



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Scienze Statistiche

Corso di Laurea in Statistica per l'Economia e l'Impresa

**Data cleaning e indicatori statistici per la diagnosi e
l'efficientamento energetico aziendale: casi studio multi-
settoriali**

Relatore:

Ch.mo Prof.
Omar Paccagnella

Laureanda:

Elisa Scarpa Falce
Matricola: 2067196

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Contesto e attività svolta	1
1.2	Obiettivi e struttura della relazione finale	1
2	L'azienda e il monitoraggio energetico	3
2.1	Il quadro normativo	3
2.2	L'infrastruttura tecnologica e i protocolli	4
2.3	La piattaforma OnBoard	4
3	Raccolta dati, pulizia del dataset ed analisi svolte	5
3.1	Metodologia di correzione e imputazione dati (data cleaning)	6
3.1.1	Mancanze di breve periodo (inferiori ad una settimana) in aziende dal profilo di carico aziendale con poche variazioni infrasettimanali	6
3.1.2	Mancanze brevi in aziende dal profilo di carico molto variabile o mancanze prolungate	6
3.1.3	Mancanze nei fotovoltaici	7
3.2	Perché non altre tecniche?	9
3.3	Analisi svolte	10
4	Analisi su un'azienda lavoratrice di alluminio	11
4.1	Raccolta e pulizia dei dati	11
4.1.1	Metodologia di correzione e imputazione dati	12
4.2	Andamento generale: consumi e fatturato	13
4.3	L'efficienza dei processi	16
4.3.1	Variazione percentuale dei KPI di anno in anno	17
4.3.2	Efficientamento dall'inizio del monitoraggio	19
4.3.3	Conclusioni sulle performance e prospettive future	20
4.4	Analisi del degradamento del fotovoltaico	20

5	Analisi su un'azienda di confezionamento alimentare	25
5.1	Struttura aziendale	25
5.2	Raccolta e pulizia dei dati	26
5.2.1	Metodologia di correzione e imputazione dei dati	26
5.3	Andamento generale dei consumi	28
5.4	L'efficienza dei processi su base annuale	30
5.5	Confronto dall'inizio del monitoraggio	31
5.6	Definizione del modello previsionale	32
5.6.1	Fase 1: Implementazione dei modelli mensili	32
5.6.2	Fase 2: Implementazione del modello giornaliero	33
5.6.3	Fase 3: Modello reattivo giornaliero finale	34
6	Analisi di un Gruppo leader nella lavorazione del legno	37
6.1	Struttura del Gruppo	37
6.2	Raccolta e pulizia dei dati	38
6.2.1	Metodologia di correzione e imputazione dati	38
6.3	Andamento dei tre stabilimenti	40
6.3.1	L'efficienza dei processi su base trimestrale	40
6.3.2	Analisi feriale vs festivo e calcolo del baseload	42
6.4	Analisi dell'autoconsumo e del mix energetico	43
6.5	Analisi specifica della Sede 3	44
6.5.1	Indice di disaccoppiamento energetico YoY	45
7	Conclusioni	47

Capitolo 1

Introduzione

La presente relazione finale deriva dallo svolgimento di uno stage della durata di circa tre mesi (da marzo a maggio 2026) presso l'azienda Innovation System, con sede a Loria (TV). L'azienda opera nel settore dei system integrators per il monitoraggio industriale non solo energetico, ma di tutte le forniture aziendali.

1.1 Contesto e attività svolta

In un panorama industriale caratterizzato da una crescente volatilità dei prezzi energetici e da una spinta verso la transizione ecologica, la capacità di tracciare e analizzare l'impiego delle risorse è diventata di cruciale importanza. Quest'attività non risponde solo ad una necessità di contenere i costi economici, ma si inserisce in un percorso di efficientamento e sostenibilità sempre più necessario per rispecchiare gli standard internazionali.

L'attività si è focalizzata sulla gestione del dato grezzo: dalla fase di pulizia del dataset, all'analisi storica dei consumi energetici, osservandone l'evoluzione nel tempo. Questo processo ha richiesto non solo una comprensione tecnica degli impianti, ma anche una solida base metodologica nella gestione dei flussi di dati, utilizzando il software statistico R.

1.2 Obiettivi e struttura della relazione finale

Obiettivo del presente lavoro è di illustrare il percorso metodologico seguito durante il periodo di tirocinio. La relazione finale è strutturata come segue:

2. **L'azienda e il monitoraggio energetico:** una panoramica su Innovation System e sul contesto normativo e tecnico in cui opera.

3. **Raccolta dati, pulizia del dataset e analisi svolte:** descrizione dettagliata delle fasi di *Data Cleaning* e delle metodologie di analisi statistica comuni applicate ai casi studio.
4. **Analisi su un'azienda lavoratrice di alluminio:** un caso studio approfondito basato su uno storico dati di 8 anni.
5. **Analisi su un'azienda di confezionamento alimentare:** analisi delle performance energetiche di una realtà strutturata su più sedi operative.
6. **Analisi di un Gruppo leader nella lavorazione del legno:** focus specifico su una delle tre Sedi.
7. **Conclusioni:** riflessioni sull'esperienza svolta.
8. **Bibliografia e Sitografia.**

Capitolo 2

L'azienda e il monitoraggio energetico

L'azienda Innovation System nasce nel 2013 con l'obiettivo di ridurre l'impatto energetico e le emissioni delle aziende accompagnando il cliente verso una transizione digitale e sostenibile attraverso l'integrazione di sistemi IoT¹.

2.1 Il quadro normativo

Il quadro normativo nazionale impone importanti adempimenti in materia di gestione ed efficienza energetica, per i quali il monitoraggio continuativo dei consumi costituisce un supporto fondamentale. In primo luogo, la direttiva europea² prevede l'obbligo di redazione della diagnosi energetica a cadenza quadriennale per tutte le aziende energivore (caratterizzate da consumi pari o superiori a 1 GWh/anno) e per le Grandi Imprese, definite da un organico superiore a 250 dipendenti e da un fatturato annuo oltre i 50 milioni di euro oppure un bilancio annuo superiore ai 43 milioni di euro [1].

Parallelamente alle prescrizioni di legge sulla diagnosi energetica, assume un ruolo di primario rilievo lo standard ISO 50001, la norma internazionale che definisce i requisiti per l'implementazione di un Sistema di Gestione dell'Energia (SGE). Tale certificazione guida le organizzazioni nella definizione di una politica energetica strutturata, nell'individuazione degli obiettivi di riduzione dei consumi e nel costante miglioramento delle prestazioni energetiche complessive. In questo contesto, un sistema di monitoraggio energetico continuativo si rivela uno strumento indispensa-

¹Internet of Things: reti di oggetti fisici dotati di sensori, software e connettività, in grado di raccogliere e scambiare dati autonomamente via Internet.

²Direttiva UE 2023/1791.

bile: esso fornisce il flusso dati accurato e in tempo reale necessario per alimentare il ciclo di miglioramento continuo (Plan-Do-Check-Act) richiesto dalla ISO 50001, consentendo di verificare l'efficacia delle azioni correttive e di mantenere elevati standard di efficienza nel tempo. [2]

Nel caso specifico oggetto di questo studio, va evidenziato come nessuna delle tre aziende analizzate sia attualmente in possesso della certificazione ISO 50001.

2.2 L'infrastruttura tecnologica e i protocolli

Per acquisire i dati, le aziende devono installare dei dispositivi multifunzione e gateway compatibili presso punti strategici come cabine elettriche, inverter o singoli macchinari. Questi componenti hardware inviano i dati tramite il protocollo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). È un protocollo di messaggistica leggero progettato per la telemetria machine to machine in ambienti con risorse limitate, ideale per connettere dispositivi remoti con un ingombro di codice ridotto e una larghezza di banda di rete minima [3].

La trasmissione dei dati alla piattaforma può avvenire sia tramite sim installata sul dispositivo, sia tramite cavo cablato.

2.3 La piattaforma OnBoard

OnBoard è la piattaforma IoT che raccoglie i dati di monitoraggio e rende possibile la gestione centralizzata, dando valore ai dati raccolti. Fornisce un'interfaccia unica che permette la gestione semplificata di tutti i reparti aziendali, infatti grazie a questo sistema automatizzato si è in grado di raccogliere e analizzare i processi produttivi in tempo reale e analizzare i profili di consumo ed autoproduzione.

Capitolo 3

Raccolta dati, pulizia del dataset ed analisi svolte

Per procedere con le analisi, si è attinto all'OnBoard aziendale, ricavando i dataset necessari. I dati sono stati scaricati in formato .csv e raccolti giornalmente, aggregando le variabili di interesse in valori cumulati per ogni giorno.

Il dato giornaliero è stato utilizzato come unità base per assicurare precisione e coerenza nelle successive analisi mensili. Questo approccio permette di monitorare gli abbattimenti dei consumi settimanali nel dettaglio, garantendo al contempo una visione aggregata coerente.

Criticità del sistema di rilevazione

Dovendo analizzare dati reali raccolti tramite sensori (IoT), uno dei problemi principali è la gestione delle interruzioni di connettività. Il sistema hardware generalmente trasmette i dati accumulati ogni 15 minuti. C'è, però, una criticità: se un dispositivo si disconnette, il dato non viene perso, visto che i contatori accumulano i valori, ma viene registrato nel momento in cui la connessione viene ripristinata. Questo crea dei picchi fittizi, rendendo i dati giornalieri inutilizzabili se non trattati precedentemente.

3.1 Metodologia di correzione e imputazione dati (data cleaning)

Per garantire l'integrità statistica del dataset e permettere un'analisi accurata sia su base mensile che annuale, si sono adottati due approcci distinti basati sulla volontà di conservare il volume totale osservato.

3.1.1 Mancanze di breve periodo (inferiori ad una settimana) in aziende dal profilo di carico aziendale con poche variazioni infrasettimanali

In presenza di mancanze di breve durata, o di aziende caratterizzate da ritmi produttivi costanti, si è adottata una media aritmetica semplice per la ripartizione del dato.

Questa scelta è giustificata dal profilo di carico aziendale con varianze minime tra giorni feriali e festivi; l'utilizzo di modelli più complessi avrebbe introdotto del rumore statistico non rappresentativo. Il valore stimato per ogni intervallo temporale i è calcolato dividendo il volume totale osservato (E_{tot}) per il numero di intervalli (n) che compongono l'interruzione:

$$P_i = \frac{E_{tot}}{n} \quad (3.1)$$

Tale approccio garantisce la perfetta congruenza del bilancio energetico, distribuendo il carico in modo uniforme lungo tutto l'arco della mancanza.

3.1.2 Mancanze brevi in aziende dal profilo di carico molto variabile o mancanze prolungate

Quando l'azienda ha cicli di lavoro marcati (fermo macchine nei weekend e nelle festività, picchi di produzione stagionali) o quando la mancata ricezione è prolungata (anche per mesi), l'approccio tramite media aritmetica fallirebbe, in quanto avrebbe causato un appiattimento eccessivo del dato (loss of variance), ignorando sia la ciclicità che la stagionalità energetica.

La correzione è avvenuta tramite l'analisi del profilo storico omologo:

1. **Verifica della coerenza predittiva:** si è osservato che l'andamento nel periodo in questione negli anni era simile, confermando la ciclicità della produzione.

2. **Isolamento del benchmark:** è stato isolato il medesimo periodo dell'anno precedente, effettuando un riallineamento al medesimo giorno della settimana, estraendo la serie storica di riferimento $P_{storico}$.

3. **Calcolo della distribuzione dei pesi:** è stata calcolata la distribuzione percentuale giornaliera (pesi w_i) dell'anno precedente rispetto al totale del periodo di riferimento:

$$w_i = \frac{P_{storico,i}}{\sum_{j=1}^n P_{storico,j}} \quad (3.2)$$

4. **Applicazione dei pesi:** tali pesi sono stati applicati al valore cumulato registrato (E_{tot}) per determinare il valore stimato in ogni intervallo temporale i :

$$P_i = w_i \cdot E_{tot} \quad (3.3)$$

L'applicazione dei pesi permette di allocare il consumo totale reale (E_{tot}) rispettando la ciclicità settimanale e stagionale dell'azienda. Il peso w_i funge da impronta digitale del consumo, trasferendo la forma del profilo storico sul dato reale aggregato.

3.1.3 Mancanze nei fotovoltaici

La ripartizione del volume totale di energia prodotta osservata (E_{tot}) lungo l'intervallo temporale mancante segue una logica gerarchica a tre livelli, che seleziona automaticamente il miglior profilo di distribuzione in base alla disponibilità di informazioni:

1. **Approccio Spaziale - correlazione tra impianti:** se lo stabilimento presenta altri impianti fotovoltaici monitorati nella medesima area geografica, allora si utilizza il loro profilo di produzione aggregato come riferimento. I pesi percentuali w_i per ogni intervallo i sono calcolati sulla base della produzione degli altri impianti (P_{altri}):

$$w_i = \frac{P_{altri,i}}{\sum_{j=1}^n P_{altri,j}} \quad (3.4)$$

Il valore imputato sarà quindi $P_i = w_i \cdot E_{tot}$. Questo metodo è prioritario poiché cattura le reali variazioni meteorologiche e di irraggiamento solare specifiche del periodo di interruzione.

2. **Profilo storico omologo:** nel caso in cui non siano disponibili dati da impianti limitrofi, se è presente una registrazione affidabile relativa al medesimo

intervallo temporale dell'anno precedente, allora l'energia viene ripartita seguendo la curva di produzione storica dell'impianto stesso, come spiegato nella sezione precedente.

Questo approccio permette di rispettare la stagionalità e l'andamento tipico del sito, preservando la varianza della serie storica ed evitando l'appiattimento dei picchi produttivi reali.

3. **Media aritmetica:** in assenza di riferimenti spaziali o storici validi, se nessuna delle informazioni sopra citate è disponibile, allora si adotta una media aritmetica semplice. Il valore cumulato viene suddiviso equamente tra tutti gli intervalli temporali (n) che compongono la mancanza:

$$P_i = \frac{E_{tot}}{n} \quad (3.5)$$

Sebbene questo metodo comporti una perdita di varianza, garantisce la corrispondenza del bilancio energetico e la continuità del dato nei casi di mancanza totale di riferimenti esterni.

3.2 Perché non altre tecniche?

Prima di esporre le motivazioni che hanno portato all'esclusione di altre tecniche, se ne fornisce una breve illustrazione.

Il **Forecasting** è una tecnica che prevede nel modo più accurato possibile, tenendo conto di tutte le informazioni disponibili, inclusi i dati storici e la conoscenza di eventuali eventi futuri che potrebbero influenzare le previsioni [4].

L'imputazione tramite **Predictive Mean Matching** calcola il valore previsto della variabile target Y secondo il modello di imputazione specificato.

Per ogni voce mancante, il metodo forma un piccolo insieme di donatori candidati (in genere con 3, 5 o 10 membri) da tutti i casi completi che hanno valori previsti più vicini al valore previsto per la voce mancante.

Un donatore viene estratto casualmente dai candidati e il valore osservato del donatore viene utilizzato per sostituire il valore mancante.

Si presume che la distribuzione della cella mancante sia la stessa dei dati osservati dei donatori candidati [5].

La tecnica del **K-Nearest Neighbour** (k-NN) si fonda sul principio della somiglianza tra i dati. Identifica un numero prefissato di istanze, i "vicini" (k) che presentano la maggiore affinità metrica con l'osservazione incompleta mediante il calcolo di una funzione di distanza basata sugli attributi noti. Una volta individuati i k vicini, il valore mancante viene stimato con modalità differenti in base alla natura del dato: se si tratta di numeri continui si calcola la media dei valori dei vicini, se si tratta di variabili categoriali si assegna la moda, ovvero il valore più frequente [6].

Il Forecasting, l'imputazione tramite PMM (Predictive Mean Matching) o K-Nearest Neighbour (k-NN) sono stati scartati perché avrebbero ignorato l'informazione certa del valore cumulato finale, fornendo stime potenzialmente sfasate rispetto ai volumi reali registrati dal contatore.

Inoltre, usare il dato cumulato reale registrato dal contatore come ancora per la ripartizione dei pesi, garantisce che il bilancio energetico finale sia reale al 100%.

Per ogni azienda si analizzerà nello specifico il motivo di questa scelta.

3.3 Analisi svolte

Si è proceduto guardando in generale i consumi energetici nel tempo, dividendoli per sede (se presente), per poi man mano andare sempre più nello specifico della realtà aziendale.

Successivamente si è svolta un'analisi per cercare di spiegare la storia della produttività e dell'efficienza tecnologica dell'azienda, comparata sia ad un parametro stabile nel tempo (la metratura), che all'andamento economico e all'acquisto delle materie prime impiegate nella produzione (i quali sono sicuramente causa di variazioni del volume produttivo). Si utilizzeranno tre KPI chiave:

- **Intensità Economica (kWh/€):** ³ misura quanta energia serve per generare 1€ di fatturato. Un trend decrescente indica che l'azienda sta diventando più efficiente, riuscendo a produrre più valore con meno risorse.

$$Intensita' economica = \frac{Consumi\ totali}{Fatturato}$$

- **Intensità Spaziale (kWh/m²):** misura il carico energetico per unità di superficie. Essendo la metratura costante, questo indice evidenzia variazioni nell'utilizzo degli impianti o miglioramenti tecnologici indipendenti dal volume d'affari.

$$Intensita' spaziale = \frac{Consumi\ totali}{Metratura}$$

- **Intensità per Materie Prime (kWh / grammi di materie):** misura il carico energetico per unità di materie prime lorde utilizzate per la produzione. Sebbene tale indice risenta significativamente del carico aziendale di base (baseload), esso risulta fondamentale per una valutazione puntuale dell'andamento operativo in relazione ai volumi produttivi effettivi.

$$Intensita' MP = \frac{Consumi\ totali}{Materie\ prime\ (g)}$$

³L'indice di intensità economica (o energetica aziendale) riprende la logica dell'indicatore di Intensità Energetica applicato a livello macroeconomico (tipicamente calcolato come rapporto tra Consumo Interno Lordo di energia e PIL), contestualizzandolo alla realtà microeconomica aziendale.

Capitolo 4

Analisi su un'azienda lavoratrice di alluminio

L'oggetto dell'analisi è un'azienda con oltre sessant'anni di esperienza, specializzata nello stampaggio a caldo di diverse leghe di alluminio e nella realizzazione di progetti su commessa grazie all'impiego di strumentazione specifica.

La società si qualifica a tutti gli effetti come impresa energivora, registrando un consumo medio annuo superiore a 5 GWh.

4.1 Raccolta e pulizia dei dati

I dati relativi ai consumi energetici e alla produzione dell'impianto sono disponibili su base giornaliera a partire dal 27 settembre 2018. Tuttavia, i dati relativi al 2018 sono stati esclusi poiché presentavano anomalie di scala riconducibili a errori di configurazione del sistema di monitoraggio, non risolvibili ex-post. Non potendo determinare con certezza il fattore di conversione errato, si è scelto di far partire l'analisi ufficialmente dal 1° gennaio 2019.

Il consumo totale analizzato (E_{tot}) è determinato su base giornaliera applicando l'equazione di bilancio energetico dei flussi di stabilimento:

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{fv, auto}} + E_{\text{rete, imp}} - E_{\text{rete, esp}}$$

dove la componente fotovoltaica effettivamente autoconsumata in situ ($E_{\text{fv, auto}}$) viene isolata sottraendo l'energia immessa in rete dall'energia totale generata dai pannelli:

$$E_{\text{fv, auto}} = E_{\text{fv, prod}} - E_{\text{rete, esp}}$$

4.1.1 Metodologia di correzione e imputazione dati

A seguito di un'analisi del profilo di carico aziendale, si è vista la presenza di variazioni marcate tra giorni feriali e festivi, che però non si annullano mai. Questo fenomeno è usuale in aziende in cui i dipendenti lavorano in tre turni e che non spengono tutti i macchinari durante i fine settimana. Nello specifico di questo caso risulta inefficiente per l'azienda spegnere i forni, in quanto questi hanno un tempo di riscaldamento troppo elevato, motivo per cui non vengono spenti nemmeno nei fermi estivi o natalizi.

Si sono verificati diversi gap di breve durata, trattati come spiegato nella Sezione 3.1.1, e tre gap prolungati.

In particolare, due riguardano l'energia importata ed esportata ($E_{\text{rete,imp}}$ ed $E_{\text{rete,esp}}$), dal 26 ottobre al 10 novembre 2024 e dal 28 marzo al 28 maggio 2025, e sono stati trattati come descritto nella Sezione 3.1.2. Il gap della produzione fotovoltaica ($E_{\text{fv,prod}}$), dal 17 febbraio al 5 marzo 2026, è stato trattato come illustrato nella Sezione 3.1.3.

Perché non altre tecniche?

Le tecniche del PMM e del KNN nel caso di mancanza dei dati di energia importata ed esportata avrebbe attinto da un pool di donatori (ovvero giorni con dati reali) basandosi sull'unica variabile della produzione fotovoltaica. Tuttavia, in un contesto industriale energivoro, il legame tra produzione solare e prelievi dalla rete non è sempre lineare. Un giorno di sole non garantisce necessariamente un basso prelievo se, ad esempio, la produzione in fonderia è al massimo.

Inoltre, un limite fondamentale di questo approccio risiede nella scarsità di variabili predittive: si disponeva della sola produzione fotovoltaica per tentare di ricostruire contemporaneamente due variabili distinte (energia importata ed esportata). Affidare la stima di entrambi i flussi di rete a un'unica variabile indipendente avrebbe aumentato il rischio di selezionare donatori con profili di consumo non conformi alla realtà operativa di quei mesi, restituendo valori potenzialmente fuorvianti e statisticamente deboli. In generale, in un'azienda con fonderia o processi pesanti, il prelievo energetico non segue una distribuzione "normale" o facilmente prevedibile solo tramite l'unica variabile della produzione del fotovoltaico.

Nel caso del gap del fotovoltaico la scelta di applicare la tecnica del profilo storico omologo è fondamentale per rispettare la curva di insolazione stagionale. Usare una media semplice in primavera (periodo di rapida crescita della produzione solare) avrebbe sottostimato i giorni finali.

Il motivo per cui, invece, non è stato preso in considerazione il PMM e del K-NN è scaturito sia perché non si sarebbe usata la cumulata, ma anche per lo stesso ragionamento all'inverso di prima. Ovvero, non è detto che i giorni in cui si consuma di più siano i giorni in cui il fotovoltaico abbia prodotto di meno. Inoltre, non avrebbe rispettato la stagionalità del fotovoltaico.

4.2 Andamento generale: consumi e fatturato

Una volta pulito il dataset, si è proceduto a svolgere alcune analisi. Innanzitutto, è stata effettuata una valutazione preliminare generale visualizzando l'andamento dei consumi mensili totali nel corso degli anni, come illustrato nella Figura 4.1.

I consumi totali sono stati calcolati come:

$$\text{Consumi totali} = \text{Energia importata} + (\text{Produzione fotovoltaico} - \text{Energia esportata})$$

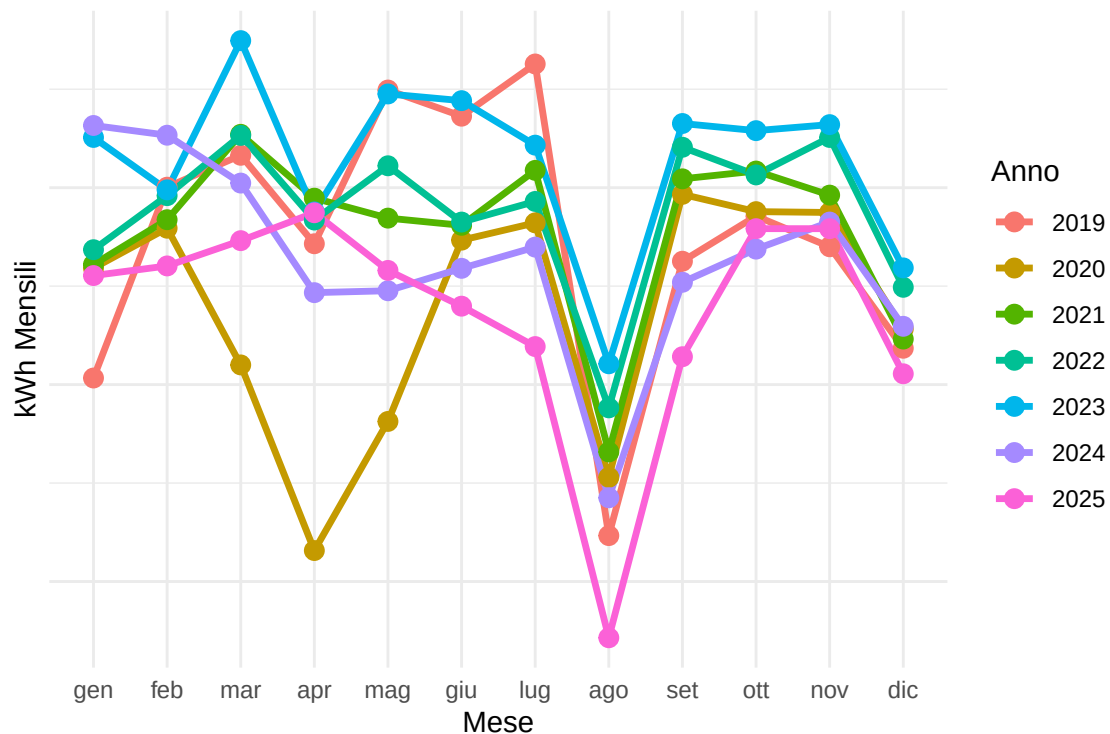


Figura 4.1: Visualizzazione grafica dell'andamento dei consumi mensili aziendali

La Figura 4.1 mostra un andamento ciclico molto marcato, da cui emergono dinamiche di consumo ricorrenti.

A prima vista si nota il calo drastico di agosto e questo è un chiaro segnale che vi è la sospensione estiva delle attività produttive. Questo riduce quasi totalmente

la richiesta di elettricità, che riprende a settembre. Anche a dicembre vi è un calo, seppur minore, dovuto alle chiusure natalizie.

Inoltre, si nota una domanda di energia maggiore durante i mesi invernali, verosimilmente dovuto sia dai sistemi di riscaldamento che alla necessità prolungata di illuminazione.

Unico elemento di rottura è rappresentato dal mese di aprile 2020, il cui crollo è diretta conseguenza del lockdown dovuto alla pandemia di COVID-19.

Negli ultimi anni si nota una generale riduzione dei consumi rispetto ai primi anni, tuttavia si tratta di valori assoluti quindi non è sufficiente per trarre alcuna conclusione sull'efficienza aziendale. Per questo motivo, è necessario un approfondimento più analitico sull'andamento totale dell'azienda nelle sezioni successive.

È utile, per avere una visione d'insieme, visualizzare l'andamento del fatturato dell'azienda nel tempo:

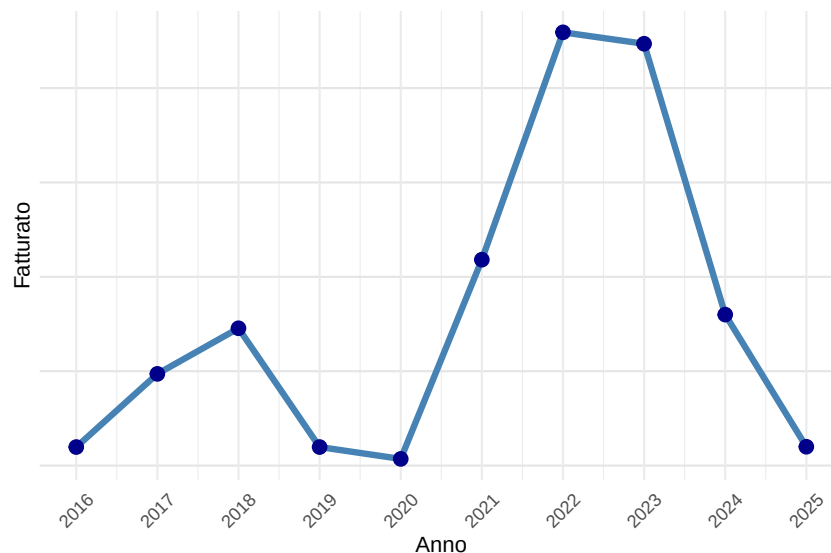


Figura 4.2: Andamento del fatturato aziendale

Come possiamo vedere nella Figura 4.2 è possibile suddividere l'andamento del fatturato aziendale in cinque fasi:

1. Il primo slancio (2016-2018): un triennio di crescita rapida e costante, in cui l'azienda con un incremento complessivo del 20%, raggiungendo un primo massimo relativo nel 2018.
2. La battuta d'arresto e il lockdown (2019-2020): un biennio critico in cui il trend si inverte bruscamente. Già nel 2019 il fatturato torna ai livelli del 2016,

contrazione che viene poi esasperata nel 2020 dalle restrizioni pandemiche, portando l'azienda ai minimi storici della serie.

3. L'esplosione post-pandemia (2021-2022): dopo il lockdown del 2020, l'azienda ha vissuto una crescita verticale, il volume d'affari segna un incremento del 75% rispetto al minimo del 2020. Il picco del 2022 rappresenta il punto di massima forza commerciale.
4. Tra il 2022 e il 2023 la curva si appiattisce, ovvero l'azienda sta mantenendo i ritmi economici dell'anno precedente.
5. Il biennio recente, invece, mostra una discesa simmetrica alla salita precedente. Il fatturato nel 2025 ritorna su livelli simili a quelli del 2016.

Se si andassero, però, a vedere i consumi che l'azienda aveva nel 2019 rispetto a quelli del 2025 (annate che hanno un fatturato quasi identico) si nota come l'azienda abbia consumato molta meno energia elettrica. Ciononostante, questa evidenza non è di per sé sufficiente a trarre conclusioni: trattandosi di valori assoluti, il dato risente dell'aumento dei prezzi di vendita avvenuto negli anni. Per ottenere una valutazione oggettiva dell'efficienza, è necessario individuare un indicatore di prestazione energetica (KPI) più attendibile, che prescinda dalle fluttuazioni monetarie.

4.3 L'efficienza dei processi

In questa Sezione si analizzerà l'andamento della produttività e dell'efficienza energetica dell'azienda; al fine di evitare un mero confronto tra consumi assoluti, si è scelto di metterli in relazione con tre diverse metriche (come introdotte nella Sezione 3.3).

Nella Figura 4.3 si visualizzerà l'andamento dei tre KPI.

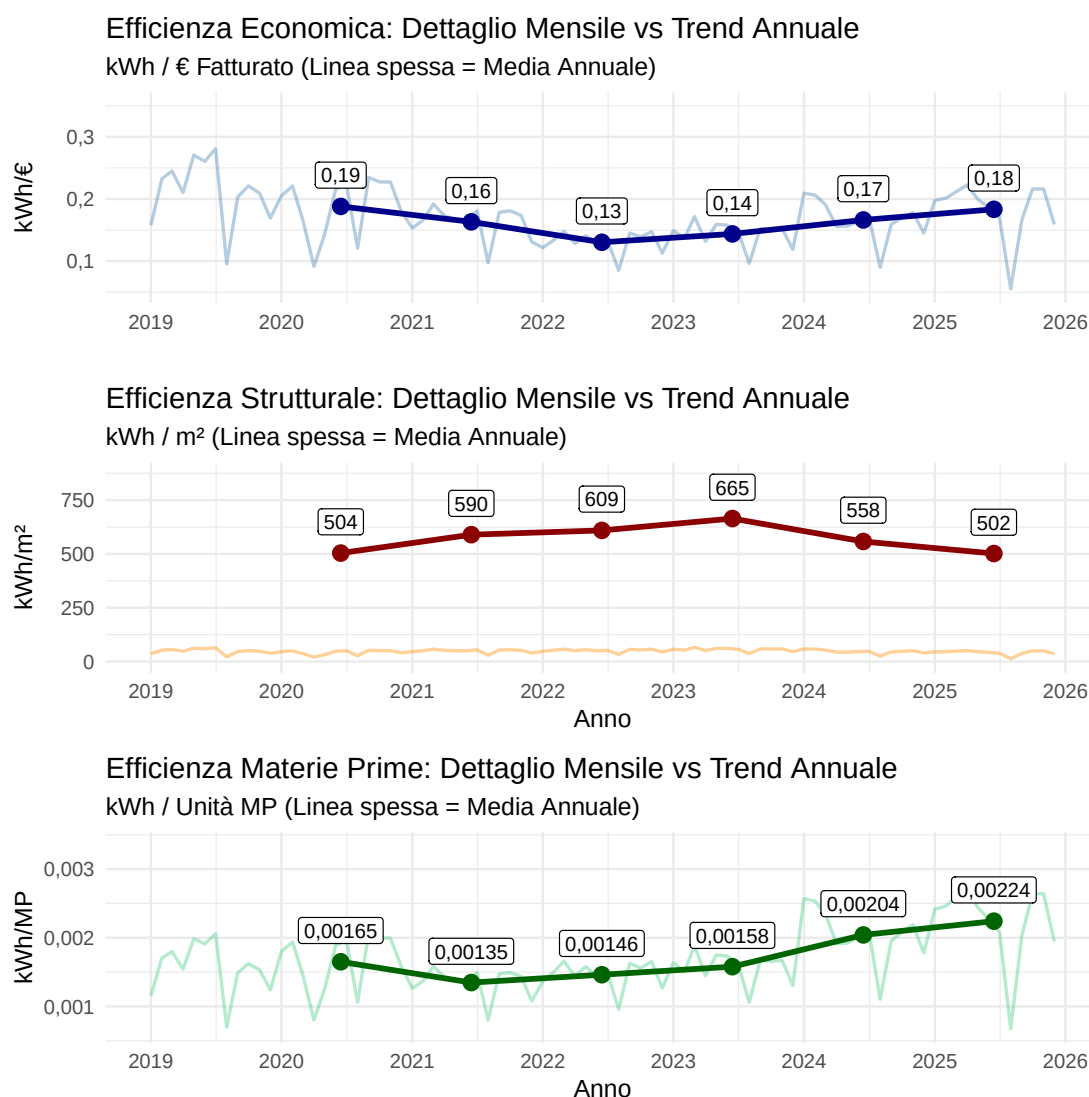


Figura 4.3: Efficienza Economica, Strutturale e su Materie Prime

Dalla Figura 4.3 si possono trarre diverse conclusioni sia dei singoli andamenti dei KPI, sia unendoli e cercando di commentarli insieme.

Si nota che *l'efficienza economica* ha un andamento parabolico, con il punto di massima efficienza nel 2022, seguito però da un aumento che fa tornare il KPI poco sotto i livelli del 2019.

L'efficienza strutturale è quasi simmetrica rispetto al precedente indicatore, avendo però il picco nel 2023, seguito da una contrazione nel 2025. Questa decrescita è coerente con la messa in cassa integrazione di una parte dei dipendenti nel periodo estivo nel 2024 e di tutto il 2025.

L'indicatore delle materie prime è quello più critico, dal 2021 al 2025 il consumo specifico per unità di materia prima utilizzata è aumentato del 66%.

Minori consumi ma peggioramento dei KPI: dal 2024 compreso, i consumi energetici sono diminuiti. Questo però non ha portato ad un miglioramento degli altri indicatori. Questo significa che l'azienda sta operando, negli ultimi anni, sotto carico o con lotti di produzione più piccoli. Il mantenimento delle temperature per la fonderia ha un costo energetico fisso molto elevato, quindi quando la produzione scende sotto una certa soglia, i consumi di base ineliminabili (come anche l'illuminazione o i sistemi in standby) finiscono per pesare proporzionalmente di più su ogni euro incassato o per ogni unità di materie prime processate. In sintesi l'energia, per quanto ridotta, risulta una voce sempre più gravosa.

Il peggioramento dell'efficienza economica indica che l'aumento del prezzo di vendita non è stato sufficiente per compensare l'inefficienza specifica delle materie prime.

4.3.1 Variazione percentuale dei KPI di anno in anno

L'analisi svolta è utile per quantificare il tasso di miglioramento dell'efficienza energetica rispetto all'anno precedente (Figura 4.4):

- Variazione percentuale dell'intensità economica;
- Variazione percentuale dell'intensità spaziale;
- Variazione percentuale dell'intensità materiale.

Filtro dati: esclusi il 2019 (anomalia statistica data dal fatto che del 2018 si hanno dati incompleti) e il 2026 (dato parziale) per garantire un confronto omogeneo tra anni solari completi. In generale i valori positivi (verdi) indicano un miglioramento dell'efficienza (si sta consumando meno energia per ogni unità comparata), i valori negativi (rossi) indicano un peggioramento o un aumento dell'intensità energetica.

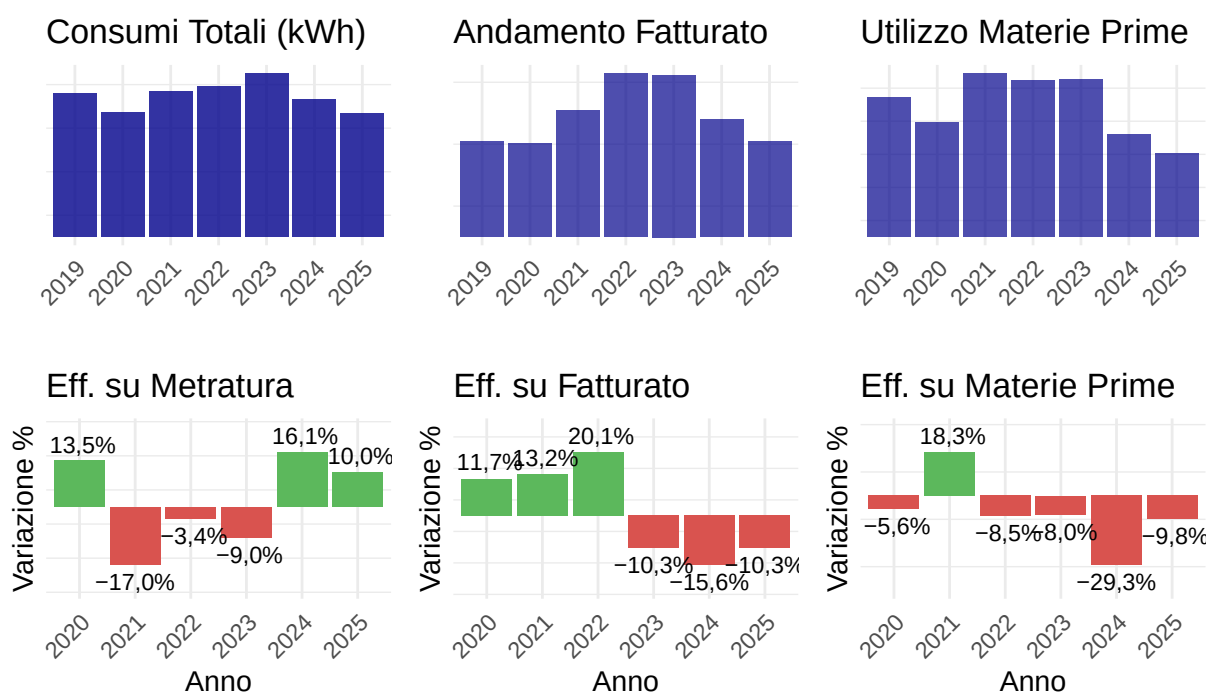


Figura 4.4: Variazione Percentuale dei KPI Year On Year

L'analisi riportata nella Figura 4.4 mostra che l'azienda sta faticando a ridurre i costi energetici di pari passo con il calo della produzione. L'energia, che dovrebbe essere un costo variabile, sta diventando una spesa fissa difficile da abbattere.

Tra il 2024 e il 2025, nonostante le vendite siano diminuite, i consumi elettrici non sono calati proporzionalmente. Questo accade perché una quota eccessiva di energia serve a tenere accesi gli impianti e i servizi generali, indipendentemente da quanto si produce effettivamente.

Nello specifico, l'efficienza dei processi è crollata del 29,3% nel 2024. Gli impianti, lavorando a regime ridotto (essendo un giorno a settimana l'azienda in cassa integrazione), consumano molta più energia per ogni chilo di prodotto lavorato.

L'incidenza dell'energia su ogni euro incassato è, quindi, aumentata del 15,6%. In pratica, l'energia erode una fetta sempre più grande del fatturato. Questo si rispecchia sull'utile aziendale: tra il 2022 e il 2024 esso è sceso di oltre il 90%. I consumi energetici sono rimasti alti mentre i ricavi calavano, diventando una delle cause principali del crollo dei guadagni, visti anche gli aumenti dei costi energetici.

In conclusione, l'azienda non è più nel periodo d'oro del 2021-2022. Oggi, l'inefficienza energetica mette a rischio la tenuta economica del business. È urgente intervenire per eliminare gli sprechi nei momenti di inattività e rendere i consumi più flessibili, così da proteggere i guadagni anche quando il mercato rallenta.

4.3.2 Efficientamento dall'inizio del monitoraggio

Quest'analisi si pone l'obiettivo di visualizzare e valutare l'evoluzione della performance energetica aziendale negli ultimi 6 anni. Il 2019 è l'anno baseline per due motivi fondamentali: è il primo anno completo di monitoraggio e ha il fatturato identico a quello registrato nel 2025. Avere un volume d'affari che differisce solo di qualche centinaia di euro, permette un confronto diretto tra le due annualità isolando la gestione operativa.

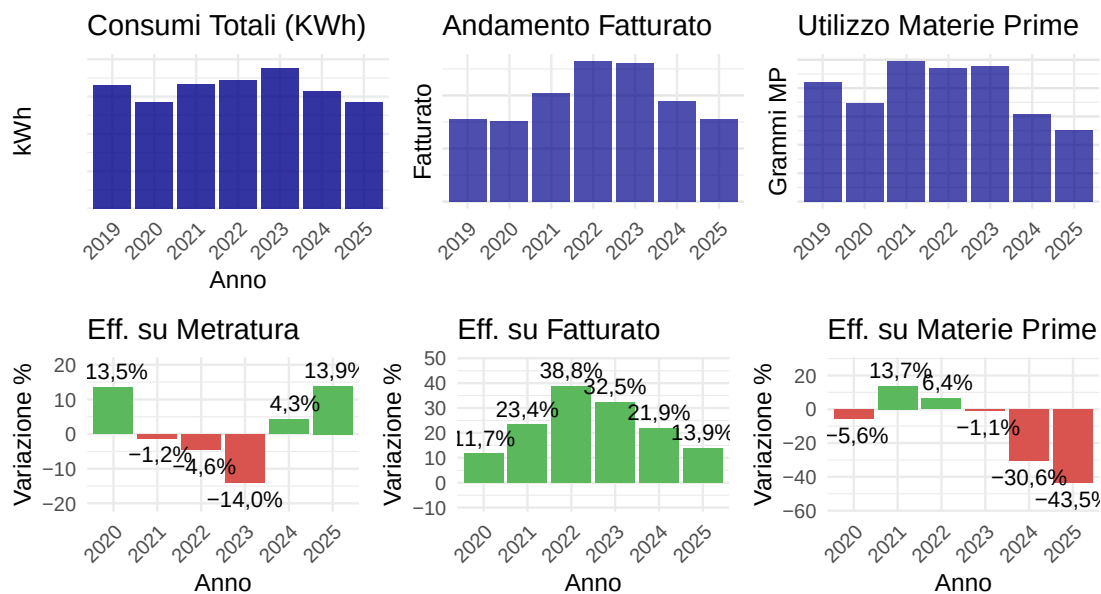


Figura 4.5: Analisi comparativa tra andamento assoluto ed efficienza

Dalla Figura 4.5 si nota subito che l'efficienza economica ha un andamento costantemente positivo, con un picco del 38.8% nel 2022. Ad oggi l'indicatore mantiene il trend positivo, a parità di fatturato l'azienda riesce a consumare meno KWh, verosimilmente per un aumento dei prezzi di vendita.

L'efficienza sulla metratura mostra un miglioramento nel 2025, che è un riflesso della flessione dei consumi assoluti totali rispetto agli anni precedenti.

Questo miglioramento viene smentito dall'indicatore relativo alle materie prime, che segna il 2025 con un -43.5%. A parità di fatturato con il 2019, oggi l'azienda consuma quasi il doppio dell'energia per unità di materie prime.

4.3.3 Conclusioni sulle performance e prospettive future

Le due analisi restituiscono due quadri totalmente diversi: se la comparazione dal 2019 restituisce una sensazione di stabilità finanziaria, la comparazione YoY invece restituisce le inefficienze che erodono l'utile aziendale (tra il 2023 e 2024 l'azienda ha registrato un -88,76 %).

Il crollo registrato nel 2025 dell'indicatore dell'efficienza sulle materie prime è coerente in entrambe le analisi e rispecchia sia il baseload sempre più pesante su unità di materia prima utilizzata, sia una situazione di crisi in cui l'energia è diventata un costo fisso e gravoso.

La marginalità dell'azienda è legata alle sole dinamiche del rialzo dei prezzi, però è chiaro come il processo stia perdendo competitività in modo sempre più allarmante. Serve che l'azienda attui delle logiche di accensione e spegnimento programmate, per evitare degli sprechi notturni e durante il fine settimana (che risultano elevati anche in assenza di turni lavorativi). Solo diminuendo drasticamente i consumi inattivi sarà possibile per l'azienda proteggere i margini in un mercato sempre più in rallentamento.

4.4 Analisi del degradamento del fotovoltaico

Avendo a disposizione il progetto definitivo per la realizzazione dell'impianto fotovoltaico è stato possibile analizzare la degradazione avvenuta negli anni. Per calcolare la degradazione si è calcolata, come prima cosa, la prestazione annuale del 2010 ponendola come termine di paragone. Successivamente, dal database è stata selezionata la quantità di energia prodotta del fotovoltaico, filtrando gli anni completi dal 2019 al 2025 e si è calcolato quanta energia è stata effettivamente prodotta ogni anno. Dividendo la produzione reale per la resa iniziale si è ottenuta una percentuale di performance relativa. Infine, si è creato un modello di regressione lineare che distribuisce la performance relativa in base agli anni passati. La retta di regressione così calcolata viene riportata in Figura 4.6.

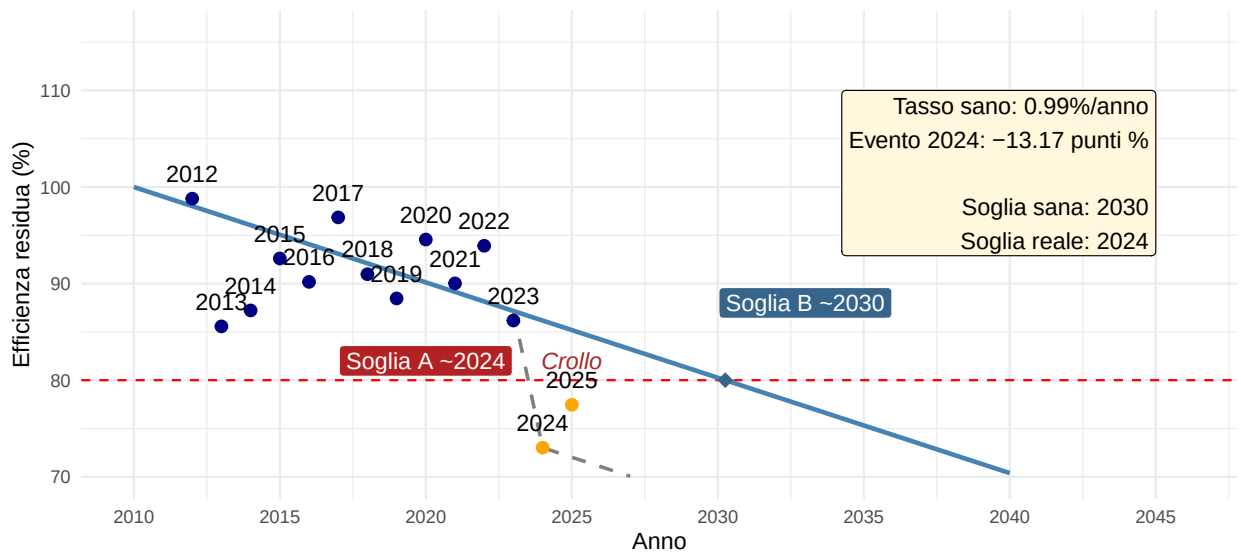


Figura 4.6: Degradamento Impianto Fotovoltaico

La pendenza della retta di previsione blu rappresentata nella Figura 4.6 mostra l'usura naturale dei materiali e la perdita di efficienza delle celle solari.

La pendenza della linea tratteggiata in grigio, invece, indica l'usura reale dei pannelli fotovoltaici avvenuta in questi anni. Negli ultimi due anni, però, numerose celle si sono rotte, motivo di una prestazione peggiore. Normalmente gli impianti fotovoltaici perdono di efficienza annua tra il 0.5% e lo 0.8%. Anche in condizioni ottimali, l'impianto si stava degradando ad un tasso del 0.99 %. L'impianto, invece, a causa della rottura strutturale di diversi moduli mostra un decadimento significativamente più accelerato.

Il grafico mostra chiaramente come l'impianto abbia già incrociato la linea rossa della soglia critica nel corso del 2024. Questo è un segnale della necessità di un intervento di manutenzione straordinaria o della sostituzione dei moduli. Se l'azienda non interviene, entro il 2030 l'efficienza residua scenderà verso il 70%-73%. A questi livelli, l'impianto produce molta meno energia di quella prevista dal piano finanziario originale, rendendo i costi di manutenzione superiori ai ricavi energetici.

Infatti, l'azienda ha infatti già richiesto un preventivo per la sostituzione parziale dei pannelli, fornendo i dati necessari per elaborare una stima delle prestazioni future:

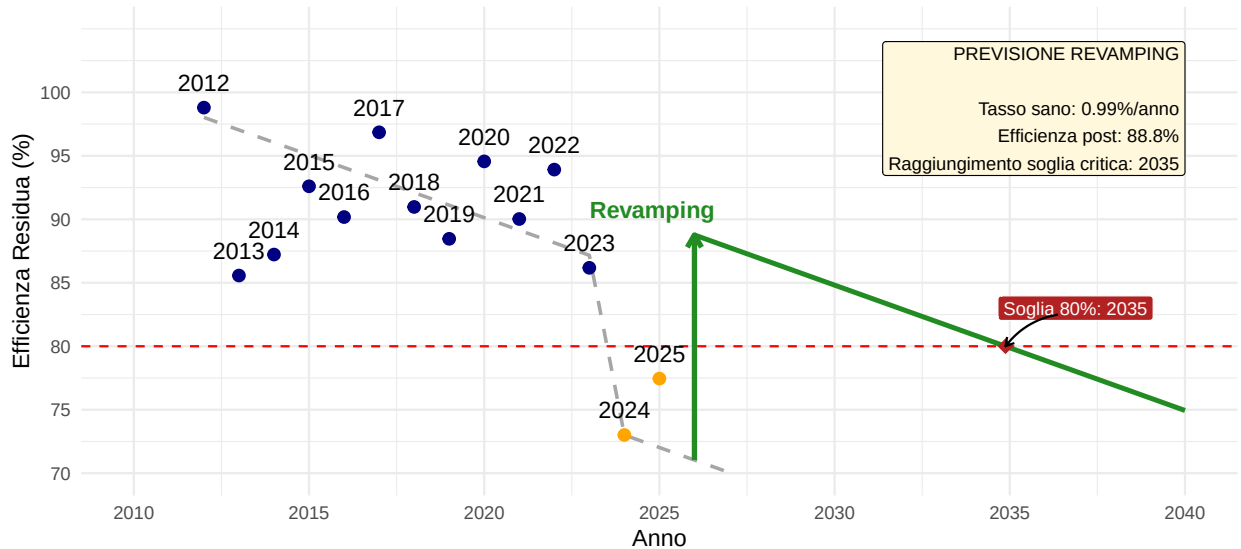


Figura 4.7: Previsione Ciclo di Vita del Fotovoltaico Dopo la Sostituzione

Poiché i dati degli anni 2024-2025 sono anomali a causa di rotture di diverse celle, questi vengono esclusi dalla stima del modello previsivo: includerli produrrebbe una sovrastima del tasso di degradazione, distorcendo le proiezioni future verso il basso, rendendole non verosimili. Il modello viene quindi stimato esclusivamente sul periodo 2019-2023, che si è assunto rappresentativo del normale invecchiamento dell'impianto. Il tasso di degradazione del fotovoltaico, quindi, sarà il nuovo coefficiente angolare della retta.

Una volta stimato, il modello viene utilizzato per proiettare l'efficienza residua dell'impianto al 2026, ovvero al momento dell'intervento di sostituzione. Questo restituisce lo stato di degrado attuale dei sottosistemi 1 e 2, che non vengono sostituiti, mentre il sottosistema 3 verrà integralmente sostituito e si assume che opererà alla piena capacità teorica.

La resa complessiva del sistema post-intervento nel 2026 è quindi la somma della resa degradata dei pannelli 1 e 2 e della resa teorica del pannello 3 nuovo. Rapportando questa somma al benchmark del 2010 si ottiene l'efficienza di sistema post-sostituzione, che rappresenta il punto di partenza della proiezione futura.

Le assunzioni del modello sono che il tasso di degradazione stimato sul periodo sano si applichi uniformemente a tutto il sistema rinnovato, e che il declino sia lineare nel tempo.

Sebbene l'investimento possa ottimizzare la gestione dei costi energetici, è stato suggerito all'azienda di attendere la pubblicazione di bandi regionali o nazionali, così da beneficiare di agevolazioni finanziarie che ne migliorino il ROI (Return on Investment).

Capitolo 5

Analisi su un'azienda di confezionamento alimentare

L'oggetto dell'analisi è un'azienda con un'esperienza ultra ventennale, specializzata nella produzione di contenitori per uso alimentare realizzati con materiali certificati⁴. Con un consumo energetico complessivo compreso tra 1 e 2 GWh annui distribuiti tra le varie sedi, la società rientra a tutti gli effetti nella categoria delle imprese energivore.

5.1 Struttura aziendale

L'organizzazione si articola in quattro sedi, di cui tre produttive e un magazzino.

La Sede produttiva 1, **SP1**, dispone di due punti di prelievo (POD), denominati rispettivamente SP1 100 e SP1 60. I dati storici includono le fatturazioni mensili a partire da gennaio 2023 e le rilevazioni del consumo energetico giornaliero dal 21 luglio 2023.

La Sede produttiva 2, **SP2**, di cui si dispongono le fatture mensili da gennaio 2023 e i consumi energetici giornalieri dal 21 luglio 2023.

Dell'ultima sede produttiva, **SP3**, sono disponibili le fatture mensili da ottobre 2023 e i dati di consumo giornaliero dal 1° febbraio 2024.

Infine, non sono disponibili dati storici di consumo giornaliero del magazzino, **MAG**, ma si dispone delle fatture mensili di energia elettrica a partire da gennaio 2025.

⁴BRC GLOBAL STANDARD for PACKAGING MATERIAL Issue: 6. La certificazione BRC garantisce sicurezza, qualità ed idoneità alimentare del packaging attraverso controlli periodici su prodotti, processi e materie prime.

5.2 Raccolta e pulizia dei dati

Il dataset comprende le rilevazioni dei consumi energetici raccolte in due fasi distinte, interrotte da un cambio nella tecnologia di monitoraggio. Fino al 24 giugno 2025, i dati sono stati acquisiti tramite il sistema hardware preesistente in azienda, il quale forniva esclusivamente il valore cumulato dei consumi. Dal 25 giugno 2025 è subentrato il nuovo hardware fornito da Innovation System. A differenza del precedente, questo sistema elabora internamente il dato cumulato per restituire in output il "delta", ovvero il consumo effettivo registrato in ogni specifico intervallo temporale.

Il consumo totale analizzato (E_{tot}) è determinato su base giornaliera ed equivale all'energia elettrica prelevata dalla rete ($E_{\text{rete, imp}}$):

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{rete, imp}}$$

A integrazione dei rilievi puntuali del sistema di monitoraggio, sono state acquisite le fatture energetiche di tutti gli stabilimenti, utilizzate come riferimento certo per i consumi mensili e i relativi costi. La discrepanza tra i dati rilevati sul campo e i consumi fatturati in bolletta è risultata intorno all'1.5%.

5.2.1 Metodologia di correzione e imputazione dei dati

Per garantire l'integrità statistica del dataset e permettere un'analisi accurata sia su base mensile che annuale, le anomalie e i periodi di mancata rilevazione sono stati gestiti applicando una metodologia di ripartizione proporzionale basata sul profilo storico omologo (descritto nella Sezione 3.1.2). Tale approccio è stato declinato sui due specifici periodi di interruzione come segue:

Transizione hardware nel sito SP1 100 (dal 24/06/2025 al 03/07/2025)

In corrispondenza del cambio di strumentazione nel POD, si è verificato un gap temporale di dieci giorni privo di letture. I consumi mancanti sono stati imputati isolando il consumo complessivo del periodo dalle bollette e ripartendolo secondo la seguente metodologia:

- **giugno:** dal totale mensile desunto dalla fatturazione elettronica sono stati sottratti i consumi regolarmente registrati fino al giorno 23; la quota residua del mese è stata distribuita sulle giornate rimanenti applicando i pesi storici dello stesso mese dell'anno precedente.

- **luglio:** i consumi dei primi tre giorni del mese sono stati stimati con la stessa modalità dalla bolletta mensile di luglio, per poi riprendere la serie reale dal 4 luglio.

Interruzione dei dati nel sito SP2 (dal 26/10/2025 al 15/01/2026)

Il 16 gennaio 2026, al ripristino del sistema, il software ha registrato un unico valore cumulativo che inglobava la totalità dei consumi effettuati durante l'intero periodo di blackout. Per ricostruire la serie storica giornaliera, tale dato cumulato è stato incrociato e vincolato ai consumi mensili certificati dalle bollette, applicando il sistema di pesi descritto nella Sezione 3.1.2:

- **ottobre:** detratte le letture note (fino al giorno 25) dal totale fatturato in bolletta, la quota rimanente è stata ripartita sulla base dei pesi registrati nel medesimo intervallo dell'anno precedente.
- **novembre e dicembre:** i volumi mensili complessivi certificati dalle rispettive fatture sono stati ridistribuiti su scala giornaliera applicando la medesima pesistica storica del profilo omologo.
- **gennaio (fino al giorno 15):** il consumo parziale è stato ricavato per differenza, sottraendo dal valore cumulato registrato il 16/01 i consumi precedentemente imputati nei mesi di ottobre, novembre e dicembre. Il residuo così ottenuto è stato distribuito mediante i pesi storici del profilo omologo.

Perché non altre tecniche?

La tecnica selezionata deriva da un'attenta valutazione delle alternative metodologiche, scartate poiché inadeguate o non applicabili al contesto aziendale.

La media aritmetica semplice è stata scartata in quanto avrebbe causato un appiattimento eccessivo del dato, ignorando la componente di stagionalità e la ciclicità dei consumi. Allo stesso modo, i classici modelli di forecasting avrebbero ignorato il vincolo fondamentale rappresentato dal valore cumulato finale; l'utilizzo del dato reale del contatore come "ancora" permette invece di garantire una quadratura reale al 100% del bilancio energetico, azzerando l'errore di stima complessivo. Infine, tecniche basate su algoritmi a "donatori" come il Predictive Mean Matching (PMM) o i K-Nearest Neighbors (KNN) non sono risultate applicabili. Questo a causa dell'assenza di variabili esplicative nel dataset, come i volumi di produzione oraria, che sarebbero state indispensabili per individuare gruppi di dati statisticamente coerenti.

5.3 Andamento generale dei consumi

In via preliminare rispetto allo svolgimento delle analisi, si è proceduto all'aggregazione dei dati relativi a SP1 100 e SP1 60, trattandosi di due POD facenti capo al medesimo stabilimento produttivo, la cui separazione avrebbe indotto a valutazioni fuorvianti.

Come prima analisi, è stato esaminato l'andamento complessivo dei consumi nel tempo. Sono stati esclusi i mesi parziali e i valori mancanti (NA) relativi agli stabilimenti entrati in funzione in un momento successivo.

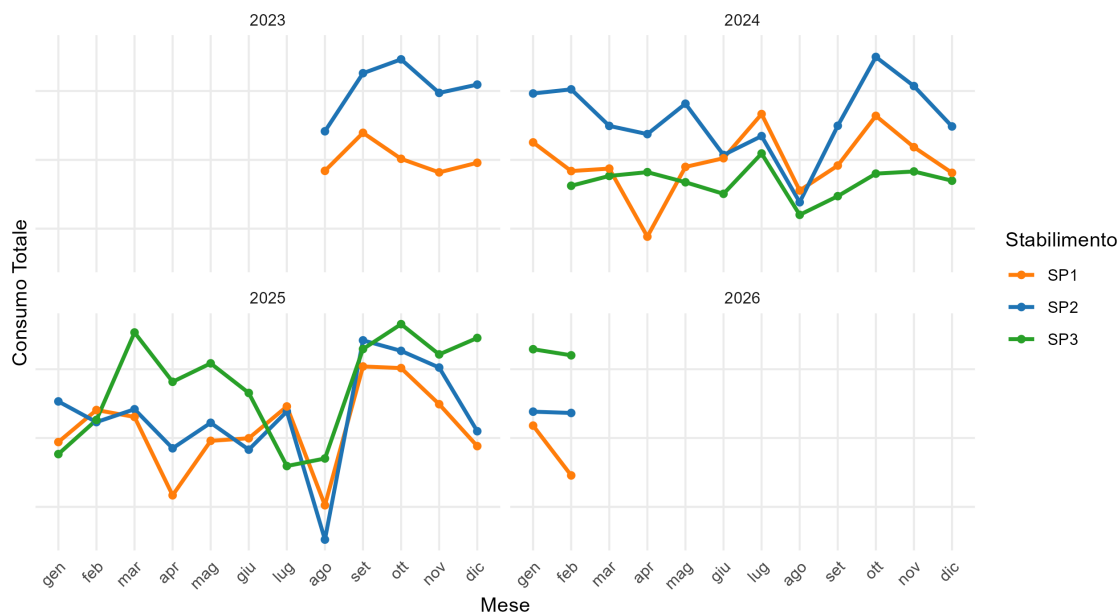


Figura 5.1: Andamento dei consumi totali aziendali.

Nonostante i differenti volumi assoluti, tutte le sedi analizzate nella Figura 5.1 evidenziano una medesima stagionalità: si osserva una netta contrazione nel mese di agosto, imputabile alla chiusura aziendale estiva che azzerà i consumi di processo. Si nota anche una risalita costante verso i mesi di ottobre e novembre, verosimilmente causata dalla ripresa delle attività produttive a pieno regime e all'accensione degli impianti di riscaldamento e illuminazione.

Si rileva un'anomalia a marzo 2025: il grafico evidenzia un picco insolito per la sede SP3, i cui consumi sfiorano gli 80.000 kWh, a fronte di una contestuale diminuzione nei consumi di SP2. Tale andamento potrebbe riflettere un test di produzione o un evento straordinario localizzato esclusivamente in SP3.

Inoltre, dalla Figura 5.1 emerge come, a partire dal 2024, l'attivazione della sede SP3 (rappresentata in verde) abbia ridefinito gli equilibri energetici aziendali, assorbendo una quota progressivamente crescente del consumo totale.

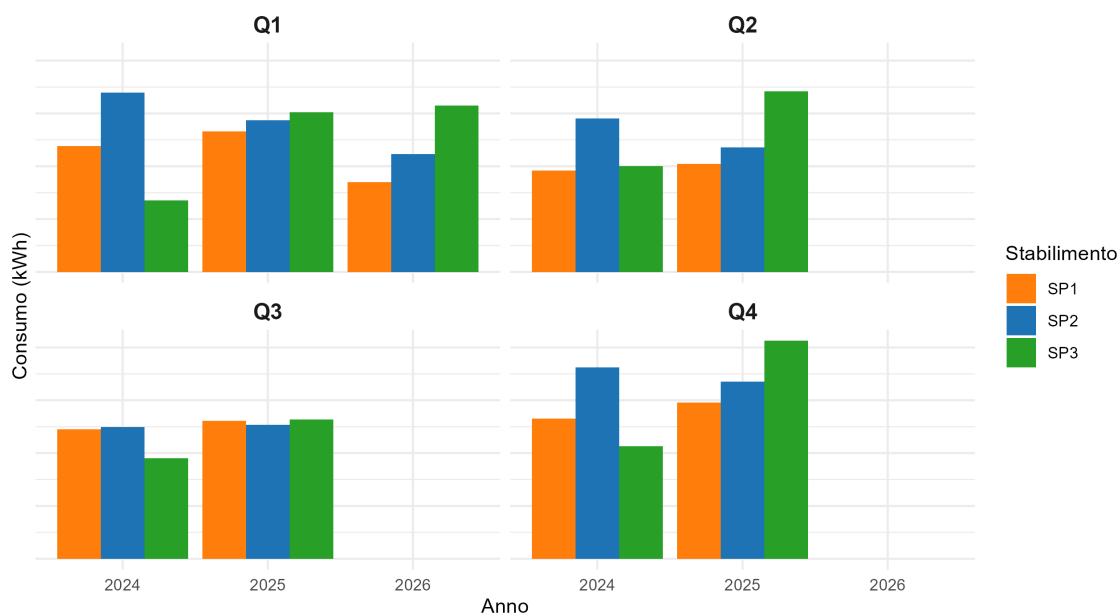


Figura 5.2: Confronto dei consumi energetici trimestrali.

L'analisi trimestrale riportata nella Figura 5.2 conferma che l'incremento generale dei consumi è fortemente trainato dal sito SP3. Osservando le ripartizioni trimestrali, il consumo di SP3 nel Q1 2025 risulta quasi triplicato rispetto al medesimo periodo del 2024; situazione simile nei trimestri Q2 e Q4 2025, in cui si registrano valori prossimi al doppio rispetto all'anno precedente. Questo cambiamento nei consumi è giustificato dal passaggio dello stabilimento, tra il 2024 e il 2025, da un regime di utilizzo parziale e logistico a uno di piena produzione.

5.4 L'efficienza dei processi su base annuale

La Figura 5.3 illustra l'evoluzione energetica dei siti SP1, SP2 e SP3 nel triennio 2023-2025. L'analisi incrocia il consumo assoluto (espresso in kWh) con l'intensità strutturale (kWh/mq) e il fatturato (€) al fine di valutare l'efficientamento operativo. L'obiettivo è determinare se la crescita del volume d'affari avvenga in modo efficiente rispetto all'assorbimento delle risorse energetiche.

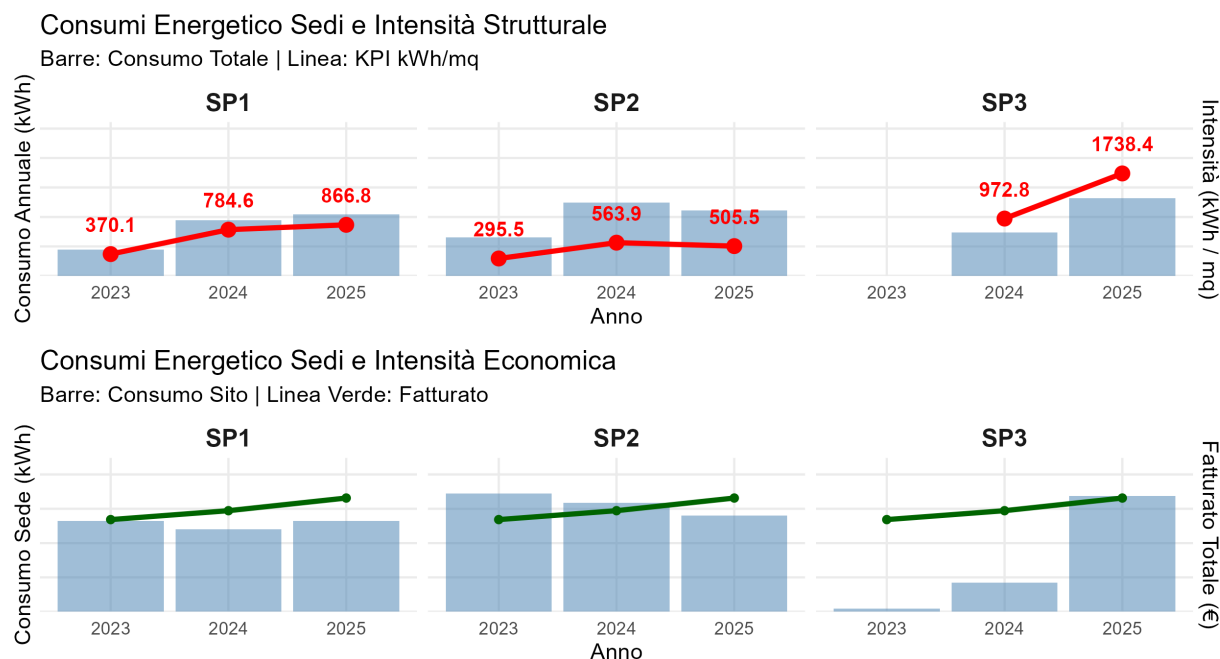


Figura 5.3: Analisi comparativa dei consumi in relazione alla superficie e al fatturato.

A conferma delle evidenze precedenti, l'esame dell'efficienza strutturale, riportato graficamente nella Figura 5.3, ottenuto rapportando i consumi annuali alla superficie in metri quadri di ciascuna sede, evidenzia come lo stabilimento SP2 rappresenti il sito più virtuoso. Quest'ultimo mostra infatti una contrazione dei consumi a fronte di un incremento sia del fatturato sia rapportato alla metratura. Parallelamente, l'analisi convalida la fase di forte espansione del sito SP3, mentre la sede SP1 mostra una progressiva stabilizzazione dei propri fabbisogni energetici.

L'analisi del grafico inferiore evidenzia la correlazione esistente tra i consumi (rappresentati dalle barre) e il fatturato (linea verde): l'andamento parallelo dei due indicatori conferma che l'energia elettrica costituisce un costo variabile direttamente proporzionale ai volumi di produzione. Per la sede SP2 si rileva un netto disallineamento nel 2025 (consumi in calo e fatturato in crescita), indice di un significativo efficientamento del sito.

5.5 Confronto dall'inizio del monitoraggio

Viene di seguito presentato un confronto tra il periodo luglio-febbraio dell'anno corrente e il medesimo intervallo dell'anno precedente. L'obiettivo è verificare l'eventuale presenza di un trend di efficientamento dall'inizio del monitoraggio, isolando gli effetti della stagionalità.

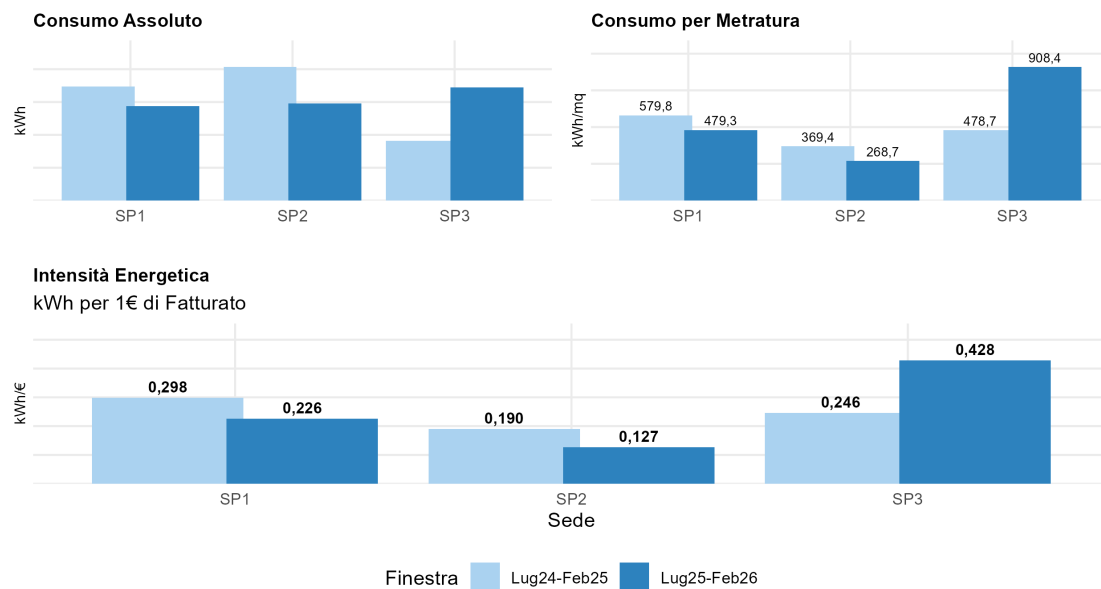


Figura 5.4: Confronto dei consumi dall'inizio del monitoraggio.

Al netto delle metrature, si osserva dalla Figura 5.4 che, nonostante l'incremento fisiologico dei consumi totali legato all'aumento del fatturato, quindi della produzione, l'indicatore di produttività dello spazio mostra trend positivi. Il mantenimento di una pendenza costante o decrescente per tali vettori energetici attesta una gestione efficiente delle infrastrutture. Si ipotizza che nel corso dell'anno corrente la sede SP3 vada incontro a una stabilizzazione, propedeutica a una successiva flessione dei consumi analoga a quella registrata negli altri stabilimenti.

5.6 Definizione del modello previsionale

Durante il percorso di modellazione si è passati dall'aggregazione mensile alla scala giornaliera. La ricerca del modello previsionale è stata finalizzata alla spiegazione e alla stima dei consumi energetici delle tre sedi produttive. Inizialmente sono stati testati modelli di tipo "macro" su base mensile; successivamente, l'analisi è stata affinata scendendo a un livello "micro" giornaliero, scala nella quale diventa possibile catturare le dinamiche operative di dettaglio (giorni lavorativi rispetto ai fine settimana), determinando un netto incremento delle performance del modello.

Come analizzato anche da Wooldridge, l'inserimento simultaneo dell'intercetta e di una variabile indicatrice per ciascuna delle g categorie individuate genererebbe un problema di collinearità perfetta, rendendo la matrice dei dati non invertibile e bloccando la stima dei parametri (la cosiddetta "trappola delle dummy"). Per ovviare a tale criticità, in ciascuna specificazione è stata omessa una categoria, assunta come baseline (o gruppo di controllo), rispetto alla quale vengono interpretati i coefficienti delle restanti $g - 1$ variabili dummy inserite nei modelli.[7]

Per ciascun modello è stata definita una differente categoria di riferimento (baseline), che verrà opportunamente specificata nei rispettivi paragrafi.

5.6.1 Fase 1: Implementazione dei modelli mensili

Nella prima fase si è operato su dati aggregati mensilmente, valutando differenti combinazioni di variabili esplicative per spiegare la varianza dei consumi.

1. Modello "stagionale base"

Il modello mappa i consumi in funzione della Sede (SP1, SP2, SP3) e della Stagione (Estate, Inverno, Mezza Stagione). La baseline di riferimento è costituita dalla sede SP2 nel periodo estivo.

- **Performance:** $R^2 = 0.23$. Il modello spiega soltanto il 23% della varianza complessiva, palesando ampi margini di miglioramento.
- **Punti di forza:** linearità strutturale e interpretabilità immediata. Il modello conferma la minore intensità energetica di SP3 e SP1 rispetto a SP2 (coefficiente negativo statisticamente significativo).
- **Punti di debolezza:** la definizione rigida delle stagioni (es. Estate identificata rigidamente nel trimestre giugno-agosto) si rivela troppo macroscopica per intercettare variazioni repentine come la chiusura nel mese di agosto.

2. Modello "strutturale mensile"

In sostituzione delle macro-stagioni, sono stati introdotti i 12 mesi dell'anno come fattori dummy. La baseline è rappresentata dalla sede SP2 nel mese di gennaio.

- **Performance:** $R^2 = 0.23$. L'introduzione dei mesi non ha prodotto variazioni nel potere esplicativo del modello.
- **Punti di forza:** isolamento statistico della contrazione dei consumi di agosto (coefficiente negativo e significativo). Le sedi SP1 e SP3 mantengono coefficienti negativi e significativi.
- **Punti di debolezza:** l'inserimento di 11 variabili dummy su un dataset di dimensioni ridotte riduce drasticamente i gradi di libertà, inficiando la significatività statistica di quasi tutti i mesi stimati.

3. Modello "produttivo"

Tale approccio ha tentato di vincolare i consumi al fatturato mensile stimato (ottenuto ripartendo il fatturato totale annuo in base alla superficie delle sedi). Baseline: SP2 nel primo trimestre.

- **Performance:** $R^2 = 0.20$. Nessuna variabile esplicativa è risultata significativa, configurando questo come il modello meno efficiente.
- **Punti di forza:** coerenza concettuale con le dinamiche di business (la produzione e i consumi energetici risultano legati ai ricavi).
- **Punti di debolezza:** il fatturato mensile non era un dato puntuale ma una derivazione fittizia lineare del dato annuale. L'assenza di una reale variabilità mensile ha impedito al modello di identificare una correlazione robusta.

5.6.2 Fase 2: Implementazione del modello giornaliero

Evidenziati i limiti dell'approccio macro-mensile, l'analisi è stata spostata sulla scala temporale giornaliera.

Modello giornaliero statico

I dati sono stati stratificati per sede, formalizzando tre modelli indipendenti basati sulle seguenti variabili:

- **Trend:** giorni trascorsi dal tempo zero, utile a catturare derive di lungo periodo.

- **Ciclo settimanale:** variabile categoriale per riflettere le asimmetrie tra giorni feriali e festivi.
- **Stagionalità:** per intercettare i fabbisogni termici ed eventuali fermi programmati.

Punti di forza: descrive accuratamente il profilo operativo aziendale, mappando la flessione dei consumi nei fine settimana e la ripresa del lunedì. Consente la generazione di previsioni puntuali giornaliere.

Punti di debolezza: rigidità storica, con una tendenza a sottostimare le fluttuazioni e i picchi improvvisi di produzione.

5.6.3 Fase 3: Modello reattivo giornaliero finale

Rappresenta l’approccio definitivo implementato, sviluppato per superare la rigidità del modello statico. La variabile rigida del trend lineare è stata sostituita con una media mobile calcolata su un orizzonte di 7 giorni. Il modello definitivo si articola secondo tre componenti principali:

1. **Trend a breve termine:** la media mobile a 7 giorni conferisce flessibilità e reattività all’algoritmo, definendo la baseline fluttuante del periodo.
2. **Giorno della settimana:** corregge la baseline applicando i coefficienti specifici del giorno della settimana.
3. **Effetto mensile:** apporta un micro-aggiustamento stagionale legato a fattori esogeni (es. riscaldamento o chiusure programmate).

Punti di forza del modello reattivo

Il principale vantaggio risiede nella **reattività**: come illustrato nella Figura 5.5 ⁵, il modello si adatta rapidamente alle variazioni del regime produttivo. L’attivazione di una nuova linea ad alta intensità in una sede determina l’innalzamento della media mobile a 7 giorni, adeguando automaticamente le stime per i giorni successivi e intercettando fedelmente i picchi di consumo.

⁵I valori sull’asse delle ordinate sono stati riscaldati per garantire l’anonimato dei dati sui consumi.

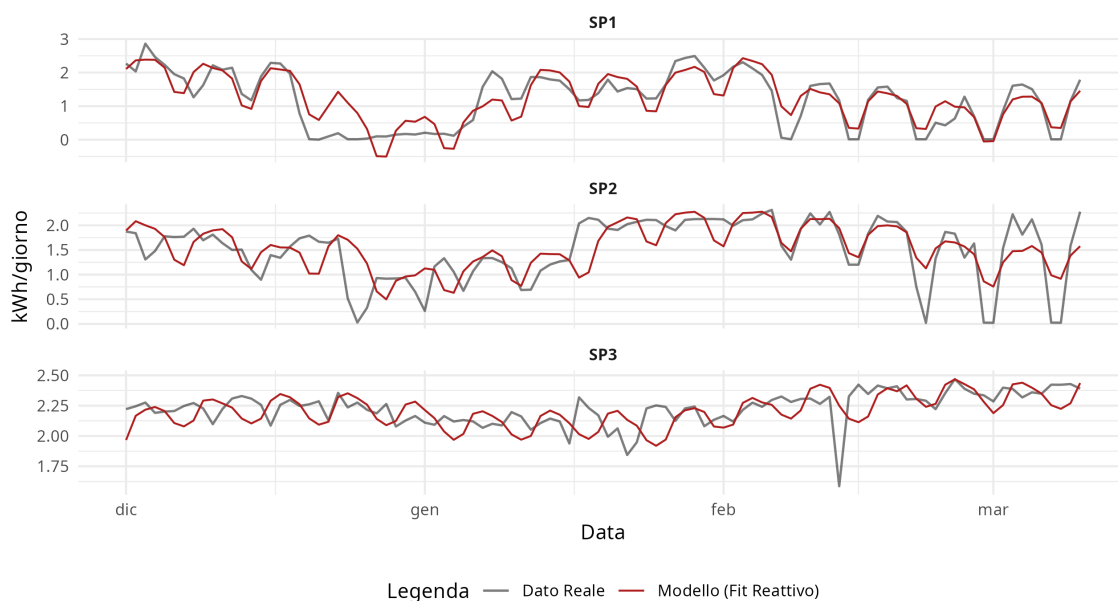


Figura 5.5: Validazione e *fitting* del modello reattivo finale, da dicembre a marzo.

Come evidenziato dalla Figura 5.5, le traiettorie del modello seguono fedelmente i picchi e i minimi dei dati reali. La precisione percentuale misurata sulle tre sedi è pari al 78.18% per **SP2**, 83.97% per **SP3** e 71.29% per **SP1**.

Punti di debolezza

- **Shock temporanei:** a causa dell'elevata reattività, un guasto improvviso a un macchinario con conseguente crollo verticale dei consumi influenzerà al ribasso le stime per i giorni successivi.
- **Mese di agosto:** la chiusura aziendale estiva rischia di essere sottostimata se la media mobile dell'ultima settimana di luglio rimane elevata. Tale limite viene superato forzando il dato reale a ridosso del fermo.

Capitolo 6

Analisi di un Gruppo leader nella lavorazione del legno

Il Gruppo si configura come una delle principali realtà europee leader nella lavorazione e commercializzazione del legno, con molteplici sedi operative dislocate sia in Italia che nel resto d'Europa.

I consumi dei siti in esame risultano costantemente inferiori alla soglia di 500.000 kWh annui; di conseguenza, queste sedi non soddisfano i requisiti volumetrici per l'inclusione nella categoria delle imprese a forte consumo di energia.

6.1 Struttura del Gruppo

Al fine di identificare chiaramente i diversi siti produttivi del Gruppo all'interno delle analisi, le aziende sono state denominate come segue.

Della **Sede 1** i dati disponibili comprendono le rilevazioni dell'impianto fotovoltaico a partire dal 1° gennaio 2023, del cogeneratore ⁶ dal 4 dicembre 2023 e della rete elettrica dal 29 gennaio 2024. Di conseguenza, per garantire il calcolo dell'assorbimento totale complessivo del sito, l'orizzonte temporale dell'analisi ha inizio il 1° febbraio 2024.

Le serie storiche della **Sede 2** includono i dati del fotovoltaico dal 7 febbraio 2023, del cogeneratore dal 12 ottobre 2023 e della rete elettrica dal 21 marzo 2024. Pertanto, l'analisi finalizzata alla determinazione dell'assorbimento totale della sede ha inizio il 1° aprile 2024.

I monitoraggi della rete elettrica, del cogeneratore e del fotovoltaico della **Sede 3** decorrono, rispettivamente, dal 10 ottobre 2023, dal 30 novembre 2023 e dal 30

⁶Un cogeneratore è un impianto che produce simultaneamente energia elettrica e termica a partire da una singola fonte di energia primaria (ad esempio il gas naturale o la biomassa).

agosto 2024.

Le relative analisi sull'assorbimento totale partono quindi dal 1° settembre 2024.

Per questo stabilimento si possiede l'analisi energetica del triennio 2021-2023, la quale fornisce il quadro storico annuale dei consumi dei vettori elettrici e termici. Invece, per il biennio successivo 2024-2025, si dispone delle fatture di fornitura e dei registri di produzione fotovoltaica dal 2024; questo consente di integrare lo studio con i consumi più recenti e completi. Un esame dettagliato di questa sede è presente nella Sezione 6.3.

6.2 Raccolta e pulizia dei dati

Lo studio si concentra sull'esame dei profili di consumo di tre stabilimenti produttivi del Gruppo dislocati in Italia. I dati oggetto di valutazione derivano sia dai sistemi di monitoraggio aziendali, sia dalla documentazione integrativa fornita direttamente dal Gruppo.

Il consumo totale analizzato (E_{tot}) è determinato su base giornaliera applicando l'equazione di bilancio energetico dei flussi di stabilimento:

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{cog}} + E_{\text{fv, auto}} + E_{\text{rete, imp}} - E_{\text{rete, esp}}$$

Dove la componente fotovoltaica effettivamente autoconsumata in situ ($E_{\text{fv, auto}}$) viene isolata sottraendo l'energia immessa in rete dall'energia totale generata dai pannelli:

$$E_{\text{fv, auto}} = E_{\text{fv, prod}} - E_{\text{fv, esp}}$$

6.2.1 Metodologia di correzione e imputazione dati

Per tutte le Sedi si sono applicate le metodologie di correzioni spiegate nella Sezione 3.1.

In particolare, i gap relativi alla cogenerazione (E_{cog}), sono stati risolti applicando la metodologia spiegata nella Sezione 3.1.1.

Al contrario, le interruzioni prolungate riguardanti l'energia importata ed esportata ($E_{\text{rete, imp}}$ ed $E_{\text{rete, esp}}$), sono state trattate applicando la metodologia del profilo storico omologo, spiegata nella Sezione 3.1.2.

Analogamente, per i gap prolungati della produzione fotovoltaica ($E_{\text{fv, prod}}$), il dato cumulato reale è stato ripartito sulla base dell'andamento storico di produzione del medesimo impianto, metodologia spiegata nella Sezione 3.1.3, garantendo il pieno rispetto della varianza e della stagionalità.

Perché non altre tecniche?

L'impiego di tecniche tradizionali o imputazione statistica avanzata è stato scartato per diverse motivazioni.

Algoritmi come **k-Nearest Neighbors** o **Predictive Mean Matching** generano stime stocastiche che non vincolano la somma dei dati imputati alla cumulata reale del contatore. Nei siti del Gruppo, regolati dall'equazione di bilancio riportata nella Sezione 6.2, un'imputazione non vincolata introdurrebbe un errore sistematico nella quantificazione dei consumi totali.

La presenza simultanea di cogenerazione (E_{cog}), fotovoltaico (E_{fv}) e scambio bidirezionale della rete, rende complessa **l'imputazione multivariata**. Tentare di stimare separatamente immissioni ($E_{rete,esp}$) e prelievi ($E_{rete,imp}$) con le sole variabili indipendenti dell'irraggiamento solare e della produzione del cogeneratore, genererebbe forti distorsioni nei modelli predittivi.

L'avvio recente del monitoraggio ad alta frequenza rende insufficiente il volume di dati puliti necessario per addestrare modelli più complessi o regressivi avanzati, poiché aumenterebbe il rischio di overfitting.

L'interpolazione lineare semplice, pur mantenendo la continuità, appiattisce le curve di carico nei fermi produttivi, sottostimando il consumo di fondo e alterando il calcolo dell'indice festivo.

L'approccio vincolato alla cumulata reale e al profilo omologo garantisce la rigorosa chiusura del bilancio e la conservazione della dinamica dei turni operativi aziendali.

6.3 Andamento dei tre stabilimenti

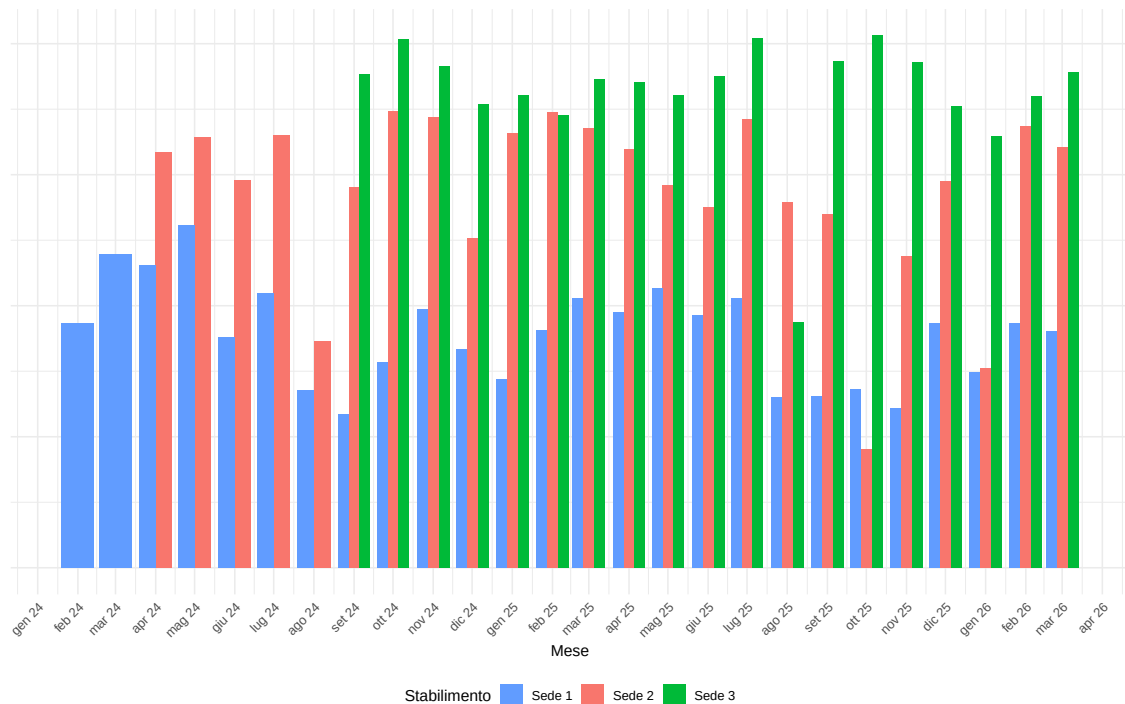


Figura 6.1: Andamento consumi del Gruppo in esame

L'analisi comparativa dei consumi mensili riportata nella Figura 6.1 evidenzia profili operativi differenti tra i tre siti.

La Sede 2 mostra una marcata variabilità nel corso dell'anno, caratterizzata da cali evidenti nei mesi di agosto e dicembre, legati alle fermate tecniche e alle pause produttive stagionali.

La Sede 1 presenta invece l'assorbimento energetico più contenuto e lineare del gruppo.

Al contrario, la Sede 3 si distingue nettamente come il sito a maggiore intensità e assorbimento energetico complessivo.

6.3.1 L'efficienza dei processi su base trimestrale

Per valutare l'efficacia delle strategie di efficientamento al netto delle fluttuazioni stagionali, i dati sono stati raggruppati in intervalli trimestrali a partire dall'avvio del monitoraggio di ciascuna sede, calcolando lo scostamento percentuale rispetto al primo anno di riferimento definito come baseline.

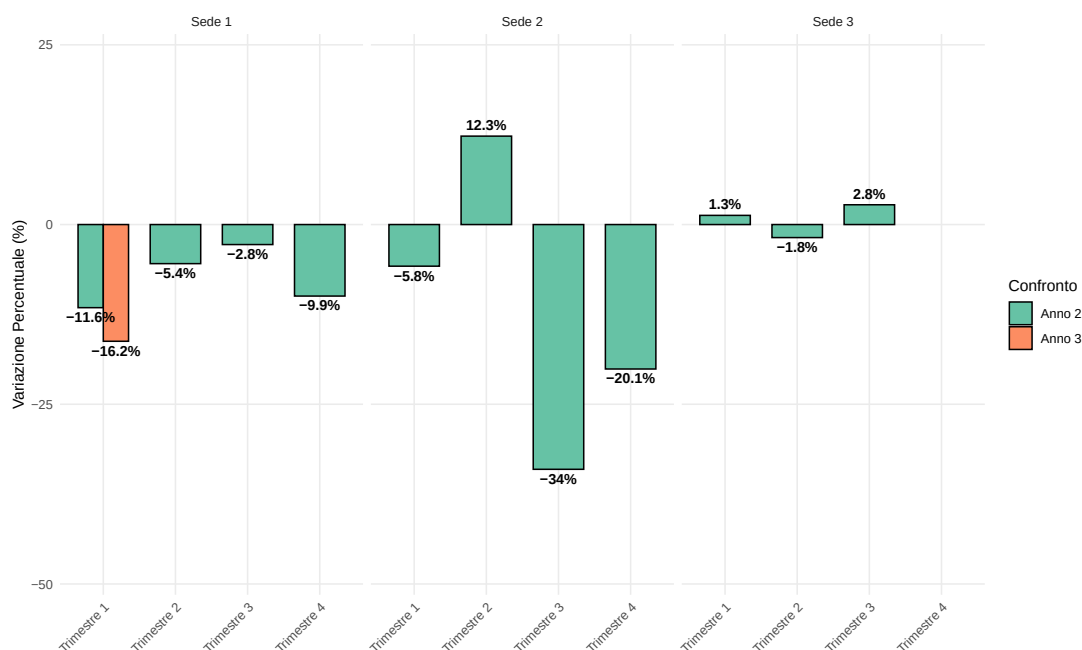


Figura 6.2: Andamento consumi del Gruppo in esame

Dal grafico riportato nella Figura 6.2, si possono trarre alcune interessanti conclusioni.

La **Sede 1** mostra il trend di miglioramento più costante e rilevante dal punto di vista percentuale. Si registra una riduzione progressiva dei consumi rispetto alla baseline, con un calo che passa dal -11.6% del secondo anno al -16.2% nel terzo anno per il primo trimestre (T1). Anche negli altri trimestri il segno rimane stabilmente negativo, confermando una reale ottimizzazione strutturale dei carichi.

La **Sede 2** evidenzia una maggiore oscillazione dei risultati. Nel secondo trimestre dell'anno 2 si nota un incremento dei consumi del +12.3%, unico scostamento positivo di rilievo, probabilmente legato a un aumento dei volumi di produzione. Nei periodi successivi il trend si inverte drasticamente, toccando una contrazione del -34% nel terzo trimestre, segno di una risposta efficace nella gestione dei carichi.

A causa della serie storica ridotta derivante dalla partenza più recente del monitoraggio, le variazioni registrate (+1,3% nel T1 e -1,8% nel T2) della **Sede 3** mostrano un sostanziale allineamento alla baseline iniziale, senza delineare ancora un trend consolidato.

6.3.2 Analisi feriale vs festivo e calcolo del baseload

Un indicatore fondamentale per intercettare sprechi energetici ed esaminare l'efficienza degli spegnimenti degli impianti a fine turno è il rapporto tra i consumi registrati nei giorni festivi (*Weekend*) e quelli feriali (*Feriale*).

Al fine di garantire la robustezza dell'analisi rispetto a picchi anomali isolati o fermate straordinarie, l'indicatore non calcola il rapporto tra le medie aritmetiche, bensì tra i valori mediani della serie storica, mitigando così l'effetto distorsivo degli outlier.

L'indice di assorbimento del fine settimana (I_{wnd}) è formalizzato come segue:⁷

$$I_{\text{wnd}} = \frac{\text{mediana}(E_{\text{tot, weekend}})}{\text{mediana}(E_{\text{tot, feriale}})} \times 100$$

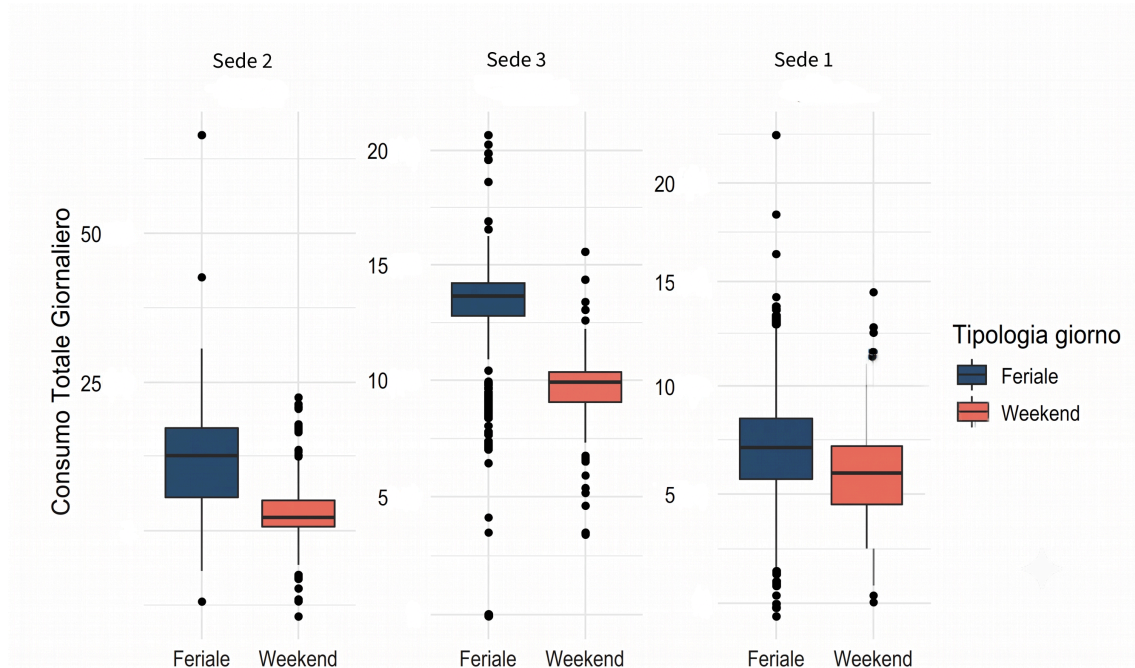


Figura 6.3: Confronto dei consumi feriali e festivi

Dai risultati mostrati dalla Figura 6.3, si evidenziano metodi gestionali profondamente divergenti tra i siti.

La **Sede 2** presenta un indice del 18.2%, il che significa che l'assorbimento nel fine settimana scende a meno di un quinto rispetto ai giorni lavorativi. Questo

⁷Un valore elevato di questo indicatore denota una forte rigidità del profilo di consumo dello stabilimento, evidenziando carichi passivi o impianti mantenuti in funzione nonostante l'interruzione dei turni del personale. I valori sull'asse delle ordinate sono stati riscaliati per garantire l'anonimato dei dati sui consumi.

scenario attesta un'ottima gestione dei fermi macchina e la corretta disattivazione di tutte le utenze non necessarie.

Al contrario, le **Sede 3 e Sede 1** mostrano indici rispettivamente del 71.9% e del 79.6%. In entrambi i casi il consumo nei giorni di chiusura resta estremamente vicino a quello dei giorni di piena attività. Questo elevato carico di base (*baseload*) indica una rigidità dei consumi e suggerisce la necessità di verifiche specifiche sugli impianti a ciclo continuo, come gli essiccatoi, o di una revisione delle procedure operative di spegnimento a fine settimana.

6.4 Analisi dell'autoconsumo e del mix energetico

La scelta delle fonti di approvvigionamento delinea la strategia di sostenibilità ed economicità dei singoli siti. Al fine di valutare l'apporto relativo di ciascun vettore energetico, viene analizzata l'evoluzione temporale del mix energetico di stabilimento attraverso una rappresentazione grafica ad aree cumulate (Figura 6.4). Questo approccio consente di visualizzare non solo il volume complessivo dei consumi, ma anche la dinamica di sostituzione tra le diverse sorgenti al variare delle condizioni stagionali e operative⁸.



Figura 6.4: Confronto dei consumi feriali e festivi

⁸Nel grafico ad aree cumulate, lo spessore verticale di ciascuna fascia colorata rappresenta l'apporto assoluto (espresso in kWh) della specifica sorgente in quel determinato momento. L'altezza complessiva della curva, data dalla somma verticale delle singole aree, esprime il fabbisogno energetico totale del sito. I valori sull'asse delle ordinate sono stati riscalandi per garantire l'anonimato dei dati sui consumi.

La **Sede 1** risulta fortemente orientata verso le fonti rinnovabili grazie a una significativa integrazione dell'energia fotovoltaica, in particolare nei mesi estivi, supportata in seconda battuta dal cogeneratore.

La **Sede 2**, pur sfruttando l'energia solare, mantiene una dipendenza costante e rilevante dalla rete elettrica nazionale per coprire i propri picchi operativi, rappresentando il sito con il maggiore potenziale per futuri investimenti in autoproduzione.

La **Sede 3** mostra il profilo più resiliente, basato sul ruolo preponderante della cogenerazione che garantisce un apporto energetico massivo, continuo e indipendente dalle condizioni meteo. La scelta delle fonti di approvvigionamento delinea la strategia di sostenibilità dei singoli siti.

6.5 Analisi specifica della Sede 3

Avendo a disposizione i dati forniti dall'azienda dei consumi dell'energia elettrica, della produzione del cogeneratore e fotovoltaico, si sono potuti ricostruire i consumi dell'azienda a partire dal 2021.

Nella Figura 6.5 si visualizzano i consumi della sede differenziati per fonte.

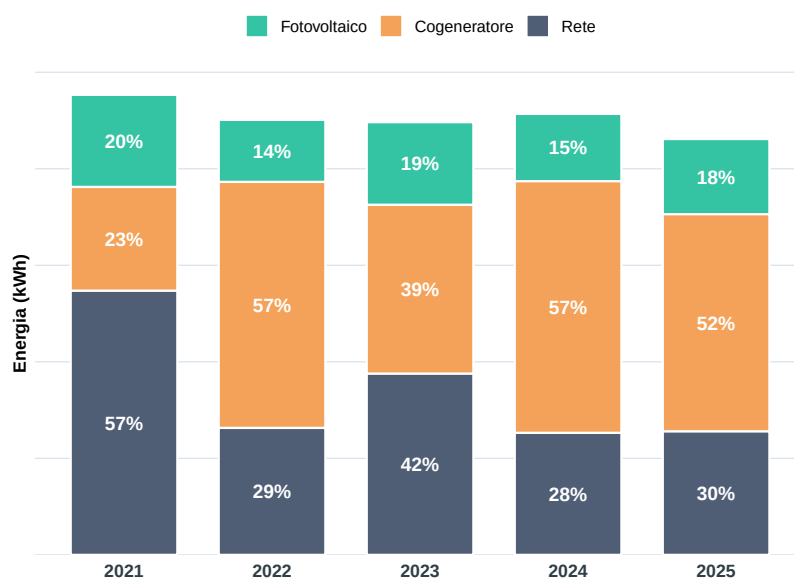


Figura 6.5: Andamento differenziato consumi e produzione Sede 3

Si nota una chiara strategia di transizione energetica volta a ridurre la dipendenza dalla rete elettrica esterna negli anni, oltre ad una lieve contrazione dei consumi complessivi.

Il dato più significativo è il crollo della **dipendenza dalla rete**, passando dal 57% del 2021 a circa il 30% nel 2025. Nonostante un picco di ritorno al 42% nel 2023, il trend generale è di forte contrazione. Questa flessione rende l'azienda meno esposta alla volatilità dei mercati energetici e ai rincari improvvisi derivanti da instabilità geopolitiche, garantendo una maggiore resilienza operativa e stabilità nei costi di approvvigionamento.

L'aumento della produzione **energetica derivata dal cogeneratore** conferma una transizione strategica di successo: nel giro di pochi anni, è passata da fonte complementare a vero e proprio pilastro del mix energetico aziendale. Il raddoppio dell'incidenza, stabilizzatosi stabilmente oltre la soglia del 50%, non solo evidenzia un'efficienza operativa ottimizzata, ma testimonia una significativa riduzione dell'esposizione alla volatilità dei mercati esterni. Questo passaggio, compiuto in un contesto di transizione energetica globale, rende oggi l'azienda più resiliente, autonoma e sostenibile.

L'apporto dell'**energia solare del fotovoltaico** rimane relativamente costante, oscillando tra il 14% e il 20%, fungendo da base rinnovabile stabile ma non primaria.

Si nota una leggera flessione del consumo totale di energia nel 2025 rispetto agli anni precedenti, il che suggerisce il conseguimento di risultati concreti nelle azioni di efficientamento energetico, a fronte di una produzione industriale che ha visto una rimodulazione costante dei volumi. Trattandosi però di un dato grezzo, non è possibile formulare valutazioni definitive: l'analisi dell'indice di disaccoppiamento fornirà un quadro interpretativo più solido.

6.5.1 Indice di disaccoppiamento energetico YoY

Per analizzare l'evoluzione della sostenibilità e dell'efficienza energetica ed economica dello stabilimento, viene adottato l'indice di disaccoppiamento energetico annuale (I_{dec})⁹. Esso quantifica lo *spread*¹⁰ (espresso in punti percentuali, *pp*) tra il tasso di variazione del fatturato ($\Delta\%Fat$) e quello del fabbisogno energetico ($\Delta\%Fab$):

$$I_{dec,t} = \Delta\%Fatturato_t - \Delta\%Fabbisogno_t$$

$$I_{dec,t} = \left(\frac{Fat_t - Fat_{t-1}}{Fat_{t-1}} \right) \times 100 - \left(\frac{Fab_t - Fab_{t-1}}{Fab_{t-1}} \right) \times 100$$

Un valore positivo indica una condizione di disaccoppiamento favorevole, in cui la generazione di valore economico cresce a ritmi superiori (o si contrae a ritmi inferiori) rispetto alle risorse energetiche assorbite dal sistema.

⁹Si utilizza il pedice *dec* dal termine inglese *Decoupling*, ovvero disaccoppiamento.

¹⁰Termine inglese che indica il differenziale o lo scarto tra due grandezze.

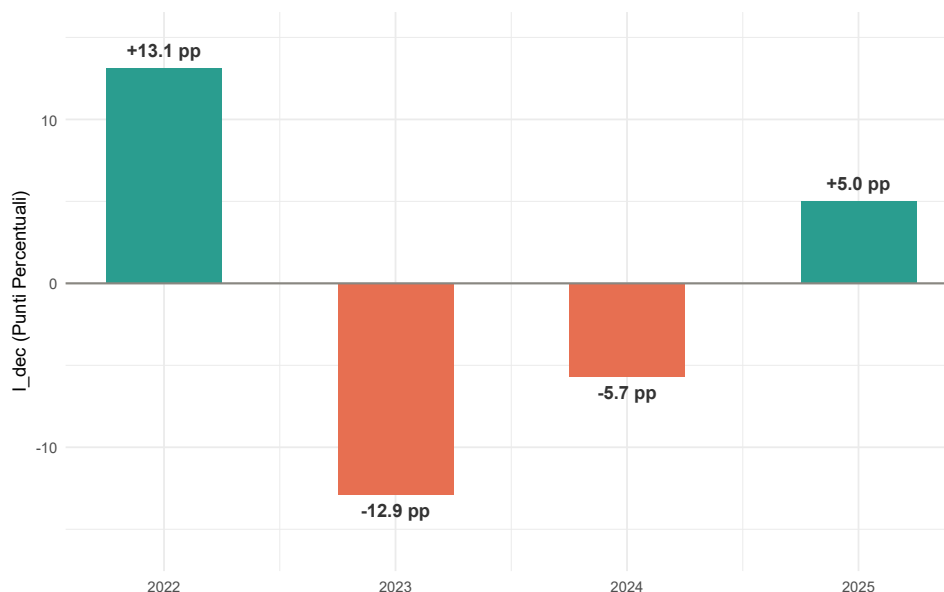


Figura 6.6: Andamento annuale dell'Indice di disaccoppiamento energetico espresso in punti percentuali.

L'analisi dell'andamento storico evidenziato in Figura 6.6 rivela una dinamica in tre fasi distintive:

Nel **2022 (+13.1 pp)** si presenta una forte separazione iniziale: è un anno con una performance d'eccellenza, in cui la crescita economica dello stabilimento ha ampiamente distanziato l'incremento dei consumi energetici, segnando un picco di efficienza operativa.

Successivamente, nel **2023 e nel 2024 (-12.9 pp e -5.7 pp)** si nota una rigidità strutturale e di transizione. Nel biennio intermedio l'indice scende in negativo. Nel 2023 si registra la criticità maggiore, legata alla forte incidenza dei consumi energetici di base che non si riducono proporzionalmente durante le fasi di rallentamento della produzione. Nel 2024, tuttavia, si osserva un lieve recupero (rispetto all'anno precedente), che conferma la progressiva attenuazione della rigidità dei consumi.

Infine, nel **2025 (+5.0 pp)** vi è un'inversione di tendenza e consolidamento. Nell'ultimo anno l'indice torna nettamente positivo. La contrazione del fabbisogno energetico è stata significativamente più marcata della lieve flessione del fatturato, confermando l'efficacia delle misure di efficientamento dei processi industriali e del nuovo assetto di autoproduzione.

In conclusione, lo stabilimento ha spostato il proprio baricentro energetico dall'approvvigionamento esterno tramite rete verso l'autoproduzione da cogenerazione e solare. L'ottimizzazione dell'indice di disaccoppiamento registrata nell'ultimo anno conferma l'efficacia della strategia industriale intrapresa nel percorso di transizione e sostenibilità dell'intero Gruppo.

Capitolo 7

Conclusioni

Alla conclusione di questa esperienza formativa, che aveva come obiettivo l'analisi statistica di diverse aziende clienti monitorate da Innovation System, ho avuto l'opportunità di applicare concretamente i metodi e gli strumenti appresi durante il percorso universitario. L'esperienza ha rappresentato un importante passaggio tra teoria e pratica, permettendomi di confrontarmi con dati reali, problematiche operative e situazioni che raramente emergono in un contesto puramente accademico.

Attraverso l'analisi svolta si è cercato di fornire alle aziende clienti una visione il più possibile completa dei propri consumi energetici, sia tramite un'analisi assoluta sia attraverso indicatori relativi costruiti sulla base dei diversi input forniti. L'utilizzo di differenti metodologie imputazionali ha consentito di risolvere le principali criticità legate alla qualità e completezza dei dati, permettendo di ottenere risultati analizzabili.

Tuttavia, durante lo svolgimento dell'attività sono emerse diverse problematiche che hanno evidenziato come l'analisi dei dati in ambito aziendale sia un processo complesso e non privo di ostacoli. A mio avviso, uno degli aspetti più interessanti di questa esperienza è stato comprendere come il lavoro statistico non consista esclusivamente nell'applicazione di tecniche e modelli, ma richieda anche capacità critica e interpretativa. I dati, infatti, non possono essere considerati automaticamente affidabili: è necessario comprenderne l'origine, valutarne i limiti e contestualizzarne i risultati. Spesso le tecniche studiate risultano essere non applicabili, poiché non sempre sono soddisfatti tutti gli assunti necessari.

Durante la mia permanenza ho potuto riscontrare diversi punti di forza dell'azienda; l'aspetto che ho maggiormente apprezzato è stato l'ambiente lavorativo, che ho trovato estremamente positivo, collaborativo e caratterizzato da grande disponibilità. Nonostante le mie lacune nel settore energetico, ho sempre percepito piena comprensione da parte di tutti i colleghi. Si sono dimostrati costantemente dispo-

nibili a chiarire dubbi e a rispondere alle mie domande, contribuendo a creare un contesto stimolante e favorevole all'apprendimento.

Un ulteriore elemento che considero un importante punto di forza è stata la possibilità di conoscere una realtà aziendale differente rispetto a quelle affrontate durante i corsi universitari. Ritengo che confrontarsi direttamente con un contesto reale rappresenti un valore aggiunto significativo, perché permette di comprendere dinamiche, problematiche e modalità operative che difficilmente possono emergere esclusivamente attraverso lo studio teorico.

Un risultato particolarmente significativo per l'azienda emerso dall'analisi riguarda il monitoraggio degli impianti fotovoltaici e delle cabine elettriche. Nella maggior parte degli anni osservati, l'hardware tende a sottostimare la produzione di circa l'1.3–1.9% rispetto ai dati registrati dal contatore fiscale. Tale comportamento risulta plausibile e può essere attribuito a diversi fattori, tra cui arrotondamenti del sistema di monitoraggio, differenze nei punti di acquisizione delle misure o piccole discrepanze dovute alla calibrazione degli strumenti. Sebbene questa informazione non fosse inizialmente nota all'azienda, ritengo che rappresenti uno degli aspetti più interessanti del lavoro svolto, poiché dimostra come anche differenze apparentemente contenute possano avere un impatto sull'interpretazione dei risultati e sulla loro comunicazione ai clienti.

Per quanto riguarda gli aspetti migliorabili, ritengo che la presenza di una figura tecnica in ambito statistico con cui confrontarmi più frequentemente avrebbe potuto arricchire ulteriormente questa esperienza, soprattutto sui temi prettamente aziendali. Pur non avendo rappresentato un limite particolarmente significativo nello svolgimento del lavoro, grazie alla disponibilità generale del professore relatore e alla possibilità di apprendere in autonomia, un confronto tecnico più diretto e continuativo avrebbe probabilmente facilitato alcuni passaggi e consentito un approfondimento ancora maggiore di determinate tematiche.

Dal punto di vista personale, questa esperienza mi ha permesso di sviluppare una maggiore consapevolezza riguardo alle difficoltà che si incontrano nell'analisi di dati reali e all'importanza di mantenere un approccio critico verso i risultati ottenuti. Mi ha inoltre fatto comprendere quanto la statistica non sia solamente uno strumento matematico, ma un supporto fondamentale per i processi decisionali aziendali.

In conclusione, ritengo che questa esperienza abbia contribuito in modo significativo alla mia crescita professionale e personale, fornendomi competenze tecniche e capacità di analisi e interpretazione preziose per il mio percorso futuro.

Bibliografia e Sitografia

- [1] Saverio Lapini. *Obbligo Diagnosi Energetica 2026: le Novità per le Imprese Italiane*. Gen. 2026. URL: <https://ollum.it/blog/diagnosi-energetica-obbligo/> (visitato il giorno 23/04/2026).
- [2] UNI CEI EN ISO 50001. *Sistemi di gestione dell'energia - Requisiti e linee guida per l'uso*. Rapp. tecn. UNI CEI EN ISO 50001:2018. Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), 2018.
- [3] Nitin Naik. *Choice of Effective Messaging Protocols for IoT Systems*. School of Communications e Information, 2017.
- [4] R. J. Hyndman e George Athanasopoulos. *Forecasting: principles and practice*. 2018.
- [5] Stef Van Buuren. *Flexible Imputation of Missing Data*. CRC press, 2018.
- [6] Gustavo E.A.P.A. Batista e Maria Carolina Monard. «A Study of K-Nearest Neighbour as an Imputation Method». In: *Design, Management and Applications IOS Press* (2002).
- [7] Jeffrey Wooldridge. *Introductory Econometrics: A Modern Approach (7th ed.)* 2020.