



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

**SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA PER SUPPORTARE  
L'EFFICIENZA ENERGETICA DEI PROCESSI INDUSTRIALI  
DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY TO SUPPORT THE  
ENERGY EFFICIENCY OF INDUSTRIAL PROCESSES**

Relatore: Chiar.mo

**Prof. Michele Germani**

Correlatrice:

**Dott.ssa Miriana Mundo**

Tesi di Laurea di:

**Marco Messersì**

**A.A. 2023 / 2024**



# Sommario

<b>Capitolo 1: Introduzione.....</b>	<b>8</b>
<b>Capitolo 2: Stato Dell'Arte .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Gestione Energetica nei Contesti Industriali .....</b>	<b>10</b>
2.1.1 Il ruolo dell'efficienza energetica nell'industria .....	12
<b>2.2 Metodi e Strumenti per l'Efficienza Energetica .....</b>	<b>18</b>
2.2.1 Metodi e strumenti di analisi energetica.....	19
2.2.2 Metodi e strumenti per le misure di risparmio energetico.....	20
2.2.3 Metodi e strumenti di valutazione energetica .....	21
2.2.4 Limiti dei metodi analizzati .....	22
<b>2.3 Sostenibilità.....</b>	<b>24</b>
2.3.1 I Pilastri della Sostenibilità .....	24
<b>2.4 Corporate Carbon Footprint (CCF).....</b>	<b>26</b>
2.4.1 Carbon Footprint di Prodotto .....	27
2.4.2 Carbon Footprint di Organizzazione.....	28
2.4.3 Carbon Footprint in Italia .....	29
<b>Capitolo 3: Definizione Del Metodo.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1 Definizione di obiettivi e confini dell'analisi .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2 Raccolta dei dati .....</b>	<b>33</b>
3.2.1 Caratterizzazione del sistema produttivo .....	34
3.2.2 Acquisizione dei dati.....	35
3.2.3 Classificazione delle attività produttive per l'analisi energetica .....	36

<b>3.3</b>	<b>Analisi dei dati .....</b>	<b>37</b>
3.3.1	Calcolo degli indicatori di prestazione.....	38
3.3.2	Mappatura dell'efficienza energetica dei processi.....	42
<b>3.4</b>	<b>Definizione strategie di miglioramento.....</b>	<b>42</b>
3.4.1	Identificazione delle azioni correttive .....	42
3.4.2	Definizione piano d'azione .....	43
<b>3.5</b>	<b>Attuazione .....</b>	<b>45</b>
3.5.1	Attuazione e funzionamento .....	45
3.5.2	Controllo .....	46
<b>Capitolo 4:</b>	<b>Applicazione e Caso Studio .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b>Descrizione dello strumento.....</b>	<b>48</b>
4.1.1	Reparto fisico .....	48
4.1.2	Centro dati cloud .....	48
4.1.3	Piattaforma web .....	49
<b>4.2</b>	<b>Funzionalità dello strumento.....</b>	<b>50</b>
4.2.1	Prima funzionalità: Valutazione Energetica .....	50
4.2.2	Valutazione energetica: input e output .....	52
4.2.3	Seconda funzionalità: Valutazione Impatto Ambientale .....	53
4.2.4	Valutazione impatto ambientale: input e output .....	55
<b>4.3</b>	<b>Simulazione Excel dello strumento .....</b>	<b>56</b>
4.3.1	Processo produttivo di pannelli in EPS espanso .....	56
4.3.2	Modulo di Input .....	59
4.3.3	Modulo di Analisi Energetica .....	61
4.3.4	Modulo di Analisi Ambientale .....	64
4.3.5	Modulo Indici di Valutazione Energetica .....	66
<b>4.4</b>	<b>Caso Studio .....</b>	<b>68</b>
4.4.1	Caso studio: livello di dettaglio basso .....	68
4.4.2	Caso studio: livello di dettaglio medio .....	71

<b>4.5 Possibili sviluppi futuri dello strumento .....</b>	<b>74</b>
<b>Capitolo 5: Conclusione.....</b>	<b>76</b>
<b>Capitolo 6: Bibliografia .....</b>	<b>78</b>

# Indice Figure e Tabelle

Figura 1. Principali fonti energetiche UE .....	11
Figura 2. Obiettivi entro il 2030.....	12
Figura 3. Pilastri della sostenibilità.....	25
Figura 4. Diagramma concettuale del metodo di valutazione dell'efficienza energetica .....	32
Figura 5. Esempio di classificazione delle attività con la metodologia Lean [4], [11] .....	37
Figura 6. Sviluppo del piano d'azione .....	43
Figura 7. Diagramma ad albero dei consumi energetici .....	50
Figura 8. Simulazione strumento - valutazione energetica (consumi totali)	51
Figura 9. Simulazione strumento - indici di prestazione energetica .....	52
Figura 10. Simulazione strumento - valutazione ambientale (CCF).....	55
Figura 11. Simulazione strumento - grafici analisi ambientale (kg CO2 eq.) .....	55
Figura 12. Processo di produzione dei manufatti in EPS.....	59
Figura 13. Possibile architettura futura dello strumento .....	75
Tabella 1. Parametri generali .....	60
Tabella 2. Parametri specifici.....	61
Tabella 3. Esempio tabella riassuntiva consumi totali.....	62
Tabella 4. Esempio di tabella consumi energia elettrica.....	62
Tabella 5. Esempio tabella consumo energia termica.....	63
Tabella 6. Esempio di tabella con distinzione per tipologia attività .....	63
Tabella 7. Esempio consumi di un ipotetico attore 1 .....	64
Tabella 8. Esempio calcolo emissioni con CCF .....	65
Tabella 9. Esempio valutazione ambientale ipotetico attore 1.....	66

Tabella 10. Esempio calcolo Cost Index.....	67
Tabella 11. Esempio calcolo Muda Index.....	67
Tabella 12. Esempio calcolo IPE .....	68
Tabella 13. Parametri generali – caso studio 1 .....	69
Tabella 14. Calcolo del Cost Index .....	69
Tabella 15. Calcolo del Muda Index .....	70
Tabella 16. Calcolo dell'IPE .....	70
Tabella 17. Emissioni calcolate secondo la CCF [kg CO2 eq.].....	71
Tabella 18. Parametri generali – caso studio 2 .....	71
Tabella 19. Percentuali di consumo associate ad ogni fase .....	72
Tabella 20. Calcolo del Cost Index .....	72
Tabella 21. Calcolo del Muda Index .....	73
Tabella 22. Calcolo dell'IPE .....	73
Tabella 23. Calcolo emissioni secondo la CCF [kg CO2 eq.] .....	74

# Capitolo 1: Introduzione

In questo lavoro di tesi verrà sviluppata e successivamente implementata una metodologia per supportare l'efficienza energetica nei processi industriali. Il progetto di tesi si inserisce all'interno del progetto OFFICIO: realizzato da ENEA nell'ambito del programma di Ricerca di Sistema (Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024) finanziato dal Ministero per l'Ambiente e la Sicurezza Energetica in collaborazione con diverse Università, tra cui l'Università Politecnica delle Marche (Dipartimento Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche). L'obiettivo generale di progetto è quello di caratterizzare la filiera italiana di produzione e fornitura delle soluzioni Off Site Construction (OSC) per la riqualificazione e l'isolamento termico degli edifici, fornendo degli strumenti per la sua ottimizzazione energetica e integrazione.

In tale contesto si è proceduto allo sviluppo di una metodologia e uno strumento per l'uso efficiente delle risorse per l'intera filiera OSC, che permetta alle aziende di misurare le loro performance, calcolare i benefici legati all'implementazione di strategie migliorative e agli analisti di supportare l'efficientamento di tutta la filiera [1].

L'utilizzo efficiente dell'energia rappresenta una tematica di elevata importanza per le aziende, in quanto rappresenta uno strumento fondamentale per ridurre costi, aumentare l'efficienza della produzione ed è uno dei pilastri su cui si basa il concetto di Sostenibilità. Dunque, risulta fondamentale analizzare il ruolo dell'energia, che oggi rappresenta una fonte imprescindibile per numerosi contesti, tra cui quello dell'industria manifatturiera, ed è quindi prioritario capire come essa viene gestita e consumata, illustrando il ruolo prioritario che ha il concetto di efficienza energetica. Questo renderà possibile valutare tutti gli strumenti e i metodi già

esistenti che questo studio cerca di perfezionare, per guidare gli utenti ad un'analisi sempre più accurata e personalizzabile, ma che possa essere realizzata in modo semplice e intuitivo. Inoltre, il tema dell'uso efficiente delle risorse è legato indissolubilmente a quello della sostenibilità ambientale, che rappresenta uno dei principali elementi di interesse degli ultimi anni, che in questo studio sarà analizzato e applicato seguendo le linee guida della Corporate Carbon Footprint (CCF).

La tesi si struttura come segue. Il primo capitolo è stato descritto il progetto con il quale nasce questo lavoro e le motivazioni per cui l'aspetto trattato è di fondamentale importanza per le aziende. Nel secondo capitolo verrà quindi presentata una panoramica su ciò che l'energia rappresenta per il mondo e in particolare per l'industria e come un suo efficiente utilizzo risulti essere fondamentale per una crescita importante e consapevole. Verrà poi realizzata da una panoramica sui principali strumenti per la valutazione energetica già esistenti, indicandone vantaggi e limiti da superare, per poi concentrarsi sul tema della sostenibilità e dello sviluppo sostenibile, che rappresentano lo sfondo nel quale l'efficienza energetica nasce e si sviluppa. Nel terzo capitolo si procederà invece ad illustrare il metodo proposto e le sue fasi principali, andando a sottolineare tutti i punti salienti che fanno di esso una soluzione alternativa e in parte migliorata dei metodi già esistenti. Nel quarto capitolo verrà infine illustrato l'applicazione del metodo proposto ad un caso di studio. In particolare, verrà dapprima illustrata un dimostratore statico dello strumento realizzato su Excel per l'analisi di processi di realizzazione di pannelli in EPS espanso.

## **Capitolo 2: Stato Dell'Arte**

Il costante incremento della popolazione, unito al benessere economico sempre più richiesto e diffuso, ha determinato un aumento esponenziale della richiesta energetica globale sia per un uso domestico che per uno industriale. Per quest'ultimo in particolare, l'aspetto energetico è critico in quanto le alte percentuali di risorse energetiche richieste, insieme all'impoverimento delle risorse naturali non rinnovabili e al crescente problema ambientale, hanno creato la rapida necessità di implementare soluzioni incentrate su un utilizzo efficiente dell'energia [2].

### **2.1 Gestione Energetica nei Contesti Industriali**

Ormai da parecchi decenni, l'energia rappresenta uno dei pilastri fondamentali del settore industriale. Come indicato dai report dell'Unione europea (UE), nel 2021 il settore industriale rappresentava il 25,6 % del consumo finale di energia, il che lo rendeva il terzo consumatore dopo i trasporti e le famiglie. Per quanto riguarda il mix energetico attuale Europeo, secondo gli ultimi dati esaustivi a disposizione, che risalgono al 2020, l'energia complessivamente disponibile nell'UE proviene principalmente da cinque fonti diverse, come mostrato in Figura 1: prodotti petroliferi (circa 35 %); gas naturale (24 %); energia rinnovabile (17 %); energia nucleare (13 %) e combustibili fossili solidi, come il carbone (12 %). Ovviamente, il mix energetico di un paese è costituito da diversi fattori, inclusa la disponibilità di risorse nazionali, come le foreste e altre biomasse, i fiumi o un buon potenziale per energia eolica o solare. Le scelte fatte in passato molto

spesso obbligano i paesi all'utilizzo di determinate fonti e tecnologie per molti decenni e la connettività a grandi reti energetiche, oltre alle relazioni con i paesi confinanti, influiscono sulle opzioni disponibili per le esportazioni e le importazioni. Nel 2020 il 42 % circa dell'energia complessivamente disponibile e consumata nell'UE era anche prodotta in Unione Europea. Il resto, circa il 60 %, era importato [3].

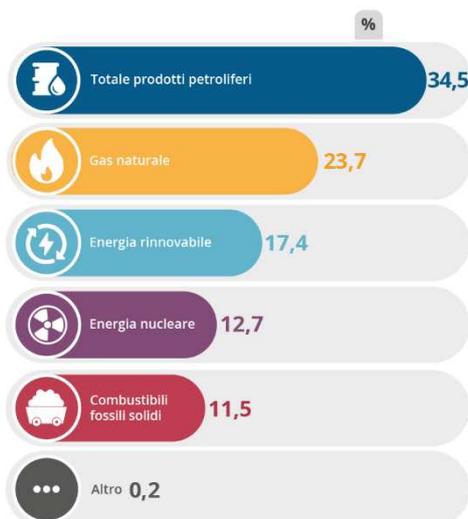


Figura 1. Principali fonti energetiche UE

Nello specifico, il settore manifatturiero industriale è considerato senza dubbio come uno dei più critici a causa dei rilevanti consumi di gas serra (circa il 36% del totale) e di energia primaria (circa il 30% del totale), che hanno evidenziato l'urgenza di immediati provvedimenti. In questo scenario, l'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile pone come uno degli obiettivi la Produzione Sostenibile, ovvero una *“produzione che utilizza processi e sistemi non inquinanti che preservino l'energia e le risorse naturali in modo economicamente sostenibile, sicuro e salutare per dipendenti, comunità e consumatori e che siano economicamente solidi”* (Dipartimento del Commercio degli Stati Uniti, 2012) [4]. Risulta quindi essenziale che il settore manifatturiero non si basi solo sul concetto di sostenibilità economica, ma anche sugli altri due pilastri, ovvero la sostenibilità ambientale e sociale.

Gli obiettivi minimi attualmente previsti per il 2030 in materia di emissioni di gas serra, energia rinnovabile ed efficienza energetica a livello dell'UE sono i seguenti:



Figura 2. Obiettivi minimi previsti entro il 2030

L'obiettivo principale consiste nell'incrementare il mercato e la propria competitività, preservare e rafforzare il marchio, aumentare redditività e successo a lungo termine, rispondere ai vincoli delle normative e massimizzare l'efficienza riducendo costi operativi e sprechi. Proprio a partire da quest'ultima risulta evidente come sia centrale il concetto di utilizzo intelligente delle risorse energetiche: in particolare, risulta fondamentale il concetto di efficienza energetica nel contesto industriale.

### 2.1.1 Il ruolo dell'efficienza energetica nell'industria

Il contesto sociale in relazione alle politiche energetiche e ai progressi tecnologici dal punto di vista dell'efficienza energetica è in una fase di costante mutamento, determinando di conseguenza la necessità di cambiamento in tutto il settore manifatturiero. Negli ultimi anni, è stata dunque rivolta una grande attenzione all'uso efficiente delle risorse energetiche, dovuta a tre principali diversi motivi:

- dal punto di vista dell'ambiente, migliorare l'utilizzo e l'efficienza energetica permette una riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e di tutte le altre sostanze nocive per l'atmosfera, tra cui le emissioni relative ai gas ad effetto serra (GHGs). Inoltre, il loro migliore utilizzo limita anche l'impatto sul consumo di nuove risorse, già scarse in partenza, che rischiano di impoverirsi sempre più fino a sparire completamente;
- l'aumento costante del costo dell'energia che, se non usata efficacemente, influisce in maniera negativa sulla competitività

dell'azienda stessa, peggiorando la sostenibilità economica dei processi produttivi;

- la presenza di regolamenti e standard nazionali e internazionali che raccomandano o prescrivono una migliore gestione aziendale dell'energia per ridurre il consumo, come la recente politica dell'UE verso un settore industriale Net-Zero.

Il particolare, la mitigazione del cambiamento climatico rimane una sfida cruciale dei nostri giorni e l'efficienza energetica è indicata proprio come uno dei principali strumenti per combattere il cambiamento climatico, diventando il primo passo verso l'implementazione della Produzione Sostenibile. Essa, nel contesto produttivo, viene definita come il rapporto tra la produzione utile e l'energia totale immessa nel sistema; aumentare l'efficienza significa quindi aumentare la produzione senza riscontrare incrementi dell'energia in ingresso o ridurre il consumo energetico a parità di output produttivo.

$$\textit{efficienza energetica} = \frac{\textit{output utile}}{\textit{energia totale in ingresso}} \quad (1)$$

In questo caso, occorre fare particolare attenzione ai confini dell'analisi del sistema, oltre che alle diverse possibili variabili di input e output. La produzione può essere infatti espressa ad esempio in quantità prodotte, masse, o ricavi generati mentre l'energia immessa può essere misurata in base al valore energetico, ai costi energetici o all'impatto ambientale. L'efficienza energetica dipende poi anche dal livello di produzione analizzato, che solitamente viene distinto tra macchina, linea produttiva e impianto produttivo: a livello di macchina viene espressa come il rapporto tra la potenza di lavorazione e quella assorbita dalla macchina stessa in un tempo finito; per il livello della linea produttiva, formato da più macchine e dispositivi ausiliari, la definizione di efficienza energetica si basa sulle variabili considerate e sul tipo di valutazione attraverso l'equazione (1); a livello di impianto, ovvero quello più complesso, si fanno le stesse considerazioni della linea produttiva. L'efficienza energetica sta quindi diventando un tema sempre più importante nella gestione della produzione a causa principalmente dei tre fattori sopra descritti, a cui si unisce una sempre

maggior consapevolezza dei clienti riguardo a prodotti o servizi sostenibili dal punto di vista dell'energia [5].

### **Costo dell'energia**

Il consumo di energia rappresenta una quota importante dei costi totali di produzione per le aziende manifatturiere poiché statisticamente si colloca tra l'1% e il 10% dei costi (Commissione Europea, 2018) [5], dove i costi totali di produzione sono pari a costi del personale e al totale acquisto di beni e servizi, compresa appunto l'energia. Ci sono alcuni settori più energivori che superano il 10% (ad esempio per la produzione di cemento, carta e materiali in argilla), mentre per le aziende a minore consumo la quota si aggira tra l'1-3% (come per computer ed elettronica e mezzi di trasporto); tutto ciò rappresenta una questione particolarmente importante se si considera l'attuale aumento dei prezzi dell'energia dovuto alle numerose crisi globali, con previsione di un aumento considerevole delle bollette energetiche per il 2030. Infine, la struttura del consumo energetico all'interno di un'azienda dipende fortemente dal settore dove si colloca: l'industria manifatturiera continua, ovvero una produzione a flusso che realizza o elabora materiali senza interruzioni, è caratterizzata da un consumo prevalente di energia termica spesso prodotta con combustibili fossili, mentre l'industria manifatturiera discreta, ovvero quella caratterizzata dalla produzione di pezzi e articoli singoli, ha un consumo prevalente di energia elettrica [5].

### **Norme e standard**

Un altro fattore che spinge ad attuare procedure per il miglioramento dell'efficienza energetica nelle industrie sono le norme e gli standard nazionali e internazionali. Il principale tra tutti gli standard internazionali per quanto riguarda la gestione dell'energia e i sistemi di gestione aziendale è la ISO 50001:2018 (ISO, 2018) [6], che descrive il quadro generale per l'implementazione di un sistema di gestione dell'energia interno ad un'organizzazione. Lo scopo dello standard è quello di promuovere le migliori pratiche per un'amministrazione energetica funzionale e migliorare

il controllo dell'energia volto a ridurre le emissioni di gas serra, specificando i requisiti del sistema di gestione dell'energia (SGE) in base ai quali un'azienda può sviluppare internamente o attuare una particolare politica energetica. Lo standard si basa sul ciclo PDCA (plan-do-check-act):

- Plan: si stabiliscono gli obiettivi e gli indicatori, raccogliendo poi i dati ed effettuando la revisione energetica;
- Do: si definiscono le risorse necessarie per progettare e realizzare i SGE;
- Check: si monitorano i consumi energetici, si misurano i processi e i parametri e si confrontano con i risultati e gli obiettivi prefissati;
- Act: si opera per migliorare continuamente le prestazioni energetiche del SGE.

Grazie a questa struttura le aziende possono quindi tenere sotto controllo l'efficienza energetica del processo produttivo e ottenere risparmi in termini di energia ed economici. La norma ISO 50001 stabilisce però solo procedure generiche per strutturare l'organizzazione e i processi senza fornire supporto su come condurre l'identificazione delle misure di efficienza energetica e non è facilmente applicabile alle PMI a causa della complessità delle procedure e dello sforzo richiesto. Esistono tuttavia ulteriori norme che possono essere utilizzate nei contesti aziendali: le norme ISO dalla 50002 alla 50008 e la ISO 50015 che definiscono ed esaminano le diverse problematiche legate alla gestione energetica; gli standard UNI CEI 11339:2009, UNI CEI EN 15900:2010, UNI CEI EN 16231:2012, UNI CEI EN 16212:2012, UNI CEI EN 16247-1:2012, UNI CEI EN 16247-3:2014, UNI CEI EN 16247-5:2015 e la UNI EN ISO 19011:2018 che sono comunemente utilizzati in processi di revisione energetica di un processo industriale. A livello nazionale italiano, è stato pubblicato un Decreto Legislativo n 102/14 il 4 luglio 2014 in attuazione della Direttiva Europea 27/2012 sull'efficienza energetica. Il decreto stabilisce un insieme di misure per il miglioramento dell'efficienza destinate a contribuire all'obiettivo nazionale di risparmio energetico. La norma si applica alle aziende più grandi ed energivore con l'obbligo di effettuare un audit energetico entro il 2015 e di ripeterlo ogni 4 anni [5].

La sfida dell'implementazione e dell'ottimizzazione dell'efficienza energetica risulta essere però ancora ostacolata da numerosi fattori e barriere, che possono avere molte forme e sono determinati dalle caratteristiche dell'impresa: l'indisponibilità di tecnologia efficiente dal punto di vista energetico; un'organizzazione carente; la mancanza di informazioni e di competenze; l'indisponibilità economica per attuare i cambiamenti; il carattere comportamentale nell'intraprendere le scelte; le barriere del mercato; la mancanza di consapevolezza; le scelte delle politiche nazionali e internazionali. Questo campo di studio offre quindi ancora numerose opportunità per trovare applicazioni e metodi sempre più innovativi per il raggiungimento di un utilizzo sempre più consapevole delle risorse energetiche. Dunque, le tematiche legate all'energia diventano estremamente importanti per tutto il settore industriale, e l'implementazione di processi produttivi efficienti dal punto di vista energetico può garantire un notevole vantaggio competitivo. L'UE ha definito con chiarezza come obiettivo la neutralità climatica entro il 2050 e in questo la decarbonizzazione delle industrie europee è un passo fondamentale verso il raggiungimento di tale target. Le direttive hanno come obiettivo complessivo quello di arrivare entro il 2030 al 32,5% di efficienza energetica e, per raggiungere tale valore, sarà necessario ridurre il consumo finale di energia dell'Unione Europea del 20% rispetto ai dati del 2005. Il modello tradizionale per l'efficientamento energetico ruotava principalmente attorno alla ricerca di tecnologie sempre più avanzate e in grado di lavorare con assorbimenti energetici sempre più limitati, fornendo informazioni mirate sulle misure di miglioramento. È stato però dimostrato che l'integrazione di pratiche di gestione dell'energia con l'implementazione tecnologica può far raggiungere all'efficienza valori ancora più elevati. Da molte aziende, la gestione delle risorse energetiche è vista come uno strumento cruciale per migliorare i propri sistemi di produzione e le operazioni nel perseguire l'obiettivo sopra descritto; tuttavia, migliorare l'efficienza energetica nel contesto industriale resta comunque un compito estremamente arduo, a causa dell'elevata complessità dei sistemi energetici del settore, soprattutto nelle condizioni attuali in cui si richiede un'importante trasformazione per raggiungere l'obiettivo della neutralità da carbonio entro la metà del secolo. Il rinnovamento del settore può essere

ottenuto attraverso diverse innovazioni incrementali e radicali nelle modalità di gestione interna dell'energia unite al miglioramento della sua efficienza. Occorre quindi fare una distinzione tra innovazioni incrementali e radicali di processi tecnologici:

- le innovazioni incrementali sono cambiamenti minori o più semplici aggiustamenti delle tecnologie già esistenti nel panorama. Si tratta quindi di miglioramenti gradualmente ma continui delle tecnologie esistenti, dei processi o dell'organizzazione, che contengono un basso fabbisogno di nuove conoscenze e caratterizzate da bassi rischi ma anche bassi rendimenti. Alcuni esempi di innovazioni incrementali sono l'adozione di nuove routine che portano a cambiamenti comportamentali, l'utilizzo di strumenti che aumentano la consapevolezza sui processi produttivi dell'azienda o l'implementazione di un approccio di gestione energetica basato sul metodo PDCA. Nonostante questi metodi permettano di raggiungere elevati livelli di efficienza, non sono mai sufficienti per realizzare una trasformazione della gestione energetica in grado di raggiungere gli obiettivi ambientali prefissati;
- le innovazioni radicali sono cambiamenti che stravolgono la tecnologia attuale e per questo richiedono un alto grado di nuove conoscenze e una nuova struttura organizzativa, oltre che rischi e rendimenti elevati. Come esempio di innovazione radicale si può considerare lo spostamento verso la digitalizzazione alla fine del XX secolo, che ha condotto alla nascita di quella che oggi viene chiamata Industria 4.0. La gestione energetica basata sulle tecnologie informatiche avanzate è infatti ormai di enorme importanza poiché risulta essere un compito complesso che deve considerare e integrare molteplici parametri, condizioni e dati, monitorando l'uso e il costo dell'energia nella produzione.

Dato che molto spesso le aziende non sono consapevoli di queste informazioni, è necessario sviluppare metodi e strumenti che forniscano indicazioni a supporto dell'efficienza energetica. Attraverso la semplificazione e l'applicazione di strumenti, è possibile ottenere ottimi

risultati con uno “sforzo sostenibile”, superando i limiti dell’implementazione delle strategie di efficientamento energetico [7].

## **2.2 Metodi e Strumenti per l’Efficienza Energetica**

Dopo aver definito il ruolo fondamentale dell’efficienza energetica nell’industria è necessario fare una revisione di quelli che sono le principali pubblicazioni relative a strumenti e metodi per la valutazione dell’utilizzo efficiente dell’energia. L’obiettivo è quello di contestualizzare lo stato attuale della ricerca scientifica su questi temi, definire i concetti rilevanti e determinarne anche i limiti. Tra gli strumenti e i metodi per la valutazione energetica in ambito industriale, possono essere individuati principalmente tre gruppi principali in base allo standard ISO 50001 (ISO, 2018)[6]:

- analisi energetica basata su audit energetici e utilizzata per aumentare la trasparenza dei consumi di un sistema produttivo;
- valutazione energetica per indagare approfonditamente come l’energia viene consumata all’interno di un processo produttivo, utilizzando dati sul consumo energetico in tempo reale provenienti da tecnologie basate sull’IoT;
- misura di risparmio energetico, che mira a individuare e valutare le opportunità di miglioramento per ridurre consumi energetici e impatti ambientali dei processi produttivi.

Questi strumenti forniscono in maniera semplice e intuitiva una prima valutazione dei consumi energetici e spesso si basano su standard con dati facilmente reperibili. A causa della varietà e della complessità dei processi industriali, questi metodi sono però solitamente specifici per un determinato settore manifatturiero. Tutte le varie misure di risparmio energetico consentono successivamente di determinare quale sia il miglior approccio di intervento per ridurre l’impatto energetico e le emissioni del processo o della catena analizzata.

### 2.2.1 Metodi e strumenti di analisi energetica

I metodi e gli strumenti di analisi energetica vengono utilizzati per aumentare ulteriormente la trasparenza dei consumi energetici di un sistema di produzione. Essi si basano solitamente sulla creazione di un audit energetico che consiste nell'indagare e compiere un'analisi sistematica di tutti i consumatori energetici dell'azienda. I dati così ottenuti, aggregati sui consumi, vengono utilizzati come input, mentre per la valutazione dell'efficienza si utilizzano indicatori nazionali o parametri di riferimento. L'obiettivo di questi metodi è di mostrare in maniera inequivocabile come l'energia viene consumata nell'azienda attraverso una diagnosi energetica preliminare, in base alla quale vengono decise le successive misure correttive e di ottimizzazione. Sono due le famiglie principali che possiamo distinguere:

- l'analisi del consumo energetico basata su audit energetici: questi metodi forniscono una prima valutazione del consumo energetico attraverso un approccio semplificato che richiede sforzi limitati per quanto riguarda tempo e know-how, identificando i diversi consumatori di energia all'interno di un prodotto. Sono strumenti che consentono quindi di riconoscere i processi più energivori utilizzando revisioni di bollette o dati operativi, accompagnati da visite della stessa struttura. Per supportare gli audit energetici che coinvolgono tutte le parti interessate dell'azienda, esistono programmi che fungono da vere e proprie guide intuitive e che funzionano senza necessitare di significative quantità di dati;
- l'analisi energetica attraverso il benchmarking: sono metodi che basano le analisi energetiche su valori di riferimento nazionali o internazionali e supportano l'Energy Manager nel confronto dell'efficienza energetica di un impianto produttivo con altri simili, valutando i dati rispetto ai diversi valori di riferimento all'interno di un particolare settore produttivo. Il processo di benchmarking viene poi usato per identificare il valore ottimale di efficienza energetica e per evidenziare dove sono necessari miglioramenti. Questi strumenti eliminano la necessità di raccogliere dati energetici da operazioni disaggregate per considerare l'effetto complessivo, analizzando

invece le differenze di prestazione tra diverse aziende per determinare il vettore energetico critico e proporre eventuali ottimizzazioni. L'ostacolo principale è rappresentato dalla possibile indisponibilità dei dati o dall'utilizzo di quelli non appropriati o significativi, poiché le aziende sono spesso restie a condividere i dati di loro proprietà.

### **2.2.2 Metodi e strumenti per le misure di risparmio energetico**

I metodi e strumenti per le misure di risparmio energetico identificano e valutano opportunità di miglioramento per ridurre il consumo energetico e gli impatti ambientali della produzione, suggerendo adeguate azioni per il risparmio energetico attraverso la raccolta di dati rilevanti e l'analisi delle correlazioni tra risparmio energetico, opportunità, rischi e benefici in termini di costi. Non sono inclusi tutti quegli strumenti di ottimizzazione, che sono invece focalizzati sulla modellazione del sistema e comportano la simulazione di eventi discreti o applicazione di modelli matematici puri. Si dividono in due categorie principali:

- metodi di identificazione delle azioni correttive basati sull'analisi energetica, che mirano a determinare tutte le opportunità per ridurre l'energia, il consumo e l'impatto ambientale della produzione. Riescono a fornire azioni correttive attraverso la selezione di quella che è la migliore tecnologia per migliorare l'efficienza energetica e la sostenibilità e si basano sulla Prevenzione Integrata dell'Inquinamento e la Direttiva sul Controllo (2008/1/CE) della Commissione Europea, che consentono una significativa riduzione dell'energia necessaria;
- metodi per valutare le misure di risparmio energetico, che caratterizzano le misure di efficienza energetica con modelli di regressione multi-variabile, sulla base di letteratura scientifica o attributi raggruppati in categorie.

Entrambe le categorie supportano l'Energy Manager nell'ultima fase del processo di valutazione del sistema produttivo e permettono la valutazione e

l'identificazione del migliore approccio per ridurre l'impronta energetica e di emissioni del processo produttivo

### **2.2.3 Metodi e strumenti di valutazione energetica**

L'obiettivo di questi metodi e strumenti è quello di spingersi oltre la semplice analisi, indagando in modo approfondito come viene consumata l'energia all'interno del processo produttivo considerato. Molto spesso utilizzano dati sui consumi in tempo reale provenienti da tecnologie di IoT, come sensori smart o contatori, e studiano e confrontano diverse tematiche legate all'ambito produttivo, analizzandone gli effetti sull'efficienza energetica e sugli obiettivi ambientali. Questi metodi consentono di avere una maggiore consapevolezza e trasparenza su come viene utilizzata l'energia da macchine, processi o fabbrica e sono principalmente divisi in due categorie:

- strumenti che analizzano la produzione con approcci matematico-statistici innovativi, creando opportuni indici. Questi cercano di superare la mancanza di un sistema di indici e di metodologia di analisi quantitativa efficaci che consentano di poter studiare approfonditamente come l'energia viene consumata nel processo produttivo. I metodi proposti utilizzano quindi dati ottenuti da sistemi di monitoraggio della produzione e consentono al manager di valutare l'efficienza energetica dei processi attraverso degli indicatori. A causa dell'elevato numero e della complessità dei processi industriali, solitamente vengono realizzati metodi specifici per un dato settore manifatturiero e spesso escludono tutto il resto della Supply Chain;
- strumenti sviluppati sulla metodologia Lean, principalmente concentrati sulla riduzione dei rifiuti. Questi utilizzano il Lean Management (LM) come punto di partenza per valutare consumi energetici e rifiuti creati dalla produzione industriale, fornendo metodi strutturati per creare strategie di gestione ambientale che semplifichino e velocizzino la produzione. Essi si basano sui diversi strumenti tipici del LM come il ciclo PDCA, le 5S, la Value Stream Mapping e tanti altri. Lo scopo è quello di ridurre più possibile gli

sprechi (W) migliorando l'efficienza energetica grazie a conoscenze e procedure consolidate dalla filosofia Lean, valorizzando invece l'energia consumata dai processi a valore aggiunto (VA) e limitando quella dei processi a non valore aggiunto (NVA). Questi strumenti possono aiutare le organizzazioni ad affrontare le sfide sempre più pressanti della sostenibilità e del conformarsi a quelle che sono le normative ambientali governative, con però limiti legati all'incapacità di far fronte a sistemi produttivi multiprodotto, a variazioni dinamiche e la possibilità di includere più flussi di energia.

#### **2.2.4 Limiti dei metodi analizzati**

In questo paragrafo vengono illustrati tutti i principali limiti posseduti dalle metodologie che si trovano in letteratura e appartenenti alle tre categorie sopra descritte. I criteri scelti per la valutazione sono i seguenti:

- dati di input: la raccolta dei dati costituisce molto spesso un problema significativo nel poter applicare correttamente o meno un metodo, poiché condiziona l'impegno in termini di tempo e risorse. La quantità di dati necessari varia da sistema a sistema e richiede più o meno dedizione per poter essere completamente ricavata;
- completezza dei flussi: il metodo di valutazione energetica dovrebbe sempre considerare tutti i flussi esistenti e non concentrarsi su un singolo vettore energetico;
- completezza del sistema: il metodo dovrebbe analizzare l'intera fabbrica per massimizzare gli effetti di risparmio implementati dalle strategie di efficienza energetica, considerando dunque la produzione, la logistica, le tecnologie di processo e i sistemi di costruzione;
- tipologia di valutazione: incide sulla qualità dei risultati poiché analisi effettuate su lunghi periodi e non contestualizzate non consentono di individuare possibili strategie per intervenire, mentre valutazioni in tempo reale forniscono dati estremamente più dettagliati e validi;
- KPI: l'utilizzo di indicatori specifici come output consente al metodo di migliorare il monitoraggio e la verifica dell'efficienza energetica,

poiché forniscono un supporto puntuale agli utenti che sfruttano il sistema;

- miglioramenti: dopo la valutazione è fondamentale pianificare le azioni correttive per migliorare le prestazioni del sistema produttivo, come stabilito dalla norma ISO 50001 (ISO, 2018);
- usabilità: i metodi vengono infine valutati anche per la chiarezza nella loro descrizione e alla facilità con cui possono essere applicati da utenti con conoscenze professionali.

I risultati della valutazione evidenziano come nessuno dei metodi prima citati soddisfi pienamente né i criteri identificati né le esigenze aziendali nella gestione dell'energia nella produzione. La maggior parte degli strumenti si basa infatti su analisi quantitative dei consumi con l'obiettivo di aumentare la consapevolezza piuttosto che analizzare l'efficienza, studiando solo in modo superficiale come esaminare e utilizzare i dati ottenuti per creare possibilità di miglioramento. Inoltre, i metodi risultano specifici per un dato settore manifatturiero e spesso considerano solo i sistemi produttivi, senza fornire indici o KPI adeguati in grado di analizzare come vengono utilizzate le macchine e i processi. Infine, tra gli strumenti software disponibili, solo alcuni forniscono all'Energy Manager delle indicazioni preziose per gestire e ottimizzare la prestazione energetica complessiva del processo.

## **2.3 Sostenibilità**

Non si può ovviamente parlare di efficienza energetica senza legarla al tema della sostenibilità. Il concetto di sviluppo sostenibile è stato ormai individuato come la principale direzione di sviluppo del XXI secolo e ciò ha portato le aziende di tutto il mondo a adattare i propri modelli e processi aziendali a questo criterio. Questo concetto è apparso per la prima volta nel 1987, quando la Commissione mondiale per l'ambiente e lo sviluppo delle Nazioni Unite ha presentato il rapporto "Il nostro futuro comune", noto anche come "Rapporto Brundtland". Il rapporto metteva in luce l'impatto negativo dello sviluppo economico sull'ambiente, per promuovere la ricerca di possibili soluzioni ai problemi causati dall'industrializzazione sempre crescente e dall'aumento esponenziale della popolazione mondiale. Ciononostante, l'interesse per la protezione del pianeta era emerso già nel decennio passato. Quando si è trattato di stabilire come agire in materia di sostenibilità, l'ONU ha creato uno spazio in occasione dei Vertici della Terra o dei Vertici sul clima. I Vertici riuniscono i membri dell'organizzazione, che cercano di raggiungere accordi vincolanti su tematiche legate all'ambiente e ai cambiamenti climatici. Uno dei principali risultati del vertice è stata la creazione della Convenzione sulla diversità biologica e della Convenzione quadro sui cambiamenti climatici. Entrambi, nel corso degli anni, sarebbero diventati due pilastri del Protocollo di Kyoto (1997) e del più attuale Accordo di Parigi (2015) [8].

### **2.3.1 I Pilastri della Sostenibilità**

Il concetto di sostenibilità è stato definito come un equilibrio soddisfacente tra il benessere umano e quello della Terra; in altre parole, il progresso dell'umanità non deve necessariamente entrare in conflitto con il progresso del suo pianeta. Per raggiungere questo obiettivo, è necessario sviluppare una serie di politiche globali per ridurre al minimo gli impatti negativi e a tale scopo va spiegata la distinzione tra i tre ambiti fondamentali dello sviluppo sostenibile: ambientale, sociale ed economico. Questi tre assi sono

interconnessi e lo sviluppo sostenibile può essere raggiunto solo se le condizioni sono ottimali su ciascun asse e non isolatamente:

- per sostenibilità ambientale si intende sfruttare e fare buon uso delle risorse naturali, evitare l'inquinamento degli ecosistemi, promuovere il diritto umano a un ambiente sano, proteggere e mantenere la biodiversità, ecc.;
- la sostenibilità sociale è caratterizzata da lotta alle disuguaglianze, rispetto dei diritti umani, promozione di una giusta transizione verde che non lasci indietro nessuno, responsabilizzazione delle persone, qualità della vita, ecc.;
- la sostenibilità economica comprende invece innovazione e ricerca al servizio delle persone, prosperità economica entro i limiti del nostro pianeta, condizioni di lavoro dignitose, ecc.

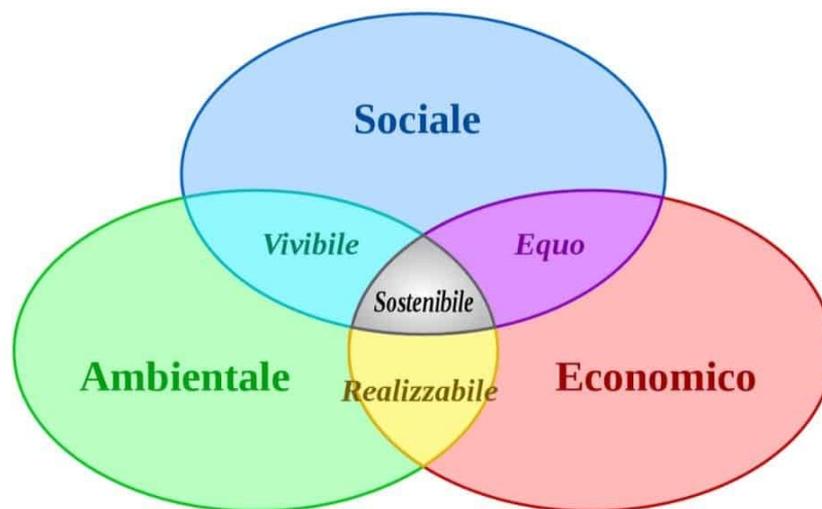


Figura 3. Pilastri della sostenibilità

Il sistema attuale intende la sostenibilità in un modo specifico: si tratta infatti di ridurre, per quanto possibile, lo sfruttamento eccessivo delle risorse naturali. L'obiettivo può essere raggiunto attraverso diversi approcci, come ad esempio l'economia circolare e rigenerativa. L'adozione di questi modelli consente di compiere progressi significativi verso il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile. Oltre definire il concetto di sostenibilità, è necessario poi capire cosa significa transizione giusta, che consiste in un

cambiamento nel modo in cui le fonti di energia vengono prodotte e utilizzate: l'obiettivo è quello di ridurre le emissioni di gas serra e migliorare la sicurezza includendo misure come la promozione delle fonti di energia rinnovabili e migliorando l'efficienza energetica. In questo particolare lavoro di tesi, verrà utilizzato il parametro definito dalla Corporate Carbon Footprint per misurare le emissioni legate ai processi e al consumo di energia delle diverse aziende [8].

## **2.4 Corporate Carbon Footprint (CCF)**

La Carbon Footprint (CF) è un parametro che viene utilizzato per stimare le emissioni gas serra che vengono causate da un prodotto, da un servizio, da un'organizzazione, da un evento o da un individuo e che sono espresse generalmente in tonnellate di CO<sub>2</sub> equivalente (ovvero prendendo come riferimento per tutti i gas serra l'effetto associato alla CO<sub>2</sub>, assunto pari a 1). Secondo le indicazioni del Protocollo di Kyoto del 1997, i gas serra da utilizzare per il calcolo sono i seguenti: anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), monossido di diazoto (N<sub>2</sub>O), idrofluorocarburi (HFCs), perfluorocarburi (PFCs) ed esafluoruro di zolfo (SF<sub>6</sub>). Le misurazioni devono essere poi convertite in anidride carbonica equivalente, mediante opportuni parametri, per poter essere facilmente analizzabili e per poter ottenere risultati confrontabili con altri studi. La CF può essere dunque utilizzata per la determinazione di quelli che sono gli impatti ambientali che le emissioni hanno sui cambiamenti climatici di origine antropica. Parte di questa analisi è determinata dal carbon accounting, noto anche come contabilizzazione delle emissioni di gas serra: è un processo volto a quantificare la quantità di gas serra prodotti direttamente e indirettamente dalle attività di un'azienda o di un'organizzazione entro determinati confini. La pratica del carbon accounting si basa sulla suddivisione delle emissioni in tre categorie, Scope 1, 2 e 3, per fornire un quadro completo delle fonti di gas serra di un'organizzazione e per facilitare la loro gestione e riduzione:

- Le emissioni Scope 1, anche chiamate "emissioni dirette", derivano da fonti direttamente controllate o possedute da un'organizzazione.

Esempi includono le emissioni prodotte dai processi di fabbricazione o la produzione di elettricità in loco attraverso la combustione del carbone;

- Le emissioni Scope 2, denominate "emissioni indirette", provengono dall'acquisto di energia elettrica, riscaldamento e raffreddamento da fornitori esterni. Nel calcolo delle emissioni di Scope 2, vengono utilizzate metodologie basate sul luogo di provenienza dell'energia (es. rete elettrica locale) e sul relativo mercato di acquisto (es. acquisto di energie rinnovabili);
- Le emissioni Scope 3, spesso definite "emissioni legate alla catena di fornitura", sono emissioni indirette di gas serra che derivano dalle attività di un'azienda, ma non sono di competenza diretta dell'azienda stessa. Queste emissioni rappresentano in media ben 5,5 volte le emissioni di un'azienda e offrono un'importante opportunità per coinvolgere i fornitori nel percorso di decarbonizzazione.

A tal fine devono essere considerate le emissioni relative a tutte le fasi del ciclo di vita aziendale, dall'estrazione delle materie prime, fino alla gestione dei rifiuti che originano dall'utilizzo delle stesse, con riferimento alle attività di recupero oppure smaltimento. Esse devono essere poi convertite in anidride carbonica equivalente, mediante opportuni parametri, per poter ottenere risultati validi [9], [10], [11].

#### **2.4.1 Carbon Footprint di Prodotto**

La CF di Prodotto esprime la quantità di emissioni di gas ad effetto serra (GHGs - Greenhouse Gases) originate da un processo manifatturiero. A seguito di questo è infatti realizzato un bene tangibile come un prodotto o intangibile come un servizio. La CF di Prodotto viene calcolata a seguito di ciascuna fase del ciclo di vita, che è formato da diverse attività, cronologicamente ordinate come segue:

- l'estrazione delle materie prime utili a realizzarlo;
- la loro trasformazione e il correlato processo di produzione di beni o servizi;
- il packaging (o confezionamento del prodotto fisico);

- la distribuzione, ovvero la logistica dell'output ottenuto come obiettivo primario della produzione;
- l'utilizzo da parte del consumatore;
- la gestione del fine vita (rifiuti compresi).

La misurazione delle emissioni originate viene realizzata tramite opportune procedure, descritte dalla norma UNI EN ISO 14067:2018. Tale norma definisce requisiti e linee guida per la loro quantificazione, basandosi su quanto prescritto dagli standard internazionali di riferimento per gli studi relativi al ciclo di vita dei prodotti. Con essa vengono puntualizzate la quantificazione e la rendicontazione dell'impronta climatica dei prodotti sia in base a quanto stabilito dalle norme internazionali sulla valutazione del ciclo di vita (Life Cycle Assessment – LCA) (ISO 14040 e ISO 14044) sia chiarendo i requisiti e le linee guida per la quantificazione di una impronta “parziale”. Pertanto, per misurare le emissioni di gas serra di un prodotto è necessario prendere in considerazione l'intero ciclo vitale del bene secondo la metodologia LCA (Life Cycle Assessment), rispettando i principi, i requisiti e le linee guida della norma ISO 14067. Tale metodo risulta differente da quello previsto per la misurazione dell'impronta di carbonio di un'organizzazione. Nonostante questo, in entrambi i casi, è necessario analizzare tutte le attività compiute seguendo gli standard ISO di riferimento e affidarsi a professionisti qualificati [11].

#### **2.4.2 Carbon Footprint di Organizzazione**

La CF di Organizzazione (CFO) consiste nella quantificazione e rendicontazione delle emissioni, dirette o indirette, di gas effetto serra (GHGs) connesse all'organizzazione. La misurazione delle emissioni originate dalle attività svolte da un'organizzazione viene realizzata tramite opportune procedure. Queste sono descritte dalla norma UNI EN ISO 14064, la quale viene articolata secondo tre aree, chiarendo, per ognuna, specifiche linee guida per:

- la determinazione e la relativa rendicontazione delle emissioni di GHGs e della loro rimozione nell'ambito organizzativo;

- la determinazione e la relativa rendicontazione delle GHGs attinenti al progetto;
- la validazione e la verifica delle asserzioni relative ai GHGs, che precisa requisiti e linee guida per condurre convalide e verifiche (da parte degli Enti di certificazione) riferite ad organizzazioni, progetti e prodotti.

Si deve considerare anche che, al fine di rendere confrontabili le metodologie di calcolo dell'Impronta Ambientale dei prodotti (PEF) e delle organizzazioni (OEF) in ambito comunitario, comprese la misurazione del carbonio, realizzata con la metodologia della CF, la Commissione Europea ha provveduto a definire un'apposita metodologia utile a misurare e comunicare le performance ambientali basate proprio sul ciclo di vita di un prodotto e di un'organizzazione. Inoltre, è stata emanata la specifica norma tecnica UNI ISO/TS 14072:2015, riguardante requisiti e linee guida finalizzate alla valutazione del ciclo di vita di un'organizzazione [11].

### **2.4.3 Carbon Footprint in Italia**

La CF in Italia non rappresenta esclusivamente una leva di marketing (in particolare di comunicazione ambientale) a disposizione delle imprese che intendono attuarla. Infatti, in base alla normativa vigente sugli affidamenti della Pubblica Amministrazione, regolata dal c.d. "Codice degli Appalti" (Decreto Legislativo n. 50/2016):

- l'impresa vincitrice delle gare così disciplinate deve fornire talune garanzie di natura finanziaria, ed in particolare fideiussorie, a copertura del rischio che si può manifestare in corso d'opera;
- l'adozione di una certificazione (quale, ad esempio, la UNI EN ISO), ottenuta anche con l'ausilio di una certificazione dell'impronta di carbonio rilasciata dall'impresa, consente una riduzione delle medesime coperture, ovvero un vantaggio di natura economica per chi intende adottarla.

Per valutare la CF di un prodotto o servizio è stata sviluppata una norma tecnica standard: UNI CEN ISO/TS 14067:2014 "Gas ad effetto serra – Impronta climatica dei prodotti (Carbon footprint dei prodotti) – Requisiti e

linee guida per la quantificazione e comunicazione”, entrata in vigore l’11 settembre 2014. Lo scopo della norma ISO 14067 è quello di quantificare le emissioni di GHGs associate all’intero ciclo di vita di un prodotto, a partire dall’estrazione delle risorse comprendendo l’approvvigionamento delle materie prime, le fasi di produzione, utilizzo e fine vita [11].

## Capitolo 3: Definizione Del Metodo

Nel seguente capitolo, verrà illustrata la metodologia sviluppata con l'obiettivo di supportare l'efficienza energetica nell'ambito industriale e fornire valori riguardanti l'impatto ambientale dei processi considerati secondo le direttive della Carbon Footprint. Il metodo sviluppato si basa sull'approccio delineato da Papetti et al. (2019) [2] e si propone come un'alternativa agli strumenti già analizzati, grazie alla semplicità e alla facilità con cui può essere utilizzato, valutando ed estraendo informazioni significative dai dati per migliorare l'efficienza energetica e ridurre l'impronta ambientale. Molto interessante e utile è stato considerare la filosofia del Lean Management, che aiuta le aziende a migliorare le prestazioni soddisfacendo criteri essenziali come la redditività, la qualità e la soddisfazione del cliente. Questo particolare lavoro di tesi, partendo da queste basi, propone una metodologia e un relativo strumento software in grado sia di supportare l'identificazione delle inefficienze energetiche a livello aziendale e di Supply Chain, attraverso un approccio semplificato basato sulla distinzione tra attività a Valore Aggiunto, Non Valore Aggiunto o di Waste, sia di quantificare l'impatto ambientale delle varie attività che costituiscono la produzione quantificando i flussi di risorse materiali ed energetiche in entrata e uscita dal sistema. L'obiettivo è quello di calcolare dei KPI che consentano facilmente di identificare le attività maggiormente energivore e inefficienti dal punto di vista ambientale ed economico. Il tutto viene realizzato proponendo possibili approcci risolutivi, ovvero delle misure concrete per migliorare l'efficienza energetica, e supporta l'Energy Manager nella definizione di un piano di azione concreto e facilmente implementabile. Basandosi sul processo iterativo proposto nello standard ISO 50001 (ISO,

2018), il metodo utilizza l'approccio PDCA e la filosofia Kaizen identificando e analizzando il processo produttivo attraverso la raccolta e la rielaborazione dei dati, supportando la progettazione con azioni correttive e implementando e verificando i risultati ottenuti e deve essere ripetuto continuamente per identificare le inefficienze dello scenario attuale e futuro.



Figura 4. Diagramma concettuale del metodo di valutazione dell'efficienza energetica

### 3.1 Definizione di obiettivi e confini dell'analisi

Il primo aspetto da considerare per la definizione del metodo è identificare quelli che sono gli obiettivi e i confini che caratterizzano l'analisi energetica e ambientale, tenendo conto dei seguenti aspetti:

- **Obiettivi:** stabilire obiettivi chiari e misurabili è fondamentale per comprendere i risultati attesi e sviluppare strategie d'azione efficaci. Essi guidano il processo di analisi e costituiscono la base per monitorare e misurare i progressi; devono essere quindi ben definiti e accompagnati da target per tutte le varie strutture. Ad esempio, un obiettivo potrebbe essere la simulazione del funzionamento di una

macchina dal punto di vista energetico o la caratterizzazione dei consumi globali dell'azienda.

- **Accuratezza:** l'accuratezza dei risultati dipende strettamente dalla precisione delle informazioni raccolte e il livello di dettaglio delle informazioni sarà specificato in base all'obiettivo del progetto.
- **Frequenza:** la frequenza si basa sull'aggiornamento periodico dell'analisi iniziale per verificare il raggiungimento degli obiettivi prefissati. Può essere considerato un parametro statico, dinamico o ibrido: statico se viene eseguita una sola volta; dinamico se si basa sul monitoraggio continuo degli asset; ibrido se è una combinazione dei due precedenti.
- **Confini del sistema:** i confini del sistema definiscono i limiti dell'analisi, che potrebbe essere fatta su una singola macchina, area produttive o tutto il plant di produzione. Potrebbe inoltre coinvolgere tutti i flussi di energia o solo un sottoinsieme di essi, oppure considerare una o più famiglie di prodotti. La definizione dei confini è strettamente correlata all'obiettivo principale dell'analisi e agli ulteriori dati disponibili che provengono da studi precedenti.

La scelta dei parametri effettuata in questa fase definirà lo scenario di analisi e la fase di raccolta dati, nonché le successive attività di valutazione. Devono infatti essere selezionati in base ai risultati previsti e all'impegno richiesto in termini di tempo e conoscenze; sarà proprio il compromesso tra risultati e risorse a definire la successiva fase di raccolta dati.

### **3.2 Raccolta dei dati**

Dopo aver individuato l'obiettivo e i confini dell'analisi, il passo successivo è rappresentato dalla raccolta dei dati. Si tratta della fase centrale del metodo poiché i suoi risultati influenzano la successiva analisi dei dati e l'individuazione delle azioni correttive. Per questo motivo è fondamentale che i dati siano facilmente e rapidamente raccogliibili, nonché semplici da analizzare. Lo scopo è quello di valutare tutti i processi all'interno dell'area

di indagine, identificare i flussi energetici, i flussi materiali in ingresso e uscita, le attrezzature e i flussi produttivi. Successivamente si passa all'acquisizione dei dati di consumo energetico e di tutti gli altri parametri che influenzano l'efficienza energetica, come anche alla definizione dei dati necessari per la valutazione ambientale. In ultimo, per l'analisi energetica, è necessario classificare le attività produttive secondo la metodologia Lean.

### **3.2.1 Caratterizzazione del sistema produttivo**

La caratterizzazione del sistema produttivo si basa su un'indagine approfondita dei processi attraverso l'osservazione fisica degli impianti e delle linee produttive, con l'obiettivo di caratterizzare il funzionamento dello stesso individuando i flussi energetici e produttivi. Questo processo può evidenziare elementi che potrebbero essere sfuggiti o considerati non importanti dall'osservatore, e per questo coinvolge il direttore di stabilimento, l'Energy Manager, il responsabile della produzione e il responsabile tecnico. Viene effettuata una panoramica completa dell'impianto per comprendere la ripartizione corretta dei consumi, in modo da interpretare efficacemente i risultati. Questo significa analizzare la configurazione fisica dell'impianto di produzione, che influisce poi sull'efficienza delle operazioni successive e su tutti i flussi di produzione (materiali, risorse, informazioni). Il processo viene quindi schematizzato attraverso dei diagrammi a blocchi che rappresentano le diverse attività produttive con relativi input e output. Ogni attività viene gerarchicamente suddivisa in sotto-azioni fino ad arrivare al livello di dettaglio desiderato; ciascuna attività deve includere:

- input, ovvero ciò che è necessario per svolgere l'attività in termini di masse ed energie;
- output, ovvero il prodotto dell'attività;
- controlli, ovvero l'insieme di vincoli e delle procedure che l'attività deve seguire;
- meccanismi, ovvero gli strumenti necessari per svolgere l'attività.

L'output della fase è dunque un primo schema del sistema produttivo che rappresenta: a) layout: la disposizione fisica di macchine, celle e stazioni all'interno dello stabilimento; b) processi: si riferiscono a una singola

operazione o a una sequenza eseguite da macchine e operatori; c) energia: quella necessaria per eseguire le operazioni, come ad esempio elettrica o termica; d) percorso del prodotto: la sequenza dei processi eseguiti su un prodotto o una famiglia di prodotti.

### **3.2.2 Acquisizione dei dati**

La fase di acquisizione consiste nel raccogliere in modo accurato e metodico i dati necessari per la fase di valutazione. È fondamentale seguire una struttura definita nella raccolta dati per evitare situazioni inadeguate nelle fasi successive. La raccolta e la classificazione riguarda informazioni su risorse, attività e processi:

- **Risorse energetiche:** si riferisce ai flussi di energia i quali, con eventuale disponibilità di sensori, possono essere misurati e raccolti automaticamente, o, in caso contrario, fanno riferimento ai dati di fatture e contatori, specificando sempre i processi che contribuiscono a ciascun consumo. In caso di monitoraggio temporaneo, va considerato che il consumo energetico è dinamico e cambia nel tempo a seconda del processo produttivo o dello stato effettivo della macchina costituita da diversi componenti, i quali consumano energia e generano un particolare profilo di carico energetico. In termini di tempo, i sensori ad alta risoluzione forniscono elevati livelli di informazione attraverso diagrammi di flusso dinamici che permettono un'analisi dettagliata del processo ma creano anche elevati volumi di dati da elaborare e conservare. Una risoluzione temporale bassa consente invece di garantire un volume ridotto di dati e costi inferiori dal punto di vista della misurazione, rinunciando però alla precisione nella lettura. L'accuratezza e quindi il contenuto delle informazioni diminuiscono drasticamente con frequenze di campionamento elevate.
- **Risorse materiali:** per svolgere l'analisi ambientale secondo le linee guida della Carbon Footprint è necessario considerare non solo i flussi energetici ma anche tutti i flussi di materiale in input e output delle

attività e dei processi, distinguendoli per tipologia, quantità in ingresso, quantità in uscita riutilizzata, da recuperare o di scarto.

- **Attività:** si riferiscono a tutte le caratteristiche dell'asset come nome, potenza, ore di funzionamento, ecc. Questi dati possono essere raccolti consultando il direttore dell'impianto, manuali delle macchine o documenti di progettazione dell'impianto. Alcuni di questi dati possono però cambiare a seconda della famiglia di prodotto considerata e pertanto è necessario rilevare valori diversi per ogni stazione e/o processo.
- **Processi:** si riferisce al flusso produttivo. Per ogni prodotto bisogna formalizzare, secondo il livello di dettaglio stabilito, tutte le interdipendenze logiche di attività, processi e flussi all'interno della fabbrica. In questo modo è possibile associare il flusso di produzione al flusso energetico di un determinato prodotto.

### **3.2.3 Classificazione delle attività produttive per l'analisi energetica**

Parallelamente alla definizione del flusso, per rendere possibile l'applicazione del metodo per l'analisi energetica è necessario che le attività produttive vengano classificate secondo i principi della filosofia Lean, che differenzia le attività in:

- **Attività a valore aggiunto (VA):** operazioni necessarie per realizzare il prodotto e che modificano lo stato di un componente o di un semilavorato. Sono le attività per le quali il cliente è disposto a pagare e si riferiscono solo ai prodotti conformi;
- **Attività senza valore aggiunto (NVA):** includono tutte le operazioni necessarie ma che non trasformano il prodotto e che quindi non interessano al cliente;
- **Attività relative agli scarti (W):** includono le operazioni che non trasformano il prodotto e non sono necessarie, generando costi aggiuntivi che il cliente non è disposto a pagare.

Questa classificazione consente di valutare e comprendere il flusso del valore energetico e di conseguenza dove focalizzare le strategie di miglioramento, minimizzando le risorse consumate dalle attività NVA e W. Sulla base del lavoro di Ohno [12], esiste una classificazione generale delle attività come proposto nella Figura 5.

ACTIVITY ( <i>energy consumption for...</i> )	VA	NVA	W
Processing of compliant products	×		
More (or faster) production than required (overproduction)			×
Inventory of products, materials, energy, etc.		×	×
Production of non-compliant products (defects)			×
Performing processes that are not required or with inappropriate techniques, oversize equipment, etc.			×
Machinery setup		×	
Movement of materials or products		×	×
Movements of man or machine		×	×
Transport of resources		×	×
Corrective maintenance			×
Preventive or predictive maintenance		×	
Waiting, that is no operation is occurring		×	×

Figura 5. Esempio di classificazione delle attività con la metodologia Lean [4], [11]

### 3.3 Analisi dei dati

In questa fase i dati raccolti vengono analizzati per evidenziare come ciascun processo contribuisce al consumo di ciascuna energia, evidenziando la percentuale di attività a VA, NVA e W. Il tutto viene realizzato determinando indicatori appropriati e visualizzando i dati. Gli indicatori servono come misura per valutare il corretto funzionamento del sistema rispetto a come è stato progettato e aiutano a definire i progressi verso l'obiettivo prestabilito, consentendo quindi un accurato monitoraggio del consumo energetico e dell'impronta ambientale. Infatti, i valori misurati e le misure aggregate forniscono solo una panoramica sullo stato del sistema e non riescono a fornire supporto decisionale, trasparenza e chiara identificazione delle azioni da realizzare. Per questo occorre calcolare degli indicatori di efficienza energetica e di impatto ambientale per poter identificare i driver energetici nel sistema di produzione, rendere chiaro il profilo di comportamento energetico del sistema, riconoscere le azioni causa-effetto, preparare azioni

ad hoc per misure di miglioramento e comunicare adeguatamente l'interazione con altre aree funzionali. Questi indicatori sono poi visualizzati attraverso opportuni grafici e tabelle che rendono rapida e intuitiva la determinazione delle attività per le quali le azioni per l'ottimizzazione energetica e ambientale sono più critiche e/o urgenti.

### 3.3.1 Calcolo degli indicatori di prestazione

In questa sezione vengono definiti gli indicatori scelti per analizzare l'efficienza energetica e ambientale del processo produttivo, per consentire la successiva interpretazione dei rapporti causa-effetto e quindi supportare le aziende nel processo decisionale operativo. Gli indicatori sono calcolati a partire dai dati sul consumo energetico e dati sulla produzione raccolti dal plant produttivo in tempo continuo o discreto ed evidenziano i livelli di efficienza per le diverse attività produttive che consumano energia e quantificano l'impronta ecologica delle attività in base alla divisione delineata dalla CF. In base ai confini del sistema selezionati, le equazioni seguenti vengono calcolate per una singola macchina, singolo processo o impianto complessivo.

#### Indici energetici

Innanzitutto, viene determinata la quantità di energia consumata dalle diverse attività che, in base alla classificazione precedente, è suddivisa in:

- $E_{VAi}$  è la quantità di energia  $i$  consumata dalle attività  $VA_j$ . Si intende la quantità minima di energia teoricamente necessaria per trasformare un materiale o un semilavorato in un prodotto. Tuttavia, il consumo teorico è spesso influenzato da diversi fattori e richiede un monitoraggio continuo non sempre realizzabile. In contesti industriali reali quindi solitamente si misura come somma dei consumi orari per attività VA moltiplicate per la loro durata:

$$E_{VAi} = \sum_j e_{VAij} \times t_{VAij} - \Delta \quad (2)$$

Il consumo dovrebbe essere il più vicino possibile al consumo teorico, che rappresenta la quantità minima di energia richiesta per la lavorazione considerata.

- $E_{NVAi}$  è la quantità di energia  $i$  consumata dalle attività  $NVA_j$ . Si intende la quantità di energie ausiliarie richieste dal processo che non aggiungono valore al prodotto ma sono necessarie per eseguire il processo correttamente e si ottiene come somma tra i consumi orari per attività  $NVA$  moltiplicati per la durata:

$$E_{NVAi} = \sum_j e_{NVAij} \times t_{NVAij} - \Delta \quad (3)$$

- $E_{Wi}$  è la quantità di energia  $i$  consumata dalle attività  $W_j$ . Significa la quantità di energia persa a causa di un errato utilizzo dei macchinari, di guasti o di un uso inadeguato delle attrezzature e si misura come somma dei consumi orari per attività  $W$  moltiplicata per la loro durata:

$$E_{Wi} = \sum_j e_{Wij} \times t_{Wij} - \Delta \quad (4)$$

I consumi orari per pezzo prodotto devono essere stimati o misurati in base alle famiglie di prodotti e alla configurazione delle macchine.

Dopo aver calcolato il consumo energetico, possono essere definiti i rendimenti delle diverse attività:

- $\eta_{VAi}$  : rendimento relativo all'energia  $i$  consumata dalle attività  $VA$  rispetto alla quantità totale di energia consumata. Idealmente dovrebbe essere 100%;

$$\eta_{VAi} = \frac{E_{VAi}}{(E_{VAi} + E_{NVAi} + E_{Wi})} \quad (5)$$

- $\eta_{NVAi}$  rendimento relativo all'energia  $i$  consumata dalle attività  $NVA$  rispetto alla quantità totale di energia. Dovrebbe essere ridotto al minimo;

$$\eta_{NVAi} = \frac{E_{NVAi}}{(E_{VAi} + E_{NVAi} + E_{Wi})} \quad (6)$$

- $\eta_{Wi}$  rendimento relativo all'energia  $i$  consumata dalle attività  $W$  rispetto a quella totale. Idealmente dovrebbe essere 0%.

$$\eta_{Wi} = \frac{E_{Wi}}{(E_{VAi} + E_{NVAi} + E_{Wi})} \quad (7)$$

A questo punto possono essere calcolati tre indicatori identificati come significativi per stabilire quali processi o attività hanno un maggiore impatto e quindi la precedenza per essere valutati e successivamente corretti: Cost Index, Muda Index e IPE.

Il Cost Index (CI) consente di identificare quale processo è responsabile dei costi più elevati tra quelli legati ai consumi energetici. Si ottiene come somma del costo unitario di energia ( $c_i$ ) moltiplicato per la relativa quantità totale di energia consumata:

$$CI = \sum_i c_i \times (E_{VAi} + E_{NVAi} + E_{Wi}) \quad (8)$$

Il Muda Index (MI) consente di quantificare il costo dell'energia non correlata alle attività VA, fornendo una rappresentazione chiara delle criticità dei flussi oltre che una chiara rappresentazione dei flussi energetici. Più il valore di MI è alto, più interventi correttivi saranno necessari per l'attività considerata. L'indice si calcola come:

$$MI = \sum_i c_i \times (E_{NVAi} + 2 \times E_{Wi}) \quad (9)$$

Per quanto riguarda l'energia consumata dalle attività W, queste vengono moltiplicate per un coefficiente maggiore di uno in modo da focalizzare l'indicatore sulle energie sprecate dal sistema. Utilizzando un fattore pari a due, le differenze tra i  $MI_i$  calcolati per le diverse energie vengono amplificate e si evidenzia al meglio l'energia maggiormente critica. Infatti, le analisi e la definizione di azioni correttive dovrebbero essere incentrate principalmente riguardo l'identificazione e la minimizzazione delle attività W, mentre le NVA dovrebbero possedere una priorità minore.

L'Indice di Prestazione Energetica (IPE) è qui definito facendo riferimento agli indicatori solitamente utilizzati per la stesura di diagnosi energetiche. Come suggerito dal Ministero dello Sviluppo Economico, ora Ministero delle Imprese e del Made in Italy, le diagnosi energetiche dovrebbero individuare un indice prestazionale aziendale descritto come il rapporto tra i consumi complessivi energetici e la media della specifica destinazione d'uso dell'azienda. Quest'ultima coincide con la produzione se si parla di aziende con attività produttive o con l'ampiezza della superficie servita se si tratta di aziende che realizzano servizi [12]. Questo parametro verrà calcolato per tutte le specifiche attività considerate maggiormente energivore e verrà confrontato con i valori delle tecnologie di riferimento

ottenuti dalla letteratura. In questo lavoro di tesi è stato scelto di calcolare l'indicatore come tipicamente utilizzato nei report energetici di ENEA, ovvero l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile:

$$\text{IPE} = \frac{\text{energia complessivamente consumata dalla fase [kWh]}}{\text{quantità di materia in uscita da utilizzare della fase [t]}} \quad (10)$$

## **Indici ambientali**

Successivamente, è necessario descrivere gli indicatori definiti dalla Carbon Footprint per l'analisi ambientale, che consentiranno di ottenere in maniera chiara e confrontabile l'impatto ambientale di ogni attività considerata espresso in kg di CO<sub>2</sub> equivalenti. Questi indicatori si basano sulla determinazione delle emissioni totali divise per Scope 1, Scope 2 e Scope 3 e determinate in base al tipo di emissione e ai flussi di materiali:

- le emissioni relative allo Scope 1 sono calcolate partendo dalle emissioni dirette associate agli impianti produttivi aziendali, alle quali andranno sommate le quantità di energia autoprodotta di tipo elettrico, termico o proveniente da altre fonti;
- le emissioni relative allo Scope 2 sono calcolate tenendo in considerazione le emissioni generate per la produzione esterna di tutte le risorse acquistate e utilizzate dall'azienda;
- le emissioni relative allo Scope 3 sono calcolate tenendo in considerazione le emissioni associate a tutti i flussi di risorse in uscita dall'azienda.

Grazie a questi indicatori sarà quindi possibile ottenere dei dati riguardo l'impatto che permettano di individuare quali fasi del processo risultano accettabili e quali richiedono invece di essere ottimizzate.

### **3.3.2 Mappatura dell'efficienza energetica dei processi**

Dopo aver raccolto tutti i dati necessari, si procede con il mappare l'efficienza energetica del processo, suddividendo inizialmente il layout dell'impianto in aree o processi che rimarranno sempre gli stessi per tutti i vettori energetici e i prodotti considerati. Questo consente una rapida lettura della mappa perché risulta facile individuare la localizzazione dei processi e l'utilizzo di vettori energetici per ogni zona considerata. Successivamente i processi vengono connessi tra loro per evidenziare il flusso produttivo di ciascun prodotto, creando una connessione naturale tra le mappe delle diverse fonti energetiche e flusso produttivo. Questa mappa incorpora dunque solo le informazioni essenziali necessarie per capire dove si trovano le criticità in termini di consumo energetico e il margine di miglioramento esistente per ciascun processo. Il metodo sfrutta la tecnica di gestione gerarchica dei dati, consentendo di visualizzare tutti i sottolivelli di ogni casella di processo scendendo nella gerarchia attraverso un'espansione della cella.

## **3.4 Definizione strategie di miglioramento**

Questa fase consente di stabilire le strategie per migliorare il consumo del processo produttivo, sviluppando un piano d'azione che miri ad eliminare gli sprechi energetici e a diminuire il consumo di energia senza valore aggiunto una volta individuate le situazioni critiche e a bassa efficienza, monitorando e mitigando allo stesso tempo l'impatto ambientale.

### **3.4.1 Identificazione delle azioni correttive**

Sono azioni che possono includere tecnologia, pianificazione, comportamento, economia e cambiamenti organizzativi e che mirano a eliminare le inefficienze e migliorare le prestazioni energetiche riducendo il consumo ma mantenendo la resa utile, essendo l'efficienza energetica definita come rapporto tra un output e un input di energia. Questo significa

che un'azione correttiva non dovrebbe generalmente includere una diminuzione di produzione del processo, anche se resta un possibile uso specifico, ma dovrebbe comprendere sia misure che azioni dirette a influenzare il consumo energetico e adottare cambiamenti per migliorare le questioni organizzative. Lo scopo è quello di fornire all'utente più approcci in grado di migliorare l'efficienza energetica e l'impatto ambientale per questo viene effettuata una revisione della letteratura per individuare possibili azioni correttive, scegliendo quelle più comunemente utilizzate.

### 3.4.2 Definizione piano d'azione

Il passo successivo è rappresentato dalla definizione del piano d'azione. Esso è un documento che elenca tutti i passi da intraprendere per raggiungere l'obiettivo stabilito nella prima fase del metodo, definendo tutte le risorse necessarie, prioritizzando gli eventi e formulando le tempistiche per il completamento dei compiti specifici. L'obiettivo principale sarà quindi redigere un piano che miri ad eliminare le energie  $W$ , ridurre il consumo di quelle  $NVA$  e massimizzare l'efficienza energetica delle attività  $VA$ , diminuendo così costi di produzione e impatti ambientale (Figura 6).

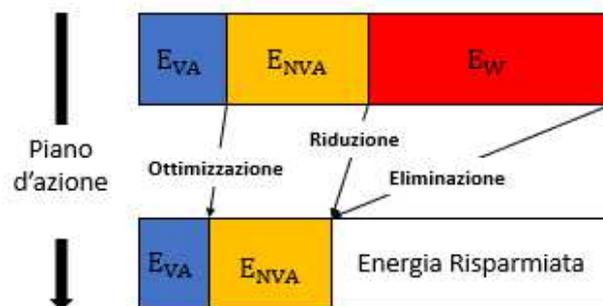


Figura 6. Sviluppo del piano d'azione

Per indagare ogni inefficienza e impostare strategie di miglioramento si può utilizzare un'analisi di Pareto basata sul Muda Index, con lo scopo di identificare il 20% dei processi che costituiscono l'80% del consumo di energie non legate alle attività VA. Il tutto porterà alla costruzione di un diagramma in questo modo:

- elencare ogni processo e la sua MI associata;
- calcolare il MI% per ciascun processo k:

$$MI\%_k = \frac{MI_k}{\sum_k MI_k} \quad (11)$$

- ordinare i processi in ordine decrescente secondo i valori di MI% calcolati;
- calcolare i valori cumulativi MI% aggiungendo a ciascuno la somma dei suoi predecessori;
- Tracciare una barra per ogni processo e i valori cumulativi MI% (indicando il processo nell'asse orizzontale, MI nell'asse verticale sinistro e MI% nell'asse verticale destro);
- Tracciare una linea all'80% del valore cumulativo MI% sull'asse x.

Questa analisi consente anche di identificare contemporaneamente le cause importanti per processi ed energia. In questo caso occorre elencare le coppie processo (k) – risorsa (i) e per ciascuna calcolare i relativi MI e MI% in questo modo:

$$MI\%_{ki} = c_i \times (E_{NVAi} + 2 \times E_{Wi}) \quad (12)$$

$$MI\%_{ki} = \frac{MI_{ki}}{\sum_k MI_{ki}} \quad (13)$$

Per tutte le attività che possiedono un MI% maggiore dell'80% e un valore di IPE maggiore dei valori standard verrà segnalata una maggiore urgenza nell'intraprendere le azioni correttive. Successivamente, per ogni causa identificata vengono fornite più soluzioni, selezionandole tra le azioni correttive individuate nella fase precedente, che dovranno essere state contestualizzate e valutate sulla base del loro impatto sulla riduzione dei consumi energetici e dell'investimento (preferendo azioni con elevato impatto e basso livello di investimento) ma tenendo conto di un preliminare studio di fattibilità e del rapporto costi-benefici.

## **3.5 Attuazione**

Una volta definito il piano d'azione, la fase di implementazione consente di realizzare il programma nel sistema produttivo. Le azioni con alta priorità e tempi di recupero bassi vengono applicate per prime e dovrebbero coprire tutti gli ambiti: macchine, organizzazione e risorse umane. Questa fase deve prevedere allo stesso tempo azioni di verifica e valutazione delle prestazioni., monitorando il raggiungimento degli obiettivi prefissati in termini di riduzione energetica, riduzione di costi e dell'impatto ambientale.

### **3.5.1 Attuazione e funzionamento**

In questa fase vengono implementate le attività determinate nel piano d'azione. Come già evidenziato, è necessario formare un team di efficienza energetica che sia responsabile dell'impostazione, del mantenimento e del controllo durante l'intervento. Quando invece si introducono misure che richiedono investimenti, è bene includere tra le responsabilità anche fornitori e stakeholders per realizzare il massimo risparmio possibile.

Per garantire un'efficace attuazione, è necessario considerare questi aspetti:

- garantire le risorse necessarie per una corretta attuazione delle misure del piano, facendo sì che siano disponibili le risorse tecniche e finanziarie necessarie a garantire una corretta attuazione delle misure;
- sensibilizzare e formare tutti i dipendenti coinvolti nel processo migliorativo e nel campo di gestione dell'energia. Questi, infatti, sono requisiti fondamentali per il successo dell'implementazione delle azioni correttive, che richiedono una formazione adeguata e delle competenze rilevanti;
- comunicare e fornire documentazioni efficaci, che rappresentano un prerequisito fondamentale poiché informare regolarmente aumenta la motivazione a partecipare attivamente da parte dei dipendenti, istituendo una cultura aziendale che permetta ai lavoratori di avanzare proposte di miglioramento continuo.;
- effettuare un controllo operativo di tutti i processi, poiché tutti i processi aziendali devono essere esaminati al fine di identificare

eventuali inefficienze o maggiori impatti ambientali create durante la modifica stessa.

### **3.5.2 Controllo**

L'ultima fase del metodo ha lo scopo di monitorare e verificare l'efficacia delle azioni correttive implementate; l'istituzione e il mantenimento delle procedure e dei controlli operativi aiutano infatti l'azienda a garantire il corretto uso dell'energia rispetto alle politiche e agli obiettivi stabiliti nella prima fase. Dunque, dopo aver applicato le azioni, è necessario effettuare nuove raccolte di dati e analisi per valutare i benefici ottenuti in termini di energia, costi e impatti. Un confronto frequente e regolare tra consumo energetico previsto ed effettivo consente di individuare in tempo un utilizzo inefficiente dell'energia, monitorando le aree di intervento e tutti gli altri fattori rilevanti per i consumi. Dopo le misurazioni e la raccolta dei dati, gli indicatori prima calcolati dovranno essere aggiornati, ricalcolando le percentuali di energia consumata dalle attività VA, NVA e W e gli indicatori CI, MI e IPE, realizzando una mappa dei valori energetici aggiornata. In questo modo viene definita l'efficienza energetica del sistema produttivo migliorato e la nuova mappa consentirà di confrontare i risultati ottenuti e analizzare se le azioni implementate hanno eliminato o ridotto l'inefficienza, scoprendo le potenziali non conformità rispetto ai risultati attesi.

## Capitolo 4: Applicazione e Caso Studio

In questo capitolo verrà descritto la struttura di uno strumento software basato sul metodo sopra descritto per fornire supporto nelle scelte aziendali volte ad aumentare l'efficienza energetica e ridurre l'impatto ambientale di tutte le attività coinvolte nel processo produttivo o in generale in tutto il funzionamento aziendale. In particolare, in questo lavoro di tesi lo strumento verrà applicato sulla filiera off-shore per la produzione di pannelli in EPS utilizzati nei cappotti termici degli edifici ma potenzialmente sia il metodo sia lo strumento potrebbero essere sfruttati anche in altri contesti industriali. Lo strumento è stato modellato distinguendo le diverse sezioni e funzionalità che lo caratterizzano e facendo in modo che lo svolgimento dell'analisi e il calcolo degli indicatori ambientali venga eseguito non solo per le attività e le fasi del processo produttivo identificato ma, a fronte di una disponibilità dei dati, anche per tutti gli attori che compongono la Supply Chain, per ottenere un quadro effettivo degli impatti e dei consumi di tutto ciò che concorre alla realizzazione di un certo prodotto finale. Successivamente verrà mostrato e descritto un esempio di come lo strumento possa funzionare, attraverso un dimostratore in Excel, per l'analisi di un processo produttivo tipicamente associato alla realizzazione di pannelli in EPS espansi utilizzati per i cappotti termici negli edifici. Questo sarà capace di dimostrare il funzionamento dello strumento. Il tutto sarà poi validato da un caso studio applicativo in cui verrà mostrato l'effettivo funzionamento del tool realizzato utilizzando dati reali provenienti da diagnosi energetiche e modellato con due diversi scenari da confrontare.

## **4.1 Descrizione dello strumento**

Per quanto riguarda la descrizione dello strumento, inizialmente bisogna distinguere le diverse parti che compongono la sua architettura: il reparto fisico, il centro dati cloud, la piattaforma web e il modulo analitico.

### **4.1.1 Reparto fisico**

Il primo modulo rappresenta il reparto produttivo fisico. L'attuale sviluppo dello strumento consente soltanto di valutare uno scenario con un'azienda con produzione non automatizzata: i dati vengono raccolti consultando manualmente fatture, contatori o dati storici dell'azienda e vengono manualmente inseriti nelle apposite sezioni dello strumento. Il livello di dettaglio dei dati in questo caso sarà molto minore ma la mole di quelli raccolti molto più gestibile. I dati di input allo strumento includono informazioni sul consumo energetico delle risorse aziendali, lo stato del processo produttivo (ad esempio se la macchina o la stazione è in attesa, manutenzione o guasta) e i parametri di processo (ad esempio i pezzi in ingresso/uscita, la pressione o la temperatura).

### **4.1.2 Centro dati cloud**

Il sistema di raccolta prima descritto trasmette poi i dati raccolti all'interno di un centro cloud. Il Cloud Data Center è un centro di informazioni che archivia e scambia dati di produzione. Questo modulo riceve i dati e li archivia in modo strutturato in base a varie caratteristiche. Quando vengono effettuate query dalla piattaforma web esso restituisce i set di dati che poi potranno essere utilizzati nell'analisi. Il suo compito principale consiste quindi in archiviare i dati di produzione e associarli al modello di dati del processo. In questo modo, la piattaforma web potrà gestire i flussi di informazioni provenienti da diverse fonti, archivarli in database multipli ed estrarre informazioni significative in base alle richieste dell'utente.

### **4.1.3 Piattaforma web**

La piattaforma web sarà la parte di strumento a disposizione dell'utente per chiedere, ottenere e visionare i risultati desiderati. L'utente verrà distinto tra:

- amministratore, che avrà accesso a tutte le funzionalità e potrà gestire le attività produttive e non comprese tra quelle disponibili nel software o aggiungerne altre presenti nella sua azienda e non di default nello strumento. Inoltre, sarà in grado di visualizzare nel dettaglio tutti i risultati ottenuti dall'analisi energetica e ambientale per ogni singola sottofase del processo produttivo e dell'intera Supply Chain e sarà in grado di concedere l'accesso a nuovi utenti standard;
- standard, che non sarà abilitato a modificare o aggiungere nessuna attività o informazione, ma che potrà solamente visualizzare i risultati finali dell'analisi energetica e ambientale in toto, senza poter entrare nel dettaglio di ogni singola attività.

## 4.2 Funzionalità dello strumento

In questo paragrafo verrà descritto il funzionamento del modulo analitico che permette allo strumento di analizzare i dati in ingresso e fornire risultati dal punto di vista energetico e ambientale. Nella versione attualmente sviluppata, sono state identificate due diverse funzionalità, ovvero la valutazione energetica e la valutazione ambientale.

### 4.2.1 Prima funzionalità: Valutazione Energetica

La prima funzionalità consiste nello svolgere l'analisi energetica, ovvero il punto cardine dello strumento. Verranno quindi analizzati tutti i flussi energetici per le diverse attività e saranno calcolati tutti gli indicatori descritti dal metodo. La prima suddivisione realizzata dallo strumento sarà tra le due categorie energetiche più utilizzate all'interno dell'industria manifatturiera, ovvero energia elettrica e termica, che saranno distinte in base a delle percentuali di utilizzo rispetto all'energia globalmente utilizzata in ingresso dall'azienda. Successivamente, sarà necessario dividere a sua volta le energie nella percentuale autoprodotta dall'azienda (ad esempio con utilizzo di pannelli fotovoltaici) o la controparte acquistata dall'esterno (quindi tra energia green e non green), sfruttando i dati presenti (Figura 7).

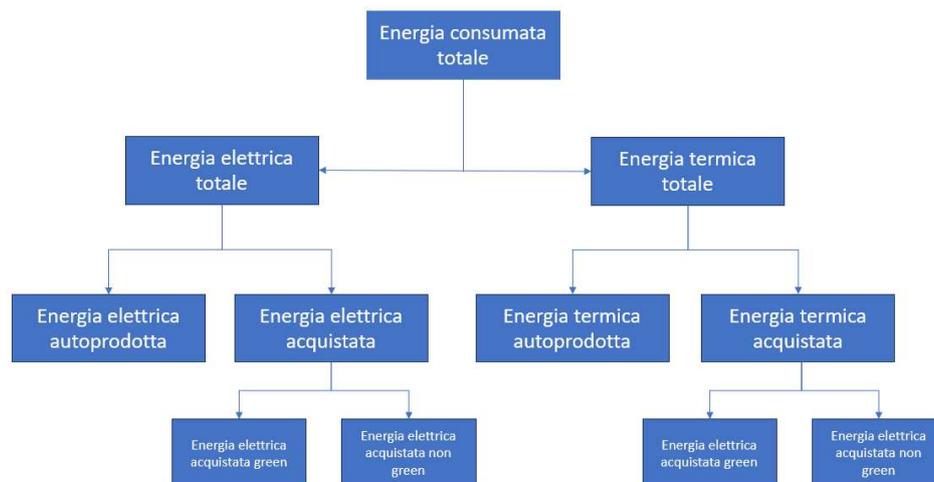


Figura 7. Diagramma ad albero dei consumi energetici

Una volta distinte le categorie energetiche, bisogna stabilire l'unità temporale nella quale sarà svolta l'analisi per validare un successivo confronto (ad esempio un mese, un trimestre o un anno di consumi). A questo punto, si può proseguire realizzando la suddivisione delle attività in base a tre categorie: attività principali, che descrivono tutte le fasi di produzione; servizi ausiliari, che rappresentano tutte quelle attività di supporto alla produzione; servizi generali, che agglomerano tutte le altre spese energetiche di carattere generale e non limitato all'ambiente produttivo. Per ogni categoria si potrà comunque ulteriormente suddividere scendendo ancora più in dettaglio in base alla fase produttiva. Sono infatti previsti tre diversi livelli su cui impostare l'analisi: il livello di dettaglio basso viene selezionato quando non si hanno dati specifici sia sul contributo in percentuale delle varie fasi sia sulle percentuali di energia elettrica e termica di ogni fase e quindi si impone un contributo uguale per tutte le voci valido in tutte le diverse fasi; con il livello medio si ipotizza che l'utente conosca le percentuali di contributo al consumo energetico di ogni fase (che quindi da ora possono essere diverse) mentre quelle di energia elettrica e termica restano le stesse delle globali; per il livello alto si utilizzano le stesse ipotesi del livello medio con la differenza che ora l'utente che può specificare il contributo di energia elettrica e termica di ogni fase. Fatta questa distinzione, si può proseguire differenziando tra attività Value-Added, Non-Value-Added e Waste secondo i principi della filosofia Lean (senza supporto di algoritmi ma con decisioni da prendere internamente in base alle competenze o alle ricerche in letteratura).

Fasi processo produttivo	Tipologia attività	Consumo energetico totale (kWh)	Energia Autoprodotta (kWh)	Energia Acquistata (kWh)
• Pre-espansione				
• Maturazione				
• Espansione 2				
• Reparto blocchi				
• Reparto stampaggio				
• Finitura				
• Macinazione per recupero				
• Confezionamento				
<b>TOTALE</b>				

Figura 8. Simulazione strumento - valutazione energetica (consumi totali)

Da qui, una volta individuate e distinte tutte le quantità di energia associate ad ogni categoria (Figura 8. Simulazione strumento - valutazione energetica (consumi totali)), si possono iniziare a calcolare i primi indici utili, ovvero il Cost Index e il Muda Index (Figura 9. Simulazione strumento - indici di prestazione energetica), sia a livello medio per tutto il plant produttivo, sia a livello più dettagliato per ogni singola attività se si conoscono i valori precisi.

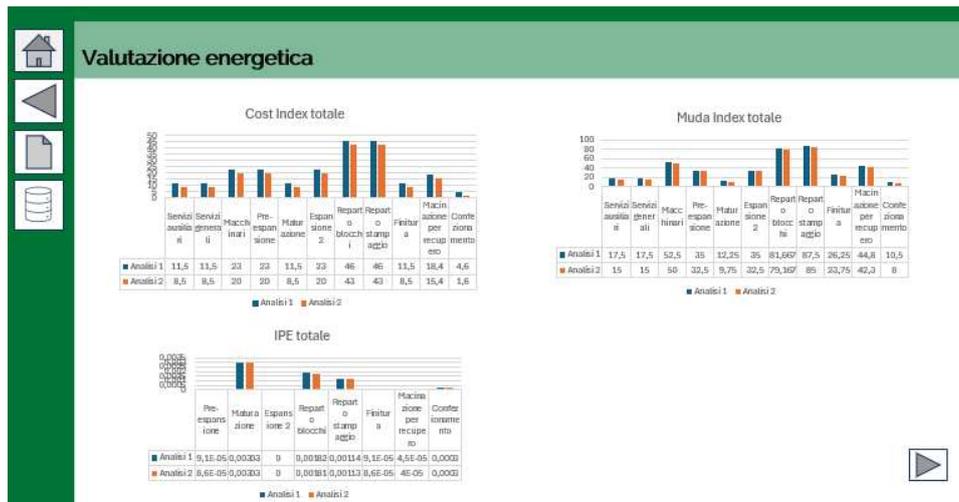


Figura 9. Simulazione strumento - indici di prestazione energetica

#### 4.2.2 Valutazione energetica: input e output

Una volta illustrato il funzionamento della valutazione energetica, è importante stabilire e fissare tutti i vari ingressi necessari allo strumento per svolgere l'analisi in maniera coerente con il metodo descritto e in grado di fornire risultati efficaci in funzione della situazione analizzata, che a loro volta decreteranno una serie di uscite utili per svolgere e comprendere correttamente l'analisi.

##### Input:

- definizione del periodo considerato per l'analisi;
- energia elettrica acquistata e autoprodotta;
- energia termica acquistata e autoprodotta;
- distinzione tra energia corrispondente alle attività principali, ai servizi generali e a quelli ausiliari;

- distinzione tra attività VA, NVA, W per il processo produttivo, eventualmente associandole alla distinzione precedente;
- Valori standard dell'IPE per il confronto.

**Output:**

- calcolo del Cost Index per tutte le attività, partendo dal generale e proseguendo nel particolare (valido per tutti gli indici ma non obbligatorio);
- calcolo del Muda Index per tutte le attività;
- classificazione delle attività dalla più energivora alla meno;
- calcolo dell'IPE delle attività più energivore;
- possibile segnalazione delle azioni correttive, ad esempio per  $MI\% > 80\%$  e  $IPE >$  del valore standard in ordine di urgenza  $W > NV > VA$  per uno sviluppo futuro;
- grafici e tabelle riassuntive che mostrino in maniera chiara i risultati ottenuti.

#### **4.2.3 Seconda funzionalità: Valutazione Impatto Ambientale**

La seconda funzionalità cardine dello strumento è la valutazione dell'impatto ambientale. Come descritto nel metodo, l'analisi verrà eseguita seguendo le linee guida della Corporate Carbon Footprint (CCF), che distingue tre diverse tipologie di emissioni legate al prodotto che servono a quantificare in termini di CO<sub>2</sub> equivalente l'intera catena che influisce sull'impatto finale. Dunque, i valori finali per ogni tipo di emissione saranno determinati moltiplicando i flussi energetici e di materiali per dei coefficienti ottenuti dal dataset Ecoinvent versione v3.8, riferendosi in particolare ai valori definiti dall'Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC, 2013) considerando un potenziale di riscaldamento globale (GWP) in un intervallo di 100 anni per il Climate Change (Figura 10 e 11):

- Scope 1: in questa categoria vengono considerate le emissioni dirette provenienti da fonti possedute o controllate direttamente dall'azienda e per questo vengono determinate sommando la quantità di emissioni dirette in kg di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), monossido di diazoto (N<sub>2</sub>O), idrofluorocarburi (HFCs), perfluorocarburi (PFCs)

ed esafluoruro di zolfo ( $\text{SF}_6$ ), con questi valori che vanno moltiplicati per dei coefficienti definiti dall'IPCC che calcolano l'impatto ambientale ma non prelevati dal dataset già creato da Ecoinvent. A queste bisogna poi aggiungere le emissioni legate alla produzione di energia interna all'azienda (se presente) che verrà calcolata moltiplicando il valore di energia autoprodotta di ogni fase per l'impatto unitario individuato nel dataset sotto la voce "electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si", ovvero la voce relativa all'energia autoprodotta da fotovoltaico, che rappresenta una delle tipologie presenti nel dataset;

- Scope 2: in questa tipologia vengono considerate le emissioni indirette derivanti da energia acquistata e generata fuori sede. In questo caso il calcolo viene determinato sommando la quantità di energia elettrica acquistata, moltiplicata per l'impatto unitario "market for electricity, medium voltage" e la quantità di energia termica acquistata, moltiplicata per l'impatto unitario "market group for heat, district or industrial, natural gas": entrambi gli impatti unitari provengono dal dataset di riferimento per quantità energetiche a medio voltaggio e sono specificati in funzione del contesto geografico considerato;
- Scope 3: in questa categoria vengono considerate tutte le emissioni indirette che si verificano all'interno dell'intera catena del valore. Per il calcolo si considerano i flussi di materiale all'interno dell'intera azienda, che nello strumento sono stati distinti in cartone e polistirolo. Il valore complessivo viene quindi determinato moltiplicando la quantità in kg di materia prima in uscita da riutilizzare per ogni attività per gli impatti unitari "market for polystyrene, expandable" per il polistirolo e "market for containerboard, linerboard" per il cartone.

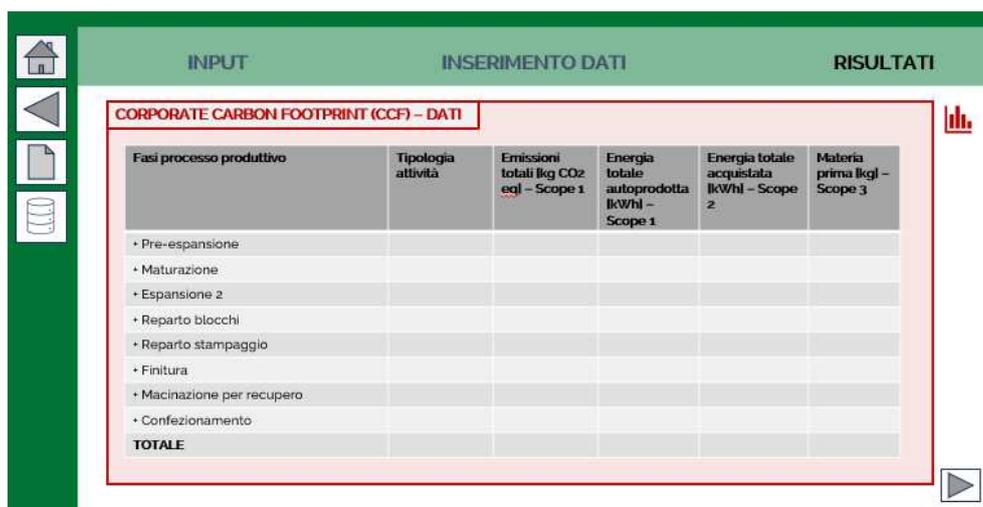


Figura 10. Simulazione strumento - valutazione ambientale (CCF)

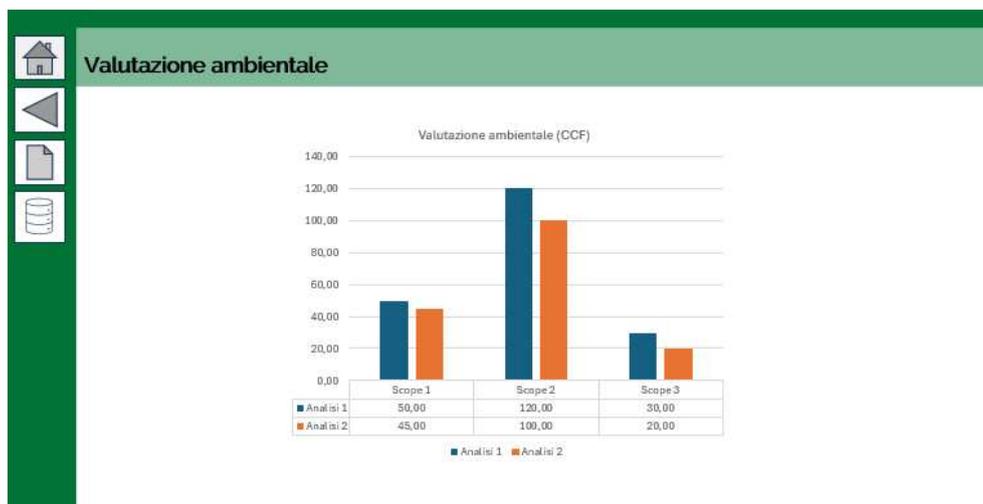


Figura 11. Simulazione strumento - grafici analisi ambientale (kg CO2 eq.)

#### 4.2.4 Valutazione impatto ambientale: input e output

Come per la valutazione energetica, è necessario individuare tutti gli ingressi e le uscite che sono necessarie quindi allo strumento per poter svolgere correttamente la valutazione ambientale e che quindi dovranno sempre essere presenti nell'analisi.

##### Input:

- energia elettrica e termica acquistata per lo Scope 2;
- energia elettrica e termica autoprodotta ed emissioni dirette per lo Scope 1;

- materia prima acquistata da fornitore. Se si possiedono i consumi energetici sia del fornitore che del cliente sono da aggiungere per poter calcolare le emissioni legate allo Scope 3. Eventualmente bisogna valutare anche i materiali (ad esempio sia la materia prima EPS che l'acqua per la generazione del vapore);
- eventuali dati ottenuti dalla letteratura su impatti medi di tipologie di industrie simili.

**Output:**

- la valutazione ambientale realizzata considerando l'indicatore Climate Change;
- eventuale confronto tra risultati e dati di letteratura;
- grafici e tabelle per la descrizione dei risultati raggiunti.

### **4.3 Simulazione Excel dello strumento**

Una volta descritto il funzionamento dello strumento, per avere una chiara idea di come impostare tutti i parametri e le sezioni del software è stata realizzata un dimostratore Excel dello strumento e su di esso analizzato il caso studio di un processo produttivo tipico per la realizzazione di pannelli in EPS utilizzati per realizzare i cappotti termici negli edifici. Il file è stato impostato con diverse sezioni, concentrandosi principalmente sul modulo per l'inserimento degli input, il modulo per il calcolo degli indici di valutazione energetica, il modulo di analisi energetica e il modulo di analisi ambientale. Il primo passo consiste dunque nel descrivere come funziona il processo di produzione dell'EPS, poiché in funzione di ciò è stato modellato il dimostratore.

#### **4.3.1 Processo produttivo di pannelli in EPS espanso**

La materia prima utilizzata per la produzione del polistirene espanso è il polistirolo espansibile vergine; questo materiale si presenta sotto forma di piccole sfere o chips di dimensioni inferiori ai 3 mm di diametro. Le perle di

polistirolo espansibile sono costituite da celle microscopiche riempite di pentano, un gas espandente che si dilata durante il processo.

### **Fase di pre-espansione, maturazione ed espansione**

La prima fase del processo è una fase di pre-espansione. In un apposito espansore, la materia prima viene sottoposta ad un processo di espansione mediante l'iniezione di vapore in una camera ad una temperatura intorno ai 90 °C. L'immissione di vapore causa la vaporizzazione dell'agente espandente, amplificando le perle di polistirolo espansibile fino a 50 volte il volume iniziale. La seconda fase del processo consiste nella maturazione (o stagionatura) delle perle espanse. Al termine della pre-espansione, le perle si presentano ancora separate tra loro, e vengono inviate tramite ventilatori all'interno di silos per il processo di maturazione. A seguito del raffreddamento i residui di gas espandente e di vapore condensano nelle singole celle; la depressione che così si forma viene annullata dall'aria che diffonde all'interno delle celle. La fase di maturazione è necessaria per far raggiungere alle sfere la stabilità necessaria per essere sottoposte alle lavorazioni successive. La stagionatura delle perle espanse può durare da un minimo di 4 ore a un massimo di 24 ore, a seconda delle densità e del tipo di polistirolo espansibile impiegato. Talvolta le perle possono andare incontro ad una seconda fase di espansione, nella quale queste vengono ulteriormente espanse tramite immissione di vapore.

### **Reparto blocchi e reparto stampaggio**

Terminato il periodo di maturazione, le perle di polistirolo pre-espanso e stagionate possono essere trasformate nei diversi manufatti. A seconda del prodotto desiderato, gli impianti di produzione di EPS dividono la mandata di sfere in due diversi tipi di macchinari:

- Nelle blocchiere le perle vengono sottoposte all'iniezione di vapore ad una temperatura di 110-120 °C. L'immissione di vapore porta alla sinterizzazione delle sfere, che si gonfiano ulteriormente e si saldano

tra di loro per effetto della loro pressione interna fino a formare un blocco omogeneo di polistirene espanso. I blocchi in polistirene espanso, una volta asciutti, vanno incontro ad una fase di taglio per la realizzazione di lastre di EPS. Il taglio in lastre avviene mediante l'impiego di un filo metallico incandescente.

- Nelle stampatrici (o "presse") avviene un analogo processo di sinterizzazione, ma questa volta in stampi chiusi che consentono di ottenere direttamente la forma desiderata senza la necessità di ulteriori lavorazioni meccaniche.

### **Finitura**

I prodotti stampati in uscita dalle presse vengono poi rifiniti mediante l'utilizzo di pantografi, in modo tale da eliminare imperfezioni e far assumere loro la forma corretta in base alle diverse esigenze di morfologia.

### **Macinazione**

Alcuni impianti prevedono il recupero degli sfridi prodotti durante le fasi di stampaggio, taglio e finitura, al fine di ridurre gli sprechi di materiale ed energia. Gli sfridi di polistirolo vengono macinati in appositi trituratori e trasferiti in silos di raccolta, per essere poi riutilizzati nelle fasi di sinterizzazione future.

### **Confezionamento**

Le lastre e i manufatti in EPS, una volta concluse le fasi di taglio e finitura, vengono inviati nei depositi e confezionati in modo tale da essere pronti per le future fasi di trasporto.

Il processo produttivo del polistirene espanso, schematizzato in Figura 12, utilizza principalmente due vettori energetici: l'energia elettrica, impiegata anche per la produzione di aria compressa, e il gas naturale, utilizzato nelle caldaie per la produzione di vapore, elemento indispensabile per le fasi di espansione e stampaggio [13].

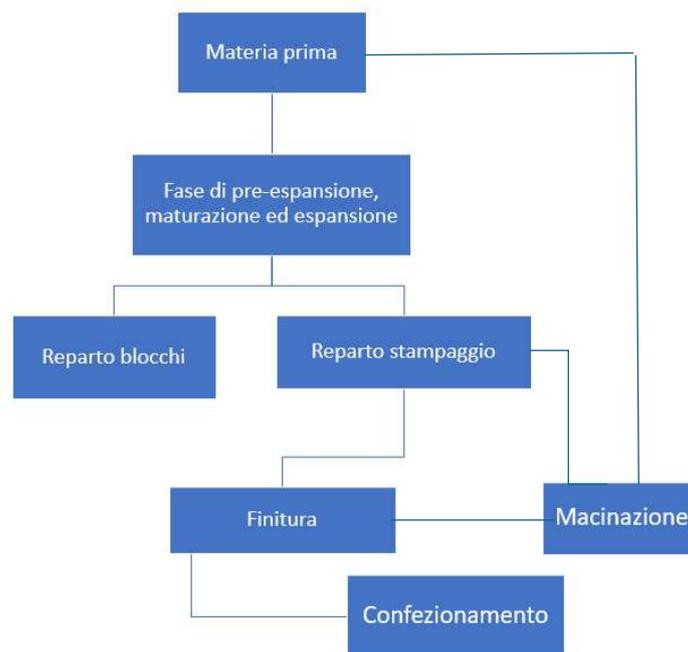


Figura 12. Processo di produzione dei manufatti in EPS

#### 4.3.2 Modulo di Input

Una volta descritto il processo produttivo, si può procedere nell'illustrare il funzionamento dei diversi fogli. Il modulo di input contiene al suo interno tutte le informazioni riguardo i dati necessari per lo svolgimento dell'analisi. Il foglio elettronico è stato organizzato in modo da comprendere al suo interno delle sezioni dove è possibile inserire manualmente i dati in ingresso del sistema. Inizialmente, è necessario definire alcune informazioni riguardo il confine dell'analisi: scegliere il tipo di valutazione da realizzare, indicando se estendere il tutto al singolo plant o all'intera catena produttiva se sono noti i dati necessari; inserire la modalità di prelievo dei dati (manuale o con sensori) e il periodo temporale durante il quale viene svolta l'analisi (se con

dati mensili, trimestrali, annuali ecc...); impostare il livello di dettaglio delle informazioni richiesto, che si distingue tra:

- basso se ci si limita ad inserire informazioni solo riguardo alla distinzione tra energia elettrica e termica, autoprodotta o acquistata, con delle percentuali uguali associate a tutte le fasi che rimarranno le stesse per tutta l'analisi e senza entrare nel dettaglio di ogni singolo processo;
- medio se l'utente distingue le percentuali di consumo energetico di ogni fase analizzata (che quindi saranno diverse in base agli effettivi consumi), mentre le percentuali riguardo energia elettrica e termica rimangono le stesse di quelle impostate globalmente;
- alto se è possibile specificare le percentuali di consumo di ogni fase, distinguendo inoltre per ognuna di esse la divisione di consumo tra energia elettrica e termica.

A questo punto è possibile inserire nello strumento i valori relativi al consumo energetico totale, alla percentuale di energia elettrica, termica, energia autoprodotta e acquistata (come mostrato nella Tabella 1) se il livello di dettaglio scelto è basso.

Tabella 1. Parametri generali

<b>consumo energetico</b>	UM			
<b>valore totale</b>	kWh	7934804,00		
<b>energia termica</b>	%	86,59	kWh	6871003,87
<b>energia elettrica</b>	%	13,41	kWh	1063799,97
<b>energia autoprodotta</b>	%	2,68	kWh	212906,66
<b>energia acquistata</b>	%	97,32	kWh	7721897,34

Se invece è stato impostato un livello di dettaglio medio o alto, è necessario compilare la tabella dei parametri specifici, dove si devono inserire le percentuali dettagliate di consumo delle singole attività, le distinzioni tra energia elettrica, termica, autoprodotta e acquistata specifiche (Tabella 2) e tutte le informazioni riguardo ai flussi di materiale in ingresso e uscita per ogni fase, distinguendo tra flussi di scarto, da lavorare o di recupero,

indicando il tipo di materiale. In ultimo vanno inserite tutte le informazioni per quanto riguarda il tipo di emissioni generate da ogni fase e distinte tra diverse tipologie di gas nocivi, che saranno poi utilizzate nel modulo di analisi ambientale per la determinazione degli impatti.

Tabella 2. Parametri specifici

<b>Processo produttivo</b>	<b>contributo sul totale</b>	<b>contributo energia elettrica</b>	<b>contributo energia termica</b>	<b>quantità materia prima in ingresso</b>
<b>Fase</b>	%	%	%	kg
<b>Intero plant</b>				
Servizi ausiliari	7,3			
Servizi generali	0,4			
Pre-espansione	29,5			
Maturazione	0,4			
Reparto stampaggio	64,1			
Finitura	0,4			
Macinazione	0,2			

#### 4.3.3 Modulo di Analisi Energetica

Per quanto riguarda il modulo di analisi energetica, questo si occupa di trasformare i dati e la divisione in percentuale delle diverse fonti energetiche in delle tabelle che descrivano il funzionamento e le quantità di energia associate a ciascuna attività, per avere una panoramica generale di come i consumi siano distribuiti in base al tipo di energia, alla modalità di produzione dell'energia o in base al tipo di attività (VA, NVA, W). Per ogni singolo plant produttivo vengono generate infatti sei diverse tabelle:

- la prima tabella presenta un riassunto totale di quelli che sono i consumi energetici sommati delle diverse fonti energetiche e i

consumi associati alla totalità dell'energia acquistata e autoprodotta, come illustrato dalla Tabella 3;

Tabella 3. Esempio tabella riassuntiva consumi totali

Etichette di riga	Somma di Consumo energetico totale [kWh]	Somma di Energia autoprodotta [kWh]	Somma di Energia acquistata [kWh]
<b>Confezionamento</b>	<b>721345,82</b>	<b>19355,15</b>	<b>701990,67</b>
confezionamento	360672,91	9677,58	350995,33
trasporto	360672,91	9677,58	350995,33
<b>Espansione 2</b>	<b>721345,82</b>	<b>19355,15</b>	<b>701990,67</b>
iniezione vapore, riscaldamento camera ed espansione	240448,61	6451,72	233996,89
prelievo materia prima	240448,61	6451,72	233996,89
trasferimento materia prima	240448,61	6451,72	233996,89
<b>Finitura</b>	<b>721345,82</b>	<b>19355,15</b>	<b>701990,67</b>

- la seconda tabella descrive invece quali sono i consumi relativi alla sola componente di energia elettrica di ogni fase, anche questi divisi tra energia elettrica totale, energia elettrica acquistata ed energia elettrica autoprodotta (Tabella 4);

Tabella 4. Esempio di tabella consumi energia elettrica.

Etichette di riga	Somma di Consumo energia elettrica [kWh]	Somma di Energia elettrica autoprodotta [kWh]	Somma di Energia elettrica acquistata [kWh]
<b>Confezionamento</b>	<b>9669,94</b>	<b>259,46</b>	<b>9410,48</b>
confezionamento	4834,97	129,73	4705,24
trasporto	4834,97	129,73	4705,24
<b>Espansione 2</b>	<b>9669,94</b>	<b>259,46</b>	<b>9410,48</b>
iniezione vapore, riscaldamento camera ed espansione	3223,31	86,49	3136,83
prelievo materia prima	3223,31	86,49	3136,83
trasferimento materia prima	3223,31	86,49	3136,83
<b>Finitura</b>	<b>9669,94</b>	<b>259,46</b>	<b>9410,48</b>

- la terza tabella descrive a sua volta tutti i consumi relativi alla componente di energia termica associata ad ogni fase, anche qua divisi

tra energia termica totale, energia termica acquistata ed energia termica autoprodotta (Tabella 5);

Tabella 5. Esempio tabella consumo energia termica

Etichette di riga	Somma di Consumo energia termica [kWh]	Somma di Energia termica autoprodotta [kWh]	Somma di Energia termica acquistata [kWh]
<b>Confezionamento</b>	<b>62457,43</b>	<b>1675,86</b>	<b>60781,57</b>
confezionamento	31228,71	837,93	30390,78
trasporto	31228,71	837,93	30390,78
<b>Espansione 2</b>	<b>62457,43</b>	<b>1675,86</b>	<b>60781,57</b>
iniezione vapore, riscaldamento camera ed espansione	20819,14	558,62	20260,52
prelievo materia prima	20819,14	558,62	20260,52
trasferimento materia prima	20819,14	558,62	20260,52
<b>Finitura</b>	<b>62457,43</b>	<b>1675,86</b>	<b>60781,57</b>

- la quarta, la quinta e la sesta tabella generate riguardano invece la descrizione dei diversi consumi legati e divisi in questo caso per tipologia di attività, ovvero VA, NVA e W. La quarta tabella rappresenta sempre i consumi totali mentre la quinta e la sesta sempre i consumi divisi per tipologia di fonte energetica, come mostrato in Tabella 6.

Tabella 6. Esempio di tabella con distinzione per tipologia attività

Etichette di riga	Somma di Consumo energetico totale [kWh]
<b>Confezionamento</b>	<b>721345,82</b>
NVA	360672,91
W	360672,91
<b>Espansione 2</b>	<b>721345,82</b>
NVA	240448,61
VA	240448,61
W	240448,61
<b>Finitura</b>	<b>721345,82</b>
NVA	120224,30

Allo stesso modo possono essere calcolate delle tabelle molto simili anche per tutti i vari attori che fanno parte della Supply Chain e dei quali si conoscono dati a sufficienza, limitandosi però solo alla creazione delle prime tre tipologie di tabelle sopra descritte, di cui nella Tabella 7 è riportato un esempio.

Tabella 7. Esempio consumi di un ipotetico attore 1

Etichette di riga	Somma di Consumo energetico totale [kWh]	Somma di Energia autoprodotta [kWh]	Somma di Energia acquistata [kWh]
1 Fase	0	0	0
2 Fase	0	0	0
3 Fase	0	0	0
4 Fase	0	0	0
5 Fase	0	0	0
<b>Totale complessivo</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

#### 4.3.4 Modulo di Analisi Ambientale

Il modulo di analisi ambientale rappresenta la seconda funzionalità implementata nello strumento nella sua versione attuale. Il principio di funzionamento di questa sezione si basa sempre sullo stesso modello degli altri moduli, andando ad illustrare i risultati sempre distinti tra le diverse fasi che compongono il processo produttivo e separando il plant dai diversi possibili attori considerabili in base ai dati posseduti. In questo caso particolare, per esprimere i risultati sono stati sfruttati i dati compresi all'interno del database Ecoinvent versione v3.8, grazie al quale è possibile esprimere tutti i risultati ottenuti per le diverse componenti energetiche, di materiali e di emissioni in termini di kg CO2 equivalente moltiplicando i valori per dei coefficienti come descritto nel capitolo della seconda funzionalità dello strumento legata al calcolo dell'impatto ambientale. Come mostrato in Tabella 8, i singoli valori attribuibili ad ogni fase vengono suddivisi in:

- emissioni legate a Scope 1, Scope 2 e Scope 3 calcolate in base alla tipologia di emissione indicata nel modulo di input e attribuita alla particolare fase (ad esempio CO2, CH4, ecc...) suddivise rispetto ai tre diversi metodi descritti nei capitoli precedenti;
- emissioni legate all'energia autoprodotta che rientra all'interno dello Scope 1 in quanto emissione direttamente attribuibile all'azienda;
- emissioni dovute alla componente di energia elettrica acquistata e che, essendo prodotta esternamente all'azienda, rientra nella categoria dello Scope 2;
- emissioni dovute alla componente di energia termica acquistata e che, essendo prodotta anch'essa esternamente all'azienda, rientra sempre nella categoria dello Scope 2;
- emissioni legate alla circolazione, alla trasformazione, all'utilizzo e allo scarto di materiali all'interno di ogni singola fase del processo produttivo considerato, inizialmente distinte tra polistirolo e cartone, identificati come materiali sicuramente utilizzati durante il processo di produzione di EPS.

Tabella 8. Esempio calcolo emissioni con CCF

	energia autoprodotta Scope 1	energia elettrica acquistata Scope 2	energia termica acquistata Scope 2	materia prima Scope 3
Servizi ausiliari	1406,83	3737,04	3106,53	0,00
Servizi generali	1406,83	3737,04	3106,53	0,00
Macchinari	1406,83	3737,04	3106,53	0,00
Pre-espansione	1406,83	3737,04	3106,53	0,00
Maturazione	1406,83	3737,04	3106,53	0,00
Espansione 2	1406,83	3737,04	3106,53	0,00
Reparto blocchi	1406,83	3737,04	3106,53	0,00
Reparto stampaggio	1406,83	3737,04	3106,53	0,00
Finitura	1406,83	3737,04	3106,53	0,00
Macinazione per recupero	1406,83	3737,04	3106,53	0,00
Confezionamento	1406,83	3737,04	3106,53	0,00

Un discorso simile viene realizzato per tutti i diversi attori della Supply Chain, limitandosi però al calcolo delle emissioni legate all'energia autoprodotta e all'energia elettrica e termica acquistate esternamente, come mostrato in Tabella 9.

Tabella 9. Esempio valutazione ambientale ipotetico attore 1

Tipologia Energia	energia autoprodotta Scope 1	energia elettrica acquistata Scope 2	energia termica acquistata Scope 2
1 Fase	0,00	0,00	0,00
2 Fase	0,00	0,00	0,00
3 Fase	0,00	0,00	0,00
4 Fase	0,00	0,00	0,00
5 Fase	0,00	0,00	0,00

#### 4.3.5 Modulo Indici di Valutazione Energetica

Il modulo relativo agli indici di valutazione energetica sfrutta gli input definiti nel paragrafo precedente per calcolare tutti gli indicatori definiti nel capitolo della metodologia, ovvero Cost Index (Tabella 10), Muda Index (Tabella 11) e IPE (Tabella 12), per tutte le fasi del processo produttivo, in base ai consumi definiti con la scelta del livello di dettaglio dell'analisi. I primi due indici vengono determinati in maniera distinta per energia elettrica o gas utilizzata da ogni fase e poi successivamente sommati per ottenere il valore finale per ogni attività, mentre l'IPE viene valutato direttamente come consumo energetico totale. Diversamente dal precedente modulo, in questo caso è stata ipotizzata l'estensione all'intera catena produttiva solamente per il calcolo dell'IPE.

Tabella 10. Esempio calcolo Cost Index

<b>Fasi</b>	Cost Index Totale	Cost Index Energia Elettrica	Cost Index Gas
Servizi ausiliari	447088,37	15197,13	431891,2
Servizi generali	447088,37	15197,13	431891,2
Macchinari	447088,37	15197,13	431891,2
Pre-espansione	447088,37	15197,13	431891,2
Maturazione	447088,37	15197,13	431891,2
Espansione 2	447088,37	15197,13	431891,2
Reparto blocchi	447088,37	15197,13	431891,2
Reparto stampaggio	447088,37	15197,13	431891,2
Finitura	447088,37	15197,13	431891,2
Macinazione per recupero	447088,37	15197,13	431891,2
Confezionamento	447088,37	15197,13	431891,2
<b>Totale</b>	4917972,07		

Tabella 11. Esempio calcolo Muda Index

<b>Fasi</b>	Muda Index Totale	Muda Index Energia Elettrica	Muda Index Gas
Servizi ausiliari	5221,769	966,9942	4254,774
Servizi generali	5221,769	966,9942	4254,774
Macchinari	7832,653	1450,491	6382,162
Pre-espansione	5221,769	966,9942	4254,774
Maturazione	3094,381	966,9942	2127,387
Espansione 2	5221,769	966,9942	4254,774
Reparto blocchi	6092,063	1128,16	4963,903
Reparto stampaggio	6527,211	1208,743	5318,468
Finitura	7832,653	1450,491	6382,162
Macinazione per recupero	8354,83	1547,191	6807,639
Confezionamento	7832,653	1450,491	6382,162
<b>Totale</b>	68453,52		

Tabella 12. Esempio calcolo IPE

<b>Fasi</b>	<b>IPE consumo energetico totale</b>
Servizi ausiliari	0
Servizi generali	0
Macchinari	0
Pre-espansione	0,0005424
Maturazione	0,0005424
Espansione 2	0,0005424
Reparto blocchi	0,0010305
Reparto stampaggio	0,0008291
Finitura	0,0005424
Macinazione per recupero	0,0036067
Confezionamento	0,0005424
<b>Totale</b>	<b>0,0081782</b>

## 4.4 Caso Studio

Arrivati a questo punto della trattazione, risulta molto efficace inserire alcuni casi studio per mostrare in maniera ancora più evidente la semplicità e l'efficacia dello strumento ideato e sviluppato. In particolare, verranno analizzate due situazioni di aziende produttrici di pannelli in EPS in base ai dati presi dalla letteratura: da questa, infatti, sono stati estratti i consumi necessari a realizzare un'analisi focalizzandosi su un livello di dettaglio basso e medio, concentrandosi sul singolo plant produttivo.

### 4.4.1 Caso studio: livello di dettaglio basso

Nel primo caso studio realizzato, verrà analizzata una situazione caratterizzata da un livello di dettaglio basso, dove quindi vengono definite solo le percentuali generali riguardo la distinzione tra energia elettrica e termica, acquistata e autoprodotta. Mancando alcuni dati, non sarà possibile calcolare tutte le varie quantità e di seguito verranno riportate le tabelle con i

principali risultati ottenuti in base al livello delle informazioni disponibili. Per quanto riguarda l'analisi energetica, di seguito nella Tabella 13 vengono riportati i dati generali legati al consumo in un intervallo temporale pari ad un anno, mentre la produzione annua, utilizzata per il calcolo dell'IPE e delle emissioni dello Scope 3, è pari a 1330 tonnellate/anno.

Tabella 13. Parametri generali – caso studio 1

<b>PARAMETRI GENERALI</b>				
<b>consumo energetico</b>	UM			
<b>valore totale</b>	kWh	7934804,00		
<b>energia termica</b>	%	86,59	kWh	6871003,87
<b>energia elettrica</b>	%	13,41	kWh	1063799,97
<b>energia autoprodotta</b>	%	2,68	kWh	212906,66
<b>energia acquistata</b>	%	97,32	kWh	7721897,34

A questo punto vengono riportate tutte le considerazioni ottenute calcolando i tre diversi indicatori, distinti per le fasi effettivamente presenti nel particolare contesto (che sono in numero inferiore rispetto a quelle ipotizzate nello strumento). In particolare, si può notare come l'IPE, essendo disponibile solo il dato relativo alla produzione annua in tonnellate, può essere calcolato dividendo il consumo totale del plant produttivo per la produzione totale annua.

Tabella 14. Calcolo del Cost Index

<b>Fasi</b>	<b>Cost Index Totale</b>	<b>Cost Index Energia Elettrica</b>	<b>Cost Index Gas</b>
Servizi ausiliari	447088,37	15197,13	431891,2
Servizi generali	447088,37	15197,13	431891,2
Pre-espansione	447088,37	15197,13	431891,2
Maturazione	447088,37	15197,13	431891,2
Espansione 2	447088,37	15197,13	431891,2
Finitura	447088,37	15197,13	431891,2
Confezionamento	447088,37	15197,13	431891,2
<b>Totale</b>	<b>3129618,6</b>		

Tabella 15. Calcolo del Muda Index

<b>Fasi</b>	Muda Index Totale	Muda Index Energia Elettrica	Muda Index Gas
Servizi ausiliari	82064,49	15197,13	66867,36
Servizi generali	82064,49	15197,13	66867,36
Pre-espansione	82064,49	15197,13	66867,36
Maturazione	48630,81	15197,13	33433,68
Espansione 2	82064,49	15197,13	66867,36
Finitura	123096,7	22795,69	100301
Confezionamento	123096,7	22795,69	100301
<b>Totale</b>	<b>623082,2</b>		

Tabella 16. Calcolo dell'IPE

	IPE consumo energetico totale [kWh/t]
<b>Totale</b>	<b>5966</b>

Essendo stata impostata una percentuale standard sia per il consumo energetico che per la divisione tra energia elettrica e termica in tutte le fasi, i risultati ottenuti con l'analisi energetica risultano essere identici per ogni sottoprocesso considerato. Questo compromette il livello di efficacia dell'analisi, che infatti ci permette di individuare con più fatica quali sono le attività maggiormente energivore e con un peso maggiore in termini di consumi legati ad attività a Non Valore Aggiunto o di Waste e che quindi richiederebbero una più urgente implementazione di azioni correttive.

Per quanto riguarda l'analisi ambientale, con i dati disponibili è stato possibile eseguire e calcolare soltanto il contributo associato alle emissioni delle categorie Scope 1, Scope 2 e Scope 3 espresse in kg CO2 equivalente come mostrato in Tabella 17. In particolare, lo Scope 3 è stato calcolato moltiplicando l'impatto unitario associato al polistirene espanso del dataset Ecoinvent v3.8 per la produzione totale annua. In questo caso si può notare come l'impatto maggiore sia associato proprio alla categoria dello Scope 3, a causa del fatto che il flusso di materiale è costituito esclusivamente da

polistirene, ovvero un materiale con un impatto ambientale abbastanza elevato, come evidenziato dall'impatto unitario piuttosto alto. A causa poi della maggior percentuale di energia acquistata rispetto ad autoprodotta risulta anche una grande differenza tra gli impatti della categoria Scope 2 rispetto allo Scope 1.

Tabella 17. Emissioni calcolate secondo la CCF [kg CO2 eq.]

<b>PLANT PRODUTTIVO</b>			
	Scope 1	Scope 2	Scope 3
<b>Totale</b>	9847,82	752867,65	4823744,55

#### 4.4.2 Caso studio: livello di dettaglio medio

Il secondo caso studio analizzato differisce nel tipo di informazioni presenti per l'analisi energetica e ambientale. Utilizzando infatti un livello di dettaglio medio, bisogna inserire in questo caso anche la distinzione percentuale delle diverse fasi che compongono il processo produttivo. In Tabella 18 sono indicati tutti i dati generali riguardo i consumi energetici annui, mentre la produzione totale è pari a 4253,159 tonnellate/anno. Le percentuali calcolate delle diverse fasi presenti nel ciclo di produzione sono indicate in Tabella 19.

Tabella 18. Parametri generali – caso studio 2

<b>PARAMETRI GENERALI</b>				
<b>consumo energetico</b>	UM			
<b>valore totale</b>	kWh	27885740,4		
<b>energia termica</b>	%	86,5	kWh	24121165,45
<b>energia elettrica</b>	%	13,5	kWh	3764574,954
<b>energia autoprodotta</b>	%	0,34	kWh	94811,51736
<b>energia acquistata</b>	%	99,66	kWh	27790928,88

Tabella 19. Percentuali di consumo associate ad ogni fase

<b>Processo produttivo</b>	<b>contributo sul totale</b>
<b>Fase</b>	<b>%</b>
<b>Intero plant</b>	
Servizi ausiliari	7,3
Servizi generali	0,4
Pre-espansione	29,5
Maturazione	0,4
Reparto stampaggio	64,1
Finitura	0,4
Frantumazione	0,2

Anche per questo scenario vengono calcolati i tre indicatori energetici per ogni fase del processo. L'IPE verrà sempre calcolato invece in forma generale di tutto il plant produttivo dato che i dati a disposizione non ci permettono di realizzare una suddivisione più approfondita. In Tabella 20, 21 e 22 vengono quindi riportati i risultati ottenuti; la maggior differenza rispetto al precedente caso studio risulta essere associata proprio ai diversi valori degli indicatori fase per fase, mentre prima erano risultati dei valori univoci per tutte le componenti del processo.

Tabella 20. Calcolo del Cost Index

<b>Fasi</b>	<b>Cost Index Totale</b>	<b>Cost Index Energia Elettrica</b>	<b>Cost Index Gas</b>
Servizi ausiliari	82999,78	29057,68	53942,1
Servizi generali	4119,52	1442,22	2677,31
Pre-espansione	333419,08	116727,8	216691,2
Maturazione	4581,66	1604,01	2977,65
Reparto stampaggio	724525,38	253651,6	470873,8
Finitura	4955,04	1734,73	3220,32
Macinazione per recupero	2123,61	743,46	1380,15
<b>Totale</b>	<b>1156724,1</b>		

Tabella 21. Calcolo del Muda Index

<b>Fasi</b>	Muda Index Totale	Muda Index Energia Elettrica	Muda Index Gas
Servizi ausiliari	37476,39	29057,68	8418,71
Servizi generali	1860,06	1442,22	417,84
Pre-espansione	150546,7	116727,8	33818,86
Maturazione	1836,37	1604,01	232,360
Reparto stampaggi	408925,7	317064,5	91861,22
Finitura	3355,98	2602,09	753,89
Macinazione per recupero	1534,18	1189,54	344,64
<b>Totale</b>	<b>605535,4</b>		

Tabella 22. Calcolo dell'IPE

	IPE consumo energetico totale [kWh/t]
<b>Totale</b>	<b>6556,5</b>

Si può quindi subito notare come in questo caso sia possibile identificare quali sono le attività del processo produttivo che risultano più critiche dal punto di vista sia del costo che del consumo associato al tipo di attività; osservando le Tabelle 20 e 21, le attività legate alla Pre-espansione e al Reparto stampaggio sono estremamente più rilevanti in termini di impatto legato sia al costo dell'energia necessaria sia al costo legato alla percentuale di attività NVA e W che compongono le due fasi analizzate. Saranno quindi queste che necessiteranno di azioni correttive da intraprendere più urgentemente per incrementare il livello di efficienza energetica dell'intero plant produttivo.

Riguardo l'analisi ambientale, il discorso risulta essere molto simile a quello fatto per il caso studio precedente. Anche qua infatti, il livello di informazioni presente in letteratura è estremamente limitato e quindi ci si limiterà al calcolo delle tre categorie di emissioni previste dalla Carbon Footprint, specificando sempre che lo Scope 3 sarà calcolato ipotizzando di considerare tutta la quantità annua prodotta in polistirene moltiplicato per il corrispondente impatto unitario. Stesse considerazioni possiamo fare per quanto riguarda i

risultati ottenuti: anche in questo scenario l’impatto è fortemente determinato soprattutto dallo Scope 3 sempre a causa del materiale utilizzato, ovvero il polistirene, e come nel caso studio 1, l’elevata percentuale di energia acquistata rispetto a quella prodotta fa sì che le emissioni ricondotte allo Scope 1 siano una percentuale estremamente ridotta rispetto quelle totali dell’impianto considerato.

Tabella 23. Calcolo emissioni secondo la CCF [kg CO2 eq.]

	Scope 1	Scope 2	Scope 3
<b>Totale</b>	7053,45	2782453,66	15425678,60

#### 4.5 Possibili sviluppi futuri dello strumento

Per quanto riguarda le possibili ulteriori funzionalità da incrementare, vengono fatte alcune considerazioni alla luce di quello che è lo stato attuale dello strumento (riferimento alla Figura 13).

- Sarà possibile realizzare lo scenario con un’azienda altamente automatizzata: in questa situazione si possono sfruttare numerosi dati operativi provenienti da sensori installati nelle varie stazioni e macchine che coinvolgono risorse, pianificazione, controllo, monitoraggio e misurazioni (sensori/dispositivi IoT, MES, ERP, ecc...), eliminando la necessità di inserire i dati manualmente.
- Si potrebbe inserire anche la fase del trasporto nell’analisi ambientale, con la necessità di specificare i km percorsi e definire un dataset di riferimento.
- La valutazione della circolarità potrebbe essere sviluppata individuando un metodo che permetta allo strumento, attraverso la valutazione dei flussi di materiale ed altre risorse, di stabilire quanti di questi possono essere riutilizzati e riciclati all’interno della catena produttiva e quanti invece no.
- Per ogni attività segnalata, potrebbero essere suggerire azioni correttive per ottimizzare l’efficienza energetica dei processi e migliorare l’impatto ambientale. Tra tutte le attività per ogni

sottocategoria individuata (principali, ausiliarie, generali), attraverso il calcolo dell'IPE di quelle più energivore (ad esempio con valore > 15-20% di assorbimento energetico rispetto al totale), potranno essere segnalate quelle con dei valori non coerenti con il confronto con i valori standard (ottenuti da letteratura o altri casi applicativi), come potrebbero essere anche segnalate le attività in cui si riscontra un valore di Muda Index % superiore all'80%. Queste attività potrebbero essere definite come particolarmente critiche e quindi avranno necessità di azioni correttive da intraprendere più urgentemente rispetto alle altre attività del processo in studio. Tra le attività ritenute critiche, verrà data maggiore precedenza all'intervento nei confronti delle attività W, idealmente da eliminare, successivamente alle NVA e in ultimo alle VA. Per il suggerimento di azioni correttive, queste potranno essere individuate attraverso una ricerca in letteratura o chiedendo direttamente alle aziende coinvolte.

- Eventualmente potrebbe essere interessante inserire un algoritmo di Machine Learning (ML) per ricordare le scelte storiche correttive effettuate dal cliente e farle diventare le prioritarie nel suggerimento (ad esempio, se in 7 casi su 10 è usata un'azione, quella allora andrà suggerita tra le prime).

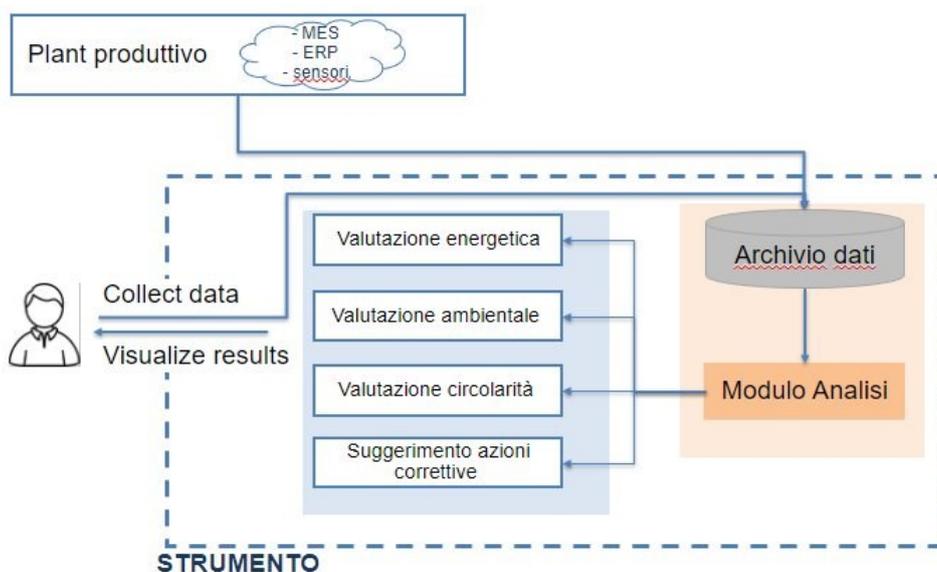


Figura 13. Possibile architettura futura dello strumento

## Capitolo 5: Conclusione

In questo lavoro di tesi è stato sviluppato un metodo innovativo e semplificato per supportare la valutazione e il miglioramento dell'efficienza energetica e dell'impatto ambientale nei processi industriali. In particolare, la metodologia, sviluppata all'interno del progetto Ricerca di Sistema OFFICIO, supporta l'analisi dei flussi energetici e di materiali, delle prestazioni energetiche e ambientali associate all'intero processo produttivo o all'intera Supply Chain, attraverso la definizione delle risorse consumate da tutte le fasi del processo e il calcolo di alcuni indici di prestazione energetica e ambientale che guidano l'utilizzatore nel visualizzare e analizzare i risultati ottenuti. Il metodo risulta applicabile a numerosi differenti contesti industriali ma in questo elaborato ci si è concentrati, come previsto dal progetto OFFICIO, sull'uso efficiente delle risorse per l'intera filiera OSC per la riqualificazione e l'isolamento termico degli edifici. Sulla base del metodo, si è proceduti allo sviluppo di uno strumento software che si occupa di monitorare l'efficienza energetica e ambientale del processo di produzione di pannelli in EPS e della sua filiera. Per definire il comportamento dello strumento, è stato realizzato un dimostratore Excel con il quale è stato illustrato il funzionamento applicato della metodologia, supportato da un mock-up in PowerPoint. Per validarne il funzionamento sono stati analizzati due casi studio con l'obiettivo di effettuare le valutazioni energetiche e ambientali mostrando esempi di due differenti modalità di utilizzo del sistema creato, definite in base al livello di dettaglio delle informazioni di partenza. Ciò che è risultato possibile osservare è quindi che la metodologia e lo strumento sviluppati presentano alcuni vantaggi rispetto agli strumenti già esistenti in termini di semplicità di utilizzo e immediatezza nel visualizzare il

rendimento della produzione, restituendo indici propri della filosofia Lean e valutazioni ambientali. Le aziende potranno beneficiare della visualizzazione di rendimenti energetici e ambientali, da cui identificare le principali criticità e definire strategie migliorative. L'utilizzo di tali strumenti, soprattutto in contesti aziendali medio-piccoli, determina un incremento di consapevolezza, sui consumi e gli impatti ambientali legati al processo, che costituisce il primo importante passo verso la riduzione delle inefficienze. Numerosi sono i possibili miglioramenti: l'acquisizione automatica dei dati attraverso sensoristica avanzata tipica dei contesti industriali altamente automatizzati; considerare anche la fase relativa al trasporto; implementare la funzionalità per l'analisi della circolarità; inserire un modulo per il suggerimento di azioni correttive, supportato da algoritmi di Machine Learning. Tali sviluppi potranno migliorarne le funzionalità oltre al livello di dettaglio con cui viene eseguita l'analisi allo stato attuale.

## Capitolo 6: Bibliografia

- [1] Osservatorio Officio, “<https://progetto-officio.it/>,” <https://progetto-officio.it/>.
- [2] A. Papetti, R. Menghi, G. Di Domizio, M. Germani, and M. Marconi, “Resources value mapping: A method to assess the resource efficiency of manufacturing systems,” *Appl Energy*, vol. 249, pp. 326–342, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.04.158.
- [3] European Environment Agency, “La situazione attuale: l’energia alla base delle ambizioni europee sul clima.”
- [4] Kriebel D. Lowell center for sustainable production, “Approaches to Sustainable Development: The Public University in the Regional Economy.”
- [5] R. Menghi, “A Method and Tool to improve the energy efficiency of production systems in the context of Smart Manufacturing,” 2019.
- [6] geoside.com, “ISO 50001: LO STANDARD INTERNAZIONALE PER LA GESTIONE DELL’ENERGIA.”
- [7] M. Andrei, P. Thollander, and A. Sannö, “Knowledge demands for energy management in manufacturing industry - A systematic literature review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 159. Elsevier Ltd, May 01, 2022. doi: 10.1016/j.rser.2022.112168.
- [8] aplanet.org, “Cos’è la sostenibilità: il concetto di sviluppo sostenibile.”

- [9] climatepartner.com, “The complete guide to understanding scope 1, 2, and 3 emissions.”
- [10] Wikipedia.org, “Carbon footprint.”
- [11] insic.it, “Cos’è la Carbon Footprint e perché è importante misurarla.”
- [12] T. Ohno, *Toyota Production System*. Productivity Press, 1988. doi: 10.4324/9780429273018.
- [13] S. Messina, “Elaborazione degli indici di prestazione energetica per la produzione di sistemi di isolamento termico a cappotto dell’involucro edilizio,” Università Sapienza, Roma, 2023.

# Ringraziamenti

Desidero ringraziare l'Università Politecnica delle Marche per avermi offerto la possibilità di realizzare questa esperienza di ricerca accademica a coronazione di un percorso di crescita come persona e come futuro ingegnere. Inoltre, desidero ringraziare il professore Michele Germani per avermi dato la possibilità di collaborare con il suo gruppo di ricerca, la professoressa Marta Rossi per avermi supportato e coordinato durante tutta l'attività in veste di mia tutor accademica e infine la dottoressa Miriana Mundo, con la quale ho collaborato attivamente per lo sviluppo di questo lavoro di tesi e che mi ha accompagnato durante questi mesi di collaborazione al suo fianco.