



Ricerca di Sistema elettrico

# Efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa: metodologia di benchmarking delle prestazioni e strumento di supporto alle decisioni per l'efficientamento energetico

*M. Benedetti, V. Introna, A. Facci, S. Ubertini*



EFFICIENZA ENERGETICA DEI SISTEMI ARIA COMPRESSA: METODOLOGIA DI BENCHMARKING DELLE PRESTAZIONI E STRUMENTO DI SUPPORTO ALLE DECISIONI PER L'EFFICIENTAMENTO ENERGETICO

M. Benedetti, V. Introna (Università di Roma Tor Vergata), A. Facci, S. Ubertini (Università della Tuscia)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA


Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici"

Progetto: "Processi e macchinari industriali"

Obiettivo: B "Efficientamento di processi industriali"

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa: metodologia di benchmarking delle prestazioni e strumento di supporto alle decisioni per l'efficientamento energetico".

Responsabile scientifico ENEA: Domenico Santino.

Responsabile scientifico Università degli Studi della Tuscia: Stefano Ubertini



## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA PER IL BENCHMARKING DELL'EFFICIENZA ENERGETICA DEI SISTEMI ARIA COMPRESSA.....	7
2.1 LO STATO DELL'ARTE: GLI INDICI DI PERFORMANCE ENERGETICA E IL BENCHMARKING ENERGETICO.....	7
2.2 LO STATO DELL'ARTE: GLI INDICI DI PERFORMANCE ENERGETICA PER I SISTEMI ARIA COMPRESSA.....	13
2.3 LA METODOLOGIA PROPOSTA.....	14
2.3.1 <i>Definizione degli indici</i> .....	14
2.3.2 <i>Analisi dei dati di consumo ed efficienza dei Sistemi Aria Compressa nei settori industriali sensibili</i> .....	16
2.3.3 <i>Progettazione di uno strumento di benchmarking e valutazione delle performances</i> .....	19
2.4 APPLICAZIONE DELLA PROPOSTA AI SETTORI INDUSTRIALI SENSIBILI.....	21
2.4.1 <i>Metallurgia</i> .....	21
2.4.2 <i>Fabbricazione di prodotti chimici</i> .....	24
2.4.3 <i>Fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici</i> .....	27
2.4.4 <i>Fabbricazione di prodotti in metallo (esclusi macchinari e attrezzature)</i> .....	30
2.4.5 <i>Fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi</i> .....	33
2.4.6 <i>Fabbricazione di articoli in materie plastiche</i> .....	36
2.4.7 <i>Industrie tessili</i> .....	39
2.4.8 <i>Industrie alimentari</i> .....	42
2.4.9 <i>Fabbricazione di carta e prodotti di carta</i> .....	46
2.4.10 <i>Analisi trans-settoriale dell'indice di efficienza energetica della fase di generazione dell'aria compressa</i> 49	
2.4.11 <i>Sviluppo delle Matrici di Assessment per il settore metallurgico</i> .....	50
2.5 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	55
3 SVILUPPO DI UNO STRUMENTO PER IL SUPPORTO ALLE DECISIONI PER L'EFFICIENTAMENTO DEI SISTEMI ARIA COMPRESSA: IL CASEEMM (COMPRESSED AIR SYSTEMS ENERGY EFFICIENCY MATURITY MODEL).....	57
3.1 I MODELLI DI MATURITÀ: STRUTTURA E CARATTERISTICHE.....	57
3.2 I MODELLI DI MATURITÀ: APPLICAZIONI ALL'AMBITO ENERGETICO.....	58
3.3 PROGETTAZIONE DEL CASEEMM (COMPRESSED AIR SYSTEMS ENERGY EFFICIENCY MATURITY MODEL).....	60
3.3.1 <i>Definizione di livelli e dimensioni</i> .....	60
3.3.1.1 <i>Consapevolezza, conoscenza e competenza</i> .....	63
3.3.1.2 <i>Approccio metodologico</i> .....	63
3.3.1.3 <i>Gestione delle prestazioni energetiche</i> .....	64
3.3.1.4 <i>Implementazione "Best Practices" e adozione di "Best Available Technologies"</i> .....	65
3.3.2 <i>Progettazione del questionario di self-assessment e della rappresentazione dei risultati</i> .....	67
3.3.3 <i>Validazione del modello attraverso l'applicazione ad un caso di studio</i> .....	79
3.4 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	82
4 CONCLUSIONI.....	83
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	84
6 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	87

## Sommario

I Sistemi Aria Compressa sono uno dei sistemi maggiormente diffusi ed energivori all'interno degli stabilimenti industriali di tutto il mondo, arrivando a percentuali di consumo normalmente intorno al 10% del totale. Tuttavia, metodologie, strumenti e valori di benchmarking (soprattutto valori basati su dati reali e non nominali, riferiti non solo alla fase di progettazione, ma anche a quella di gestione e utilizzo dell'impianto e all'intero impianto piuttosto che alla sola centrale di generazione) non sono attualmente disponibili né diffusi. Scopo del progetto di ricerca, di cui questo documento rappresenta il report dei risultati della prima annualità, è appunto quello di fornire tali valori, nonché metodologie, strumenti e mezzi di supporto alle decisioni aziendali nell'ambito dell'efficientamento energetico dei Sistemi Aria Compressa.

In questa prima fase sono state condotte in parallelo due attività che contribuiscono al raggiungimento di tale obiettivo e che sono strettamente interconnesse tra di loro, ovvero lo sviluppo di una metodologia per il benchmarking dell'efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa e di un modello di maturità che aiuti le aziende, una volta avuta un'idea quantitativa dello stato di efficienza del proprio impianto, a sviluppare una "road map" per la riduzione dei consumi, evidenziando le aree di sviluppo e le politiche decisionali sulle quali intervenire.

Entrambe le attività sono basate su un ampio studio della letteratura e svolte in stretta collaborazione con l'Unità Tecnica Efficienza Energetica dell'ENEA.

Come risultato delle attività, sono stati ottenuti dei valori di benchmark dell'intero Sistema Aria Compressa e della fase di generazione dell'aria compressa per nove diversi settori industriali, giudicati maggiormente sensibili alla tematica. È inoltre stato realizzato uno strumento per consentire alle aziende di visualizzare in maniera immediata e intuitiva i risultati del benchmarking con altre aziende dello stesso settore e di tenere traccia del proprio percorso di sviluppo. Infine, è stato progettato e testato un modello di maturità (denominato CASEEMM, Compressed Air Systems Energy Efficiency Maturity Model), che, da un lato possa essere messo a disposizione delle aziende per aiutarle nel difficile processo di individuare le aree di intervento più profittevoli per l'incremento dell'efficienza energetica dell'impianto, e dall'altro possa essere di aiuto per le successive fasi del progetto, in modo da consentire una raccolta delle informazioni qualitative sullo stato di efficientamento in Italia di questi sistemi e mantenere un dialogo aperto e costante con il mondo industriale.

## 1 Introduzione

Il lavoro presentato nel seguito del report è il risultato della prima annualità di un'attività triennale che prevede i seguenti obiettivi:

- L'individuazione indici di benchmark e baseline per settore produttivo;
- La definizione di linee guida e buone pratiche per la riduzione dei consumi degli impianti di produzione, trattamento, distribuzione e utilizzo dell'aria compressa;
- La realizzazione di strumenti di supporto alle decisioni (DSS, Decision Support Systems) in grado di indirizzare le aziende di vari settori produttivi verso l'adozione di tali buone pratiche secondo le modalità e le specifiche esigenze del settore e dell'impianto.

In questa prima fase il gruppo di ricerca si è concentrato sulla messa a punto di metodologie e strumenti che potessero rappresentare una base di partenza per sviluppare, negli anni successivi, il seguito del lavoro in stretta sinergia con il mondo aziendale, mantenendo aperto un contatto diretto e costante con le industrie e impegnandosi quindi nel trasferimento delle conoscenze e nella realizzazione di strumenti di supporto alle decisioni.

In particolare, l'attività della presente annualità è stata suddivisa in due fasi, descritte nei due capitoli corrispondenti del report:

- Lo sviluppo di una metodologia per il benchmarking dell'efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa;
- Lo sviluppo di uno strumento per il supporto alle decisioni per l'efficientamento dei Sistemi Aria Compressa.

Entrambe le fasi, come meglio dettagliato all'interno del report, sono state precedute da un'approfondita analisi della letteratura riguardante sia le metodologie che i contenuti utilizzati, che ha consentito di sviluppare il progetto a partire da una solida base di conoscenze e di inquadrare il lavoro realizzato all'interno di un più ampio filone di ricerca internazionale, che riguarda la misura e il benchmarking delle performance energetiche, l'efficientamento dei Sistemi Aria Compressa e lo sviluppo di linee guida per il miglioramento delle performance e il trasferimento delle conoscenze.

Per quanto riguarda il benchmarking dell'efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa, è stato identificato un set di indicatori che consente alle aziende di poter comparare le proprie performance sia per la generazione che per l'utilizzo dell'aria compressa.

Grazie alla stretta e continua collaborazione con l'Unità Tecnica Efficienza Energetica dell'ENEA, è stato possibile utilizzare le informazioni derivanti dalla grande quantità di dati ottenuti a seguito dell'implementazione del D.Lgs. 102/2014 per fornire una prima valutazione degli indicatori individuati, basata su dati reali e non nominali, provenienti dalle aziende stesse e ottenuta attraverso analisi statistiche relative ad un campione di siti produttivi e impianti molto ampio.

Tali indici sono stati valutati per nove diversi settori industriali, considerati maggiormente sensibili al tema dell'efficientamento energetico del Sistema Aria Compressa perché fortemente impattati dal suo consumo.

Oltre a tali valori, al fine di rendere maggiormente efficace il lavoro realizzato e quindi di trasformarlo in uno strumento che rendesse possibile per le aziende una visualizzazione immediata e intuitiva dei risultati del benchmarking, è stato sviluppato un metodo per la realizzazione di Matrici di Assessment. Il metodo è stato poi testato sul settore metallurgico. Tali matrici consentono alle aziende di visualizzare la propria posizione rispetto alle altre aziende dello stesso settore in termini di consumo per la produzione di aria compressa ed efficienza in funzione della quantità di prodotto finito realizzato, nonché di tracciare l'evoluzione di tale posizionamento nel tempo.

Per completare l'analisi quantitativa con informazioni di tipo qualitativo, nella seconda fase della prima annualità di progetto, abbiamo realizzato un modello di maturità per l'efficienza energetica del Sistema Aria Compressa (il CASEEMM, Compressed Air Systems Energy Efficiency Maturity Model).

Il modello è stato realizzato individuando, ordinando e strutturando su diversi livelli di maturità le principali "Best Practices", "Best Available Techniques" e "Best Available Technologies" riguardanti la gestione dell'energia in generale e i Sistemi Aria Compressa in particolare. Il modello ottenuto, articolato in cinque diversi livelli di maturità e quattro dimensioni, può essere utilizzato dalle aziende per confrontare il proprio livello di efficienza non solo con le altre aziende dello stesso settore, ma anche con degli standard assoluti di eccellenza. Il modello sarà poi utilizzato nel prossimo biennio per incrociare dati quantitativi e qualitativi, e analizzare quanto la diffusione delle "Best Practices", "Best Available Techniques" e "Best Available Technologies" ha inciso e può ancora incidere sul risparmio di energia nei settori industriali considerati.

## 2 Sviluppo di una metodologia per il benchmarking dell'efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa

### 2.1 *Lo stato dell'arte: gli Indici di Performance Energetica e il benchmarking energetico*

La misura, il monitoraggio, il controllo nel tempo e il benchmarking delle performance energetiche degli impianti industriali e dei loro sottosistemi (tra i quali i Sistemi Aria Compressa) rappresentano il primo, strategico passo per la comprensione delle loro modalità di consumo e per l'identificazione rapida, sistematica ed efficace delle opportunità di efficientamento energetico.

Tali attività risultano inoltre essenziali per la corretta implementazione dei Sistemi di Gestione dell'Energia e, più in generale, di tutte quelle pratiche di gestione dell'energia basate sul miglioramento continuo e sul coinvolgimento attivo delle persone [1, 2]. Queste pratiche sono sempre più diffuse in ambito industriale e richiedono la definizione di indici e dei relativi valori di riferimento attraverso i quali confrontare le proprie prestazioni energetiche, al fine di definire possibili percorsi di sviluppo e di monitorare e verificare i propri progressi continuamente nel tempo. Ciò consente quindi di affrontare l'efficientamento energetico in maniera organica e sistematica [3].

I principali obiettivi di tali indici, a prescindere dalla specifica finalità con la quale vengono formulati, sono [4]:

- Estrarre solamente le informazioni più rilevanti riguardo la performance energetica del sistema, limitandone la quantità;
- Fornire una rappresentazione globale e accurata dell'attuale performance, essenziale per identificare le opportunità di efficientamento;
- Facilitare la definizione di obiettivi di efficientamento, fornendo uno strumento di monitoraggio per il progresso delle misure di efficientamento implementate.

Nella letteratura tecnico-scientifica esistono diversi tentativi di definizione di Indici di Performance Energetica, applicabili a diversi oggetti e a diversi livelli di analisi. Alcuni di questi indici nascono con finalità legate all'analisi dell'andamento dei consumi energetici di singoli siti industriali nel tempo, altri alla scelta delle migliori tecnologie o strategie per l'efficienza energetica da adottare, altri ancora al confronto con sistemi differenti e al benchmarking. La seguente figura rappresenta una sintesi grafica delle tipologie di Indici di Performance Energetica più utilizzati in letteratura (sezione verde), a cui vengono associati i relativi oggetti di analisi (sezione blu) e le finalità per le quali vengono applicati (sezione arancione).



Figura 1. Misure e indici di performance energetica (adattato da [5])

In [6, 7] tali Indici 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):

- “Indici 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);
- “Indici 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);
- “Indici 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. Driver utilizzati per la classificazione degli Indici di Performance Energetica (adattato da [7])

Livello di aggregazione	di	Livello decisionale	Scala
Aggregato		Strategico	Impresa Sito produttivo
Disaggregato		Tattico	Centro di lavoro
Processo/Impianto		Operativo	Unità di lavoro

Con riferimento a tale classificazione e alla Figura 1, si riporta in Tabella 2 l'elenco esteso degli Indici di Performance Energetica maggiormente utilizzati in letteratura, per i quali viene indicata anche la tipologia (distinguendo in particolare tra indici di natura fisica o economica) e la formulazione.

**Tabella 2. Elenco degli Indici di Performance Energetica maggiormente utilizzati in letteratura (adattato da [6])**

<b>Indicatore (denominazione originale)</b>	<b>Tipologia</b>	<b>Applicazione</b>	<b>Formula/Unità di misura (definizione originale)</b>
<b>Energy Intensity</b>	Economico	Livello aggregato	Energy consumption/ economic term
<b>Specific energy consumption</b>	Fisico	Livello disaggregato	GJ per t
<b>Energy intensity</b>	Macro-economico	Livello aggregato	Energy consumption/ monetary variables (GDP)
<b>Degree of efficiency</b>	Ingegneristico	Livello aggregato	Net energy /used primary energy
<b>Final energy efficiency improvement</b>	Fisico	Livello nazionale	Energy savings per year
<b>Thermodynamic energy efficiency</b>	Termodinamico	Misure derivate dalla termodinamica	Actual energy usage related to an "ideal" process
<b>Physical-thermodynamic energy efficiency</b>	Ibrido	Misurazione del servizio o prodotto finale realizzato dal processo	Actual energy usages/ tonnes or passenger miles
<b>Economic-thermodynamic energy efficiency</b>	Ibrido	Misurazione del servizio o prodotto finale realizzato dal processo	Energy usage in conventional thermodynamic units/output in terms of market price
<b>Economic energy efficiency</b>	Economico	Misura in termini di valore di mercato	Energy input in monetary terms/ output in monetary terms
<b>Energy efficiency measurement</b>	Economico	Attività di un settore	Energy consumption/ value added or value of shipments
<b>Specific energy consumption</b>	Fisico	Livello di processo, confront tra più paesi	Energy use/ physical unit of production
<b>Thermal energy efficiency of equipment</b>	Fisico	Per un singolo macchinario	Energy value available for production/ input energy value
<b>Energy consumption intensity</b>	Fisico	Più ampio degli indicatori termici e termodinamici: aziende, ecc.	Energy consumption/ physical output value
<b>Absolute amount of energy consumption</b>	Fisico	Insieme all'indicazione dei volumi di produzione	Energy value
<b>Diffusion rates of equipment</b>	Fisico	Focalizzato su una particolare tecnologia ad elevata efficienza energetica	Rate of deployment of technology
<b>Industrial energy intensity</b>	Fisico	Confronto dei dati di efficienza riguardo sotto-settori tra Paesi diversi	Energy use/ unit of industrial output, e.g. GJ/t
<b>Specific energy consumption</b>	Fisico	A livello di settore	e.g. GJ/t

<b>Energy performance indicator</b>	Statistico	A livello di stabilimento	Percentile ranking of the energy efficiency
-------------------------------------	------------	---------------------------	---

Dall'analisi della letteratura finora introdotta è evidente come gli Indici di Performance siano solitamente utilizzati ai fini di benchmarking solo ad un livello molto aggregato, considerando come oggetto di analisi principalmente interi stabilimenti, aziende o addirittura nazioni [8]. La possibilità di ottenere informazioni rilevanti e una guida nella scelta delle azioni di efficientamento energetico da implementare resta immutata a livello maggiormente disaggregato (ad esempio, considerando come oggetto di analisi singoli sistemi o impianti). Quello che cambia è la disponibilità dei dati necessari per stabilire valori di benchmark affidabili. I benchmark costituiscono infatti un utile supporto decisionale per le aziende quando sono definiti sulla base di dati misurati relativi ad un campione sufficientemente esteso, in modo da considerare le condizioni reali di funzionamento dei sistemi e non semplicemente quelle nominali, difficilmente ottenibili nella conduzione e gestione degli impianti quotidiana.

Proprio la mancanza di valori e strumenti di benchmark a livello di impianto, ed in particolare per i Sistemi Aria Compressa, ha motivato questo lavoro, unitamente alla possibilità di raccogliere dati rilevanti a seguito dell'implementazione del D.Lgs. 102/2014. Oltre all'analisi dei dati di consumo e produzione di aria compressa, si è scelto di progettare e realizzare anche uno strumento di benchmarking, così da facilitare il confronto tra diversi impianti, aziende e realtà industriali e semplificare il complesso processo di trasferimento delle conoscenze tra aziende dello stesso settore e, laddove possibile, anche di settori industriali differenti.

A tale scopo, sono state inizialmente analizzate le diverse metodologie e i diversi strumenti di benchmarking presenti in letteratura, in modo tale da individuare i modelli più adatti all'applicazione ai Sistemi Aria Compressa. In Tabella 3 viene fornita una sintesi della letteratura tecnico-scientifica rilevante ai fini della definizione di tali metodologie e strumenti ai diversi livelli di analisi; nella stessa tabella vengono anche riportate le principali problematiche relative alla loro progettazione affrontate in ciascun documento [5-7, 9-33].

**Tabella 3. Sintesi della letteratura rilevante ai fini della definizione di i indicatori di benchmarking energetico**

Referenza	Livello			Principali problematiche affrontate
	Aggregato	Disaggregato	Processo /Impianto	
Ang (1995) [9]	X			Benchmark tra settori industriali e confronto della domanda di energia nel tempo attraverso l'IDA (Index Decomposition Analysis).
Tanaka (2008) [5]	X			Definizione dei confini di analisi, affidabilità e incertezza dei risultati.
Boyd et al. (2008) [10]	X			Definizione delle baseline, utilizzo dell'Indicatore di Performance Energetica dell'Energy Star.
Mendes et al. (2011) [11]	X			Identificazione dell'incertezza associate agli indicatori energetici, affidabilità dei dati.
Olanrewaju et al. (2012) [12]	X			Metodologia basata sull'IDA-ANN-DEA (Index Decomposition Analysis-Artificial Neural Network-Data Envelopment Analysis) volta allo sviluppo di indicatori per il benchmarking dei consumi di diversi settori industriali.
Ang and Xu (2013) [13]	X			Benchmarking di settori industriali e confronto delle loro performance nel tempo attraverso l'IDA (Index Decomposition Analysis).
Olanrewaju et al. (2013) [14]	X			Metodologia basata sull'IDA-ANN-DEA (Index Decomposition Analysis-Artificial Neural Network-Data Envelopment Analysis) volta allo sviluppo di metodologie di decision-making e alla definizione di modelli politici.
Boyd (2014) [15]	X			Applicazione dell'indicatore di performance dell'Energy Star al settore automotive.
Lin and Du (2014) [16]	X			Metodo di scomposizione degli indici per l'analisi dei cambiamenti nell'intensità energetica.
Ma (2014) [17]	X			Analisi dell'andamento dei consumi energetici nazionali, attraverso la valutazione di diverse variabili (combustibili utilizzati, settori industriali, regione).
Siebert et al. (2014) [18]	X			Strumento online per il benchmarking di diversi settori attraverso la valutazione di vari Indicatori di Performance Energetica.
Song et al. (2014) [19]	X			Creazione di un Sistema di Indicatori di Performance Energetica per il benchmarking di settori industriali in Cina (metodo "Hierarchical-Indicator Comparison").
Xu and Ang (2014) [20]	X			Scomposizione degli indici attraverso l'IDA (Index Decomposition Analysis).
Horowitz and Bertoldi (2015) [21]	X			Utilizzo di Indicatori di Performance Energetica aggregate per la stima degli impatti delle politiche nazionali e sovranazionali.
Morfeldt et al. (2015) [22]	X			Indicatori energetici e ambientali per il settore dell'acciaio.
Narula and Reddy	X			Confronto critico di diversi Indicatori di

(2015) [23]				Performance Energetica utilizzati per misurare la sicurezza energetica e la sostenibilità energetica.
Van Gorp (2005) [24]		X		Definizione di baseline, gestione dei dati, definizione di target e obiettivi.
May et al. (2012) [25]		X		Utilizzo dell'Information Technology a supporto della creazione di sistemi di Indicatori di Performance Energetica.
Goldstein and Almaguer (2013) [26]		X		Sviluppo di un Sistema di Indicatori di Performance Energetica per il monitoraggio della performance energetica ai diversi livelli dell'organizzazione, definizione dei confini, definizione della baseline.
Askounis and Psarras (1998) [27]			X	Utilizzo dell'Information Technology a supporto della creazione di sistemi di Indicatori di Performance Energetica.
Swords et al. (2008) [28]			X	Utilizzo dell'Information Technology a supporto della creazione di sistemi di Indicatori di Performance Energetica.
Bunse et al. (2011) [6]			X	Introduzione di Indicatori di Performance Energetica nelle pratiche di controllo operative e di gestione dei processi e della produzione.
Dörr et al. (2013) [29]			X	Definizione di un set di indicatori a livello di processo ai fini del miglioramento della gestione della produzione e del controllo operativo.
Linke et al. (2013) [30]			X	Indicatori di sostenibilità applicati ai processi manifatturieri (caso di studio su tecnologie di macinazione).
May et al. (2013) [7]			X	Review e Gap Analysis tra necessità dell'industria e stato dell'arte per gli Indicatori di Performance Energetica.
Coroiu and Chindris (2014) [31]			X	Sviluppo di indicatori di efficienza energetica a diversi livelli al fine di agevolare la valutazione degli investimenti e la definizione della baseline.
Madan et al. (2014) [32]			X	Benchmarking di processi differenti in diversi settori (caso di studio sull'injection moulding).
May et al. (2015) [33]			X	Sviluppo di Indicatori di Performance Energetica legati all'efficienza dei processi produttivi.

La letteratura riassunta in Tabella 3 ha fornito un'utile base di conoscenza per la progettazione della nuova metodologia e dello strumento di benchmarking di seguito presentati. In particolare, il lavoro di Energy Star [10], essendo caratterizzato da una notevole versatilità e semplicità applicativa, è risultato un ottimo punto di partenza e riferimento per il lavoro presentato nel seguito del presente capitolo. La metodologia elaborata da Energy Star si basa infatti sull'utilizzo di uno strumento statistico che realizza una fotografia dell'uso energetico nei singoli siti industriali all'interno di uno stesso settore, attraverso la costruzione di relazioni funzionali tra il livello di uso dell'energia e il livello e la tipologia delle varie attività produttive, la qualità dei materiali in ingresso e fattori esterni (come il clima). Il modello fornisce anche una distribuzione dell'efficienza energetica nel settore di riferimento, consentendo all'utilizzatore di comprendere il proprio livello di efficienza energetica rispetto alle altre aziende del settore, nell'ipotetica condizione in cui tutti i siti produttivi avessero lo stesso comportamento energetico del proprio.

## 2.2 Lo stato dell'arte: gli Indici di Performance Energetica per i Sistemi Aria Compressa

Per quanto riguarda più nello specifico i Sistemi Aria Compressa, esistono numerosi articoli scientifici [34 - 39] e rapporti tecnici [40 - 48] che riportano liste di "Best Practices", "Best Techniques" e "Best Technologies", talvolta anche fornendone una prima valutazione e ordinandole per profittabilità o ritorno economico degli investimenti necessari alla loro implementazione. Tuttavia, nessuno di essi fornisce dei valori o delle metodologie di benchmarking attraverso i quali le aziende possano facilmente valutare le performances del proprio impianto, verificare l'efficacia delle azioni di efficientamento intraprese e stabilire appropriate strategie di miglioramento per il futuro. L'unico valore di benchmarking attualmente reperibile in letteratura per i Sistemi Aria Compressa si riferisce al Consumo Specifico della fase di generazione dell'aria compressa, ed è quello fornito nel 2009 dalla Comunità Europea nel "Documento di riferimento sulle Best Available Techniques per l'Efficienza Energetica" ("Reference Document on Best Available Techniques for Energy Efficiency") [49], che, riprendendo quanto già affermato da [50] riporta:

*"The energy cost of compressed air is expressed in terms of specific energy consumption (SEC) in Wh/Nm<sup>3</sup>. For a correctly dimensioned and well managed installation, operating at a nominal flow and at a pressure of 7 bars, the following can be taken as a reference (it takes different compressor technologies into account):*

$$85 \text{ Wh/Nm}^3 < \text{SEC} < 130 \text{ Wh/Nm}^3 \dots$$

*This ratio represents the quality of the design and the management of the compressed air installation. It is important to know and monitor it (...), because it can quickly deteriorate, leading to a large rise in the price of the air."*

Il documento citato individua quindi un possibile intervallo di valori di riferimento per il consumo specifico dell'impianto aria compressa (espresso in Wh/Nm<sup>3</sup>), introducendo però anche una serie di importanti restrizioni per la sua validità e applicabilità, tra cui:

- I valori in questione si riferiscono a impianti correttamente dimensionati e ben gestiti;
- Le condizioni di funzionamento dell'impianto devono essere pari a quelle nominali per quanto riguarda la portata d'aria compressa prodotta e a 7 bar per quanto riguarda la pressione di uscita dell'aria dalla fase di compressione.

Nel quotidiano funzionamento degli impianti per la generazione e il trasporto dell'aria compressa, tali condizioni non sono praticamente mai rispettate, o lo sono per periodi di tempo molto brevi, allorché la richiesta d'aria compressa da parte dell'impianto produttivo (sia in termini quantitativi, legati alla portata d'aria, che qualitativi, legati alla sua pressione) lo consentono. Questi valori risultano quindi essere dei riferimenti difficilmente applicabili senza ricorrere a proporzioni ed approssimazioni per tenere conto dell'introduzione di fisiologiche inefficienze dovute a condizioni di funzionamento diverse da quelle nominali o al progressivo deteriorarsi dei componenti delle macchine a fluido (nello specifico dei compressori d'aria) nel tempo.

In aggiunta, un indice come il Consumo Specifico può essere utilizzato per confrontare l'efficienza dei Sistemi Aria Compressa limitatamente alla sola fase di generazione dell'aria compressa e non al suo trasporto e utilizzo, che pure sono fasi che si caratterizzano per un'elevatissima dispersione di energia.

Considerato quanto illustrato in questa sezione e nella precedente è quindi fondamentale, nell'ambito del progetto di cui questo report illustra la prima fase, creare un nuovo set di indicatori e definire una metodologia di benchmarking per consentire alle aziende di effettuare facilmente ed efficacemente delle analisi comparative riguardanti la produzione, il trasporto e l'utilizzo dell'aria compressa nei siti industriali. La disponibilità di dati misurati sul campo e raccolti dall'ENEA a seguito dell'implementazione del D.Lgs 102/2014 [51], come descritto nel report ENEA, ha consentito di fornire una prima valutazione (generale o, laddove possibile, riferita ai singoli settori industriali) degli indici individuati, che sono dunque valutati sulla base di dati raccolti sul campo e possono essere messi a disposizione delle aziende per agevolarle nel complesso compito di valutare e gestire le performance energetiche dei propri Sistemi Aria Compressa.

### 2.3 La metodologia proposta

La metodologia proposta per il benchmarking dell'efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa, descritta nel dettaglio nelle sezioni successive, si articola nelle seguenti tre macro-fasi:

- La scelta e definizione degli Indici di Performance Energetica da utilizzare; in questa fase si selezionano e formulano gli indici che verranno utilizzati e valutati nel seguito per stabilire il livello di efficienza energetica delle fasi di generazione, trasporto e utilizzo dell'aria compressa;
- La definizione dei valori di benchmark per tali indici; in questa fase vengono analizzati statisticamente i dati raccolti a seguito del D.Lgs 102/2014 ed elaborati da ENEA al fine di estrarre le informazioni utili per il benchmarking;
- La progettazione di uno strumento di benchmarking per facilitare il confronto tra aziende e siti differenti, consentire alle aziende di tracciare l'andamento delle proprie performance nel tempo e abilitare il trasferimento di conoscenze tra aziende dello stesso settore.

#### 2.3.1 Definizione degli indici

Il primo passo consiste nella definizione di un set di Indicatori di Performance Energetica da utilizzare per il benchmarking dei Sistemi Aria Compressa, in base alla letteratura tecnico-scientifica e alla pratica industriale, ovvero alla conoscenza degli indici già in uso nelle aziende di diversi settori, in modo che la metodologia sia facilmente assimilabile dall'industria. In particolare, si è fatto riferimento alla struttura di alcuni indici proposti per applicazioni differenti [5, 6], verificando l'allineamento degli Indicatori di Performance Energetica definiti da [4] agli obiettivi e costruendo gli indici in modo che siano adatti all'utilizzo per fini di benchmarking (con riferimento alle principali problematiche illustrate nella Tabella 3).

Le tabelle 4, 5 e 6 illustrano il set di indicatori individuato, riportando obiettivi, definizione e formulazione di ciascun indice.

**Tabella 4. Descrizione indice "kWh<sub>e</sub> AC"**

kWh <sub>e</sub> AC	
<b>Obiettivo</b>	L'obiettivo di questo indice è quello di fornire una misura dell'entità assoluta del consumo elettrico relativo al Sistema Aria Compressa all'interno di ciascun sito industriale; questa misura può essere utilizzata per stimare il potenziale impatto dell'implementazione di specifiche misure di efficientamento sul sistema in termini assoluti.
<b>Definizione</b>	Entità, in termini assoluti, dell'energia elettrica utilizzata dai singoli siti industriali per la produzione dell'aria compressa.
<b>Formulazione</b>	<i>kWh elettrici consumati in un anno dallo stabilimento per la produzione di aria compressa</i>

**Tabella 5. Descrizione indice “kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT”**

kWh <sub>e</sub> AC/kWh <sub>e</sub> TOT	
<b>Obiettivo</b>	L’obiettivo di questo indice è quello di fornire una misura relativa del consumo elettrico relativo al Sistema Aria Compressa all’interno di ciascun sito industriale; questa misura può essere utilizzata per analizzare l’incidenza dell’aria compressa sui consumi del singolo stabilimento e per stimare il potenziale impatto dell’implementazione di specifiche misure di efficientamento sul sistema in termini relativi.
<b>Definizione</b>	Entità, in termini relativi, dell’energia elettrica utilizzata dai singoli siti industriali per la produzione dell’aria compressa.
<b>Formulazione</b>	$\frac{kWh \text{ elettrici consumati in un anno dallo stabilimento per la produzione di aria compressa}}{kWh \text{ elettrici totali consumati in un anno dallo stabilimento}}$

**Tabella 6. Descrizione indice “kWh<sub>e</sub> AC/t”**

kWh <sub>e</sub> AC/t	
<b>Obiettivo</b>	L’obiettivo di questo indice è quello di fornire una misura dell’efficienza dell’intero Sistema Aria Compressa (non distingue le fasi di generazione, trasporto, utilizzo). La semplicità di formulazione lo rende molto adatto all’impiego come indice di benchmarking delle performance energetiche, anche se bisogna tenere conto di alcune evidenti approssimazioni, come ad esempio il fatto che non considera il mix di prodotti realizzato né distingue tra componente fissa (non variabile con la produzione) e componente variabile dei consumi.
<b>Definizione</b>	Entità dell’energia elettrica utilizzata per la produzione dell’aria compressa per singola tonnellata di prodotto.
<b>Formulazione</b>	$\frac{kWh \text{ elettrici consumati in un anno dallo stabilimento per la produzione di aria compressa}}{\text{tonnellate di prodotto realizzate in un anno dallo stabilimento}}$

La scelta di misurare la produzione in peso e quindi di fornire un indice relativo al consumo di energia elettrica per la generazione di aria compressa per singola tonnellata di prodotto deriva dalle analisi condotte da ENEA e illustrate nel già citato report, dalle quali risulta evidente come la grande maggioranza delle aziende in tutti i settori oggetto di analisi già misura in unità di peso la propria produzione. La misura in peso consente inoltre di ottenere una maggiore omogeneità del valore dell’indice all’interno dei settori industriali rispetto alla misura in pezzi, che renderebbe il valore dell’indice troppo dipendente dalla forma e dalla tipologia di prodotto; in pratica, questo tipo di misura consente di includere nell’analisi e misurare facilmente anche realtà industriali multi-prodotto, per le quali il consumo specifico relativo al singolo pezzo può variare notevolmente con la tipologia di produzione. I siti che hanno fornito la misura della produzione non in unità di peso sono al momento esclusi dall’analisi di tale indice (si può pensare, in futuro, di chiedere un’integrazione di tale dato).

**Tabella 7. Descrizione indice “kWh<sub>e</sub> AC/m<sup>3</sup>”**

kWh <sub>e</sub> AC/m <sup>3</sup>	
<b>Obiettivo</b>	L’obiettivo di questo indice è quello di fornire una misura dell’efficienza della fase di generazione dell’aria compressa. L’indice si presta anche al confronto con i valori forniti da [49].
<b>Definizione</b>	Entità dell’energia elettrica utilizzata per la produzione dell’aria compressa per singolo metro cubo di aria compressa prodotta.
<b>Formulazione</b>	$\frac{kWh \text{ elettrici consumati in un anno dallo stabilimento per la produzione di aria compressa}}{\text{metri cubi di aria compressa prodotti in un anno nello stabilimento}}$

**Tabella 8. Descrizione indice “m<sup>3</sup>/t”**

<b>m<sup>3</sup>/t</b>	
<b>Obiettivo</b>	L’obiettivo di questo indice è quello di fornire una misura dell’efficienza della fase di trasporto e utilizzo dell’aria compressa.
<b>Definizione</b>	Metri cubi di aria compressa utilizzati per la produzione della singola tonnellata di prodotto finito.
<b>Formulazione</b>	<i><math display="block">\frac{\text{metri cubi di aria compressa prodotti in un anno nello stabilimento}}{\text{tonnellate di prodotto realizzate in un anno dallo stabilimento}}</math></i>

### 2.3.2 Analisi dei dati di consumo ed efficienza dei Sistemi Aria Compressa nei settori industriali sensibili

Come già precedentemente accennato, l’analisi dei dati di consumo e di efficienza dei Sistemi Aria Compressa nei settori sensibili è stata resa possibile dal lavoro di raccolta ed elaborazione dei dati effettuata dall’ENEA a seguito dell’implementazione del D.Lgs. 102/2014 e descritta nel report ENEA. Tale analisi ha consentito di ottenere dei valori per gli indici di seguito individuati, basati su dati reali dei siti produttivi presenti sul territorio italiano e relativi non solo alla fase di generazione dell’aria compressa, ma anche a quelle di trasporto e utilizzo. I settori sensibili individuati (identificati dai rispettivi codici ATECO [52]) per i quali sono state realizzate le analisi descritte nel seguito sono i seguenti nove:

- Metallurgia, codice ATECO 24;
- Fabbricazione di prodotti chimici, codice ATECO 20;
- Fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici, codice ATECO 21;
- Fabbricazione di prodotti in metallo (esclusi macchinari e attrezzature), codice ATECO 25;
- Fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi, codice ATECO 29;
- Fabbricazione di articoli in materie plastiche, codice ATECO 22.2;
- Industrie tessili, codice ATECO 13;
- Industrie alimentari, codice ATECO 10;
- Fabbricazione di carta e prodotti di carta, codice ATECO 17.

Per ciascuno dei settori sopra elencati e per ciascuno degli indici finora introdotti (con alcune eccezioni, che sono descritte nel seguito del capitolo), sono stati calcolati due diversi indici statistici di posizione (valore medio e mediana, definiti nel seguito) su due differenti gruppi di dati, ottenendo i seguenti quattro valori:

- Valori medi degli indici descritti, considerando solo siti industriali in cui i dati necessari al calcolo degli indici sono tutti misurati;
- Valori medi degli indici descritti, considerando tutti i siti industriali che riportano i dati necessari al calcolo degli indici (sia misurati che stimati);
- Mediane degli indici descritti, considerando solo siti industriali in cui i dati necessari al calcolo degli indici sono tutti misurati;
- Mediane degli indici descritti, considerando tutti i siti industriali che riportano i dati necessari al calcolo degli indici (sia misurati che stimati).

La distinzione tra il gruppo di dati misurati e il gruppo di dati totali (insieme di dati misurati e stimati) è stata introdotta per poter fornire degli indici sufficientemente affidabili (ottenuti da dati misurati), ma anche robusti, tenendo comunque traccia dai dati dichiarati dall’intero campione di aziende analizzati (dati totali).

L’indice “kWh<sub>e</sub> AC/m<sup>3</sup>” costituisce un’eccezione, in quanto è stato analizzato considerando il solo gruppo di dati misurati. In questo caso, infatti, il valore ottenuto dai dati totali non è stato considerato significativo, poiché le aziende che stimano il valore dei metri cubi di aria compressa prodotti annualmente stimano generalmente anche l’efficienza della fase di generazione, e dunque assumono un valore standard proprio per l’indice in questione. Per tale motivo, è stato possibile valutare l’indice “kWh<sub>e</sub> AC/m<sup>3</sup>” solo per un numero molto ridotto di aziende e alcune analisi in questo particolare caso sono state effettuate, come si

vedrà in seguito, non internamente al settore industriale ma trasversalmente ai diversi settori considerati nell'analisi.

Altra eccezione è rappresentata dall'indice "m<sup>3</sup>/t", che è stato invece momentaneamente escluso dalle analisi e verrà quindi trascurato nel seguito del presente report. Il motivo principale di tale esclusione è la quasi totale assenza di misure del volume di aria compressa prodotto, come meglio evidenziato nel rapporto ENEA, considerata anche l'impossibilità in questo caso di confrontando valori relativi a settori industriali differenti, come fatto per l'indice "kWh<sub>e</sub> AC/m<sup>3</sup>", vista la notevole varietà di processi industriali nei quali è previsto l'impiego di aria compressa.

Oltre ai valori medi (rapporto tra la somma dei dati numerici e il numero di dati a disposizione) si è quindi scelto di tenere conto anche delle mediane (valore centrale tra i dati numerici, ovvero il valore per il quale la frequenza relativa cumulata è pari al 50%) per ciascun settore, indice e gruppo di dati. Le mediane consentono infatti di dare meno peso nel calcolo del valore di benchmark ad eventuali outlier (valori anomali eccessivamente lontani dalla media del campione), e quindi di ottenere dei valori maggiormente affidabili in attesa di procedere all'analisi puntuale di ciascuno degli outlier individuati e all'analisi delle cause delle singole anomalie.

La maschera di raccolta dati elaborata per gli indici di posizione dei diversi Indici di Performance Energetica sui diversi gruppi di dati per ciascun settore industriale considerato è riportata in Figura 2. Oltre al valore di ciascun indice, si è anche estrapolato, per completezza, il numero di dati dai quali è stato ricavato (N).

		N	Valori medi			N	Valori medi
Valori misurati	kWhe AC/kWhe TOT			Valori totali (stimati + misurati)	kWhe AC/kWhe TOT		
	kWhe AC				kWhe AC		
	kWhe AC/t				kWhe AC/t		
	kWhe AC/m <sup>3</sup>						
		N	Mediane			N	Mediane
Valori misurati	kWhe AC/kWhe TOT			Valori totali (stimati + misurati)	kWhe AC/kWhe TOT		
	kWhe AC				kWhe AC		
	kWhe AC/t				kWhe AC/t		
	kWhe AC/m <sup>3</sup>						

**Figura 2. Struttura del foglio Excel utilizzato per calcolare i valori medi e mediani degli Indici di Performance Energetica per ciascun settore industriale.**

I valori medi e le mediane calcolate per ogni indice individuato e su ciascun gruppo di dati possono essere utilizzati come primo valore di riferimento per il confronto delle performance energetiche di un Sistema Aria Compressa. Tuttavia, per consentire una più affidabile e robusta comparazione tra le prestazioni di siti produttivi diversi, e fondare il confronto su forbici di valori, piuttosto che su valori singoli, abbiamo anche eseguito un'analisi statistica della distribuzione in frequenza dei valori di ciascuno degli indici riportati in Figura 2.

È stata innanzitutto testata la normalità delle distribuzioni attraverso il test di Anderson-Darling [53]. Una distribuzione non normale dei dati può indicare la presenza di outlier o di alcune cause speciali (da indagare successivamente) che determinano un differente comportamento energetico di alcuni sistemi all'interno del campione di dati. Successivamente, le distribuzioni in frequenza dei vari indici sono state rappresentate graficamente attraverso grafici a istogramma, e descritte utilizzando i principali parametri statistici di posizione, dispersione e simmetria descritti di seguito.

- Deviazione standard (StDev), ovvero lo scarto quadratico medio del valore sulla popolazione considerata (radice quadrata della varianza),

$$StDev = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{media})^2}{n}}$$

dove x è il valore dell'indice per il singolo sito (i) e n è il numero totale di siti costituenti il campione.

- Varianza, ovvero la media aritmetica del quadrato delle distanze dei singoli valori dalla loro media (o quadrato della deviazione standard).
- Indice di Skewness (si veda la Figura 3), che quantifica l'asimmetria rispetto al valore medio della distribuzione in frequenza (un valore nullo indica che la distribuzione è simmetrica, un valore negativo indica che la distribuzione è "sbilanciata" verso destra, un valore positivo indica che la distribuzione è "sbilanciata" verso sinistra; maggiore è il modulo dell'indice, maggiore è lo sbilanciamento), calcolato attraverso software statistici.

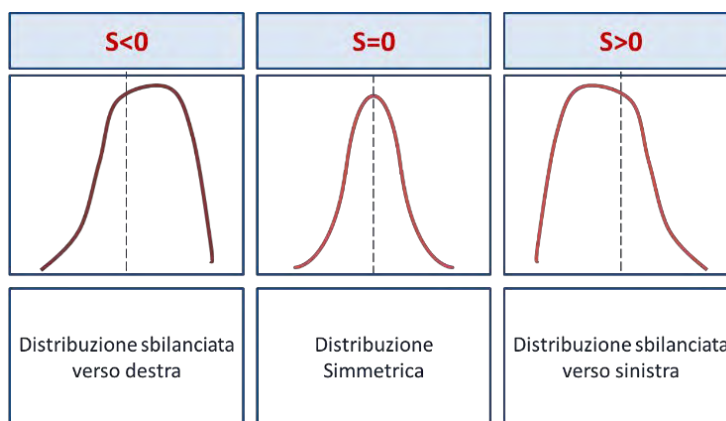


Figura 3. Spiegazione grafica dell'indice di Skewness

- Indice di Kurtosis (si veda la Figura 4), che definisce la forma della distribuzione (un valore nullo indica che la distribuzione assume la classica forma "a campana", tipica delle distribuzioni normali, un valore negativo indica che la distribuzione risulta "appiattita" o "platicurtica", un valore positivo indica che la distribuzione risulta "appuntita" o "leptocurtica"; maggiore è il modulo dell'indice, maggiore è la deformazione della distribuzione), calcolato attraverso software statistici.

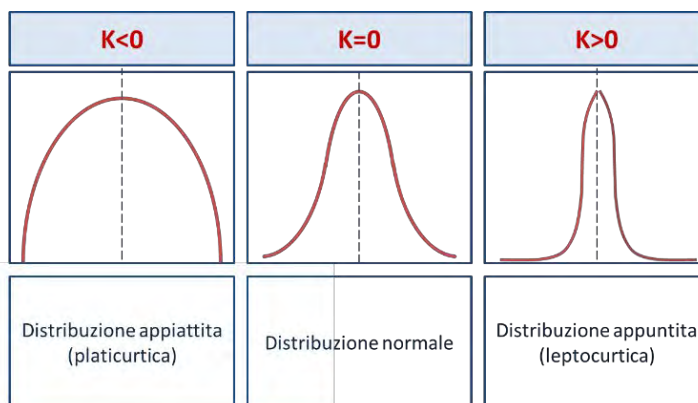
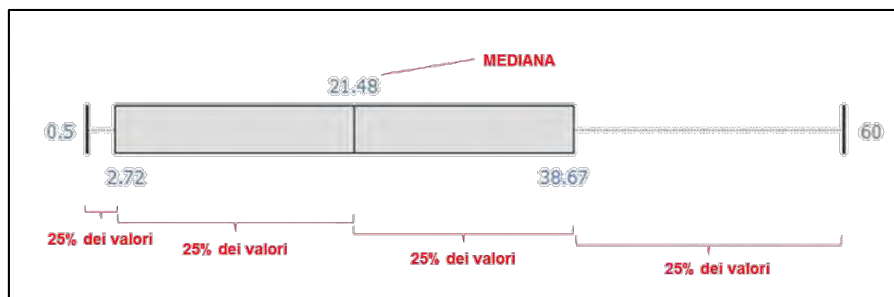


Figura 4. Spiegazione grafica dell'indice di Kurtosis

Sono state poi calcolate le variabili statistiche necessarie a descrivere in maniera sintetica ciascun gruppo di dati e a fornire la forbice di valori ricercata ai fini del benchmarking, ovvero:

- Quartili (primo e terzo, rappresentano i valori che delimitano rispettivamente il primo quarto e i primi tre quarti di dati); i quartili sono anche stati rappresentati graficamente attraverso dei grafici di boxplot (si veda la Figura 5);



**Figura 5. Esempio di rappresentazione grafica dei quartili tramite boxplot; eventuali outlier sono riportati nel grafico come “punti” posizionati lontano dai quartili**

- Intervalli di confidenza al 95% di significatività per valori medi, mediane e deviazioni standard; anche degli intervalli di confidenza di valori medi e mediane è stata fornita una rappresentazione grafica (test di significatività eseguiti attraverso software statistici).

Tutti i test statistici sono stati eseguiti accettando un livello di significatività del test del 95%, ovvero una probabilità di errore statistico (P\_value) minore o uguale al 5%.

Utilizzando l'analisi delle distribuzioni statistiche unitamente ai valori medi e mediani e ai loro intervalli di confidenza, è possibile ottenere una visione completa della situazione energetica attuale dei Sistemi Aria Compressa per ciascun settore, e quindi fornire alle aziende un'idea chiara ed affidabile della loro condizione attuale rispetto alle altre aziende dello stesso settore. Tale analisi consente inoltre una prima individuazione di anomalie e sottogruppi anomali all'interno dei gruppi di dati oggetto di analisi. In particolare, i grafici di boxplot possono essere utilizzati direttamente per il benchmarking, mentre le altre informazioni estrapolate circa le distribuzioni statistiche forniscono interessanti spunti per l'analisi e la verifica delle anomalie.

### 2.3.3 Progettazione di uno strumento di benchmarking e valutazione delle performances

Una volta strutturato il set di indicatori e definite le modalità di analisi dei dati per l'ottenimento dei valori di benchmark per ciascun settore, è stato progettato uno strumento in grado di elaborare in maniera semplice e graficamente più immediata le informazioni estrapolate grazie alle analisi precedentemente descritte e che consenta quindi alle aziende di comprendere in maniera rapida e intuitiva quale sia il proprio livello di efficienza rispetto alle altre aziende dello stesso settore, nonché potenzialmente di tracciare nel tempo la propria evoluzione. Lo strumento in questione è la Matrice di Assessment.

La Matrice di Assessment è un grafico a dispersione con in ascissa i valori di Efficiency Ratio (definito nel seguito della presente sezione) associato ad ogni sito produttivo, e in ordinata i consumi teorici annuali (espressi in kWh, anch'essi definiti nel seguito del capitolo) dei singoli siti produttivi.

Il consumo teorico (“kWh<sub>e</sub> AC<sub>t</sub>”) è definito come il consumo annuale di energia elettrica per la produzione di aria compressa che ciascun sito dovrebbe registrare, data la quantità (in tonnellate) di prodotto finito realizzato e l'efficienza media di generazione, trasporto e utilizzo dell'aria compressa nel settore di riferimento. Tale valore è calcolato secondo un modello previsionale dei consumi ottenuto da regressione statistica lineare sui gruppi di dati del settore considerato (ancora una volta, l'analisi è stata eseguita distinguendo dati misurati e dati totali). L'analisi di regressione considera dunque tutte le coppie di dati “kWh<sub>e</sub> AC<sub>i</sub>, t<sub>i</sub>” di ciascun gruppo e generalizza la correlazione esistente tra questi due valori attraverso l'individuazione della retta che minimizza la somma dei quadrati degli errori casuali, differenza tra valori effettivi e valori previsti della variabile “kWh<sub>e</sub> AC<sub>t,i</sub>”, espressa dalla relazione matematica:

$$kWh_e AC_{t,i} = \alpha + \beta * t_i$$

dove  $\alpha$  e  $\beta$  sono termine noto e coefficiente angolare della retta di regressione, calcolati secondo le seguenti espressioni:

$$\alpha = kWh_e AC_{media} - b_1 t_{media}$$

$$\beta = \frac{\sum(t_i - t_{media})(kWh_e AC_i - kWh_e AC_{media})}{\sum(t_i - t_{media})^2}$$

Per valutare l'affidabilità dell'analisi di regressione lineare e quindi la forza della correlazione esistente tra dati di consumo elettrico per la produzione dell'aria compressa e dati di produzione di prodotti finiti sono stati utilizzati due diversi indici.

- Il valore del coefficiente di determinazione  $R^2$ , ovvero la frazione della varianza della variabile dipendente espressa dalla regressione (l'analisi di regressione è generalmente considerata accettabile se tale valore risulta superiore a 0,5);

$$R^2 = \left( \frac{\sum(t_i - t_{media})(kWh_e AC_i - kWh_e AC_{media})}{\sqrt{\sum(t_i - t_{media})^2 \sum(kWh_e AC_i - kWh_e AC_{media})^2}} \right)^2$$

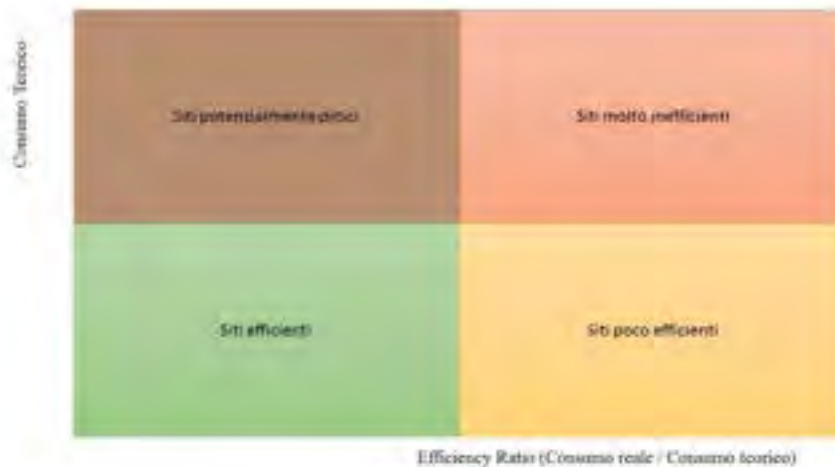
- Il valore di significatività della relazione trovata, espresso ancora una volta tramite il P\_value (la significatività viene considerata accettabile quando la probabilità di incorrere in errore è inferiore al 5%).

L'indice "Efficiency Ratio" è invece definito come il rapporto tra il consumo reale del singolo sito produttivo (i) e il consumo teorico così calcolato.

$$ER = \frac{kWh_e AC_i}{kWh_e AC_{t,i}}$$

Questa matrice permette di individuare in maniera immediata i siti, settore per settore, sui quali è necessario intervenire per ridurre i consumi elettrici nazionali per la produzione di aria compressa, analizzando i valori di efficienza e consumo teorico rispetto alla media del gruppo di dati. Infatti, a seconda della posizione dei valori del sito nella matrice si evidenziando diverse priorità di intervento (si confronti la Figura 3) descritte di seguito.

- In alto a destra si ha la zona dei siti inefficienti. Qui si collocano i siti per cui è elevato il consumo teorico ed è scarsa l'efficienza, ossia è elevato l'Efficiency Ratio. Questi siti sono da considerarsi prioritari in quanto sono ampi i margini di miglioramento (è elevato l'Efficiency Ratio) ed è alto il risparmio conseguibile, essendo elevato il valore del consumo teorico.
- In basso a destra si colloca la zona dei siti poco efficienti. Per questi siti il consumo teorico è inferiore rispetto ai precedenti, ma l'Efficiency Ratio ha valori elevati. Per questo motivo i margini di miglioramento possono comunque essere consistenti.
- In alto a sinistra si ha la zona dei siti potenzialmente critici. I siti presenti in questa zona non permettono in genere di ottenere miglioramenti significativi, in quanto l'indice di efficienza è migliore rispetto alla media del settore. Vanno tuttavia monitorati in quanto, essendo alto il consumo teorico, causerebbero perdite consistenti di efficienza in presenza di anomalie e variazioni di rendimento.
- In basso a sinistra troviamo la zona dei siti efficienti. Su questi siti non è normalmente conveniente intervenire. Il loro comportamento è infatti virtuoso da un punto di vista energetico, essendo basso il valore dell'Efficiency Ratio, ed i loro consumi sono inferiori alla media.



**Figura 6. Struttura della Matrice di Assessment.**

Da questa matrice si possono inoltre ottenere ulteriori informazioni: muovendosi lungo le ascisse ad ordinata costante, infatti, è possibile individuare siti che potenzialmente dovrebbero avere gli stessi consumi ma hanno efficienza differente. Si identificano così i siti che hanno un consumo elevato a parità di condizioni di lavoro. Muovendosi invece lungo le ordinate ad ascissa costante è possibile trovare siti che, pur essendo differenti per consumo, hanno lo stesso livello di efficienza energetica.

La matrice così costruita può dunque essere utilizzata dalla singola azienda per valutare l'efficienza del proprio Sistema Aria Compressa rispetto a quelli delle altre aziende dello stesso settore (posizionando il proprio sito sulla matrice), ed eventualmente monitorare eventuali variazioni nel tempo; può tuttavia anche essere un utile strumento per ENEA per individuare le aziende più virtuose di ciascun settore e abilitare il trasferimento di pratiche e conoscenze relative all'efficienza energetica da tali aziende verso quelle meno virtuose (cercando di spostare i siti presenti nel quadrante in alto a destra della matrice verso sinistra).

## 2.4 Applicazione della proposta ai settori industriali sensibili

I risultati dell'applicazione della metodologia di benchmarking proposta nei paragrafi precedenti ai settori sensibili sono riportati nella presente sezione. Per ciascun indicatore individuato vengono forniti i grafici di istogrammi, boxplot e intervalli di confidenza; accanto ai grafici sono invece riportate delle tabelle contenenti i risultati del test di Andreson-Darling su ciascun gruppo di dati (la distribuzione può essere considerata normale se  $P\_value \geq 0,05$ ), tutti i valori degli indici statistici di posizione, dispersione e simmetria introdotti nei paragrafi precedenti, e il valore N che rappresenta invece la numerosità del campione considerato in ogni analisi. Vengono inoltre forniti i risultati delle analisi statistiche effettuate per l'indice di efficienza della fase di generazione dell'aria compressa "kWh<sub>e</sub> AC/m<sup>3</sup>" che, come anticipato, è stato analizzato non per singolo settore ma in modalità trans-settoriale.

### 2.4.1 Metallurgia

Nel settore sono comprese le attività di fusione e affinazione di metalli ferrosi e non ferrosi a partire da minerali, lingotti metallici o rottame metallico, con tecniche elettrometallurgiche ed altre tecniche metallurgiche. Rientra in questo settore anche la produzione di leghe e superleghe di metalli, con l'aggiunta nei metalli puri di altri elementi chimici. I prodotti ottenuti dalla fusione e dalla affinazione, generalmente in forma di lingotti vengono trasformati con processo di laminazione, trafilatura ed estrusione in lamiera, nastri, barre, tondi o vergella e in forma fusa, per realizzare pezzi di fonderia e altri prodotti metallici [52].

Nelle figure dalla 7 alla 12 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per gli indicatori introdotti nella sezione precedente, calcolati su ciascun gruppo di dati (misurati e totali).

Per il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori degli indici risultano tutte non normali e fortemente non simmetriche. Soprattutto nel caso del gruppo di dati misurati gli outlier presenti sono in numero contenuto e si prestano quindi ad uno studio approfondito in una seconda fase del progetto, per l'ottenimento di valori di benchmark più precisi ed affidabili; si noti in particolare l'outlier di figura 10 che sposta notevolmente il valor medio (ma non la mediana) dell'indice kWh<sub>e</sub> AC calcolato sui dati totali. Per un riepilogo dei valori medi e mediani di tutti gli indici del settore si vedano le figure 62 e 63 nel seguito del capitolo.

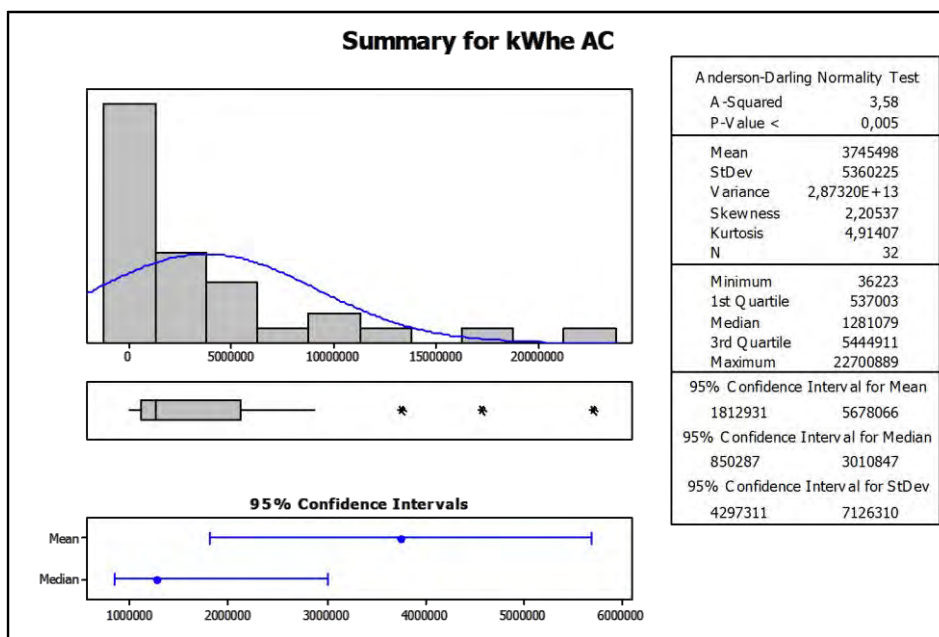


Figura 7. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente solo siti con dati misurati, metallurgia

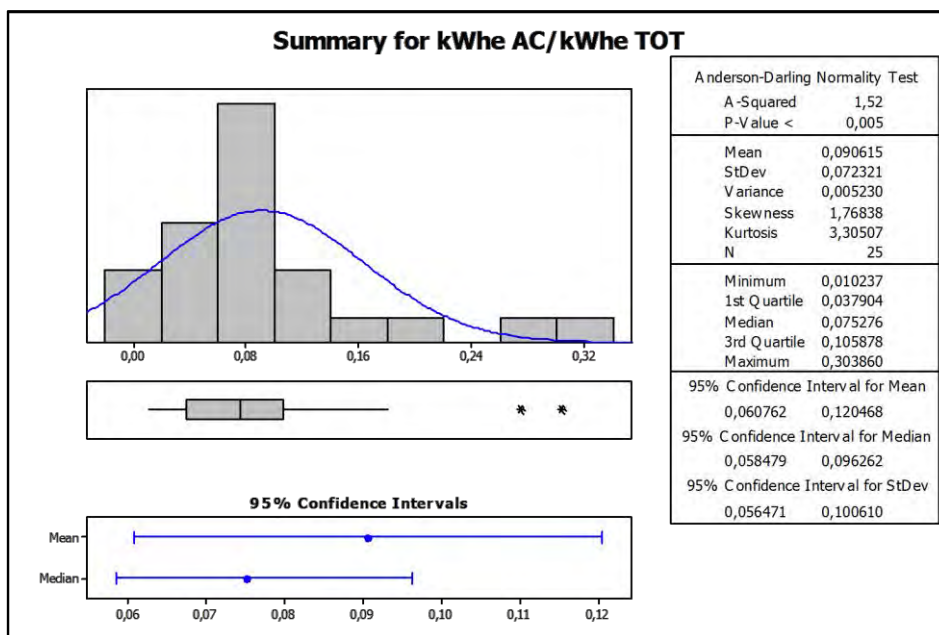


Figura 8. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente solo siti con dati misurati, metallurgia

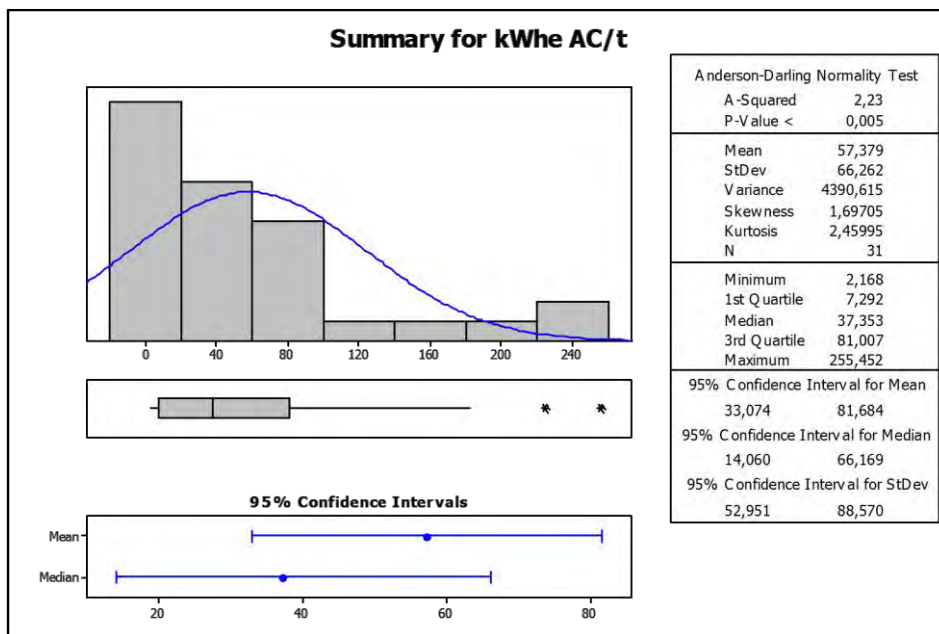


Figura 9. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente solo siti con dati misurati, metallurgia

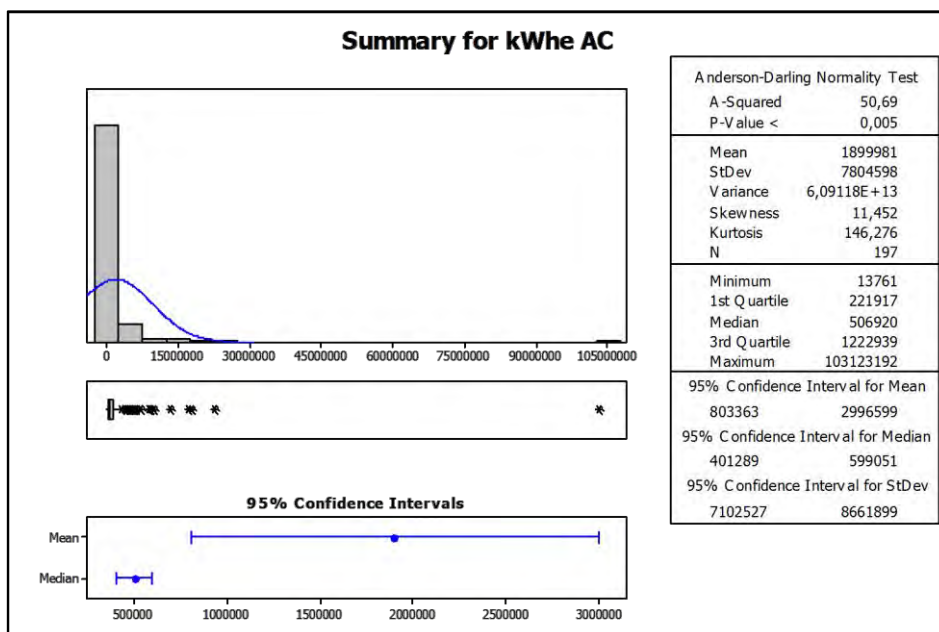


Figura 10. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), metallurgia

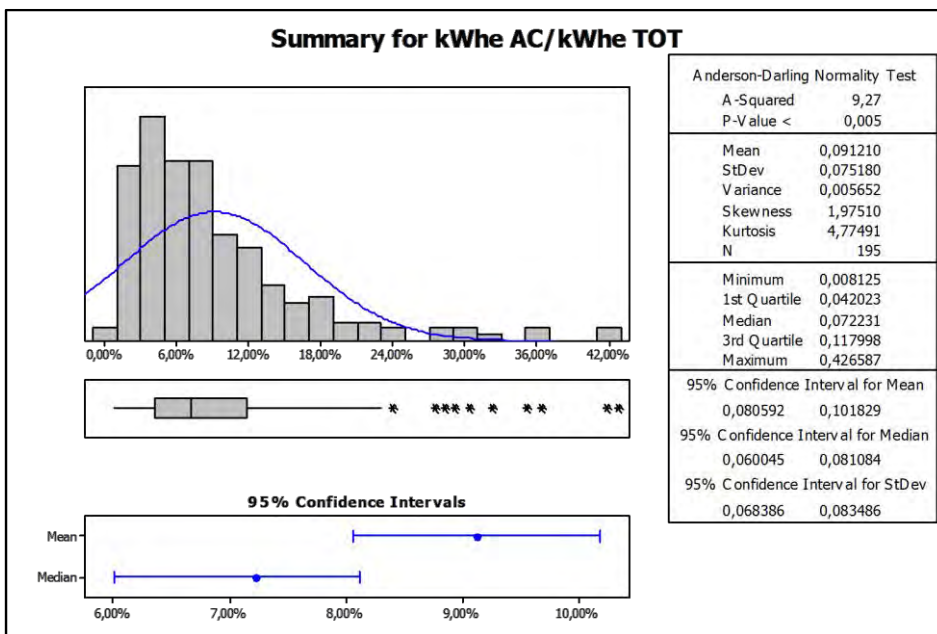


Figura 11. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), metallurgia

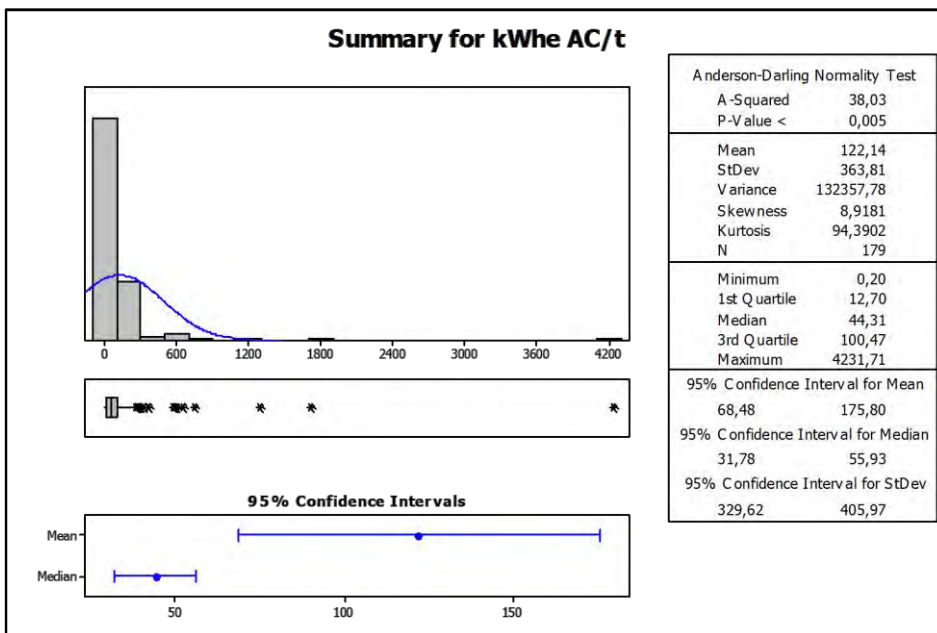


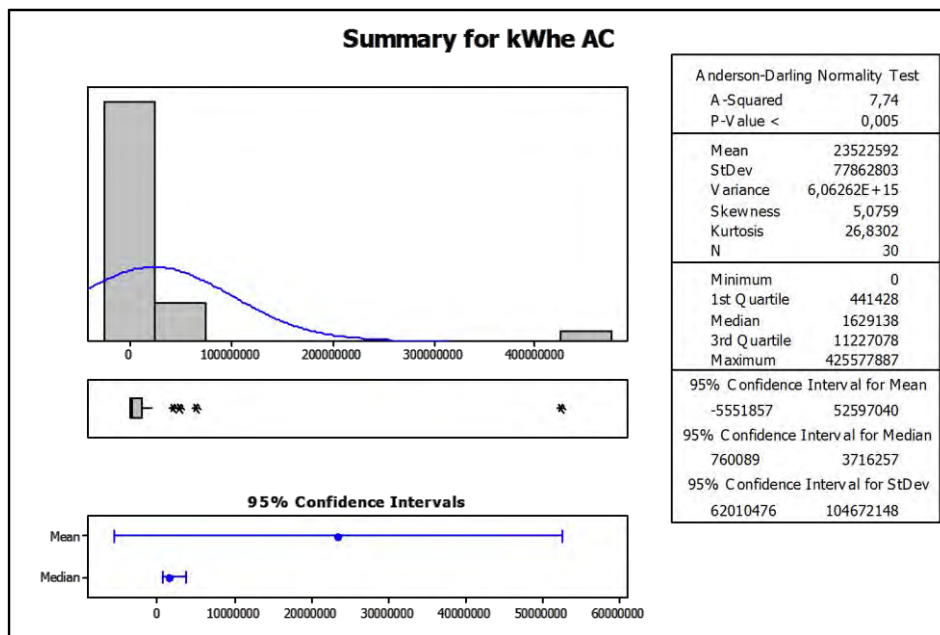
Figura 12. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), metallurgia

### 2.4.2 Fabbricazione di prodotti chimici

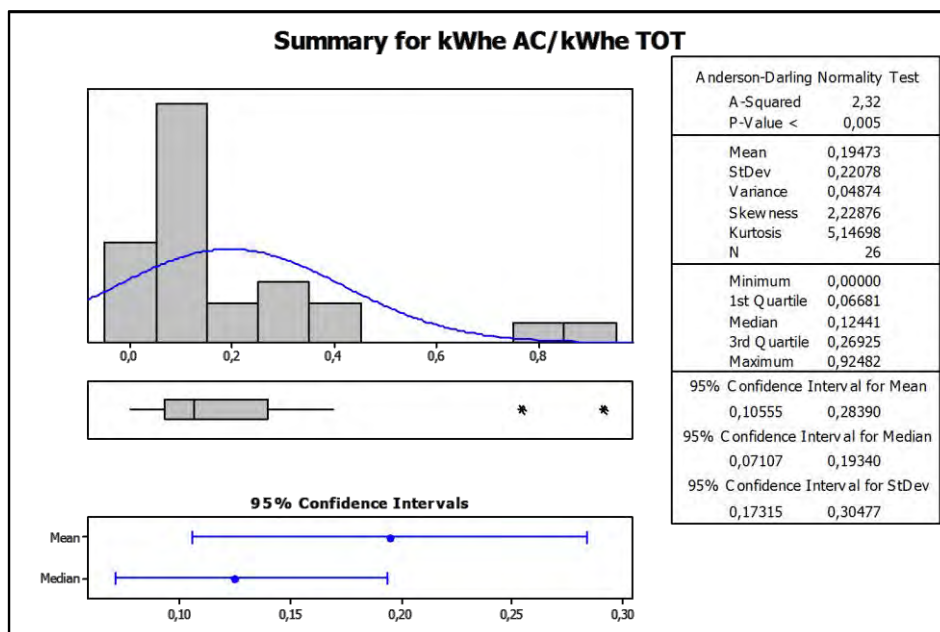
Questo settore include la trasformazione di materiale organico e inorganico grezzo tramite processi chimici e la formazione di prodotti specifici. Si distingue la produzione di elementi chimici di base, che costituiscono il gruppo industriale primario, dalla produzione di prodotti intermedi e finali ottenuti tramite un'ulteriore lavorazione degli elementi chimici di base [52].

Nelle figure dalla 13 alla 18 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per gli indicatori introdotti nella sezione precedente, calcolati su ciascun gruppo di dati (misurati e totali).

Per il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori degli indici risultano tutte non normali e fortemente non simmetriche. Soprattutto nel caso del gruppo di dati misurati gli outlier presenti sono in numero contenuto (solo uno nel caso dell'indice kWh<sub>e</sub> AC/t) e si prestano quindi ad uno studio approfondito in una seconda fase del progetto, per l'ottenimento di valori di benchmark più precisi ed affidabili; si notino in particolare i due outlier di figura 16 e figura 18 che spostano notevolmente il valor medio (ma non la mediana) degli indici kWh<sub>e</sub> AC e kWh<sub>e</sub> AC/t calcolati sui dati totali. Per un riepilogo dei valori medi e mediani di tutti gli indici del settore si vedano le figure 62 e 63 nel seguito del capitolo.



**Figura 13. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di prodotti chimici**



**Figura 14. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di prodotti chimici**

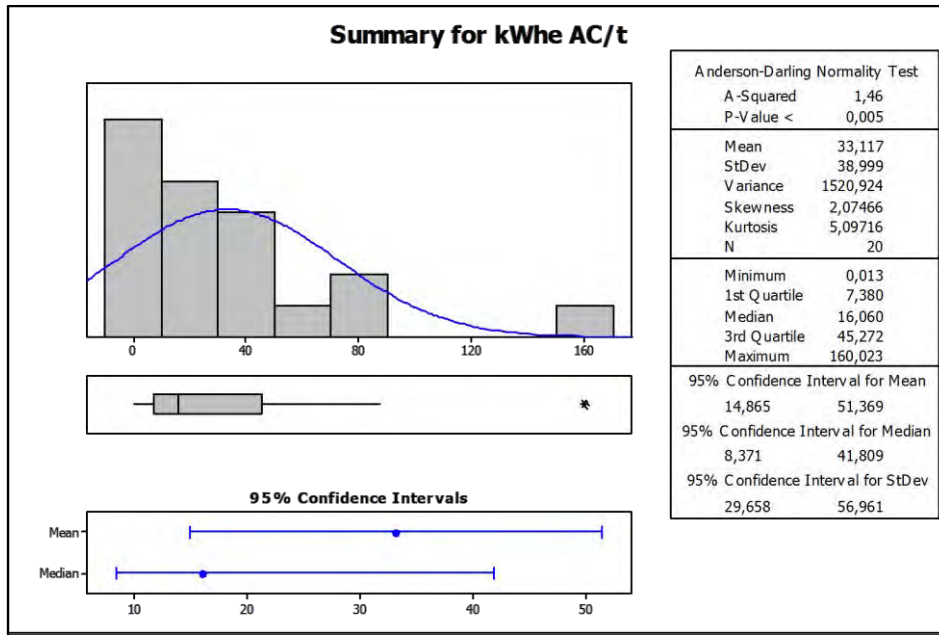


Figura 15. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di prodotti chimici

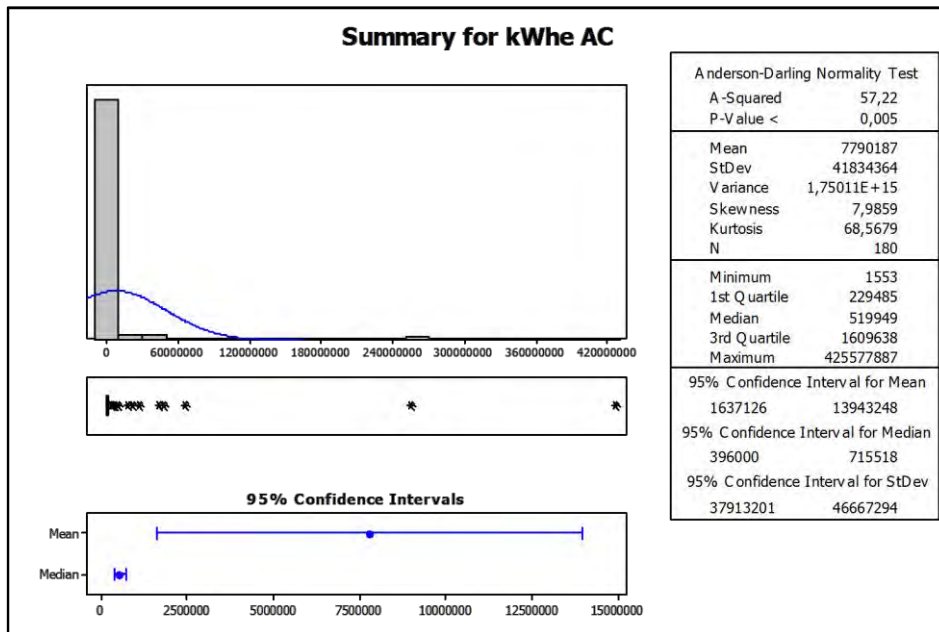
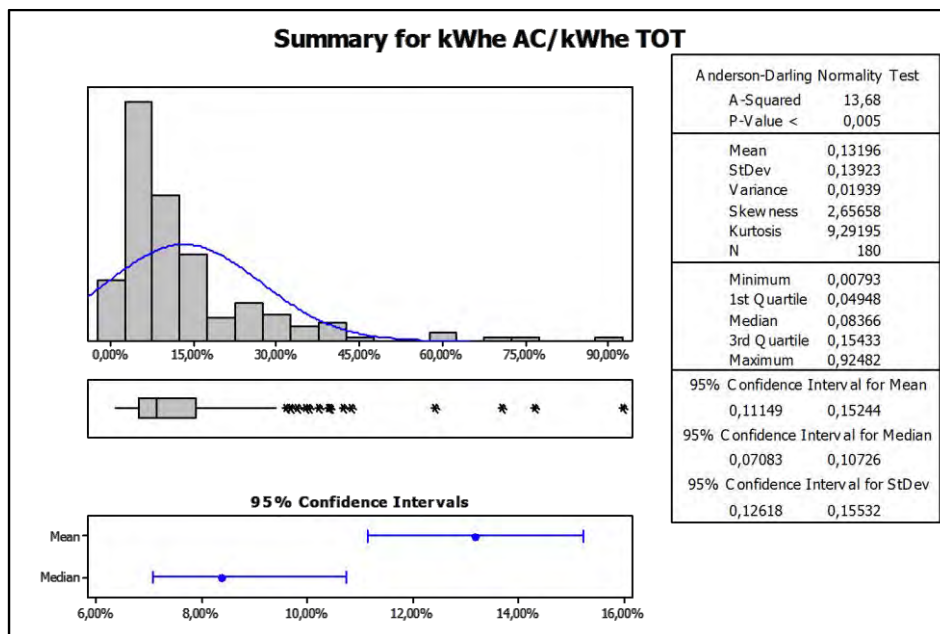
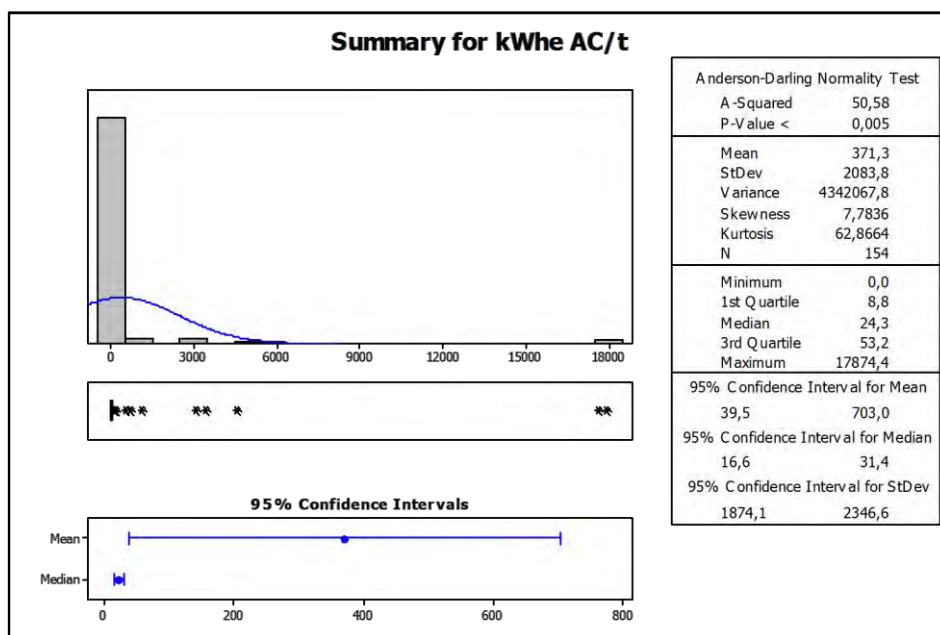


Figura 16. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di prodotti chimici



**Figura 17. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di prodotti chimici**



**Figura 18. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di prodotti chimici**

### 2.4.3 Fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici

Questo settore include la fabbricazione di prodotti e preparati farmaceutici di base. È inclusa anche la fabbricazione di prodotti chimici e botanici per usi medicinali [52].

Nelle figure dalla 19 alla 24 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per gli indicatori introdotti nella sezione precedente, calcolati su ciascun gruppo di dati (misurati e totali).

Per il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori degli indici risultano tutte normali e abbastanza simmetriche per gli indici calcolati sul gruppo di dati misurati (tranne per quanto riguarda

l'indice kWh<sub>e</sub> AC/t), mentre risultano non normali e fortemente non simmetriche per gli altri indici. Nel caso del gruppo di dati misurati non sono presenti outlier (se ne può identificare solo uno nel caso dell'indice kWh<sub>e</sub> AC/t) e si prestano quindi ad uno studio approfondito in una seconda fase del progetto, per l'ottenimento di valori di benchmark più precisi ed affidabili; si noti in particolare l'outlier di figura 22, figura 23 e figura 24 che sposta notevolmente il valor medio (ma non la mediana) degli indici kWh<sub>e</sub> AC, kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT e kWh<sub>e</sub> AC/t calcolati sui dati totali. Per un riepilogo dei valori medi e mediani di tutti gli indici del settore si vedano le figure 62 e 63 nel seguito del capitolo.

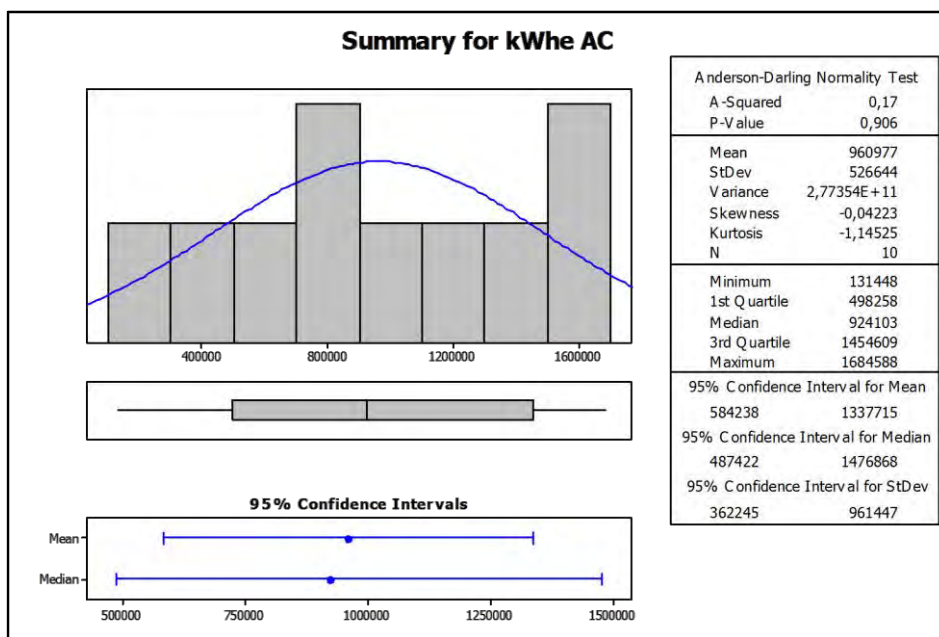


Figura 19. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici

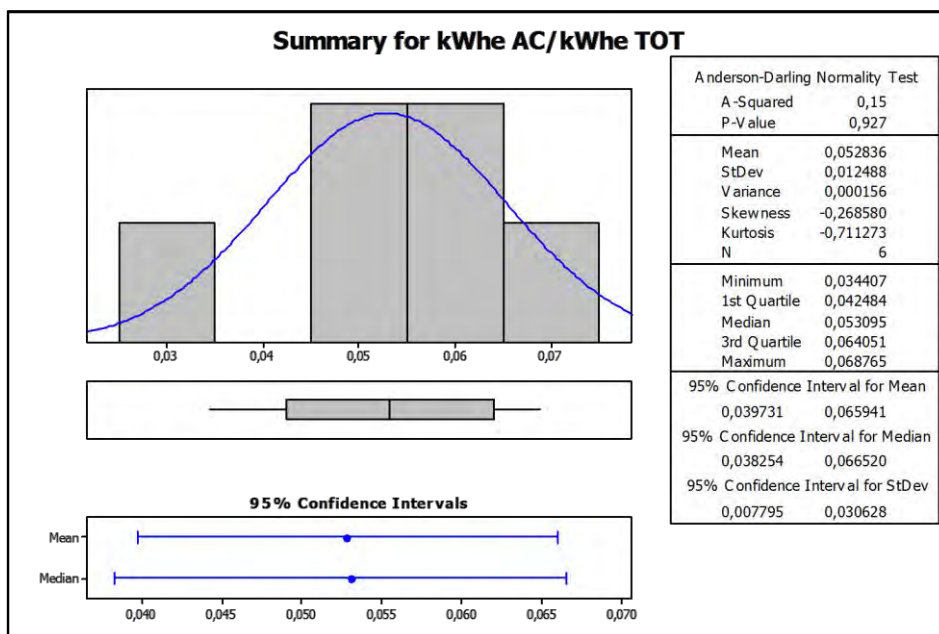


Figura 20. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici

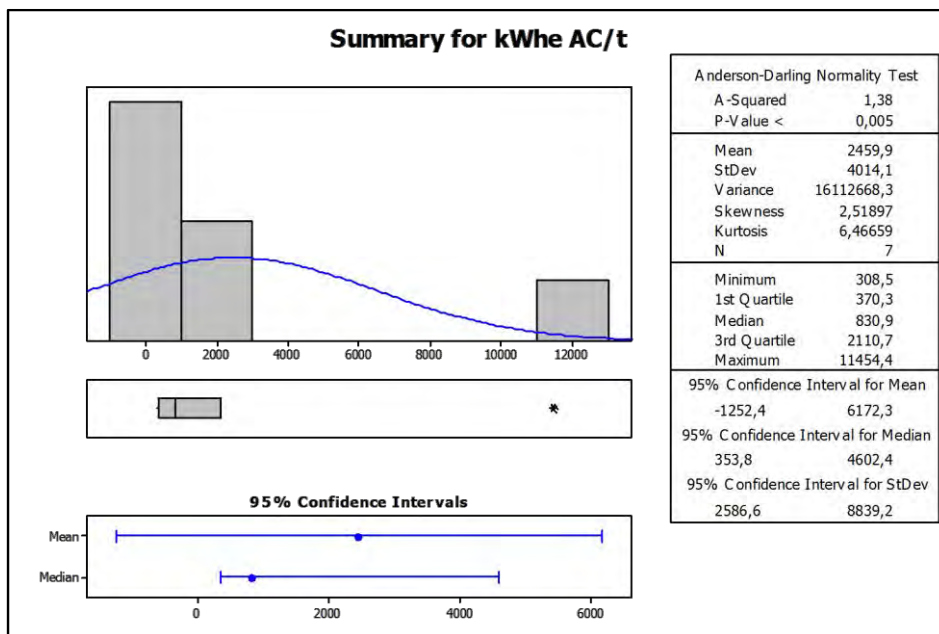


Figura 21. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici

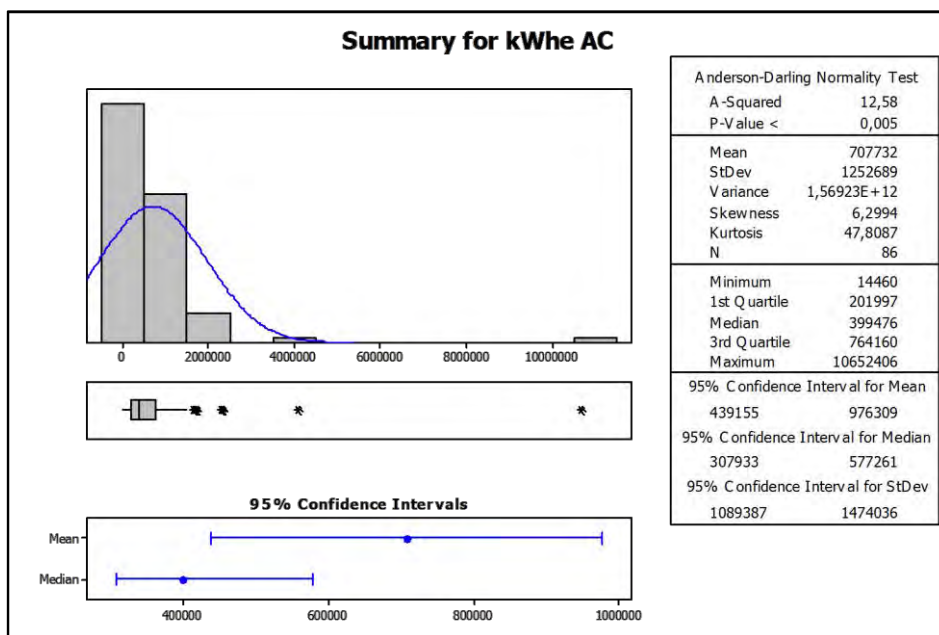


Figura 22. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici

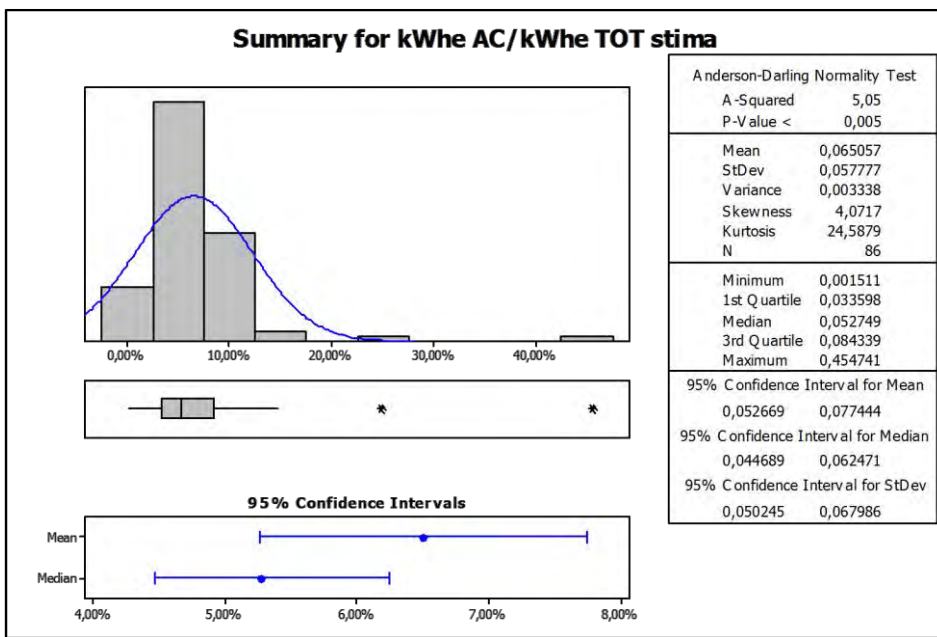


Figura 23. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici

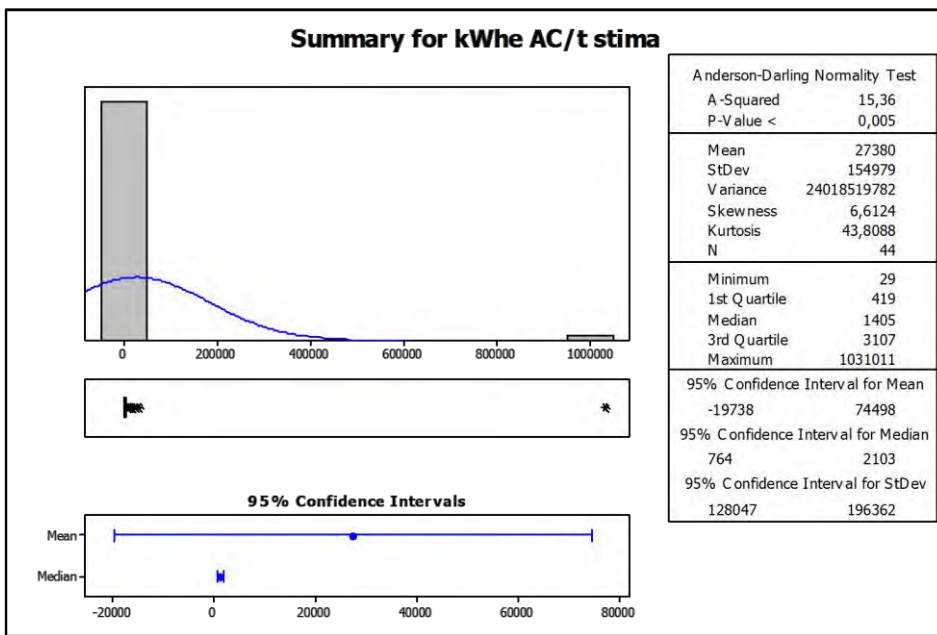


Figura 24. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici

#### 2.4.4 Fabbricazione di prodotti in metallo (esclusi macchinari e attrezzature)

Questo settore include la fabbricazione di prodotti in metallo (quali parti, contenitori, strutture), generalmente con funzione statica fissa. La fabbricazione di armi e munizioni è inclusa in questa divisione [52].

Dal settore sono escluse:

- Attività di riparazione e di manutenzione specializzata;
- Installazione specializzata di beni finali prodotti in questa divisione all'interno di edifici, come le caldaie per il riscaldamento.

Nelle figure dalla 25 alla 30 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per gli indicatori introdotti nella sezione precedente, calcolati su ciascun gruppo di dati (misurati e totali).

Per il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori degli indici risultano tutte non normali e fortemente non simmetriche, tranne per quanto riguarda l'indice kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT calcolato sul gruppo di dati misurati. Soprattutto nel caso del gruppo di dati misurati non sono presenti outlier (anche se le distribuzioni in frequenza evidenziano come il campione sia, per cause da indagare, chiaramente suddiviso in due gruppi) e si prestano quindi ad uno studio approfondito in una seconda fase del progetto, per l'ottenimento di valori di benchmark più precisi ed affidabili. Per un riepilogo dei valori medi e mediani di tutti gli indici del settore si vedano le figure 62 e 63 nel seguito del capitolo.

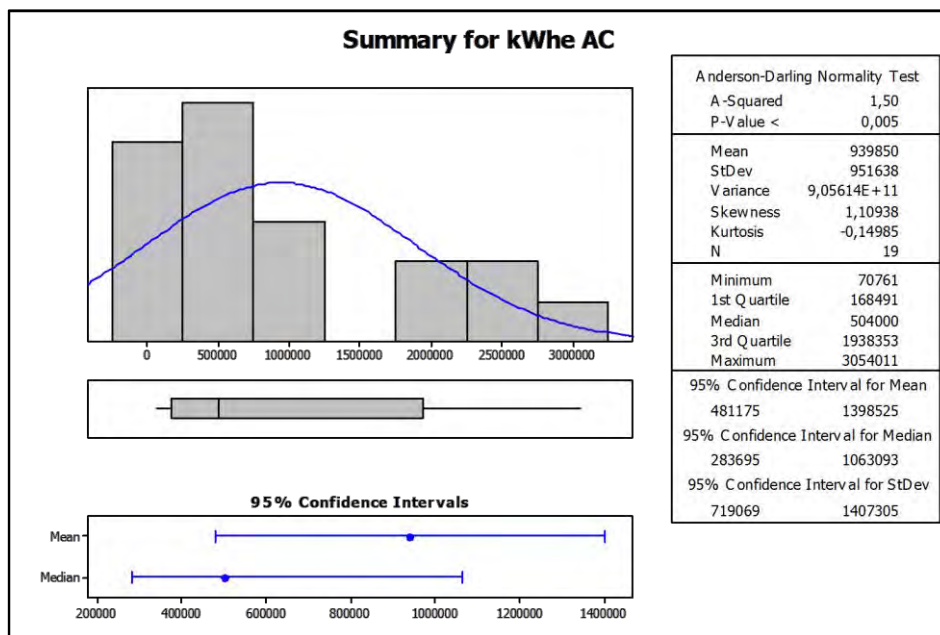


Figura 25. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di prodotti in metallo

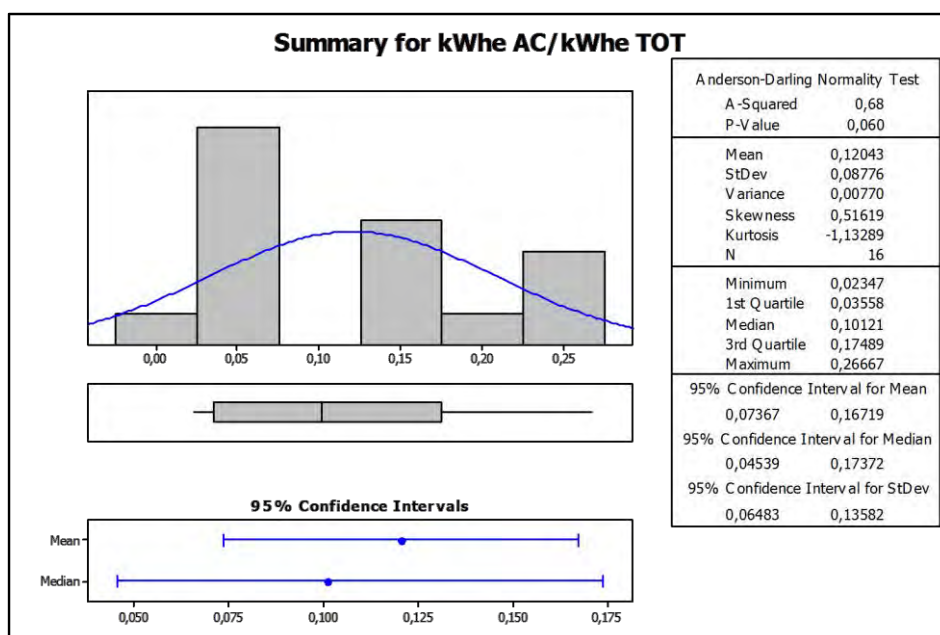


Figura 26. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di prodotti in metallo

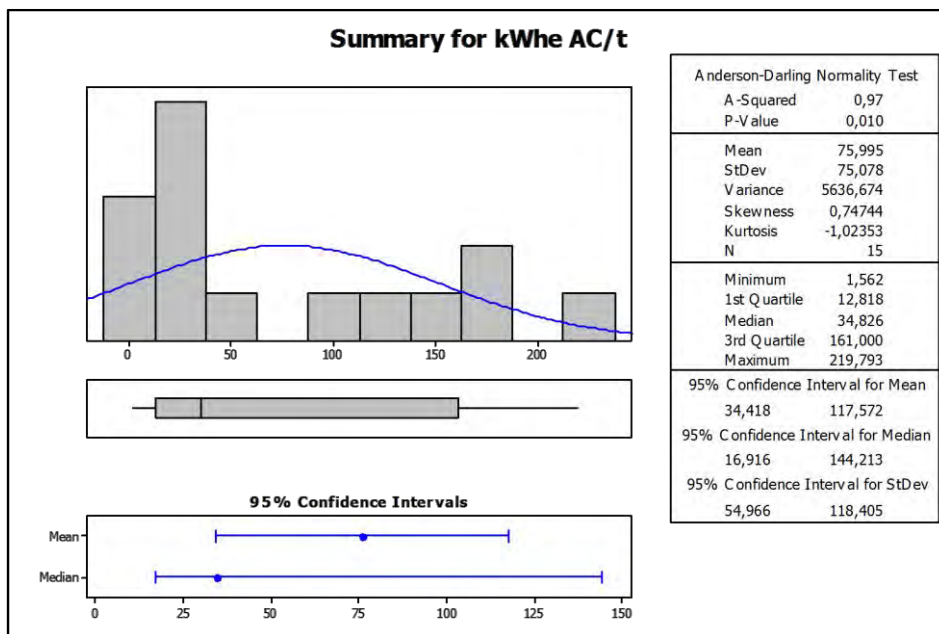


Figura 27. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di prodotti in metallo

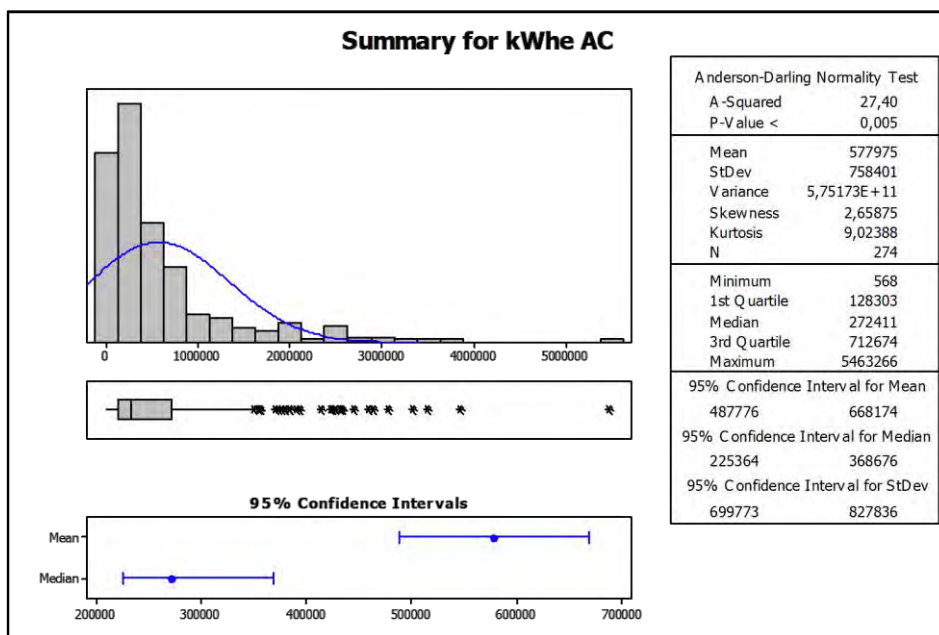
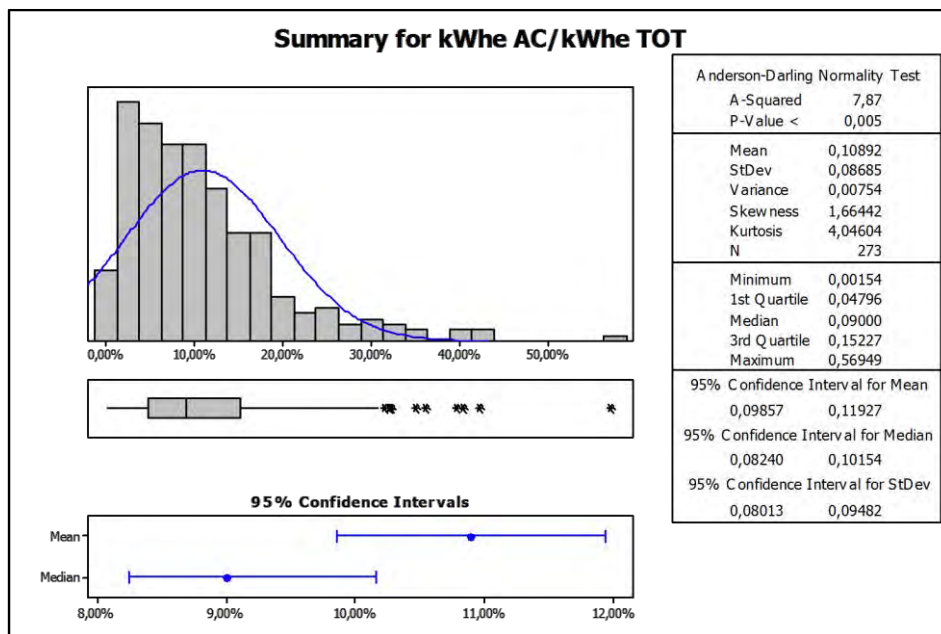
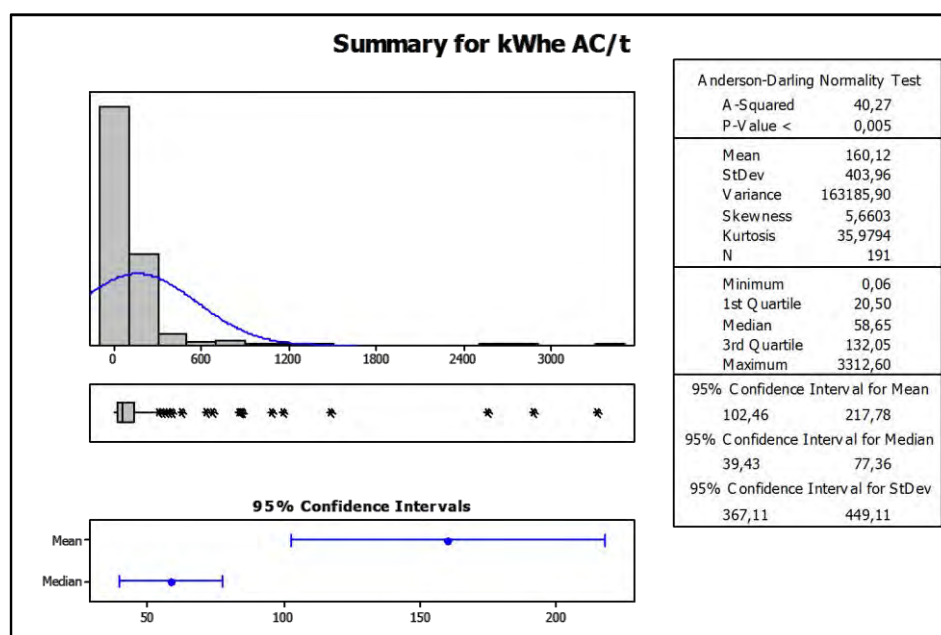


Figura 28. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di prodotti in metallo



**Figura 29. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di prodotti in metallo**



**Figura 30. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di prodotti in metallo**

#### 2.4.5 Fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi

Questo settore include la fabbricazione di autoveicoli per il trasporto di passeggeri o merci. È inclusa la fabbricazione di parti ed accessori, nonché la fabbricazione di rimorchi e semi-rimorchi.

La manutenzione e la riparazione dei veicoli, prodotti in questo settore, sono classificate in un'altra classe [52].

Nelle figure dalla 31 alla 36 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per gli indicatori introdotti nella sezione precedente, calcolati su ciascun gruppo di dati (misurati e totali).

Per il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori degli indici calcolati sul gruppo di dati misurati sono state riportate per completezza, ma sono ritenute poco significative data la scarsa numerosità del campione. Per quanto riguarda gli indici calcolati invece sul gruppo di dati totali, si note come le distribuzioni risultino tutte non normali e scarsamente simmetriche; gli outlier presenti sono tuttavia in numero contenuto e si prestano quindi ad uno studio approfondito in una seconda fase del progetto, per l’ottenimento di valori di benchmark più precisi ed affidabili. Per un riepilogo dei valori medi e mediani di tutti gli indici del settore si vedano le figure 62 e 63 nel seguito del capitolo.

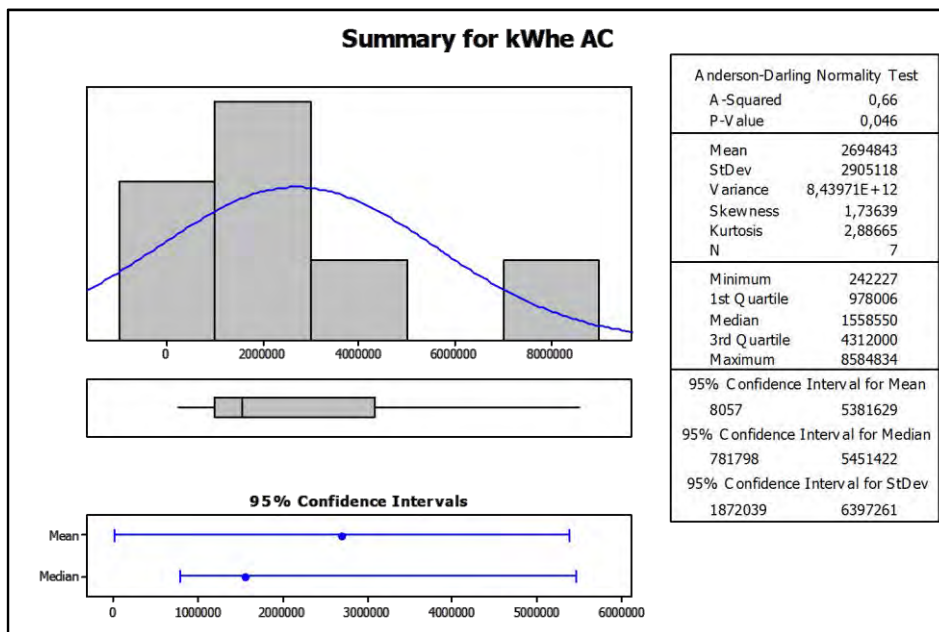


Figura 31. Analisi statistica dei valori dell’indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi

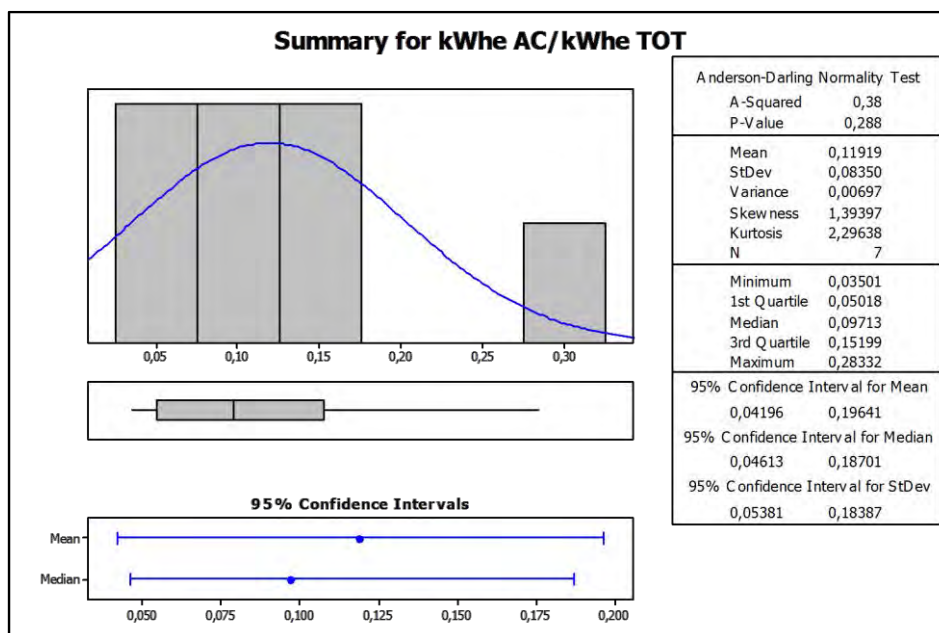


Figura 32. Analisi statistica dei valori dell’indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi

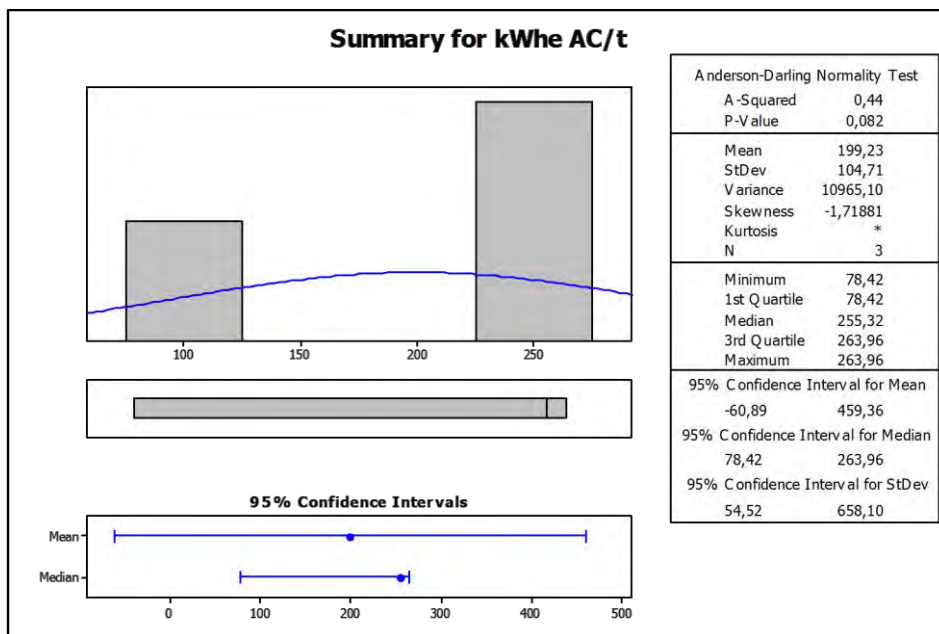


Figura 33. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi

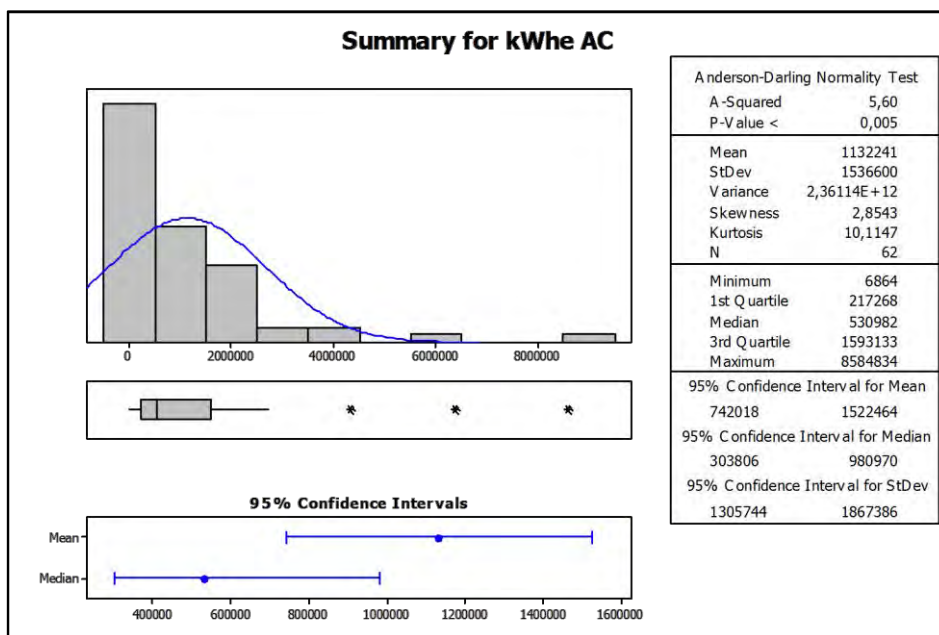


Figura 34. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi

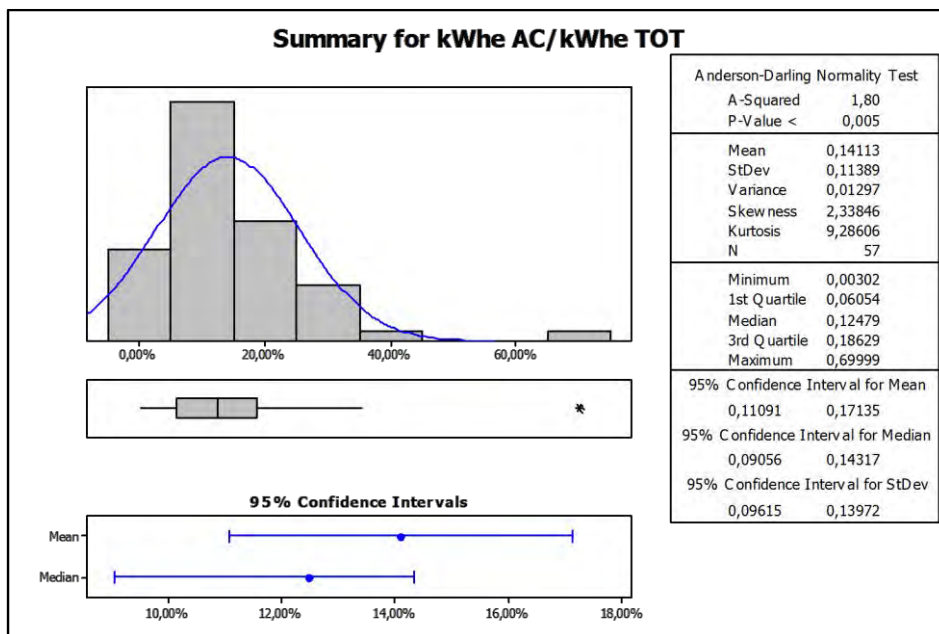


Figura 35. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi

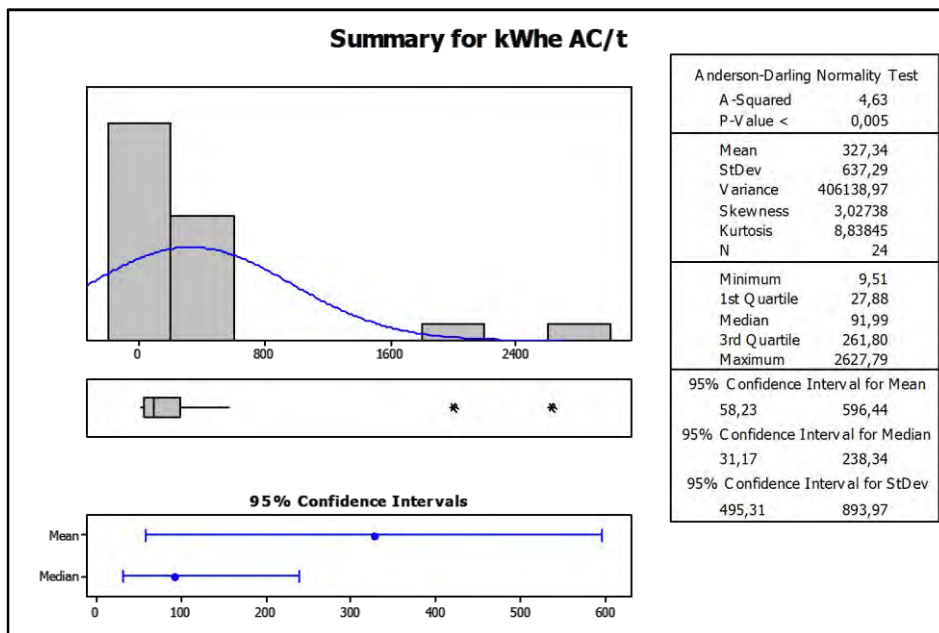


Figura 36. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi

#### 2.4.6 Fabbricazione di articoli in materie plastiche

Questo settore comprende la trasformazione di resine plastiche nuove o usate (per esempio riciclate) in prodotti intermedi o finali, utilizzando processi quali la compressione, l'estrusione, l'iniezione, il soffio e la fusione. Nella maggior parte dei casi, il processo di produzione permette di ottenere una grande varietà di prodotti [52].

Nelle figure dalla 37 alla 42 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per gli indicatori introdotti nella sezione precedente, calcolati su ciascun gruppo di dati (misurati e totali).

Per il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori degli indici risultano tutte non normali e fortemente non simmetriche (tranne per quanto riguarda gli indici kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT e kWh<sub>e</sub> AC/t calcolati sul gruppo di dati misurati). Soprattutto nel caso del gruppo di dati misurati gli outlier presenti sono scarsamente presenti e si prestano quindi ad uno studio approfondito in una seconda fase del progetto, per l'ottenimento di valori di benchmark più precisi ed affidabili; si notino in particolare i due outlier di figura 40 e figura 42 che spostano notevolmente il valor medio (ma non la mediana) degli indici kWh<sub>e</sub> AC e kWh<sub>e</sub> AC/t calcolati sui dati totali. Per un riepilogo dei valori medi e mediani di tutti gli indici del settore si vedano le figure 62 e 63 nel seguito del capitolo.

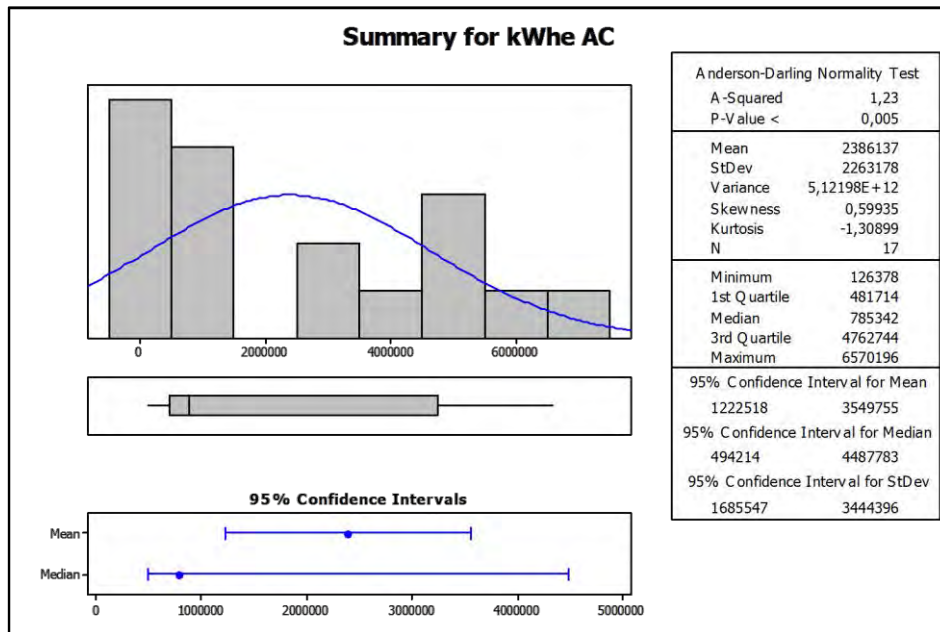


Figura 37. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di articoli in materie plastiche

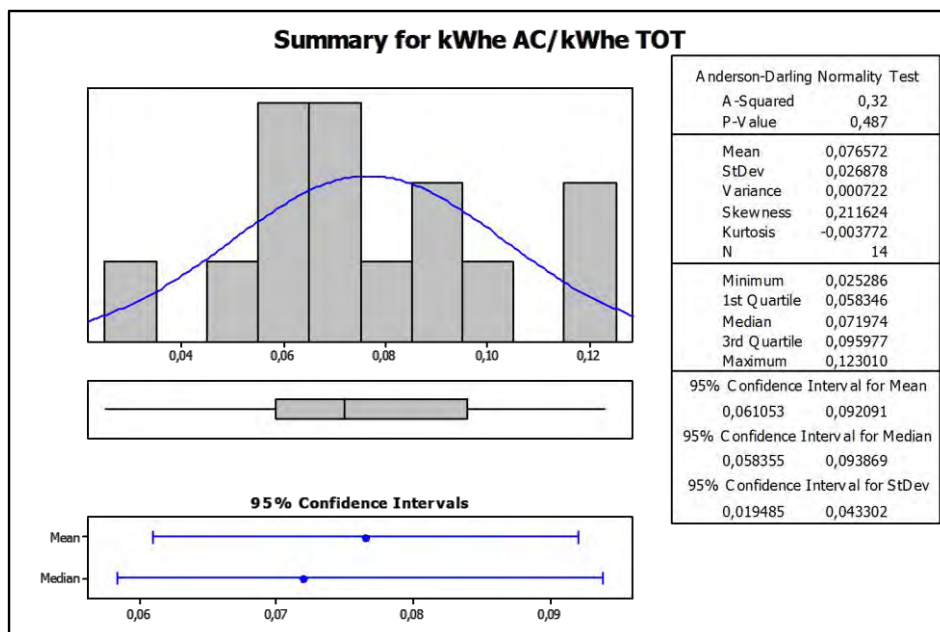


Figura 38. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di articoli in materie plastiche

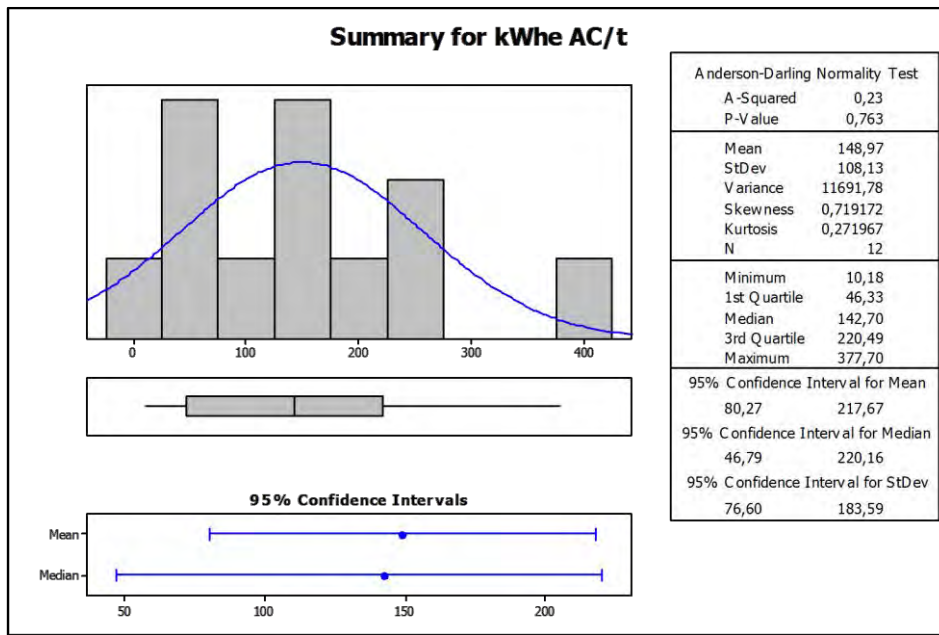


Figura 39. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di articoli in materie plastiche

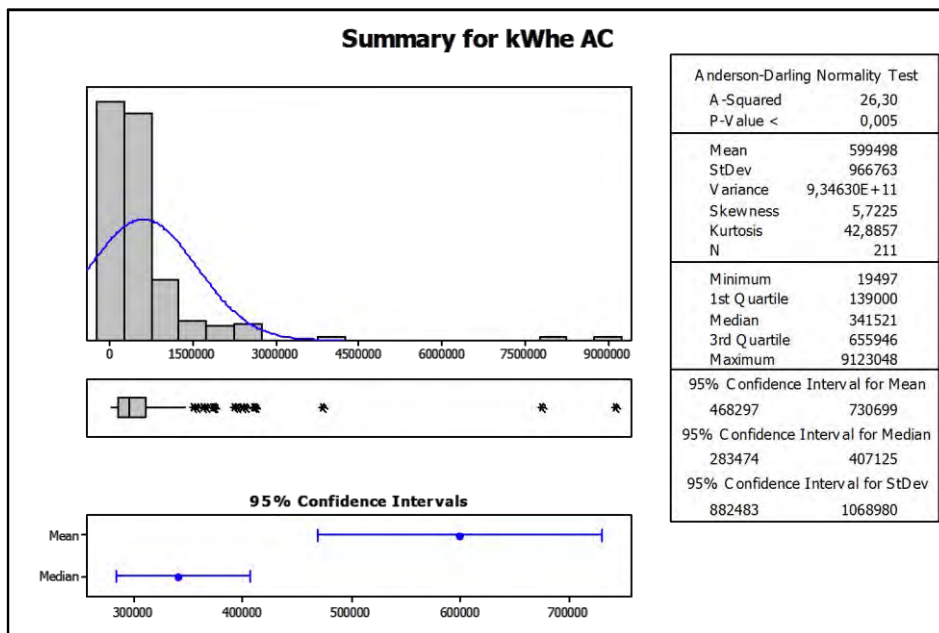
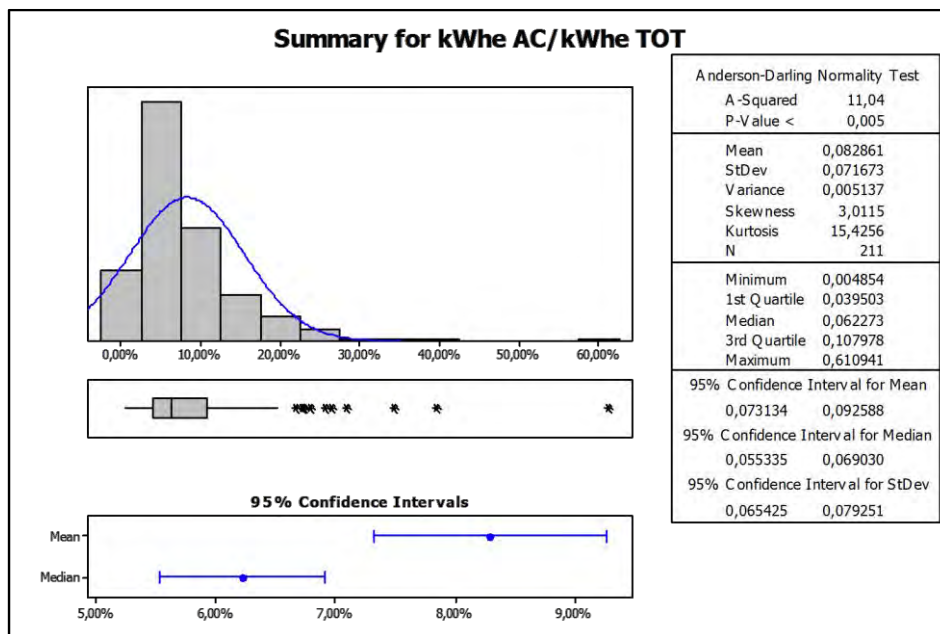
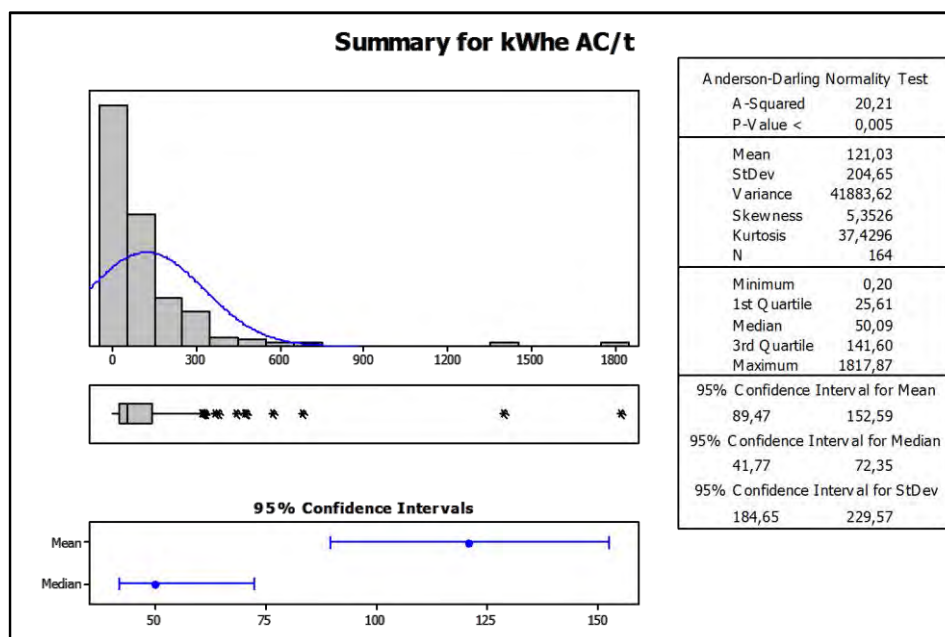


Figura 40. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di articoli in materie plastiche



**Figura 41. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di articoli in materie plastiche**



**Figura 42. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di articoli in materie plastiche**

#### 2.4.7 Industrie tessili

Questo settore include la preparazione e la filatura di fibre tessili compresa la tessitura di materie tessili, il finissaggio dei tessuti e degli articoli di vestiario, la fabbricazione di articoli in tessuto, diversi dagli articoli di vestiario (ad esempio: biancheria da casa, coperte, scendiletto, corde eccetera). La coltivazione di piante produttrici di fibre naturali rientra in un altro settore, così come la fabbricazione di articoli di vestiario e di fibre artificiali e sintetiche, che è classificabile come processo chimico [52].

Nelle figure dalla 43 alla 48 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per gli indicatori introdotti nella sezione precedente, calcolati su ciascun gruppo di dati (misurati e totali).

Per il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori degli indici calcolati sul gruppo di dati misurati sono state riportate per completezza, ma sono ritenute poco significative data la scarsa numerosità del campione. Per quanto riguarda gli indici calcolati invece sul gruppo di dati totali, si note come le distribuzioni risultino tutte non normali e scarsamente simmetriche; gli outlier presenti sono tuttavia in numero contenuto e si prestano quindi ad uno studio approfondito in una seconda fase del progetto, per l’ottenimento di valori di benchmark più precisi ed affidabili. Per un riepilogo dei valori medi e mediani di tutti gli indici del settore si vedano le figure 62 e 63 nel seguito del capitolo.

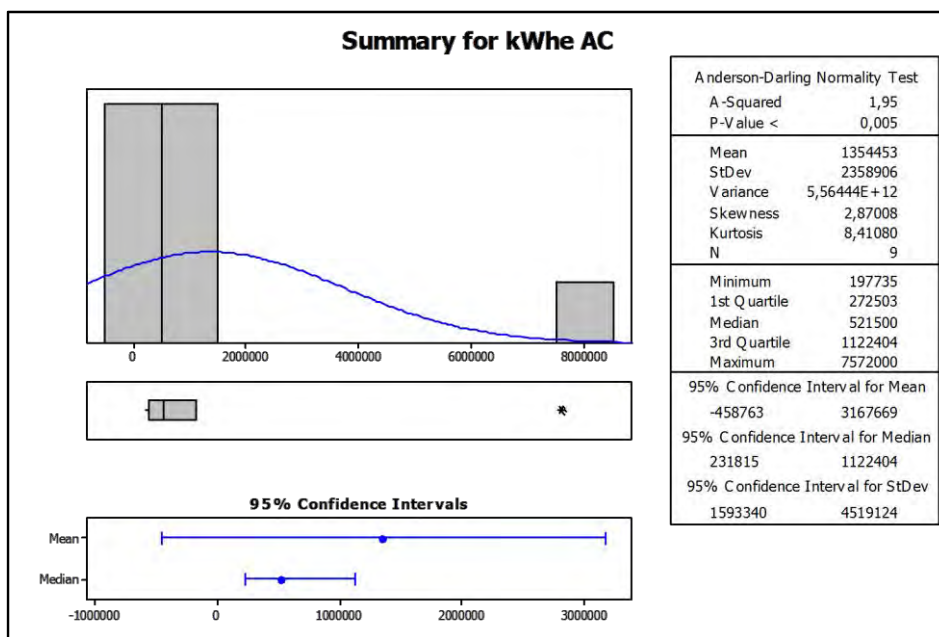


Figura 43. Analisi statistica dei valori dell’indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente solo siti con dati misurati, industrie tessili

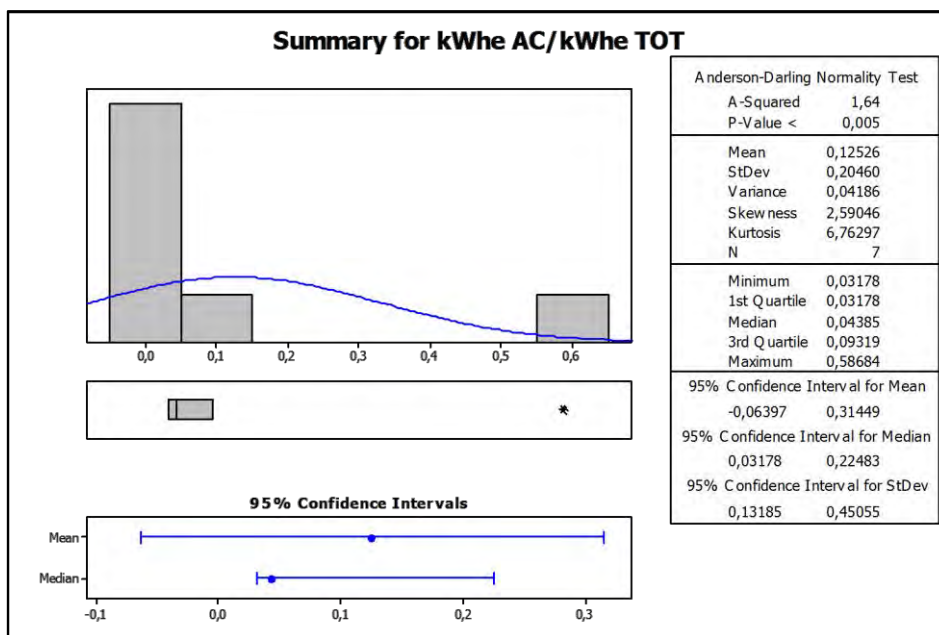


Figura 44. Analisi statistica dei valori dell’indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente solo siti con dati misurati, industrie tessili

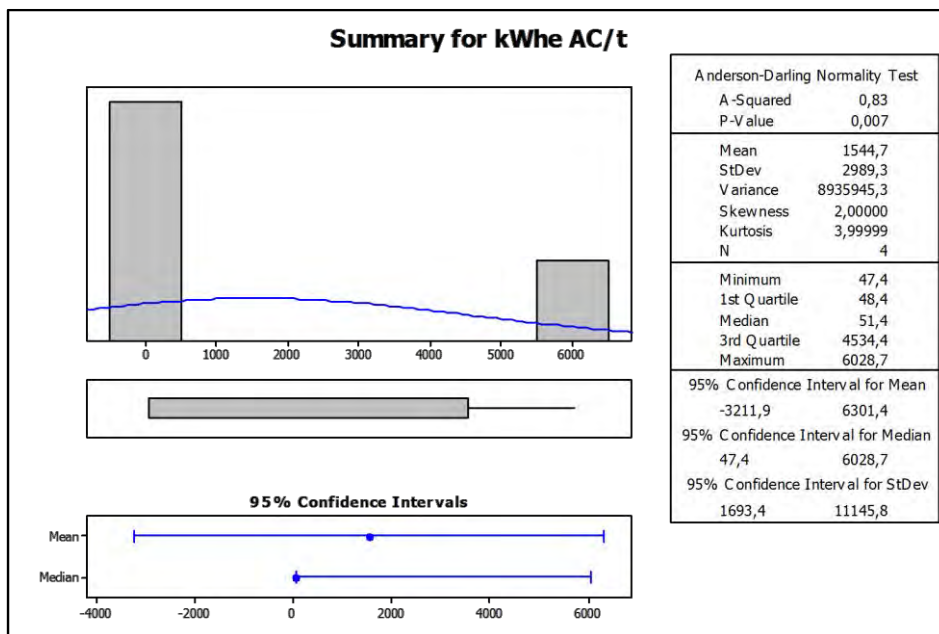


Figura 45. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente solo siti con dati misurati, industrie tessili

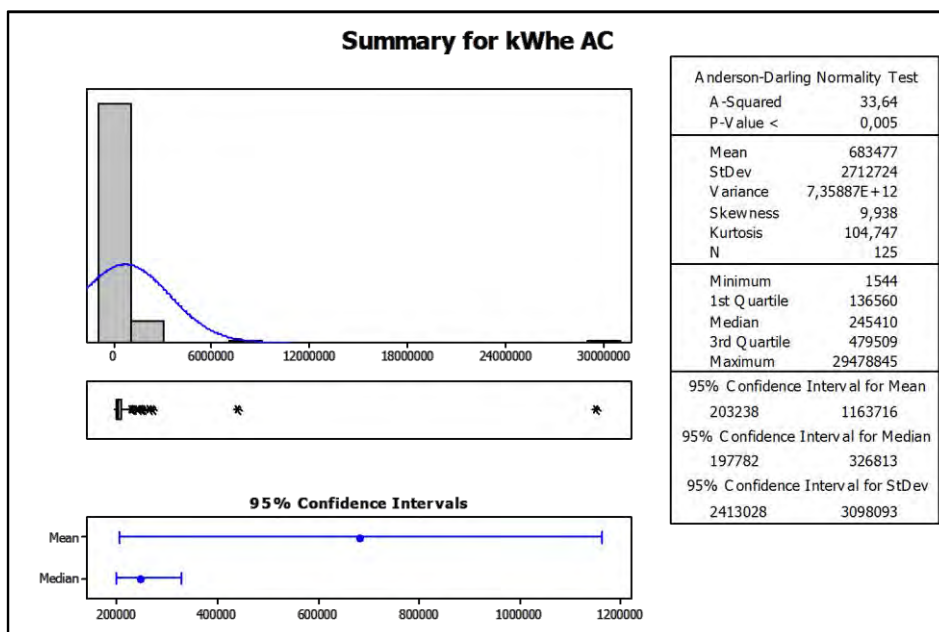


Figura 46. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), industrie tessili

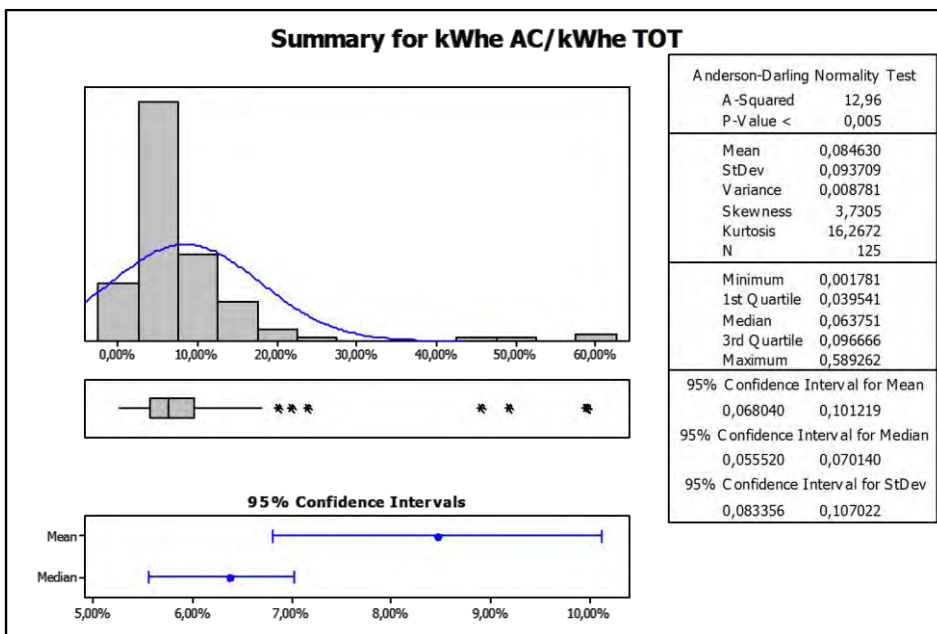


Figura 47. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), industrie tessili

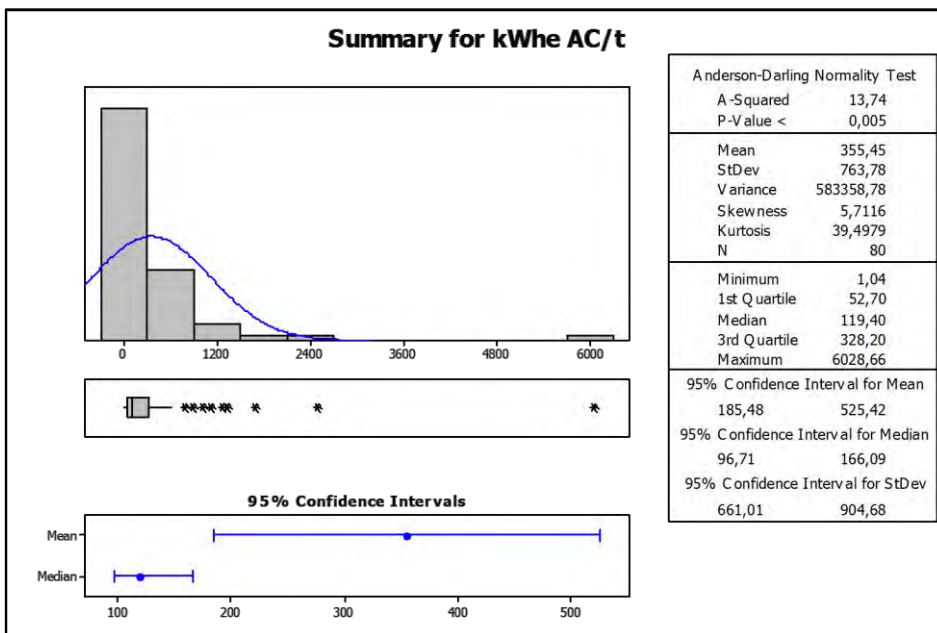


Figura 48. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), industrie tessili

### 2.4.8 Industrie alimentari

Questo settore include la trasformazione di prodotti dell'agricoltura, della silvicoltura e della pesca in alimenti e bevande commestibili per l'uomo o per gli animali, nonché la produzione di vari prodotti intermedi da non considerare alla stregua dei prodotti alimentari (ad esempio, pellame proveniente dai macelli, pannelli provenienti dalla produzione di olio).

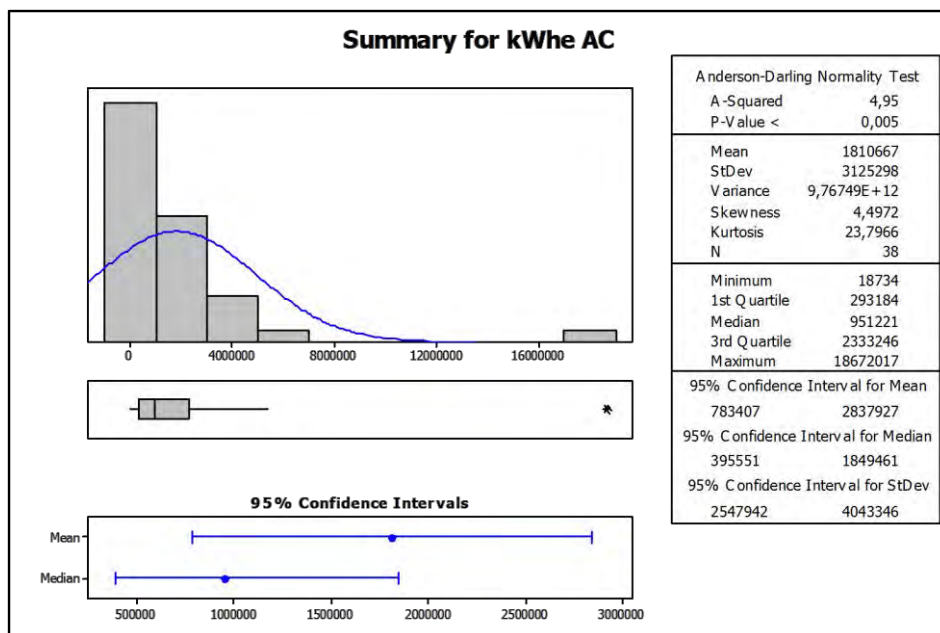
Il settore è organizzato per attività riguardanti diversi tipi di prodotti: carne, pesce, frutta e ortaggi, grassi ed oli, prodotti lattiero-caseari, granaglie, prodotti di panetteria e farinacei, altri prodotti alimentari e mangimi per animali. La produzione può essere effettuata per conto proprio o per conto terzi, come nel

caso della macellazione su ordinazione. Questo settore non include la preparazione di pasti per il consumo immediato come nei ristoranti.

Alcune attività sono considerate manifatturiere (panetterie che vendono i propri prodotti) anche se l'unità che le espleta vende al dettaglio in un proprio negozio. Tuttavia, nel caso in cui la lavorazione sia minima e non conduca ad una reale trasformazione, l'unità viene classificata nella sezione Commercio all'ingrosso e al dettaglio. La preparazione di alimenti per il consumo immediato sul posto, la trasformazione di cascami di alimenti e bevande in materie prime secondarie e lo smaltimento di cascami di alimenti e bevande sono inseriti in altre classi [52].

Nelle figure dalla 49 alla 54 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per gli indicatori introdotti nella sezione precedente, calcolati su ciascun gruppo di dati (misurati e totali).

Per il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori degli indici risultano tutte non normali e fortemente non simmetriche (tranne per quanto riguarda l'indice kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT calcolato sul gruppo di dati misurati). Soprattutto nel caso del gruppo di dati misurati gli outlier presenti sono in numero contenuto e si prestano quindi ad uno studio approfondito in una seconda fase del progetto, per l'ottenimento di valori di benchmark più precisi ed affidabili; si noti in particolare l'outlier di figura 52, figura 53 e figura 54 che sposta notevolmente il valor medio (ma non la mediana) degli indici calcolati sui dati totali. Per un riepilogo dei valori medi e mediani di tutti gli indici del settore si vedano le figure 62 e 63 nel seguito del capitolo.



**Figura 49. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente solo siti con dati misurati, industrie alimentari**

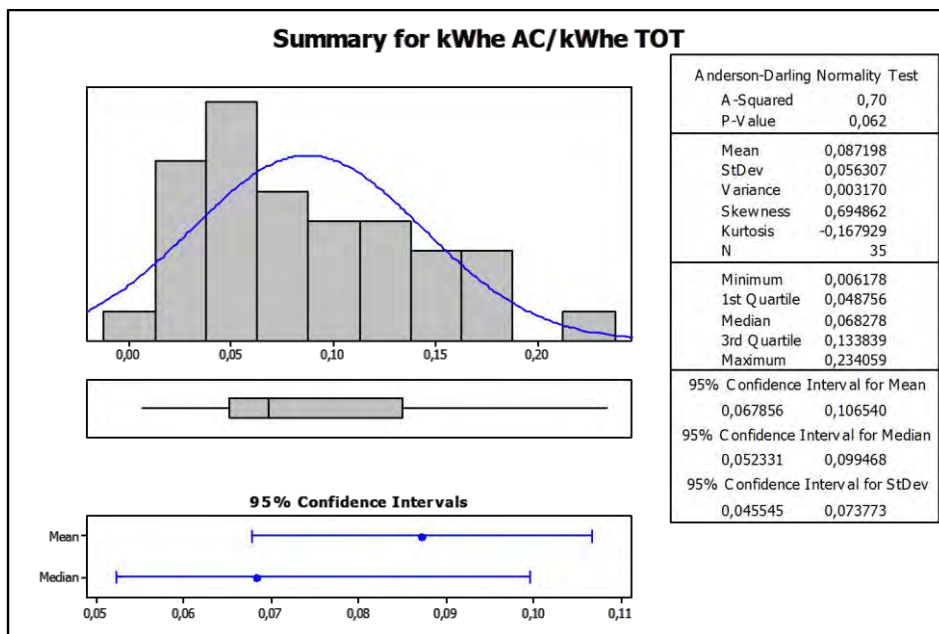


Figura 50. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente solo siti con dati misurati, industrie alimentari

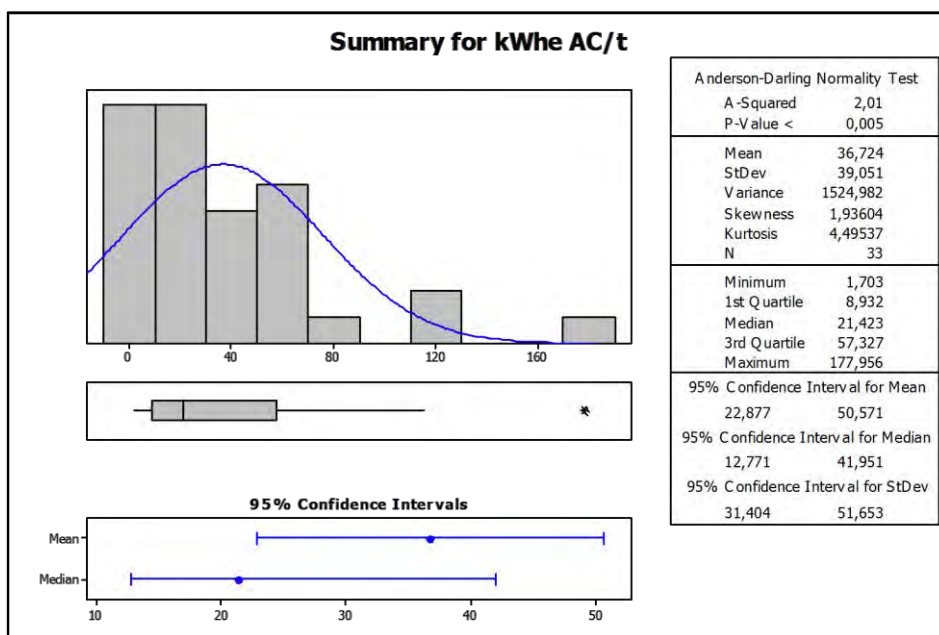


Figura 51. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente solo siti con dati misurati, industrie alimentari

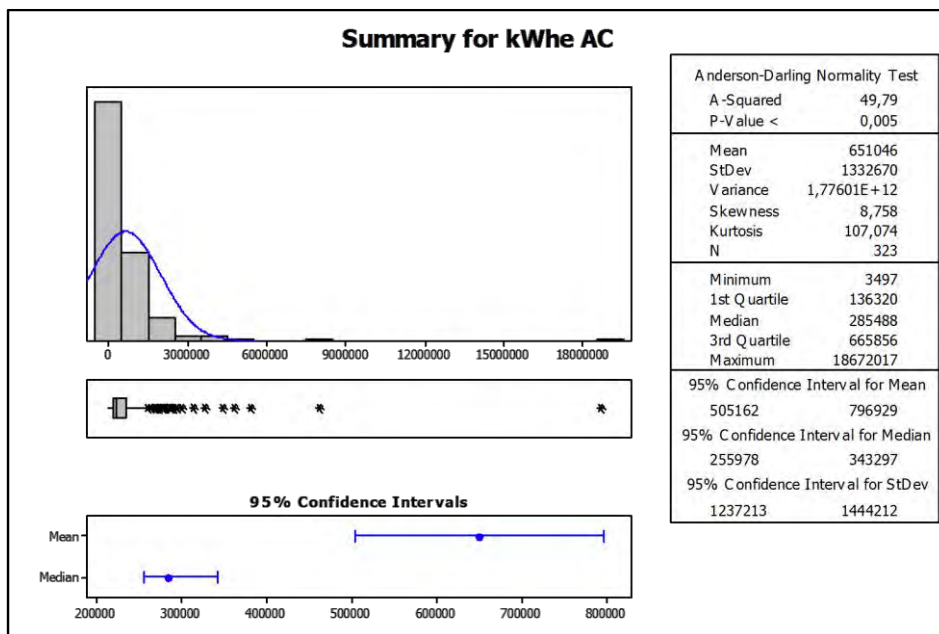


Figura 52. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), industrie alimentari

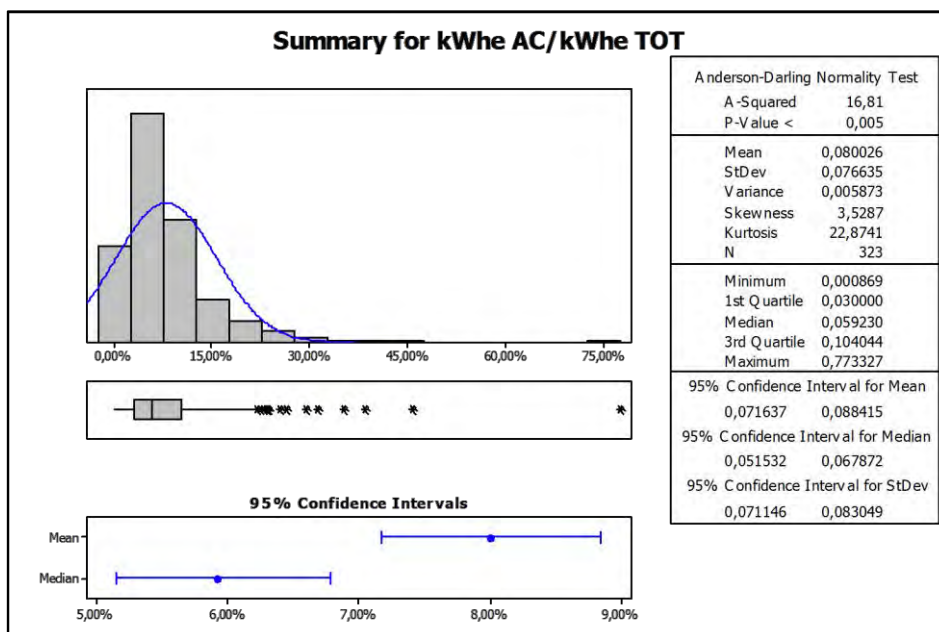


Figura 53. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), industrie alimentari

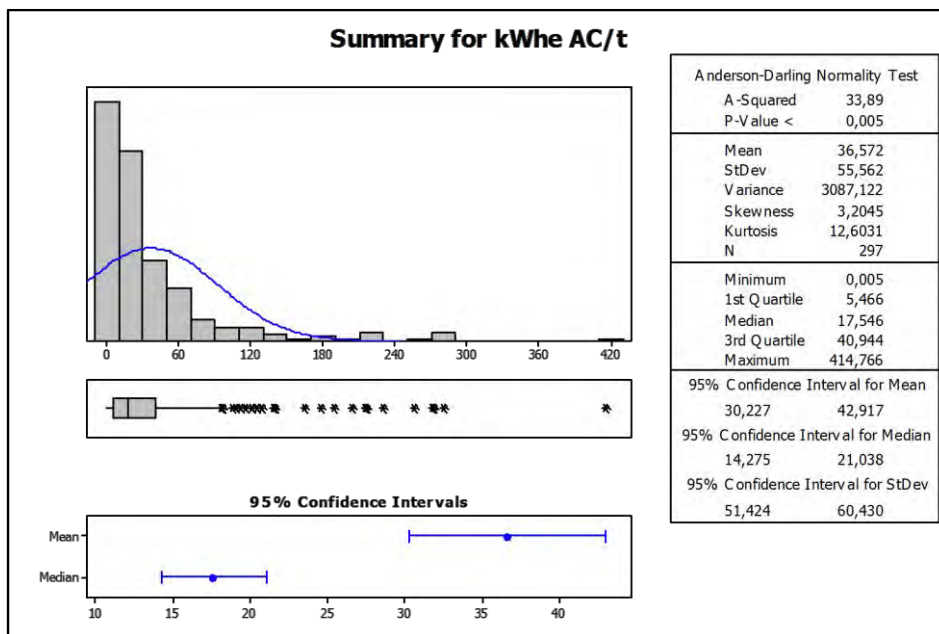


Figura 54. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), industrie alimentari

#### 2.4.9 Fabbricazione di carta e prodotti di carta

Questo settore include la fabbricazione di pasta-carta, carta e prodotti di carta trasformati. La fabbricazione di tali prodotti è raggruppata insieme in quanto si tratta di una serie di processi integrati verticalmente. Una stessa unità spesso effettua più di una attività.

Le attività sono essenzialmente tre: la fabbricazione di pasta-carta, che comporta la separazione delle fibre di cellulosa dalle altre impurità del legno o della carta usata; la fabbricazione di carta, che comporta la finitura di tali fibre in fogli; la trasformazione e la lavorazione di prodotti di carta e cartone, fatte con tecniche e l'apporto di materiali diversi.

La fabbricazione di articoli di carta stampata (ad esempio: carta da parati, carta da regalo eccetera) è compresa in questo settore a condizione che l'attività di stampa non costituisca lo scopo principale [52].

Nelle figure dalla 55 alla 60 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per gli indicatori introdotti nella sezione precedente, calcolati su ciascun gruppo di dati (misurati e totali).

Per il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori degli indici calcolati sul gruppo di dati misurati sono state riportate per completezza, ma sono ritenute poco significative data la scarsa numerosità del campione. Per quanto riguarda gli indici calcolati invece sul gruppo di dati totali, si nota come le distribuzioni risultino tutte non normali e scarsamente simmetriche; gli outlier presenti sono tuttavia in numero contenuto e si prestano quindi ad uno studio approfondito in una seconda fase del progetto, per l'ottenimento di valori di benchmark più precisi ed affidabili. Per un riepilogo dei valori medi e mediani di tutti gli indici del settore si vedano le figure 62 e 63 nel seguito del capitolo.

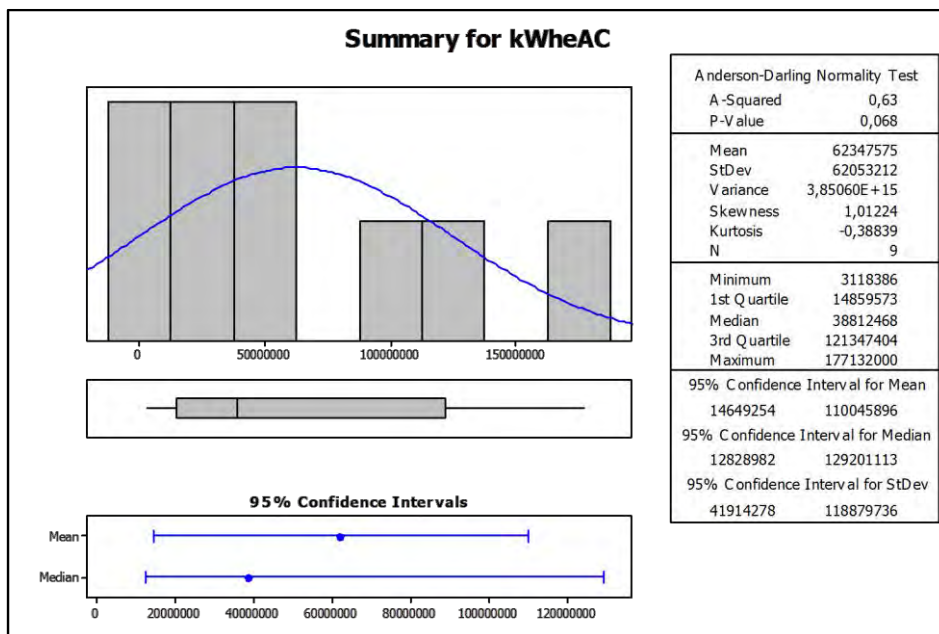


Figura 55. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di carta e prodotti di carta

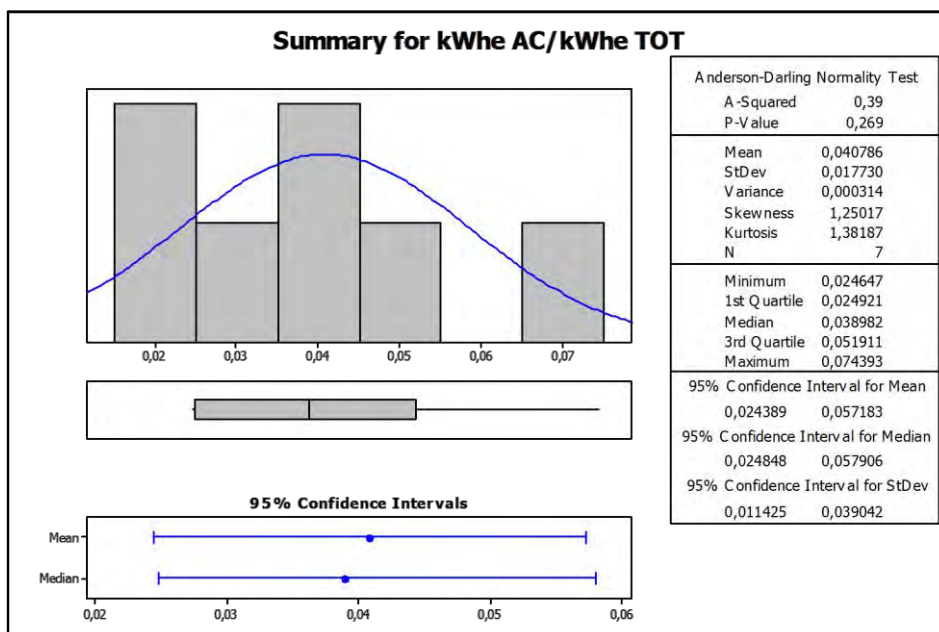


Figura 56. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di carta e prodotti di carta

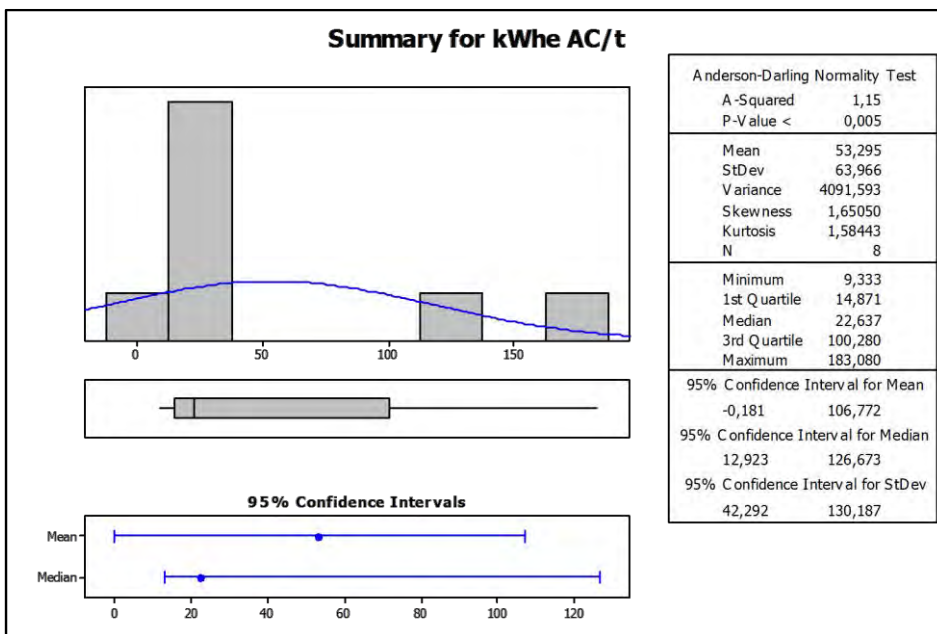


Figura 57. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente solo siti con dati misurati, fabbricazione di carta e prodotti di carta

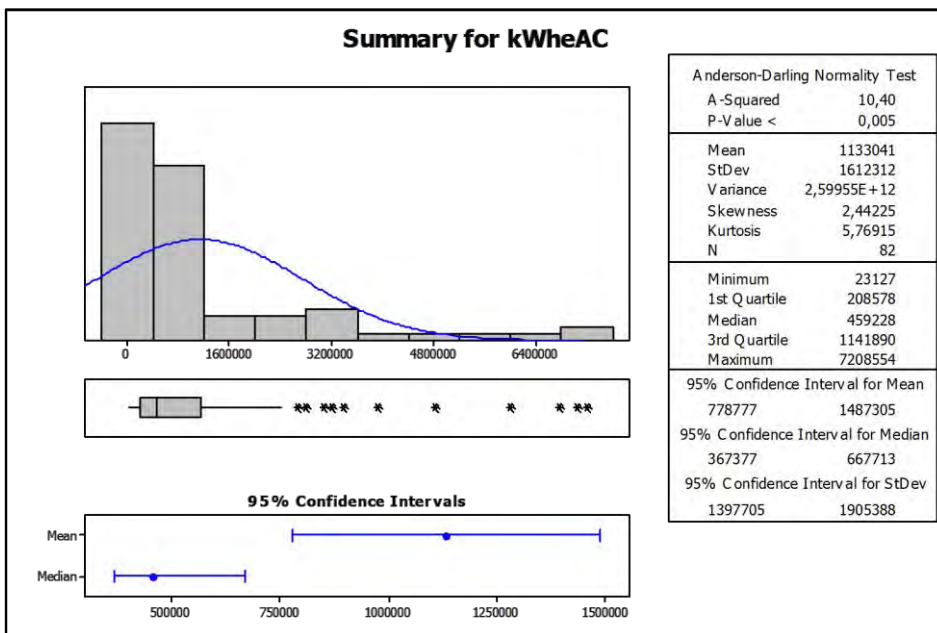
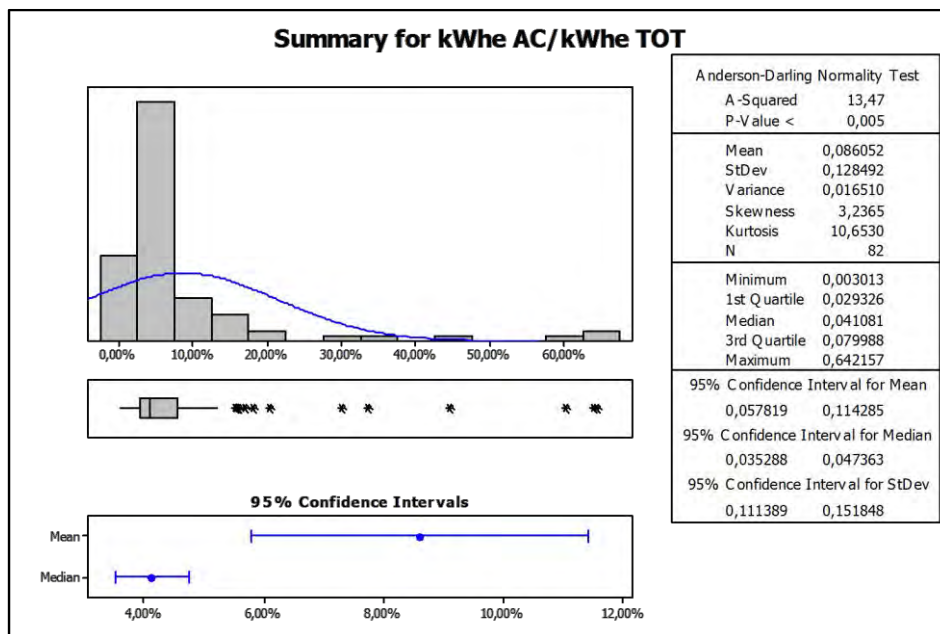
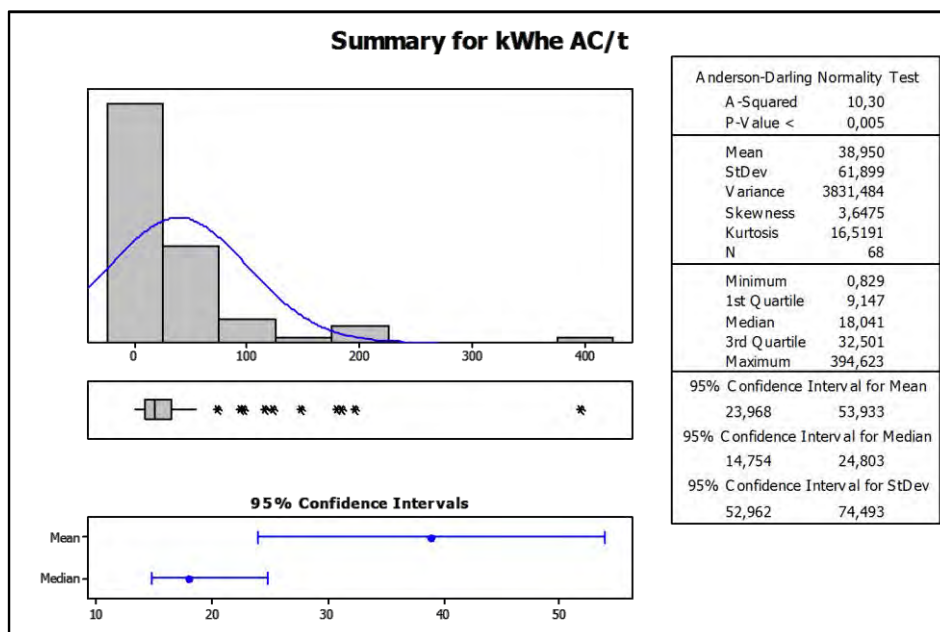


Figura 58. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di carta e prodotti di carta



**Figura 59. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di carta e prodotti di carta**



**Figura 60. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/t per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati), fabbricazione di carta e prodotti di carta**

#### 2.4.10 Analisi trans-settoriale dell'indice di efficienza energetica della fase di generazione dell'aria compressa

Vengono nella figura seguente riportati i risultati delle analisi statistiche effettuate per l'indice di efficienza della fase di generazione dell'aria compressa "kWh<sub>e</sub> AC/m<sup>3</sup>" che, come anticipato, è stato analizzato non per singolo settore ma in modalità trans-settoriale. La distribuzione in frequenza risulta non normale e non simmetrica, ma dal grafico risulta evidente come il campione di siti produttivi sia diviso in due gruppi di dati ben distinguibili (la motivazione di tale suddivisione è da indagare, potrebbe essere legata a particolari configurazioni o settaggi dell'impianto, come ad esempio il valore della pressione di mandata). I valori del primo dei due gruppi di dati risultano comunque confrontabili con quelli forniti in [49], solo leggermente più altri probabilmente a causa dell'esercizio in condizioni reali anziché nominali dell'impianto.

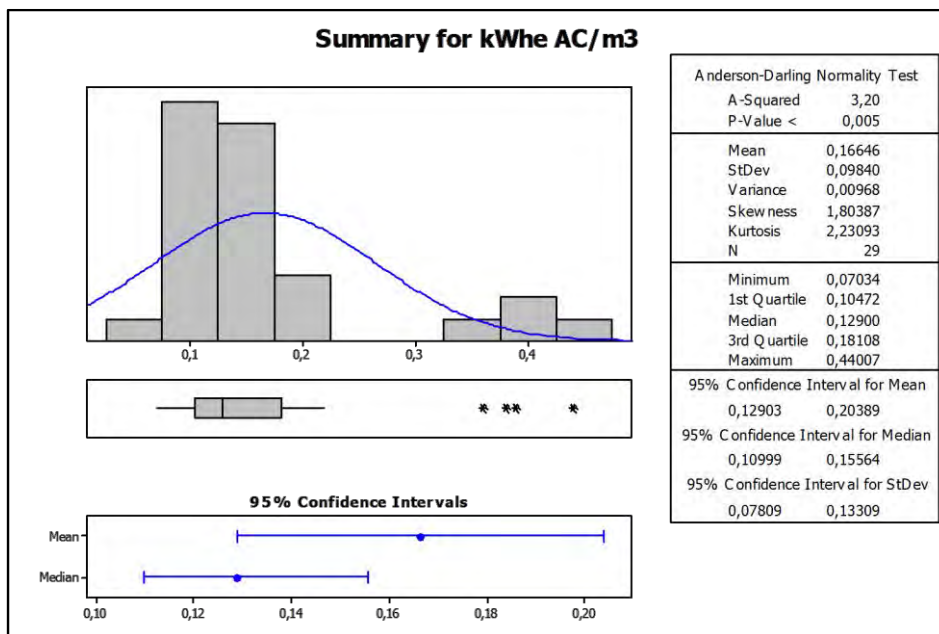


Figura 61. Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh<sub>e</sub> AC/m<sup>3</sup> per il campione contenente solo i siti con dati misurati, tutti i nove settori considerati

#### 2.4.11 Sviluppo delle Matrici di Assessment per il settore metallurgico

Una volta eseguite le analisi statistiche per l'ottenimento di valori di benchmark su tutti i settori sensibili considerati, si è proceduto con l'applicazione della metodologia proposta ad un solo settore. L'applicazione agli altri settori avrà luogo subito dopo una più approfondita validazione degli strumenti ideati attraverso il confronto diretto con le aziende coinvolte, fase prevista per il seguente anno di progetto.

Al fine di selezionare il settore con il quale effettuare la validazione dello strumento di benchmarking, nonché di assegnare ai restanti settori una priorità per l'applicazione della metodologia completa, e strutturare quindi il lavoro per i seguenti anni di progetto, i valori medi e mediani di ciascun Indicatore di Performance Energetica per ciascun settore, insieme ai valori relativi alla quantità di dati misurati a disposizione forniti dall'ENEA, sono stati sintetizzati nelle seguenti matrici.

Tali matrici presentano i diversi settori analizzati nelle colonne e le quantità di dati misurati a disposizione per ciascuna variabile e gli Indici di Performance Energetica nelle righe. I valori relativi alla quantità di dati misurati a disposizione hanno consentito di ordinare i settori per priorità in base al livello di approfondimento con cui è possibile condurre le analisi. I valori degli Indici di Performance Energetica hanno invece permesso di ordinare i settori per priorità in base all'incidenza del consumo elettrico per l'aria compressa nel settore e alla possibilità di efficientamento del Sistema Aria Compressa (più è alto il valore di "kWh<sub>e</sub> AC" e di "kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT" e più l'aria compressa avrà un peso importante per il settore considerato, più sono elevati i valori di Consumo Specifico e più sarà possibile introdurre degli interventi di efficientamento in maniera efficace). L'ultima riga della matrice riporta invece la stima della percentuale del consumo di energia elettrica per la produzione di aria compressa sul totale del consumo di energia elettrica nel settore industriale nazionale; questo valore è stato inserito nella matrice per avere un'idea di come si può andare ad incidere, introducendo delle misure di efficientamento energetico del Sistema Aria Compressa su ciascuno dei settori considerati, sui consumi elettrici dell'industria nazionale.

Le righe della matrice sono poi state formattate in modo tale che i valori che i colori verde, giallo, arancione e rosso rappresentano livelli decrescenti di interesse nel proseguire le analisi per un determinato settore. Il colore è verde se è disponibile un elevato numero di dati a disposizione, se l'incidenza del consumo elettrico per la produzione di aria compressa è alta, se la generazione, il trasporto o l'utilizzo di aria compressa avvengono a bassa efficienza.

Le matrici sono state realizzate prendendo in considerazione separatamente valori medi e mediani degli indici, in modo tale da ottenere una valutazione che risentisse il meno possibile della presenza degli outlier.

CRITERI RIGUARDANTI IL NUMERO DI DATI A DISPOSIZIONE	Metallurgia	Fabbricazione di prodotti chimici	Fabbricazione di prodotti farmaceutici base e di preparati farmaceutici	Fabbricazione di prodotti in metallo (esclusi macchinari e attrezzature)	Fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi	Fabbricazione di articoli in materie plastiche	Industrie tessili	Industrie alimentari	Fabbricazione di carta e prodotti di carta					
										Numero diagnosi totale	351	363	163	519
CRITERI RIGUARDANTI L'INCIDENZA DELL'ARIA	Numero file analizzati	208	105	315	72	228	132	385	95					
										Numero file con misurazione continua EE	156	134	64	191
L'INCIDENZA AC di settore	Numero file con misurazione continua EE AC	32	30	10	19	7	17	6	38	9				
											Numero file con misurazione continua EE e EE AC	25	26	6
Stima incidenza AC di settore sui consumi elettrici industriali	Numero file con misurazione continua AC	9	16	6	6	7	5	11	2	3	3	1	6	1
Stima incidenza AC di settore sui consumi elettrici industriali	kWhe AC	3745498	23522592	960977	939850	2694843	2386137	1354453	1810667	62347575				
											kWhe AC/kWhe TOT	0,091	0,195	0,053
Stima incidenza AC di settore sui consumi elettrici industriali	kWhe AC/m3	0,163	0,199	0,159	0,120	0,128	0,000	0,105	0,146	0,171				
											kWhe AC/t	57,379	33,117	2459,937
Stima incidenza AC di settore sui consumi elettrici industriali	kWhe AC stimato	1899981,147	7747147,268	720472,179	577974,963	1132240,909	599498,010	683476,940	651045,567	1133041,095				
											kWhe AC/kWhe TOT stimato	0,091	0,131	0,081
Stima incidenza AC di settore sui consumi elettrici industriali	kWhe AC/t stimato	122,144	371,272	27379,633	160,120	327,336	121,031	355,450	36,572	38,950				
											Stima incidenza AC di settore sui consumi elettrici industriali	1,55%	1,52%	0,30%

Figura 62. Matrice per l'assegnazione di priorità di intervento ai diversi settori sensibili, realizzata con valori medi degli Indici di Performance Energetica

	Metallurgia	Fabbricazione di prodotti chimici	Fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici	Fabbricazione di prodotti in metallo (esclusi macchinari e attrezzature)	Fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi	Fabbricazione di articoli in materie plastiche	Industrie tessili	Industrie alimentari	Fabbricazione di carta e prodotti di carta
Numero diagnosi totale	351	363	163	519	112	458	244	597	170
Numero file analizzati	223	208	105	315	72	228	132	385	95
Numero file con misurazione continua EE	156	134	64	191	47	151	82	265	71
Numero file con misurazione continua EE AC	32	30	10	19	7	17	6	38	9
Numero file con misurazione continua EE e EE AC	25	26	6	16	7	14	5	35	7
Numero file con misurazione continua AC	9	16	6	6	7	5	3	11	2
Numero file con misurazione continua EE AC e AC	5	11	2	3	2	3	1	6	1
kWhe AC	1281079	1629138	924103	504000	1558550	785342	521500	951221	38812468
kWhe AC/kWhe TOT	0,075	0,124	0,053	0,101	0,097	0,072	0,046	0,068	0,039
kWhe AC/m3	0,125	0,119	0,159	0,125	0,128	0,000	0,105	0,143	0,171
kWhe AC/t	37,353	16,060	830,944	34,826	255,321	142,697	51,374	21,423	22,637
kWhe AC stimato	506920,000	517215,504	410252,525	272411,388	530981,500	341521,000	245410,000	285488,000	459227,500
kWhe AC/kWhe TOT stimato	0,072	0,084	0,054	0,090	0,125	0,062	0,064	0,059	0,041
kWhe AC/t stimato	44,308	24,302	1405,134	58,648	91,988	50,087	119,400	17,546	18,041
Stima incidenza AC di settore sui consumi elettrici industriali	1,23%	0,97%		1,23%	0,27%	0,32%	0,19%	0,58%	0,25%

Figura 63. Matrice per l'assegnazione di priorità di intervento ai diversi settori sensibili, realizzata con valori medi dei valori degli Indici di Performance Energetica

Dall'osservazione di entrambe le matrici risulta immediatamente evidente come il settore maggiormente prioritario risulti essere la metallurgia, che è dunque il primo per il quale si è proceduto all'applicazione dell'intera metodologia di benchmarking. Dopo il settore metallurgico, le analisi proseguiranno con (nell'ordine) i settori della fabbricazione di prodotti chimici, delle industrie alimentari e della fabbricazione dei prodotti in metallo. Verrà successivamente valutata la profittabilità dell'applicazione dell'intera metodologia agli altri settori considerati.

Con riferimento al settore metallurgico, dunque, le analisi di regressione necessarie alla definizione del consumo teorico e quindi alla costruzione delle Matrici di Assessment sono state realizzate considerando dati relativi all'intero settore e i dati relativi anche ai sotto-settori (definiti dalla terza cifra del codice ATECO) caratterizzati da un numero sufficiente di siti produttivi (come indicato dalle analisi effettuate dall'ENEA e illustrate nel già citato report).

La Tabella 9 riporta, per ciascun gruppo di dati considerato, i risultati dell'analisi di regressione, in termini dei due coefficienti (intercetta e coefficiente angolare) dell'equazione della retta ottenuta, di  $R^2$  e di P\_value. I gruppi di dati che presentano valori non accettabili di  $R^2$  o di P\_value (segnati in rosso in Tabella 9) sono al momento stati esclusi dall'analisi. I motivi dell'inaccettabilità dell'analisi di regressione su questi gruppi di dati verranno esaminati e indagati in seguito, anche grazie al confronto diretto con le aziende coinvolte.

**Tabella 9. Risultati delle analisi di regressione tra consumo elettrico per la produzione di aria compressa e quantità in peso di prodotto finito realizzato per il settore metallurgico**

Modello	Intercetta	Coefficiente angolare	$R^2$	P_value
Solo dati misurati, tutto il settore metallurgico	1111318,09	12,4	0,582	≤ 0,05
Solo dati misurati, sotto-settore "Produzione di metalli di base preziosi e altri metalli non ferrosi, trattamento dei combustibili nucleari"	-1403465,87	86,5	0,9817	≤ 0,05
Solo dati misurati, sotto-settore "Fabbricazione di tubi, condotti, profilati cavi e relativi accessori in acciaio (esclusi quelli in acciaio colato)"	-1531143,28	24,904	0,969	0,11
Solo dati misurati, sotto-settore "Fonderie"	925955,92	20,84	0,4101	≤ 0,05
Dati totali, tutto il settore metallurgico	297538,74	15,423	0,8868	≤ 0,05
Dati totali, sotto-settore "Produzione di metalli di base preziosi e altri metalli non ferrosi, trattamento dei combustibili nucleari"	410275,35	32,645	0,3016	≤ 0,05
Dati totali, sotto-settore "Fabbricazione di tubi,	-297186,59	20,692	0,9156	≤ 0,05

condotti, profilati cavi e relativi accessori in acciaio (esclusi quelli in acciaio colato)”				
Dati totali, sotto-settore “Fonderie”	860561,60	0,949	0,0194	0,22

Sono di seguito riportate le Matrici di Assessment realizzate per il settore metallurgico, sulla base delle analisi di regressione riportate nella precedente tabella. Per ciascun sito (ogni sito è rappresentato da un triangolo blu sulla Matrice di Assessment) sono stati calcolati il consumo teorico (sulla base delle relazioni illustrate nella precedente tabella) e il valore di Efficiency Ratio. I singoli siti sono poi stati posizionati nei quadranti della Matrice.

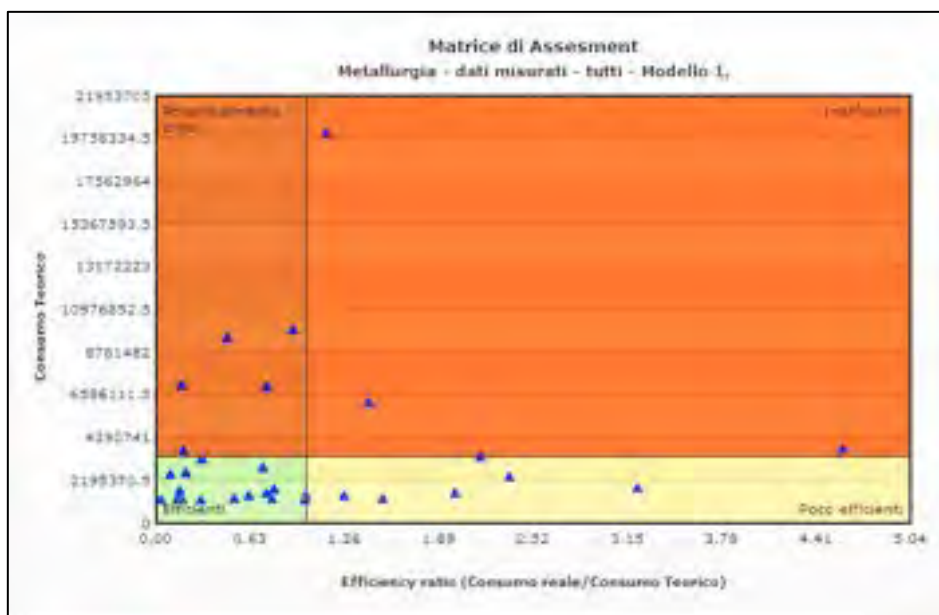


Figura 64. Matrice di Assessment per l'intero settore metallurgico, considerando il campione contenente solo i siti con dati misurati

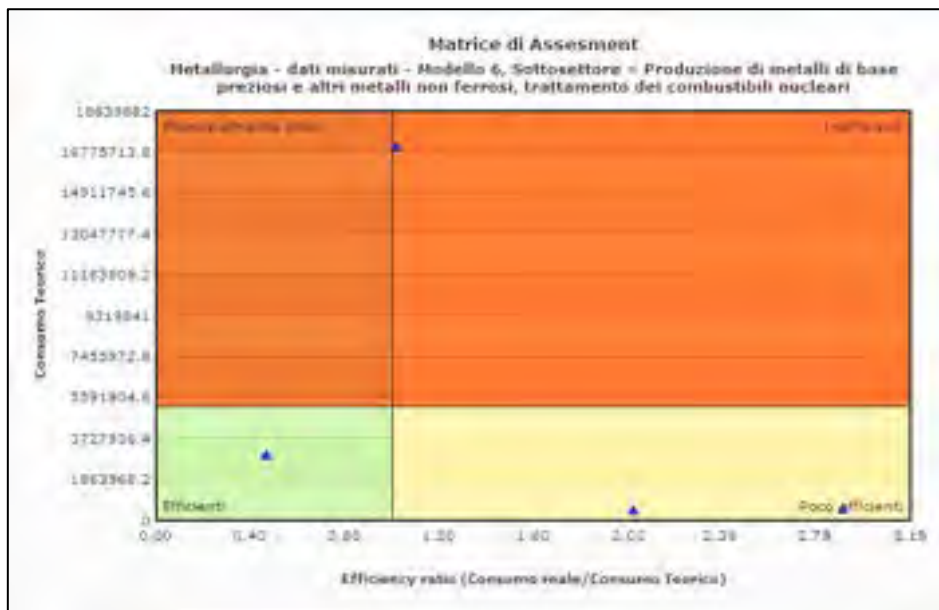


Figura 65. Matrice di Assessment per il sotto-settore “Produzione di metalli di base preziosi e altri metalli non ferrosi”, considerando il campione contenente solo i siti con dati misurati

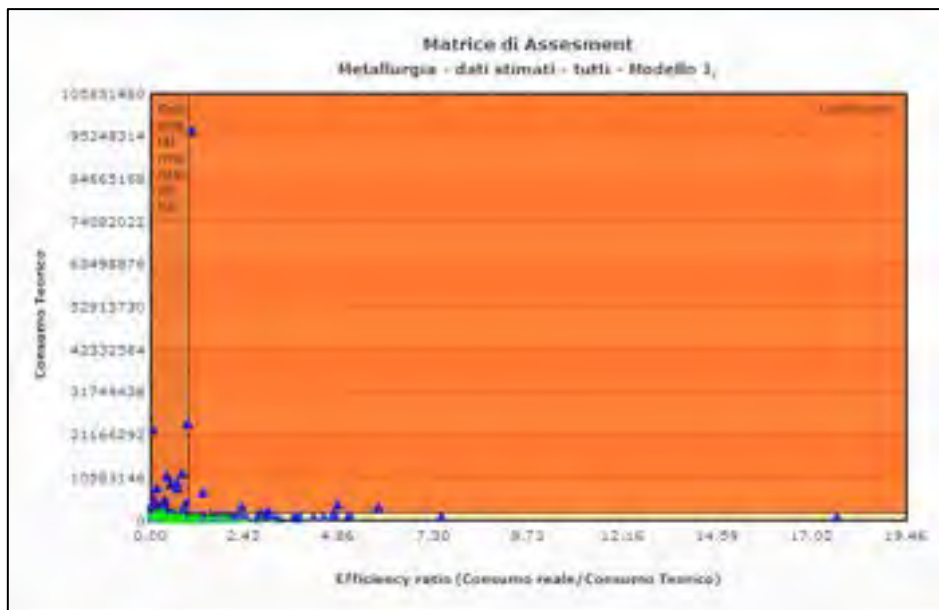


Figura 66. Matrice di Assessment per l'intero settore metallurgico, considerando il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati)

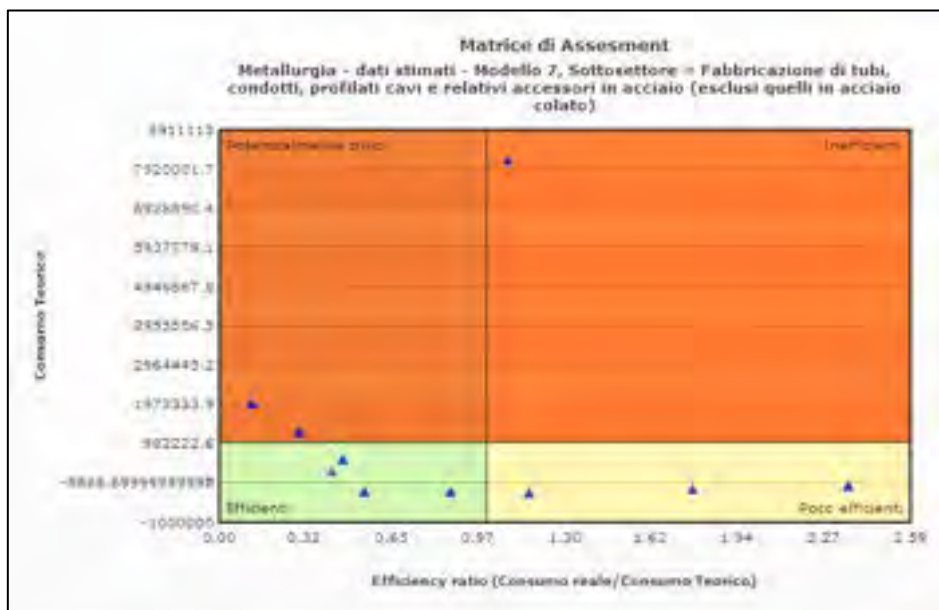


Figura 67. Matrice di Assessment per il sotto-settore “Fabbricazione di tubi, condotti, profilati cavi e relativi accessori in acciaio (esclusi quelli in acciaio colato)”, considerando il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati stimati)

## 2.5 Conclusioni del capitolo

Nel presente capitolo è stata proposta una metodologia per il benchmarking dell'efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa, basata su valori reali (misurati o stimati) di consumo di energia elettrica per la produzione dell'aria compressa e di produzione (sia di aria compressa che di prodotti finiti). La metodologia proposta consente di confrontare l'incidenza dei Sistemi Aria Compressa sui consumi totali di stabilimento e l'efficienza non solo nella fase di generazione dell'aria compressa, ma anche in quella di trasporto e utilizzo tra aziende dello stesso settore o di settori differenti. È stato altresì sviluppato uno strumento in

grado di facilitare le aziende nelle attività di benchmarking e di abilitare le attività di trasferimento delle conoscenze tra aziende più o meno efficienti. La metodologia elaborata è stata testata su nove settori di interesse (per quanto riguarda la formulazione e valutazione degli indici) e sul settore per cui la sua applicazione potrebbe risultare maggiormente proficua (per quanto riguarda lo strumento di benchmarking elaborato). La fase di validazione della metodologia sviluppata verrà conclusa nei prossimi mesi, quando sarà possibile aprire un confronto diretto con le aziende coinvolte e indagare le cause di eventuali anomalie e difficoltà riscontrate.

Per quanto riguarda la valutazione dei valori degli indici di benchmarking per i nove settori sensibili individuati, si è potuto notare come quasi nessuno degli Indici di Performance Energetica presenti una distribuzione in frequenza normale, situazione che denuncia la presenza di comportamenti anomali da parte di alcuni siti. In una fase successiva tali comportamenti saranno analizzati nel dettaglio, cercando di comprenderne la natura fisiologica (ad esempio causati da usi molto differenti dell'aria compressa all'interno del sito industriale rispetto agli altri siti del settore o diversi settaggi di pressione) o patologica (dovuta a un basso livello di efficienza, e dunque migliorabile attraverso opportuni interventi di efficientamento).

In particolare, per quanto riguarda l'indice di efficienza della fase di generazione dell'aria compressa, che è stato valutato in modalità trans-settoriale, risulta evidente come i range di riferimento siano sostanzialmente due:

- Il primo compreso tra 0,08 kWh/m<sup>3</sup> e 0,22 kWh/m<sup>3</sup> (sostanzialmente in linea con quanto definito nel documento europeo precedentemente citato [49], il cui range viene solo ampliato in quanto, in questo caso, si tiene conto delle reali condizioni di funzionamento degli impianti);
- Il secondo molto più alto, compreso tra 0,35 kWh/m<sup>3</sup> e 0,44 kWh/m<sup>3</sup> (apparentemente fuori range, ma probabilmente dovuto a diverse condizioni di utilizzo o a diversi settaggi, in particolare relativi alla pressione dell'aria in uscita dal sistema; le cause di tale scostamento andranno comunque ulteriormente indagate).

Le analisi qui presentate andranno comunque raffinate in un secondo momento, in seguito all'inclusione degli ultimi dati elaborati da ENEA, e ulteriormente validate tramite il confronto diretto con almeno un campione selezionato delle industrie incluse nell'analisi.

L'applicazione dello strumento di benchmarking sviluppato nell'ambito della presente attività, ovvero le Matrici di Assessment, al settore metallurgico, ha consentito di ottenere risultati positivi, aiutando ad evidenziare in maniera visiva ed intuitiva i siti industriali caratterizzati da performance energetiche del Sistema Aria Compressa decisamente povere rispetto agli altri del settore. I siti individuati come inefficienti dalle Matrici di Assessment sono peraltro gli stessi individuati come outlier nei grafici di boxplot. Tale strumento dovrà, nel seguito del progetto, essere ulteriormente testato e validato attraverso il confronto diretto con le aziende, e anche attraverso il confronto con i risultati dell'applicazione del modello di maturità (CASEEMM) presentato nel capitolo successivo. Possibili miglioramenti da apportare a tale strumento, che andranno verificati e valutati nel prosieguo del progetto, sono l'utilizzo di altre variabili per la valutazione del consumo teorico rispetto alla produzione annuale di prodotti finiti (che al momento costituisce l'unico dato presente in quantità sufficienti da poter essere utilizzato per tale scopo) e l'analisi dell'effettiva incidenza del sotto-settore industriale dei vari siti (ad esempio attraverso l'analisi ANOVA sull'intero campione) per verificare l'utilità e profittabilità dell'applicazione di tale strumento anche ai singoli sotto-settori.

### 3 Sviluppo di uno strumento per il supporto alle decisioni per l'efficientamento dei Sistemi Aria Compressa: il CASEEMM (Compressed Air Systems Energy Efficiency Maturity Model)

#### 3.1 I modelli di maturità: struttura e caratteristiche

Quando si parla di “crescita organizzativa”, si fa riferimento al percorso incrementale attraverso il quale un'organizzazione persegue e consegue il cambiamento nel tempo. I modelli di maturità sono degli strumenti che consentono di individuare le dimensioni organizzative che devono essere coinvolte nel cambiamento, selezionare il percorso di sviluppo delle competenze più opportuno e monitorare costantemente i progressi compiuti dall'organizzazione nel cammino verso il raggiungimento dei propri obiettivi.

Il concetto di maturità aziendale è attribuito a Philip Crosby, autore del testo “Quality is free” del 1979 [54], con la “Quality Management Maturity Grid”. La matrice descritta nel modello era ideata per essere utilizzata dalle aziende come punto di riferimento per capire quanto maturi fossero i propri processi e quanto bene fossero integrati con la cultura aziendale, nell'ambito della gestione della qualità di prodotti o servizi. Da quel momento il concetto è stato sviluppato in molte direzioni e in vari ambiti fino all'elaborazione di numerosi modelli di maturità in differenti ambiti dell'organizzazione aziendale (gestione dei progetti, sviluppo nuovo prodotto, gestione dei servizi, gestione della qualità, gestione della sicurezza, sostenibilità, ecc.) [55]. Kohlegger propone la seguente definizione di modello di maturità: “A maturity model conceptually represents phases of increasing quantitative or qualitative capability changes of a maturing element in order to assess its advances with respect to defined focus areas” [56]. In generale, quindi, un modello di maturità serve a valutare l'appartenenza di un'azienda o di un'organizzazione ad una delle configurazioni previste dal modello stesso allo scopo di trarne informazioni utili per avviare processi di miglioramento e di benchmarking.

La diffusione di tale approccio alla crescita delle organizzazioni è sicuramente spiegata in parte dal fatto che il concetto di maturità è molto intuitivo e trova applicazione in molti contesti della nostra vita quotidiana, ma un elemento di successo altrettanto fondamentale è l'aspetto di *gradualità progressiva* che normalmente si associa a quello di maturità. La possibilità di riconoscere esplicitamente l'esistenza di un percorso di maturazione graduale dell'organizzazione consente di individuare, in maniera più efficace ed efficiente, le azioni e le direzioni per guidarla verso l'eccellenza.

Le principali caratteristiche comuni a tutti i modelli di maturità sono le seguenti [55].

- **Struttura del modello:** il tipo di struttura può essere “a stadi” o “continua”. La prima, denominata “a stadi”, prevede un'organizzazione della maturità a livelli, solitamente discreti. Il raggiungimento di un livello è consentito dalla presenza di determinate modalità operative all'interno dell'organizzazione. Il passaggio ad un livello successivo prevede il completamento dei livelli precedenti e l'implementazione delle “buone pratiche” ad esso relative. La seconda, denominata “continua”, prevede invece un approccio al miglioramento basato sullo sviluppo dei processi aziendali di tipo continuo e più flessibile, associato ad una valutazione continua della maturità aziendale. Per l'organizzazione la prima tipologia presenta il vantaggio di un percorso chiaro e sequenziale. Tale caratteristica può però in alcune situazioni limitare le possibilità di azione dell'organizzazione costringendola ad un percorso di miglioramento predefinito ed indifferenziato. La seconda tipologia consente un percorso di miglioramento “parallelo” e personalizzabile che, di contro, in alcuni casi può risultare di difficile comprensione ed implementazione.
- **Metodologia di analisi:** fa riferimento alle modalità con le quali viene stabilita la maturità dell'organizzazione. Ad esempio la valutazione può essere effettuata ricercando all'interno dell'organizzazione ben definite modalità operative associate ai differenti livelli di maturità.

Generalmente ad un aumento della complessità dell'assessment dovrebbe corrispondere un maggior valore aggiunto in termini di risultati ottenuti dall'analisi.

- **Riferimento a standard internazionali:** nel caso in cui l'organizzazione implementi al suo interno dei sistemi con riferimento ad uno standard internazionale, la scelta di un modello di maturità che utilizzi lo stesso standard può semplificare sia la fase di assessment sia la successiva fase di sviluppo di un piano di miglioramento. Per le organizzazioni che non hanno uno standard internazionale di riferimento, la scelta di un modello fortemente orientato ad uno standard indirizza inevitabilmente verso l'implementazione dello stesso (in alcuni casi infatti questi modelli sono utilizzati come strumento proprio per conseguire e mantenere certificazioni volontarie a norme internazionali).
- **Modalità di assessment:** se tutti i modelli sono accomunati dalla presenza di un questionario con domande a risposta chiusa, esistono delle differenze evidenti in termini di numero delle domande alle quali rispondere e alla possibilità concreta di condurre l'assessment in maniera autonoma da parte dell'organizzazione (self assessment). Ovviamente assessment basati su un gran numero di domande possono facilmente scoraggiare organizzazioni meno strutturate e meno esperte. La possibilità di self assessment permette inoltre all'organizzazione un approccio più graduale alla valutazione. Sebbene difficilmente un assessment condotto autonomamente per la prima volta risulta esente da problemi di interpretazione, risulta comunque un modo efficace ed efficiente per l'organizzazione di ottenere una valutazione di massima della propria maturità e di prendere confidenza con lo strumento e le conoscenze tecniche che esso presume.
- **Risultati dell'assessment:** le informazioni fornite all'organizzazione come risultato del processo di valutazione hanno un ruolo chiave in quanto costituiscono le basi sulle quali impostare il successivo percorso di miglioramento. I modelli di maturità si differenziano decisamente in termini di risultati forniti: si va da un numero (il livello di maturità dell'organizzazione) fino ad un report strutturato delle performance organizzative aziendali.
- **Guida al miglioramento:** l'ultimo elemento caratterizzante i modelli di maturità è la presenza esplicita e più o meno estesa di indicazioni specifiche per il miglioramento. Infatti in alcuni modelli queste indicazioni sono assenti o presenti in maniera intrinseca (possono essere più o meno facilmente dedotte dalle mancanze individuate in fase di assessment) in altri vengono esplicitate e organizzate in modo da individuare un piano di miglioramento per l'organizzazione.

### 3.2 I modelli di maturità: applicazioni all'ambito energetico

Nel caso della gestione dell'energia e dell'efficienza energetica, la maturità è legata alla capacità di un'organizzazione di gestire i propri fabbisogni energetici, dall'acquisto o l'autoproduzione dell'energia fino al suo utilizzo efficiente basato sull'adozione delle migliori pratiche operative e sull'adeguato ricorso alle tecnologie energeticamente più efficienti. In questo particolare ambito, esistono in letteratura alcuni tentativi di costruire dei modelli per valutare la maturità delle organizzazioni. Tuttavia, molti degli strumenti esistenti sono poco strutturati e non consentono di effettuare un'analisi dettagliata del livello di maturità delle organizzazioni e del suo sviluppo lungo le principali dimensioni di analisi.

Ad esempio, la Carbon Trust affronta il problema proponendo un "Energy Management Matrix" [57] che consente di comprendere ed identificare le modalità e gli schemi ricorrenti di consumo, di tracciare e misurare i miglioramenti e di identificare le opportunità di efficientamento energetico. Il modello proposto dalla Carbon Trust è caratterizzato da una struttura a stadi, organizzata in cinque livelli e sei differenti dimensioni di sviluppo (aree principali della gestione dell'energia). Il modello non fa riferimento ad uno specifico standard, ma prevede piuttosto la modalità cosiddetta di self-assessment e fornisce i risultati sotto forma di un report completo di istruzioni per migliorare il proprio livello.

L'Osservatorio Italiano sull'Energy Management [58] ha invece realizzato un assessment del livello di maturità in ambito Energy Management delle aziende italiane: l'obiettivo di tale assessment è quello di descrivere le capacità che la funzione di gestione dell'energia deve possedere per far sì che i eventuali sistemi di gestione dell'energia siano realmente efficaci e allineati alle strategie aziendali. L'assessment è

stato realizzato attraverso la somministrazione alle aziende di un questionario di 22 domande raggruppate in sei diverse macro aree; questo tipo di assessment non può però essere definito modello di maturità in quanto non prevede l'elaborazione di indicazioni per miglioramenti futuri del livello di maturità.

L'Energy Star ha invece sviluppato alcune linee guida per la messa in atto di un efficace programma di gestione dell'energia, basato sull'esperienza accumulata in diversi progetti svolti in collaborazione con alcuni partner aziendali. Queste linee guida sono poi state sintetizzate in una matrice di assessment per aiutare le organizzazioni a confrontare le proprie pratiche di gestione dell'energia con quelle descritte dalle linee guida [59]. La maturità delle organizzazioni è definita su tre livelli, ed è analizzata sulla base di sette diversi elementi caratterizzanti della gestione dell'energia che corrispondono ad altrettante attività fondamentali. Una breve serie di domande è utilizzata per l'assessment. Come nel caso del Carbon Trust, nemmeno questo modello fa esplicito riferimento a standard internazionali e prevede la modalità di self-assessment. I risultati dell'analisi comprendono una lista di attività per il miglioramento.

L'Innovation Value Institute (IVI) [59] ha sviluppato un modello di maturità per l'assessment e il miglioramento sistematico dell'efficienza energetica dei Data Centers. Il modello comprende sette blocchi di capacità necessarie per il miglioramento dell'efficienza energetica suddivise in tre categorie (Management, Operations e Building); il livello di maturità per ciascuno dei sette blocchi è identificato attraverso un questionario. Anche in questo caso, il modello non fa riferimento a specifici standard internazionali, e il principale risultato dell'assessment è una mappa che mostra graficamente il livello di maturità per ciascuna categoria e le capacità che richiedono un maggiore sviluppo per poter progredire nel livello di maturità.

La Sustainable Energy Authority of Ireland ha invece proposto un Energy Management Maturity Model (EM3) [60], che sottolinea l'importanza strategica dello sviluppo di sistemi di gestione dell'energia per la massimizzazione del potenziale di risparmio energetico. Il modello di maturità identifica cinque diversi livelli (Emerging, Defining, Integrating, Optimizing e Innovating); comprende quattro principali domini (corrispondenti alle fasi del ciclo Plan, Do, Check, Act), 16 pilastri (quattro per dominio) e 63 sotto-pilastri. Per ciascun sotto-pilastro il modello fornisce cinque quesiti per identificare il livello di maturità. Questo modello fa esplicito riferimento allo standard ISO 50001 e fornisce in output un grafico che evidenzia punti di forza e punti di debolezza del sistema di gestione dell'energia in ogni dominio e per ciascun pilastro.

Il modello "Energy and utility management maturity model" sviluppato da Ngai et al. [61] comprende cinque livelli di maturità e quattro fasi di maturazione dei processi. Lo studio non consente di identificare il livello di maturità di un'azienda, e non fornisce quindi nessuno strumento di assessment, ma ha l'obiettivo di descrivere le fasi di sviluppo: risulta quindi molto utile per comprendere il percorso di sviluppo delle aziende per raggiungere l'efficienza energetica dei propri processi e sistemi, ma non per aiutare le aziende a disegnare il proprio percorso di sviluppo.

Il modello "Energy Management Maturity Model" di Introna et al. [3] è invece articolato su cinque diversi livelli di sviluppo e cinque dimensioni. Non fa esplicito riferimento a standard internazionali, anche se per la definizione delle dimensioni si riferisce chiaramente alla norma ISO 50001. Il modello prevede la modalità di self-assessment per le aziende, attraverso un questionario composto da 40 domande, e i risultati sono forniti sotto forma di due diversi grafici: uno riguardante la copertura percentuale dei diversi livelli, l'altro la copertura percentuale delle dimensioni di sviluppo. L'analisi dei due grafici citati consente inoltre di stabilire un possibile percorso di sviluppo per l'azienda oggetto di analisi.

Infine, il modello "EMMM50001" proposto in [62] è un modello di maturità strettamente legato allo sviluppo di un sistema di gestione dell'energia conforme allo standard internazionale ISO 50001. Il modello si articola in cinque livelli di maturità che vengono valutati per ciascuno dei processi previsti dalla norma. Lo studio prosegue poi con l'applicazione del modello a una serie di aziende certificate e non e con l'analisi

statistica dei dati ottenuti fino a dimostrare che aziende certificate e aziende non certificate ottengono risultati sostanzialmente diversi dall'assessment.

Non esiste ancora in letteratura nessun modello di maturità riferito in particolare ad una singola utility o ad un singolo sistema, compreso il Sistema Aria Compressa.

Considerato quindi quanto riportato nel presente e nel precedente sotto capitolo, si è ritenuto opportuno, nell'ambito del presente progetto, realizzare un modello di maturità per l'assessment del livello di efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa nei siti industriali. La realizzazione e la diffusione di tale modello consentiranno da un lato di completare le informazioni ottenute attraverso l'analisi dei dati raccolti a seguito del D.Lgs. 102/2014 con dati di tipo più qualitativo (comprendendo non solo il livello di efficienza dei sistemi ma anche la tipologia delle pratiche di efficienza maggiormente diffuse), e dall'altro di fornire alle aziende un'utile strumento di auto-valutazione che, unitamente alle Matrici di Assessment descritte nel capitolo precedente, potrà aiutarle non solo a comprendere il livello di efficienza energetica del proprio Sistema Aria Compressa, ma anche a definire il più opportuno percorso di sviluppo per incrementarlo. Inoltre, la struttura del modello di maturità, fondata sulla raccolta delle "Best Practices", "Best Available Technologies" e "Best Techniques" descritte in letteratura, consente un approccio sistemico e strutturato alla loro implementazione.

### *3.3 Progettazione del CASEEMM (Compressed Air Systems Energy Efficiency Maturity Model)*

Il modello di maturità presentato nel presente capitolo è costruito sulla base dei modelli presenti in letteratura e descritti nel sotto capitolo precedente. In particolare, si è preso come riferimento principale la struttura di due diversi modelli ([3] e [59]): il primo fornisce infatti una suddivisione in livelli e dimensioni molto fruibile e intuitiva e delle modalità di self-assessment e di riepilogo dei risultati che ben si prestano all'applicazione ai Sistemi Aria Compressa e alla diffusione del modello nelle aziende italiane, mentre il secondo è riferito ad una particolare applicazione (quella ai data center) e ha quindi una struttura decisamente più simile al modello che si voleva ottenere per quanto riguarda la raccolta e l'ordinamento delle "Best Practices", "Best Available Technologies" e "Best Techniques".

#### *3.3.1 Definizione di livelli e dimensioni*

Per la creazione del modello di maturità per la gestione energetica del Sistema Aria Compressa si è scelto di adottare una struttura a stadi, di più immediata comprensione e dai risultati più facilmente interpretabili, prevedendo la modalità di self-assessment attraverso la strutturazione di un questionario. I risultati sono forniti in forma grafica, più facile e sintetica per l'utente aziendale e prevedono l'analisi dello sviluppo dell'azienda lungo i livelli e le dimensioni, nonché l'identificazione di un possibile percorso di sviluppo.

Il modello realizzato non fa riferimento esplicito a standard internazionali (non esistendo standard circa la gestione energetica dei Sistemi Aria Compressa), ma tiene conto, nella sua struttura, della letteratura rilevante ai fini dell'identificazione delle "Best Practices", "Best Available Technologies" e "Best Techniques".

Prima di iniziare a progettare la struttura del questionario è stata infatti realizzata un'approfondita analisi bibliografica. Tale analisi bibliografica ha riguardato tre principali categorie di documenti:

- Ricerche di sistema, ovvero documenti generalmente realizzati da enti nazionali o sovranazionali, con il chiaro fine di verificare lo stato dell'arte in materia di efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa;
- Articoli scientifici, ovvero documenti riportanti metodologie e risultati delle ricerche scientifiche internazionali riguardo l'efficientamento energetico dei Sistemi Aria Compressa;

- Guide tecniche per l'industrial, ovvero documenti realizzati principalmente da aziende produttrici di compressori, finalizzate a far familiarizzare l'utente del sistema con il sistema stesso e a sensibilizzare l'utente ad un uso efficiente della strumentazione.

Si è ritenuto opportuno analizzare queste tre diverse tipologie di documenti in quanto contengono tutte degli utili riferimenti a "Best Practices", "Best Available Technologies" e "Best Techniques", ma con punti di vista decisamente differenti. Se, infatti, le ricerche di sistema tendono ad analizzare le pratiche più comunemente diffuse e a classificarle a seconda dei risparmi che ciascuna di esse ha consentito di ottenere a livello nazionale o sovranazionale, gli articoli scientifici si concentrano principalmente sulle modalità di gestione dell'impianto e sulle tecnologie più innovative. Le guide tecniche, infine, fanno maggiore riferimento a pratiche e tecnologie semplici e di sicuro successo per l'industria. La Figura 68 illustra la bibliografia che è stata presa come riferimento per la definizione della struttura del CASEEMM, suddivisa nelle tre categorie sopra citate. I documenti ritenuti più rilevanti ai fini della realizzazione del modello di maturità sono riportati in rosso, i documenti meno rilevanti, perché non trattano nello specifico dei Sistemi Aria Compressa, ma li analizzano solo come un aspetto dei sistemi energetici o industriali, sono riportati in nero.

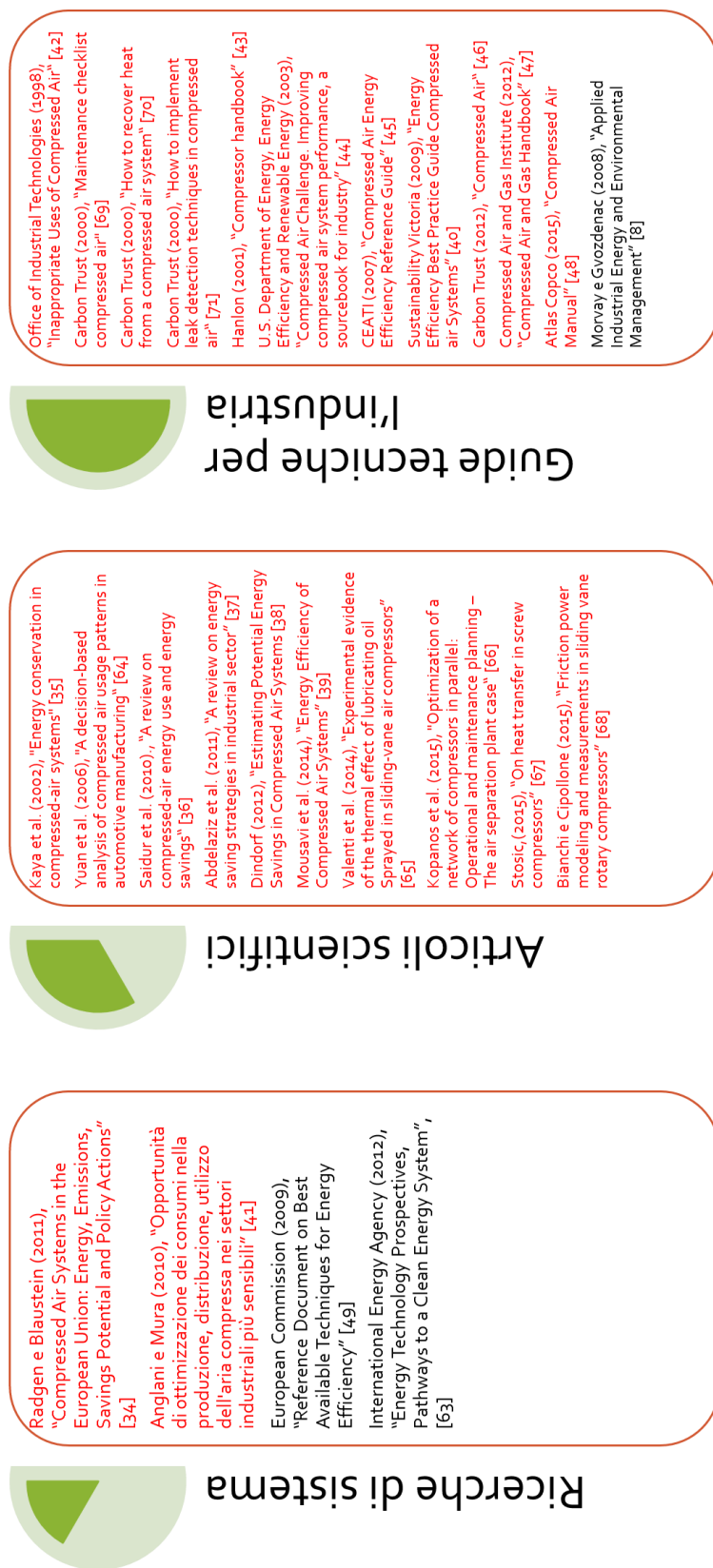


Figura 68. Bibliografia organizzata per la realizzazione del Compressed Air Systems Energy Efficiency Maturity Model. I documenti ritenuti più rilevanti ai fini della realizzazione del modello di maturità sono riportati in rosso, i documenti meno rilevanti, perché non trattano nello specifico dei Sistemi Aria Compressa, ma li analizzano solo come un aspetto dei sistemi energetici o industriali, sono riportati in nero

Il Compressed Air Systems Energy Efficiency Maturity Model è dunque strutturato in cinque livelli di maturità e in quattro dimensioni, che rappresentano quattro aspetti fondamentali della gestione energetica del Sistema Aria Compressa in azienda.

Le quattro dimensioni di maturità sono:

1. Consapevolezza, conoscenza e competenza;
2. Approccio metodologico;
3. Gestione delle prestazioni energetiche;
4. Implementazione “Best Practices” e adozione di “Best Available Technologies”.

Le prime tre dimensioni sono riferite all’approccio generale dell’azienda al tema dell’efficienza energetica, che ovviamente si riflette anche nelle modalità di gestione del Sistema Aria Compressa. L’ultima dimensione è invece specifica del sistema, e riguarda la diffusione e il livello di implementazione delle diverse “Best Practices, “Best Available Technologies” e “Best Techniques” presenti in letteratura. Le quattro dimensioni sono di seguito descritte più nel dettaglio.

### 3.3.1.1 Consapevolezza, conoscenza e competenza

La dimensione “Consapevolezza, conoscenza e competenza” rappresenta una dimensione basilare della Gestione dell’Energia, in generale, e della gestione dell’efficienza energetica del Sistema Aria Compressa, in particolare. Essa considera differenti aspetti:

- la consapevolezza del personale dell’importanza del tema dell’efficienza energetica anche all’interno della propria organizzazione;
- le conoscenze gestionali utili alla prevenzione, all’individuazione dei problemi e alla gestione dei miglioramenti;
- le conoscenze tecniche e tecnologiche utili alla risoluzione dei problemi e all’individuazione delle soluzioni migliori;
- le competenze richieste per una gestione ottimale dell’energia in termini di capacità di individuare e saper attuare le “Best Practices” nei diversi ambiti di applicazione e secondo le diverse responsabilità e ruoli all’interno del Sistema Energetico della propria organizzazione, nonché i più appropriati strumenti di finanziamento degli interventi come ad esempio i Certificati Bianchi.

Tra le principali conoscenze e competenze fondamentali per una gestione ottimale dei consumi energetici alle quali il modello fa riferimento vi sono:

- Conoscenza della struttura dei consumi energetici;
- Conoscenza di tecniche analitiche per la valutazione dei consumi energetici;
- Conoscenza tecnica del Sistema Aria Compressa;
- Conoscenza di metodi di analisi finanziaria degli investimenti per l’efficientamento energetico;
- Conoscenza del mercato dei servizi energetici e degli strumenti di finanziamento dei progetti di efficientamento;
- Capacità di gestire i progetti per l’implementazione delle misure di miglioramento dell’efficienza energetica.

### 3.3.1.2 Approccio metodologico

Un’efficace Gestione dell’Energia richiede non solo la conoscenza di metodi, tecniche e strumenti per l’efficienza energetica, ma anche la definizione e l’utilizzo di un approccio metodologico che ne chiarisca le modalità di applicazione.

In particolare la dimensione dell’approccio metodologico è quella che più caratterizza i livelli di maturità, specialmente nel settore energetico. In letteratura sono infatti note tre classi principali nelle quali possono essere raggruppati i diversi approcci metodologici [3]:

- **Quick Fixes:** riduzione occasionale dei consumi energetici. L’organizzazione attua una serie non coordinata di misure di risparmio energetico, generalmente poco o per nulla costose, valutandole

esclusivamente in base alla loro fattibilità tecnico-economica come interventi a sé stanti senza preoccuparsi di individuare delle priorità di azioni. Generalmente l'organizzazione arriva a prendere in considerazione tali opportunità di risparmio in maniera occasionale (ad esempio su proposta di fornitori o in base a possibilità di funzionamento). Generalmente non è presente un piano temporale di sviluppo degli interventi. Questo approccio può arrivare a portare vantaggi economici anche significativi (soprattutto nel caso di edifici o impianti di vecchia concezione) ma generalmente molto limitati rispetto a quelli potenzialmente raggiungibili;

- **Energy Projects:** riduzione sistematica dei consumi energetici. Raggiunti i massimi livelli di risparmio conseguibili nella fase precedente, generalmente l'organizzazione comprende che per conseguire ulteriori risparmi è necessario agire in maniera più sistematica. A tale scopo l'organizzazione ricorre di solito ad analisi complessive dell'efficienza energetica del Sistema Aria Compressa individuando tutte le opportunità di riduzione dei consumi energetici, valutandole dal punto di vista tecnico-economico e quindi stabilendone la priorità. Il risultato di questo tipo di approccio è generalmente un piano di interventi approvati dall'organizzazione che danno luogo ad uno o più progetti di miglioramento dell'efficienza. La fase di analisi su cui si basa questo approccio, che è quella dell'"audit" o della "diagnosi energetica", può essere più o meno trasversale (comprendendo tutti gli utilizzatori di energia o solo i principali) e approfondita (ricorrendo o meno a misurazioni specifiche dei consumi). Questo approccio, che rappresenta sicuramente un passo in avanti rispetto al precedente, nella pratica presenta il grosso limite che le attività di miglioramento realmente implementate dall'organizzazione risultano generalmente molto limitate rispetto a quanto previsto dal piano. Ciò è spesso dovuto al fatto che l'organizzazione una volta implementati gli interventi più urgenti, con il trascorrere del tempo perde fiducia nella reale utilità degli ulteriori interventi pianificati a fronte dei continui cambiamenti a cui è soggetta (ad esempio volumi di produzione o di attività, macchinari o attrezzature, ecc.). In diversi casi l'organizzazione non è in grado di valutare con certezza i reali benefici conseguiti anche a fronte di nuovi audit a causa principalmente dell'assenza di un sistema di controllo dei consumi e ciò può portare ad una regressione all'approccio "Quick fixes".
- **Comprehensive Energy Management:** riduzione sistematica e continua dei consumi. Aumentando la consapevolezza e la conoscenza relativamente agli aspetti energetici del Sistema Aria Compressa l'approccio "per progetti" tende ad essere sistematizzato all'interno di un vero e proprio sistema di gestione. Ciò richiede all'organizzazione un passo in avanti significativo che la porta a decidere di affrontare la questione dell'ottimizzazione dell'efficienza energetica del Sistema Aria Compressa come un aspetto da considerare stabilmente nelle proprie attività.

I tre approcci denotano una differente maturità da parte dell'organizzazione nella gestione dei consumi energetici. Ovviamente l'approccio metodologico che viene utilizzato per gestire le prestazioni energetica del Sistema Aria Compressa dipende anche fortemente dalla rilevanza che tale sistema assume all'interno del sito produttivo in termini di incidenza sul consumo totale e criticità dal punto di vista della continuità di servizio. Nel modello sviluppato, tuttavia, si parte dall'assunzione che il Sistema Aria Compressa sia nettamente rilevante per l'azienda cui il modello viene applicato (altrimenti non risulterebbe conveniente la stessa applicazione del modello).

### 3.3.1.3 Gestione delle prestazioni energetiche

Partendo dal presupposto che non si può gestire ciò che non si può misurare, l'organizzazione deve preoccuparsi di raccogliere ed analizzare dati e informazioni in modo da assicurare un'efficace valutazione delle prestazioni energetiche del Sistema Aria Compressa, seguendo con continuità la loro evoluzione nel tempo. Le modalità di gestione delle prestazioni energetiche e la tipologia del sistema informativo di supporto devono essere stabilite in base alle necessità specifiche dell'organizzazione in modo da garantire risultati superiori allo sforzo necessario per il loro mantenimento. Il pieno successo nella riduzione dei consumi energetici richiede, inoltre, la presenza di una figura all'interno dell'organizzazione che abbia la responsabilità di guidare l'intera organizzazione al conseguimento degli obiettivi prefissati in termini di

efficienza energetica del Sistema Aria Compressa, e che sia quindi in grado di interagire con le varie funzioni che contribuiscono al miglioramento dell'efficienza energetica delle fasi di generazione, trasporto e utilizzo dell'aria compressa. Tale responsabile deve quindi avere la capacità di individuare compiti e responsabilità per i diversi ruoli aziendali ed avere l'autorità e l'autorevolezza necessarie per assicurarne il rispetto garantendo pieno coordinamento delle attività. È inoltre fondamentale la gestione degli aspetti comunicativi interni ed esterni all'organizzazione.

### **3.3.1.4 Implementazione “Best Practices” e adozione di “Best Available Technologies”**

La quarta dimensione descritta in questa sezione, fa riferimento all'implementazione delle “Best Practices” e all'adozione delle “Best Available Technologies” per i Sistemi Aria Compressa esistenti in letteratura.

Si era inizialmente pensato di descrivere l'evoluzione sui cinque livelli in questa dimensione facendo riferimento alle classificazioni, presenti in letteratura, delle “Best Practices” e “Best Available Technologies” maggiormente diffuse nelle aziende. Tuttavia questo approccio, basato sulla “popolarità” dei vari interventi di efficientamento, non si è rivelato adatto allo scopo del modello di maturità, in quanto la scelta di implementare un intervento piuttosto che un altro è fortemente influenzata dalla specifica realtà aziendale nonché da fattori e condizioni al contorno, tra cui la posizione geografica e la disponibilità di risorse dell'azienda. Pertanto, non si può giudicare un'azienda più o meno matura solo sulla base del fatto che abbia o meno implementato una specifica azione di miglioramento.

I cinque livelli sono stati dunque associati a cinque differenti approcci alla valutazione degli interventi, che influenzano a loro volta la scelta e la definizione della priorità degli interventi stessi. Al primo livello gli interventi di efficientamento non sono affatto valutati (coerentemente con quanto descritto al primo livello della dimensione “Approccio metodologico”), mentre al secondo livello si prendono in considerazione e implementano solamente gli interventi più noti e di facile valutazione, che possono essere totalmente affidati a fornitori e che richiedono bassi investimenti e generano ritorni economici notevoli (quindi, ad esempio, la riparazione delle perdite di aria compressa lungo la rete di distribuzione, l'eliminazione e sostituzione degli usi impropri dell'aria compressa o la modifica del posizionamento della presa d'aria all'ingresso dei compressori). Al terzo livello si considerano ancora solo interventi noti e di facile valutazione, ma si implementano anche quelli che richiedono investimenti più consistenti, ferma restando la relativa certezza dei ritorni economici (come ad esempio la modifica del sistema di regolazione dei compressori, la verifica dei piani di manutenzione e della corretta progettazione del sistema e dei suoi elementi principali, e l'adozione di sistemi per il controllo automatico della modulazione). Al quarto livello invece l'azienda ha ormai acquisito una profonda conoscenza della propria struttura di consumo (si confrontino a tale riguardo le altre dimensioni) e può quindi valutare e implementare interventi che richiedono una profonda conoscenza dei propri impianti da un punto di vista energetico (ad esempio, la riduzione delle cadute di pressione nella rete di distribuzione, la valutazione della pressione di erogazione dell'aria o la modifica del profilo di richiesta dell'aria compressa). Infine, al quinto livello, l'azienda ha ormai ottimizzato l'impianto da un punto di vista sia tecnologico che gestionale e può cominciare a sperimentare soluzioni sperimentali e innovative per il risparmio energetico (come ad esempio differenti modalità di recupero di calore o di inter refrigerazione, modelli matematici per il controllo e la gestione del parco compressori, sistemi di riduzione delle perdite di calore dovute all'attrito o sistemi di generazione dell'aria compressa da recupero di calore).

Per ognuno degli interventi indicati, il modello di maturità non valuta semplicemente il fatto che siano effettivamente implementati o meno in stabilimento, quanto il fatto che la loro implementazione sia stata correttamente valutata in termini energetici ed economici.

I cinque livelli di maturità in cui si struttura il modello sono invece descritti di seguito.

1. **Iniziale:** in questo stadio l'organizzazione non si interessa quasi affatto dei propri consumi energetici e dell'efficienza energetica del Sistema Aria Compressa. La direzione non fornisce nessun segnale a riguardo e gli altri membri dell'organizzazione non prestano attenzione all'argomento. La performance energetica del sistema non viene valutata e non viene adottato nessun approccio metodologico per la riduzione dei consumi.
2. **Occasionale:** l'organizzazione mostra interesse nei confronti del tema dell'efficienza energetica del Sistema Aria Compressa cercando di incrementare la consapevolezza dei membri coinvolti nella sua gestione. Si arriva di solito ad identificare un responsabile dei consumi energetici di tale impianto, che non ha però sufficiente autorità per coinvolgere altre persone dell'organizzazione. Le misure di efficientamento non sono sistematicamente ricercate, ma vengono colte qualora se ne presenti l'occasione (ad esempio nel caso di sostituzione di compressori, ecc.). Proprio per questo motivo le misure solitamente implementate sono quelle molto note e diffuse, a basso costo e con ritorni elevati. I consumi del sistema sono monitorati, ma non costantemente analizzati.
3. **Sistematico ma non continuo:** in questo stadio l'organizzazione sviluppa strategie di efficientamento per il Sistema Aria Compressa, identifica degli obiettivi di riduzione dei consumi e tenta di raggiungerli attraverso l'implementazione di specifici progetti di efficientamento. La collaborazione tra le diverse funzioni dell'organizzazione ai fini dell'efficientamento del sistema è buona, ma è principalmente orientata al completamento di specifici progetti. Gli interventi di efficientamento implementati prevedono anche dei budget elevati, ma sono comunque noti e diffusi e dai ritorni economici pressoché sicuri. Viene utilizzato un sistema di misura delle performance del Sistema Aria Compressa, che consente la definizione di Indici di Performance Energetica del sistema e l'identificazione di opportunità di miglioramento non solo legate alla tecnologia, ma anche alla formazione tecnica e manageriale del personale.
4. **Integrato:** a questo livello l'organizzazione è sufficientemente matura da attuare strategie che prevedono una gestione continua dell'efficienza energetica del Sistema Aria Compressa; si inizia quindi a sviluppare un vero e proprio sistema di gestione dell'efficienza energetica dell'impianto, più o meno inserito all'interno di un sistema di gestione dell'energia aziendale. Il monitoraggio e controllo dei consumi dell'impianto diventa un'attività abituale, che porta all'ottenimento di una conoscenza approfondita dell'impianto. Proprio per questo motivo è possibile implementare interventi di efficientamento meno comuni e diffusi e che richiedono uno studio puntuale del funzionamento del proprio impianto per poter essere efficaci. Vengono sviluppati programmi di attività di efficientamento da realizzare sull'impianto per raggiungere obiettivi di efficientamento che vengono periodicamente fissati e verificati. Le responsabilità per l'efficienza energetica dell'impianto sono identificate a vari livelli e per diverse funzioni e le "Best Practices" sono regolarmente identificate, diffuse e standardizzate.
5. **Ottimizzato:** il sistema di gestione dell'efficienza d'impianto è stabile e ottimizzato, e il miglioramento continuo è diffuso come approccio al tema dell'efficienza energetica. Tutti i membri dell'organizzazione sono informati a tale riguardo e i membri attivamente coinvolti sono anche formati e in grado di interagire proattivamente, proponendo possibili interventi di efficientamento dell'impianto. Il livello tecnologico e gestionale dell'impianto è ottimizzato, e si stanziavano anche budget per soluzioni di efficienza energetica sperimentali e all'avanguardia. I risultati ottenuti sono anche diffusi al di fuori dell'organizzazione, che diventa un punto di riferimento per le altre aziende, in particolar modo all'interno del proprio settore industriale.

Ciascun livello può contenere aspetti inerenti le differenti dimensioni della maturità ma ovviamente le capacità richieste all'organizzazione rispetto alle diverse dimensioni crescono di intensità e complessità con il livello di maturità. L'intersezione tra livelli e dimensioni di maturità è riportata nelle Figure 69 e 70.

	Consapevolezza, conoscenza e competenza	Approccio metodologico	Gestione delle prestazioni energetiche	Implementazione Best Practices e adozione BAT	
5	Ottimizzata: formazione avanzata e continua	Ottimizzato e in uso	Ottimizzato e in uso	Livello tecnologico ottimizzato	OTTIMIZZATO
4	Sviluppo proattività del personale sul tema dell'efficiamento energetico dell'impianto	Sistema di gestione standardizzato ed in uso	Presente ed in uso, con compiti e responsabilità diffuse	Vengono implementati interventi per i quali è necessario uno studio approfondito del sistema basato sui dati (prevalentemente gestionali o modifiche strutturali)	INTEGRATO
3	Sviluppo competenze gestionali e di consapevolezza dell'impatto del personale	Gestione per progetti (energy audit)	Parziale e spontaneo, con un responsabile "effettivo"	Vengono implementati anche gli interventi più comuni che richiedono un investimento elevato ma consentono di avere ritorni certi	SISTEMATICO MA NON CONTINUO
2	Prevalentemente tecniche e di livello elementare	Si parla della questione	Raccolta informazioni occasionale	Vengono implementati solo gli interventi più comuni a costo basso o nullo e con importanti ritorni	OCCASIONALE
1	Disperse	Inesistente	Inesistente (bollette)	Inesistente	INIZIALE

Figura 69. Intersezione di livelli e dimensioni di maturità nel Compressed Air Systems Energy Efficiency Maturity Model



Figura 70. Rappresentazione grafica dell'evoluzione delle dimensioni nei livelli di maturità nel Compressed Air Systems Energy Efficiency Maturity Model

### 3.3.2 Progettazione del questionario di self-assessment e della rappresentazione dei risultati

Una volta creata la struttura del modello di maturità, si è realizzato un questionario da poter mettere a disposizione delle aziende per abilitare la modalità di self-assessment. Come già accennato, infatti, la modalità di self-assessment è ritenuta fondamentale per consentire alle aziende di avvicinarsi gradualmente e autonomamente alla tematica, e quindi sviluppare la sensibilità e l'interesse necessari per incrementare il proprio livello di maturità. Inoltre, diffondendo in un secondo momento il modello in questa modalità sarà possibile raccogliere una maggiore quantità di dati.

Inoltre, le informazioni contenute all'interno di ciascun livello, come descritte fino a questo momento, pur essendo molto specifiche, sono di tipo descrittivo ed espongono al rischio che l'organizzazione, in fase di assessment, si qualifichi come appartenente ad un livello sulla base del fatto che possiede (o ritiene di possedere) solamente alcune delle caratteristiche descritte. In altri termini, se si utilizzassero i livelli così come sono definiti per valutare il livello di maturità dell'organizzazione, si lascerebbe eccessivo spazio ad interpretazioni personali. Per questa ragione si è sviluppato un questionario per misurare il grado di appartenenza dell'organizzazione ad uno specifico livello, nella convinzione che il ricorso a tale strumento possa rendere la valutazione meno arbitraria.

Proprio a seguito di queste considerazioni si è realizzato un questionario di self-assessment con domande a risposta chiusa. Tale scelta, se da una parte riduce lo spazio di analisi ad un insieme di risposte precodificato (quindi non customizzabile in base alle specifiche esigenze), dall'altra ne consente l'utilizzo come strumento di self-assessment anche per organizzazioni che non hanno confidenza con lo strumento e per effettuare analisi di benchmarking tra le organizzazioni, in quanto restituisce un risultato quantitativo. Questo, inoltre, non esclude la possibilità di approfondire, in una fase successiva, le cause che rendono alcune aree più deboli in base a quanto emerge dal questionario, in modo da sviluppare azioni di miglioramento efficaci. Si è anche ritenuto opportuno consentire alle organizzazioni l'inserimento di note e suggerimenti che permettano di individuare eventuali aree di miglioramento del modello stesso, considerato che il modello si trova ancora in una fase di validazione.

Nel questionario sono state elaborate per ogni livello una serie di domande relative a ciascuna dimensione. Le domande sono ovviamente state progettate in modo tale da aderire completamente alla descrizione dell'evoluzione della maturità lungo le differenti dimensioni descritte nel sotto capitolo precedente. Le domande che compongono il questionario sono in totale 34, suddivise nei differenti livelli e dimensioni come riportato in Figura 71.

	DIM.1	DIM.2	DIM.3	DIM.4	TOT per livello
LIV.2	2	1	3	3	<b>9</b>
LIV.3	2	2	4	4	<b>12</b>
LIV.4	1	1	3	3	<b>8</b>
LIV.5	1	1	2	1	<b>5</b>
<b>TOT per dimensione</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	

Figura 71. Suddivisione delle domande per livelli e dimensioni del modello di maturità

Il primo livello non prevede domande in quanto è un livello "base", in cui le dimensioni non sono praticamente sviluppate.

Ad ogni domanda corrisponde una serie di affermazioni che si ritiene caratterizzino uno specifico livello (il numero di risposte è pari a 5 per i primi tre livelli, dal secondo al quarto, mentre è pari a 2 per l'ultimo livello); l'organizzazione che si sottopone al questionario sceglie quella che rispecchia maggiormente la situazione attuale. Le affermazioni sono costruite in modo tale che se un'affermazione è vera, anche quelle che la precedono sono vere, o quantomeno lo sono state in un momento precedente: in questo modo è possibile assegnare un peso a ciascuna risposta in maniera cumulativa.

Per ogni domanda ( $d_i$ ), il punteggio conseguito ( $p_i$ ) è calcolato come segue. Date  $n$  affermazioni, numerate in ordine crescente, la prima ha valore zero, mentre per le  $(n-1)$  affermazioni restanti,  $1/(n-1)$  è il peso di ognuna delle affermazioni vere. Se la  $j$ -esima affermazione è vera al momento dell'assessment, anche le  $(j-1)$  precedenti lo sono, quindi il punteggio della domanda sarà  $p_i = \frac{j-1}{(n-1)}$ .

Calcolando i punteggi nella modalità appena illustrata, lo sviluppo massimo percentuale (ottenuto quindi conseguendo il massimo del punteggio per ciascuna domanda) delle diverse dimensioni lungo i cinque livelli

è quello rappresentato in Figura 72 (il livello 1 è ancora una volta assente, in quanto rappresenta lo 0% di sviluppo per tutte le dimensioni).

	DIM.1	DIM.2	DIM.3	DIM.4
LIV.2	33%	20%	25%	27%
LIV.3	67%	60%	58%	64%
LIV.4	83%	80%	83%	91%
LIV.5	100%	100%	100%	100%

**Figura 72. Suddivisione delle domande per livelli e dimensioni del modello di maturità**

Si riportano nella tabella seguente le domande e le possibili risposte alternative elaborate per il questionario di self-assessment del CASEMM.

**Tabella 10. Domande e possibili risposte alternative elaborate per il questionario di self-assessment del CASEMM**

LIVELLO 2	
02:01	Per quanto riguarda la promozione dell'efficienza energetica del sistema aria compressa all'interno dell'azienda:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>nessuna iniziativa è stata recentemente intrapresa in tale direzione;</li> <li>delle attività di promozione sono state effettuate sporadicamente e sulla base di contatti informali;</li> <li>sono in corso di definizione iniziative ad hoc per lo sviluppo della consapevolezza del personale riguardo all'importanza dell'efficienza energetica del sistema aria compressa;</li> <li>iniziative sistematiche sono state portate avanti in passato, si ritiene che buona parte del personale sia consapevole dell'importanza dell'efficienza energetica del sistema aria compressa;</li> <li>l'importanza dell'efficienza energetica del sistema aria compressa è promossa sistematicamente e tutto il personale ne è consapevole.</li> </ul>
02:02	Riguardo l'atteggiamento dell'organizzazione nei confronti delle opportunità di efficientamento energetico è possibile affermare che:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>le opportunità non vengono ricercate e qualora si manifestino c'è grossa resistenza legata alla poca fiducia sui loro reali benefici;</li> <li>le opportunità non vengono ricercate ma nel momento in cui si presenta l'occasione vengono intraprese;</li> <li>le opportunità non vengono ricercate ma nel momento in cui si presenta l'occasione vengono intraprese in caso di una positiva valutazione quantitativa dei relativi costi e benefici;</li> <li>le opportunità vengono ricercate ogni qualvolta ci sia l'occasione (ad es. impianti nuovi/modifiche, manutenzioni, ecc.) e intraprese in caso di una positiva valutazione dei relativi costi e benefici;</li> <li>le opportunità vengono ricercate sistematicamente (ad esempio attraverso apposite diagnosi energetiche) e intraprese in caso di una positiva valutazione dei relativi costi e benefici.</li> </ul>
02:03	Relativamente alla raccolta dei dati relativi ai costi e ai consumi dell'impianto aria compressa è possibile affermare che:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>i costi energetici dell'impianto non sono oggetto di revisione neanche annuale;</li> <li>costi e consumi di impianto sono stimati annualmente sulla base delle fatture e dei dati di targa e rendicontati alla direzione;</li> <li>costi e consumi di impianto sono stimati ad ogni periodo di fatturazione;</li> <li>l'azienda raccoglie i dati con frequenza superiore a quella di fatturazione (ad es. giornaliera od oraria) o raccoglie ulteriori informazioni necessarie alla comprensione</li> </ul>

	<p>dei dati di consumo (ad es. unità prodotte, ore lavorate, ecc.);</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• l'azienda raccoglie i dati con frequenza superiore a quella di fatturazione (ad es. giornaliera od oraria) e raccoglie ulteriori informazioni necessarie alla comprensione dei dati di consumo (ad es. unità prodotte, ore lavorate, ecc.).</li> </ul>
02:04	Per quanto riguarda le perdite di aria compressa nella rete di distribuzione:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non è stata recentemente effettuata una valutazione della loro entità;</li> <li>• ne è stata stimata l'entità sulla base di prove di accensione/spegnimento dei compressori a impianto fermo e si sta valutando di intraprendere un'azione di miglioramento in tal senso;</li> <li>• sono stati effettuati dei sopralluoghi a seguito dei quali sono state rimosse le perdite più significative (individuabili a orecchio) ed è stato almeno pianificato l'inserimento di apposite valvole a solenoide sui condotti verso le apparecchiature utilizzatrici;</li> <li>• è stata condotta una campagna di ricerca delle perdite con la tecnologia ad ultrasuoni a seguito della quale è stata rimossa la quasi totalità delle perdite nell'impianto ed è stato almeno pianificato l'inserimento di apposite valvole a solenoide sui condotti verso le apparecchiature utilizzatrici;</li> <li>• l'impianto di distribuzione risulta ottimizzato per quanto riguarda la riduzione delle perdite di aria compressa (l'entità delle perdite è monitorata ad intervalli di tempo regolari e/o si effettuano interventi periodici di manutenzione delle tubazioni).</li> </ul>
02:05	Livello delle conoscenze tecniche (progettazione, manutenzione, gestione, utilizzo dell'aria compressa, tecnologie innovative) relative ad aspetti energetici del personale responsabile della gestione dell'impianto:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• le conoscenze specifiche sono scarse e non è attualmente prevista alcuna formazione a riguardo;</li> <li>• il livello delle conoscenze è limitato ed eterogeneo ma si prevede di attivare a breve un programma formativo;</li> <li>• il livello di conoscenze è quasi sufficiente e sono attualmente in corso attività formative per migliorarlo;</li> <li>• il livello di conoscenze è quasi quello richiesto e sono attualmente in corso attività formative per raggiungere il livello desiderato;</li> <li>• il livello di conoscenza è quello richiesto.</li> </ul>
02:06	Il responsabile per l'efficienza energetica dell'impianto aria compressa:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non esiste;</li> <li>• esiste informalmente;</li> <li>• esiste in maniera formale;</li> <li>• esiste in maniera sostanziale (ha obiettivo specifico di riduzione consumi e riporta periodicamente alla dirigenza) ma agisce in maniera separata dal resto dell'azienda;</li> <li>• esiste e si occupa di ridurre i consumi e ha l'autorità per coinvolgere il personale di altre aree all'occorrenza.</li> </ul>
02:07	Per quanto riguarda gli usi impropri dell'aria compressa:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non sono mai stati sistematicamente identificati;</li> <li>• gli operatori sono stati informati riguardo le corrette modalità operative e la necessità di spegnere le apparecchiature non in uso ma il loro operato in tal senso non viene verificato;</li> <li>• esistono e sono diffuse delle apposite procedure di accensione e spegnimento nonché di corretto utilizzo delle apparecchiature che usano aria compressa e la loro applicazione viene periodicamente verificata attraverso ispezioni interne;</li> <li>• esistono e sono verificate le procedure di cui al punto precedente, sono stati individuati gli usi impropri dell'aria compressa (ad es. preferendo blower a bassa pressione per</li> </ul>

	<p>applicazioni quali lame ad aria, postole ad aria, ecc.) ed esistono specifiche o checklist di progettazione per evitare che ne vengano introdotti di nuovi;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• esistono e sono verificate le procedure e le specifiche di cui al punto precedente e sono stati individuati e sostituiti gli usi per i quali è conveniente sostituire l'aria compressa con un altro vettore (ad es. preferendo blower a bassa pressione per applicazioni quali lame ad aria, postole ad aria, ecc.).</li> </ul>
02:08	<p>Analisi dei dati di costo e di consumo dell'impianto aria compressa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• i dati di costo/consumo non vengono analizzati;</li> <li>• viene periodicamente condotta un'analisi dell'andamento nel tempo dei costi/consumi e vengono raffrontati i dati attuali con quelli storici;</li> <li>• sono stati definiti dei target basati anche su eventuali dati di benchmark disponibili;</li> <li>• in caso di anomalie possono essere condotte analisi specifiche sul rapporto consumo/produzione o sul consumo specifico (ad es. per unità di prodotto, per ora lavorata, ecc.), viene periodicamente monitorato il rapporto consumo/produzione o il consumo specifico;</li> <li>• in caso di anomalie possono essere condotte analisi specifiche sul rapporto consumo/produzione e sul consumo specifico (ad es. per unità di prodotto, per ora lavorata, ecc.), viene periodicamente monitorato il rapporto consumo/produzione ed il consumo specifico.</li> </ul>
02:09	<p>Il posizionamento della presa dell'aria in ingresso ai compressori:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• non è mai stato verificato;</li> <li>• è stato valutato non corretto (la presa d'aria risulta spesso calda e umida) ma non è stato pianificato nessun intervento di miglioramento a riguardo;</li> <li>• è stato valutato non corretto (la presa d'aria risulta spesso calda e umida) ed è stato pianificato un intervento di miglioramento a riguardo;</li> <li>• risulta corretto;</li> <li>• risulta corretto, le condizioni dell'aria in ingresso vengono periodicamente valutate ed esistono specifiche di progettazione sul posizionamento della presa d'aria in caso di riprogettazione del sistema.</li> </ul>
<b>LIVELLO 3</b>	
03:01	<p>Il personale dell'azienda (ed in particolare quello coinvolto nella gestione dell'impianto aria compressa):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ha scarsa consapevolezza dell'importanza del risparmio energetico, dell'impegno dell'organizzazione in tal senso e del proprio ruolo e delle proprie responsabilità nel raggiungimento degli obiettivi;</li> <li>• ha scarsa consapevolezza a riguardo ma si stanno definendo le modalità migliori per migliorare questa situazione;</li> <li>• ha iniziato a sviluppare tale consapevolezza grazie ad una serie di attività finalizzate in corso di esecuzione;</li> <li>• ha mediamente un buon livello di consapevolezza e viene coinvolto in attività di efficientamento ma sono percepibili ulteriori margini di miglioramento;</li> <li>• è pienamente consapevole e si dimostra attivamente coinvolto nell'operato dell'azienda in tal senso.</li> </ul>
03:02	<p>Diagnosi sistematiche e documentate dell'impianto aria compressa, finalizzate all'individuazione di opportunità di risparmio energetico (audit energetici) condotte anche attraverso l'analisi di dati disponibili e sopralluoghi che possono prevedere anche campagne di misura...</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• non sono mai state effettuate;</li> <li>• sono state condotte in passato ma in maniera non adeguata o senza portare a miglioramenti significativi nel medio periodo;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>sono state condotte in passato portando alcuni miglioramenti ma solo una minima parte delle opportunità individuate sono state successivamente colte;</li> <li>ne è stata effettuata una di recente e si stanno implementando le opportunità di efficientamento individuate sulla base della loro priorità;</li> <li>vengono condotte periodicamente individuando un piano di opportunità di risparmio energetico che vengono successivamente valutate ed eventualmente implementate.</li> </ul>
03:03	Sviluppo di un sistema di misura dei consumi (definizione ed utilizzo di un piano di misura che individui le grandezze da misurare, la frequenza di misurazione e gli strumenti di misura):
	<ul style="list-style-type: none"> <li>la questione non è mai stata affrontata;</li> <li>sono state condotte alcune campagne di misurazione tese all'individuazione dei consumi di specifiche parti dell'impianto (ad es. alcuni compressori o particolari utenze);</li> <li>sono state definite le modalità per la raccolta dei dati relativi alle parti dell'impianto di principale interesse dal punto di vista dei consumi energetici ma le misurazioni non sono ancora state attivate;</li> <li>i dati vengono raccolti secondo quanto previsto dal sistema di misura sviluppato solo parzialmente o in maniera incompleta;</li> <li>le operazioni di raccolta e registrazione di tutti i dati previsti dal piano sono regolari e sono state automatizzate ed integrate a quelle eventualmente già presenti sulla base delle necessità dell'azienda.</li> </ul>
03:04	Per quanto riguarda il sistema di regolazione dei compressori (on/off, vuoto/carico, inverter):
	<ul style="list-style-type: none"> <li>non è mai stato oggetto di studio e valutazioni;</li> <li>è stato preso in considerazione come oggetto di studio ma un eventuale miglioramento non è mai stato valutato in termini economici, rimandando tale valutazione al momento in cui sarà comunque necessario sostituire uno o più compressori;</li> <li>l'inserimento del sistema di regolazione ad inverter sul compressore master è stato valutato sulla base di dati nominali;</li> <li>l'inserimento del sistema di regolazione ad inverter sul compressore master è stato valutato sulla base di dati misurati;</li> <li>il sistema è ottimizzato dal punto di vista della regolazione e l'efficienza del sistema di modulazione viene controllata nel tempo.</li> </ul>
03:05	Livello delle conoscenze gestionali (valutazione economico-finanziaria di progetti energetici, audit energetici, metodi e strumenti per l'analisi e il controllo dei consumi, sistemi informativi per la gestione dell'energia, sistemi di gestione dell'energia, strumenti di finanziamento delle tecnologie innovative) relative ad aspetti energetici del personale responsabile della gestione dell'impianto:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>non vi sono conoscenze specifiche e non è attualmente prevista alcuna formazione a riguardo;</li> <li>il livello delle conoscenze è limitato ed eterogeneo ma si prevede di attivare a breve un programma formativo;</li> <li>il livello di conoscenze è quasi sufficiente e sono attualmente in corso attività formative per migliorarlo;</li> <li>il livello di conoscenze è quasi quello richiesto e sono attualmente in corso attività formative per raggiungere il livello desiderato;</li> <li>il livello di conoscenza è quello richiesto.</li> </ul>
03:06	Registro delle opportunità di risparmio energetico:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>non è presente;</li> <li>non esiste un documento formale che elenca tali opportunità anche se vi è un elenco informale;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• è presente un elenco delle opportunità che ne fornisce una descrizione e riporta per ciascuna di esse una sommaria valutazione costi/benefici;</li> <li>• è presente un elenco che contiene una precisa valutazione della fattibilità tecnica ed economica dei singoli interventi e individua anche le responsabilità ed i tempi per l'attuazione;</li> <li>• è presente e oltre a contenere le informazioni già elencate viene utilizzato come strumento di programmazione e controllo dell'avanzamento delle attività fino alla verifica della loro attuazione ed efficacia.</li> </ul>
03:07	Misurazione dei fattori energetici (fattori che influenzano il consumo di energia come ad esempio volumi di produzione, la produzione di aria compressa, ore lavorate, ecc.):
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la questione non è mai stata affrontata;</li> <li>• ne sono stati individuati alcuni che vengono regolarmente misurati ma non è mai stata condotta un'analisi specifica;</li> <li>• si sta conducendo un'analisi per l'individuazione dei fattori energetici relativi a tutti i punti di consumo monitorati;</li> <li>• l'analisi è stata condotta e si sta completando la predisposizione del sistema di misura per la raccolta dei dati;</li> <li>• i fattori energetici individuati vengono regolarmente misurati insieme ai dati di consumo.</li> </ul>
03:08	Per quanto riguarda la pianificazione della manutenzione dei compressori:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non esiste un piano di manutenzione per i compressori;</li> <li>• esiste un piano di manutenzione e sostituzione dei motori (ad es. interventi di pulizia e lubrificazione, di sostituzione cinghie o di sostituzione con motori a più alta efficienza), ma la pulizia dei filtri di ingresso e dei banchi di raffreddamento avviene al bisogno;</li> <li>• oltre alla manutenzione dei motori, il piano di manutenzione prevede anche periodiche attività di pulizia dei filtri di ingresso e dei banchi di raffreddamento;</li> <li>• la manutenzione dei motori e la pulizia dei filtri di ingresso e dei banchi di raffreddamento avviene ad intervalli di tempo regolari e la sua effettiva esecuzione ed efficacia viene controllata;</li> <li>• la manutenzione dei motori e la pulizia dei filtri di ingresso e dei banchi di raffreddamento avviene su condizione o sulla base del monitoraggio di determinate variabili (segnali deboli).</li> </ul>
03:09	Per quanto riguarda le analisi che vengono condotte sui dati raccolti relativi agli aspetti di consumo energetico è possibile affermare che:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• si effettua l'analisi dei dati solo a livello di intero sistema (impianto aria compressa);</li> <li>• a seguito di un'analisi costi-benefici sono stati individuati i sottosistemi da tenere maggiormente sotto controllo dal punto di vista dei consumi (ad esempio singoli compressori, essiccatori, reparti o singoli utilizzatori, ecc.), e per tali sottosistemi di analizza il contributo al consumo globale d'impianto nel caso si notino delle anomalie;</li> <li>• i punti di misura individuati al punto precedente sono monitorati ad intervalli di tempo costanti;</li> <li>• a volte si analizza anche l'andamento dei consumi in funzione dei fattori energetici individuati (ad es. tramite regressione) per ogni punto di misura;</li> <li>• si effettua un'analisi periodica che tiene sistematicamente conto dei consumi registrati rispetto ai fattori energetici monitorati.</li> </ul>
03:10	Per quanto riguarda la verifica della corretta progettazione del sistema e dei suoi elementi:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la corretta progettazione del sistema non è stata riesaminata e aggiornata di recente;</li> <li>• è stata verificata la corretta scelta della tipologia dei compressori sulla base di quantità e qualità dell'aria richiesta o della tipologia degli essiccatori, e gli interventi identificati</li> </ul>

	sono stati valutati e pianificati;
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• è stata verificata la corretta scelta della tipologia dei compressori sulla base di quantità e qualità dell'aria richiesta e della tipologia degli essiccatori, e gli interventi identificati sono stati valutati e pianificati;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• è stata verificata la corretta scelta della tipologia dei compressori sulla base di quantità e qualità dell'aria richiesta e della tipologia degli essiccatori, e gli interventi identificati sono stati già eseguiti;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• il sistema è completamente ottimizzato e viene periodicamente riverificato, sono state emesse linee guida per la corretta progettazione di tali impianti.</li> </ul>
03:11	Comunicazione interna:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nessun contatto tra il responsabile per l'efficienza energetica dell'impianto con i reparti/aree che utilizzano l'aria compressa;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• comunicazioni informali prevalentemente tra tecnici specialisti e pochi utilizzatori;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• si tengono riunioni all'occorrenza per le quali vengono individuati rappresentanti delle diverse aree;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• si tengono regolarmente riunioni tra un gruppo di responsabili identificati presso le diverse aree nell'ambito dei quali si discutono anche le prestazioni energetiche dell'impianto;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• canali di comunicazione formali e informali sono regolarmente sfruttati dal responsabile dell'efficienza energetica dell'impianto a tutti i livelli.</li> </ul>
03:12	Per quanto riguarda l'adozione di sistemi di controllo automatico per la modulazione:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• l'adozione di tali sistemi non è mai stata presa in considerazione;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• l'adozione di una centralina di controllo dei compressori o di un sistema di controllo automatico del punto di rugiada per gli essiccatori è stata valutata e pianificata;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• l'adozione di una centralina di controllo dei compressori e di un sistema di controllo automatico del punto di rugiada per gli essiccatori è stata valutata e pianificata;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• l'adozione di una centralina di controllo dei compressori e di un sistema di controllo automatico del punto di rugiada per gli essiccatori è stata valutata e almeno una delle due è stata implementata;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• i sistemi di controllo sono attivi e monitorati in continua, esistono sistemi di allarme nel caso di funzionamento poco efficiente del sistema.</li> </ul>
LIVELLO 4	
04:01	Relativamente al coinvolgimento del personale nel processo di efficientamento energetico dell'impianto:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non vi è un diretto coinvolgimento del personale nel processo di efficientamento energetico del sistema;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• il personale viene coinvolto ma in maniera discontinua e informale;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• il personale viene coinvolto in maniera sistematica e informale;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• il personale viene coinvolto in maniera sistematica attraverso appositi sistemi di raccolta delle idee per l'efficientamento energetico;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• esistono appositi sistemi per la raccolta continua delle idee del personale circa l'efficientamento energetico ed opportuni meccanismi di feedback/rewarding.</li> </ul>
04:02	Definizione di specifiche tecniche di efficienza energetica per la progettazione e riprogettazione d'impianto o dei suoi componenti:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non esistono specifiche tecniche di questo tipo e ogni volta che si progetta o riprogetta l'impianto o sue parti si esegue una valutazione tecnico-economica delle BAT;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• per alcune componenti dell'impianto esistono delle specifiche tecniche di questo tipo ma la loro effettiva applicazione non è verificata sistematicamente;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• specifiche tecniche di questo tipo sono stabilite per tutte le componenti dell'impianto</li> </ul>

	<p>ma la loro effettiva applicazione non è verificata sistematicamente;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• specifiche tecniche di questo tipo esistono per tutte le componenti o per le componenti giudicate più importanti secondo opportuni criteri e la loro effettiva applicazione è sistematicamente verificata;</li> <li>• quando si individuano delle BAT particolarmente efficaci vengono applicate a tappeto a tutti i componenti dell'impianto, anche se non necessitano di riprogettazione.</li> </ul>
04:03	Utilizzo di metodi per la previsione dei consumi energetici:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non è presente alcun meccanismo di previsione dei consumi;</li> <li>• viene previsto il consumo globale sulla base dei consumi storici;</li> <li>• viene previsto il consumo globale sulla base di un modello di previsione che tiene conto dei fattori energetici;</li> <li>• si sta sperimentando lo sviluppo di modelli di previsione basati sui fattori energetici per i principali utilizzatori;</li> <li>• sono stati introdotti dei modelli di consumo basati sui fattori energetici per i principali sotto sistemi/aree che compongono l'impianto aria compressa.</li> </ul>
04:04	Le cadute di pressione nell'impianto di distribuzione dell'aria compressa:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non sono periodicamente misurate;</li> <li>• sono periodicamente verificate per motivi non legati all'efficienza energetica (es. per motivi di qualità), pertanto tale verifica non porta alla formulazione di opportunità di risparmio energetico;</li> <li>• l'entità delle cadute di pressione è nota, viene periodicamente verificata e sono stati pianificati alcuni interventi di correzione più immediati e a basso costo (manutenzione periodica dei filtri, sostituzione di altre connessioni con saldature, ecc.);</li> <li>• l'entità delle cadute di pressione è nota e sono stati realizzati quasi tutti gli interventi di correzione più immediati e a basso costo e pianificati alcuni degli interventi più importanti (verifica del corretto dimensionamento dei tubi ed eventuale sostituzione, acquisto manometri per la manutenzione su condizione dei filtri, correzione della forma della rete per evitare curve);</li> <li>• la rete è ottimizzata per la minimizzazione delle perdite di pressione.</li> </ul>
04:05	Controllo dei consumi permanente (acquisizione dati, confronto con modello di previsione, analisi dello scostamento, reazione):
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non è previsto alcun controllo dei consumi;</li> <li>• si effettuano dei controlli periodici basati sui consumi storici;</li> <li>• per alcuni sistemi si sta sperimentando un controllo basato sulla previsione dei consumi tramite modelli che tengono conto dei fattori energetici;</li> <li>• per le aree/sistemi più significativi dal punto di vista dei consumi energetici si effettua un controllo periodico basati su target di consumo ottenuti da modelli di previsione che tengono conto dei fattori energetici;</li> <li>• per le aree/sistemi più significativi esiste un sistema di controllo in continuo dei consumi, automatizzato e basato su sistemi di previsione che tengono conto dei fattori energetici, che viene periodicamente aggiornato.</li> </ul>
04:06	Per quanto riguarda la pressione di erogazione dell'aria compressa:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la possibilità di ridurla non è stata recentemente verificata;</li> <li>• è settata sul massimo valore richiesto dalle utenze, identificato sulla base di una serie di prove;</li> <li>• è stata stabilita sulla base di uno studio puntuale delle varie utenze e viene regolata automaticamente da un sistema di controllo;</li> <li>• sono stati impostati diversi valori a seconda delle condizioni operative dell'impianto (ad es. giorni feriali e giorni festivi) e dello studio della richiesta delle singole utenze;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>è stata valutata la possibilità di gestire separatamente alcuni rami dell'impianto che richiedono pressioni differenti (utilizzando diversi compressori o booster).</li> </ul>
04:07	Individuazione delle responsabilità circa l'efficienza energetica dell'impianto aria compressa:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>non vi è una chiara conoscenza dell'impatto dei diversi ruoli sui consumi energetici dell'impianto (ad esempio acquisto e progettazione nuovi impianti, manutenzione degli impianti esistenti, rispetto delle modalità operative, ecc.);</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>si è cominciato a lavorare sulla valutazione dell'impatto dei diversi ruoli;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>sono state individuate le figure aziendali con impatto sui consumi energetici dell'impianto e sono state definite le responsabilità in base agli impatti;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>sono state individuate le figure aziendali con impatto sui consumi energetici dell'impianto e in base agli impatti sono state definite le responsabilità e assegnati gli obiettivi di efficientamento energetico;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>il responsabile dell'efficienza energetica dell'impianto è pienamente integrato nella struttura organizzativa e vi è una chiara attribuzione di compiti, responsabilità e obiettivi in relazione ai consumi.</li> </ul>
04:08	Per quanto riguarda il profilo di richiesta dell'aria compressa:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>non è mai stato ricostruito e valutato;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>è stato sommariamente ricostruito sulla base di dati di targa e si sta valutando la possibilità di ottimizzare l'accumulo (ad es. ridimensionando il serbatoio esistente o posizionando nuovi serbatoi nei pressi di utenze chiave);</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>la domanda di aria è misurata e si sta pianificando di valutare sia l'ottimizzazione dell'accumulo che il load shifting;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ottimizzazione dell'accumulo e load shifting sono stati entrambi valutati;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>il profilo della richiesta di aria compressa è ottimizzato e l'aggiunta di nuovi carichi viene studiata tenendo conto dell'impatto sul profilo di domanda.</li> </ul>
<b>LIVELLO 5</b>	
05:01	Relativamente alla formazione continua sul tema dell'efficienza energetica è possibile affermare che:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>lo scenario descritto nel seguito non è stato completamente raggiunto;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>l'organizzazione valuta i fabbisogni, pianifica, attua e verifica periodicamente l'efficacia delle attività di formazione secondo programmi specifici per le diverse funzioni aziendali per assicurare che le stesse siano informate e adeguatamente formata nel settore della gestione dell'energia e in particolare riguardo l'efficienza energetica dell'impianto aria compressa. Periodicamente è prevista la revisione dei programmi di formazione ed in particolare il loro aggiornamento rispetto alle innovazioni tecnologiche.</li> </ul>
05:02	Relativamente alle nuove tecnologie:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>lo scenario descritto nel seguito non è stato completamente raggiunto;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>l'organizzazione favorisce e appoggia attività avanzate di efficientamento attraverso tecnologie innovative (ad esempio attraverso progetti di ricerca), è in grado di sfruttare a pieno gli strumenti di finanziamento delle soluzioni tecnologiche innovative volte al risparmio energetico, ricerca proattivamente e sistematicamente le novità tecnologiche disponibili per il risparmio energetico, confronta le prestazioni delle BAT con quelle dei propri sistemi e valuta la loro adozione non solo in termini di convenienza economica.</li> </ul>
05:03	Relativamente al sistema informativo per la gestione dei consumi energetici d'impianto:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>lo scenario descritto nel seguito non è stato completamente raggiunto;</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>tale sistema è del tutto adeguato alle esigenze del settore, comprende tutti gli aspetti necessari e copre tutte le aree/sistemi/servizi tenendo conto della loro rilevanza ai fini dell'incremento dell'efficienza energetica e delle loro peculiarità, è integrato con il sistema informativo aziendale ed è abitualmente utilizzato da almeno due anni.</li> </ul>

05:04	Relativamente all'implementazione delle Best Practices e all'adozione delle BAT per l'efficiamento energetico del sistema aria compressa:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>lo scenario descritto nel seguito non è stato completamente raggiunto;</li> <li>il sistema aria compressa risulta ottimizzato e sotto continuo monitoraggio, esistono specifiche di progettazione che tengono conto dell'efficienza energetica per le principali componenti di impianto e sono state valutate anche soluzioni avanzate come l'installazione di recuperatori di calore o di stadi di inter refrigerazione.</li> </ul>
05:05	Relativamente all'atteggiamento dell'organizzazione nei confronti della gestione energetica d'impianto:
	<ul style="list-style-type: none"> <li>lo scenario descritto nel seguito non è stato completamente raggiunto;</li> <li>la gestione delle performance energetiche dell'impianto aria compressa è percepita come un elemento naturale e strategico per l'organizzazione. Le misure per la riduzione dei consumi energetici vengono individuate ed attuate in maniera continua ed efficiente, sulla base di responsabilità e secondo modalità ben consolidate e con alto tasso di successo in termini economici e di impatto ambientale.</li> </ul>

La seguente figura riporta invece la corrispondenza tra le domande elaborate e le dimensioni di maturità.

Domanda	DIM.1	DIM.2	DIM.3	DIM.4
02:01	x			
02:02		x		
02:03			x	
02:04				x
02:05	x			
02:06			x	
02:07				x
02:08			x	
02:09				x
03:01	x			
03:02		x		
03:03			x	
03:04				x
03:05	x			
03:06		x		
03:07			x	
03:08				x
03:09			x	
03:10				x
03:11			x	
03:12				x
04:01	x			
04:02		x		
04:03			x	
04:04				x
04:05			x	
04:06				x
04:07			x	
04:08				x
05:01	x			
05:02		x		
05:03			x	
05:04				x
05:05			x	

**Figura 73. Corrispondenza tra le domande del questionario e le dimensioni di maturità del CASEEMM**

Una volta scelte le alternative per ciascuna domanda, alle aziende viene dunque fornito un report sintetico del proprio livello di maturità, elaborato automaticamente a partire dai punteggi ottenuti.

Il report finale consente di valutare la maturità dell'organizzazione nella gestione dell'efficienza energetica del proprio Sistema Aria Compressa attraverso:

- L'**indicatore sintetico di maturità**: è un numero, compreso tra 1 e 5, che sintetizza il livello di maturità dell'organizzazione nella gestione dell'efficienza energetica del proprio Sistema Aria Compressa (si considera il livello 1 come livello di partenza, e 5 è quindi il punteggio minimo conseguibile);
- Il **grado di copertura dei livelli**: misura il risultato ottenuto in termini percentuali dell'organizzazione in ogni livello (dato dal rapporto della somma totale dei punteggi delle domande di un dato livello e il massimo punteggio conseguibile sul livello). Si è scelto per la rappresentazione dei risultati un grafico a barre (esempio nella seguente figura);



Figura 74. Esempio di grafico a barre per la valutazione della copertura percentuale dei livelli

- Il **livello di sviluppo delle dimensioni**: misura in corrispondenza di ogni dimensione il risultato percentuale ottenuto rispetto al totale conseguibile. Questo risultato è utile per individuare le aree (dimensioni) in cui l'organizzazione è più debole e sviluppare una "road map" per il miglioramento. Si è scelto per la rappresentazione dei risultati un grafico radar (esempio nella seguente figura).

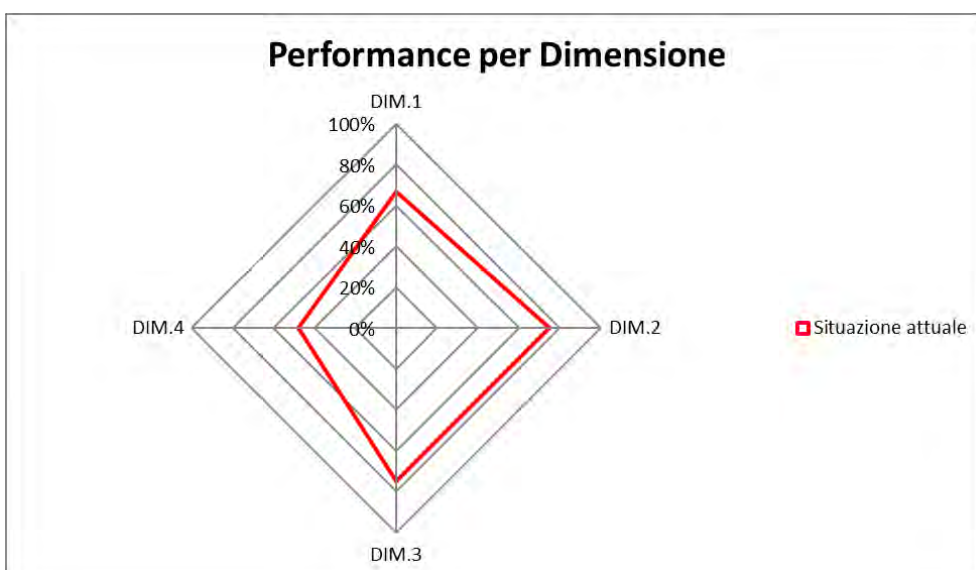


Figura 75. Esempio di grafico radar per la valutazione della copertura percentuale delle dimensioni

Una volta definita la situazione attuale e il livello di maturità dell'azienda oggetto di analisi, è possibile stabilire insieme una possibile strada di sviluppo del livello di maturità a partire dall'osservazione dei due grafici sopra riportati e sulla base di due considerazioni fondamentali:

- Per evitare che lo sviluppo sia caotico piuttosto che sistematico è opportuno che la copertura percentuale dei livelli più bassi sia sempre superiore rispetto a quella dei livelli più alti;
- Per evitare che il mancato sviluppo di una dimensione sia d'ostacolo allo sviluppo delle altre è opportuno che la copertura percentuale delle dimensioni sia il più simmetrica possibile.

Sulla base di queste due considerazioni fondamentali e interagendo con l'azienda per comprendere le sue strategie e i suoi obiettivi, è possibile rivedere il questionario, stabilire il livello di sviluppo al quale si cerca di tendere e definire i valori desiderati di indicatore sintetico di maturità, copertura percentuale dei livelli e delle dimensioni di maturità.

### 3.3.3 Validazione del modello attraverso l'applicazione ad un caso di studio

Il questionario presentato è stato validato attraverso l'applicazione ad un'azienda manifatturiera. Tale applicazione è servita a perfezionare il questionario realizzato (fornito già nella sua forma definitiva, per brevità di narrazione, nel sotto capitolo precedente) e a validarne la capacità di raffigurare efficacemente la situazione dell'azienda e il suo livello di maturità relativamente alla gestione dell'efficienza energetica del Sistema Aria Compressa.

A tale scopo, si è identificata un'azienda che fosse evidentemente abbastanza matura da essere in grado di fornire feedback sufficienti a riguardo e di verificare la precisione della "fotografia" della propria situazione ottenuta attraverso il modello di maturità. Per motivi di riservatezza, non viene riportato il nome dell'azienda né una precisa descrizione dei suoi asset; tuttavia, è importante sapere, ai fini della comprensione dei risultati del questionario, che è un'azienda che produce beni di consumo, classificata sia come grande impresa che come impresa energivora secondo la legislazione italiana, e certificata secondo lo standard internazionale ISO 50001.

Essendo la prima somministrazione del questionario, la compilazione non è avvenuta in modalità self-assessment, ma con l'ausilio e la supervisione degli autori del questionario, in modo tale che da un lato fosse più semplice per l'azienda risolvere alcuni dubbi legati alla formulazione delle domande e dall'altro che fosse possibile per gli autori raccogliere utili feedback sugli stessi. A rispondere alle domande è stato in questo caso l'Energy Manager dell'azienda, che essendo anche nel caso specifico il responsabile del sistema di gestione dell'energia ha visibilità e responsabilità sia dal punto di vista tecnologico che dal punto di vista gestionale per quanto riguarda il Sistema Aria Compressa.

Nella figura seguente, sono riportati i punteggi totalizzati dall'azienda per ciascuna domanda.

Domanda	DIM.1	DIM.2	DIM.3	DIM.4
02:01	0,75			
02:02		0,75		
02:03			1	
02:04				0,5
02:05	0,75			
02:06			1	
02:07				0,75
02:08			1	
02:09				0
03:01	0,75			
03:02		1		
03:03			1	
03:04				0,75
03:05	0,75			
03:06		1		
03:07			0,75	
03:08				0,75
03:09			0,75	
03:10				0,75
03:11			1	
03:12				0,75
04:01	1			
04:02		1		
04:03			0,75	
04:04				0,25
04:05			0,75	
04:06				0,25
04:07			1	
04:08				0,5
05:01	0			
05:02		0		
05:03			0	
05:04				0
05:05			0	

**Figura 76. Punteggi totalizzati dall’azienda per ciascuna domanda del questionario**

Come era possibile immaginare, l’ultimo livello è completamente scoperto, essendo un livello che fa riferimento all’eccellenza nel settore, ma la copertura dei livelli più bassi è decisamente elevata: il valore dell’indicatore sintetico di maturità è infatti di 2,85.

Nella figura seguente è invece riportato il punteggio desiderato dall’azienda per ciascuna domanda, ovvero il punteggio che rispecchia la situazione cui l’azienda vorrebbe tendere nel medio termine. In giallo sono evidenziate le domande per le quali ci si aspetta un cambiamento rispetto alla situazione attuale (i cambiamenti e la loro entità sono stati definiti sulla base delle considerazioni introdotte nel precedente sotto capitolo). Essendo una “road map” di medio periodo, l’azienda non tende per il momento ancora a raggiungere l’eccellenza, ma piuttosto a consolidare le basi esistenti sulle quali poter poi sviluppare ulteriormente le dimensioni di maturità nel seguito. Il valore dell’indice sintetico di maturità atteso alla fine di questa seconda fase è di 3,46.

Domanda	DIM.1	DIM.2	DIM.3	DIM.4
02:01	1			
02:02		1		
02:03			1	
02:04				1
02:05	1			
02:06			1	
02:07				0,75
02:08			1	
02:09				1
03:01	1			
03:02		1		
03:03			1	
03:04				0,75
03:05	1			
03:06		1		
03:07			0,75	
03:08				0,75
03:09			1	
03:10				0,75
03:11			1	
03:12				1
04:01	1			
04:02		1		
04:03			0,75	
04:04				0,5
04:05			0,75	
04:06				1
04:07			1	
04:08				0,5
05:01	0			
05:02		0		
05:03			0	
05:04				0
05:05			0	

Figura 77. Punteggi desiderati, nel medio periodo, dall'azienda per ciascuna domanda del questionario

Il grafico a barre e il grafico radar ottenuti per la situazione corrente e la situazione desiderata nel medio periodo sono riportati nelle figure 78 e 79. Si nota dai grafici come la situazione raggiungibile con l'implementazione della "road map" proposta sia decisamente più bilanciata, con una copertura quasi totale dei primi due livelli, una buona copertura del Livello 4 e una distribuzione maggiormente simmetrica del livello di copertura tra le quattro dimensioni (in particolare grazie allo sviluppo delle dimensioni relative alla formazione del personale e all'implementazione di "Best Practices" e adozione di "Best Available Technologies").

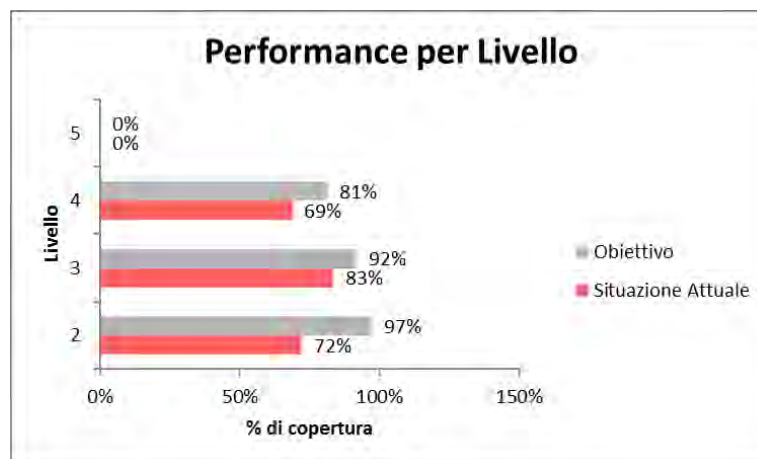


Figura 78. Grafico a barre per la valutazione della copertura percentuale dei livelli e della copertura percentuale dei livelli desiderata

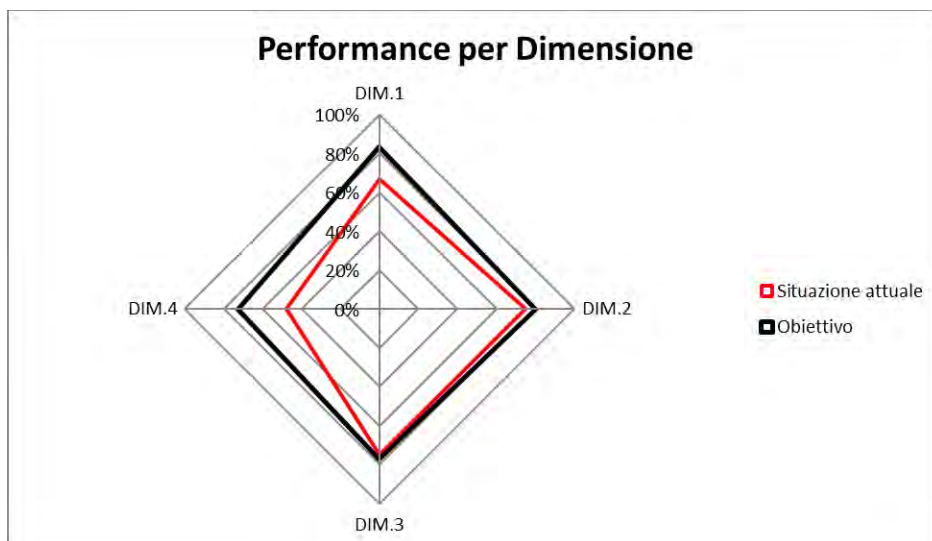


Figura 79. Grafico radar per la valutazione della copertura percentuale delle dimensioni e della copertura percentuale delle dimensioni desiderata

### 3.4 Conclusioni del capitolo

Nel presente capitolo è stato introdotto uno strumento di valutazione delle performance e di supporto alle decisioni per l’efficientamento dei Sistemi Aria Compressa. Tale strumento consiste in un modello di maturità somministrabile in modalità self-assessment che può essere fornito alle aziende e da esse utilizzato per comprendere il proprio livello di maturità attuale, confrontarlo con il livello di eccellenza nel settore e definire una linea di sviluppo personalizzata e coerente con le proprie strategie e con i propri obiettivi, ma strutturata ed equilibrata, incrementando notevolmente le possibilità di successo.

Lo strumento presentato può essere inoltre utilizzato dall’ENEA per completare con informazioni qualitative le informazioni quantitative ottenute attraverso l’analisi dei dati raccolti a seguito dell’implementazione del D.Lgs. 102/2014.

Il modello di maturità progettato è stato inoltre sottoposto ad una prima validazione attraverso la somministrazione pilota ad un’azienda manifatturiera. Nel prossimo anno di progetto si prevede di eseguire ancora qualche somministrazione pilota (quindi non in modalità self-assessment, ma guidata dagli autori) e poi di passare, con l’aiuto e la collaborazione di ENEA, alla fase di somministrazione massiva e di raccolta dati. Tale fase, grazie alla struttura semplice e ben definita del questionario, può anche essere realizzata in maniera automatizzata.

## 4 Conclusioni

Nel presente report è stata proposta una metodologia per il benchmarking dell'efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa, basata su valori reali (misurati o stimati) di consumo di energia elettrica per la produzione dell'aria compressa e di produzione (sia di aria compressa che di prodotti finiti). La metodologia proposta consente di confrontare l'incidenza dei Sistemi Aria Compressa sui consumi totali di stabilimento e l'efficienza non solo nella fase di generazione dell'aria compressa, ma anche in quella di trasporto e utilizzo tra aziende dello stesso settore o di settori differenti. È stato altresì sviluppato uno strumento in grado di facilitare le aziende nelle attività di benchmarking e di abilitare le attività di trasferimento delle conoscenze tra aziende più o meno efficienti. La metodologia elaborata è stata testata su nove settori di interesse (per quanto riguarda la formulazione e valutazione degli indici) e sul settore per cui la sua applicazione potrebbe risultare maggiormente proficua (per quanto riguarda lo strumento di benchmarking elaborato).

La fase di validazione della metodologia sviluppata verrà conclusa in un secondo momento, quando sarà possibile aprire un confronto diretto con le aziende coinvolte e indagare le cause di eventuali anomalie e difficoltà riscontrate.

Per quanto riguarda invece l'applicazione dello strumento di benchmarking ideato, ovvero delle Matrici di Assessment, al settore metallurgico, questa ha dato dei risultati parziali positivi, aiutando ad evidenziare in maniera visiva ed intuitiva i siti industriali caratterizzati da performance energetiche del Sistema Aria Compressa decisamente povere rispetto agli altri del settore. I siti individuati come inefficienti dalle Matrici di Assessment sono peraltro gli stessi individuati come outlier nei grafici di boxplot. Tale strumento dovrà, nel seguito del progetto, essere ulteriormente testato e validato attraverso il confronto diretto con le aziende, e anche attraverso il confronto con i risultati dell'applicazione del modello di maturità (CASEMM) presentato nel seguente capitolo. Possibili miglioramenti da apportare a tale strumento, che andranno verificati e valutati nel prosieguo del progetto, sono l'utilizzo di altre variabili per la valutazione del consumo teorico rispetto alla produzione annuale di prodotti finiti (che al momento costituisce l'unico dato presente in quantità sufficienti da poter essere utilizzato per tale scopo) e l'analisi dell'effettiva incidenza del sotto-settore industriale dei vari siti (ad esempio attraverso l'analisi ANOVA sull'intero campione) per verificare l'utilità e profittabilità dell'applicazione di tale strumento anche ai singoli sotto-settori.

È stato inoltre introdotto uno strumento di valutazione delle performance e di supporto alle decisioni per l'efficientamento dei Sistemi Aria Compressa. Tale strumento consiste in un modello di maturità somministrabile in modalità self-assessment che può essere fornito alle aziende e da esse utilizzato per comprendere il proprio livello di maturità attuale, confrontarlo con il livello di eccellenza nel settore e definire una linea di sviluppo personalizzata e coerente con le proprie strategie e con i propri obiettivi, ma strutturata ed equilibrata, incrementando notevolmente le possibilità di successo.

Lo strumento presentato può essere inoltre utilizzato dall'ENEA per completare con informazioni qualitative le informazioni quantitative ottenute attraverso l'analisi dei dati raccolti a seguito dell'implementazione del D.Lgs. 102/2014.

Il modello di maturità progettato è stato sottoposto ad una prima validazione attraverso la somministrazione pilota ad un'azienda manifatturiera. Nel prossimo anno di progetto si prevede di eseguire ancora qualche somministrazione pilota (quindi non in modalità self-assessment, ma guidata dagli autori) e poi di passare, con l'aiuto e la collaborazione di ENEA, alla fase di somministrazione massiva e di raccolta dati. Tale fase, grazie alla struttura semplice e ben definita del questionario, può anche essere realizzata in maniera automatizzata.

## 5 Riferimenti bibliografici

1. UNI CEI EN ISO 50001:2011, "Sistemi di gestione dell'energia - Requisiti e linee guida per l'uso".
2. 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".
3. V. Introna, V. Cesarotti, M. Benedetti, S. Biagiotti, R. Rotunno, "Energy management maturity model: an organizational tool to foster the continuous reduction of energy consumption in companies", *International Journal of Cleaner Production* 83 (2014), 108-117.
4. A. Gonzales-Gil, "Optimal energy management of urban rail systems: Key performance indicators" *Energy Conversion and Management* 90 (2015), 282-291.
5. K. Tanaka, "Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy", *Energy Policy* 36 (2008), 2887-2902.
6. K. Bunse, M. Vodicka, P. Schönsleben, M. Brühlhart, F. O. Ernst, "Integrating energy efficiency performance in production management - gap analysis between industrial needs and scientific literature", *Journal of Cleaner Production* 19 (2011), 667-679.
7. G. May, M. Taisch, V. V. Prabhu, I. Barletta, "Energy Related Key Performance Indicators – State of the Art, Gaps and Industrial Needs", *APMS 2013, Part I, IFIP AICT 414* (2013), 257–267.
8. Z. K. Morvay, D. D. Gvozdenac, "Applied Industrial Energy and Environmental Management" (2008), JohnWiley & Sons Ltd, United Kingdom.
9. B. X. Ang, "Decomposition methodology in industrial energy demand analysis", *Energy* 20 (1995), 1081-1095.
10. G. Boyd, E. Dutrow, W. Tunnessen, "The evolution of the ENERGY STAR energy performance indicator for benchmarking industrial plant manufacturing energy use", *Journal of Cleaner Production* 16 (2008), 709-715.
11. C. Mendes, L. Silva de Souza, R. Kalid, K. Esquerre, A. Kiperstok, "Assessment of the uncertainty associated with the energy indicator", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), 3156-3164.
12. O. A. Olanrewaju, A. A. Jimoh, P. A. Kholopane, "Integrated IDA-ANN-DEA for assessment and optimization of energy consumptions in industrial sectors", *Energy* 46 (2012), 629-635.
13. B. W. Ang, X. Y. Xu, "Tracking industrial energy efficiency trends using index decomposition analysis", *Energy Economics* 40 (2013), 1014-1021.
14. O. A. Olanrewaju, A. A. Jimoh, 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* 63 (2013), 225-232.
15. G. Boyd, "Estimating the changes in the distribution of energy efficiency in the U.S. automobile assembly industry", *Energy Economics* 42 (2014), 81-87.
16. B. Lin, K. Du, "Decomposing energy intensity change: A combination of index decomposition analysis and production-theoretical decomposition analysis", *Applied Energy* 129 (2014), 158-165.
17. C. Ma, "A multi-fuel, multi-sector and multi-region approach to index decomposition: An application to China's energy consumption 1995-2010", *Energy Economics* 42 (2014), 9-16.
18. L. C. Siebert, E. K. Yamakawa, A. R. Aoki, L. R. Ferreira, P. A. Santos, E. J. Silva Jr., G. Klinguelfus, F. A. Filipini, "Energy Efficiency Indicators Assesment Tool for the Industry Sector", *Transmission and Distribution Conference and Exposition IEEE PES*, 10-13 Sept. 2014.
19. C. Song, M. Li, Z. Wena, Y. L. He, W. Q. Tao, Y. Li, X. Wei, X. Yin, X. Huang, "Research on energy efficiency evaluation based on indicators for industry sectors in China", *Applied Energy* 134 (2014), 550-562.
20. X. Y. Xu, B. W. Ang, "Multilevel index decomposition analysis: Approaches and application", *Energy Economics* 44 (2014), 375-382.
21. M. J. Horowitz, P. Bertoldi, "A Harmonized Calculation Model for Transforming EU Bottom-Up Energy Efficiency Indicators into Empirical Estimates of Policy Impacts". *Energy Economics* 51 (2015), 135-148.

22. J. Morfeldt, S. Silveira, T. Hirsch, S. Lindqvist, A. Nordqvist, J. Pettersson, M. Pettersson, "Improving energy and climate indicators for the steel industry: the case of Sweden", *Journal of Cleaner Production* 107 (2015), 581-592.
23. K. Narula, B. S. Reddy, "Three blind men and an elephant: The case of energy indices to measure energy security and energy sustainability", *Energy* 80 (2015), 148-158.
24. J. C. Van Gorp, "Using key performance indicators to manage energy costs", *Proceedings of the 27th Industrial Energy Technology Conference*, New Orleans, LA, May 10-13, 2005.
25. G. May, M. Taisch, K. Geoghegan, M. Beccaris, "Improving Energy Efficiency in Manufacturing via KPI Intelligence based on Plant Integration", *10th Glob. Conference on Sustainable Manufacturing* (2012).
26. D. B. Goldstein, J. A. Almaguer, "Developing a Suite of Energy Performance Indicators (EnPIs) to Optimize Outcomes", *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry* (2013).
27. D. TH. Askounis, J. Psarras, "Information system for monitoring and targeting (M&T) of energy consumption in breweries", *Energy* 23 (1998), 413-419.
28. B. Swords, E. Coyle, B. Norton, "An enterprise energy-information system", *Applied Energy* 85 (2008), 61-69.
29. M. Dörr, S. Wahrena, T. Bauernhansla, "Methodology for energy efficiency on process level". *46th CIRP Conference on Manufacturing Syst. 2013*, *Procedia CIRP* 7 (2013), 652 – 657.
30. B. S. Linke, G. J. Corman, D. A. Dornfeld, S. Tönissen, "Sustainability indicators for discrete manufacturing processes applied to grinding technology", *Journal of Manufacturing Systems* 32 (2013), 556-563.
31. M. Coroiu, M. Chindris, "Energy Efficiency Indicator and methodology for evaluation of energy performance and retained savings", *Power Engineering Conference (UPEC), 2014 49th International Universities* (2014), 1-6.
32. J. Madan, M. Mani, J. H. Lee, K. W. Lyons, "Energy performance evaluation and improvement of unit-manufacturing processes: injection molding case study" *Journal of Cleaner Production* 105 (2015), 157-170.
33. G. May, I. Barletta, B. Stahl, M. Taisch, "Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency", *Applied Energy* 149 (2015), 46–61.
34. P. Radgen, E. Blaustein, "Compressed Air Systems in the European Union: Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions", 2001.
35. D. Kaya, P. Phelan, D. Chau, H. I. Sarac, "Energy conservation in compressed-air systems", *International Journal of Energy Research*, 26 (2002), 837–849.
36. R. Saidur, N. Rahim, M. Hasanuzzaman, "A review on compressed-air energy use and energy savings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010), 1135-1153.
37. E. A. Abdelaziz, R. Saidur, S. Mekhilef, "A review on energy saving strategies in industrial sector", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011), 150–168.
38. R. Dindorf, "Estimating Potential Energy Savings in Compressed Air Systems", *Procedia Engineering* 39 (2012), 204-211.
39. S. Mousavi, S. Kara, B. Kornfeld, "Energy Efficiency of Compressed Air Systems", *Procedia CIRP* 15 (2014), 313-318.
40. Sustainability Victoria, "Energy Efficiency Best Practice Guide Compressed air Systems", 2009.
41. N. Anglani, P. Mura, "Optimization opportunities in compressed air production, distribution and use of compressed air in most relevant sectors (Opportunità di ottimizzazione dei consumi nella produzione, distribuzione, utilizzo dell'aria compressa nei settori industriali più sensibili)", *ENEA*, 2010.
42. Office of Industrial Technologies, "Inappropriate Uses of Compressed Air", 1998.
43. P. Hanlon, "Compressor handbook", *McGrawHill Professional*, 2001.
44. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, "Compressed Air Challenge. Improving compressed air system performance, a sourcebook for industry", 2003.
45. CEATI, "Compressed Air Energy Efficiency Reference Guide", 2007.
46. Carbon Trust, "Compressed Air", 2012.
47. Compressed Air and Gas Institute, "Compressed Air and Gas Handbook", Sixth edit ed., 2012.

48. Atlas Copco, "Compressed Air Manual", 8th ed., 2015.
49. European Commission, "Reference document on Best Available Techniques for Energy Efficiency", 2009.
50. ADEME, "Compressed Air", 2007.
51. Decreto Legislativo 102 [Repubblica Italiana], 4 luglio 2014, disponibile su: <http://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2014/07/18/14G00113/sg> [ultimo accesso 29 Maggio 2016].
52. Sistema Statistico Nazionale, Istituto Nazionale di Statistica, "Classificazione delle attività economiche Ateco 2007, derivata dalla Nace Rev. 2", 2009.
53. T. W. Anderson, D. A. Darling, "Asymptotic theory of certain "goodness-of-fit" criteria based on stochastic processes", *Annals of Mathematics and Statistics* 23 (1952), 193–212.
54. P. B. Crosby, "Quality is free" (1979), McGraw-Hill, New York.
55. V. Introna, "Modelli di maturità a confronto", *Il Project Management* 1 e 2 (2010).
56. M. Kohlegger, R. Maier, S. Thalmann, "Understanding Maturity Models: results of a structured contents analysis", *Proceedings of I-KNOW '09 and I-SEMANTICS '09 2-4 September 2009, Graz, Austria* (2009).
57. Carbon Trust, "CTG054 – Energy Management – A comprehensive guide to controlling energy use" (2011), Great Britain.
58. Osservatorio Italiano sull'Energy Management (2011). Il livello di maturità dell'Energy Management in Italia: [http://energia24club.it/articoli/0,1254,51\\_ART\\_142539,00.htm](http://energia24club.it/articoli/0,1254,51_ART_142539,00.htm)
59. E. Curry, G. Conway, B. Donnellan, C. Sheridan, K. Ellis, "A Maturity Model For Energy Efficiency in Mature Data Centres" (2012), In 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems (SMARTGREENS), Porto, Portugal, p. 263-267.
60. Sustainable Energy Authority of Ireland, Energy Management Maturity Model (EM3): [http://www.seai.ie/News\\_Events/Previous\\_SEAI\\_events/Creating\\_the\\_Right\\_Environment\\_for\\_ISO\\_50001/John%20%20Sullivan.pdf](http://www.seai.ie/News_Events/Previous_SEAI_events/Creating_the_Right_Environment_for_ISO_50001/John%20%20Sullivan.pdf).
61. E. W. T. Ngai, D. C. K. Chau, J. K. L. Poon, "Energy and utility management maturity model for sustainable manufacturing process", *International Journal of Production Economics* 146 (2013), 453-464.
62. B. Jovanovic, J. Filipovic, "ISO 50001 standard-based energy management maturity model – proposal and validation in industry", *International Journal of Cleaner Production* 112 (2016), 2744-2755.
63. International Energy Agency, "Energy Technology Perspectives, Pathways to a Clean Energy System" (2012).
64. C. Y. Yuan, T. Zhang, A. Rangarajan, D. Dornfeld, B. Ziemba, R. Whitbeck, "A decision-based analysis of compressed air usage patterns in automotive manufacturing", *Journal of Manufacturing Systems* 25 (2006), 29-300.
65. G. Valenti, S. Murgia, G. Contaldi, A. Valenti, "Experimental evidence of the thermal effect of lubricating oil Sprayed in sliding-vane air compressors", *Case Studies in Thermal Engineering* 4 (2014), 113-117.
66. G. M. Kopanos, D. P. Xenos, M. Ciccioiti, E. N. Pistikopoulos, N. F. Thornhill, "Optimization of a network of compressors in parallel: Operational and maintenance planning – The air separation plant case", *Applied Energy* 146 (2015), 453-470.
67. N. Stosic, "On heat transfer in screw compressors", *International Journal of Heat and Fluid Flow* 51 (2015), 285-297.
68. G. Bianchi, R. Cipollone, "Friction power modelling and measurements in sliding vane rotary compressors", *Applied Thermal Engineering* 84 (2015), 276-285.
69. Carbon Trust, "Maintenance checklist compressed air", 2000.
70. Carbon Trust, "How to recover heat from a compressed air system", 2000.
71. Carbon Trust, "How to implement leak detection techniques in compressed air", 2000.

## 6 Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il gruppo di ricerca impegnato nel progetto è composto da professori e ricercatori con competenze in molti ambiti dell'ingegneria energetica, con particolare riferimento alla termo-fluidodinamica applicata, ai sistemi innovativi di conversione dell'energia e alla riduzione dei consumi energetici e dell'impatto ambientale dei processi industriali, alla gestione dell'energia e dei servizi industriali. Nell'ambito di queste tematiche, il gruppo ha sviluppato e applicato in diversi contesti una metodologia integrata per l'analisi, la caratterizzazione e il controllo dei consumi energetici al fine di individuare le principali opportunità di efficientamento. L'approccio di simulazione numerica è stato supportato da una continua fase di sperimentazione e di raccolta di dati sul campo al fine di validare le procedure e i benefici delle soluzioni proposte ed implementate. Nella metodologia è compresa la gestione ottimale degli impianti di servizio (condizionamento, acqua, aria compressa) e dei sistemi di autoproduzione di energia elettrica.

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

- Stefano Ubertini, professore associato di macchine e sistemi per l'energia e l'ambiente;
- Vito Introna, ricercatore universitario di impianti meccanici;
- Miriam Benedetti, dottoranda e docente a contratto di impianti meccanici;
- Andrea Facci, ricercatore di macchine e sistemi per l'energia e l'ambiente;