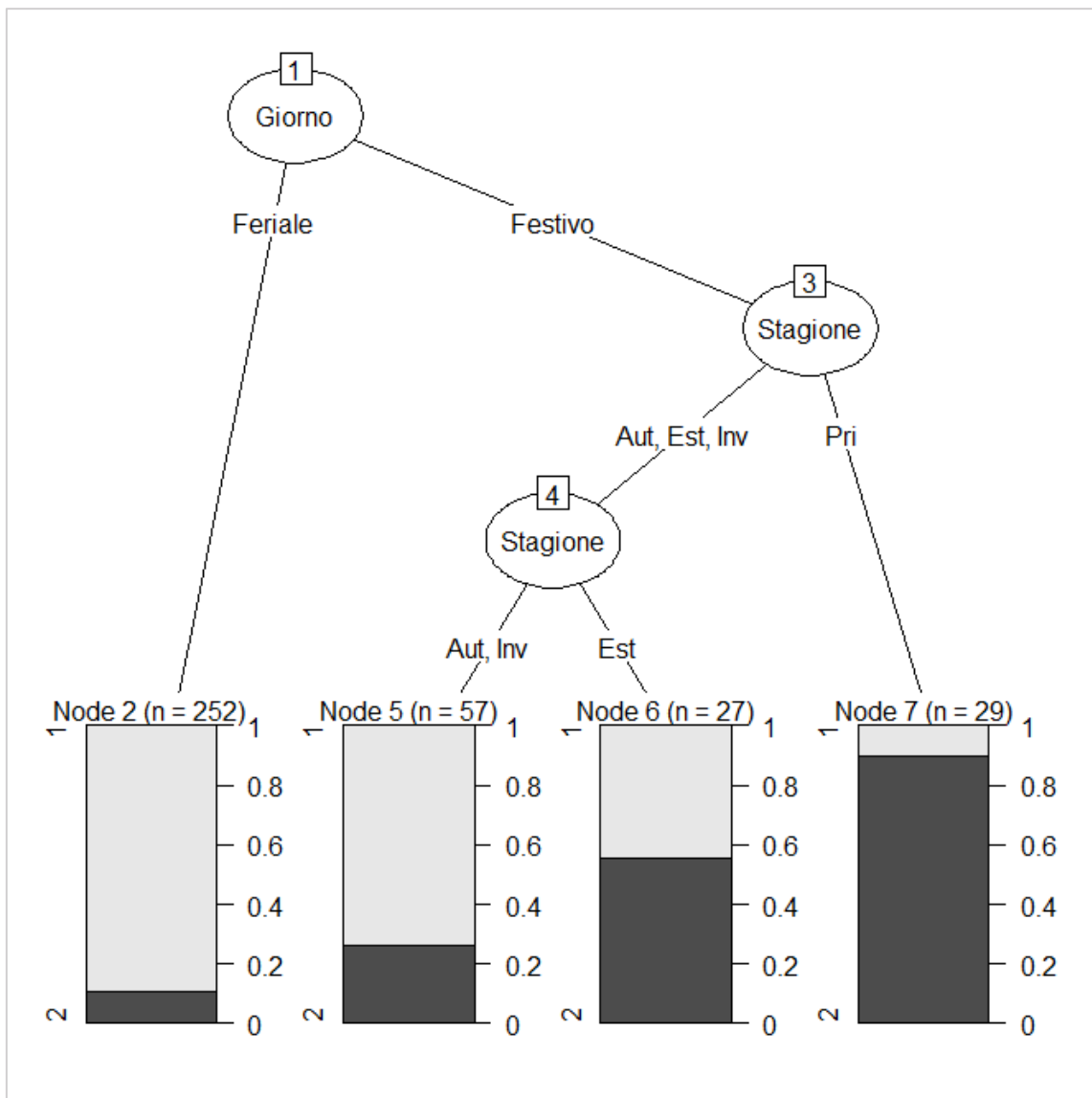


Figura 33: Albero di classificazione per il PEF rinnovabile dell'anno 2022

Come previsto si ottiene lo stesso albero riportato nella Figura 31, con la stessa accuratezza e precisione.

In conclusione si può dire che il modello derivato dall'analisi di clusterizzazione dia risultati molto buoni e, nonostante le poche variabili influenzanti disponibili ed utilizzate, si sono ottenuti risultati con un ottimo grado di precisione, riuscendo ad individuare due profili tipologici che possono tornare utili anche per previsioni future su dei possibili valori assunti dai PEF in una determinata giornata, semplicemente essendo a conoscenza della tipologia di giornata e della stagione in cui ci si trova.

Per verificare quanto detto sulla bontà del modello si è deciso di dedicare il paragrafo successivo alla validazione del modello costruito, per capirne il reale grado di precisione in ottica di previsione dei dati.

6.5. Risultati dell'analisi predittiva

Dopo aver sfruttato la clusterizzazione per individuare i profili tipologici e aver costruito l'albero di classificazione per capire quali giorni sia più corretto attribuire ad un cluster rispetto all'altro, ci si chiede se questo modello costruito sui dati del 2022 possa ritenersi valido se applicato a dati differenti e che rilevanza possa assumere l'errore percentuale tra i valori ottenuti analiticamente rispetto a quelli predetti attraverso l'applicazione dei risultati ottenuti dall'analisi appena svolta.

Per effettuare questa verifica si sono utilizzati i dati dei primi sei mesi del 2023 resi disponibili da Terna. Questi sono della stessa natura di quelli utilizzati per il calcolo dei PEF nella parte antecedente della tesi, con dati relativi alla produzione nazionale, all'import, all'export e ai carichi richiesti dagli utilizzatori finali.

Per rendere possibile questo tipo di valutazione, da ognuno dei cluster trovati, sia per il PEF non rinnovabile sia per quello rinnovabile, si sono estratti gli andamenti dei profili medi percentuali, rappresentati nelle Figure 34 e 35 e già individuati nelle Figure 30 e 32.

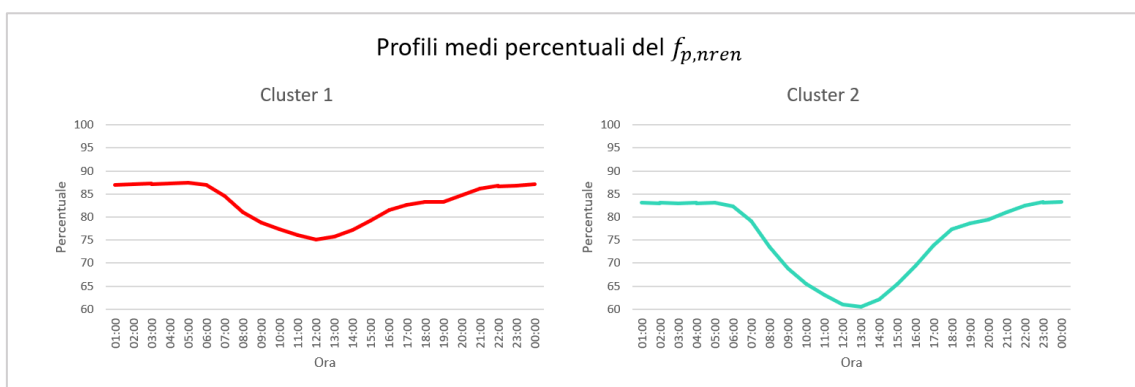


Figura 34: Profili medi percentuali del PEF non rinnovabili: cluster 1 (a) e cluster 2 (b)

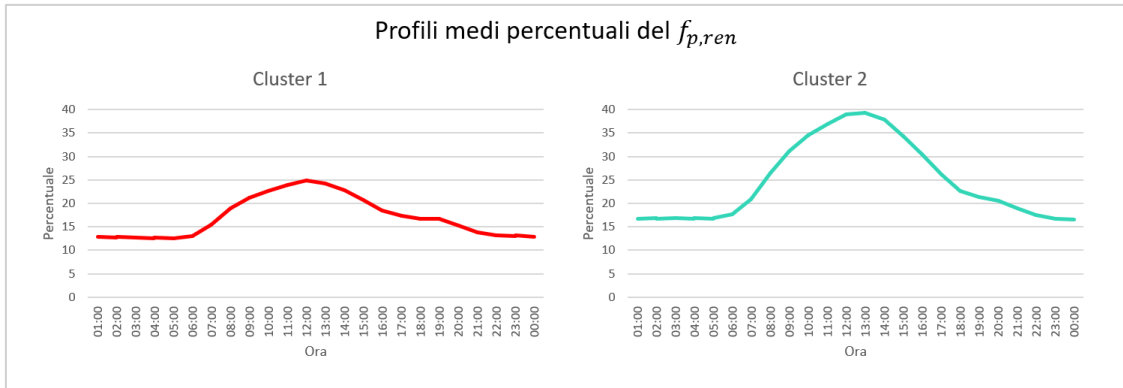


Figura 35: Profili medi percentuali del PEF rinnovabile: cluster 1 (a) e cluster 2 (b)

Come si può osservare dalle Figure 34 e 35 e come già detto nel paragrafo precedente, i profili dei PEF medi percentuali relativi alla quota non rinnovabile sono complementari rispetto a quelli rinnovabili.

Trovando i valori dei profili medi di ogni cluster è ora possibile utilizzarli per andare ad effettuare una previsione di quelli che sono i valori dei PEF per i primi sei mesi del 2023. Infatti si confronteranno i risultati ottenuti con i valori reali calcolati, in modo tale da ricavare l'errore celato dietro questa approssimazione.

Per iniziare, sono stati calcolati i PEF orari rinnovabile e non rinnovabile per il 2023, seguendo le stesse ipotesi e le linee guida presentati nei paragrafi 5.1 e 5.2, in modo da ottenere i valori reali su cui poi poter effettuare le valutazioni successive.

Dopo di che si sono attribuite ad ogni giorno dal 1° gennaio al 30 giugno del 2023 le variabili influenzanti utilizzate durante la costruzione dell'albero di classificazione, cioè la tipologia di giornata e la stagione. In questo modo si è attribuito ai giorni feriali il profilo medio percentuale del cluster 1, come ai giorni festivi autunnali e invernali, e il profilo medio percentuale del cluster 2 ai giorni festivi estivi e primaverili. Effettuando questa distinzione si è seguito quanto è emerso dall'analisi dall'albero di classificazione.

Una volta che ogni giorno disponibile del 2023 è stato “etichettato” nel modo corretto e, conseguentemente, gli è stato attribuito il corrispondente profilo medio percentuale, sia per il PEF rinnovabile sia per quello non rinnovabile, è stato possibile ricavare i valori dei PEF approssimati. Questa operazione è stata effettuata sviluppando tre valutazioni differenti.

Nel primo caso i profili medi percentuali, ottenuti durante l’analisi di clusterizzazione, sono stati moltiplicati per il valore del PEF totale proposto dal DM Requisiti Minimi del 2015, cioè 2,42. Con i risultati ottenuti, è quindi interessante andare ad osservare l’ammontare dell’errore nel caso in cui si utilizzassero questi valori rispetto a quelli calcolati analiticamente, come presentato nelle Figure 36 e 37.

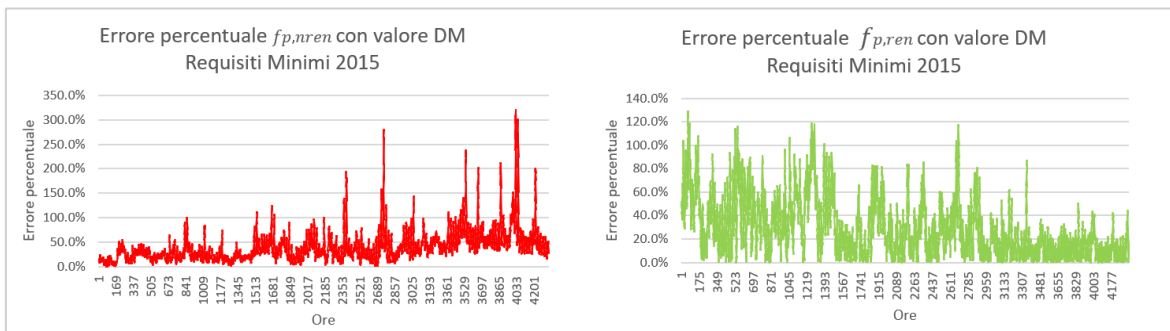


Figura 36: Errore percentuale dei PEF non rinnovabile (a) e rinnovabile (b) con il valore del DM del 2015

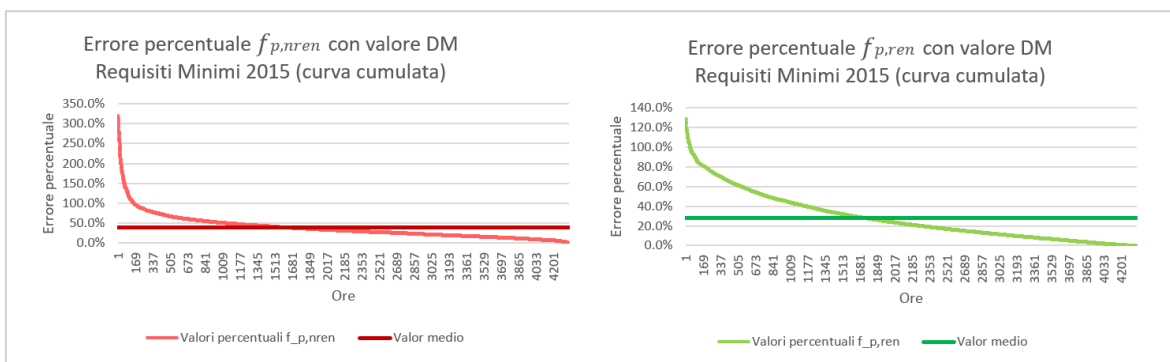


Figura 37: Errore percentuale dei PEF non rinnovabile (a) e rinnovabile (b) con il valore del DM del 2015 (curve cumulate)

Si può notare come nella Figura 36 siano riportati gli errori percentuali tra i valori reali calcolati e quelli approssimati utilizzando il valore prescritto dal DM Requisiti Minimi del 2015. Questi, nel corso dei sei mesi in studio, presentano valori molto differenti tra di loro, evidenziando come in alcuni giorni l'approssimazione possa ritenersi quasi perfetta e come in alcuni altri gli errori abbiano magnitudini molto elevate, facendo sì che l'approssimazione non sia per nulla buona. La Figura 37 consente di osservare come si distribuiscano questi valori rispetto al valor medio dell'errore che, durante il corso dei primi sei mesi del 2023, è pari al 39,2% per il PEF non rinnovabile e al 28,4% per quello rinnovabile.

Fatta questa considerazione ci si chiede se, al posto di adoperare il valore proposto dal Decreto Ministeriale del 2015 si utilizzasse il valore del PEF totale medio dell'anno precedente, calcolato in precedenza, l'errore possa ridursi, essendo un valore più vicino a quelli utilizzati per la creazione dei profili medi percentuali. Questo valore, come già detto nella sezione 6.2, è pari a 1,85.

Quindi, seguendo lo stesso processo evidenziato in precedenza, sono stati moltiplicati i profili medi percentuali assegnati ad ogni giorno, secondo quanto descritto dall'albero di classificazione, con il valore del PEF totale di 1,85.

Adottando questo valore si ottengono i seguenti errori percentuali, riportati nelle Figure 38 e 39.

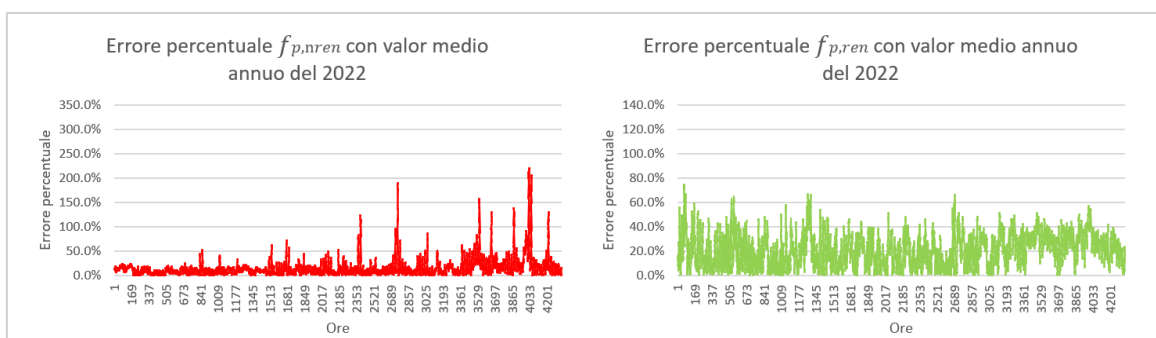


Figura 38: Errore percentuale dei PEF non rinnovabile (a) e rinnovabile (b) con valor medio del PEF totale 2022

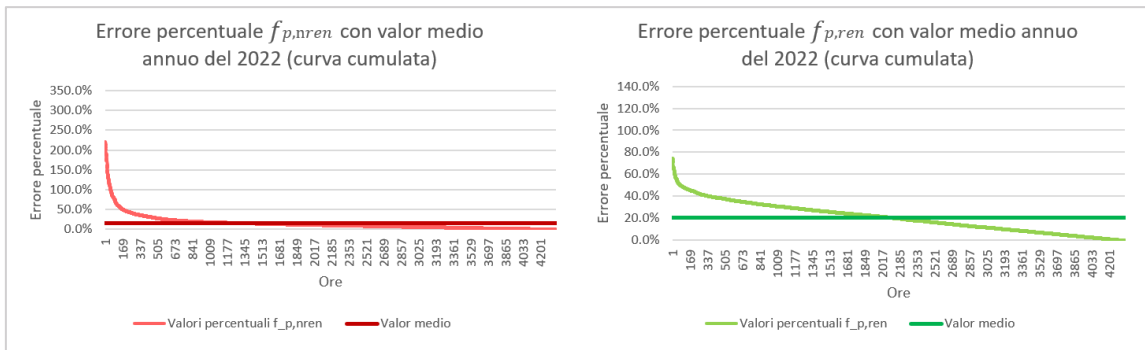


Figura 39: Errore percentuale dei PEF non rinnovabile (a) e rinnovabile (b) con il valor medio del PEF totale del 2022 (curve cumulate)

Dalla Figura 38 si può notare come, utilizzando un valore minore del PEF totale rispetto al caso precedente, gli errori nel corso della prima parte del 2023 siano diminuiti notevolmente con i picchi massimi che sono calati vistosamente. Passando nuovamente alla valutazione di quello che è l'errore medio dei due PEF nel corso del periodo gennaio-giugno 2023, si riscontra che, come osservabile dalla Figura 39, l'errore medio per il PEF non rinnovabile è sceso al 15,3% e per il PEF rinnovabile al 20,9%, entrambi valori molto buoni.

Infine, cercando di effettuare una valutazione ancor maggiormente dettagliata, si è deciso di non utilizzare il valor medio annuo del PEF totale del 2022 ma di moltiplicare i profili medi percentuali attribuiti ad ogni giorno con la rispettiva media mensile dei valori del PEF totale del 2022. Seguendo questo approccio è stato necessario calcolare questi valori medi per i mesi che vanno da gennaio a giugno, in modo da poterli applicare al set di dati del 2023; questi sono riportati nella Tabella 7.

Tabella 7: PEF totale medio mensile del 2022

Mese	PEF totale medio mensile del 2022
Gennaio	1.82
Febbraio	1.89
Marzo	1.88
Aprile	1.78
Maggio	1.84
Giugno	1.82

Utilizzando questi dati in funzione del relativo giorno in analisi è stato possibile nuovamente ricavare gli errori percentuali medi nel corso dei sei mesi in studio, rappresentati nelle Figure 40 e 41.

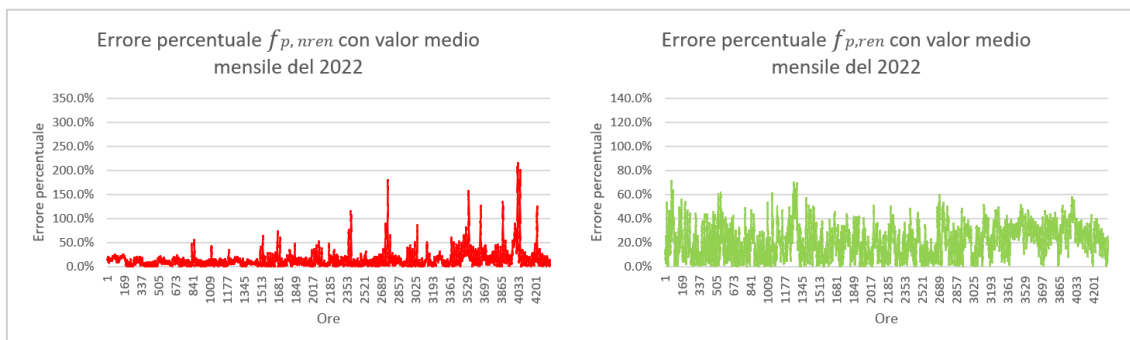


Figura 40: Errore percentuale dei PEF non rinnovabile (a) e rinnovabile (b) con media mensile del PEF totale del 2022

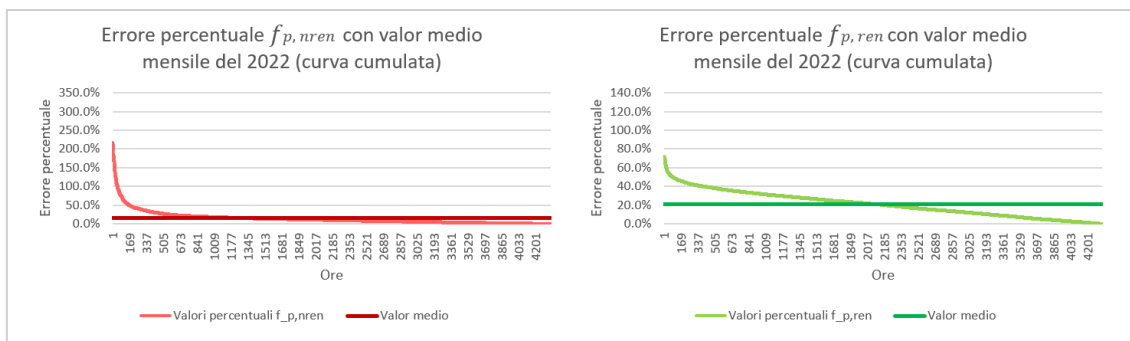


Figura 41: Errore percentuale dei PEF non rinnovabile (a) e rinnovabile (b) con media mensile del PEF totale del 2022 (curve cumulate)

In questo caso, come si può osservare dalla Figura 40, non è presente una sostanziale differenza rispetto al caso precedente. Infatti, nonostante i valori mensili siano differenti, a volte maggiori a volte minori rispetto al valor medio annuo, non si discostano in maniera tale da quest'ultimo da generare una grande differenza.

Infatti anche analizzando i valori medi dell'errore percentuale visibili nella Figura 41 si scopre che per il PEF non rinnovabile l'errore medio è pari al 15,0% e per quello rinnovabile è del 21,1%. Detto ciò sembra comunque più corretto utilizzare i valori medi mensili da accoppiare ai profili medi percentuali ricavati dall'analisi di clusterizzazione.

Facendo una considerazione aggiuntiva si può dire che gli errori percentuali sono fortemente influenzati da pochi giorni in cui il valore di questi è molto elevato, in tutte e tre le casistiche presentate. Questi giorni sono in particolar modo giorni festivi primaverili e estivi in cui i profili del PEF rinnovabile raggiungono percentuali molto elevate e, di conseguenza, quelli del PEF non rinnovabili percentuali basse. Questi sono inseriti all'interno del secondo cluster, caratteristico dei giorni con grossa variabilità, nonostante si possa notare che questi profili si discostino notevolmente da quello medio, come osservabile dalle Figure 30 e 32. Quindi, ipotizzando di creare in modo "artificiale" un terzo cluster in cui inserire questi pochi giorni, si riuscirebbe a prevedere in modo più accurato i PEF di questi giorni, che portano ad errori in alcuni casi anche superiori al 200%. Questo migliorerebbe di certo l'accuratezza della previsione dei valori per la prima metà del 2023, rendendo l'errore percentuale medio più basso e ancor più sorprendenti i risultati ottenuti in questo paragrafo.

In conclusione si può dire che il modello derivato dall'analisi di clusterizzazione e dal relativo albero di classificazione può ritenersi valido, nonostante non sia in grado di prevedere sempre il valore corretto dei PEF orari, dovuto alle poche variabili influenzanti considerate e ai pochi dati su cui è stato costruito il modello, relativi al solo anno 2022. Infatti se questo fosse arricchito attraverso altre variabili influenzanti, porterebbe sicuramente ad ottenere risultati più simili a quelli

calcolati analiticamente. Nonostante ciò il modello consente in maniera abbastanza intuitiva di localizzare un giorno nel cluster corretto e, di conseguenza, di risalire nella maggior parte dei casi ad un'approssimazione più che buona dei PEF rinnovabile e non rinnovabile.

Tutto ciò conclude l'analisi dei risultati ottenuti, consentendo, di qui in avanti, di sfruttare le informazioni acquisite per poterle applicare al caso in studio presentato nel capitolo conclusivo.

7. Caso studio

In questo capitolo si riporta l'applicazione dei fattori di energia primaria dinamici (PEF) calcolati in precedenza ad un caso studio, per valutare l'effettivo risparmio di energia primaria che consegue all'utilizzo di questi valori al posto di quelli statici previsti dal DM Requisiti Minimi del 2015. Per avere a disposizione i dati da usare per l'applicazione dei risultati ottenuti si utilizzano quelli riguardanti il prelievo medio orario di elettricità per ogni regione di Italia, resi disponibili da ARERA [15]. Questo quindi rappresenta il consumo medio orario di elettricità da parte di tutti i consumatori di energia di una determinata regione. Per l'analisi da effettuare si è deciso di ridurre il campo della valutazione al solo Piemonte e di considerare esclusivamente i consumatori di elettricità con una potenza impegnata compresa tra 1,5 e 3 kW, in modo da simulare il consumo di un tipico edificio ad uso residenziale, tralasciando quelli con potenza maggiore e minore rispetto a questo range. Altre semplificazioni sono state fatte considerando solamente il consumo di elettricità delle abitazioni di residenti, escludendo quindi le case dei non residenti che richiedono elettricità solo in alcuni periodi dell'anno. L'ultimo aspetto da evidenziare è che sono state considerate solo le abitazioni servite da contratti di maggior tutela e non da quelli del mercato libero, in quanto presenti minime variazioni tra le due tipologie di abitazioni.

In questo modo, per ogni mese, si sono ottenuti i profili di prelievo orario medi, suddivisi in tre gruppi distinti: il primo caratteristico dei giorni feriali, il secondo del sabato e l'ultimo della domenica. Quindi sono disponibili tre profili differenti per ogni mese dell'anno, distinzione abbastanza simile a quanto riscontrato dall'analisi di clusterizzazione e dall'albero di classificazione sviluppato nel capitolo precedente.

Con queste informazioni disponibili è quindi possibile attribuire ad ogni giorno del 2022, anno sul quale sono stati calcolati tutti i PEF dinamici, il profilo di prelievo orario in modo da simulare l'assorbimento di energia elettrica di un'abitazione ad uso residenziale. Imponendo questi profili si è quindi ottenuto il profilo dell'assorbimento di elettricità per l'intero anno in analisi, come riportato nella Figura 42.

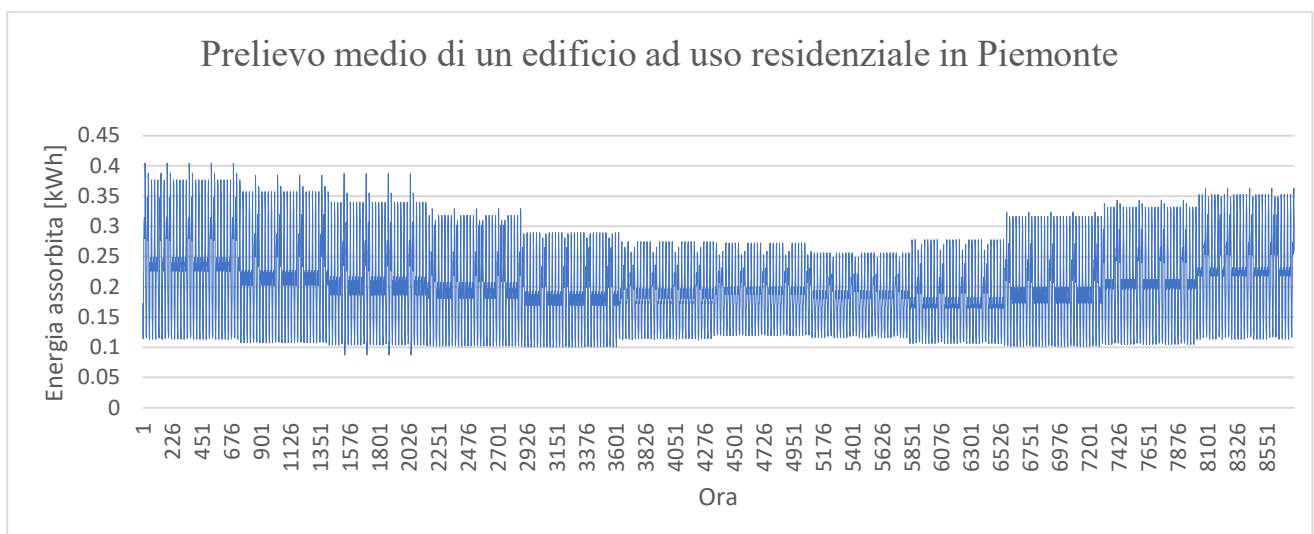


Figura 42: *Prelievo medio di un edificio ad uso residenziale in Piemonte*

Come si può notare dalla Figura 42 i profili dei prelievi orari si ripetono in maniera uguale all'interno dello stesso mese, semplicemente alternandosi tra giorni feriali, sabati e domeniche, per essere invece differenti tra un mese e l'altro. Si può osservare come il consumo di elettricità sia maggiore durante la stagione invernale con invece un consumo minore nelle ore centrali dell'anno, che corrispondono ai mesi estivi.

Avendo ora a disposizione questo profilo annuale si è potuta ricavare l'energia primaria consumata da questo edificio tipologico nel corso dell'anno in studio. Questa valutazione è stata fatta attraverso tre metodi differenti.

Nel primo caso, si sono utilizzati i valori prescritti dal DM Requisiti Minimi del 2015, suddividendo la frazione rinnovabile da quella non rinnovabile, con il PEF rinnovabile pari a 0,47 e quello non rinnovabile di 1,95.

In questo modo, utilizzando valori statici, si ottengono andamenti simili a quelli del profilo di assorbimento ma, in questo caso, rappresentano l'energia primaria consumata e non l'energia finale. Tutto ciò è riportato nella figura sottostante, la Figura 43.

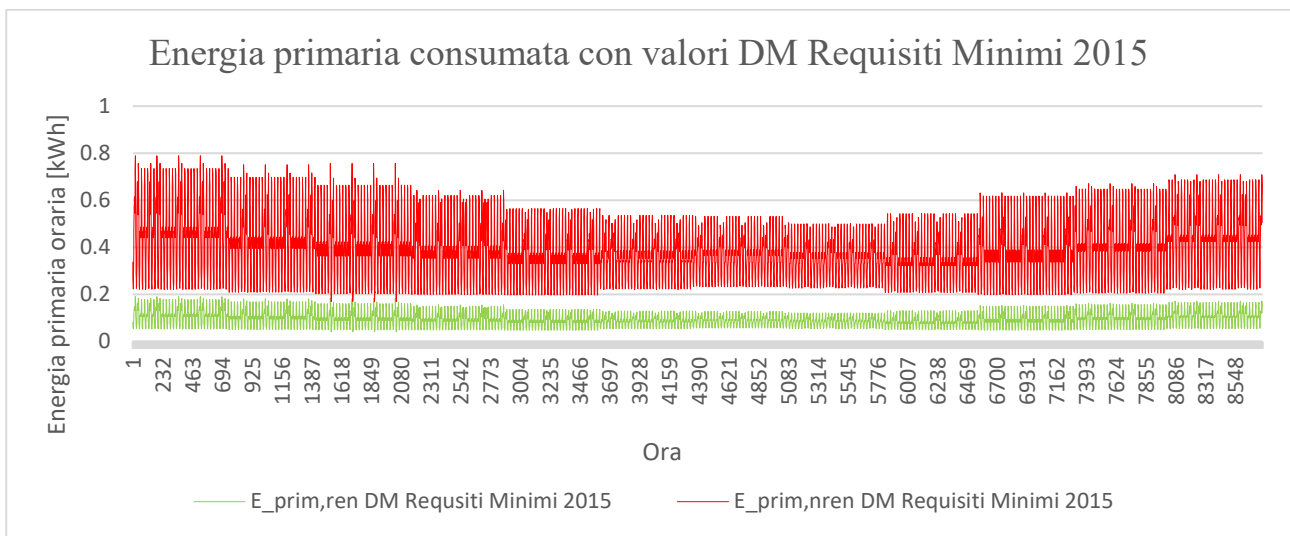


Figura 43: Energia primaria consumata con valori DM Requisiti Minimi 2015

Come già detto in precedenza, dalla Figura 43, si nota come l'andamento dell'energia primaria oraria consumata dall'edificio tipo segue l'andamento del profilo di assorbimento annuale, in quanto quest'ultimo è semplicemente moltiplicato per i due PEF previsti dal decreto ministeriale del 2015. Ovviamente quello che fa differire questo grafico rispetto a quello nella Figura 39 è la magnitudine dei risultati ottenuti. Quindi, seguendo quanto previsto dalla normativa italiana in vigore, si ottiene questo consumo di energia primaria che, andando a sommare tutti i contributi orari calcolati, è pari a 821,4 kWh per quanto riguarda quella derivata da fonti rinnovabili e 3407,7 kWh per quella derivata da fonti non rinnovabili.

Questi risultati di per sé non dicono molto ed è per questo che è necessario andarli a confrontare con quelli ottenuti utilizzando i valori calcolati seguendo la UNI EN 17423 nelle sezioni precedenti della tesi, in modo da capire di quale entità sia il risparmio di energia primaria con le valutazioni effettuate e i risultati ottenuti.

In primo luogo si procede effettuando una valutazione più grossolana, utilizzando i valori dei PEF medi, sia quello rinnovabile sia quello non rinnovabile, calcolati per il 2022. In questo modo si ottiene un risultato analogo a quello avuto utilizzando i valori previsti dal DM Requisiti Minimi 2015, come riportato nella Figura 44.

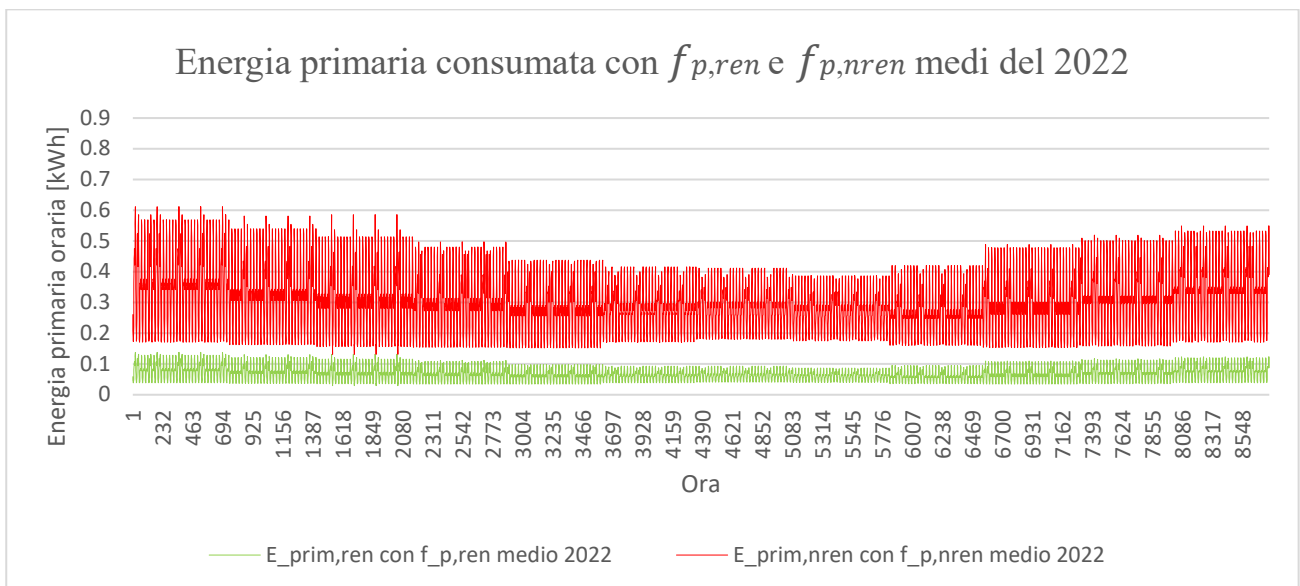


Figura 44: Energia primaria consumata con PEF medi del 2022

Quindi osservando i risultati ottenuti nella Figura 44, si evince quanto detto in precedenza, cioè il fatto che l'andamento dell'energia primaria consumata nel corso dell'anno 2022 con i valori medi calcolati è uguale a quello valutato con i PEF del DM del 2015, in quanto anche in questo caso si utilizzano due valori statici. La grande variazione che si denota tra i due risultati è la magnitudine dell'energia primaria oraria. Infatti, utilizzando valori minori di quelli previsti dalla normativa italiana, si riduce per tutte le ore dell'anno il consumo di energia primaria.

Utilizzando infatti come PEF medio annuo rinnovabile il valore di 0,34 e come PEF medio annuo non rinnovabile 1,51, è di facile intuizione capire che l'energia primaria consumata nel corso del 2022 dall'edificio tipo sia decisamente minore. Infatti, sommando tutti i valori orari calcolati per l'anno in questione, si ottiene un consumo di energia primaria legata a fonti rinnovabili di 594,2 kWh e quello legato a fonti non rinnovabili di 2638,8 kWh.

Quindi effettuando un confronto tra i risultati appena ottenuti e quelli calcolati in precedenza si arriva ad individuare un risparmio di energia primaria del 27,7% per la quota rinnovabile e del 22,6% per la frazione non rinnovabile. Se si guarda invece il risparmio complessivo è pari al 23,6%.

Quindi si ha ufficialmente il primo riscontro del risparmio che scaturisce dall'utilizzo di valori aggiornati rispetto all'applicazione di quelli previsti ed imposti dal DM del 2015. Quanto ottenuto si può considerare come un risultato con un notevole peso, in quanto fa capire che le valutazioni al giorno d'oggi sono errate e che il consumo di energia primaria valutato sia nettamente superiore rispetto a quello reale, evidenziando come circa un quarto dell'energia primaria consumata da un'abitazione tipo in realtà non sussista.

Quanto ottenuto è di particolare interesse ma non emerge il concetto di dinamicità, presente invece se si andassero ad utilizzare i PEF orari calcolati per ogni ora dell'anno. Per questo motivo l'ultima valutazione viene effettuata considerando questi valori al posto di quelli medi statici utilizzati nelle prime due casistiche. I risultati ottenuti sono riportati nella Figura 45.

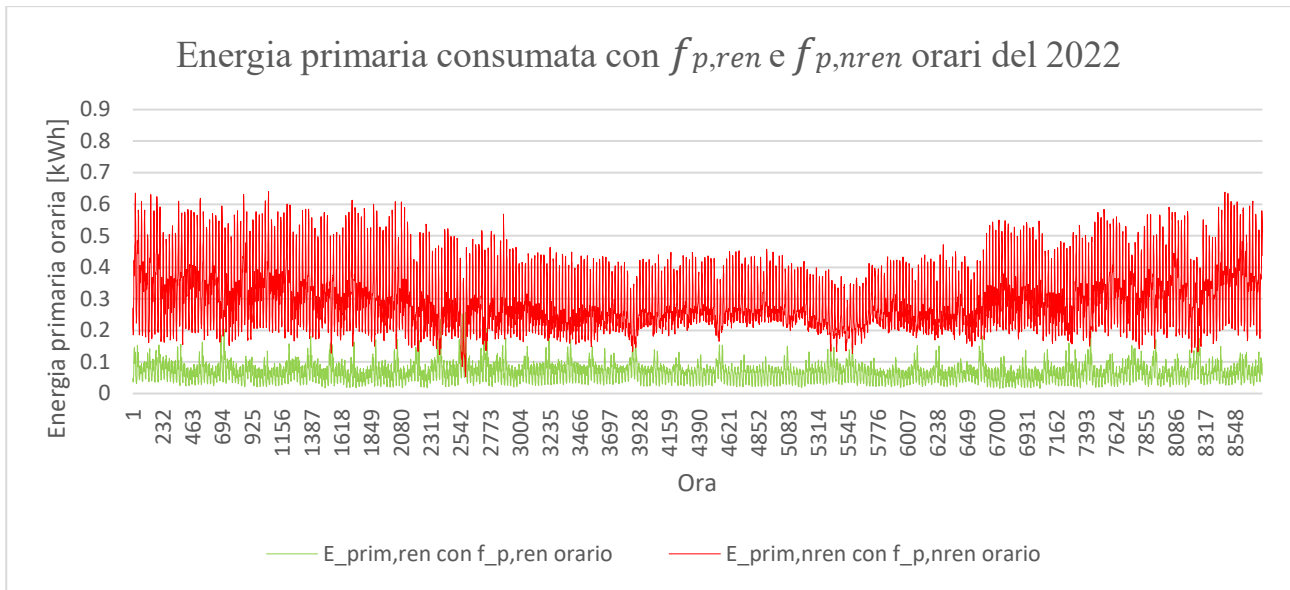


Figura 45: Energia primaria consumata con PEF orari del 2022

Come si può osservare, al contrario delle due valutazioni precedenti, non si scorge più lo stesso andamento regolare; in questo caso il valore dell'energia primaria consumata, sia legata alle fonti rinnovabili sia a quelli non rinnovabili, varia non solo in funzione del profilo di assorbimento orario del 2022 ma anche in funzione del valore assunto dai relativi PEF dinamici, contrariamente ai casi statici antecedenti. Questo rende la valutazione più attendibile rispetto alle altre due valutazioni, nonostante il consumo complessivo di energia primaria rimanga pressoché invariato rispetto alla casistica in cui sono utilizzati i valori medi annui dei PEF rinnovabile e non rinnovabile del 2022. Infatti il consumo di energia primaria legato a fonti rinnovabili è di 595 kWh e quello legato alle fonti non rinnovabili è di 2589,7 kWh.

Nella Tabella 8 sono quindi riassunti i risultati delle tre casistiche appena valutate, in modo che sia possibile effettuare delle considerazioni conclusive.

Tabella 8: tabella riassuntiva dei risultati ottenuti per il risparmio di energia primaria

Casistica	Consumo rinnovabile [kWh]	Consumo non rinnovabile [kWh]	Risparmio di energia primaria (quota rinnovabile)	Risparmio di energia primaria (quota non rinnovabile)	Risparmio di energia primaria (totale)
PEF DM Requisiti minimi 2015	821.4	3407.7	-	-	-
PEF statico 2022	594.2	2638.8	27.7%	22.6%	23.6%
PEF dinamici 2022	595.0	2589.7	27.6%	24.0%	24.7%

Da questi risultati sembrerebbe che per quanto riguarda il risultato complessivo del consumo di energia primaria in un anno non sia presente una sostanziale differenza tra la valutazione statica rispetto a quella dinamica, risultato prevedibile dall'utilizzo di valori medi annuali coerenti con i valori dinamici.

Non bisogna però dimenticare che con una valutazione dinamica si hanno risultati più corretti ora per ora, consentendo per ogni ora dell'anno, non solo di avere un'approssimazione dell'energia primaria consumata, ma anche un risultato notevolmente più preciso. Proprio per la precisione e le informazioni aggiuntive che scaturiscono dalla valutazione dinamica dei valori dei PEF, questa metodologia è stata introdotta all'interno del nuovo report sulla prestazione energetica nel settore dell'edilizia, approvato il 14 marzo del 2023 [16]. Questo documento propone infatti metodologie aggiornate per la valutazione energetica degli edifici, in modo tale da rispettare gli obiettivi riguardanti il cambiamento climatico per il 2030 e successivamente per il 2050.

Riprendendo quanto descritto nell'allegato I del report dell'UE, si trova scritto che per la valutazione delle prestazioni energetiche di un edificio ci si deve rifare alla normativa UNI EN ISO 52000-1 e per risalire all'energia primaria necessaria al calcolo di tali prestazioni sia necessario l'utilizzo di fattori di energia primaria dinamici e lungimiranti per ogni singolo vettore energetico, effettuando la determinazione di un PEF non rinnovabile, di uno rinnovabile e di quello totale, tutto ciò rifacendosi e rispettando quanto prescritto dalla norma UNI EN 17423.

Una valutazione dinamica dei PEF risulta necessaria in quanto, riprendendo l'articolo 2 di tale report, i nuovi edifici definiti come "edifici a emissioni zero" dovranno possedere un'elevata flessibilità della domanda di energia in modo da contribuire all'ottimizzazione del sistema energetico; dovranno quindi essere in grado di effettuare un continuo matching tra la domanda e l'offerta di energia, in modo da ottimizzare il consumo di energia.

Valori di PEF dinamici consentono quindi di poter sfruttare le informazioni aggiuntive per effettuare considerazioni ed azioni differenti rispetto alla casistica statica.

Riprendendo i concetti del documento appena citato, si pensi ad esempio ad un edificio quasi totalmente autonomo con un impianto fotovoltaico e che esso vada quindi a produrre energia elettrica che può essere autoconsumata.

Nel momento in cui essa non viene utilizzata in tempo reale alla sua produzione può essere stoccata all'interno di batterie per poi essere impiegata nel momento del bisogno. Nel momento in cui non è disponibile energia elettrica autoprodotta, è necessario effettuare un prelievo di energia elettrica della rete e quindi generare un consumo di energia primaria per la produzione e la trasmissione di questa energia da dover fornire per il consumo finale.

Con le informazioni acquisite dalla valutazione dinamica si può di ora in ora andare a prevedere in maniera abbastanza accurata il consumo di energia primaria e di conseguenza cercare, attraverso l'utilizzo integrato del fotovoltaico, di utilizzare l'energia elettrica proveniente dal fotovoltaico nel momento in cui l'energia della rete pubblica avrà un costo energetico più alto ed utilizzare invece quest'ultima quando l'energia primaria richiesta per la sua produzione è minore.

In questo modo si cerca quindi di raggiungere obiettivi differenti contemporaneamente, non solo cercando di consumare l'energia autoprodotta nel momento in cui l'elettricità della rete pubblica ha un costo economico maggiore ma anche un costo energetico più alto.

Seguendo quanto detto si riesce a sfruttare i calcoli svolti all'interno di questo elaborato per trarre alcune conclusioni. Si deduce infatti come la priorità vada data all'aggiornamento dei PEF previsti dal DM Requisiti Minimi del 2015, da sostituire con nuovi fattori più veritieri rispetto a quelli proposti dalla normativa, in quanto si osserva come l'utilizzo di PEF datati rispetto a quelli determinati nell'elaborato abbia un enorme impatto sul consumo di energia primaria. Successivamente si evince come anche il concetto di dinamicità non possa essere trascurato, in quanto consente di sfruttare le informazioni aggiuntive che derivano da tale approccio per ottimizzare e ridurre ulteriormente l'uso di energia elettrica, in accordo con quanto descritto dal nuovo report per la prestazione energetica degli edifici [16].

8. Conclusioni

Questo studio ha avuto come obiettivo quello di verificare numericamente, attraverso una metodologia condivisa, che gli attuali fattori di energia primaria per l'energia elettrica utilizzati in Italia, seguendo quanto prescritto dal DM Requisiti Minimi del 2015, siano oramai desueti. È stato evidenziato come l'utilizzo degli stessi conducesse ad una valutazione del fabbisogno di energia primaria superiore rispetto a quella reale e senza consentire una valutazione dinamica.

In primo luogo, applicando la metodologia proposta dalla norma UNI EN 17423, sono stati determinati i PEF orari rinnovabili, non rinnovabili e totali del vettore energia elettrica per l'Italia del 2022. I risultati hanno evidenziato un discostamento tra i valori calcolati e i PEF attualmente previsti dalla normativa italiana, rendendo chiara la necessità di una rivalutazione urgente di questi valori. Analizzando il trend dinamico dei PEF è stato raggiunto un valor medio di 1,85, ampiamente inferiore al valore di 2,42 previsto dalla normativa italiana, si è osservato come solo pochi valori nel corso dell'intero 2022 siano maggiori rispetto al valore normativo. Di conseguenza, anche le frazioni rinnovabile e non rinnovabile, che assumono un valor medio calcolato di 0,34 e di 1,51, risultano decisamente inferiori rispetto a quanto previsto dal DM Requisiti Minimi del 2015, che li considerava pari a 0,47 e 1,95, rispettivamente.

Partendo dal risultato precedente, è stato possibile effettuare diverse analisi statistiche per approfondire il comportamento orario dei PEF, così come la loro relazione con il contesto energetico nazionale. L'analisi in frequenza ha permesso di individuare come si distribuissero e in che range tutti i valori dei PEF orari rinnovabili e non rinnovabili. L'analisi attraverso box plot ha permesso di capire la variabilità dei valori nel corso della stessa giornata, scoprendo che durante le ore diurne sia presente una variabilità maggiore di entrambi i PEF rispetto alle ore notturne, attribuendo questo risultato alla producibilità fotovoltaica.

La medesima analisi ha permesso di descrivere una correlazione tra i valori dei PEF rinnovabili e quelli non rinnovabili. La relazione tra le due quote del PEF è stata approfondita inizialmente da un modello di regressione lineare che ha permesso di scoprire come i valori del PEF rinnovabile siano maggiormente o meno dipendenti da quelli non rinnovabili in funzione della stagione in cui ci si trova, evidenziando come la fonte rinnovabile con il maggior impatto sugli andamenti sia il solare fotovoltaico. Questa correlazione è stata ulteriormente esplorata analizzando le heatmap dei PEF rinnovabili e non rinnovabili, grazie a cui è stato possibile appurare un'ulteriore influenza tra i valori assunti dai PEF e la magnitudine dei profili di carico dell'energia elettrica di un determinato giorno. Le analisi statistiche condotte hanno supportato un processo di clusterizzazione che ha individuato due cluster differenti all'interno dei quali è possibile associare con un'accuratezza del 84% tutti i profili giornalieri dei due PEF, evidenziando come essi siano riconducibili ad uno specifico cluster in funzione della stagione e della tipologia di giornata (feriale o festivo) a cui appartiene un giorno.

Partendo dall'analisi di clusterizzazione è stato possibile sviluppare un metodo di analisi predittiva per la valutazione dell'andamento futuro dei PEF. Il metodo proposto nella tesi è stato testato per stimare i valori dei PEF riconducibili ai primi sei mesi del 2023, ottenendo un errore medio del 15% e del 21,1% (confrontato con il calcolo analitico) nello stimare la quota non rinnovabile e rinnovabile, rispettivamente. Questo risultato ha evidenziando come i valori calcolati attraverso la semplificazione derivata dall'analisi di clusterizzazione non induca un errore eccessivamente elevato rispetto ai valori calcolati con l'approccio analitico, consentendo di ottenere risultati, nella maggior parte delle volte, più che attendibili. Inoltre, l'approccio predittivo ha permesso lo sviluppo di uno strumento preliminare di primaria importanza per la futura progettazione di edifici resilienti e coerenti con il contesto energetico in transizione.

Infine, per avere conferma del quesito al centro della tesi, cioè che i PEF utilizzati ora siano troppo elevati e discostati dalla realtà, si sono applicati i PEF ottenuti ad un edificio tipo ad uso residenziale che ha evidenziato come i valori ottenuti portino ad una riduzione del consumo di energia primaria di circa il 25% rispetto alla valutazione con quanto prescritto dal DM Requisiti Minimi 2015, anche solo utilizzando i nuovi valori statici dei PEF.

Sfruttando invece i valori dinamici si è messo in mostra come la dinamicità introdotta nella valutazione possa tornare utile per il soddisfacimento di una funzione multi-obiettivo, cercando di ridurre sia il costo economico sia il costo energetico, nel caso di edifici con impianti a fonti rinnovabili, rifacendosi a quanto dovrà essere applicato secondo la nuova direttiva sulla prestazione energetica dell'edilizia.

In conclusione, è possibile sintetizzare i risultati ottenuti dal lavoro contenuto in questa tesi nei punti seguenti:

- Gli attuali valori normativi dei PEF non rappresentano il contesto energetico nazionale necessitando di un aggiornamento urgente, in linea con le politiche di transizione energetica promosse a livello europeo.
- L'analisi dinamica oraria dei PEF è cruciale per comprendere la variabilità giornaliera dei fattori di conversione e per poter implementare strategie di ottimizzazione volte a minimizzare il fabbisogno di energia primaria degli edifici.
- La predizione dei PEF è uno strumento strategico necessario per la corretta progettazione di edifici coerenti con lo scenario energetico esistente e resilienti ad eventuali scenari futuri.

9. Limiti e sviluppi futuri del lavoro

In conclusione, è importante tenere in considerazione che questo lavoro si è concentrato sul dimostrare l'importanza di sostituire i valori prescritti dalla legge italiana, dimostrando in aggiunta come il concetto di dinamicità sia fondamentale per comprendere e sfruttare al meglio la variabilità del PEF, requisito fondamentale della nuova direttiva europea per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici.

I risultati ottenuti sono frutto di diverse ipotesi, in alcuni casi semplificatorie, che quindi lasciano spazio a possibili diverse valutazioni future, attraverso l'adozione di ipotesi più stringenti e dettagliate rispetto a quelle fatte, che non hanno comunque precluso il raggiungimento dell'obiettivo principale dell'elaborato.

Come per le differenti ipotesi che possono essere presentate, il lavoro svolto lascia spazio ad altri possibili approfondimenti, legati all'analisi di clusterizzazione, che può essere svolta introducendo più variabili influenzanti, con l'obiettivo di ridurre nell'analisi predittiva la distanza tra valori previsti e reali oppure legati all'utilizzo dei PEF dinamici per ottimizzare il connubio energia prelevata dalla rete e energia autoprodotta, cercando di ridurre ancor maggiormente il consumo di energia primaria di un edificio, come prescritto dal nuovo documento del Parlamento europeo per gli edifici nZEB.

Questi sono solo alcuni degli spunti che possono essere seguiti per approfondire il lavoro svolto.

Bibliografia

[1] European Environment Agency (EEA), “EU achieves 20-20-20 climate targets, 55% emissions cut by 2030 reachable with more efforts and policies”, 2021

Disponibile: <https://www.eea.europa.eu/highlights/eu-achieves-20-20-20>

[2] Consiglio dell'Unione europea, “Pacchetto “Pronti per il 55%”: in che modo l'UE diventerà più efficiente sotto il profilo energetico”, 2023

Disponibile: <https://www.consilium.europa.eu/it/infographics/fit-for-55-how-the-eu-will-become-more-energy-efficient/#:~:text=In%20base%20alle%20nuove%20norme,entro%20la%20fine%20del%202030.>

[3] Ministero dello Sviluppo Economico, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, “Piano nazionale integrato per l'energia e il clima”, Dicembre 2019

Disponibile:

https://www.mimit.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC_finale_17012020.pdf

[4] Parlamento Europeo e del Consiglio, “Directive 2018/844/EU del parlamento europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018 che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edificio e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica”, 30 maggio 2018

Disponibile:

<https://eurlex.europa.eu/legalcontent/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844>

[5] Parlamento europeo e del Consiglio, “Direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012 sull’efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE”, 25 ottobre 2012

Disponibile:

<https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:it:PDF>

[6] European Parliament and of the Council, “Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency”, 11 dicembre 2018

Disponibile: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2002/oj>

[7] Commissione Europea, “Regolamento delegato (UE) 2023/807 della commissione del 15 dicembre 2022 che rivede il fattore di energia primaria per l’energia elettrica in applicazione della direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio”, 15 dicembre 2022

Disponibile:

<https://eurlex.europa.eu/legalcontent/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0807&from=EN>

[8] S. Galatà, “Impatto dei fattori di energia primaria (PEF) sulle valutazioni energetiche di edifici ad energia quasi zero”, Tesi di laurea magistrale A.A. 2020/2021

[9] A. Stoffregen and O. Schuller, “Primary Energy Demand of Renewable Energy Carriers - Part 1: Definitions, accounting methods and their application with a focus on electricity and heat from renewable energies,” pp. 1–18, 1° aprile 2014, [Online].

[10] Affordable Zero Energy Building, “Definition of indicators and assesment methods for cost effective nZEB and Energy+ Building”, no. April 2019

[11] M. Noussan, R. Roberto, and B. Nastasi, “Performance indicators of electricity generation at country level - The case of Italy,” *Energies*, vol. 11, no. 3, 14 marzo 2018.

[12] E. Marrasso, C. Roselli, and M. Sasso, “Electric efficiency indicators and carbon dioxide emission factors for power generation by fossil and renewable energy sources on hourly basis,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 196, pp. 1369–1384, 8 luglio 2019.

[13] A.B. Constantinos, E.G. Dascalaki, I. Psarra and T. Cholewa, “Primary Energy Factor for Electricity Production in Europe”, articolo scientifico, 21 dicembre 2022.

[14] L. Leoncini, “The Primary Energy Factors play a central role in European 2020 targets achievement”, Chapter 2-Policies for Sustainable Construction, 2013

[15] ARERA, Analisi dei consumi dei clienti domestici, prelievo medio orario dei clienti domestici per regione, anno 2022

Disponibile: https://www.arera.it/it/dati/mr/mr_consumiele.htm

[16] Parlamento europeo, “Prestazione energetica nell’edilizia (rifusione). Emendamenti del Parlamento europeo, approvati il 14 marzo 2023, alla proposta di direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell’edilizia (rifusione) (COM(2021)0802-C9-0469/2021-2021/0426(COD))”, 14 marzo 2023