



Ricerca di Sistema elettrico

Stato dell'arte e definizione di una metodologia per la determinazione dei consumi energetici ideali per unità di prodotto

Andrea Luigi Facci, Mauro Scungio, Simone Salvatori

Report RdS/PTR2019/079

STATO DELL'ARTE E DEFINIZIONE DI UNA METODOLOGIA PER LA DETERMINAZIONE DEI CONSUMI ENERGETICI
IDEALI PER UNITÀ DI PRODOTTO

Andrea Luigi Facci, Mauro Scungio, Simone Salvatori (CINTEST)

Dicembre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: N. 1 - Tecnologie

Progetto: 1.6 – Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali”

Work package: 4 – Definizione di best practices e di indicatori di performance per interventi di efficienza energetica

Linea di attività: LA 4.10 - Stato dell'arte e definizione di una metodologia per la determinazione dei consumi energetici ideali per unità di prodotto

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work package: Fabrizio Martini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Determinazione analitica dei consumi energetici ideali per unità di prodotto dei principali settori energivori italiani”*

Responsabile scientifico ENEA: Fabrizio Martini

Responsabile scientifico CINTEST: Andrea Luigi Facci

Indice

SOMMARIO.....	4
INTRODUZIONE.....	5
1 BENCHMARKING ENERGETICO ED INDICATORI DI PRESTAZIONE ENERGETICA.....	7
1.1 INTRODUZIONE AL BENCHMARK ENERGETICO	9
1.2 INDICATORI DI PRESTAZIONE	11
1.3 INDICATORI DI PRESTAZIONE ENERGETICA	13
1.3.1 <i>Metodo</i>	13
1.3.2 <i>Risultati</i>	15
1.3.3 <i>Discussione dei risultati</i>	18
<i>Analisi di dettaglio dei risultati</i>	26
<i>Punti di forza e criticità</i>	28
1.4 DEFINIZIONE DEGLI INDICATORI IDEALI E OPERATIVI	30
1.4.1 <i>Indicatori di prestazione ideale</i>	31
1.4.2 <i>Indicatori di prestazione operativi</i>	34
1.5 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	41
2 SVILUPPO INDICATORI DI PRESTAZIONE ENERGETICA.....	42
2.1 INTRODUZIONE	42
2.2 METODO DI APPLICAZIONE DEGLI INDICATORI.....	43
2.2.1 <i>Analisi e scelta dei vettori energetici</i>	45
2.2.2 <i>Presa di contatto con l'azienda</i>	45
2.2.3 <i>Definizione dei confini dell'analisi</i>	46
2.2.4 <i>Scelta degli indicatori</i>	48
2.2.5 <i>Raccolta dei dati per calcolo indicatori</i>	49
2.2.6 <i>Confronto dei risultati e proposte di miglioramento</i>	49
2.3 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	50
3 CONCLUSIONI DEL LAVORO	51
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	52
5 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	56

Sommario

Il settore industriale è responsabile di una quota molto significativa dei consumi energetici mondiali. Per questo numerose strategie e metodologie sono state sviluppate per il controllo e la riduzione dei consumi energetici.

L'utilizzo degli indicatori di prestazione energetica è riconosciuto essere uno degli strumenti più efficaci per il monitoraggio dei consumi e la proposizione di strategie per la riduzione degli stessi.

In questo lavoro è stata approfondita la tematica degli strumenti di analisi delle prestazioni energetiche. La ricerca sugli indicatori di prestazione ha portato alla definizione dello stato dell'arte sull'utilizzo di questi in ambito industriale e per quanto riguarda la loro applicazione all'interno dell'analisi di benchmark, con maggiore attenzione sui metodi ed i modelli utilizzabili per i siti industriali.

L'analisi bibliografica ha portato alla caratterizzazione delle numerose metodologie presenti in letteratura e alla discussione dei pregi e dei difetti delle metodologie stesse. Nonostante la grande varietà di documenti disponibili, le criticità dei metodi sono comuni e risiedono nella disponibilità dei dati per l'analisi e nelle difficoltà di comparazione di settori industriali differenti.

A partire dai risultati dell'analisi della letteratura, è stato proposto un metodo per l'analisi delle prestazioni attraverso gli indici di prestazione ideali ed operativi. Tale metodo vuole aiutare ad identificare il livello di prestazione del sistema in esame e fornire gli strumenti necessari per indagare sulle cause dei consumi energetici. Tali strumenti sono utilizzabili per il supporto alle decisioni in materia di efficienza energetica e consentono la definizione di interventi per l'efficientamento delle procedure operative.

Introduzione

Il lavoro presentato in questa relazione è relativo ad una specifica linea di attività per il 2019 di un progetto di ricerca triennale inquadrato nel Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021, che vede la collaborazione tra l'Unità Tecnica Efficienza Energetica dell'ENEA e il Centro per l'Innovazione Tecnologica e lo Sviluppo del Territorio (CINTEST) a cui afferiscono l'Università degli studi della Tuscia e l'Università di Roma "Tor Vergata".

Il Work Package nell'ambito del quale si inquadra il presente progetto ha come macro-obiettivo quello di contribuire all'efficientamento energetico di diversi settori industriali italiani attraverso attività di ricerca finalizzate allo sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni aziendali e realizzate grazie alla collaborazione di ENEA, diverse Università italiane e con il coinvolgimento di diverse aziende ed associazioni di categoria.

Lo specifico progetto nasce dalle analisi dei risultati dei progetti di ricerca portati avanti da ENEA e terminati nei periodi precedenti che hanno portato alla definizione di indicatori di prestazione energetica e alla loro valutazione per oltre 15.000 siti in Italia attraverso i dati di consumo raccolti sul campo attraverso la campagna di diagnosi energetiche del 2015 ai sensi del D.Lgs 102/2014. L'analisi di questi dati ha consentito il calcolo di valori medi di prestazione utili a caratterizzare i singoli settori e fornire una rappresentazione affidabile del settore produttivo italiano. Nel quadriennio 2015-2018 un significativo lavoro di analisi degli indicatori e standardizzazione delle modalità di raccolta dei dati è stato effettuato allo scopo di rendere ancora più affidabili i risultati ottenibili dall'approccio proposto.

Il lavoro di ricerca della presente linea di attività si inquadra quindi in un più ampio progetto triennale che ha l'obiettivo finale di sviluppare degli indicatori che possano essere assunti come riferimento di eccellenza in termini di prestazione energetica, e che possano essere applicati dalle aziende all'interno di specifici settori produttivi per poter confrontare le proprie prestazioni, valutare margini di miglioramento e definire adeguate strategie di efficientamento energetico.

Gli indicatori di riferimento ricercati, affiancati agli indicatori di prestazione valutati con i dati raccolti dalle diagnosi del 2019, consentiranno inoltre di avere un quadro di riferimento delle prestazioni energetiche di alcuni importanti settori produttivi italiani.

Gli obiettivi dell'attività di ricerca prevedono:

- Lo studio dello stato dell'arte per quanto riguarda l'utilizzo degli indicatori di prestazione energetica e la determinazione analitica dei consumi energetici industriali;
- Lo sviluppo di un metodo per la definizione indicatori di prestazione di riferimento specifici, utili per stabilire le prestazioni energetiche di ciascun settore industriale;
- Lo sviluppo di indicatori di prestazione energetica di riferimento specifici per i principali settori produttivi, stabiliti in collaborazione con ENEA;

Nel suo sviluppo integrale, l'attività vuole quindi fornire alle aziende, degli indicatori di prestazione con cui poter confrontare le proprie prestazioni ed utili per sviluppare una strategia volta al miglioramento dell'efficienza energetica.

La linea di attività relativa al primo anno (2019), descritta in questo rapporto, ha visto il gruppo impegnato nella ricerca degli strumenti e delle metodologie utilizzate nella letteratura tecnico-scientifica in modo da porre delle basi per un successivo sviluppo di strumenti di analisi di prestazione e di benchmark energetico. Tale lavoro mira a stabilire una stretta sinergia con il mondo aziendale cercando di mantenere viva la collaborazione che storicamente gli enti di ricerca hanno instaurato con il settore industriale italiano. La collaborazione consentirà di rendere fruibile al settore industriale i metodi e gli strumenti sviluppati, nel tentativo di migliorare le prestazioni energetiche dei processi industriali.

Un lavoro di tale complessità deve essere strutturato in varie fasi, ciascuna con un differente obiettivo parziale. Per questo motivo l'attività della presente annualità, riguardante la definizione degli indicatori di prestazione di riferimento, è stata suddivisa in due fasi:

- definizione dello stato dell'arte sulla tematica degli indicatori di prestazione e di benchmark energetico attraverso la consultazione di articoli scientifici e review bibliografiche;
- proposizione di metodologie e strumenti per la creazione di indicatori di prestazione energetica di riferimento utili per confrontare le prestazioni all'interno dello stesso settore industriale.

L'analisi dello stato dell'arte serve a dimostrare l'interesse della comunità scientifica verso la proposizione di indici di prestazione energetica. Questa parte ha consentito di valutare punti di forza e criticità dei metodi proposti e sviluppare una appropriata conoscenza delle metodologie che possono essere applicate.

Il metodo proposto nella seconda parte potrà essere utilizzato per la caratterizzazione delle prestazioni dei settori industriali italiani.

1 Benchmarking energetico ed indicatori di Prestazione Energetica

Il settore industriale è, nel mondo, il più importante utilizzatore di energia ed anche il più grande produttore di gas serra. Si stima che la produzione di gas serra dovuta all'industria si attesti oltre il 30% del totale. L'aumento dell'immissione dei gas clima alteranti nell'atmosfera sta rapidamente condizionando le attività economiche sia dei paesi più industrializzati che di quelli che si stanno affacciando nel mercato globale. La necessità di mitigare l'impatto ambientale dei processi produttivi rende l'efficienza energetica un fattore chiave per il successo e per la sostenibilità della produzione industriale. Di conseguenza, l'interesse della comunità scientifica verso la gestione dell'energia è cresciuto considerevolmente, portando alla definizione di numerosi modelli energetici per l'industria e numerose analisi dei sistemi di produzione indirizzate al calcolo delle emissioni, con l'obiettivo della riduzione delle stesse.

Ottenere una corretta gestione dell'energia richiede attente valutazioni del processo in oggetto attraverso approcci il più possibile multidisciplinari che coinvolgono differenti funzioni aziendali come la direzione, l'assicurazione della qualità, il reparto produzione e l'ufficio tecnico. Per i motivi descritti, la ricerca scientifica si propone di sviluppare metodi e strumenti per il supporto alla valutazione energetica e per aiutare coloro che sono impegnati nella gestione dei consumi di energia ad implementare le prestazioni energetiche del sistema in esame.

Spesso, gli studi sono volti alla modellizzazione dei sistemi produttivi ed all'analisi della possibile influenza delle pratiche di efficientamento energetico. I metodi che vengono proposti, solitamente, forniscono un supporto per l'analisi delle prestazioni e per la definizione della corretta strategia decisionale.

Tutti i metodi e gli strumenti di valutazione identificati sono essenziali per l'attività di gestione dell'energia in quanto consentono ai decisori di identificare opportunità di miglioramento e di monitorare gli effetti delle loro decisioni sull'uso dell'energia [1]. L'utilizzo degli strumenti può, inoltre, aiutare le industrie a migliorare le proprie conoscenze sulla tematica dell'efficienza energetica ed a superare le barriere organizzative dell'attuazione delle misure di riduzione dell'energia [2].

Generalmente l'adozione di strumenti di monitoraggio e analisi del consumo dei processi produttivi aziendali rappresentano il primo passo verso l'aumento dell'efficienza energetica [3], [4].

La misura ed il monitoraggio dei consumi energetici, unitamente al confronto delle prestazioni tramite i modelli di prestazione risultano essere, quindi, strumenti fondamentali per l'ottimale gestione dell'energia tanto che la norma ISO 50001:2018 sui sistemi di gestione dell'energia ha al suo interno numerose sezioni che illustrano le metodologie di misura delle prestazioni [5].

La corretta implementazione dei Sistemi di Gestione dell'Energia non comporta solamente l'attuazione di misure volte al monitoraggio dei consumi ma prevede anche l'implementazione di pratiche gestionali che siano basate sul coinvolgimento di tutto il personale e sulla convinzione della necessità di un miglioramento continuo [6], [7]. Inoltre, l'utilizzo sistematico di pratiche ben definite porta ad una gestione organica e ottimale dell'energia con l'unico obiettivo di migliorare tutti gli aspetti energetici dei sistemi [8].

La gestione dell'energia è quindi un complesso sistema di pratiche che sono sempre più diffuse nel tessuto industriale e che richiedono, per la valutazione della loro efficacia, di essere confrontate attraverso degli opportuni indicatori di prestazione e relativi valori di riferimento.

La misurazione delle prestazioni energetiche tramite indicatori di prestazione e l'analisi di benchmark sono, sicuramente, fattori chiave per il buon funzionamento della produzione industriale e rappresentano le prime attività utili per la caratterizzazione dei consumi e soprattutto per la definizione delle opportunità di efficientamento energetico.

L'analisi delle prestazioni energetiche e di benchmark per essere efficaci e funzionali al loro obiettivo, ovvero il miglioramento dell'efficienza energetica, hanno bisogno di modelli che consentano il confronto tra le prestazioni del sistema in esame con gli altri appartenenti allo stesso settore industriale.

Il livello di benchmark a cui le prestazioni dovrebbero tendere può essere definito in numerose maniere tuttavia si possono distinguere 2 approcci: descrittivo e ingegneristico/economico. Il primo utilizza modelli

fisici-parametrici frutto di analisi statistiche per caratterizzare il funzionamento, e quindi le prestazioni del sistema in esame. Il secondo rappresenta i processi e le tecnologie attraverso l'analisi delle migliori pratiche. La differenza tra i due approcci è sostanziale. I modelli statistici si basano sull'analisi di una pratica "media", ossia frutto dell'analisi statistica delle prestazioni di un insieme di campioni in esame. I modelli ingegneristici cercano di caratterizzare il livello identificato come best practice ossia il più alto livello di prestazione ottenibile dall'uso di una determinata tecnologia.

L'utilizzo del livello indicato dalle best practice è importante poiché, nella pratica industriale, sono numerose le tecnologie e le metodologie che consentono di ottenere risultati simili con livelli di prestazione assai differenti. A livello intuitivo, le differenze tra media e best practice potrebbero essere osservate negli intervalli di prestazioni di specifiche attrezzature o differenze di prestazioni a livello di sistema tra i vari impianti appartenenti ad un settore. Più nel dettaglio, le variazioni tra le prestazioni osservate possono esistere per innumerevoli ragioni, comprese quelle basate su decisioni economiche, ad esempio il costo dell'energia, e quelle sul livello di servizio garantito, in termini di qualità di produzione o requisiti del servizio energetico.

Difficilmente il confronto tra livello di prestazione garantito dalle best practice e quello della pratica media viene effettuato su sistemi estesi con numerose variabili. La motivazione risiede nella difficoltà di elaborare modelli teorici che considerino sistemi produttivi troppo estesi.

I modelli statistici consentono di "allargare" il confronto prendendo in considerazione interi sistemi o processi produttivi poiché solitamente questo tipo di approccio, basandosi su dati aggregati, riesce a valutare le prestazioni di sistemi complessi, al limite anche di interi settori, di cui sarebbe impossibile caratterizzare la migliore pratica. Tuttavia, il ricorso all'analisi di benchmark a partire dalla prestazione media non ha portato sempre alla perfetta caratterizzazione del sistema. Questo è dovuto principalmente al fatto che la misura della distanza dall'indicatore medio non è una pratica che può portare al miglioramento dell'efficienza rispetto alla misura della distanza rispetto alla best practice. Quindi, nella pratica risulta più utile un indicatore che certifichi la vicinanza (o la lontananza) delle prestazioni reali rispetto a quelle del massimo raggiungibile.

In questo modo l'azienda ha un'indicazione chiara se cercare più da vicino un'opportunità specifica per ridurre il consumo di energia.

L'utilizzo di metodologie basate sul calcolo e sul confronto di indicatori di prestazione ha svariati obiettivi principali [9]. Il primo di questi è sicuramente legato all'estrazione delle informazioni riguardo la prestazione del sistema; gli indicatori consentono di tenere in considerazione solo alcuni aspetti energetici limitando l'ambito di riferimento. Il secondo obiettivo è quello di fornire una rappresentazione accurata delle prestazioni del sistema; definire un insieme di indicatori consente di valutare numerosi aspetti che se considerati nella loro totalità permettono di definire un quadro generale della situazione energetica e rendere possibile l'identificazione delle opportunità di efficientamento. L'ultimo obiettivo riguarda la definizione degli obiettivi di efficientamento. Gli indicatori di prestazione possono essere utilizzati come strumento di monitoraggio delle prestazioni nel tempo e fornire informazioni utili sull'efficacia delle misure di efficientamento messe in atto.

L'obiettivo del presente lavoro consta nella definizione di una metodologia che porti all'analisi di benchmark energetico di riferimento, utile per evidenziare i consumi energetici e le opportunità di efficientamento all'interno dei settori industriali più rappresentativi.

Tali indicatori terranno in considerazione il funzionamento teorico dei sistemi che rappresenta il livello raggiunto dalle best practices ma potranno anche essere caratterizzati da alcuni aspetti legati al reale funzionamento che possono quindi modificare sostanzialmente il livello di prestazione del sistema.

Prima di poter sviluppare una strategia per la definizione di indicatori di prestazione di riferimento, l'attività di ricerca ha visto una revisione attenta dei contributi presenti nella letteratura scientifica. In questo modo

è stato possibile caratterizzare i vantaggi e gli svantaggi di ciascun approccio e definire alcune regole per la definizione di indicatori di prestazione energetica di riferimento.

1.1 *Introduzione al benchmark energetico*

Il benchmarking energetico è universalmente riconosciuto essere una delle metodologie più efficaci per migliorare le prestazioni e quindi l'efficienza energetica [10]. In generale, il benchmarking energetico consente di valutare le prestazioni energetiche di un determinato settore industriale, di un impianto industriale o di un sottosistema rispetto a un riferimento indicato dalle migliori pratiche conosciute [11].

Questo significa che tutte le organizzazioni che vogliono valutare le proprie prestazioni, in termini di consumi energetici o in termini produttivi, possono fare riferimento al livello indicato dalle organizzazioni afferenti allo stesso settore. Quindi, il benchmark rappresenta un valido riferimento per l'individuazione di una strategia indirizzata al miglioramento dell'efficienza energetica, caratterizzando quelli che sono i margini di miglioramento possibili [12].

L'applicazione di un'analisi di benchmark richiede di avere a disposizione un set di indicatori in grado di caratterizzare l'efficienza di un determinato sistema e su cui basare l'analisi stessa. Gli indicatori di prestazione si basano sull'utilizzo di dati di funzionamento che richiederebbero l'installazione di sistemi di misurazione delle prestazioni di un certo numero di campioni per effettuare il confronto. La scelta del metodo con cui effettuare l'analisi dipende in larga parte dal tipo di dati disponibili [13].

Tutte queste caratteristiche hanno portato ad una grande varietà di analisi e quindi alla produzione di un gran numero di documenti scientifici in cui di volta in volta si affronta l'analisi di benchmark con un approccio differente. In alcuni casi il benchmarking energetico è stato eseguito su un intero settore industriale, analizzando il consumo di energia tramite la misurazione della produzione di CO₂ [14], ad es. sulla base di dati provenienti da imprese appartenenti al settore della lavorazione dei minerali o del cemento [15], [16].

Esistono anche numerosi esempi in cui l'analisi è stata sviluppata sul confronto di sistemi singoli o particolari installazioni. In [17] ad esempio, si è affrontato l'argomento del consumo di energia per il servizio di trattamento delle acque reflue, in [18] sono stati trattati i sistemi di ventilazione per uso civile, in [19] i consumi generali dei centri commerciali, in [20], [21] le prestazioni dei mezzi di trasporto e in [22] il consumo delle centrali termiche.

In ciascuno degli esempi riportati è stato utilizzato un metodo differente per condurre l'analisi di benchmark. In generale le metodologie e le procedure per effettuare l'analisi variano a seconda del tipo di dati a disposizione e del settore di appartenenza. La letteratura scientifica offre una vasta gamma di metodi che possono essere raggruppati come descritto di seguito:

1. Metodi basati sulla normalizzazione. Questo approccio è di gran lunga il più utilizzato nella pratica industriale grazie alla sua semplicità di implementazione e all'immediata interpretazione dei risultati. Il metodo consiste nella valutazione dell'efficienza energetica del sito in esame attraverso il semplice confronto degli indicatori di prestazione. In molti casi il confronto avviene attraverso semplici rapporti tra indicatori.

In questo approccio gli indicatori sono ottenuti normalizzando il consumo di energia in base a un determinato livello di produzione o attività. Il consumo di energia viene calcolato facendo riferimento al volume dei prodotti trasformati, al numero di ore di lavorazione ecc. Tali dati sono spesso facilmente disponibili e consentono di eseguire semplici confronti tra campioni.

Purtroppo, la semplicità di calcolo e di confronto degli indicatori porta ad alcuni aspetti che devono essere considerati con attenzione nell'analisi dei dati.

Gli indicatori semplici presentano anche alcuni inconvenienti causati dalla rappresentazione eccessivamente semplicistica del sistema. La prima fonte di errore è dovuta alla convinzione, spesso erronea, che le prestazioni di impianti piccoli e grandi dimensioni possano essere confrontati assumendo una relazione lineare tra input e output. Nella realtà, gli impianti di grandi dimensioni possono avere rendimenti, e in generale caratteristiche di funzionamento, completamente diversi da quelli di piccole dimensioni. Questo comporta stime errate per quanto riguarda le prestazioni e le possibilità di migliorare l'efficienza energetica. La seconda causa di errore è data dall'attitudine di utilizzare una sola metrica per confrontare l'intera popolazione senza considerare le diverse caratteristiche dei processi industriali. I processi industriali sono complesse sequenze di operazioni che coinvolgono macchine e personale, ridurre il loro funzionamento ad un solo indicatore può portare a grossi errori nella stima delle prestazioni.

2. Analisi di frontiera. Questo metodo utilizza un profilo (una frontiera appunto) per definire la prestazione media o migliore per un determinato insieme di input (ovvero dati operativi e di progettazione) [23]. La letteratura scientifica raccoglie 2 tipi di approccio: la regressione lineare e analisi stocastica delle frontiere [24]. Per definire la frontiera, viene sviluppato un modello di regressione lineare utilizzando dati sull'uso di energia o indicatori di prestazione. Il modello di regressione lineare può essere facilmente descritto attraverso la formula:

$$E = \alpha + \beta Y + \epsilon_i$$

dove E rappresenta il consumo di energia, Y è il dato operativo o di progetto, β il coefficiente angolare ed ϵ_i è il termine di errore che definisce l'inefficienza relativa. La retta di regressione rappresenta il livello di efficienza media. L'analisi di benchmark viene basata sulla distribuzione dei residui del modello di regressione. Il residuo è la differenza tra il consumo di energia effettivo e quello previsto (rappresentato dalla retta di regressione). Pertanto, i residui sono trattati come misure di inefficacia. Residuo negativo significa che il sistema consuma meno energia di un sistema simile con le stesse caratteristiche. Lo strumento di benchmarking basato sulla regressione è stato applicato da Energy Star in [25]. Questo approccio presenta alcuni inconvenienti. Il primo è rappresentato dalla necessità di un database di grandi dimensioni per ottenere risultati affidabili. Il secondo è causato dalla sensibilità della regressione alla forma funzionale.

L'analisi stocastica di frontiera considera la deviazione dalla frontiera di efficienza come due termini distinti, separando le componenti di errore dalle componenti di inefficienza. L'analisi di frontiera porta potenzialmente a misure più accurate di efficienza relativa perché considera separatamente le distribuzioni dell'inefficienza e gli errori. L'errore viene considerato come una variabile e la stima della sua distribuzione (per raggiungere una robustezza sufficiente) richiede la disponibilità di un database di grandi dimensioni.

3. Metodi di programmazione. Questi metodi si basano sull'approccio di frontiera ma applicano metodi di ottimizzazione, basati sui dati raccolti, per definire un profilo utile per un successivo confronto. Questo approccio offre una migliore definizione di frontiera rispetto ai modelli parametrici. In effetti, la forma funzionale della frontiera può essere modificata aggiungendo nuovi dati. In questo modo viene minimizzata la possibilità di definire un modello di frontiera sbagliato. Questo approccio presenta alcuni vantaggi. La valutazione di efficienza tende ad essere sensibile alla scelta delle variabili di input e output; la scelta di variabili non rappresentative possono portare a una definizione errata della frontiera e a risultati errati. Le variabili dovrebbero, per quanto possibile, riflettere gli aspetti principali dell'uso delle risorse nell'attività interessata. Se non fossero scelte accuratamente le variabili, l'indicatore di prestazione non rappresenterebbe necessariamente le prestazioni dell'organizzazione.

La scelta delle tecniche di benchmarking dipende, quindi, in parte dalla qualità e dalla quantità di dati disponibili e in parte dall'obiettivo delle valutazioni e, in generale, può avere un impatto decisivo sulla determinazione dei risultati.

1.2 Indicatori di prestazione

Le prestazioni di un'azienda appartenente al settore industriale sono molto complesse da monitorare a causa della varietà di apparecchiature e processi che costituiscono l'attività produttiva. Per ottenere buone prestazioni, l'azienda dovrebbe cercare di mantenere alto il livello di prestazione ogni singola lavorazione cercando di limitare, o addirittura eliminare, gli sprechi.

L'utilizzo degli indicatori di prestazione è un ottimo metodo per tenere sotto controllo le prestazioni del sistema.

Gli indicatori possono fornire informazioni sulle prestazioni in diversi ambiti come energia, materie prime, controllo e funzionamento, manutenzione, pianificazione e programmazione, qualità del prodotto, scorte, sicurezza, ecc.

Oltre gli indicatori di prestazione energetica che verranno descritti nella sezione successiva, la letteratura scientifica propone numerosi esempi di indicatori di prestazione da applicare in altri ambiti. A titolo di esempio, in [26] vengono identificati gli indicatori di affidabilità di una centrale elettrica, concentrati principalmente sulle reti di generazione e trasmissione, in [27] vengono trattati gli indicatori di rischio per la sicurezza durante la produzione industriale e in [28] vengono definiti indicatori di prestazione incentrati sul controllo e le prestazioni operative.

Di seguito vengono proposti alcuni indicatori di prestazione che possono essere facilmente implementati per il monitoraggio del settore industriale (adattato da [12]).

- **Indicatori di prestazione dell'uso delle materie prime.**

L'ottimizzazione dello sfruttamento delle materie prime comporta un miglioramento generale dell'economicità della produzione poiché diminuisce i costi per l'acquisto delle stesse ma anche quelli legati allo smaltimento delle materie considerate come scarto. In questa analisi alle tipiche materie prime di processo possono essere aggiunte anche acqua, prodotti chimici ecc. Gli indicatori possono essere:

- $\frac{\text{Quantità di materia prima in input}}{\text{Output prodotto}}$;
- $\frac{\text{Quantità di materia scartata}}{\text{Output prodotto}}$;
- $\frac{\text{Quantità di rifiuti prodotti}}{\text{Output prodotto}}$.

- **Indicatori di prestazione operativi.**

Questi indicatori servono per caratterizzare il buon funzionamento del reparto produttivo. Nell'analisi vengono infatti inseriti tutti i fattori che provocano il distacco delle prestazioni reali da quelle reali dovute alla presenza di malfunzionamenti, ritardi, guasti, gestione sbagliata ecc. Gli indicatori di questo tipo fanno riferimento allo studio dell'OEE (Overall Equipment Effectiveness).

- OEE.
- Percentuale del tempo di funzionamento programmato, in un periodo di tempo, ad es. un giorno, settimana, mese, ecc.
- Percentuale del tempo di attività effettiva pianificata in un periodo di tempo.

- Tasso di produzione reale rispetto al tasso di produzione massimo per ciascun prodotto, per un periodo di tempo.
 - Percentuale di prodotti di qualità buoni su prodotti totali, per un periodo di tempo.
- **Indicatori di prestazione del controllo.**
 Il controllo delle prestazioni può fortemente influenzare la qualità del prodotto finale, la velocità di produzione, l'usura delle attrezzature, ecc. Controlli troppo stretti porteranno ad una migliore qualità del prodotto con maggiori tempi di produzione e probabilmente maggiori quantità di scarti. Gli indicatori tipici di questa tipologia sono:
 - $\frac{\text{Numero di cicli di controllo manuale}}{\text{Numero totale di cicli di controllo}}$.
 - Varianza dell'errore di controllo (set-point e valore misurato).
 - Tempo di assestamento dopo una modifica del set-point.
- **Indicatori di prestazione della manutenzione.**
 L'attività di manutenzione è fondamentale per la buona gestione del sistema produttivo. Una manutenzione scarsa ed insufficiente può portare al verificarsi di un numero eccessivo di arresti non pianificati con conseguente perdita di produzione e necessità di intervento non desiderato. Tutti questi aspetti si traducono in costi eccessivi e non desiderati per l'azienda. Allo stesso modo anche una manutenzione eccessiva può causare eccessivi costi legati ad interventi non dovuti, al materiale di ricambio, al numero eccessivo di interruzioni e conseguenti perdite di produzione durante ogni manutenzione programmata.
 - $\frac{\text{Costi di manutenzione}}{\text{Output prodotto in un periodo di tempo}}$.
 - $\frac{\text{Tempo di manutenzione}}{\text{Output prodotto in un periodo di tempo}}$.
 - Numero di allarmi in un periodo di tempo.
- **Indicatori di prestazione della pianificazione.**
 La pianificazione e lo scheduling influiscono sul modo in cui viene utilizzata la capacità produttiva dell'impianto. In generale non è semplice descrivere un indicatore di prestazione per la pianificazione, tuttavia una soluzione potrebbe essere data dal confronto tra la produzione ottimale e quella effettiva. La formulazione risulta quindi considerare l'aderenza della produzione reale al piano produttivo attraverso:
 - Sommatoria dei soli valori positivi della differenza tra pianificazione e produzione effettiva in un periodo di tempo.
- **Indicatori di prestazione dell'utilizzo dei buffer e del magazzino.**
 Una gestione non corretta delle scorte potrebbe portare all'aumento dei costi sia nel caso di scorte eccessive sia nel caso di scorte non sufficienti. Scorte eccessive sono difficili da gestire, hanno bisogno di più spazio e più mezzi del necessario. Scorte non sufficienti comportano problemi nella gestione della produzione. I buffer inter-operazionali consentono di diminuire i problemi legati al flusso dei prodotti durante la produzione. Nel caso in cui non siano sfruttati al meglio potrebbero causare aumento dei costi e diminuzione della produttività dell'impianto. Gli indicatori per caratterizzare la prestazione del magazzino sono quindi:
 - $\frac{\text{Volume di produzione}}{\text{Scorta media}}$;

- Varianza del livello del buffer.
- **Indicatori di prestazione delle apparecchiature.**

In generale il funzionamento delle apparecchiature non è costante nel tempo. Le prestazioni possono subire variazioni (in calo) soprattutto a causa dell'invecchiamento dell'attrezzatura o alla manutenzione non perfetta che porta al verificarsi di un maggior numero di guasti. Gli indicatori di prestazione di questo tipo possono essere utilizzati per monitorare le condizioni delle apparecchiature e in alcuni casi anche prevedere quando sarà necessaria la manutenzione.
- Valutazione dell'efficienza delle apparecchiature.
 - Rendimento del trasferimento del calore degli scambiatori di calore;
 - Efficienza della pompa / ventola;
 - Efficienza di asciugatura;
 - ecc.
- Calcolo dell'usura dell'attrezzatura (in base ad es. tempo di funzionamento, velocità, carico, avviamenti, numero di cicli di una valvola, ecc.).
- Misura delle vibrazioni prodotte dall'apparecchiatura.
- Confronto tra prestazioni misurate e previste.

1.3 Indicatori di prestazione energetica

Negli ultimi anni, la comunità scientifica si è occupata con molto interesse dello sviluppo di sistemi di gestione dell'energia a livello industriale [1]. La letteratura tecnico-scientifica è ricca di documenti in cui si affronta l'argomento, approcciandolo di volta in volta in maniera differente e proponendo una soluzione al problema dell'efficienza energetica attraverso l'applicazione della metodologia definita. Considerando la vastità e la complessità del problema, in ciascun documento viene posta l'attenzione su un aspetto differente, tralasciando quelli che hanno un impatto inferiore.

Lo scopo di questa sezione è definire lo stato dell'arte sugli indicatori di prestazione energetica attraverso un'attenta ricerca bibliografica sul tema. Per questo nelle prossime sezioni vengono mostrati i passi attraverso cui la ricerca è stata condotta ed i risultati della stessa.

1.3.1 Metodo

L'obiettivo di questa sezione è la descrizione del metodo utilizzato per selezionare i documenti più importanti che trattano lo sviluppo degli indicatori di prestazione.

Per ottenere un quadro completo sull'utilizzo degli indicatori di prestazione nel settore industriale, è stata intrapresa un'attenta attività di ricerca di lavori pertinenti all'argomento presenti sui principali database online (Scopus, Science-Direct e Google Scholar). Tali database sono stati scelti per la pertinenza degli articoli al loro interno riguardo gli argomenti di gestione dell'energia e dell'ingegneria in generale. La ricerca ha seguito quindi una metodologia con le seguenti caratteristiche:

- La scelta delle parole chiave è stata fatta in modo da porre delle limitazioni per circoscrivere i risultati ottenibili. Le parole utilizzate sono state: "industrial", "energy" ed "indicator". In questo modo è stato possibile, in primis, escludere tutti i lavori che non affrontavano la problematica della gestione dell'energia a livello industriale, in secundis, è stato possibile selezionare solo documenti scritti in inglese.

- Nell'analisi sono stati inclusi solo documenti disponibili in formato digitale come testi completi. Questa scelta è dettata dal fatto che i testi di cui si ha a disposizione solo il titolo e l'abstract non possono essere valutati con la giusta attenzione.
- Non è stato fissato alcun limite di tempo e la ricerca si è concentrata sulle discipline di ricerca "ingegneria" e "energia".
- I documenti sono stati selezionati in base alla loro pertinenza rispetto al tema. Sono stati esclusi articoli che si concentrano solo su questioni di policy aziendali piuttosto che questioni di gestione tecnica.

La ricerca bibliografica ha quindi seguito una procedura composta di numerose fasi:

- Ricerca sui motori di ricerca degli articoli partendo dalle parole selezionate;
- Degli articoli trovati sono stati letti i titoli e gli abstract così da caratterizzarne macroscopicamente la validità;
- Salvataggio degli articoli più validi;
- Eliminazione dei doppioni dovuti alla ricerca degli articoli su motori di ricerca differenti;
- Analisi delle cross-reference in maniera tale da trovare articoli validi per "via indiretta";
- Analisi integrale del testo degli articoli selezionati come migliori.

Dopo una prima fase di lettura degli abstract sono stati selezionati circa 100 documenti dei quali solo 59 sono stati considerati i più significativi.

In Figura 1 è rappresentato lo schema del metodo utilizzato per l'analisi dei documenti bibliografici.

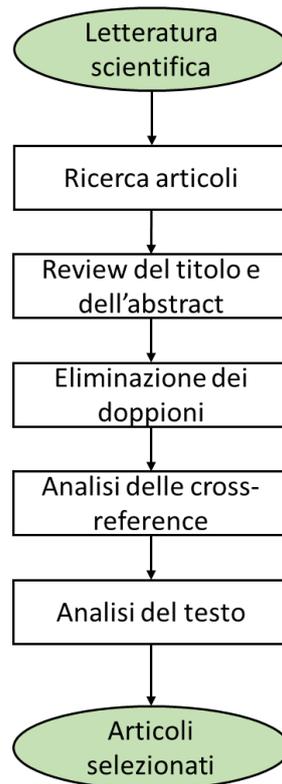


Figura 1. Metodologia utilizzata per la ricerca bibliografica

1.3.2 Risultati

Anno di pubblicazione

L'analisi dei documenti selezionati inizia con la proposizione del dato oggettivo più semplice: la data di pubblicazione del documento.

Come è possibile notare dalla Figura 2, i documenti analizzati sono stati pubblicati dal 1995 in poi. L'istogramma mostra che la grande maggioranza dei documenti è stata pubblicata negli ultimi 9 anni (dal 2011 al 2019) dimostrando che l'argomento ha suscitato un notevole e crescente interesse negli ultimi anni.

In particolare, i risultati mostrano che l'attenzione della comunità scientifica è cresciuta in maniera sostanziale dopo la pubblicazione della prima versione dello standard ISO 50001 nel giugno 2011. Questo standard ha fortemente contribuito ad aumentare la consapevolezza dell'importanza del consumo di energia a livello industriale e stimolato gli studiosi a cercare nuovi metodi e strumenti con l'obiettivo di migliorare le prestazioni legate all'energia e identificare le opportunità di risparmio energetico [29].

All'interno del periodo descritto, è possibile notare un forte aumento dei documenti pubblicati sull'argomento degli indicatori di prestazione energetica nel periodo tra il 2013 e il 2015.

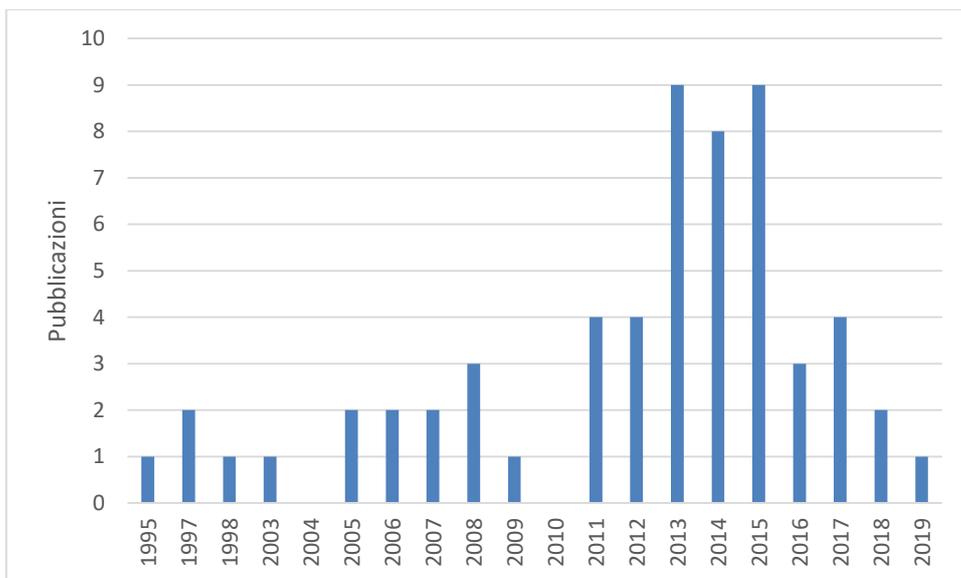


Figura 2. Distribuzione nel tempo dei documenti analizzati

Provenienza geografica

Come già descritto, i documenti analizzati provengono da database internazionali in cui sono presenti sia paper scientifici che atti di congresso.

Analizzando la distribuzione geografica dei documenti riportata in Figura 3, intesa come provenienza dei casi di studio analizzati, si può notare come il continente che fornisce il numero maggiore di contenuti sia l’Europa, seguito a breve distanza da Nord America e dall’Asia.

Questi risultati sono facilmente imputabili al maggior sviluppo industriale dei paesi appartenenti a tali continenti e ad una grande attenzione dei ricercatori di questi paesi al tema della gestione dell’energia. La colonna “varie” si riferisce a documenti redatti da ricercatori di diversa provenienza geografica e le cui analisi non riguardano settori industriali di singoli stati ma mettono insieme database di differente provenienza.

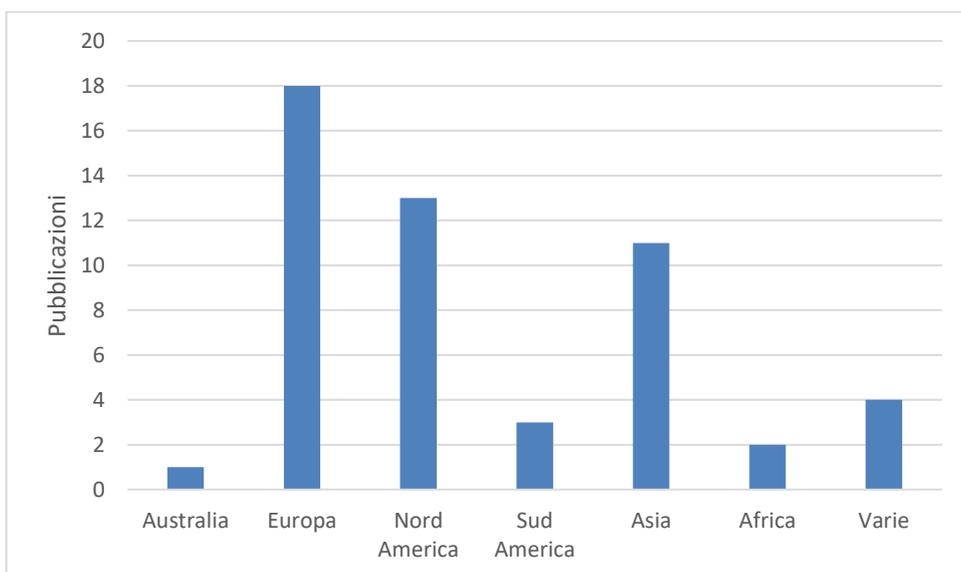


Figura 3. Distribuzione geografica dei contributi analizzati

Settori industriali analizzati

L'analisi dei settori industriali è stata condotta all'interno del campione selezionato dopo aver escluso gli articoli concettuali e teorici che non contengono casi studio. I risultati hanno confermato che il problema della gestione ottimale dell'energia attraverso l'utilizzo di sistemi per la misura e confronto delle prestazioni come gli indicatori è fortemente sentito soprattutto per quelle aziende le cui produzioni sono generalmente considerate energivore.

I settori più studiati risultano essere quelli legati alla produzione di prodotti alimentari e bevande (6), alla fabbricazione di prodotti chimici (6), alla fabbricazione di automobili (4), alla fabbricazione di prodotti di metallo (3) e alla fabbricazione di altri prodotti minerali non metallici come il cemento (2). Considerando l'influenza che i consumi energetici hanno sulle produzioni di questi settori, un risultato simile era atteso e mostra come la gestione dell'energia sia tenuta in considerazione con particolare attenzione da parte delle aziende e della comunità scientifica.

Nel campione sono presenti anche alcuni articoli che analizzano più settori industriali contemporaneamente e presentano casi di studio multipli. In altri ancora, l'analisi viene condotta ad un livello più alto considerando quindi interi comparti industriali senza specificare la scelta di un settore in particolare.

Caratterizzazione dei confini

La grande varietà di documenti selezionati mostra che l'utilizzo gli indicatori di prestazione è diffuso ad ogni livello del comparto industriale dalla singola lavorazione al settore di appartenenza. Nel conteggio dei lavori sono stati esclusi i lavori di review bibliografica.

L'applicazione ad un livello più alto, e quindi meno di dettaglio, consente la valutazione delle prestazioni generali del comparto industriale ed è spesso utilizzato per la definizione di obiettivi a medio e lungo termine.

L'applicazione sulla singola lavorazione consente di valutare nel dettaglio il funzionamento del processo ed identificare le cause di miglioramento o peggioramento delle prestazioni.

L'analisi dei documenti selezionati ha mostrato che la maggior parte dei lavori riguarda l'analisi delle prestazioni a livello di impianto, di processo e di settore. Molto inferiore è il numero di lavori che concentrano la propria attenzione sullo sviluppo di strumenti per analisi a livello di dettaglio sulla lavorazione o sul singolo prodotto.

Ciò è dovuto ad una intrinseca difficoltà di sviluppare un modello di dettaglio che consideri il singolo prodotto ed i relativi consumi che devono essere attribuiti allo stesso [30]. Ciò vale soprattutto nel caso di produzioni manifatturiere in cui le tipologie di prodotti processati possono essere notevolmente diverse tra loro. Meno complessa è l'analisi della prestazione a livello di processo o addirittura di stabilimento.

In Figura 4 sono raccolti i risultati dell'analisi descritta.

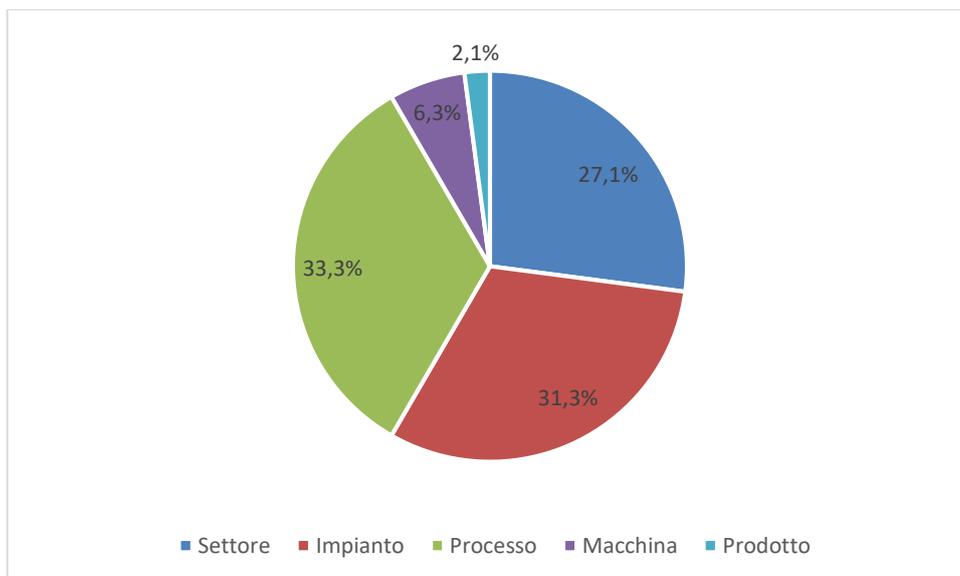


Figura 4. Ripartizione dei lavori esaminati sulla base del confine di analisi

Metodi per la definizione degli indicatori di prestazione

Per quanto riguarda la metodologia di sviluppo degli indicatori di prestazione si può fare riferimento a 2 differenti categorie: indicatori teorici e indicatori basati sul funzionamento reale. I primi sono basati su modelli teorici di consumo energetico e non fanno riferimento a dati reali di funzionamento del sistema. In pratica sono indicatori che identificano le best practices ed il livello di prestazione a cui tutti i sistemi dovrebbero tendere. I secondi sono indicatori basati sull'analisi delle prestazioni dei sistemi e quindi relativi a sistemi reali.

L'analisi bibliografica ha mostrato che solo in pochissimi casi si parla di indicatori di prestazione teorica. In particolare, i metodi utilizzati per la definizione di tali indicatori sono basati su: analisi energetica dei processi, modellazione fisica dei processi e analisi statistiche dei consumi.

In tutti gli altri lavori sono stati approfonditi indicatori basati sul funzionamento reale dei sistemi.

1.3.3 Discussione dei risultati

La letteratura scientifica raccoglie numerose definizioni di indicatori di prestazione energetica differenti. Gli indicatori di prestazione applicati a realtà che non sono legate all'industria non sono considerati in questo lavoro. In generale gli indicatori vogliono misurare la variazione di prestazioni nel tempo, altri servono al confronto di alternative, altri ancora vengono utilizzati per il benchmark.

Il lavoro "Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy" [31] raccoglie definisce in maniera rigorosa le caratteristiche degli indicatori di prestazione energetica. In particolare, viene operata una prima distinzione in base alle tipologie di indicatori, una seconda distinguendo i confini dell'analisi e una terza secondo le finalità per cui sono utilizzati.

1. Misure ed indicatori di prestazione energetica.

- Consumi di energia in termini assoluti. Queste grandezze vengono utilizzate come indicatori di prestazione energetica tuttavia perdono di significatività se non vengono accompagnati da indicazioni che integrano l'informazione (es. volumi di produzione, durata della lavorazione). Anche la definizione dei confini deve essere fatta accuratamente per non far perdere di significatività all'indicatore.

- Efficienza termica, COP o coefficienti fisici. Questa grandezza viene espressa dal rapporto: *quantità di energia prodotta/quantità di energia in ingresso*. Ad esempio, l'efficienza energetica di una caldaia a vapore è la quantità di energia intesa come quella disponibile dal vapore prodotto divisa per il calore in ingresso per generare il vapore. Nel caso dei motori, è la potenza meccanica divisa per la potenza elettrica in ingresso;
- Utilizzo di energia per la produzione, intensità di consumo energetico (J/tonnellate di prodotto, J/kWh, ecc.). Per calcolare questi indicatori, il consumo di energia viene diviso per il valore di output fisico (o un valore economico) dello stesso. Questi indicatori di prestazione possono essere utilizzati per un'attività di confronto delle prestazioni energetiche per un insieme ampio di oggetti: processi, fabbriche, aziende e persino paesi. Il denominatore dell'indicatore è un valore fisico che può essere a livello aggregato o disaggregato.
- Distribuzione, tasso di diffusione della tecnologia/impianto. Questa misura indica il tasso di diffusione di una tecnologia specifica che è stata identificata come efficiente dal punto di vista energetico. Le singole tecnologie condividono alcune caratteristiche comuni, tra cui le prestazioni energetiche, con lievi variazioni da un luogo di utilizzo all'altro. Il tasso di diffusione di tecnologie ad alta efficienza energetica ben identificate può quindi indicare progressi verso una maggiore efficienza energetica, supponendo che l'installazione implichi un uso effettivo dell'attrezzatura.

2. Oggetto (taglia, confini del sistema).

- Macchinario/strumento. È il confine più ristretto dell'analisi. L'analisi dei dati su un confine così stretto consente di analizzare a fondo il funzionamento del sistema nel particolare.
- Impianto/stabilimento. Questo confine permette di analizzare l'andamento generale di un impianto e consente anche di confrontare le prestazioni dello stesso con quelle di impianti simili all'interno della stessa azienda.
- Azienda. Gli indicatori che usano l'azienda come confine vengono utilizzati soprattutto per il confronto delle prestazioni dell'azienda stessa con quelle delle aziende concorrenti.
- Regione. I confini di questo indicatore consentono l'analisi delle prestazioni e servono per la pianificazione di strategie di interesse regionale.
- Nazione. I confini di questo indicatore consentono l'analisi delle prestazioni e servono per la pianificazione di strategie di interesse nazionale.
- Internazionale. I confini di questo indicatore consentono l'analisi delle prestazioni e servono per la pianificazione di strategie di interesse internazionale.

3. Tipo di assessment / decisioni.

- Monitoraggio periodico dei trend di consumo degli stabilimenti e delle aziende;
- Confronto internazionale e supporto alle decisioni;
- Confronto con la concorrenza interna al settore;
- Definizione di strategie per il risparmio energetico su singole entità;
- Definizione di politiche per l'efficienza energetica a livello regionale e internazionale;
- Scelta della tecnologia e degli investimenti tramite strumenti di contabilità energetica.

Altri lavori suggeriscono classificazioni differenti degli indicatori. Una delle più efficaci è sicuramente la classificazione elaborata in [32], [33]. In questi lavori gli indicatori di prestazione vengono suddivisi in 3 classi a seconda del livello di aggregazione specificato.

In [6, 7] tali Indicatori vengono classificati in tre differenti categorie, a seconda del loro livello di aggregazione (o livello di analisi, si confronti a tale riguardo la Tabella 1):

- “Indicatori aggregati”, riferiti ad aziende o siti produttivi, e quindi principalmente utilizzati a fini strategici per la definizione a lungo termine delle azioni che l’intera azienda deve mettere in atto per raggiungere i propri obiettivi di risparmio energetico e riduzione dell’impatto ambientale;
- “Indicatori disaggregati”, riferiti centri di lavoro o reparti produttivi, e quindi principalmente utilizzati a fini tattici per la definizione a medio termine delle azioni che ciascun centro di lavoro deve intraprendere per incrementare la propria efficienza energetica;
- “Indicatori riferiti al processo o ai singoli impianti”, e quindi principalmente utilizzati a fini operativi per la definizione a breve termine delle pratiche e delle tecnologie da adottare e della loro priorità di implementazione.

Tabella 1. Classificazione degli Indicatori di Prestazione Energetica (adattato da [34])

Livello di aggregazione	Livello decisionale	Scala	Specifiche
Aggregato	Strategico	Impresa - Sito produttivo	Vengono riferiti a siti produttivi o ad aziende. Vengono utilizzati principalmente per la definizione delle strategie a lungo termine e per la pianificazione delle azioni che dovrebbero essere intraprese per il raggiungimento degli obiettivi di efficienza energetica e riduzione dell’impatto ambientale.
Disaggregato	Tattico	Centro di lavoro	Vengono riferiti ai centri di lavoro o ai singoli reparti produttivi. Vengono utilizzati per la definizione a medio termine delle azioni che l’azienda deve intraprendere in ogni centro di lavoro per incrementare la propria efficienza energetica.
Processo/Impianto	Operativo	Unità di lavoro	Vengono riferiti alle singole unità di lavoro. Vengono principalmente applicati per fini operativi (monitoraggio e controllo delle prestazioni) ma anche per la definizione a breve termine delle misure da intraprendere per migliorare l’efficienza energetica a livello di singola unità di lavoro.

A partire dalla suddivisione definita in Tabella 1, la letteratura ha messo a disposizione numerosi esempi di indicatori di prestazione energetica.

In questa parte gli indicatori di prestazione provenienti dalla letteratura sono stati classificati per tipologia e applicazione specifica. Per ognuno di essi sono riportate alcune informazioni aggiuntive sul tipo di formulazione utilizzata. In Tabella 2 sono raccolti i principali indicatori con le relative formulazioni.

Tabella 2. Elenco degli Indicatori di Prestazione Energetica maggiormente utilizzati in letteratura (adattato da [32] [35])

Indicatore	Tipologia	Applicazione	Formula/Unità di misura
Efficienza energetica termodinamica	Termodinamico	Misure derivate dalla termodinamica	<i>Utilizzo dell'energia reale relativo ad un processo "ideale"</i>
Miglioramento dell'efficienza energetica finale	Fisico	Livello nazionale	<i>Risparmio energetico annuale</i>
Consumo energetico specifico	Fisico	Livello di processo, confronto tra più paesi	$\frac{\text{Consumo di energia}}{\text{Unità produttive}}$
Efficienza termica dell'apparecchiatura	Fisico	Per un singolo macchinario	$\frac{\text{Energia utilizzabile in input}}{\text{Energia in input}}$
Intensità del consumo di energia	Fisico	Più ampio degli indicatori termici e termodinamici: aziende, ecc.	$\frac{\text{Consumo di energia}}{\text{Output fisico}}$
Quantità assoluta di energia consumata	Fisico	Insieme all'indicazione dei volumi di produzione	<i>Quantità di energia</i>
Tasso di diffusione della tecnologia	Fisico	Focalizzato su una particolare tecnologia ad elevata efficienza energetica	<i>Tasso di diffusione della tecnologia</i>
Intensità energetica del settore industriale	Fisico	Confronto dei dati di efficienza riguardo sotto-settori tra Paesi diversi	$\frac{\text{Consumo di energia}}{\text{Unità di output prodotto}}$
Consumo specifico di energia	Fisico	A livello di settore	$\frac{\text{Consumo di energia}}{\text{Unità di output prodotto}}$

Livello di efficienza	Ingegnistico	Livello aggregato	$\frac{\text{Energia realmente disponibile}}{\text{Energia primaria utilizzata}}$
Indicazione di prestazione energetica	Statistico	A livello di stabilimento	<i>Classificazione dell'efficienza energetica</i>
Efficienza energetica fisico-termodinamica	Ibrido	Misurazione del servizio o prodotto finale realizzato dal processo	$\frac{\text{Consumo reale di energia}}{\text{tonnellate o distanza percorsa}}$
Efficienza energetica economico-termodinamica	Ibrido	Misurazione del servizio o prodotto finale realizzato dal processo	<i>Consumo di energia misurato in unità convenzionali in termini di prezzo di mercato</i>
Intensità di energia	Economico	Livello aggregato	$\frac{\text{Consumo energetico}}{\text{Costo energetico}}$
Intensità di energia	Macro-economico	Livello aggregato	$\frac{\text{Consumo energia primaria (GJ)}}{\text{Costo energia}}$
Misura dell'efficienza energetica	Economico	Attività di un settore	$\frac{\text{Consumo di energia}}{\text{Vendite}}$
Efficienza energetica economica	Economico	Misura in termini di valore di mercato	$\frac{\text{Energia in input in termini economici}}{\text{Energia in output in termini economici}}$
Importanza dei consumi	Economico	Peso dei costi energetici su costi totali	$\frac{\text{Costo energia}}{\text{Costi totali}}$
Misura della redditività	Economico	Misura della redditività dei consumi	$\frac{\text{Costo energia}}{\text{Ricavi totali}}$

Data la generalità del lavoro, nella presente analisi sono stati considerati tutti gli indicatori di prestazione definiti in letteratura. Di seguito è riportata una sintesi dei lavori in cui sono stati definiti gli indicatori e commento sul contenuto del documento.

1. Indicatori di prestazione a livello aggregato.

- “Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry A Refined Divisia Index Method” [36].
Applicazione del metodo *Divisia* per definire le quote di consumo delle singole sezioni del processo.

- *“Three blind men and an elephant: The case of energy indices to measure energy security and energy sustainability”* [37].
Propone il confronto di 3 differenti indicatori il cui utilizzo non porta a risultati omogenei.
- *“Improving energy and climate indicators for the steel industry - The case of Sweden”*
Propone alcuni indicatori energetici e ambientali per il settore dell’acciaio.
- *“A harmonized calculation model for transforming EU bottom-up energy efficiency indicators into empirical estimates of policy impacts”* [38].
Propone l’utilizzo di indicatori di prestazione energetica aggregati per stimare l’impatto delle politiche nazionali e sovranazionali sulle prestazioni industriali.
- *“Modelling and analysis of energy footprint of manufacturing systems”* [39].
Propone un approccio adatto sia per stimare i consumi a livello di singola utenza che di impianto.
- *“Multilevel index decomposition analysis: Approaches and application”* [40].
Utilizza l’Index Decomposition Analysis per analizzare l’impatto delle attività e comparare le prestazioni.
- *“Research on energy efficiency evaluation based on indicators for industry sectors in China”* [41].
Introduce il metodo Hierarchical-Indicator Comparison per creare un’analisi di benchmark.
- *“Energy efficiency indicators assessment tool for the industry sector”* [42].
Propone una metodologia per selezionare gli indicatori di prestazione più opportuni in modo da aiutare le aziende a comparare i propri consumi con quelle di realtà simili.
- *“A multi-fuel, multi-sector and multi-region approach to index decomposition: An application to China’s energy consumption 1995-2010”* [43].
Propone l’analisi dell’andamento dei consumi energetici nazionali analizzando i dati di consumo di 29 province cinesi.
- *“Decomposing energy intensity change: A combination of index decomposition analysis and production-theoretical decomposition analysis”* [44].
Propone una valutazione dei cambiamenti delle prestazioni attraverso la combinazione di index decomposition analysis (IDA) e production-theoretical decomposition analysis (PDA).
- *“Estimating the changes in the distribution of energy efficiency in the U.S. automobile assembly industry”* [45].
Propone l’applicazione del metodo proposto da Energy Stra per la valutazione delle prestazioni del settore automotive.
- *“Assessing the energy potential in the South African industry: A combined IDA-ANN-DEA (Index Decomposition Analysis-Artificial Neural Network-Data Envelopment Analysis) model”* [46].
Metodologia basata sulla combinazione di Index Decomposition Analysis, Artificial Neural Network e Data Envelopment Analysis (IDA-ANN-DEA) per valutare il consumo energetico di numerose aziende energivore.
- *“Tracking industrial energy efficiency trends using index decomposition analysis”* [47].
Propone l’utilizzo dell’Index Decomposition Analysis Utilizzo (IDA) per definire l’andamento dell’efficienza energetica. Il driver utilizzati sono il valore aggiunto e i dati di produzione.
- *“Integrated IDA-ANN-DEA for assessment and optimization of energy consumption in industrial sectors”* [48].
Propone una metodologia basata sull’IDA (index decomposition analysis), ANN (artificial

neural network) e DEA (Data Envelopment Analysis) con l'obiettivo di scomporre i consumi e definire differenti indicatori.

- *“Assessment of the uncertainty associated with the energy indicator”* [49].
Propone una metodologia che permette lo studio delle cause di incertezza nella valutazione degli indicatori di prestazione.
- *“Assessing the relative efficiency of energy use among similar manufacturing industries”*[50].
Propone una metodologia per il confronto all'interno dei settori manifatturieri.
- *“The evolution of the ENERGY STAR® energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use”* [51].
Applicazione del metodo Energy Star per la definizione del confine del benchmark. 2008
- *“Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy”* [31].
Propone l'analisi dei confini e approfondisce l'affidabilità dei risultati valutando l'incertezza dei dati.
- *“An integrated DEA PCA numerical taxonomy approach for energy efficiency assessment and consumption optimization in energy intensive manufacturing sectors”* [52].
Utilizzo della Design Envelopment Analysis per la definizione degli indicatori di prestazione per vari settori.
- *“A Method for Measuring the Efficiency Gap between Average and Best Practice Energy Use”* [53].
Viene applicato il metodo Energy Star per definire la frontiera per l'analisi di benchmark
- *“Decomposition methodology in industrial demand analysis”* [54].
Propone l'analisi di benchmark tra differenti settori industriali. Attraverso il metodo IDA (Index Decomposition Analysis) analizza la domanda di energia nel tempo.

2. Indicatori di prestazione a livello disaggregato.

- *“Efficient Energy Performance Indicators for Different Level of Production Organizations in Manufacturing Companies”* [55].
Propone una metrica che potrebbe essere utilizzata per simulare e confrontare l'efficienza energetica di diversi impianti, linee e stabilimenti in una singola azienda.
- *“Developing a Suite of Energy Performance Indicators (EnPIs) to Optimize Outcomes”* [56].
Viene proposto un sistema di indicatori di prestazione utili per il monitoraggio delle prestazioni energetiche ai diversi livelli dell'organizzazione.
- *“Improving Energy Efficiency in Manufacturing via KPI Intelligence Based on Plant Integration.”* [57].
Propone l'utilizzo dell'information technology per sviluppare un sistema di supporto all'energy management.
- *“A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems”* [58].
Creazione di indicatori teorici e pratici per le industrie di manifattura dei metalli. Proposta di una metodologia di attribuzione del consumo energetico al prodotto.
- *“Using key performance indicators to manage energy costs”* [59].
Indica come definire la baseline, come gestire i dati, definire i target e gli obiettivi.

3. Indicatori di prestazione a livello di Processo / Impianto

- *“Comparing the statistical distributions of energy efficiency in manufacturing: meta-analysis of 24 Case studies to develop industry-specific energy performance indicators (EPI)”* [60].
Creazione di modelli di consumo lineari ed applicazione del metodo Energy Star per la valutazione delle prestazioni.
- *“A New Energy Performance Indicator for Energy Management”* [61].
Viene proposto un metodo basato sulla regressione multipla per la definizione dei modelli di consumo ed un nuovo indicatore di prestazione per una specifica applicazione.
- *“Uses of industrial energy benchmarking with reference to the pulp and paper industries”* [62].
Propone l’analisi ed il confronto delle prestazioni del Sistema produttivo attraverso un approccio statistico.
- *“Multivariate Key Performance Indicator of Baking Process”* [63].
Propone l’utilizzo della Principal Component Analysis per estrarre un modello fisico dei consumi.
- *“Energy Saving in Industrial Process Based on the Equivalent Production Method to Calculate Energy Performance Indicators”* [64].
Utilizza la regressione lineare per analizzare i dati ed estrarre il modello da confrontare con i dati reali.
- *“Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework”* [65].
Vengono proposte numerosi driver per sviluppare un’analisi e soprattutto mostrate alcune criticità.
- *“A novel approach for acquiring the real-time energy efficiency of machine tools”* [66].
Viene proposto lo sviluppo di un modello fisico per un’applicazione specifica. L’analisi delle prestazioni si basa sul confronto dei consumi reali con quelli del modello.
- *“Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production”* [67].
Propone lo sviluppo di un modello sia a livello di prodotto che a livello di processo.
- *“Energy management in production A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency”* [68].
Un questionario viene utilizzato per la raccolta dei dati e gli indicatori di prestazione vengono caratterizzati da parametri di utilizzo operativo.
- *“Energy efficiency indicators and methodology for evaluation of energy performance and retained savings”* [69].
Propone un metodo per la creazione di indicatori di differente tipo e a diversi livelli così da essere utili nella valutazione economica degli investimenti.
- *“Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: Injection molding case study”* [70].
Propone una metodologia per valutare le prestazioni e fare il benchmark.
- *“Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency”* [71].
Presentazione di un metodo a supporto delle aziende manifatturiere nello sviluppo di indicatori di prestazione basati sull’energia.

- *“Energy related key performance indicators-state of the art, gaps and industrial needs”* [33].
Analisi della situazione e proposizione di un metodo per la creazione di un indicatore.
- *“Sustainability indicators for discrete manufacturing processes applied to grinding technology”* [72].
Questo studio seleziona indicatori di sostenibilità semplici e pertinenti e discute i diversi metodi di normalizzazione.
- *“Methodology for energy efficiency on process level”* [73].
Propone un approccio sistematico per la definizione di indicatori e la definizione delle possibilità di risparmio di energia.
- *“A Statistical Approach to Plant-Level Energy Benchmarks and Baselines: The Energy Star Manufacturing-Plant Energy Performance Indicator”* [74].
Applicazione del metodo Energy Star per confrontare le prestazioni dei vari siti dell’azienda affrontando le piccole differenze di produzione.
- *“Integrating energy efficiency performance in production management - gap analysis between industrial needs and scientific literature”* [75].
Mostra le caratteristiche di vari approcci e caratterizza le differenze che ci sono tra le soluzioni proposte e la pratica industriale.
- *“An enterprise energy-information system”* [76].
Propone un approccio basato sull’utilizzo dell’information technology per il monitoraggio delle prestazioni e la definizione degli obiettivi.
- *“Information system for monitoring and targeting (M and T) of energy consumption in breweries”* [77].
Propone l’utilizzo dell’Information Technology per il monitoraggio e controllo di vari servizi industriali.

Analisi di dettaglio dei risultati

Nella sezione precedente, i lavori analizzati sono stati inseriti all’interno di 3 gruppi divisi per livello di aggregazione. Alcuni di loro meritano una attenzione superiore e per questo vengono descritti di seguito con un livello di dettaglio superiore.

- Rogers et al. [62] esaminano i parametri di riferimento e le stime di risparmio energetico delle industrie della carta e della cellulosa per esplorare quanto siano comparabili i dati provenienti da studi indipendenti. Il lavoro indica che gli studi di benchmarking forniscono buoni riassunti dei potenziali miglioramenti tecnologici, sebbene vi siano alcune incongruenze nelle stime dei potenziali impatti.
- Mahamud et al. in [78] hanno proposto una metodologia generica per caratterizzare l'efficienza energetica a livello di fabbrica e ricavare riferimenti per benchmarking. In questo caso, i valori di riferimento non sono derivati da database nazionali ma vengono calcolati analizzando l'impianto di produzione. Attraverso un approccio empirico e un'analisi statistica (ad es. DEA e analisi di regressione), questo approccio identifica il quotidiano valore di riferimento della produzione e consente considerazioni sul miglioramento delle prestazioni energetiche.
- Boyd in [60] analizza la metodologia di benchmark proposta da Energy Star soprattutto per quanto riguarda la scelta del livello di riferimento delle prestazioni. Lo studio si concentra sulle differenze tra i valori indicati dall’associazione e i valori provenienti dall’analisi statistica delle prestazioni del

settore. Lo studio evidenzia anche come i livelli di benchmark cambino nel tempo per i settori della produzione di cemento, automobilistico e alimentare.

- Wang e Ji in [79] hanno presentato un nuovo sistema di indicatori di valutazione con tre strati e 10 indicatori per analizzare il livello generale di consumo di energia del sistema di produzione discreto. Quindi hanno sviluppato un metodo per ottenere direttamente l'efficienza energetica della macchina e testato su un caso di studi.
- Wang et al. in [67] costruiscono un'analisi di benchmark energetico basata su indicatori di prodotto e di processo. La valutazione delle prestazioni di un gruppo di campioni ha consentito di valutare i margini di miglioramento delle prestazioni dell'industria mineraria.
- Meyers et al. in [2] hanno studiato il consumo di energia di alcune PMI europee nel settore alimentare e delle bevande. Il loro metodo si basa su l'analisi energetica e la definizione di una serie di indicatori di benchmarking, come il consumo energetico specifico del prodotto, che determinano l'efficienza della produzione.
- May et al. in [71] hanno presentato un metodo per lo sviluppo di indicatori chiave di prestazione specifici per la produzione e per l'energia che consentono l'interpretazione delle relazioni causa-effetto. Gli indicatori analizzano diversi aspetti del processo di produzione, come il consumo durante gli interventi di manutenzione, il consumo per la produzione di parti non conformi e il consumo di riavvio post-festivo, con l'obiettivo di aumentare l'efficienza della produzione.
- Jeon et al. in [39] propongono un metodo per la valutazione del consumo di energia a livello di macchina basati su parametri dipendenti dal prodotto. Tale modello viene combinato con tecniche probabilistiche per valutare l'efficienza energetica degli impianti a livello industriale. Utilizzando indicatori specifici e il database IAC, confronta l'efficienza energetica degli impianti quelli simili all'interno nel settore manifatturiero statunitense.
- Oh e Hildreth in [80] hanno concentrato la propria attenzione sui consumi energetici dell'industria automobilistica poiché tale settore è considerato uno dei più importanti consumatori di energia. Hanno proposto un modello di benchmarking basato sui valori dell'indicatore di prestazione energetica degli impianti ENERGY STAR. Attraverso la Stochastic Frontier Analysis (SFA) e la Data Envelopment Analysis (DEA), lo studio trova la frontiera del benchmark e misura l'efficacia delle iniziative di risparmio energetico in termini di miglioramento dell'efficienza per l'industria automobilistica, in particolare per gli impianti di assemblaggio di veicoli. In pratica, tali frontiere vengono utilizzate per effettuare l'analisi di benchmark e caratterizzare i miglioramenti tramite lo spostamento delle frontiere stesse.
- Aguirre et al. in [50] propongono alcuni metodi per parametrizzare elementi caratteristici a livello di prodotto e per modellare fattori a livello di macchina basati su tali elementi. A partire da tali modelli a livello di macchina, l'approccio propone la simulazione dei consumi a livello dell'impianto. Il metodo sviluppato, combinato con tecniche probabilistiche, consente di valutare l'efficienza energetica industriale e per questo viene applicato ad un caso di studio. L'applicazione fornisce la valutazione dei consumi di energia degli impianti produttivi e fornisce strumenti per la valutazione delle possibilità di efficientamento energetico di impianto. I consumi vengono comparati con i livelli definiti dall' US Industrial Assessment Centers.
- Boyd et al. in [51] hanno sviluppato uno strumento che fornisce una visione estesa del consumo di energia specifico per il settore attraverso una correlazione tra il consumo di energia, il livello e il tipo di varie attività di produzione e la qualità degli input e dei fattori esterni.
- Azadeh et al. in [52] descrivono un approccio complesso per la caratterizzazione delle prestazioni basato sulla Data Envelopment Analysis (DEA), analisi delle componenti principali e tassonomia numerica per la valutazione dell'energia. L'approccio proposto elimina la necessità di dati energetici a livello di operazioni disaggregate per considerare l'effetto strutturale. In questo modo viene

semplificata la raccolta dei dati mantenendo elevato il livello di significatività delle analisi. Infine, utilizza i risultati ottenuti per analizzare e confrontare le prestazioni di diverse aziende, per determinare i vettori energetici più importanti e critici ed infine proporre soluzioni per il miglioramento delle prestazioni energetiche.

Punti di forza e criticità

I risultati dell'analisi della letteratura tecnico-scientifica hanno mostrato un crescente interesse verso lo studio di metodologie e strumenti che consentono l'identificazione e la riduzione del consumo di energia. I lavori selezionati si sono concentrati principalmente sullo sviluppo di nuove metodologie e sulla sperimentazione in contesti applicativi reali, coinvolgendo i settori più ad alta intensità energetica e quelli con un potenziale di efficienza energetica ancora non sfruttato. Un'analisi di questi articoli ha permesso di determinare i limiti della ricerca scientifica attuale e di identificare possibili strategie di soluzione per superare questi limiti.

Di seguito sono stati identificati ed elencati i principali punti di forza e le principali criticità:

1. **Raccolta dati.** Gli indicatori di prestazione sono largamente utilizzati e in molti casi la creazione e lo sviluppo degli indicatori di benchmark è basata sull'approccio fornito dalla normativa ISO 50001 e comprende l'utilizzo di dati facilmente disponibili come ad esempio le bollette energetiche [27]. Sebbene siano facilmente implementabili, gli indicatori di prestazione che utilizzano dati sommari come quelli appena descritti possono essere utilizzati solo per l'implementazione della gestione energetica strategica di alto livello, in quanto non forniscono un livello adeguato di dettagli per identificare i flussi di energia all'interno di un impianto di produzione. Questo tipo di approccio è valido quindi se il confine di analisi va oltre quello della singola azienda ma considera il settore di appartenenza o addirittura l'intero comparto industriale. La disponibilità di dati relativi ai più importanti consumi energetici ma soprattutto dati relativi alle durate ed alle condizioni di funzionamento dei sistemi è un grosso problema che pone dei grossi limiti allo sviluppo di metodologie di analisi delle prestazioni.

L'identificazione e l'analisi di dettaglio delle prestazioni dei processi sarebbe molto semplificata nel caso in cui molti sistemi di misurazione fossero a disposizione. La normativa ISO 50001 richiede alle aziende lo sviluppo di un adeguato sistema di misurazione (piano di misura e set di strumenti) per il monitoraggio ed il controllo della prestazione energetica. In molti casi come in [81] vengono suggeriti schemi di posizionamento dei sistemi di misurazione così da avere un buon controllo del sistema in esame.

La realtà industriale vede grosse difficoltà nell'identificazione dei processi e delle prestazioni proprio a causa della mancanza di sistemi di misurazione fissa e di dati misurati in continuo. Inoltre, la fase di raccolta ed analisi dei dati misurati richiede impegno e capacità del personale addetto e quindi risorse economiche. La raccolta dei dati dovrebbe essere supportata da nuove strategie e/o metodologie per aumentare la disponibilità dei dati, ridurre il tempo e lo sforzo delle risorse, migliorarne l'accuratezza e limitare l'incertezza dei risultati.

La difficoltà nel reperire informazioni e la scarsità di dati hanno quindi un risvolto fortemente negativo dovuto alla difficoltà di applicazione degli indicatori di prestazione e soprattutto legato all'impossibilità di identificare strategie correttive e piani d'azione efficaci.

2. **Questione intersettoriale.** Le analisi delle prestazioni attraverso il benchmarking consentono agli addetti alla gestione dell'energia (energy manager, personale incaricato, ecc.) di confrontare l'efficienza energetica di un impianto con altri impianti di produzione simili.

Tuttavia, lo sviluppo di indicatori, metodologie e gli strumenti di controllo dei consumi parte dall'analisi di un settore o di un sistema di produzione specifico. Questo porta alla validazione e test di strumenti utili per i casi di studio considerati ma in generale poco utilizzabili in contesti differenti da quello di origine. Tale specificità rende assai complessa la generalizzazione del problema e

quindi la modifica dello strumento (indicatore, metodologia, tool, ecc.) da utilizzare. Gli studi dovrebbero cercare di portare a risultati il più possibili generali da poter essere utilizzati in applicazioni e settori differenti da quello indicato dal caso di studi.

La generalizzazione consentirebbe la convalida degli stessi attraverso fasi di test e considerazioni empiriche e sarebbe utile per sostenere analisi di benchmark su campioni diffusi.

La disponibilità di modelli generali consentirebbe anche la creazione di database prestazionali da cui l'azienda potrebbe attingere nel caso in cui voglia intraprendere l'analisi di benchmark.

Nel dettaglio, è emerso che questa limitazione è tra le più comuni poiché la gran parte dei metodi consente analisi dettagliate dei consumi di energia dei singoli sistemi di produzione, ma di sicuro non applicabili a tutti i contesti di produzione.

- 3. Approccio olistico.** Negli ultimi anni sono stati sviluppati diversi metodi e vari tipi di indicatori, ma manca ancora un quadro che esamini il processo di produzione in modo olistico e multilivello. A causa della varietà e della complessità dei processi industriali, i metodi sviluppati sono generalmente specifici per un determinato settore manifatturiero e spesso prendono in considerazione soltanto indicatori e strumenti che non consentono di analizzare nel dettaglio la totalità delle caratteristiche del sistema di produzione. A volte, i metodi di analisi delle prestazioni presentati non tengono in considerazione alcune caratteristiche importanti sia interne che esterne (dati di produzione, dati tecnologici, dati ambientali e altri consumi di risorse, variabili operative, ecc.) e talvolta non pongono l'attenzione sulla presenza e sul funzionamento dei sistemi e delle strutture ausiliarie (utilities, magazzini, buffer, ecc.) che possono influire notevolmente sull'efficienza energetica.

Questo problema è molto evidente nei documenti in cui si tratta l'utilizzo di indicatori sintetici. In molti casi, inoltre, l'analisi ha visto lo sviluppo di indicatori da applicare solo su casi specifici (macchina, linea, ...) o su alcuni vettori energetici o ad un particolare servizio. In generale, i metodi di calcolo delle prestazioni energetiche attraverso l'utilizzo di indicatori di prestazione consentono di verificare consumo di energia del proprio sistema produttivo grazie ad un approccio molto semplice che in alcuni casi può constare anche soltanto di un semplice calcolo matematico quindi con sforzo nullo e conoscenze richieste molto scarse. Tuttavia, gli indicatori ed in generale i metodi per la misura delle prestazioni del sistema dovrebbero porre l'attenzione sull'inclusione dei parametri aggiuntivi al consumo di risorse energetiche e prendere in considerazione diversi driver per raggiungere un approccio il più possibile comprensivo.

A causa della varietà e della complessità dei processi industriali, quindi, l'analisi dei flussi di energia non consente una visione d'insieme del sistema e per questo spesso non viene presa in considerazione.

- 4. Valori di efficienza ottimale.** Rimanendo a livello aziendale, è ormai noto che processo di benchmarking è utile per identificare il valore di efficienza energetica ottimale e per evidenziare dove è possibile apportare miglioramenti [82]. I governi nazionali e gli enti di ricerca hanno sviluppato indicatori di prestazione energetica per i vari settori industriali ma purtroppo siamo ancora a livelli di copertura dei settori molto bassa. In Italia ENEA ha supportato lo sviluppo di numerosi lavori per l'identificazione del benchmark settoriale, tuttavia ancora una volta non esistono dati per tutti i settori industriali.

Negli Stati Uniti d'America sono stati intrapresi numerosi lavori che hanno portato allo sviluppo di indicatori di benchmark settoriali ma finora solo per 11 settori sono disponibili valori di benchmark la cui rappresentatività è discutibile e legata all'inadeguatezza dei dati condivisi dalle aziende.

Per coprire tutti i settori in cui il dato di benchmark non è disponibile, la ricerca scientifica ha proposto numerosi lavori in cui il benchmark viene fatto a livello aziendale comparando siti della stessa proprietà.

- 5. Effetto dell'economia di scala.** Tutti i dati energetici riferiti al prodotto finale risultante possono essere utilizzati per ottenere una misura dell'efficienza energetica nel processo di fabbricazione. In determinate condizioni, una misura che include sia l'uso del materiale in input, sia l'output

materiale porta a risultati significativi. Anche con questi indicatori la comparazione di differenti aziende è solo parzialmente possibile; se vengono presi in considerazione produzioni simili sia per tipologia che per quantità possono essere effettuate comparazioni valide. Ad esempio, due aziende che producono lo stesso prodotto ma non hanno simili volumi produttivi, il consumo specifico di energia dell'azienda con volumi minori sarà probabilmente differente, sebbene entrambe le società abbiano un'efficienza energetica ottimale.

6. **Strategie di efficientamento.** L'identificazione delle misure di risparmio energetico a partire dall'uso degli indicatori è una strada facilmente percorribile. Una buona analisi dei risultati consente la valutazione e l'identificazione del miglior approccio di intervento per ridurre i consumi energetici e le emissioni del processo produttivo. In generale, non sono numerosi gli studi che propongono soluzioni per l'efficientamento a fronte dell'analisi degli indicatori a parte alcuni esempi su settori industriali specifici come ad esempio per la produzione di cemento. Non esiste una metodologia teorica completa a supporto dei decisori nell'attuazione delle misure di efficienza energetica nei processi di produzione e non esistono strumenti per l'identificazione e la valutazione delle opportunità di miglioramento. Per superare questi ostacoli, sono state sviluppate metodologie per l'attuazione delle BAT ma sono ancora specifici per un settore industriale e non applicabili in ogni contesto produttivo.
7. **Approccio economico.** L'aspetto economico dell'efficienza energetica è molto importante nella gestione aziendale. Gli indicatori economici su vendite, creazione di valore e ricavi totali sono molto utili per la valutazione della validità del processo produttivo. Oltre al processo produttivo questi indicatori danno prova dell'efficienza del consumo di energia e del buon funzionamento del ciclo produttivo. Tuttavia, gli indicatori energetici dipendenti dai costi totali possono fornire importanti informazioni per unità produttive ristrette per cui è possibile ottenere una imputazione più precisa delle variabili economiche ma difficilmente misurano l'efficienza energetica dell'intero processo di fabbricazione.

È quindi dimostrato che gli indicatori di prestazione offrono grandi possibilità di utilizzo ma possono essere difficilmente confrontati se appartenenti a settori differenti. Gli approcci proposti hanno dei punti di forza e dei punti deboli e devono essere sfruttati scegliendo il confine su cui verranno applicati e l'obiettivo della loro applicazione.

Pertanto, l'obiettivo di un indicatore dovrebbe essere quello di documentare le caratteristiche dei fattori che influenzano i consumi affinché possano essere interpretate correttamente e fornire potenziali spunti per il processo di ottimizzazione. Come mostrato, esistono particolari difficoltà nell'applicazione che rendono difficile la loro piena utilizzazione.

1.4 Definizione degli indicatori di riferimento ideali e operativi

La ricerca bibliografica ha consentito di portare alla luce numerosi aspetti dell'utilizzo degli indicatori di prestazione ed ha consentito di caratterizzarne i pregi ed i difetti. Gli indicatori sono utilizzabili sia per l'analisi semplice delle prestazioni di un sistema nel tempo che, soprattutto, per il confronto delle prestazioni indicate dalle best practices. Questo implica che il risultato delle analisi può essere utilizzato dalle aziende per progettare le azioni di miglioramento delle prestazioni.

Sulla base delle conoscenze acquisite è possibile definire 2 macro-tipologie di indicatori che saranno utili nella parte successiva dell'attività di ricerca:

- Indicatori di riferimento teorici;
- Indicatori di riferimento operativi.

La prima tipologia raccoglie tutti gli indicatori che puntano a definire il livello di prestazione ideale del sistema. In altre parole, gli indicatori di prestazione ideali identificano il livello di prestazione limite, ossia definire il consumo limite inferiore di energia che si avrebbe nel caso in cui la produzione sia costantemente al livello di potenzialità al quale corrisponde la massima efficienza energetica e non ci fosse nessuna causa di fermo, rallentamento o altro tipo di inefficienza durante la fase produttiva.

La seconda tipologia di indicatore misura le prestazioni del sistema e punta a definire il consumo di energia tenendo in considerazione le condizioni operative (ad es. accensioni, transitori, interruzioni di funzionamento, ecc.) che influiscono sul consumo totale di energia.

1.4.1 Indicatori di prestazione di riferimento teorici

Gli indicatori di prestazione di riferimento teorici identificano il livello che un sistema dovrebbe raggiungere se potesse lavorare costantemente al massimo dell'efficienza energetica. Si tratta di indicatori teorici il cui livello di prestazione indicato non è raggiungibile nella pratica industriale ma è quello a cui le prestazioni dovrebbero tendere. In pratica, indicano il quantitativo minimo di energia che dovrebbe essere consumato per compiere una certa fase di lavoro.

La letteratura scientifica suggerisce numerosi approcci per la formulazione del metodo di calcolo degli indicatori di prestazione teorici. In generale, la complessità del processo si riflette sulla complessità del calcolo del consumo teorico per la produzione e per questo, il calcolo dell'indicatori teorici viene effettuato per sistemi limitati o singole lavorazioni.

Gli approcci più utilizzati sono quelli basati sull'analisi exergetica dei processi produttivi [78], sul calcolo dei consumi attraverso modelli fisici [66], regressione lineare [81] e sulla Data Envelopment Analysis [48], [52]

- **L'analisi exergetica** consente di stabilire il massimo lavoro ottenibile da un sistema. In [83] viene introdotto un metodo per il calcolo delle prestazioni in un sistema manifatturiero. In questo, tutti gli input e gli output vengono trasformati in formato exergetico e analizzati in maniera tale da identificare la richiesta minima di energia per unità di prodotto. Tale approccio è abbastanza complesso poiché richiede un numero cospicuo di informazioni sui quantitativi prodotti, scartati e lavorati oltre che sulle condizioni esterne di tipo climatico.

Il metodo prevede di identificare tutti i flussi in ingresso e uscita dal sistema sia materiali che energetici. È necessario conoscere anche i dati relativi agli eventuali flussi di calore di scarico e le condizioni atmosferiche.

Inoltre, è necessario rilevare i cambiamenti di stato dei flussi di materiale / prodotto nell'intero sistema sia dovuti a trasformazioni chimiche che fisiche. L'analisi exergetica è relativamente semplice per i processi termici e chimici, ma non per altri processi, come lavorazione, formatura, assemblaggio, ecc. La complessità produzioni limita ulteriormente l'applicazione dell'analisi exergetica alle industrie di trasformazione delle materie prime. Per prodotti complessi, come i veicoli, è quasi impossibile condurre l'analisi exergetica. In Figura 5 è rappresentato il processo di analisi exergetica per la produzione di una tonnellata di alluminio fuso.

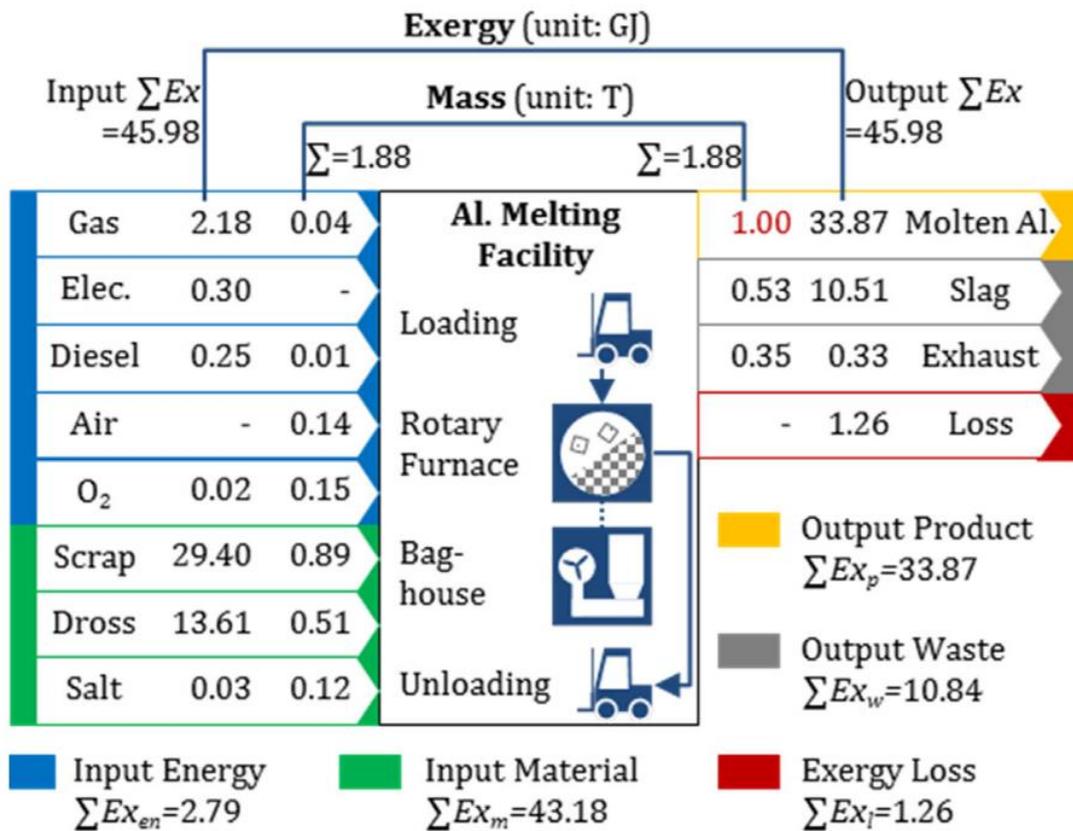


Figura 5. Esempio di analisi exergetica per la produzione di alluminio fuso (tratto da [78])

- L'approccio attraverso l'utilizzo di **modelli che considerano la chimica o la fisica della trasformazione** consentono di ottenere indicatori per il calcolo dei consumi del sistema in maniera teorica e stabilire il limite minimo di consumo per unità prodotta. Questo tipo di approccio ha una limitazione molto grande rappresentata dalla scarsa disponibilità di elaborare modelli ideali basati sulla chimica o la fisica della lavorazione. Tra gli esempi di modelli utilizzabili ci sono quelli che riguardano le trasformazioni di riscaldamento e raffreddamento, quindi anche quelli che seguono cicli termodinamici, i modelli di trasformazioni chimiche più note e quelli che permettono di calcolare l'energia consumata nelle lavorazioni meccaniche, ad esempio per l'asportazione di materiale.

A titolo di esempio, in [70] sono riportate alcune formule per il calcolo teorico dei consumi di energia nel processo di stampaggio dei polimeri.

- L'espressione:

$$E_{melt} = \rho V_{part} \cdot 10^{-3} \cdot [C_p(T_{inj} - T_{pol}) + H_f]$$

è utile per il calcolo del quantitativo teorico di energia richiesta per il riscaldamento e la fusione di un polimero plastico in cui ρ è la densità del polimero, V_{part} è il volume del getto, C_p è il calore specifico, T_{inj} è la temperatura di iniezione, T_{pol} è la temperatura in cui il polimero entra nella macchina per l'iniezione e H_f è il calore di fusione del polimero.

- La **regressione lineare** è sicuramente l'approccio più utilizzato per il calcolo dei consumi ideali e per la definizione della frontiera di analisi. Il metodo è facilmente implementabile e consente di ottenere buoni risultati in termini di qualità. Il risultato è una funzione del tipo:

$$E = \alpha + \beta_0 Y_0 + \beta_1 Y_1 + \dots + \beta_n Y_n$$

In cui E rappresenta il consumo energetico, α la quota fissa indipendente dalla produzione (intercetta), β i contributi degli n prodotti al consumo energetico ed Y il quantitativo di prodotto. Il metodo può essere implementato a partire da dati a consuntivo. Per identificare la prestazione ideale è possibile partire da quella media (identificata tramite la retta di regressione) e traslare la retta di regressione fino a farla passare per il punto con prestazioni migliori [53]. Il limite più importante del metodo è sicuramente la grande necessità di dati per impostare l'analisi. In Figura 6 è riportato a titolo di esempio l'utilizzo della regressione lineare singola per la modellazione dei consumi elettrici per la produzione di 3 diversi composti chimici. Nella figura i 3 prodotti sono individuati dai colori verde, blu e rosso. In basso a destra le funzioni lineari che mettono in relazione i consumi con le produzioni e che identificano le prestazioni medie.

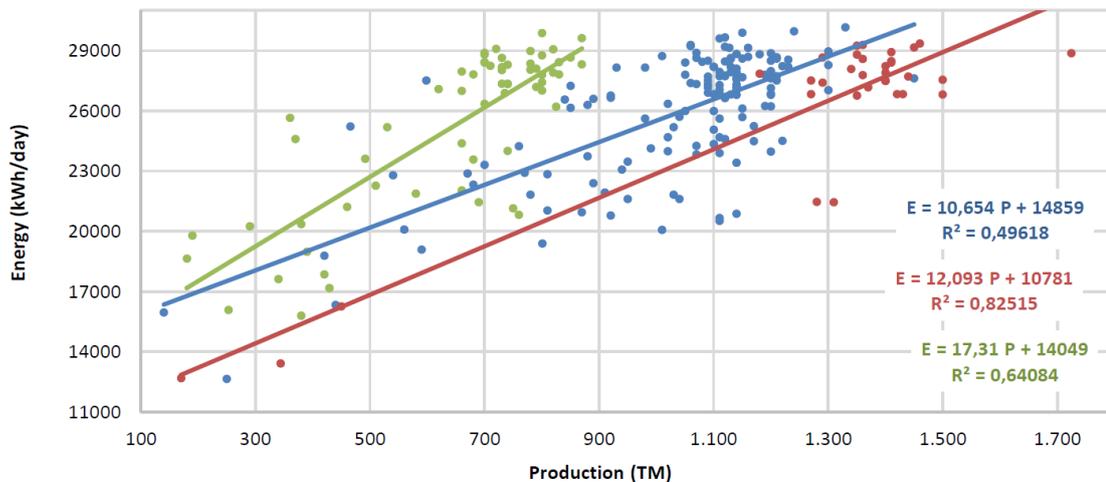


Figura 6. Esempio di regressione lineare per la modellazione dei consumi della produzione di 3 composti chimici (da [84])

La **Data Envelopment Analysis** consente di superare i limiti della regressione lineare attraverso l'utilizzo di un metodo non parametrico che utilizza gli stessi input e output. Il limite del metodo è la possibilità di applicare la DEA solo per il benchmarking interno in quanto è possibile confrontare solo tipi di processi simili.

- Un ulteriore approccio è basato sull'analisi del tempo di ciclo e sugli stati energetici durante i cicli di produzione. Come suggerito da [85] è possibile definire le percentuali del tempo totale di lavorazione in cui il sistema è in ognuno degli stati energetici e da quello stimare il consumo teorico di energia. Questo approccio ha come limite la conoscenza dei consumi teorici di ogni stato e la difficoltà nel reperire le informazioni per processi complessi. Un esempio di utilizzo di questo metodo è fornito in [85]. Sulla base dell'utilizzo del sistema è possibile stimare la percentuale di utilizzo di ogni vettore per ogni fase di lavorazione. In Figura 7 è riportato un esempio di calcolo dei consumi ideali del processo.

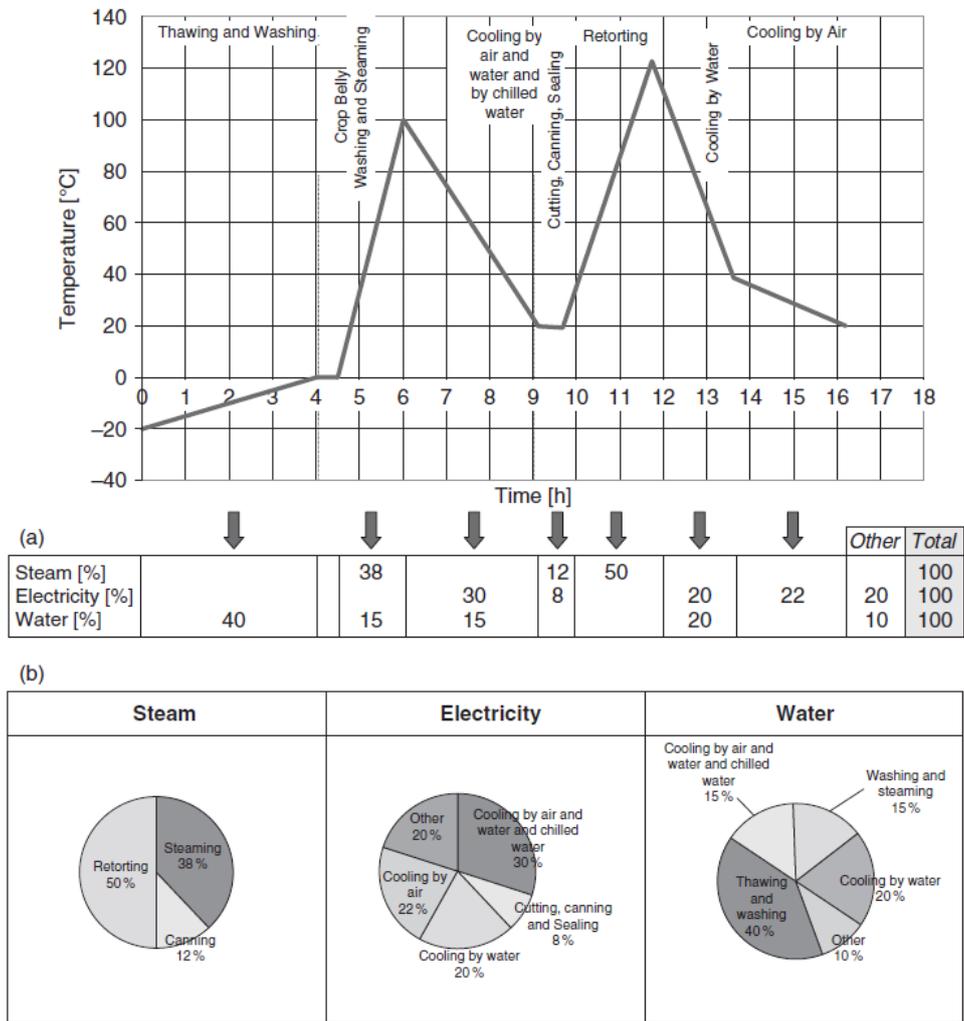


Figura 7. Temperatura del ciclo produttivo e utilizzo percentuale di energia per ogni fase.

Per poter fornire un'informazione significativa, il consumo teorico calcolato attraverso i metodi appena descritti deve essere confrontato con il consumo reale del sistema in esame.

Gli indicatori di prestazione possono quindi essere calcolati a partire dal consumo di energia ideale e quello a consuntivo:

$$\frac{\text{Consumo specifico di energia teorico}}{\text{Consumo specifico di energia reale}}$$

Sia il numeratore che il denominatore devono essere consumi specifici ovvero relativi alla quantità di prodotto fabbricato. Il valore di tale indicatore può variare tra 0 e 1. Un valore non lontano dall'unità indica che il consumo per unità di prodotto è simile al valore ideale e non si spreca energia per la produzione. Viceversa, un valore molto basso indica una gestione non corretta dei sistemi e la necessità di intervento.

1.4.2 Indicatori di prestazione di riferimento operativi

Gli indicatori di prestazione di riferimento operativi, diversamente da quelli teorici, per essere calcolati hanno bisogno di un numero superiore di informazioni sul processo in esame e sui tempi di lavorazione. Per

questo motivo, questi indicatori possono essere utilizzati soprattutto per avere indicazioni sui processi, difficilmente possono essere utilizzati per indicazioni su intere aziende o settori industriali.

Questa categoria di indicatori può essere suddivisa in 2 a seconda della provenienza dei dati:

- Indicatori operativi ideali;
- Indicatori operativi reali.

Gli indicatori di prestazione di riferimento operativi ideali servono a stabilire il livello di prestazione del sistema tenendo in considerazione le fermate, i rallentamenti e le altre condizioni operative ma in caso di funzionamento ideale, quindi con durate dei processi e quantità di lavorazione ideali.

Gli indicatori di prestazione di riferimento operativi reali consentono di stabilire il livello di prestazione del sistema tenendo in considerazione le cause operative come nel caso precedente ma utilizzando dati a consuntivo provenienti da misurazioni sul sistema produttivo reale per il calcolo dei valori.

Dal confronto degli indicatori di prestazione di riferimento operativi ideali con quelli operativi reali è possibile caratterizzare l'efficienza delle procedure operative utilizzate.

Per l'identificazione ed il calcolo di questo tipo di indicatori è necessario tenere in considerazione il fabbisogno di energia per le lavorazioni e la durata delle attività produttive.

In generale, l'analisi dei consumi energetici deve essere condotta tenendo in considerazione tutte le fasi della produzione comprese quelle in cui la produzione viene interrotta o non è realizzata al massimo delle potenzialità. Per questo motivo è necessario identificare tutte le situazioni in cui il sistema può trovarsi e caratterizzare i consumi per ogni situazione.

Le situazioni in cui il sistema si può trovare sono chiamate *stati energetici* e sono essere definiti come di seguito:

1. **In funzione.** Il sistema esegue le lavorazioni che portano alla produzione industriale ed il suo consumo di energia è variabile in funzione del carico.
2. **Spento.** Il sistema non è in funzione, non è utilizzabile prima del completamento di una fase di avviamento, il consumo è nullo.
3. **Avviamento.** Il sistema passa da spento ad acceso, tutte le apparecchiature vengono alimentate e per questo viene consumato un quantitativo di energia crescente nel tempo.
4. **Spegnimento.** Il sistema passa da essere in funzione (o stand by o inattivo) a spento. Il consumo di energia è presente e diminuisce nel tempo fino ad annullarsi.
5. **Stand-by.** Il sistema non è in funzione e non può essere immediatamente messo in funzione. Parte delle apparecchiature è accesa ma la restante parte è spenta. Il consumo è stabile nel tempo e molto basso.
6. **Inattivo.** Il sistema non sta processando nessun prodotto ma può iniziare immediatamente la produzione. Il consumo è stabile e basso.
7. **Manutenzione.** Il sistema non è in funzione e deve essere riparato, questo comporta consumo di energia variabile a seconda del tipo di intervento.
8. **Set-up.** Il sistema non è in funzione ma ha bisogno di energia per essere acceso e per la fase di attrezzaggio.

L'attività industriale ha un funzionamento molto complesso basato sull'interazione tra macchine, tra persone e tra persone e macchine. Questo comporta inevitabili difficoltà gestionali e, in termini energetici, grandi perdite di prestazione.

Il funzionamento dei sistemi produttivi difficilmente può essere sintetizzato e rappresentato dagli 8 stati energetici appena descritti. Per questo è necessario introdurre altri elementi per caratterizzare i sistemi ed i consumi in funzione delle cause operative che ne modificano il funzionamento.

Nell'analisi dei tempi di produzione, al funzionamento teorico è necessario aggiungere tutte le condizioni che comportano perdite di tempo, rallentamenti e quindi peggioramento delle prestazioni. Tutte le condizioni di inefficienza, vale a dire le perdite, influiscono sul consumo di energia del sistema in esame. Per questo motivo, occorre definire gli *stati di produzione* come quelle attività o quegli intervalli di tempo in cui la produzione non è attiva pur mantenendo elevato il consumo di energia

Per una definizione completa delle variabili che influenzano il consumo di energia, è essenziale per avere una buona conoscenza e comprensione del funzionamento del sistema di produzione.

La letteratura offre una valida panoramica dei fattori che influenzano il consumo di energia e le prestazioni ambientali complessive.

Gli stati di produzione identificati sono elencati Tabella 3. Per ognuno di loro, oltre alla denominazione è precisato lo stato energetico a cui è riferito (e quindi il relativo consumo energetico), una breve descrizione e i corrispondenti meccanismi di intervento che mostrano come ridurre l'impatto dello stesso stato di fabbricazione.

Tabella 3. Stati di produzione, meccanismi di intervento e relativi stati energetici (adattato da [68])

Stato della produzione	Stato energetico	Descrizione	Meccanismi di intervento
Blocco per scheduling della produzione	Stand-by, inattivo	Inattività a causa di motivi gestionali, rilevanti per la pianificazione della produzione (caricamento e sequenziamento delle operazioni)	<ul style="list-style-type: none"> • qualità della gestione del carico e spedizione; • dimensionamento del sistema di buffer; • rendimento; • tempi di ciclo dei pezzi del mix di prodotti;
Attesa per utensile (mancanza dell'utensile nel magazzino)	Stand-by, inattivo	Inattività causata dall'attesa di un utensile mancante nel buffer della macchina	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionamento del buffer della macchina e del magazzino; • Sistema di movimentazione degli utensili (automatico o manuale), gestione degli utensili.
Avvio giornaliero	Avviamento	Se l'azienda lavora su 1 o 2 turni al giorno le macchine vengono riavviate quotidianamente. Se l'azienda lavora in 3 turni con 5 giorni lavorativi vengono riavviate dopo il fine settimana	Numero di turni
Avvio dopo le vacanze	Avviamento	Ripartenza dei sistemi dopo le vacanze	Calendario

Set-up	Set-up	Cambio strumenti	<ul style="list-style-type: none"> • Mix produttivo • Sistemi per l'ottimizzazione del numero di cambi di strumenti
Mancanza ordini (MO)	Stand-by, inattivo	L'inattività del sistema per la mancanza di ordini prevista	<ul style="list-style-type: none"> • domanda del cliente e frequenza dell'ordine • Master Production Schedule (MPS)
Mancanza materiale (MM)	Stand-by, inattivo	L'inattività dei sistemi per la mancanza di materiale prevista	<ul style="list-style-type: none"> • Affidabilità del fornitore (interno o esterno) • Procedure e criteri di scelta del fornitore
Prove e campionamenti	In funzione	La macchina funziona per prove e campioni	<ul style="list-style-type: none"> • Richieste dalla pianificazione
Microfermate dei sistemi	Inattivo	Microfermate	<ul style="list-style-type: none"> • età e usura del sistema • qualità dei piani di manutenzione preventiva • altri fattori
Manutenzione correttiva (fermo totale o parziale)	In funzione, inattivo, manutenzione	Tempo di manutenzione correttiva in cui il sistema rimane spento	<ul style="list-style-type: none"> • qualità dei piani di manutenzione preventiva • formazione del personale • tempestività degli operatori nel riconoscere e segnalare i guasti • addestramento di manutenzione • tempestività del team di manutenzione per arrivare sulla scena
Manutenzione correttiva (manutenzione totale o parziale)	In funzione, inattivo, manutenzione	Tempo di manutenzione correttiva durante il quale il sistema rimane in stato di manutenzione	<ul style="list-style-type: none"> • entità del danno • manutenzione della formazione dei manutentori: pronta riparazione
Manutenzione pianificata	Manutenzione	Tempo di manutenzione programmata durante il quale il sistema rimane in stato di manutenzione	<ul style="list-style-type: none"> • training della manutenzione: regolazioni rapide per

Attesa per l'utensile		La rottura dell'utensile comporta l'attesa del sistema	<ul style="list-style-type: none"> • usura degli utensili • frequenza di rigenerazione dello strumento • dimensionamento del buffer degli strumenti sulla macchina e sul magazzino • sistema di movimentazione degli strumenti (automatico o manuale), gestione degli strumenti • profondità di taglio, lavori eseguiti su materiali speciali
Blocco dovuto al malfunzionamento del sistema	In funzione, inattivo	Se le stazioni operative non sono sufficientemente disaccoppiate, guasti in altri elementi del sistema (ad es. Macchine a monte e a valle) possono comportare attese della macchina	<ul style="list-style-type: none"> • età e usura delle macchine e dei componenti del sistema produttivo • dimensione del sistema di buffer • meccanismi di intervento relativi alla manutenzione correttiva
Scarti di riavvio	In funzione	Scarti durante la fase di riavvio	<ul style="list-style-type: none"> • età e usura delle macchine e dei componenti del sistema produttivo • tolleranze richieste nei prodotti finiti
Scarti/rilavorazioni in produzione normale	In funzione	Scarti e rilavorazioni durante la produzione normale	<ul style="list-style-type: none"> • età e usura delle macchine e dei componenti del sistema produttivo • gestione della qualità
Interruzioni dovute ai lavoratori (cambio turno)	Stand-by, inattivo	Interruzioni dei lavoratori che implicano aspettative per la macchina	<ul style="list-style-type: none"> • produttività del lavoro
Scioperi		Scioperi e cause sindacali durante l'orario di lavoro	<ul style="list-style-type: none"> • problemi socio-economici • salario • sicurezza sul lavoro

Dopo averli definiti, gli stati del sistema all'interno della Tabella 3 possono essere utilizzati per la rappresentazione dell'attività produttiva attraverso un diagramma dell'energia.

Il diagramma ricalca lo schema che viene utilizzato nello studio dell'Overall Equipment Effectiveness (OEE, uno dei più diffusi indicatori di efficienza produttiva) ma è basato sui consumi di energia piuttosto che sugli intervalli di tempo. Un esempio di diagramma dell'energia può essere rappresentato come in Figura 8. Ciascuna colonna indica un intervallo di consumo di energia. Partendo dalla colonna più a sinistra è possibile notare come dal tempo di apertura teorico, e relativi consumi energetici, si passi al consumo di energia per la produzione a valore aggiunto. Nel passaggio dalla colonna più a sinistra a quella più a destra si possono notare tutte le cause di peggioramento delle prestazioni energetiche.

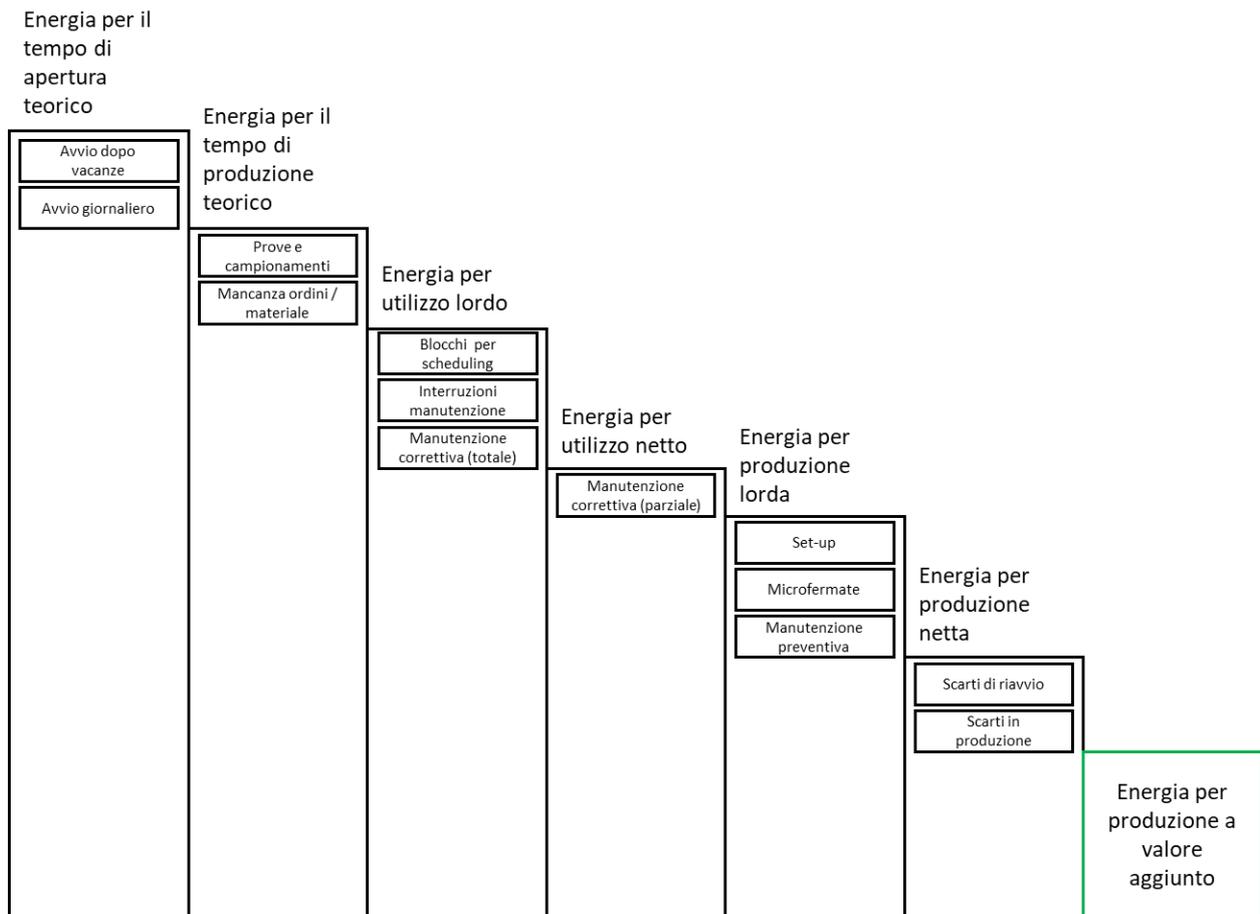


Figura 8. Diagramma dell'energia (adattato da [68])

Per la costruzione del diagramma dell'energia, l'azienda, sulla base della durata di ciascuno stato della produzione e in base ai consumi dettati da ciascuno stato energetico corrispondente, può calcolare la quota di consumo per la produzione a valore aggiunto e quelle relative agli altri intervalli di tempo.

Per poter completare una buona analisi delle prestazioni, l'azienda dovrebbe compilare il diagramma energetico sia con i valori teorici sia con quelli a consuntivo.

Per questo motivo l'azienda dovrebbe essere a conoscenza dei singoli consumi teorici e delle durate teoriche delle lavorazioni in maniera tale da poter confrontare i valori di prestazione attesi con quelli reali.

I collegamenti tra stati energetici e stati della produzione e la conoscenza dei cicli di lavorazione e tempi operativi consentono quindi di contestualizzare l'aumento dei consumi del sistema rispetto al sistema teorico ottimale.

L'analisi delle prestazioni attraverso gli indicatori necessita quindi della definizione di un diagramma dell'energia per poter identificare le cause dei consumi energetici ad esempio dovute all'inattività del sistema o alle manutenzioni.

Perciò, l'implementazione del diagramma consente di passare da una visione della produzione nel dominio del tempo ad una caratterizzazione dei consumi di ogni fase tramite il calcolo dell'energia consumata durante ciascuna fase per la durata delle stesse.

A partire dal diagramma energetico in Figura 8 è possibile calcolare gli indicatori che enfatizzano il contributo di diversi fattori come l'utilizzo, la disponibilità e la saturazione normalmente utilizzati per il calcolo della produttività.

Il primo indicatore operativo si calcola attraverso il rapporto tra l'energia consumata per la produzione a valore aggiunto e il consumo totale di energia del sistema.

Consumo di energia per la produzione a valore aggiunto
Consumo totale di energia

Il numeratore si ottiene dal prodotto del consumo unitario teorico e il numero di componenti vendibili prodotti. Questo indicatore è utile per stabilire quanto la produzione sia efficiente in termini generali. Più il valore si avvicina all'unità e più il processo ha consumi regolari e dissipa poca energia per attività esterne alla produzione.

Come avviene nel calcolo dell'OEE nel dominio del tempo, l'indicatore di prestazione appena visto può essere scomposto e visto come il prodotto di più indicatori che vengono di seguito proposti.

- $\frac{\text{Energia per la produzione a valore aggiunto}}{\text{Energia per la produzione netta}}$ Questo indicatore valuta l'efficienza del sistema durante la fase produttiva. In pratica fornisce indicazioni sulla quantità di energia sprecata per la produzione di scarti e prodotti non conformi. Il valore minore dell'unità indica che si devono osservare delle misure per la riduzione degli sprechi. Il denominatore si calcola moltiplicando il valore del consumo unitario teorico per il numero di prodotti processati.
- $\frac{\text{Energia per la produzione netta}}{\text{Energia per la produzione lorda}}$ Questo indicatore valuta la saturazione del sistema produttivo. Nel calcolo viene considerato che la produzione è dissipata energia per la presenza di microfermate e intervalli di setup. Il denominatore si calcola sommando i consumi durante tutte le fasi di inattività e i consumi per la produzione netta. Il valore unitario dell'indicatore indica che il sistema non subisce microfermate.
- $\frac{\text{Energia per la produzione lorda}}{\text{Energia per utilizzo netto}}$ Questo indicatore valuta l'efficienza del sistema considerando i consumi di energia che dipendono dal tempo richiesto per la manutenzione, dal consumo dei sistemi durante la fase di inattività e durante le fasi di riavvio. Dal punto di vista del miglioramento delle prestazioni, l'eliminazione dei guasti comporta sicuramente la riduzione dei consumi energetici.
- $\frac{\text{Energia per utilizzo netto}}{\text{Energia per tempo di produzione teorico}}$ Questo indicatore valuta l'impatto che la gestione della produzione ha sul consumo di energia. La presenza di blocchi e fermi temporanei dovuti a cause gestionali fanno consumare energia al sistema senza che questo abbia produca beni a valore aggiunto. L'abbassamento del valore dell'indice di prestazione indica che la gestione delle attività produttive non è ottimale e che devono essere intraprese azioni migliorative.
- $\frac{\text{Energia per tempo di produzione teorico}}{\text{Energia per tempo di apertura teorico}}$ Questo indicatore valuta l'impatto delle pause nella produzione dovute alle ferie ed alle vacanze. Queste fermate della produzione, sebbene inevitabili, comportano assorbimenti di energia dovuti alle fasi di spegnimento e riaccensione dei sistemi produttivi.

Gli indicatori descritti possono essere utilizzati, singolarmente o tutti insieme per effettuare una valutazione dei consumi del sistema in esame tenendo in considerazione numerosi aspetti dell'attività produttiva. La rilevazione dei parametri di consumo nel tempo consente di implementare un sistema di monitoraggio che, a seconda delle tecnologie utilizzate, può risultare più o meno efficace. Il monitoraggio continuo potrà caratterizzare in maniera precisa e rapida tutte le variazioni nelle prestazioni del sistema sia dovute al sistema produttivo stesso, sia dovute alle cause operative.

L'utilizzo che, però, si vuole proporre per questi indicatori è quello che vede il confronto tra le prestazioni teoriche e quelle reali. Il calcolo delle prestazioni ideali consente di definire il livello di prestazione a cui il sistema deve tendere. Gli indicatori proposti consentono quindi di valutare la distanza della prestazione

reale, misurata attraverso un sistema di controllo, da quella ideale e soprattutto di identificare le cause di tali differenze.

1.5 Conclusioni del capitolo

Concludendo quindi, l'analisi degli indicatori ha portato alla conoscenza di molti aspetti fondamentali nell'analisi delle prestazioni attraverso indici e benchmark.

Gli indici di prestazione energetica sono universalmente riconosciuti essere tra i metodi che portano al miglioramento dell'efficienza energetica. La loro implementazione in campo industriale è talvolta assai complicata a causa delle difficoltà dei metodi e della mancanza di dati e di riferimenti e dalla impossibilità di confrontare differenti settori.

Tali difficoltà risiedono, per quanto riguarda il metodo, nella difficoltà oggettiva di applicazione di metodi matematici a volte complessi. La mancanza dei dati è una questione ormai nota da anni che mostra le difficoltà all'interno del settore industriale di implementare sistemi di misura delle prestazioni efficaci ed efficienti. La mancanza di riferimenti per il benchmark deriva in parte dalla mancanza di sistemi di misura, in parte dalla tendenza delle aziende di non divulgare i propri dati di consumo e produzione.

Purtroppo, la letteratura non mette a disposizione dati relativi ai consumi energetici ideali e quindi, a parte per alcuni settori industriali, non è possibile compiere un'analisi di benchmark con il livello rappresentato dalle best practices.

Inoltre, gli indicatori sono difficilmente utilizzabili per l'analisi comparativa delle performance intersettoriali. La variabilità dei processi e conseguentemente dei consumi e delle prestazioni dei settori industriali comporta grandi differenze nella definizione degli indicatori e quindi una grande difficoltà nella creazione di indicatori che possano essere utilizzati per il confronto di realtà appartenenti a settori industriali differenti. L'attività di ricerca si è quindi posta l'obiettivo di studiare una metodologia per lo sviluppo di indicatori teorici e operativi che consentano il confronto delle prestazioni e la successiva proposizione di azioni di efficientamento energetico.

2 Sviluppo indicatori di prestazione energetica

2.1 Introduzione

Lo studio della letteratura condotto fino ad ora ha mostrato molte caratteristiche importanti sia dell'utilizzo degli indicatori di prestazione che per l'analisi di benchmark.

L'utilizzo degli indicatori di riferimento è riconosciuto essere un ottimo metodo per la misura delle prestazioni energetiche e delle possibilità di miglioramento delle stesse.

Il benchmark è basato sul confronto degli indicatori di prestazione ma la possibilità di utilizzare tale metodo è fortemente vincolata alla presenza di un valore ideale a cui tendere che possa essere rappresentativo della migliore pratica. Come abbiamo visto, la maggior parte dei metodi introdotti nella sezione precedente si basa sull'utilizzo di dati provenienti dalla pratica industriale per poter definire un limite di prestazione ottima a cui tendere.

Un'ipotetica analisi di benchmark può essere costruita come mostrato in Figura 9.

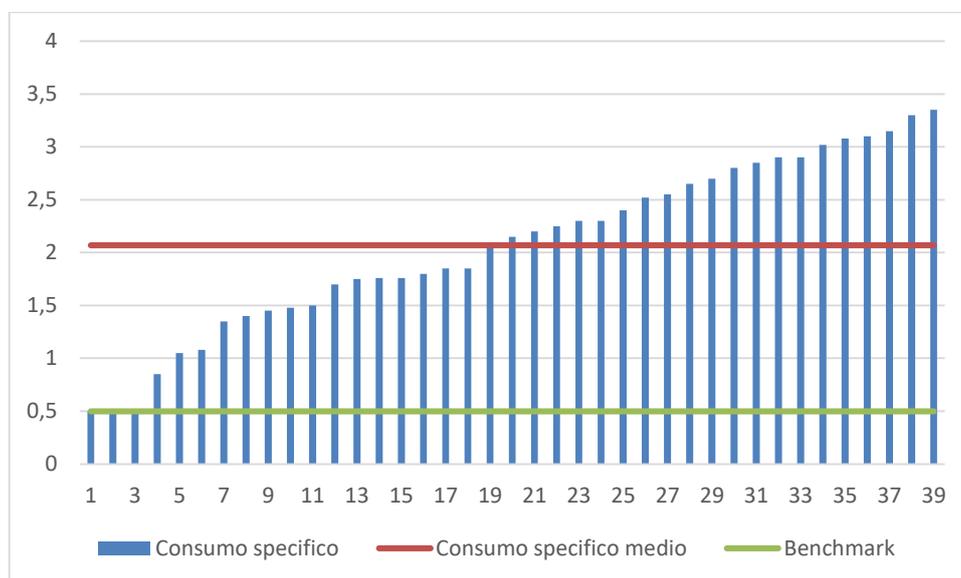


Figura 9. Benchmark ipotetico

Per costruire un grafico del genere ed utilizzarlo come strumento di benchmark, sono necessari generalmente almeno i dati sull'uso di energia a livello di impianto e quelli sulla produzione industriale. In questo caso, a ciascun valore sull'asse delle ascisse corrisponde un differente impianto mentre l'asse delle ordinate indica il consumo specifico.

L'analisi di benchmark potrebbe essere impostata considerando come riferimento il valore medio dell'indicatore di prestazione (come mostrato con la linea rossa), sulla mediana o su qualche percentuale della distribuzione (come è stato fatto per esempio con la linea verde). Ovviamente la scelta del limite di benchmark deve essere fatta in funzione dei risultati attesi e dell'obiettivo dell'analisi stessa.

Grazie a questa analisi è possibile mostrare quali siano gli impianti il cui valore dell'indicatore di prestazione è al di sotto del livello di benchmark, e quindi con prestazioni di buon livello, e quali impianti abbiano un livello di prestazione non ottimale.

Il fattore comune di tutti gli approcci studiati è la grande richiesta di dati per costruire una curva di questo tipo. I dati in questione rappresentano solitamente i consumi energetici e la produzione ma, come mostrato nella sezione precedente, possono anche riguardare aspetti differenti.

La disponibilità di dati è quindi una prerogativa del benchmarking. Per condurre un'analisi di benchmark significativa è anche necessario che i confini dell'analisi siano molto specifici per evitare il confronto tra realtà molto differenti. Questa specificità può comportare una riduzione del numero di unità produttive comparabili, ovvero stabilimenti di produzione o unità di processo.

L'approccio che si vuole proporre in questo studio desidera fornire una metodologia per l'analisi di benchmark che utilizza gli indicatori di prestazione che possano rappresentare un valore di riferimento limite a cui le prestazioni del sistema in esame devono tendere.

La letteratura analizzata ha fornito un'utile base di conoscenza per quanto riguarda l'utilizzo degli indicatori di prestazione. I tanti lavori letti presentano quindi una varietà di casistiche e metodologie tali da risultare un'utile base per la progettazione della nuova metodologia e dello strumento di benchmarking di seguito presentati.

Il primo aspetto da prendere in considerazione è sicuramente la difficoltà di applicazione del metodo di benchmark e la scarsa affidabilità dei risultati. Le metodologie e gli approcci specificamente sviluppati per supportare i processi decisionali sono spesso "distanti" dalla pratica industriale e difficilmente portano a risultati significativi. Il problema del distacco tra approccio scientifico (tendenzialmente rigido) e pratica industriale (molto variabile in funzione delle caratteristiche del sistema in esame), è ancor più aggravato dalla scarsa base scientifica su cui poggiano gli approcci utilizzati nell'industria.

Per questo motivo l'attività si propone di approcciare il problema del benchmark dal punto di vista scientifico cercando di sviluppare un metodo e degli indicatori di prestazione che possano essere facilmente utilizzati nella pratica industriale.

Lo studio vuole suggerire un metodo per lo sviluppo di indicatori di riferimento che vadano oltre l'approccio puramente teorico e proponano la misura delle prestazioni del sistema in generale e di quelle pratiche che rendono i processi industriali "lontani" dalla teoria scientifica.

Il metodo individuato ed illustrato nel seguito, dovrà quindi necessariamente prendere avvio da una fase conoscitiva della realtà in cui devono essere delineati i problemi da affrontare e cercare una prima definizione della strategia di intervento.

La fase conoscitiva dovrà ovviamente approfondire in primo luogo la tipologia di vettore energetico che dovrebbe essere tenuto in considerazione nell'analisi delle prestazioni. In seguito, l'analisi dovrà porre la propria attenzione sulla conoscenza dei prodotti e dei processi industriali dell'azienda o del settore in esame in maniera tale da facilitare lo sviluppo di uno strumento per la valutazione della prestazione energetica di riferimento. La conoscenza delle pratiche operative sarà il passo successivo che consentirà di analizzare il distacco del processo ideale/teorico da quello reale ed infine si potranno sviluppare gli indicatori desiderati.

2.2 Metodo di applicazione degli indicatori

Come visto nella sezione di analisi della letteratura, gli indicatori di prestazione più diffusi sono quelli calcolati sulla base di misure aggregate dei consumi di energia confrontate con il quantitativo di prodotto processato (kWh/unità prodotta, ecc). Questo tipo di approccio fornisce una "fotografia" del sistema in esame dal punto di vista energetico ma non consente molte altre considerazioni. Come già descritto nella prima parte, solitamente, gli indicatori vengono proposti in numero superiore ad uno in maniera tale da poter andare oltre l'analisi di un numero che da solo potrebbe non rappresentare le prestazioni del sistema. In numerosi casi, per stabilire le relazioni tra causa ed effetto vengono utilizzati più indicatori di prestazione contemporaneamente in maniera tale da avere un quadro più completo della situazione.

Gli indicatori sintetici, proprio per la loro definizione, non forniscono indicazioni di dettaglio sulle configurazioni delle macchine e dei sistemi, informazioni sui cicli produttivi e più in generale informazioni operative.

Pertanto, l'analisi dettagliata delle prestazioni e l'identificazione delle reali cause del consumo di energia sono complicate. Un valido aiuto può arrivare dall'utilizzo degli indicatori di efficienza basati sull'analisi dei tempi come ad esempio quelli utilizzati nell'approccio dell'Overall Equipment Effectiveness (OEE).

L'obiettivo è quindi quello di sviluppare un metodo che mira a definire ed utilizzare gli indicatori di prestazione che consentano di identificare il consumo ideale e che riescano anche a tenere in considerazione gli aspetti operativi del funzionamento dei sistemi. Per questo è importante caratterizzare ed interpretare le relazioni causa-effetto che legano la produzione aziendale con il consumo di energia. Il metodo che è stato proposto può essere applicato a livello di macchina, processo e impianto. In questo modo attraverso il contatto con le aziende è possibile estendere l'analisi all'intero settore di appartenenza delle aziende.

Il metodo definito vuole mettere in relazione le variabili di produzione (quantità di prodotto, di materie prime, ecc.) con il consumo di energia e fornire anche informazioni dal punto di vista operativo che potranno essere utili nello sviluppo di una strategia di miglioramento delle prestazioni. Gli indicatori proposti possono essere utilizzati per l'analisi delle prestazioni a livello ideale e delle prestazioni reali. I risultati che ne derivano possono essere utilizzati per il confronto delle prestazioni e per l'elaborazione di proposte di miglioramento.

Il miglioramento continuo che è il punto cardine attorno cui ruota l'utilizzo degli indicatori di prestazione si basa sulla registrazione delle inefficienze, sull'identificazione delle variabili che le hanno causate e sulla diminuzione dell'impatto.

Lo schema generale del metodo è mostrato in Figura 10.

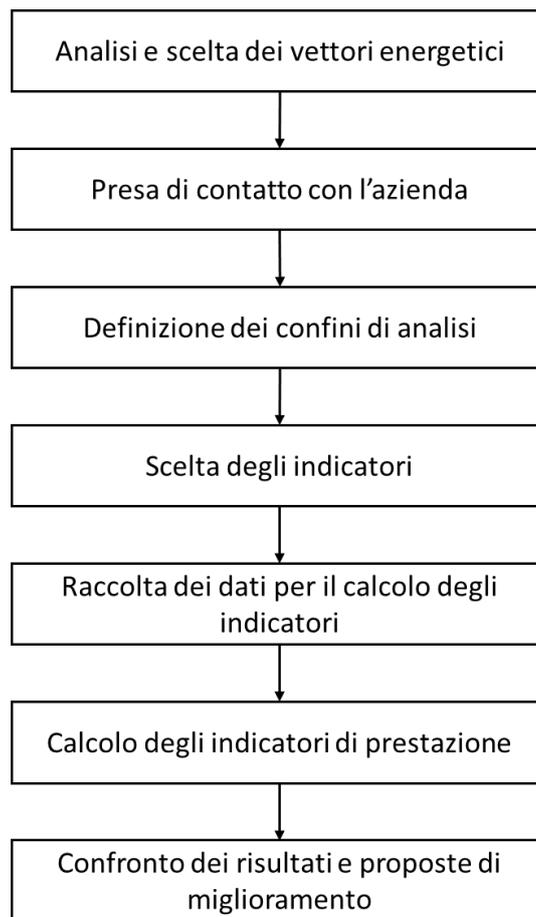


Figura 10. Schema generale del metodo

2.2.1 Analisi e scelta dei vettori energetici

Tutti gli impianti industriali hanno bisogno di energia per il funzionamento. Difficilmente gli impianti industriali vengono alimentati attraverso una unica fonte di energia. Le fonti energetiche più utilizzate nell'industria sono sicuramente energia elettrica, gas naturale altri combustibili liquidi (gasolio, olio combustibile, gpl, ecc.). Queste vengono utilizzate direttamente oppure utilizzate per la produzione di vettori energetici all'interno dello stabilimento industriale (aria compressa, vapore, acqua calda, ecc.).

È fondamentale precisare come la scelta della fonte o del vettore energetico da analizzare influenzi fortemente il lavoro di analisi delle prestazioni poiché modifica fortemente i confini dell'analisi e quindi è importante che sia la prima scelta da fare.

La scelta può ricadere sia su un singolo vettore energetico, sia sulla somma dell'energia consumata, calcolata come energia primaria dell'impianto.

La scelta del vettore viene effettuata sulla base dei consumi energetici del settore. A partire dai risultati degli studi condotti durante gli anni precedenti o dalla letteratura tecnico scientifica possono essere identificati i vettori maggiormente significativi in termini di consumo energetico e quindi scegliere quello su cui concentrare l'attenzione.

2.2.2 Presa di contatto con le aziende del settore

Dopo aver scelto il vettore energetico rispetto al quale analizzare la situazione si passa alla fase conoscitiva delle aziende del settore che saranno coinvolte nell'analisi. Tale fase è indirizzata alla conoscenza ed all'approfondimento del funzionamento dei sistemi produttivi dal punto di vista energetico.

La conoscenza deve partire necessariamente dall'analisi dei prodotti e dei processi dal punto di vista teorico. La letteratura tecnica e quella scientifica rappresentano una valida base per lo studio dei sistemi in esame. I modelli di prestazione che si basano su processi ideali provenienti dalla letteratura hanno il limite di essere spesso distanti da una rappresentazione fedele dei processi reali.

Per rendere la rappresentazione fornita dai modelli più rappresentativa possibile al funzionamento reale, c'è la necessità di raccogliere informazioni sulla gestione dei sistemi in modo tale da cercare di raggiungere un approccio che sia il più possibile comprensivo delle cause di miglioramento o peggioramento delle prestazioni.

La parte conoscitiva, oltre ad essere utile per la comprensione del funzionamento dei sistemi produttivi ed energetici sarà utile per la formulazione dei rapporti causa effetto per quanto riguarda l'andamento delle prestazioni e a fornire le basi per il progetto di indicatori di prestazione ideali.

L'analisi conoscitiva dovrà quindi approfondire vari aspetti tra cui la disponibilità di indicatori di prestazione che esulano da quelli presenti in letteratura, la tipologia di valutazioni possibili dall'analisi degli indicatori ed avere informazioni sui possibili margini di miglioramento.

Questa fase è descritta in maggior dettaglio nell'ambito della linea di azione sotto responsabilità dell'Università di Salerno relativa all'"Elaborazione di una metodologia per la caratterizzazione energetica dei principali settori produttivi italiani".

2.2.3 Definizione dei confini dell'analisi

Sulla base delle informazioni raccolte durante la fase conoscitiva, si possono definire gli obiettivi previsti dalla formulazione e dall'utilizzo degli indicatori di prestazione ed i confini di utilizzo degli stessi.

La definizione delle risorse e dei confini di analisi dipende in larga parte dalla tipologia di azienda che si vuole prendere come riferimento e dalla disponibilità di dati ed informazioni.

In questa parte occorre quindi definire il tipo di sistema di produzione che si intende analizzare e con quale livello di dettaglio. Come si è visto nella sezione precedente, la letteratura mette a disposizione esempi di analisi delle prestazioni calate su tutti i livelli aziendali.

Queste valutazioni sono condizionate dal tipo di azienda in esame e più in particolare da:

- Tipo di produzione dell'azienda (processo/manifatturiera). Questa caratteristica influenza fortemente il tipo di analisi che si vuole sviluppare. La letteratura analizzata mostra come i tentativi di definizione di indicatori di prestazioni di processo siano numerosi ed abbiano portato a buoni risultati. Per quanto riguarda invece gli indicatori per aziende manifatturiere, la letteratura indica pochi esempi e con numerose limitazioni. Tali limitazioni sono date dalle effettive difficoltà per l'attribuzione della quota parte dei consumi a ciascun prodotto lavorato, soprattutto nel caso di aziende con numerosi prodotti in catalogo.
- Specifiche del sistema di produzione basate sulle seguenti dimensioni:
 - Tipologia: produzione unitaria; produzione per lotti; produzione continua. La tipologia di produzione influisce fortemente sui flussi di energia necessari per le lavorazioni. Le produzioni continue hanno poche fermate per setup e poche fasi di spegnimento/accensione. Le produzioni per lotti hanno molti periodi in cui il sistema è acceso ma non produce.
 - Layout: linea, reparti, cellula. I consumi vengono fortemente influenzati dalla fase di spostamento del materiale, layout più compatti minimizzano i consumi.
 - Dimensione del mercato: singole commesse; commesse ripetitive; produzione basata su previsioni (MTS).
 - Grado di automazione: linea transfer automatica, controllo numerico, sistema di produzione flessibile, celle di produzione flessibili, linea di produzione flessibile.

Tali specifiche devono quindi essere tenute presenti in fase di calcolo degli indicatori e analisi dei risultati.

- Livello di dettaglio dell'analisi. Questa caratteristica può essere decisa in funzione dell'analisi che si intende fare ed influenza notevolmente la qualità del risultato del lavoro. Le analisi possono essere svolte a livello di singola lavorazione, di processo, di impianto e di settore. Ciascun livello porterà a dover raccogliere informazioni e dati di diversa tipologia, influenzando notevolmente i risultati. Riprendendo la classificazione degli indicatori in Tabella 1, possono essere definiti alcuni metodi e strumenti utilizzati per il calcolo degli indicatori di prestazione ideale. Per utilizzare gli indicatori di prestazione operativi si deve scendere ad un livello di dettaglio molto superiore arrivando alla singola lavorazione o al massimo a livello di processo per questo non si hanno indicatori strumenti di livello aggregato. In sono riportati i tre livelli di aggregazione analizzati in precedenza ed alcuni strumenti e metodi utilizzati per estrapolare informazioni utili per la definizione degli indici di prestazione.

Tabella 4. Metodi e strumenti per ciascun confine di analisi

Livello di aggregazione	Scala	Metodi e strumenti
Aggregato	Impresa - Sito produttivo	<ul style="list-style-type: none"> • Per le analisi a questo livello di aggregazione vengono utilizzati quasi esclusivamente dati a consuntivo rilevati con frequenza bassa e relativi soprattutto all'intero impianto o al settore di riferimento. Dati da fatturazioni o da strumenti di misura dei consumi e della produzione generali sono sufficienti. • Nel caso di disponibilità di dati provenienti da misurazioni i metodi statistici legati alla regressione lineare risultano essere i più applicati per l'estrapolazione di un modello fisico e di un valore medio dell'indicatore di prestazione. Il modello può in seguito essere utilizzato per il monitoraggio delle prestazioni. • Per definire le quote di energia consumate nelle singole parti del processo il metodo Divisia consente raggiungere ottimi risultati ed eliminare il problema dell'analisi dei residui. Alcuni metodi per la definizione delle quote di consumo sono basati sulla divisione dell'azienda su livelli analizzandola tramite un metodo top-down o bottom up. Altri si basano sull'Index Decomposition Analysis. • La scelta degli indicatori da utilizzare può essere effettuata attraverso la valutazione dell'impatto e dello sforzo per l'applicazione del metodo. • Gli indicatori consentono il monitoraggio dei trend a lungo termine e la definizione di politiche volte al miglioramento delle prestazioni ma non direttamente di interventi sull'azienda.
Disaggregato	Centro di lavoro	<ul style="list-style-type: none"> • A questo livello di aggregazione è necessario avere a disposizione dati su: la quantità di prodotti e le caratteristiche, mix produttivo, il valore aggiunto, il tipo di vettore energetico utilizzato, il costo dell'energia, i picchi di consumo, la tipologia di sistemi di produzione e gli impianti di servizio. I dati

		<p>dovrebbero avere frequenza di campionamento giornaliera/oraria.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nel calcolo del consumo energetico è possibile dividere il consumo in diretto (per la produzione) ed indiretto (per impianti di servizio). Nell’analisi del consumo diretto è possibile precisare la quota parte di consumo per il funzionamento dei macchinari e la parte di consumo dovuto alle condizioni operative. • Per l’attribuzione dei consumi è possibile costruire diagrammi causa effetto (diagrammi a lisca di Ishikawa), analisi attraverso i tempi di lavorazione, OEE, ecc. • È possibile caratterizzare i consumi ideali a partire da modelli fisici del processo (rari), o modelli statistici. • Il livello di aggregazione consente valutazioni di efficientamento dell’intero processo e delle procedure operative che influenzano i consumi.
<p>Processo/Impianto</p>	<p>Unità di lavoro</p>	<ul style="list-style-type: none"> • A questo livello è necessario considerare: il mix di prodotti, capacità del sistema, input e output del sistema, input esterni, condizioni climatiche, consumo generale di energia e per vettori. • Nel calcolo del consumo energetico è necessario dividere il consumo diretto in base alla quota per il processo e quella dovuta alle cause operative. • Un’analisi di processo consente di valutare i consumi ideali e operativi (come spiegato nella sezione precedente). • Per la definizione dei modelli di prestazione ideali si può ricorrere alla regressione lineare (singola o multipla), modelli exergetici, modelli basati sulla fisica del processo, modelli basati sulla durata delle attività, ecc. • L’identificazione delle cause dei consumi può avvenire attraverso l’analisi causa effetto utilizzando il diagramma di Ishikawa, analisi attraverso i tempi di lavorazione, OEE, ecc. • Il livello di aggregazione consente valutazioni di efficientamento delle varie fasi del processo e delle singole lavorazioni. Possono essere anche migliorate le procedure operative che influenzano i consumi.

2.2.4 Scelta degli indicatori

Sulla base delle fasi precedenti deve essere scelto un set di indicatori che possa essere rappresentativo della realtà in esame. In Tabella 2 sono presenti numerose tipologie di indicatori sintetici che possono essere usati per definire il livello di prestazione del sistema. Altri possono essere implementati a partire

dalle caratteristiche del sistema in esame. La sezione 1.4.1 può essere presa come riferimento per lo sviluppo di indici ideali ad hoc da confrontare con quelli a consuntivo
Nel caso in cui si scelga di compiere un'analisi a livello di processo, è possibile sviluppare un set di indicatori operativi come spiegato in 1.4.2.

2.2.5 Raccolta dei dati per calcolo degli indicatori

L'utilizzo degli indicatori appena descritti è subordinato ad un'attività di confronto tra le prestazioni del sistema ideale e quello del sistema reale.

La raccolta dati per il calcolo delle prestazioni di riferimento dovrebbe essere concentrata sui parametri di funzionamento ideale del sistema (parametri di targa), mentre per il calcolo delle prestazioni operative sarebbe necessario avere a disposizione un sistema di misurazione accurata dei parametri di funzionamento del sistema.

Questa fase è descritta in maggior dettaglio nell'ambito della linea di azione sotto responsabilità dell'Università di Salerno relativa all'"Elaborazione di una metodologia per la caratterizzazione energetica dei principali settori produttivi italiani".

2.2.6 Calcolo degli indicatori di prestazione

In funzione dei dati a disposizione e del tipo di analisi è possibile intraprendere il calcolo gli indicatori di prestazione. Si ricorda che le descrizioni degli indicatori di prestazione ideale e di prestazione operativa e del loro utilizzo sono riportate nelle sezioni 1.4.1 e 1.4.2.

Gli indicatori, in generale, possono essere calcolati tramite semplici operazioni matematiche utilizzando sia i dati relativi alle prestazioni di riferimento che quelli relativi alle prestazioni misurate.

2.2.7 Confronto dei risultati e proposte di miglioramento

Il confronto dei risultati degli indicatori di prestazione di riferimento con quelli a consuntivo derivanti dalle diagnosi o da campagne di misura specifiche permetterà di evidenziare le criticità del sistema produttivo, le potenziali aree di crescita e sviluppare dei piani di miglioramento delle prestazioni.

La corretta interpretazione dei dati ed il confronto tra i due campioni permettono di definire gli obiettivi ed in seguito di monitorarne i progressi.

Un sistema dettagliato di indicatori di prestazione come quello descritto consente di identificare facilmente le aree di miglioramento.

Il metodo per la misurazione delle prestazioni è molto semplice, più il valore dell'indicatore di prestazione si allontana dall'unità e maggiore la necessità di intervento all'interno dell'area definita.

I meccanismi di intervento raccolti nella Tabella 3 rappresentano un pratico spunto per la definizione degli interventi

Nella pratica, ad esempio se l'indicatore $\frac{\text{Energia per la produzione netta}}{\text{Energia per la produzione lorda}}$ è particolarmente basso rispetto agli altri significa che l'impianto non sta producendo come dovrebbe e che le fermate durante la produzione sono eccessive in numero o in durata. Ciò è dovuto alla presenza di cause che portano alla produzione di materiale non vendibile che quindi deve essere scartato. Le motivazioni della variazione di questi parametri possono risiedere nel peggioramento delle prestazioni della macchina dovuto all'usura ed alla mancata manutenzione, alla presenza di malfunzionamenti o alla variazione della qualità del materiale lavorato e del prodotto finale.

Allo stesso modo, se $\frac{\text{Energia per la produzione lorda}}{\text{Energia per utilizzo netto}}$ raggiunge un valore molto minore dell'unità la gestione della manutenzione deve essere rivista e corretta. Ciò significa che alcuni interventi dovranno essere

effettuati ad esempio variando la strategia di manutenzione, aumentando i controlli e gli interventi preventivi.

Dall'analisi dei singoli indicatori sarà quindi possibile identificare le debolezze del sistema e definire delle metodologie per il miglioramento delle prestazioni.

2.3 Conclusioni del capitolo

Il calcolo delle prestazioni energetiche di un sistema di produzione industriale è molto complesso ed è fortemente influenzato dal tipo di sistema in esame. La presenza di un elevato numero di componenti, sistemi, fonti energetiche e prodotti all'interno di un impianto industriale conferma la possibilità di intervento per l'ottimizzazione delle prestazioni e la diminuzione dei consumi.

In questa sezione è stato proposto un metodo per la caratterizzazione dei consumi e la valorizzazione attraverso alcuni indici di prestazione energetica di riferimento. Questi consentono sia l'analisi delle prestazioni sia la possibilità di indagare le cause di variazione delle stesse ed hanno l'obiettivo di supportare gli addetti alla gestione dell'energia nella definizione di una strategia di intervento.

Lo studio ha mostrato come l'elevato numero di meccanismi di intervento sia rappresentativo dei numerosi ambiti in cui si può intervenire per ridurre i consumi di energia.

Lo sviluppo di indici di prestazione di riferimento consentirà di identificare facilmente le grandezze in esame e proporre un confronto tra prestazioni di riferimento ed effettive. Tale confronto consente ancor di più di caratterizzare gli effetti di diversi apporti al consumo di energia, ad esempio è possibile studiare il contributo della gestione della manutenzione, della pianificazione, ecc. sulle prestazioni energetiche dell'impianto o dell'intera catena di approvvigionamento. Tutte queste informazioni forniscono indicazioni sugli interventi più importanti per il miglioramento delle prestazioni.

3 Conclusioni del lavoro

Il presente rapporto riassume le attività ed i risultati della prima annualità di attività sullo studio degli indicatori di prestazione energetica industriali.

La prima parte del lavoro ha riguardato l'analisi della letteratura scientifica con l'obiettivo di definire lo stato dell'arte degli indicatori di prestazione energetici. A partire dalla ricerca sui principali motori di ricerca di pubblicazioni scientifiche sono stati isolati circa 60 documenti che sono stati analizzati in base alla provenienza, all'anno di pubblicazione ed al settore industriale in esame. La lettura dei documenti ha fornito importanti informazioni sui metodi più applicati e sulle problematiche dell'applicazione degli indici di prestazione.

Le criticità più importanti evidenziate sono rappresentate dalla mancanza di indicatori di prestazione di riferimento (teorici o operativi) per la grande maggioranza dei settori industriali e la difficoltà nel confronto di realtà industriali differenti.

La seconda parte utilizza i risultati dell'analisi bibliografica per proporre un metodo di valutazione delle prestazioni sulla base di indicatori teorici e operativi. Il metodo si propone un approccio strutturato per arrivare alla definizione degli indicatori di riferimento, definendo le scelte da dover condurre per ogni fase e le alternative disponibili.

Nelle prossime annualità del progetto, la metodologia qui proposta sarà quindi declinata nel dettaglio per dei settori industriali specifici, definiti in collaborazione con ENEA, per arrivare alla valutazione di indicatori di prestazione di riferimento per alcuni principali settori energivori italiani.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] G. May, B. Stahl, M. Taisch, and D. Kiritsis, “Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework,” *J. Clean. Prod.*, vol. 167, pp. 1464–1489, 2017.
- [2] S. Meyers, B. Schmitt, M. Chester-jones, and B. Sturm, “Energy efficiency, carbon emissions, and measures towards their improvement in the food and beverage sector for six European countries,” *Energy*, vol. 104, pp. 266–283, 2016.
- [3] M. Benedetti *et al.*, “Maturity-based approach for the improvement of energy efficiency in industrial compressed air production and use systems,” *Energy*, vol. 186, Nov. 2019.
- [4] R. Kannan and W. Boie, “Energy management practices in SME — case study of a bakery in Germany,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 44, pp. 945–959, 2003.
- [5] M. Benedetti, F. Bonfà, V. Introna, A. Santolamazza, and S. Ubertini, “Real time energy performance control for industrial compressed air systems: Methodology and applications †,” *Energies*, vol. 12, no. 20, 2019.
- [6] UNI CEI EN ISO 50001:2018, “Sistemi di gestione dell’energia - Requisiti e linee guida per l’uso.” .
- [7] UNI CEI EN ISO 50006:2014, “Energy management systems - Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) - General principles and guidance.” .
- [8] V. Introna, V. Cesarotti, M. Benedetti, S. Biagiotti, and R. Rotunno, “Energy Management Maturity Model: An organizational tool to foster the continuous reduction of energy consumption in companies,” *J. Clean. Prod.*, vol. 83, no. 1994, pp. 108–117, 2014.
- [9] A. Gonzàles-Gil, R. Palacin, and P. Batty, “Optimal energy management of urban rail systems: Key performance indicators,” vol. 90, pp. 282–291, 2015.
- [10] W. Cai, F. Liu, O. Dinolov, J. Xie, P. Liu, and J. Tuo, “Energy benchmarking rules in machining systems,” *Energy*, vol. 142, pp. 258–263, 2018.
- [11] J. Ke, L. Price, M. McNeil, N. Z. Khanna, and N. Zhou, “Analysis and practices of energy benchmarking for industry from the perspective of systems engineering,” *Energy*, vol. 54, pp. 32–44, 2013.
- [12] C. F. Lindberg, S. Tan, J. Yan, and F. Starfelt, “Key Performance Indicators Improve Industrial Performance,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1785–1790, 2015.
- [13] A. Juaidi, F. AlFaris, F. G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro, “Energy benchmarking for shopping centers in Gulf Coast region,” *Energy Policy*, vol. 91, pp. 247–255, 2016.
- [14] D. Phylipsen, K. Blok, E. Worrell, and J. De Beer, “Benchmarking the energy efficiency of Dutch industry: An assessment of the expected effect on energy consumption and CO2 emissions,” *Energy Policy*, vol. 30, no. 8, pp. 663–679, 2002.
- [15] M. A. Mirzakhani, N. Tahouni, and M. H. Panjeshahi, “Energy benchmarking of cement industry, based on Process Integration concepts,” *Energy*, vol. 130, pp. 382–391, 2017.
- [16] S. Nadolski, B. Klein, A. Kumar, and Z. Davaanyam, “An energy benchmarking model for mineral comminution,” *Miner. Eng.*, vol. 65, pp. 178–186, 2014.
- [17] S. Longo *et al.*, “Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement,” *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 1251–1268, 2016.
- [18] K. W. Mui, L. T. Wong, and L. Y. Law, “An energy benchmarking model for ventilation systems of air-conditioned offices in subtropical climates,” *Appl. Energy*, vol. 84, no. 1, pp. 89–98, 2007.
- [19] W. Chung, Y. V. Hui, and Y. M. Lam, “Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings,” *Appl. Energy*, vol. 83, no. 1, pp. 1–14, 2006.
- [20] J. Ahn, S. Cho, and D. H. Chung, “Development of a statistical analysis model to benchmark the energy use intensity of subway stations,” *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 488–496, 2016.
- [21] L. K. Sahoo, S. Bandyopadhyay, and R. Banerjee, “Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1382–1396, 2014.

- [22] S. S. Asl, N. Tahouni, and M. H. Panjeshahi, "Energy benchmarking of thermal power plants using Pinch Analysis," *J. Clean. Prod.*, vol. 171, pp. 1342–1352, 2018.
- [23] K. Cullinane, T.-F. Wang, D.-W. Song, and P. Ji, "The technical efficiency of container ports: Comparing data envelopment analysis and stochastic frontier analysis," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 40, no. 4, pp. 354–374, 2006.
- [24] J. Chen, Y. Wu, M. Song, and Z. Zhu, "Stochastic frontier analysis of productive efficiency in China's Forestry Industry," *J. For. Econ.*, vol. 28, pp. 87–95, 2016.
- [25] S. Carlson and a Walburger, "Energy index development for benchmarking water and wastewater utilities," *T American Water Work. Assoc. Res. Found. CDH Energy Corp., Evansville, Wis*, 2007.
- [26] M. Cepin, "Reliability and Performance Indicators of Power Plants," in *Assessment of Power System Reliability*, Springer-Verlag, Ed. London, 2011.
- [27] L. I. Vestly Bergh, S. Hinna, S. Leka, and A. Jain, "Developing a performance indicator for psychosocial risk in the oil and gas industry," *Saf. Sci.*, vol. 62, pp. 98–106, 2014.
- [28] V. B. Samuel, P. Agamuthu, and M. A. Hashim, "Indicators for assessment of sustainable production: A case study of the petrochemical industry in Malaysia," *Ecol. Indic.*, vol. 24, pp. 392–402, Jan. 2013.
- [29] R. Menghi, A. Papetti, M. Germani, and M. Marconi, "Energy efficiency of manufacturing systems: A review of energy assessment methods and tools," *J. Clean. Prod.*, vol. 240, p. 118276, 2019.
- [30] M. Ruth, E. Worrell, and L. Price, "A process-step benchmarking approach to energy use at industrial facilities: Examples from the iron and steel and cement industries," *Proc. ACEEE Summer Study Energy Effic. Ind.*, vol. 1, pp. 149–160, 2001.
- [31] K. Tanaka, "Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy," *Energy Policy*, vol. 36, no. 8, pp. 2877–2892, 2008.
- [32] K. Bunse, M. Vodicka, P. Schönsleben, M. Brühlhart, and F. O. Ernst, "Integrating energy efficiency performance in production management e gap analysis between industrial needs and scientific literature," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 6–7, pp. 667–679, 2011.
- [33] G. May, M. Taisch, V. V. Prabhu, and I. Barletta, "Energy related key performance indicators-state of the art, gaps and industrial needs," in *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 2013, vol. 414, pp. 257–267.
- [34] G. May, M. Taisch, V. V. Prabhu, and I. Barletta, "Energy related key performance indicators-state of the art, gaps and industrial needs," *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, vol. 414, pp. 257–267, 2013.
- [35] S. Kreitlein, T. Rackow, and J. Franke, "Energy KPI's, challenges for sustainable manufacturing strategies, analysis of existing rules and indicators in an industrial environment in relation to the establishment of energy benchmark," *Adv. Mater. Res.*, vol. 1018, pp. 501–508, 2014.
- [36] B. W. Ang, "Decomposition of Aggregate Energy and Gas Emission Intensities for Industry : A Refined Divisia Index Method Author (s) : B . W . Ang and Ki-Hong Choi Published by : International Association for Energy Economics Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/>," *Econ. Energy*, vol. 18, no. 3, pp. 59–73, 1997.
- [37] K. Narula and B. S. Reddy, "Three blind men and an elephant: The case of energy indices to measure energy security and energy sustainability," *Energy*, vol. 80, pp. 148–158, Feb. 2015.
- [38] M. J. Horowitz and P. Bertoldi, "A harmonized calculation model for transforming EU bottom-up energy efficiency indicators into empirical estimates of policy impacts," *Energy Econ.*, vol. 51, pp. 135–148, Sep. 2015.
- [39] H. W. Jeon, M. Taisch, and V. V. Prabhu, "Modelling and analysis of energy footprint of manufacturing systems," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 53, no. 23, pp. 7049–7059, Dec. 2015.
- [40] X. Y. Xu and B. W. Ang, "Multilevel index decomposition analysis: Approaches and application," *Energy Econ.*, vol. 44, pp. 375–382, 2014.
- [41] C. Song *et al.*, "Research on energy efficiency evaluation based on indicators for industry sectors in China," *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 550–562, Dec. 2014.
- [42] L. C. Siebert *et al.*, "Energy efficiency indicators assessment tool for the industry sector," in *2014 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, PES T and D-LA 2014 - Conference Proceedings*, 2014, vol. 2014-Octob.

- [43] C. Ma, "A multi-fuel, multi-sector and multi-region approach to index decomposition: An application to China's energy consumption 1995-2010," *Energy Econ.*, vol. 42, pp. 9–16, 2014.
- [44] B. Lin and K. Du, "Decomposing energy intensity change: A combination of index decomposition analysis and production-theoretical decomposition analysis," *Appl. Energy*, vol. 129, pp. 158–165, 2014.
- [45] G. A. Boyd, "Estimating the changes in the distribution of energy efficiency in the U.S. automobile assembly industry," *Energy Econ.*, vol. 42, pp. 81–87, 2014.
- [46] O. A. Olanrewaju, A. A. Jimoh, and P. A. Kholopane, "Assessing the energy potential in the South African industry: A combined IDA-ANN-DEA (Index Decomposition Analysis-Artificial Neural Network-Data Envelopment Analysis) model," *Energy*, vol. 63, pp. 225–232, Dec. 2013.
- [47] B. W. Ang and X. Y. Xu, "Tracking industrial energy efficiency trends using index decomposition analysis," *Energy Econ.*, vol. 40, pp. 1014–1021, 2013.
- [48] O. A. Olanrewaju, A. A. Jimoh, and P. A. Kholopane, "Integrated IDA-ANN-DEA for assessment and optimization of energy consumption in industrial sectors," *Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 629–635, 2012.
- [49] C. Mendes, L. S. De Souza, R. Kalid, K. Esquerre, and A. Kiperstok, "Assessment of the uncertainty associated with the energy indicator," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 6, pp. 3156–3164, 2011.
- [50] F. Aguirre, J. R. Villalobos, P. E. Phelan, and R. Pacheco, "Assessing the relative efficiency of energy use among similar manufacturing industries," *Int. J. Energy Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 477–488, May 2011.
- [51] G. Boyd, E. Dutrow, and W. Tunnessen, "The evolution of the ENERGY STAR® energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use," *J. Clean. Prod.*, vol. 16, no. 6, pp. 709–715, 2008.
- [52] A. Azadeh, M. S. Amalnick, S. F. Ghaderi, and S. M. Asadzadeh, "An integrated DEA PCA numerical taxonomy approach for energy efficiency assessment and consumption optimization in energy intensive manufacturing sectors," *Energy Policy*, vol. 35, no. 7, pp. 3792–3806, 2007.
- [53] G. A. Boyd, "A method for measuring the efficiency gap between average and best practice energy use: The ENERGY STAR industrial energy performance indicator," *J. Ind. Ecol.*, vol. 9, no. 3, pp. 51–65, 2005.
- [54] B. W. Ang, "Decomposition methodology in industrial demand analysis," vol. 20, no. 1, pp. 1081–1095, 1995.
- [55] H. Wicaksono, T. Belzner, and J. Ovtcharova, "Efficient energy performance indicators for different level of production organizations in manufacturing companies," *IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, vol. 414, pp. 249–256, 2013.
- [56] D. Goldstein and J. A. Almaguer, "Developing a Suite of Energy Performance Indicators (EnPIs) to Optimize Outcomes." .
- [57] G. May, M. Taisch, K. Geoghegan, and M. Beccaris, "Improving Energy Efficiency in Manufacturing via KPI Intelligence Based on Plant Integration." [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/263298359_Improving_Energy_Efficiency_in_Manufacturing_via_KPI_Intelligence_Based_on_Plant_Integration. [Accessed: 10-Dec-2019].
- [58] Y. Seow and S. Rahimifard, "A framework for modelling energy consumption within manufacturing systems," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 258–264, 2011.
- [59] J. C. Van gorp, "Using key performance indicators to manage energy costs," *Strateg. Plan. Energy Environ.*, vol. 25, no. 2, pp. 9–25, 2005.
- [60] G. A. Boyd, "Comparing the statistical distributions of energy efficiency in manufacturing: meta-analysis of 24 Case studies to develop industry-specific energy performance indicators (EPI)," *Energy Effic.*, vol. 10, no. 1, pp. 217–238, 2017.
- [61] J. R. G. Sarduy, P. R. V. Felipe, Y. D. Torres, M. A. Á. G. Plascencia, V. S. Santos, and D. Haeseldonckx, "A new energy performance indicator for energy management system of a wheat mill plant," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 8, no. 4, pp. 324–330, 2018.
- [62] J. G. Rogers, S. J. Cooper, and J. B. Norman, "Uses of industrial energy benchmarking with reference

- to the pulp and paper industries," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 95, no. June, pp. 23–37, 2018.
- [63] A. Corsini, F. Bonacina, L. De Propriis, S. Feudo, and A. Marchegiani, "Multivariate Key Performance Indicator of baking process," *Energy Procedia*, vol. 82, pp. 554–561, 2015.
- [64] A. Kluczek and P. Olszewski, "Energy audits in industrial processes," *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 3437–3453, 2017.
- [65] G. May, B. Stahl, M. Taisch, and D. Kiritsis, "Energy management in manufacturing: From literature review to a conceptual framework," *J. Clean. Prod.*, vol. 167, pp. 1464–1489, 2016.
- [66] P. Liu, F. Liu, and H. Qiu, "A novel approach for acquiring the real-time energy efficiency of machine tools," *Energy*, vol. 121, pp. 524–532, 2017.
- [67] N. Wang, Z. Wen, M. Liu, and J. Guo, "Constructing an energy efficiency benchmarking system for coal production," *Appl. Energy*, vol. 169, pp. 301–308, 2016.
- [68] G. May, I. Barletta, B. Stahl, and M. Taisch, "Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency," *Appl. Energy*, vol. 149, pp. 46–61, Jul. 2015.
- [69] M. Coroiu and M. Chindris, "Energy efficiency indicators and methodology for evaluation of energy performance and retained savings," in *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*, 2014.
- [70] J. Madan, M. Mani, J. H. Lee, and K. W. Lyons, "Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: Injection molding case study," *J. Clean. Prod.*, vol. 105, pp. 157–170, Oct. 2014.
- [71] G. May, I. Barletta, B. Stahl, and M. Taisch, "Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency," *Appl. Energy*, vol. 149, pp. 46–61, 2015.
- [72] B. S. Linke, G. J. Corman, D. A. Dornfeld, and S. Tönissen, "Sustainability indicators for discrete manufacturing processes applied to grinding technology," in *Journal of Manufacturing Systems*, 2013, vol. 32, no. 4, pp. 556–563.
- [73] M. Dörr, S. Wahren, and T. Bauernhansl, "Methodology for energy efficiency on process level," in *Procedia CIRP*, 2013, vol. 7, pp. 652–657.
- [74] G. Boyd, "A statistical approach to plant-level energy benchmarks and baselines: A manufacturing-plant energy performance indicator," *Carbon Manag. Technol. Conf. 2012*, vol. 0, no. 77, pp. 799–806, 2012.
- [75] K. Bunse, M. Vodicka, P. Schönsleben, M. Brühlhart, and F. O. Ernst, "Integrating energy efficiency performance in production management - gap analysis between industrial needs and scientific literature," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 6–7, pp. 667–679, 2011.
- [76] B. Swords, E. Coyle, and B. Norton, "An enterprise energy-information system," *Appl. Energy*, vol. 85, no. 1, pp. 61–69, 2008.
- [77] D. T. Askounis and J. Psarras, "Information system for monitoring and targeting (M and T) of energy consumption in breweries," *Energy*, vol. 23, no. 5, pp. 413–419, 1998.
- [78] R. Mahamud, W. Li, and S. Kara, "Energy characterisation and benchmarking of factories," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 1, pp. 457–460, 2017.
- [79] Y. Wang and Z. Ji, "Energy efficiency quantitative analysis method of discrete manufacturing system," in *Modern Physics Letters B*, 2017, vol. 31, no. 19–21.
- [80] S.-C. Oh and A. Hildreth, "Estimating the Technical Improvement of Energy Efficiency in the Automotive Industry—Stochastic and Deterministic Frontier Benchmarking Approaches," *Energies*, vol. 7, no. 9, pp. 6196–6222, Sep. 2014.
- [81] S. Salvatori, M. Benedetti, F. Bonfà, V. Introna, and S. Ubertini, "Inter-sectorial benchmarking of compressed air generation energy performance: Methodology based on real data gathering in large and energy-intensive industrial firms," *Appl. Energy*, vol. 217, 2018.
- [82] M. Benedetti, F. Bonfà, I. Bertini, V. Introna, and S. Ubertini, "Explorative study on Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use: First steps towards the creation of a benchmarking system for large and energy-intensive industrial firms," *Appl. Energy*, no. July, pp. 0–1,

2017.

- [83] T. G. Gutowski, M. S. Branham, J. B. Dahmus, A. J. Jones, A. Thiriez, and D. P. Sekulic, "Thermodynamic Analysis of Resources Used in Manufacturing Processes," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, no. 5, pp. 1584–1590, Mar. 2009.
- [84] G. E. Valencia, Y. Cardenas, E. S. Ramos, A. Morales, and J. C. Campos, "Energy saving in industrial process based on the equivalent production method to calculate energy performance indicators," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 57, no. June, pp. 709–714, 2017.
- [85] Z. K. Morvay and D. D. Gvozdenac, *Applied Industrial Energy and Environmental Management*. 2008.

5 Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il gruppo di ricerca coinvolto nelle attività relative al risparmio energetico è così composto:

- **Andrea Luigi Facci** nel luglio 2012 ha conseguito il dottorato di ricerca in "Ingegneria energetica e ambientale" presso l'Università di Roma "Tor Vergata" discutendo la tesi "Sviluppo e validazione di uno strumento di simulazione di motori multi-scala". Da gennaio 2012 ad agosto 2012 è stato impiegato come ricercatore presso il "Politecnico" della New York University. Da settembre 2012 a febbraio 2013 è stato impiegato come ricercatore a contratto presso il Dipartimento di Economia e Commercio dell'Università della "Toscana" e presso CINTEST. Da aprile 2013 svolge attività di ricerca e docenza presso l'Università degli Studi della Toscana prima come Ricercatore a tempo determinato di tipo A ora come Ricercatore a Tempo Determinato di tipo B ai sensi della L. 240/10 nel SSD Ing-Ind/08.
- **Mauro Scungio** Le attività di ricerca dell'Ing. Mauro Scungio sono legate principalmente a temi relativi allo sviluppo di sistemi energetici sostenibili e alla termo-fluidodinamica numerica (CFD). In particolare, tali attività sono legate allo studio e all'ottimizzazione delle prestazioni di innovative configurazioni turbine eoliche ad asse verticale, mediante misure realizzate in galleria del vento e simulazioni numeriche CFD, nonché allo sviluppo di veicoli ad elevata efficienza energetica, mediante ottimizzazione aerodinamica in galleria del vento con tecnica di misura di tipo PIV (Particle Image Velocimetry) e simulazioni numeriche CFD. Nell'ambito della termo-fluidodinamica numerica, le attività sono volte allo sviluppo di algoritmi innovativi per la simulazione numerica di flussi turbolenti in regime stazionario e transitorio e di dispersione di inquinanti.
- **Simone Salvatori** dottorando di Impianti Meccanici, esperto di impianti industriali e metodologie per il controllo dei consumi energetici.