



Ricerca di Sistema elettrico

Efficienza energetica dei sistemi sria compressa: metodologia di benchmarking delle prestazioni e strumento di supporto alle decisioni per l'efficientamento energetico

V. Introna, A. Facci, S. Salvatori, S. Ubertini, M. Villarini



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

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

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

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

Progetto: "Processi e macchinari industriali"

Obiettivo: B3 "Efficienza energetica nella produzione e uso industriale dell'aria compressa"

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
INTRODUZIONE.....	5
1 SVILUPPO DI LINEE GUIDA ASSOCIATE AL LIVELLO DI MATURITÀ DELL'ORGANIZZAZIONE	7
1.1 DEFINIZIONE DI LINEE GUIDA.....	7
1.2 MIGLIORAMENTO DELL'EFFICIENZA ENERGETICA.....	9
1.2.1 <i>Progettazione e riqualificazione</i>	9
1.2.2 <i>Gestione, manutenzione e monitoraggio</i>	9
1.3 METODOLOGIA.....	10
1.4 BEST PRACTICES E LINEE GUIDA.....	11
1.5 CONCLUSIONI.....	21
2 PREDISPOSIZIONE DI UN SET DI INDICATORI PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA ENERGETICA ATTRAVERSO IL BENCHMARKING.....	22
2.1 METODOLOGIA.....	23
2.2 ANALISI DEI DATI.....	25
2.2.1 <i>Analisi statistica</i>	25
2.2.2 <i>Analisi di correlazione e regressione lineare</i>	26
2.3 APPLICAZIONE DELL'ANALISI DEI DATI.....	26
2.3.1 <i>Industria alimentare</i>	26
2.3.2 <i>Fabbricazione di carta e prodotti di carta</i>	29
2.3.3 <i>Metallurgia</i>	30
2.3.4 <i>Fabbricazione di articoli in materie plastiche</i>	32
2.3.5 <i>Fabbricazione di prodotti chimici</i>	34
2.3.6 <i>Fabbricazione di prodotti farmaceutici di base e di preparati farmaceutici</i>	36
2.3.7 <i>Fabbricazione di prodotti in metallo (esclusi macchinari e attrezzature)</i>	38
2.3.8 <i>Fabbricazione di autoveicoli, rimorchi e semirimorchi</i>	40
2.3.9 <i>Industria tessile</i>	42
2.4 PROPOSTA METODOLOGICA.....	44
2.5 DISSEMINAZIONE DEI RISULTATI.....	45
2.6 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	46
3 CONCLUSIONI.....	47
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	48
5 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	51

Sommario

I sistemi di generazione dell'aria compressa sono tra i sistemi più importanti per quanto riguarda il consumo di energia elettrica in ambito industriale.

Sebbene i loro consumi abbiano un'importanza conclamata molto spesso le aziende non considerano importante il ruolo dei sistemi di aria compressa e trascurano la loro gestione e la loro manutenzione.

In letteratura non sono disponibili molti strumenti e metodologie riguardo il benchmark delle prestazioni dei sistemi aria compressa. Lo scopo del progetto è quello di definire una strategia per effettuare un'analisi di benchmark sul settore aria compressa industriale e fornire alle aziende alcuni strumenti per il supporto alle decisioni.

L'attività della presente annualità rappresenta la naturale continuazione di quella riassunta nel report dello scorso anno che ha portato alla definizione di alcuni indici di prestazione, ad una prima metodologia di benchmark ed alla definizione di un questionario di autovalutazione per quanto riguarda la maturità aziendale sulla gestione dei sistemi aria compressa.

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

La prima parte dell'attività ha visto la delineazione di un sistema di linee guida, per il miglioramento dell'efficienza del reparto aria compressa, legato al questionario di maturità e da utilizzare come punto di riferimento per l'attività delle aziende a partire dagli aspetti che il questionario ha evidenziato come più carenti.

La seconda parte dell'attività ha riguardato l'analisi di benchmark del settore utilizzando uno degli indici di performance proposti. I risultati mostrano forti carenze dal punto di vista della qualità dei dati acquisiti che ha reso difficile ed in alcuni casi impossibile il benchmark industriale. Per migliorare questo aspetto sono stati evidenziati alcuni parametri utili alla caratterizzazione delle prestazioni dei sistemi ed è stata proposta una metodologia di misurazione delle prestazioni in grado di migliorare sostanzialmente la qualità dei dati.

Introduzione

Il lavoro presentato in questa relazione è il risultato della seconda annualità di un'attività triennale, che vede la collaborazione tra l'Unità Tecnica Efficienza Energetica dell'ENEA e Università degli studi della Tuscia, ed è mosso dai seguenti obiettivi:

- individuazione indici di benchmark e baseline per settore produttivo;
- definizione di linee guida e buone pratiche per la riduzione dei consumi degli impianti di produzione, trattamento, distribuzione e utilizzo dell'aria compressa;
- 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.

Nella seconda annualità, il gruppo di ricerca ha continuato l'attività iniziata nella fase precedente cercando di continuare all'interno del solco tracciato in passato che vede la stretta collaborazione con le aziende come punto di forza dell'attività.

L'attività, svolta nel corso dell'ultimo anno, si articola nello sviluppo dei punti di seguito elencati:

- sviluppo di linee guida associate al livello di maturità dell'organizzazione (misurato attraverso un modello di maturità sviluppato nel primo anno della ricerca) rivolte ad ottimizzare la gestione delle risorse energetiche per la produzione, la distribuzione e l'uso dell'aria compressa nel singolo settore produttivo.
- predisposizione di un set di indicatori per il monitoraggio e la valutazione dell'efficienza energetica dei singoli impianti attraverso il benchmarking con impianti simili o dello stesso comparto industriale.

Il lavoro ha come obiettivo finale quello di sfruttare le conoscenze acquisite durante i 3 anni per fornire alcuni strumenti utili alle aziende per migliorare la propria posizione per quanto riguarda l'efficienza energetica.

L'attività così organizzata può essere suddivisa in 2 filoni ben distinti.

Nello sviluppo delle due sezioni, definite dai due punti precedentemente descritti, è stato necessario compiere l'analisi della situazione per quanto riguarda lo stato dell'arte attraverso un'attenta ricerca bibliografica.

Per quanto riguarda la prima parte del lavoro ovvero la definizione di un set di linee guida per le aziende che vogliono avviare il percorso di efficientamento energetico del sistema aria compressa il lavoro è stato svolto in due fasi successive.

La prima fase ha visto lo svolgimento di una ampia e attenta ricerca bibliografica per quanto riguarda le best practices per la produzione e l'utilizzo dell'aria compressa. La ricerca ha riguardato pubblicazioni su riviste, atti di convegno e manuali tecnici delle case produttrici.

Dopo aver definito le best practices, queste sono state affiancate alle domande del modello di maturità sviluppato nella precedente annualità e, dove non ce ne fossero di appropriate, sono state elaborate ad hoc. L'ultima parte ha visto il collezionamento di una serie di linee guida da affiancare al modello di maturità. Tali linee consentono di avere una base per le attività di efficientamento e devono essere applicate nei settori in cui l'azienda è più debole dal punto di vista energetico. I punti di forza e di debolezza vengono definiti in base alle risposte al questionario di maturità.

Per quanto riguarda il benchmarking dell'efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa, il set di indicatori già identificato per consentire alle aziende di poter comparare le proprie performance sia per la generazione che per l'utilizzo dell'aria compressa durante la fase precedente, è stato ulteriormente caratterizzato e si è proceduto all'utilizzo degli stessi indicatori per un'analisi di benchmark. I dati utilizzati sono gli stessi e provengono dalla raccolta seguita all'attuazione del D.Lgs. 102/2014 attuata dall'Unità

Tecnica Efficienza Energetica dell'Enea. L'analisi dei dati ha consentito di delineare quali indicatori fossero i più opportuni da utilizzare per un'analisi che fosse la più significativa possibile.

Per l'analisi di benchmark condotta si è deciso di utilizzare soltanto uno degli indicatori descritti del precedente report ossia il rapporto tra il consumo elettrico del reparto aria compressa e la quantità di aria prodotta ($\text{kWh}_e \text{AC}/\text{m}^3 \text{AC}$). Tale rapporto è stato scelto poiché è l'unico valore utilizzato in letteratura per avere un'analisi di benchmark. Per completezza l'indice citato da ADEME, "Compressed Air", 2007 conterrebbe un'ulteriore informazione sulla pressione di generazione dell'aria fissata a 7 bar e indica la quantità di aria in Nm^3 . Per il nostro utilizzo si è scelto di approssimare questi due fattori per avere una prima analisi di massima.

1 Sviluppo di linee guida associate al livello di maturità dell'organizzazione

Secondo alcune stime tra cui quella presente in [1] l'impatto che il settore di generazione e trattamento dell'aria compressa per uso industriale all'interno del settore secondario europeo, per quanto riguarda il consumo energetico, ammonta a circa il 10% del totale di stabilimento con alcuni casi particolarmente significativi in cui si può raggiungere addirittura il 25% del totale. Partendo da questi dati è semplice intuire quanto un programma mirato all'efficientamento dell'intero comparto dell'aria compressa nell'industria italiana sia importante e quanto siano grandi i benefici che ne derivano. Ridurre i consumi energetici porta a due importanti risultati: riduzione dei costi aziendali relativi all'energia, riduzione dell'impatto ambientale dell'azienda.

In letteratura sono presenti decine di documenti che hanno come unico scopo quello di fornire indicazioni sul processo di efficientamento energetico dei processi industriali tra cui [2], [3], ma difficilmente si trovano procedure ben organizzate per la gestione e il miglioramento delle prestazioni dei sistemi di generazione e trasporto dell'aria compressa.

Questa attività di collaborazione tra università della Tuscia ed ENEA vuole portare a compimento nell'arco di tra anni un'attività mirata allo studio, allo sviluppo e alla validazione di strumenti utili alle aziende per efficientare il proprio reparto aria compressa.

L'attività triennale è alla conclusione del secondo anno e continua lungo il solco tracciato durante la prima annualità.

Come già detto, l'attività nel suo sviluppo integrale vuole arrivare a definire una procedura che porti l'azienda, che vuole iniziare il percorso di miglioramento delle prestazioni, attraverso alcuni step intermedi, al raggiungimento dell'efficienza energetica.

Durante il primo anno, i lavori si sono concentrati sull'analisi dei dati raccolti a seguito del D.Lgs 102/2014 ed elaborati da ENEA utili alla definizione di alcuni indici di prestazione energetica e allo sviluppo di un fondamentale strumento per l'assessment autonomo dell'azienda riguardo l'efficienza energetica del settore aria compressa: il modello di maturità.

Lo strumento del modello di maturità è un questionario di autovalutazione grazie al quale l'azienda può definire il proprio obiettivo in termini di efficienza e verificare la propria posizione rispetto al livello sperato. Le domande sono suddivise in 4 dimensioni che indagano rispettivamente su: conoscenza, aspetto metodologico, gestione delle prestazioni e implementazione delle best practices.

Le risposte, chiuse, sono organizzate secondo livelli di maturità crescente che portano a delineare il profilo dell'azienda per quanto riguarda lo sviluppo del sistema aria compressa e della sua gestione.

Durante la seconda annualità, come da programma, sono state delineate le linee guida impiantistiche e gestionali per il miglioramento delle prestazioni energetiche.

Per poter descrivere le linee guida opportune è stata prima effettuata un'attenta analisi bibliografica che ha portato ad uno step intermedio ossia la definizione di una serie di best practices legate ai sistemi aria compressa. Dopo aver definito le best practices il lavoro ha riguardato l'affiancamento delle best practices al questionario del modello di maturità ed in seguito la definizione delle linee guida collegate alle best practices stesse.

In questo modo stato possibile definire una procedura completa che mira all'efficientamento energetico composta di due step: il primo attraverso cui poter misurare la propria maturità riguardo l'efficienza, il secondo attraverso cui ottenere dei suggerimenti utili sulle procedure da adottare per poter innalzare il livello di efficienza al punto considerato come obiettivo.

1.1 Definizione di linee guida

La definizione più nota di Linee Guida è lontana dal settore di applicazione che si prende in considerazione in questo lavoro. La formulazione del "Institute of Medicine" del 1992 definisce le linee guida come

“raccomandazioni sviluppate in modo sistematico per assistere medici e pazienti nelle decisioni sulla gestione appropriata di specifiche condizioni cliniche”.

In un certo senso l’obiettivo del lavoro è lo stesso prefissato dalla definizione del 1992 ossia fornire dei suggerimenti alle aziende in materia di miglioramento dell’efficienza del comparto di produzione, trasporto e utilizzo dell’aria compressa.

Nel gergo comune la linea guida viene spesso confusa con il “protocollo” o con lo “standard”. Nella realtà con il primo termine, soprattutto in ambito medico, si indica uno schema di comportamento predefinito descritto da una rigida sequenza di comportamenti. È una vera e propria checklist dove si formalizza la sequenza delle azioni che debbono essere fatte per conseguire l’obiettivo dato. Con il termine standard, invece, si fa riferimento a quei valori espressi da un indicatore con cui si definisce il livello di un servizio nel suo funzionamento nominale.

Una linea guida deve essere vista come un aiuto, una strada da seguire nel momento in cui l’azienda si trova nella circostanza di dover prendere una decisione, in ambito non necessariamente energetico, che porti ad un livello di sviluppo di una procedura maggiore rispetto a quello di partenza.

In questo lavoro sono state sviluppate alcune linee guida per il processo di miglioramento dell’efficienza energetica per quanto riguarda un determinato sistema all’interno dell’industria, tuttavia la letteratura tecnica è ricca di esempi di linee guida confezionate per un determinato aspetto del comparto industriale come ad esempio [4]–[6]. Una linea guida deve essere un valido supporto per le decisioni da prendere ma deve lasciare libertà di azione all’utilizzatore, non deve essere una checklist di pratiche tecniche da attuare ma deve soltanto delineare la direzione che l’azienda deve prendere.

Le linee guida hanno riscosso un discreto successo negli ultimi anni per via della sempre maggiore diffusione delle politiche di efficientamento e di crescita continua dell’azienda; queste rappresentano una sintesi delle informazioni scientifiche disponibili e hanno come obiettivo quello di portare l’azienda al raggiungimento del livello definito dalle best practices.

Una delle caratteristiche fondamentali delle linee guida è la promozione del concetto di miglioramento continuo; con questo concetto si stimola l’azienda a non pensare soltanto al raggiungimento di un livello di prestazione elevato, in qualsiasi ambito considerato, ma anche a continuare nello sviluppo e nella ricerca di obiettivi di livello sempre crescente. Con questa strategia qualsiasi aspetto aziendale può essere migliorato e tutti i componenti possono contribuire al processo. Nelle linee guida sviluppate non si affrontano soltanto aspetti tecnici ma anche riguardanti le condizioni di lavoro ed i rapporti interpersonali.

La stesura di un set di linee guida è un’attività molto importante e ha come requisito fondamentale la piena conoscenza del sistema, delle relative peculiarità e delle sue problematiche

Il processo di sviluppo di una linea guida è di cruciale importanza poiché ogni raccomandazione deve essere messa in relazione con il livello di prestazione ricercato, con il settore in cui si vuole inserire e soprattutto deve avere i presupposti per essere di effettiva applicabilità. Ogni indicazione deve effettivamente poter essere trasferita all’azienda ed essere adottata nella pratica comune. L’aspetto fondamentale è che le linee guida devono poter essere seguite da chiunque e non essere esclusive per un solo livello di sviluppo.

Dal punto di vista aziendale, l’attuazione delle linee guida è un processo che ha bisogno di alcuni requisiti. In primo luogo la direzione e il personale devono conoscere, anche se negli aspetti generali e concettuali di massima, cosa siano le linee guida, a cosa servono e quali siano le metodologie per la produzione e valutazione delle stesse in ambito locale, nazionale ed internazionale. Lo sviluppo più interessante dell’applicazione delle linee guida è il progressivo miglioramento dell’azienda in materia di efficienza energetica e ciò potrebbe portarla a sviluppare un sistema di gestione dell’energia conforme ai requisiti della norma ISO 50001. Come già descritto, la linea guida è un’indicazione di massima e pertanto ha l’obiettivo di essere promotrice di raccomandazioni validate e riproducibili. Per questo motivo il lavoro di stesura delle linee guida è partito da una raccolta di best practices presenti in letteratura tecnica. Il fatto che le best practices siano descritte in manuali e articoli scientifici è indice di facile applicabilità delle procedure.

Per ogni best practice raccolta è stata definita una linea guida affine che se seguita in maniera rigorosa, e in base al proprio livello di sviluppo può facilitare l'azienda a raggiungere il livello di efficienza desiderato nel medio termine.

Le best practices sono quindi un obiettivo da raggiungere e che deve spingere l'azienda a continui miglioramenti.

1.2 Miglioramento dell'efficienza energetica

L'efficienza energetica è riassumibile in maniera semplificata nel concetto "fare di più utilizzando meno" che nel caso dei sistemi per la generazione, il trattamento e la distribuzione dell'aria compressa per usi industriali significa produrre l'aria strettamente necessaria alla produzione, nelle condizioni ottimali per l'utilizzo, utilizzando il quantitativo di energia più basso possibile. Il miglioramento dell'efficienza energetica di un impianto aria compressa richiede pertanto di agire su più fronti:

- il fronte tecnologico, relativo alla progettazione e riqualificazione dell'impianto;
- il fronte gestionale, relativo alle modalità di utilizzo, manutenzione e monitoraggio dell'impianto.

Solo un approccio integrato su questi due fronti è in grado di garantire un percorso efficace, vale a dire in grado di garantire il raggiungimento di un elevato livello delle prestazioni energetiche, ed efficiente, quindi tale da assicurare il raggiungimento degli obiettivi con il minimo utilizzo di risorse possibili. È bene precisare inoltre che mentre l'azione sul fronte tecnologico richiede spesso investimenti economici in grado di consentire miglioramenti sostanziali ("a gradino"), il fronte gestionale spesso non richiede investimenti economici ma di tempo delle persone, richiesto per una accurata conoscenza del funzionamento dell'impianto ed una periodica dedizione alle azioni richieste per migliorarne al massimo dell'efficienza e mantenere nel tempo i risultati ottenuti (miglioramento "continuo").

1.2.1 Progettazione e riqualificazione

La fase di progettazione di un nuovo impianto di generazione di aria compressa o la riqualificazione di uno già esistente sono attività particolarmente importanti per l'azienda poiché possono portare, a fronte di limitati oneri economici, a grandi possibilità di miglioramento dell'efficienza.

Durante la fase di progettazione bisogna considerare l'adozione di alcune soluzioni tecniche piuttosto che di altre: ad esempio va attentamente valutata la tipologia e il numero di compressori da installare come anche la tipologia e la taglia dei sistemi di essiccazione.

Un ulteriore aspetto molto importante è quello tecnologico: tutti i componenti che costituiscono un sistema di generazione di aria compressa sono soggetti a evoluzione e innovazione continua. Il mercato mette a disposizione tecnologie altamente innovative come ad esempio i compressori ad alta efficienza dotati di cuscinetti a levitazione magnetica e alcune ormai affermate come gli inverter utili alla regolazione della velocità dei compressori.

La fase di riqualificazione riguarda gli impianti già esistenti che devono essere modificati in funzione di un cambiamento tra gli utilizzatori o dei sistemi di gestione. Molto spesso, per anni, i sistemi di generazione e soprattutto le reti di distribuzione non vengono mai modificati o rinnovati neanche di fronte ai cambiamenti delle esigenze, questo aspetto può portare a grandi perdite di efficienza energetica che devono essere eliminate in fase di riqualificazione dei sistemi.

1.2.2 Gestione, manutenzione e monitoraggio

L'aspetto gestionale è fondamentale per l'efficienza energetica. L'azienda che vuole intraprendere un percorso che porta all'efficientamento energetico deve necessariamente disporre di un sistema, ben collaudato dal punto di vista gestionale, che abbia come obiettivo la diffusione delle conoscenze e delle pratiche fondamentali per la crescita aziendale. L'insieme delle competenze tecniche e tecnologiche che rappresenta l'apice per lo sviluppo al momento possono essere descritte con i termini tecnici di Best Practices (BP), Best Available Techniques e Best Available Technologies (BAT). Queste tecniche vengono

considerate le migliori poiché la loro applicazione ha portato all'ottenimento dei migliori risultati in uno specifico ambito di utilizzo.

La direzione aziendale deve quindi proporre ai livelli più bassi un sistema ben articolato di strumenti e tecniche di ambito manutentivo-gestionale mirate. Gli strumenti gestionali disponibili vanno dalla semplice agenda della manutenzione all'implementazione di software gestionali complessi.

Il livello di prestazione raggiunto, nella maggior parte dei casi, dipende dall'impegno profuso dai vertici dell'azienda nell'incentivare le BP e BAT.

1.3 Metodologia

L'intero progetto è indirizzato a sviluppare strumenti e metodologie utili per accrescere il livello di efficienza energetica per il settore di generazione dell'aria compressa ad uso industriale.

L'attività vuole fornire un metodo che serva come guida per l'azienda attraverso un percorso di implementazione delle linee guida di vario tipo adattate sul proprio livello di maturità.

Per raggiungere questo obiettivo durante il primo anno è stato sviluppato un modello di maturità sotto forma di questionario di autovalutazione con risposte chiuse a livello di maturità crescente e durante la successiva fase di progetto, è stata definita una serie di linee guida relativa a gran parte degli aspetti della produzione di aria compressa. Nell'ultima annualità di progetto verranno sviluppati degli strumenti di supporto per l'implementazione delle linee guida.

Le linee guida vengono modellate sulla base del livello di maturità raggiunto e sono in grado di definire alcune attività di rilievo che possono portare al miglioramento dell'efficienza energetica.

Per semplicità di analisi dei dati le domande del questionario sono state raggruppate in 4 macro aree dipendenti dal settore di interesse.

Le domande sono quindi organizzate secondo le seguenti dimensioni:

- consapevolezza, conoscenza e competenza;
- approccio metodologico;
- gestione delle prestazioni energetiche;
- implementazione Best Practices e adozione BAT.

L'aspetto della "Consapevolezza, conoscenza e competenza" rappresenta una dimensione basilare dell'efficienza energetica del Sistema Aria Compressa e, in generale, della Gestione dell'Energia.

Questa dimensione raccoglie: la consapevolezza del personale dell'importanza del tema dell'efficienza energetica, le conoscenze tecniche e gestionali utili alla prevenzione, alla risoluzione dei problemi e all'individuazione delle soluzioni migliori attraverso l'individuazione e l'uso delle Best Practices.

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 [7]: riduzione occasionale, riduzione sistematica, riduzione sistematica e continua dei consumi.

La gestione delle prestazioni energetiche è un aspetto fondamentale che deve essere imprescindibile da un efficiente sistema di misurazione delle prestazioni. La modalità di gestione deve essere decisa con cura dopo attente valutazioni dei costi e dei benefici. Avere un complesso sistema di monitoraggio potrebbe innalzare i costi per le necessarie apparecchiature ed inoltre richiedere la formazione di personale che gestisca i sistemi e ponga degli obiettivi da raggiungere. Il personale deve essere coordinato e deve garantire la comunicazione tra i vari reparti così da creare una sinergia che aiuti la crescita dell'azienda.

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.

Non si fa riferimento esplicito a una pratica piuttosto che ad un'altra per via della variabilità della singolarità dei casi relativi ad ogni caso aziendale. 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.

Un modello sviluppato in questo modo comprende tutti gli aspetti relativi alla progettazione, alla gestione del sistema aria compressa nonché tutti gli aspetti relativi all'organizzazione interna per quanto riguarda le politiche aziendali e lo sviluppo dell'efficientamento energetico.

Il risultato del lavoro è un questionario di 34 domande suddivise su 4 dimensioni, precedentemente descritte, e su 4 livelli (da 2 a 5) in base alla maturità dell'azienda. La divisione delle domande secondo le dimensioni analizzate ed il livello di maturità sono raccolte nella tabella 1.

Tabella 1 - Descrizione del numero di domande per ogni dimensione (colonne) e per ogni livello di maturità (righe)

	Dimensione 1	Dimensione 2	Dimensione 3	Dimensione 4	Tot. per livello
Livello 2	2	1	3	3	9
Livello 3	2	2	4	4	12
Livello 4	1	1	3	3	8
Livello 5	1	1	2	1	5
Tot. per dimensione	6	5	12	11	

L'utilizzo, da parte delle aziende, consente di avere una valutazione del livello di maturità del settore aria compressa in maniera del tutto autonoma e senza nessun condizionamento nella scelta della risposta.

L'azienda a partire dal risultato del questionario può attestare il proprio livello rispetto a quello che poteva essere definito come il livello auspicato nel medio periodo.

Dall'analisi dei risultati può essere definita una strategia di intervento basata sulle best practices e sulle linee guida sviluppate durante il lavoro.

1.4 Best practices e linee guida

Come sappiamo le best practices rappresentano l'insieme delle procedure, comportamenti, abitudini ecc. che, prese come riferimento e riprodotte per favorire il raggiungimento dei risultati migliori in ambito aziendale, ingegneristico e così via. [8]

L'espressione, coniata per l'ambito manageriale, si riferisce alle tecniche che si rivelavano in grado di ottenere i migliori risultati e che, potenzialmente possono costituire un sistema di regole da rispettare per rendere più efficiente le modalità produttive.

Considerato quindi l'interesse che, storicamente, le best practices hanno ricoperto nella gestione aziendale è stato considerato molto importante di sviluppare un sistema di pratiche legate alla generazione dell'aria compressa che possa essere di aiuto nello sviluppo delle attività aziendali mirate all'efficientamento energetico. Le best practices raccolte sono state in parte trovate attraverso la ricerca bibliografica specifica sul settore aria compressa, in parte mutate da altri settori ed in parte sviluppate secondo le conoscenze acquisite.

Il lavoro ha visto come primo passo la ricerca bibliografica delle pratiche e le consuetudini che possono essere considerate *migliori pratiche* per quanto riguarda il settore della generazione e il trattamento dell'aria compressa. La ricerca è stata condotta su articoli scientifici, pubblicazioni di convegni, tesi di laurea, manuali tecnici ecc. Dalla ricerca sono state estrapolate numerose pratiche che riguardano molti aspetti del comparto quali: generazione, manutenzione, trasporto, filtraggio, gestione ecc. Nella tabella 2 sono raccolte tutte le best practices individuate.

Tabella 2 - Best practices individuate

#	Best practices	#	Best practices
1	Audit energetico [9]	2	Utilizzo di motori elettrici ad alta efficienza [9]
3	Motori elettrici con possibilità di variazione della velocità [9]–[11]	4	Azioni di prevenzione delle perdite di aria compressa [9], [12]–[16]
5	Utilizzo di aria fresca esterna [9], [10], [15]	6	Diminuzione delle cadute di pressione lungo la linea di distribuzione [9], [10], [15]
7	Recupero di calore di scarto dai compressori e dagli essiccatori [9]	8	Efficientamento degli ugelli [9], [16]
9	Acquisto e utilizzo di compressori a configurazione variabile [9]	10	Mantenimento della pulizia del compressore e delle superfici di raffreddamento [9]
11	Diminuzione di emissioni [9]	12	Utilizzo di software per la stima dell'efficientamento dovuto a modifiche del sistema [9]
13	Riduzione o eliminazione degli usi inappropriati [10], [12], [15], [17]	14	Gestione delle domande di picco [12]
15	Minimizzazione della pressione di generazione [12], [14]–[16]	16	Riduzione delle inefficienze della distribuzione [12]
17	Utilizzo di serbatoi e sistemi di controllo automatico per anticipare i picchi di domanda [14]	18	Valutazione delle alternative all'uso dell'aria compressa [14], [15]
19	Valutazione del coefficiente di utilizzazione dei compressori [14], [18]	20	Valutazione del coefficiente di contemporaneità dei compressori [14], [18]
21	Valutazione dell'adeguatezza delle apparecchiature utilizzate per controllare il flusso e il trasporto dell'aria compressa [14], [18]	22	Spegnere l'alimentazione dell'aria compressa in un processo quando non è in funzione [14]
23	Determinare il costo dell'aria compressa per ogni macchina o processo [14]	24	Seguire l'applicazione delle raccomandazioni precedenti con una revisione del numero di compressori in funzione e delle loro impostazioni di controllo in modo da realizzare una corrispondente riduzione di energia [14]
25	Assicurarsi che il personale addetto al reparto di generazione dell'aria compressa sia coinvolto nelle decisioni relative all'utilizzo di processi e di fine utilizzo [14]	26	Creazione di un profilo di pressione del sistema, utilizzando le letture di pressione nei punti chiave in tutto il sistema [14]
27	Controllo del flusso medio [15]	28	Controllo della qualità dell'aria (punto di rugiada di pressione per l'umidità, limiti di concentrazione per sporcizia e olio) [15], [25]
29	Controllo del consumo energetico del compressore [24]	30	Definizione del profilo di carico dell'impianto [15], [16]
31	Controllo degli strumenti che ricevono aria compressa [24]	32	Manutenzione di separatori, filtri, essiccatori e valvole [24]
33	Selezione della tipologia di compressori più adatta [24]	34	Misurazione dei miglioramenti [24]
35	Fare un bilancio dell'aria compressa e utilizzata [25]	36	Miglioramento della misurazione e della registrazione dei dati [25],[10]
37	Ottimizzazione del reparto dell'aria compressa in base alla richiesta [25]	38	Ottimizzazione della rete di distribuzione [10]

39	Utilizzo livelli di pressione multipli [10]	40	Installazione dell'economizzatore di calore [10]
41	Sostituzione dei compressori più usati con nuove e migliori macchine [10]	42	Posizionamento dei serbatoi vicino alle macchine con grandi variazioni di richieste d'aria [10]
43	Rimozione dell'umidità attraverso essiccatori di tipologia e grandezza adeguati [19]	44	Rimozione della condensa evitando perdite di aria compressa [19]
45	Controllo della temperatura dell'aria [17], [20]	46	Istituzione di un'agenda della manutenzione [26]
47	Monitoraggio dell'eventuale diminuzione delle prestazioni del compressore dovute al deterioramento degli organi meccanici [21]	48	Controllo delle cinghie di trasmissione (se previste)[22]
49	Creazione di una struttura organizzativa per implementare la strategia [23]	50	Allocazione di risorse per raggiungere obiettivi strategici [23]
51	Galvanizzazione dell'attuazione della strategia scelta [23]	52	Istituzione di un sistema amministrativo interno per il sostegno [23]
53	Designazione di una leadership strategica [23]	54	Ottimizzazione della raccordatura della rete [24]
55	Diffusione della consapevolezza dell'importanza dell'efficientamento energetico	56	Diffusione della conoscenza degli strumenti di analisi
57	Istituzione di un registro formale delle opportunità	58	Valorizzazione della comunicazione interna
59	Individuazione ed adozione delle BAT	60	Formazione continua
61	Previsione dei consumi		

Le best practices così raccolte possono essere un valido aiuto per la definizione di un obiettivo a breve o a medio termine ma non sono del tutto utilizzabili come informazione per un'azienda che vuole organizzare un piano di lavoro mirato al miglioramento delle prestazioni energetiche. Le dinamiche aziendali sono complesse e non certo di immediata gestione per questo motivo una serie di best practices non è sufficiente a supportare l'azienda nel processo di efficientamento, c'è la necessità di uno strumento più potente quali possono essere le linee guida. Per questa serie di motivi, le best practices sono servite al lavoro come il punto di partenza per l'avvio di una ricerca bibliografica di alcune linee guida utili per il miglioramento dell'efficienza energetica del settore.

Seguire in maniera rigorosa le linee guida può aiutare l'azienda a delineare una strategia di crescita, nella maggior parte dei casi a basso costo, mirata al raggiungimento dell'efficienza.

Le linee guida non sono obbligatorie da seguire per avere i risultati sperati ma possono essere utili indicazioni di massima per convogliare gli sforzi verso un'unica direzione indicata dalle stesse.

Per poter sviluppare un insieme di linee guida utile per l'azienda e coerente con l'obiettivo fissato, si è pensato di affiancare il sistema all'insieme di best practices appena descritte, in maniera tale da fornire maggiori informazioni per quanto riguarda il loro raggiungimento.

Tale lavoro ha come obiettivo quello di diventare un indicatore di carattere generale per qualsiasi azienda voglia incrementare il proprio livello di maturità in uno degli aspetti individuati dalla relativa dimensione del questionario.

L'applicazione delle linee guida non è sempre facile per via della loro varietà e per il largo range di interesse. Per un'azienda non è pensabile cercare di attuare contemporaneamente tutte le best practices definite e arrivare in poco tempo all'efficienza energetica. Il processo di efficientamento energetico è, solitamente, abbastanza lungo, può essere fonte di costi notevoli e, come già detto, deve coinvolgere ogni singolo settore aziendale.

Per questa motivazione è stata proposta una metodologia per gradi che vede dapprima la somministrazione del questionario di maturità e in seguito il suggerimento dell'applicazione delle linee guida.

Come già detto, il questionario serve a fornire all'azienda informazioni sulla sua maturità, intesa come livello di sviluppo, per quanto riguarda le varie pratiche di gestione dei sistemi aria compressa. La procedura prevede, dall'analisi delle risposte, l'individuazione di quali siano gli aspetti in cui l'azienda ha un maggior livello di sviluppo e quali in cui, invece, è più carente.

Partendo proprio da quest'ultimo caso si individua dove sia possibile intervenire e quale sia il livello che sia possibile raggiungere in breve tempo. La proposta di applicazione di una o più best practices, unita alla proposta di alcune linee guida può aiutare l'azienda a raggiungere nel medio periodo il risultato desiderato. Si ricorda che le linee guida sono indicazioni di ampio spettro che non sempre comprendono pratiche particolarmente onerose per l'azienda; molto spesso l'applicazione di una best practice è del tutto gratuita e potrebbe portare ad ingenti risparmi in termini energetici.

Nell'elenco seguente sono state riportate soltanto le domande di aspetto gestionale e organizzativo.

Domanda: 02:02 - Riguardo l'atteggiamento dell'organizzazione nei confronti delle opportunità di efficientamento energetico è possibile affermare che:

Best Practice: 1, 34

Linee guida:

- L'azienda dovrebbe rendere sistematica la ricerca delle opportunità di miglioramento delle prestazioni energetiche, informando i fornitori dell'interesse per soluzioni ad alta efficienza o includendo sistematicamente nelle specifiche tecniche degli acquisiti requisiti relativi all'efficienza energetica (norma ISO 50001)
- L'azienda dovrebbe effettuare una adeguata valutazione economica di tutte le opportunità attraverso metodi quali il tempo di ritorno nel caso di potenziali interventi di modifica dell'impianto e utilizzare il metodo del Life Cycle Cost analysis per la valutazione dei nuovi acquisti (ad es. compressori, filtri, ecc)

Domanda: 02:03 - Relativamente alla raccolta dei dati relativi ai costi e ai consumi dell'impianto aria compressa è possibile affermare che:

Best Practice: 36

Linee guida:

- L'azienda dovrebbe considerare i vantaggi derivanti dal miglioramento del sistema di misurazione. Sarebbe opportuno installare almeno un sistema di misurazione continua dei consumi del reparto aria compressa e della portata d'aria elaborata. Nel caso l'installazione in cui sia troppo dispendiosa o tecnicamente impossibile, l'azienda potrebbe pensare di usare provvisoriamente i misuratori di flusso e amperometri portatili per monitorare la produzione di aria compressa ed il suo utilizzo soltanto durante determinati periodi. La misurazione continua o periodica consente di avere un quadro della situazione migliore di quello delineato attraverso l'analisi dei consumi derivata dalle fatture del servizio elettrico.

Domanda: 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:

Best Practice: 49

Linee guida:

- La direzione aziendale dovrebbe creare una struttura orientata all'implementazione della strategia. In questo modo ad ogni livello aziendale possono essere proposte continue attività di formazione tecnica per quanto riguarda le misure di efficientamento energetico del reparto aria compressa. Tutto il personale dovrebbe essere costantemente formato sulle possibilità di efficientamento del sistema di generazione dell'aria compressa attraverso tutti gli strumenti disponibili (corsi, incontri, materiale cartaceo ecc.). Tutti gli aspetti riguardanti il settore dovrebbero essere curati nel dettaglio, dalla progettazione alla manutenzione, dalla gestione al rinnovo delle apparecchiature.

Domanda: 02:06 - Il responsabile per l'efficienza energetica dell'impianto aria compressa:

Best Practice: 53

Linee guida:

- L'azienda dovrebbe operare per la formazione e la nomina di un responsabile per l'efficienza energetica, ciò comporterebbe un forte impatto positivo sui consumi dell'azienda. Il responsabile dovrebbe operare in favore del processo di efficientamento e la sua azione dovrebbe essere presa in considerazione dalla dirigenza e avere un forte impatto sull'azienda. L'assenza di una figura di riferimento può portare l'azienda a prendere decisioni sbagliate o a concentrare i propri sforzi su verso una strategia che non porta i risultati sperati. Laddove le dimensioni del sito produttivo lo richiedano sarebbe opportuno individuare responsabilità specifiche relativamente alle prestazioni energetiche del sistema di produzione dell'aria compressa (energia elettrica utilizzata a fronte della quantità di aria compressa fornita agli utilizzatori) e all'utilizzo dell'aria nei reparti di produzione (quantità di aria utilizzata rispetto ai volumi di produzione).

Domanda: 03:01 - Il personale dell'azienda (ed in particolare quello coinvolto nella gestione dell'impianto aria compressa):

Best Practice: 55

Linee guida:

- I livelli aziendali più alti dovrebbero diffondere, in ogni livello, la consapevolezza dell'importanza dell'efficienza energetica. L'efficienza deve essere un obiettivo perseguito in ogni aspetto aziendale sia in quello produttivo sia nella generazione dei servomezzi. L'impatto dei consumi per l'aria compressa può essere diminuito in ogni aspetto: in fase di progettazione, in fase di utilizzo e durante la manutenzione. Tutti dovrebbero poter essere in grado di valutare e proporre nuove idee che possono incrementare l'efficienza. Per avvalorare il lavoro il personale potrebbe mostrare gli effetti dell'efficientamento energetico attraverso tabelle, grafici e resoconti periodici.

Domanda: 03:05 - Livello delle conoscenze gestionali (valutazione economico-finanziaria di progetti energetici, audit energetici, metodi e strumenti)

Best Practice: 56

Linee guida:

- Il personale aziendale, dedito al miglioramento delle prestazioni energetiche, dovrebbe essere formato per quanto riguarda gli strumenti gestionali per il miglioramento delle prestazioni energetiche tra i quali: valutazione economico-finanziaria di progetti energetici (stima dei costi di impianto e di esercizio, calcolo ammortamenti, tempi di ritorno ed altri indicatori economico-finanziari utili), analisi dei dati di consumo (strumenti statistici per l'analisi dei dati storici, la definizione di baseline, l'individuazione di anomalie di comportamento, ecc.), diagnosi energetiche (modalità di organizzazione di una diagnosi, servizi energetici offerti dalle Esco, ecc.).

Domanda: 03:06 - Registro delle opportunità di risparmio energetico:

Best Practice: 57

Linee guida:

- L'azienda dovrebbe disporre di un registro formale che raccoglie le opportunità di efficientamento individuate dopo aver condotto campagne di sopralluoghi e audit energetici. Il registro può essere compilato da chiunque noti un'opportunità di risparmio. Oltre alle opportunità, nel registro, dovrebbero essere annotate anche valutazioni sommarie sull'impatto economico dell'intervento e disposizioni per le attività future.

Domanda: 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.):

Best Practice: 24, 25, 29

Linee guida:

- I cambiamenti nei processi, nelle condizioni operative e nell'utilizzo finale dell'aria compressa possono causare forti impatti sulle prestazioni energetiche dell'impianto aria compressa. L'azienda dovrebbe valutare attentamente quali parametri di funzionamento potrebbe essere opportuno misurare (ad es. volumi di aria compressa prodotti/utilizzati, pressioni di lavoro, condizioni ambientali, volumi produttivi o ore di lavoro dei reparti/macchinari che utilizzano l'aria compressa, ecc.), a quale livello di dettaglio (ad es. singolo compressore/singolo macchinario o intero reparto) e con quale frequenza analizzarli (mensile, settimanale, giornaliera... fino al quarto d'ora). Un sistema di misura adeguato alle necessità dovrebbe consentire di valutare le prestazioni energetiche dell'impianto e dei sotto-impianti che si intende monitorare al di là dei cambiamenti naturali delle condizioni al contorno, permettendo di distinguere ed intercettare inefficienze e sprechi, anche temporanei, consentendo di ottenere anche saving significativi (si pensi ad esempio ad un aumento non giustificato della pressione di lavoro, utenze significative che vengono lasciate assorbire aria quando dovrebbero essere spente, interventi di manutenzione errati, ecc.). Inoltre un'adeguata misura dei fattori che influenzano i consumi renderà possibile anche il successivo sviluppo di baseline dei consumi e sistemi di controllo in tempo reale delle prestazioni del sistema consentendo di individuare tempestivamente anche gli sprechi meno evidenti.

Domanda: 03:09 - Per quanto riguarda le analisi che vengono condotte sui dati raccolti relativi agli aspetti di consumo energetico è possibile affermare che:

Best Practice: 34, 36

Linee guida:

- La disponibilità dei dati relativi ai fattori in grado di influenzare i consumi consente all'azienda di misurare le prestazioni energetiche del sistema valutando se i consumi energetici misurati sono giustificati dalle condizioni operative. Tale operazione può essere eseguita a livello di intero sistema (rapportando ad esempio i kWh assorbiti dall'impianto di produzione dell'aria compressa ai volumi prodotti dall'impianto) o di sottosistemi (rapportando ad esempio il consumo di energia elettrica dei compressori ai volumi di aria compressa, per l'intero gruppo o il singolo compressore, e rapportando il volume di aria compressa utilizzato ai volumi di produzione realizzati dall'intero sito produttivo o dal singolo reparto). L'analisi può essere resa più efficace sviluppando baseline attraverso modelli statistici ottenuti tramite regressione lineare, in tal modo infatti l'analisi riesce a tenere conto degli inevitabili effetti scala che si registrano al variare delle condizioni operative (ad es. volumi di aria). L'utilizzo di questo approccio in maniera continuativa nel tempo consente di definire le prestazioni energetiche standard e di individuare tempestivamente deviazioni di comportamento del sistema dovute ad inefficienze di varia natura (regole di accensione, guasti che

ancora non hanno determinato l'avaria del sistema, perdite di aria, modifiche di impianto, ecc.) e di valutare in maniera precisa il loro impatto in termini di consumi energetici aggiuntivi consentendo quindi di poter stabilire le modalità e i tempi di intervento più convenienti.

Domanda: 03:10 - Per quanto riguarda la verifica della corretta progettazione del sistema e dei suoi elementi:

Best Practice: 2, 21, 28, 24

Linee guida:

- L'azienda dovrebbe verificare che le scelte impiantistiche effettuate in fase di progettazione siano ancora attuali in termini di fabbisogni e di tecnologie. Al di là del naturale sviluppo tecnologico che rende disponibili compressori e altri componenti di impianto (filtri, essiccatori, ecc.) in grado di assicurare prestazioni energetiche sempre migliori (motori ad alta efficienza, inverter, cuscinetti a levitazione magnetica, ecc.) bisogna tener presente che le necessità di un sito industriale possono variare notevolmente nel ciclo di vita di un impianto aria compressa. Le scelte effettuate al momento della progettazione possono quindi risultare penalizzanti ad esempio in termini di capacità di modulazione, dimensione dei compressori, diametri delle tubazioni, pressione di erogazione e di utilizzo dell'aria, ecc. Le modifiche impiantistiche richiedono in genere investimenti che possono anche essere significativi ma spesso hanno dei tempi di ritorno compatibili con le strategie aziendali. Si tenga ad esempio presente che il costo di acquisto di un compressore rappresenta in genere meno del 10% del costo nel ciclo di vita determinato dal compressore stesso, risultando i costi energetici superiori all'80%.
- I parametri da controllare in termini di qualità dell'aria sono il punto di rugiada per quanto riguarda la presenza di umidità, e la concentrazione di particelle quali pulviscolo o olio. A seconda delle necessità si possono avere tutte le apparecchiature che necessitano della stessa qualità dell'aria o anche di requisiti meno stringenti che portano a minori trattamenti e minori costi per la generazione di aria compressa. Queste differenze dovrebbero essere considerate in fase di progettazione dei sistemi unitamente al piano di manutenzione. Occorre valutare l'entità dei trattamenti dell'aria poiché un livello eccessivo di pulizia per l'aria porta a perdite di carico eccessive dovute al passaggio dell'aria attraverso filtri ed essiccatori. L'azienda dovrebbe quindi valutare le varie tipologie di applicazioni ed il livello di qualità dell'aria richiesto, nel caso di utilizzi molto differenti potrebbe essere efficiente dotarsi di due circuiti differenti con diversi tipi di trattamento.
- In ottica di risparmio energetico è opportuno che l'azienda riveda se il numero di compressori attivi è corretto per il livello di servizio richiesto. Per un buon funzionamento esente da sprechi energetici sarebbe opportuno rivedere anche il posizionamento dei compressori e la configurazione dell'impianto.

Domanda: 03:11 - Comunicazione interna:

Best Practice: 58

Linee guida:

- L'azienda dovrebbe promuovere la comunicazione interna tra i vari livelli per quanto riguarda il processo di efficientamento energetico. Dovrebbe valorizzare lo scambio anche informale di informazioni tra i responsabili dell'efficienza energetica dei vari settori e di tutti i livelli. Lo scambio di informazioni può avvenire attraverso incontri periodici in cui possono essere discusse formalmente, o in maniera informale, le diverse strategie per l'efficientamento dei vari sistemi. Gli incontri devono avvenire con scadenze regolari e a ogni incontro devono essere proposte misure di efficientamento dei settori così da poter essere discusse ed estese agli altri reparti aziendali. A titolo di esempio difficoltà o assenza di comunicazione tra il personale addetto alla valutazione dei

dati di consumo e responsabile della riduzione dei consumi ed il personale addetto alla produzione preclude la possibilità di agire su molti tipi di sprechi e di individuare interventi generalmente molto remunerativi (sprechi evitati attraverso modifiche comportamentali e quindi a costo quasi zero). Solo una periodica comunicazione tra le parti consente di individuare e di agire tempestivamente sugli sprechi avendo modo di verificare l'entità dei risparmi ottenuti e quindi favorire lo sviluppo della consapevolezza aziendale relativamente alle opportunità di risparmio energetico.

Domanda: 03:12 - Per quanto riguarda l'adozione di sistemi di controllo automatico per la modulazione:

Best Practice: 3

Linee guida:

- Molti sistemi ad aria compressa sono progettati per funzionare a condizioni di carico massimo. L'azienda in fase di progettazione o in fase di rinnovo del reparto dovrebbe valutare il profilo di utilizzo dei compressori e valutare l'introduzione di compressori a velocità variabile dotati di inverter. L'efficienza del sistema può essere migliorata variando la loro capacità per soddisfare i requisiti di carico effettivo, occorre comunque considerare che un motore dotato di inverter ha un carico di base non nullo e che il rendimento non è massimo per ogni condizione di carico. Nel caso in cui il carico non fosse totalmente parzializzabile la gestione della produzione di aria compressa può essere ottimizzata anche grazie all'utilizzo di centraline comandate da appositi software in grado di gestire autonomamente l'accensione e lo spegnimento dei vari compressori del reparto. Una gestione di questo tipo porta a spegnimento dei compressori in caso di non utilizzo e conseguente limitazione della potenza assorbita.

Domanda: 04:01 - Relativamente al coinvolgimento del personale nel processo di efficientamento energetico dell'impianto:

Best Practice: 51

Linee guida:

- La direzione aziendale dovrebbe fornire la giusta motivazione alle unità organizzative ed ai singoli individui per raggiungere l'efficienza energetica. Dovrebbero essere create delle condizioni di lavoro in cui il personale sia spinto a sostenere la strategia e sia coinvolto nell'attuazione della stessa. Il raggiungimento di buoni risultati deve essere un obiettivo continuamente ricercato da tutti i livelli aziendali e deve essere favorito dall'azienda. Il conseguimento dei risultati sperati deve essere opportunamente ricompensato dall'azienda.
- Dovrebbe essere predisposto un sistema che consenta a chiunque all'interno dell'azienda di segnalare un'opportunità di risparmio energetico o proporre un intervento in grado di migliorare le prestazioni energetiche dell'azienda. Il personale responsabile della conduzione e della manutenzione degli impianti, ad esempio, se opportunamente coinvolto può fornire spunti decisamente interessanti. Questo tipo di approccio favorisce inoltre lo sviluppo della sensibilità energetica a tutti i livelli dell'organizzazione.

Domanda: 04:02 - Definizione di specifiche tecniche di efficienza energetica per la progettazione e riprogettazione d'impianto o dei suoi componenti:

Best Practice: 59

Linee guida:

- L'azienda dovrebbe promuovere la ricerca e l'applicazione delle Best Available Technologies. In fase di progettazione o riprogettazione degli impianti, l'azienda dovrebbe essere già consapevole delle BAT

e dovrebbe applicarle a tappeto su tutta la procedura. Nel caso in cui la ricerca individui una BAT applicabile, l'azienda dovrebbe consentirne l'applicazione e la misurazione delle prestazioni raggiunte con la stessa. Il monitoraggio diventa un'attività fondamentale per la caratterizzazione dell'efficacia delle tecnologie installate. L'azienda dovrebbe quindi valutare l'opportunità di stabilire specifiche tecniche relative all'efficienza energetica da applicare per i nuovi impianti e per la sostituzione dei componenti (ad es. classe di efficienza energetica dei motori elettrici, presenza degli inverter, dei misuratori di energia elettrica o dei fattori energetici, ecc.).

Domanda: 04:03 - Utilizzo di metodi per la previsione dei consumi energetici:

Best Practice: 61

Linee guida:

- Prima di poter attuare questa linea guida l'azienda deve essere dotata di un efficiente sistema di misura dei consumi energetici dell'impianto aria compressa e dei principali fattori in grado di influenzarne i consumi (ad es. volumi di aria compressa e/o volumi di produzione dei reparti serviti). Partendo da dati certi, e misurati con cadenza regolare, l'azienda dovrebbe dotarsi di strumenti di previsione dei consumi energetici (baseline) basati su modelli statistici sviluppati a partire da dati storici (ad esempio attraverso analisi di regressione). In tal modo a partire dai volumi di produzione previsti potrebbe essere possibile prevedere il fabbisogno di aria compressa e/o il consumo energetico per l'impianto aria compressa. La conoscenza anticipata dei consumi consente inoltre di poter pianificare strategie di gestione (ad esempio accensione) dei compressori più efficienti e controllare nel tempo i consumi rispetto a quanto previsto allo scopo di individuare anomalie.

Domanda: 04:05 - Controllo dei consumi permanente (acquisizione dati, confronto con modello di previsione, analisi dello scostamento, reazione):

Best Practice: 36

Linee guida:

- In presenza di consumi energetici significativi per la produzione dell'aria compressa, l'azienda dovrebbe valutare attentamente la possibilità di dotarsi di sistemi di controllo continuo nel tempo delle prestazioni energetiche. Tali sistemi a partire dai modelli statistici dedotti dai dati storici in grado di esprimere le prestazioni energetiche standard del sistema (baseline) sono in grado di analizzare in tempo reale con frequenze anche molto elevate le prestazioni del sistema anche attraverso sistemi automatici (ad es. carte di controllo degli scostamenti con sistemi di alerting automatico). In tal modo non solo è possibile individuare tempestivamente le anomalie di consumo ma anche ottenere indizi circa la loro natura (sporadica, continua, ancora presente, crescente, ecc.) e determinare in maniera molto precisa l'impatto in termini di consumi energetici aggiuntivi. Tali sistemi sono anche in grado di consentire all'azienda di individuare miglioramenti "non voluti" e standardizzarli oltre che verificare l'effettivo impatto di interventi apportati all'impianto esistente.

Domanda: 04:07 - Individuazione delle responsabilità circa l'efficienza energetica dell'impianto aria compressa:

Best Practice: 25

Linee guida:

- Le prestazioni energetiche dell'impianto aria compressa sono generalmente determinate da una moltitudine di attori: responsabili delle scelte progettuali e di acquisto dell'impianto (anche relativamente alle modifiche), responsabili delle modalità di gestione e manutenzione dell'impianto di produzione e distribuzione, responsabili delle modalità di uso e manutenzione dei macchinari, ecc. L'azienda dovrebbe individuare tutto il personale in grado di influenzare le prestazioni

energetiche dell'impianto, assicurarsi della sua sensibilizzazione e formazione sul tema dell'efficienza energetica e definire delle responsabilità specifiche in termini di efficienza energetica.

Domanda: 05:01 - Relativamente alla formazione continua sul tema dell'efficienza energetica è possibile affermare che:

Best Practice: 60

Linee guida:

- La direzione aziendale dovrebbe spingere verso un processo di formazione continua riguardo l'efficienza energetica. I programmi di formazione oltre ad essere condivisi a tutti i livelli aziendali dovrebbero essere periodicamente rivisti e aggiornati con l'obiettivo di rimanere al passo con i tempi in materia di efficienza energetica.

Domanda: 05:02 - Relativamente alle nuove tecnologie:

Best Practice: 59

Linee guida:

- L'azienda dovrebbe promuovere la ricerca e l'applicazione delle Best Available Technologies. In fase di progettazione o riprogettazione degli impianti, l'azienda deve essere già consapevole delle BAT e deve applicarle a tappeto su tutta la procedura. Nel caso in cui la ricerca individui una BAT applicabile, l'azienda dovrebbe consentirne l'applicazione e la misurazione delle prestazioni raggiunte con la stessa. Il monitoraggio diventa un'attività fondamentale per la caratterizzazione dell'efficacia delle tecnologie installate.

Domanda: 05:03 - Relativamente al sistema informativo per la gestione dei consumi energetici d'impianto:

Best Practice: 12

Linee guida:

- L'azienda potrebbe sfruttare le potenzialità di un software specifico per la stima del risparmio in caso di modifiche all'impianto. Alcuni software sono progettati in maniera tale da mostrare visivamente i parametri energetici misurati e/o i valori di pressione. Dopo aver tarato il sistema, i parametri possono essere cambiati per simulare le prestazioni previste del compressore in varie condizioni e il risparmio può essere stimato come la differenza tra l'uso corrente e atteso di energia del compressore. L'utilizzo di software specifici per i sistemi aria compressa è quindi analogo all'utilizzo di software per la simulazione dei consumi energetici nel caso di modifiche negli edifici. La possibilità di scegliere l'intervallo temporale dei dati è fondamentale per modellare gli eventi effettivi di carico/scarico o modulazione, che si verificano tipicamente nell'ordine di secondi o minuti.

Domanda: 05:04 - Relativamente all'implementazione delle Best Practices e all'adozione delle BAT per l'efficientamento energetico del sistema aria compressa:

Best Practice: 59

Linee guida:

- L'azienda dovrebbe raggiungere l'ottimizzazione del sistema aria compressa attraverso l'implementazione (o la valutazione di applicabilità) di tutte le BP e BAT su qualsiasi aspetto del sistema. Per la progettazione considera l'efficienza energetica per le principali componenti di impianto e considera anche l'installazione di soluzioni avanzate per il recupero di energia attraverso recuperatori di calore o stadi di interrefrigerazione.

Domanda: 05:05 - Relativamente all'atteggiamento dell'organizzazione nei confronti della gestione energetica d'impianto:

Best Practice: 59

Linee guida:

I livelli aziendali più alti dovrebbero diffondere in ogni livello più basso la consapevolezza dell'importanza dell'efficienza energetica. La gestione delle performance dovrebbe essere un obiettivo perseguito in ogni aspetto aziendale sia nella produzione vera e propria sia nella generazione dei servomezzi. L'impatto dei consumi per l'aria compressa può essere diminuito in ogni aspetto attraverso un'azione continua di individuazione e attuazione di misure ad hoc. Sulle potenzialità della loro attività e deve definire una strategia di intervento mirata che possa valutare tutti le possibili azioni attuare sul reparto aria compressa. Le azioni intraprese dovrebbero avere alto tasso di successo sia in termini economici che di impatto ambientale.

1.5 Conclusioni

Nel presente capitolo è stata proposta una procedura di utilizzo del questionario del modello di maturità come punto di partenza per lo sviluppo di un sistema di linee guida indirizzate all'efficientamento dei sistemi di generazione, trasporto e utilizzo dell'aria compressa.

Partendo dalla ricerca bibliografica è stata individuata una serie di Best Practices che rappresentano il punto di arrivo del processo di efficientamento del sistema.

Dalle best practices sono state sviluppate alcune linee guida per la progettazione, la manutenzione ed in generale la gestione del comparto aria compressa industriale.

L'applicazione delle linee guida sarà quindi la naturale conseguenza della valutazione ottenuta dal modello di maturità.

L'obiettivo è quello di conoscere quali siano gli aspetti più efficienti e quali i più critici della gestione del reparto aria compressa e, sfruttando proprio questi ultimi, suggerire all'azienda le linee guida e la strategia migliore per raggiungere la best practice in quel particolare ambito di applicazione.

2 Predisposizione di un set di indicatori per la valutazione dell'efficienza energetica attraverso il benchmarking

Il lavoro di questa annualità, così come quello della precedente, parte dalla raccolta di dati operata dall'Enea in ottemperanza all'Articolo 8 del Decreto Legislativo n°102 del 4 Luglio 2014 [25], trasposizione italiana della direttiva dell'Unione Europea 2012/27/EU [26], secondo cui le grandi aziende e quelle catalogate come energivore secondo la [27] dovevano sottoporre i propri impianti a diagnosi energetica (Audit energetico) al massimo ogni 4 anni. La scadenza per presentare i risultati del primo audit energetico era fissata per il 5 dicembre 2015 [1].

Il lavoro vuole sfruttare i dati a disposizione, dovuti ad audit energetici, per fornire una metodologia in grado di portare ad un'attenta analisi di benchmark per il reparto aria compressa industriale.

Condurre un'analisi di benchmark significa operare continue valutazioni delle produzioni, dei servizi e dell'organizzazione tra due o più siti appartenenti alla stessa azienda, o ad aziende diverse, in cui uno rappresenta le best practices. I confronti sono un punto di partenza per raggiungere risultati completi e concreti in vista di un'attività di efficientamento energetico [28]. Il benchmark è riconosciuto a livello internazionale come uno dei metodi più importanti per incrementare l'efficienza energetica. È una delle metodologie migliori per avere una valutazione completa delle performance energetiche di una parte dell'industria o di un particolare settore rispetto un settore o un impianto di riferimento [29]. Un'analisi di benchmark può aiutare le imprese a valutare le loro prestazioni rispetto alle altre imprese e ad aumentare le proprie prestazioni in termini di produzione e di efficienza energetica. Fare un benchmark obbliga le aziende a raccogliere molti dati provenienti dai sistemi di misura e ad utilizzare uno o più indicatori tipici per valutare le relative prestazioni. Ogni azienda che vuole affrontare un'analisi di questo tipo ha bisogno di un certo numero di casi per definire il modello di benchmark, per questo motivo molto spesso le aziende, che hanno un certo numero di siti produttivi da cui attingere i dati, utilizzano i valori provenienti da essi per operare un "benchmark interno". Per condurre queste analisi è possibile utilizzare sia dati elementari derivanti da misure strumentali e quindi si ha un benchmark a singolo fattore, sia tecniche econometriche complesse che approcci di programmazione matematica [30].

In letteratura sono molti i casi di applicazione di analisi di benchmark. In alcune situazioni il benchmark è stato condotto su interi settori industriali che analizzano il consumo di energia connesso alla produzione di CO₂ [31]; in altri casi è stata considerata solo una tipologia di installazione [32],[33], [34].

Nonostante l'importanza, in termini di consumo energetico, del settore della produzione di aria compressa sia ormai conosciuta, non esiste uno standard comune per valutare le prestazioni dei sistemi aria compressa. Inoltre, non esistono molti documenti e valutazioni sulle metodologie di benchmarking applicabili nella produzione di aria compressa che considerino diverse condizioni nominali [1].

I dati raccolti sono stati utilizzati per effettuare considerazioni sull'impatto energetico dei diversi settori e, utilizzando alcuni Key Performance Indicators (KPI) definiti nella precedente annualità, per effettuare confronti ed analisi circa il consumo di energia relativo alle produzioni finali. Partendo dalle tecniche più comuni di analisi dei dati, lo studio presentato in questo documento intende definire una metodologia di misurazione delle prestazioni energetiche e definire quali dati siano indispensabili per un benchmark significativo. In particolare, scendendo nel tecnico, in questo lavoro vuole definire quali siano le variabili da misurare e come farlo.

Per poter fare confronti tra le varie realtà c'è bisogno di entrare in possesso di una certa quantità di dati e soprattutto che questi ultimi siano affidabili. Nel caso dei sistemi per l'aria compressa è opportuno essere a conoscenza di alcuni valori caratteristici come la quantità di aria prodotta, la pressione di esercizio del sistema, ecc.

I dati derivanti dagli audit energetici condotti dall'ENEA presentano alcune criticità non trascurabili. La prima insormontabile problematicità è la verifica della loro corrispondenza con la caratteristica misurata o stimata. Se nel caso di misurazioni si può essere abbastanza confidenti della loro bontà, nel caso di stima di valori questi assumono una significatività molto inferiore, rimanendo incognita anche la metodologia con cui la stima è stata eseguita. Per quanto riguarda il quantitativo di aria compressa prodotto, in molti casi la

stima dipende dal quantitativo di prodotto finale, in altri dalle fatture del servizio elettrico, in altre dalle ore di funzionamento; tutta questa variabilità è fonte di incertezza e può portare ad errori.

La grande variabilità nelle grandezze analizzate ha comportato una certa difficoltà nell'analisi dei dati e ha reso impossibile lo sviluppo di uno standard comune per l'utilizzo di una metodologia affidabile.

2.1 Metodologia

I sistemi di generazione di aria compressa sono impianti complessi con molte componenti, ciascuna con caratteristiche molto variabili, che possono far oscillare le prestazioni generali anche in maniera radicale. La lista delle caratteristiche da tenere sotto controllo per avere buone caratteristiche di prestazione nella generazione dell'aria potrebbe essere molto lunga ma per poter avere un primo livello di controllo sul sistema si deve necessariamente selezionarne alcune (le più importanti) e intervenire solo su queste. La letteratura tecnica fornisce numerosi esempi di variabili da tenere sotto controllo per avere un controllo efficace dei sistemi [35].

Un tipico sistema per l'aria compressa può essere diviso in 3 funzioni che sono: generazione aria compressa (compressori, sistemi di prelievo aria, filtri, essiccatori ecc.), trasporto (rete di distribuzione) e utilizzo.

Per avere un buon livello di efficienza energetica è necessario che tutti i settori siano ben progettati e funzionanti al meglio. È molto complesso definire un quadro dei potenziali fattori su cui intervenire per migliorare l'efficienza energetica, la cosa più importante considerare i fattori in ogni settore del sistema e definire le priorità. Per il settore in esame si devono considerare maggiormente:

- pressione del sistema (set point e variazione) e consumo specifico di energia compressori;
- dispersione d'aria compressa per quanto riguarda il trasporto;
- domanda specifica (richiesta aria per unità di produzione) e variabili ambientali (qualità dell'aria, umidità relativa) per quanto riguarda l'analisi degli utilizzatori [12].

Per fornire un'analisi di riferimento valida, in qualsiasi ambito, è opportuno considerare alcuni indicatori di prestazione chiave, definiti in termini di domanda di energia, utilizzo finale, tecnologia, processo e dispositivo e utilizzarli per confrontare i vari casi.

Solitamente gli indicatori sono prodotti e rapporti tra grandezze in maniera da poter calcolare le varie caratteristiche in funzione della produzione unitaria o in funzione dei costi ecc. Gli indicatori di prestazione oltre ad offrire una misura delle proprie prestazioni nel tempo vengono usati anche per mettere in relazione i vari sistemi, ovvero per confrontare le proprie prestazioni con quelle altrui o nell'ambito della stessa organizzazione (benchmarking esterno ed interno).

Gli indicatori di prestazione più usati sono principalmente appartenenti a 4 categorie:

- indicatori fisici che misurano il volume del prodotto processato;
- indicatori di qualità che valutano la qualità degli output in base a determinati standard;
- indicatori di costo;
- indicatori di servizio che misurano il tempo di risposta a partire dall'avvio del processo alla sua conclusione.

Tali indici possono riferirsi al consumo specifico di energia in funzione de numero di unità prodotte o delle ore di funzionamento conteggiate sia per aziende che operano nello stesso settore sia facendo riferimento a processi in aziende appartenenti a settori diversi.

Per l'analisi di benchmark di questo lavoro sono stati considerati soltanto gli indicatori fisici che hanno maggiore valenza per quanto riguarda l'utilizzo di dati disponibili. Generalmente gli indicatori fisici sono tutti calcolati collegando il consumo di energia ad un indicatore di attività misurato in termini fisici (ad esempio tonnellate di acciaio, chilometraggio di passeggeri, superficie in metri quadrati, ecc.) o ad un gruppo di consumo di energia (ad esempio veicolo, abitazione , ecc.)[36].

Gli indici utilizzati e già trattati nel rapporto precedente sono:

- kWh_e AC: quantità di energia elettrica utilizzata per la produzione dell'aria compressa dai singoli impianti industriali;
- kWh_e AC/kWh_e TOT: quantità relativa di energia elettrica utilizzata dai singoli siti industriali per la produzione dell'aria compressa;

- kWh_e AC/t: energia elettrica utilizzata per la produzione dell'aria compressa per singola tonnellata di prodotto;
- kWh_e AC/m³ AC: energia elettrica utilizzata per la produzione dell'aria compressa per singolo metro cubo di aria compressa prodotta.
- m³ AC/t: metri cubi di aria compressa utilizzati per la produzione della singola tonnellata di prodotto finito.

Le aziende i cui dati sono stati utilizzati sono le stesse a cui si è fatto riferimento per le precedenti attività e fanno parte di nove settori industriali:

- Industrie alimentari, codice ATECO 10;
- Fabbricazione di carta e prodotti di carta, codice ATECO 17.
- 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;

I dati disponibili includono la quantità di prodotti finiti tipici per ogni settore industriale, i dati di produzione dell'aria compressa e il relativo consumo di energia.

In particolare, i dati più significativi indicano la quantità totale di energia utilizzata dall'impresa, la quantità di energia utilizzata per la produzione di aria compressa, la quantità di prodotto finale e la quantità di aria compressa prodotta.

I KPI legati strettamente al consumo di energia sono rappresentativi dell'efficienza energetica delle aziende tuttavia non consentono il confronto tra aziende appartenenti a settori industriali diversi poiché il dato potrebbe essere condizionato dalla grandezza dell'azienda, dalla tipologia di produzione attiva, dal modo di produrre ecc. Possono essere utilizzati con successo nel caso di aziende "simili".

Gli indicatori legati alla quantità di prodotto finale sono poco utilizzabili, invece, se si vogliono effettuare confronti tra le prestazioni di aziende appartenenti a settori diversi poiché è inevitabile che il confronto tra consumo energetico o di aria compressa per processi, di diversa complessità, relativi a produzioni completamente differenti porti a risultati del tutto privi di significatività.

Tali indicatori di prestazione quindi possono essere utilizzati per avviare un'analisi di benchmark all'interno dei singoli settori e con aziende che elaborano le stesse categorie di prodotti ma non sono utili a considerare le prestazioni generali.

Considerando le difficoltà di comparare i diversi settori a causa delle loro differenze operative, compiere un'analisi di benchmark risulta un'attività abbastanza complessa.

Per fare un'analisi di benchmark in relazione ad un campione, la letteratura tecnica fornisce una vasta gamma di metodi.

Le tecniche più semplici constano in confronti parziali selezionando un KPI e normalizzando le prestazioni rispetto al riferimento o al meglio disponibile. I risultati sono facilmente comprensibili ma per poter avere una buona analisi occorre contare su un vasto campione di impianti in modo tale da fornire un buon livello di riferimento. Per confrontare impianti con differenti layout la letteratura consiglia di utilizzare più di un indicatore parziale [37].

L'analisi stocastica di frontiera si basa sulla definizione di un profilo (una frontiera) che descrive una prestazione media o migliore per un determinato insieme di input (cioè dati operativi e di progettazione). All'interno dell'analisi di frontiera, le tecniche statistiche possono essere utilizzate per descrivere e inferire le prestazioni di una popolazione analizzando un sottoinsieme (un campione).

I metodi di programmazione si basano sull'ottimizzazione fatta sui dati raccolti con l'obiettivo di definire un contorno ottimale utile per un successivo confronto.

La scelta delle tecniche di benchmarking utilizzate dalle singole utilità dipende in parte dai dati disponibili e dalle finalità degli esercizi di benchmarking e può avere un impatto sulla determinazione del punteggio di efficienza [37].

In questo lavoro sono stati utilizzati la tecnica di normalizzazione e l'approccio statistico.

Le prestazioni del sistema di generazione di aria compressa possono essere monitorate in modo robusto, in tempo reale, misurando la portata e il consumo di energia associato ad una varietà di carichi di sistema. L'utilizzo di questo KPI su base periodica consente di valutare la condizione complessiva del sistema. Per questo motivo è stato scelto di utilizzare una relazione più oggettiva tra il consumo di energia per la produzione di aria compressa e la quantità di aria prodotta in m^3 (kWh AC / m^3 AC) [38].

La scelta dell'indicatore è condizionata anche dalla caratteristica intrinseca dello stesso di essere svincolato dal tipo di produzione e di impianto che viene misurato. Infatti un rapporto tra grandezze di questo tipo consente di mettere a confronto dati provenienti da aziende differenti tralasciando il quantitativo di prodotto principale e la taglia dell'azienda.

Alla luce di quanto detto, la successiva sezione sarà dedicata alla descrizione della situazione attraverso l'analisi dei dati relativi alle aziende facenti parte del campione disponibile.

2.2 Analisi dei dati

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 valori, per l'indicatore definito in precedenza, per ognuno dei 9 settori industriali definiti.

2.2.1 Analisi statistica

I dati relativi a ciascun settore sono stati analizzati in prima istanza attraverso i due indici statistici della media e della mediana sia per l'insieme che raccoglie solo i dati derivanti da misurazioni, sia per quello dei dati derivanti da misurazioni e da stime. In questo modo si ottengono due valori per ogni insieme:

- valore medio e mediana degli indici descritti, considerando solo siti industriali in cui i dati necessari al calcolo degli indici sono tutti misurati;
- valore medio e mediana degli indici descritti, considerando tutti i siti industriali che riportano i dati necessari al calcolo degli indici (sia misurati che stimati).

I valori di media e mediana forniscono informazioni importanti per quanto riguarda l'andamento dei dati a disposizione:

- la media rappresenta il valore che descrive in maniera sintetica un insieme di dati;
- la mediana essendo il valore centrale di una distribuzione consente di dare meno peso all'eventuale presenza di valori fuori controllo e quindi ottenete un'analisi più affidabile.

Si è scelto di operare la distinzione tra i dati dovuti a misurazioni e la totalità dei dati poiché l'insieme dei misurati, sebbene molto più attendibile, è molto meno numeroso di quello dei dati stimati quindi condurre l'analisi considerando la totalità dei dati consente di tenere traccia dell'intero insieme.

I dati vengono raccolti in forma di istogramma per fornire una prima visualizzazione che rappresenta la dispersione del campione analizzato. A destra del grafico vengono descritte le principali informazioni statistiche relative alla distribuzione dei dati quali la media (descrittiva dell'andamento generale della dell'insieme) e la mediana.

Le ulteriori analisi che sono state aggiunte riguardano:

- Verifica della normalità della distribuzione dei dati attraverso il test di Anderson-Darling [39] effettuato attraverso un software statistico;
- analisi della deviazione standard;
- analisi della simmetria della popolazione rispetto al valor medio attraverso l'indice di "skewness";
- analisi dell'ampiezza della distribuzione attraverso l'indice di "kurtosis".

Sono state anche aggiunte le variabili necessarie per la descrizione dei vari gruppi di dati:

- analisi dei quartili attraverso il grafico Boxplot;

- analisi degli intervalli di confidenza al 95% di significatività per valori medi, mediale e deviazioni standard.

2.2.2 Analisi di correlazione e regressione lineare

Come già detto nel paragrafo precedente, per elaborare un'analisi di benchmark per i vari settori, è stato scelto l'approccio della normalizzazione.

Le grandezze utilizzate sono quelle caratteristiche del KPI prescelto, quindi kWhAC per il consumo di energia elettrica e m³ per la quantità di aria compressa generata.

Per usare il metodo della normalizzazione è stata utilizzata dapprima la tecnica della correlazione e successivamente quella della regressione lineare.

Dalla letteratura la correlazione è un indicatore della "associazione tra due variabili" in cui nessuna dei due valori è considerato un predittore o un risultato [40]. Per ogni settore sono stati calcolati sia i valori della correlazione tra le variabili sia per la totalità dei dati, sia esclusivamente per quelli derivati da misurazioni.

Alla correlazione è stata aggiunta anche l'analisi di regressione lineare, anche in questo caso sia per la totalità dei dati, sia esclusivamente per quelli derivati da misurazioni.

Anche la regressione indica se 2 variabili siano associate. A differenza della correlazione, tuttavia, la regressione considera una variabile come risultato (variabile dipendente) e l'altra come variabile predittiva [40].

I risultati delle analisi vengono definiti in seguito.

2.3 Applicazione dell'analisi dei dati

La raccolta dei dati descritta in precedenza viene illustrata nei prossimi paragrafi attraverso alcuni grafici caratterizzanti ogni settore industriale. Tutti i grafici sono sviluppati sulla base dell'indicatore "kWh_e AC/m³ AC", sia per la totalità dei dati di ogni settore, sia per i dati dovuti a misurazione; tutte le particolarità vengono descritte di volta in volta.

Per ogni settore vengono rappresentati grafici di istogrammi, boxplot e intervalli di confidenza; ai grafici vengono aggiunte anche le tabelle contenenti i risultati del test di Anderson-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.

La descrizione dei dati prosegue con la descrizione dei coefficienti di correlazione tra variabili e la visualizzazione sul piano cartesiano delle grandezze in gioco. Per ogni settore è stata proposta l'analisi di regressione lineare e la visualizzazione dei dati indicando in rosso i valori relativi ai valori dovuti a stime ed in blu quelli dovuti a misurazioni in continuo.

2.3.1 Industria alimentare

Il settore dell'industria alimentare comprende le attività di lavorazione di prodotti provenienti dall'agricoltura, dalla silvicoltura e dalla pesca. Le aziende trasformano le materie prime in alimenti e bevande commestibili per l'uomo o per gli animali. Il settore include anche attività di trattamento di prodotti intermedi non strettamente legati all'alimentazione come ad esempio il pellame proveniente dai macelli.

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 [41].

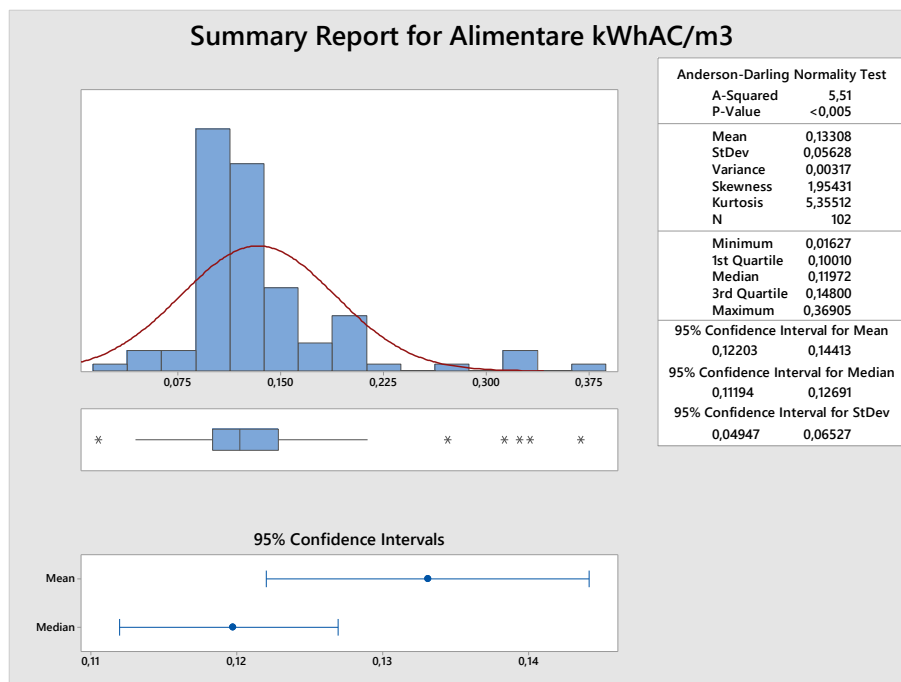
Nelle figure 1, 2 e 3 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per l'indicatore descritto precedentemente e calcolato sulla totalità dei dati del settore oppure sulla parte dei valori derivanti da misurazioni.

Per il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori, in base al test di normalità di Anderson-Darling, risultano non normali e non simmetriche, soprattutto per quanto riguarda l'insieme dei dati misurati. Gli outliers sono stati preventivamente eliminati in quanto erano visibilmente fuori controllo e modificavano radicalmente gli istogrammi rendendoli poco rappresentativi del campione.

Inoltre per quanto riguarda i dati provenienti da misurazioni è necessario dire che questi non rappresentano un campione rappresentativo considerata la scarsità di dati disponibili.

L'indice di correlazione (tabella 3) ha un valore alto per tutti i 3 casi analizzati: totale, misurato e stimato; viene descritto nella tabella 3. Il fatto che il valore dell'indice misurato sia maggiore di quello stimato fa pensare al fatto che le stime non siano state eseguite seguendo un criterio univoco e non rappresentino l'andamento reale del rapporto consumi su produzione.

La distribuzione sul piano cartesiano, con annessa retta di regressione, mostra una tendenza delineata soprattutto dai valori dovuti a stime. I valori dovuti a misurazioni, che sono i più affidabili, sono quasi tutti al di sopra della linea di tendenza, ciò denota alcune difficoltà nell'analisi che va approfondita



ulteriormente.

Figura 1 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati misurati), settore alimentare

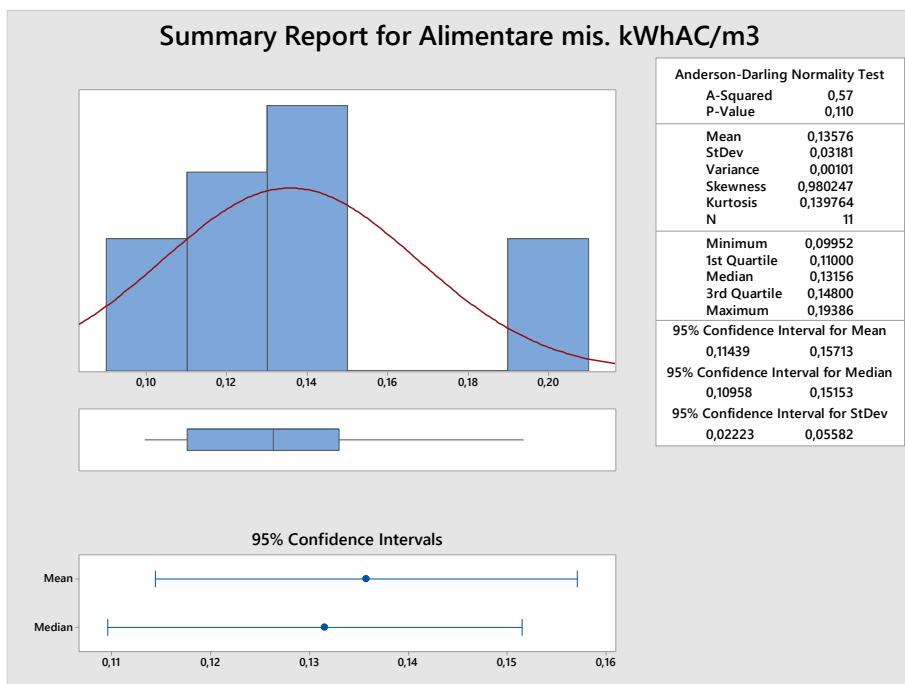


Figura 2 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente solo i siti con dati misurati, settore alimentare

Tabella 3 - Descrizione del coefficiente di correlazione nel caso della totalità dei dati, solo dati misurati, solo dati stimati. Descrizione della significatività dei coefficienti di regressione lineare considerando tutti i dati disponibili o soltanto i dati misurati; settore alimentare

Settore	Correlazione			Regressione Lineare			
				Totale		Misurato	
	Totale	Misurato	Stimato	Intercetta	Pendenza	Intercetta	Pendenza
Alimentare	0,970	0,992	0,882	0,582	9,60E-68	0,439	1,28E-15

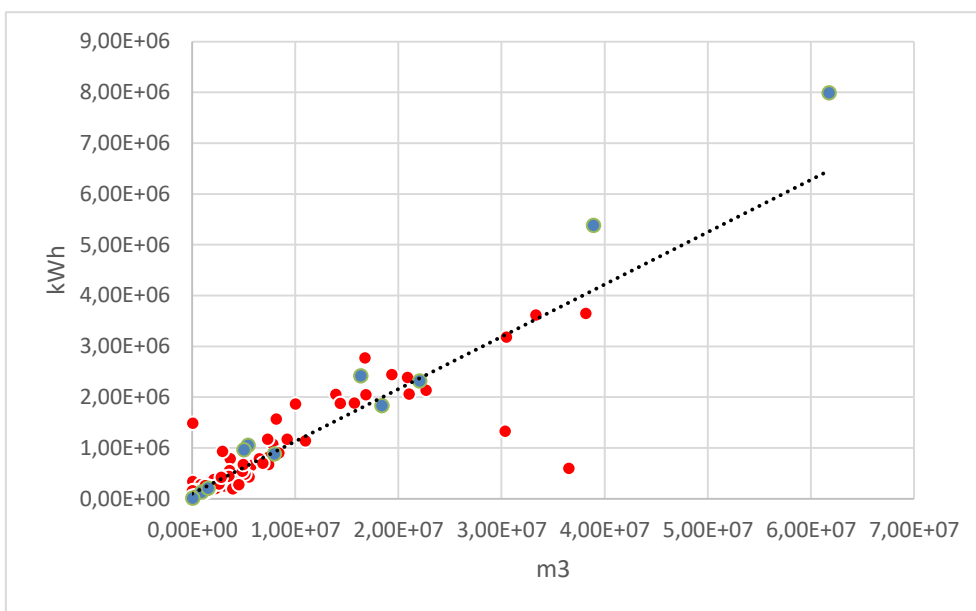


Figura 3 - Grafico di dispersione dei valori di consumo energetico per l'aria compressa espresso in kWh in funzione della quantità di aria compressa prodotta espressa in m³. In rosso i valori relativi a dati stimati, in blu i valori dei dati misurati, in nero la linea di tendenza; settore alimentare.

2.3.2 Fabbricazione di carta e prodotti di carta

Le attività relative a questo settore raccolgono la fabbricazione e la lavorazione di carta e dei prodotti derivanti dalla sua trasformazione. Le aziende in molti casi si occupano di più attività all'interno del settore. 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 [41].

Nelle figure 4 e 5 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per l'indicatore descritto precedentemente e calcolato sulla totalità dei dati del settore oppure sulla parte dei valori derivanti da misurazioni.

Per il settore della carta la distribuzione statistica dei valori, in base al test di normalità di Anderson-Darling, risulta non normale e non simmetrica anche se l'indice non è elevato. Il grafico a colonne dei dati dovuti a misurazioni non è presente per mancanza di valori.

L'indice di correlazione (tabella 4) ha un valore alto per tutti i 3 casi analizzati: totale, misurato e stimato. Il fatto che il valore dell'indice stimato sia maggiore di quello correlato fa pensare al fatto che le stime siano state fatte proprio in funzione dei consumi elettrici.

L'analisi di regressione, mostra una tendenza anche se i valori sono disposti con notevole dispersione. I valori dovuti a misurazioni, che sono i più affidabili, sono in numero estremamente limitato (due) e quindi i dati relativi alla loro statistica di regressione non sono attendibili e non è possibile fornire ulteriori informazioni.

Figura 4 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_E AC/m³ AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati misurati), settore carta

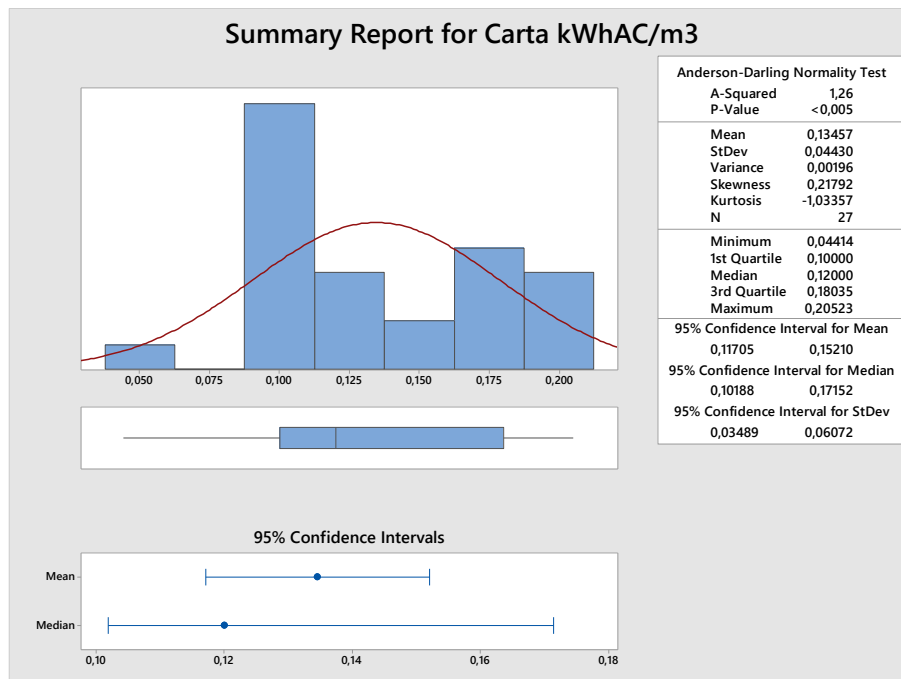


Tabella 4 - Descrizione del coefficiente di correlazione nel caso della totalità dei dati, solo dati misurati, solo dati stimati. Descrizione della significatività dei coefficienti di regressione lineare considerando tutti i dati disponibili o soltanto i dati misurati, settore carta

Settore	Correlazione			Regressione Lineare			
	Totale	Misurato	Stimato	Totale		Misurato	
				Intercetta	Pendenza	Intercetta	Pendenza
Carta	0,963	0,986	0,961	0,002	1,07E-15	0,646	0,106

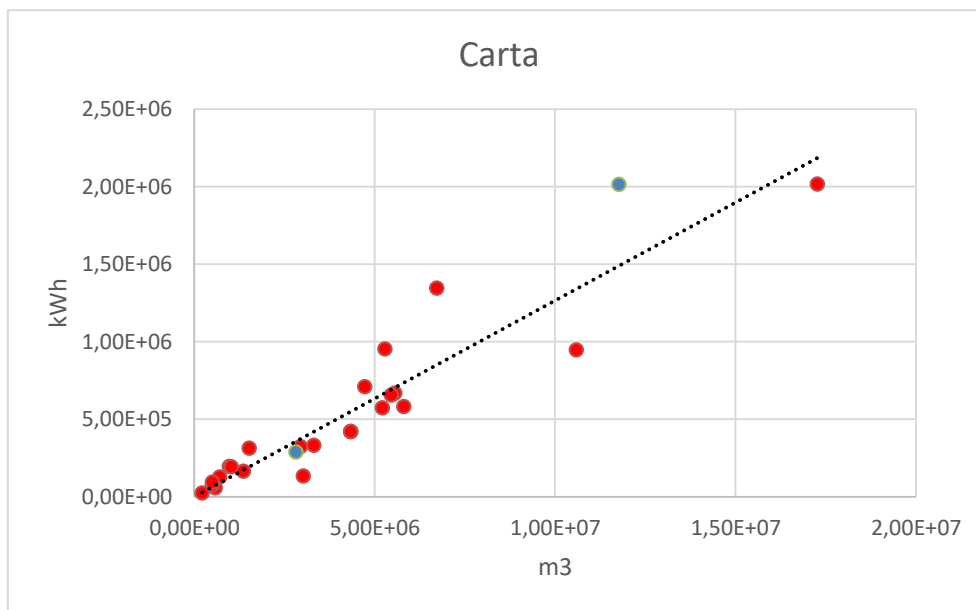


Figura 5 - Grafico di dispersione dei valori di consumo energetico per l'aria compressa espresso in kWh in funzione della quantità di aria compressa prodotta espressa in m³. In rosso i valori relativi a dati stimati, in blu i valori dei dati misurati, in nero la linea di tendenza; settore carta

2.3.3 Metallurgia

Il settore raccoglie 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 lamiere, nastri, barre, tondi o vergella e in forma fusa, per realizzare pezzi di fonderia e altri prodotti metallici [41].

Nelle figure 6, 7 e 8 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per l’indicatore descritto precedentemente e calcolato sulla totalità dei dati del settore oppure sulla parte dei valori derivanti da misurazioni.

Per il settore della metallurgia le distribuzioni statistiche dei valori, in base al test di normalità di Anderson-Darling, risultano fortemente non normali e non simmetriche.

Inoltre per quanto riguarda i dati provenienti da misurazioni è necessario dire che questi non rappresentano un campione rappresentativo considerata la scarsità di dati disponibili.

L’indice di correlazione ha valori omogenei per tutti i 3 casi analizzati (tabella 5).

La distribuzione sul piano cartesiano, con annessa retta di regressione, mostra una tendenza delineata dei valori. I valori dovuti a misurazioni, che sono i più affidabili, ricalcano la distribuzione dei dati totali quindi

la regressione può essere considerata abbastanza affidabile. La significatività dell'analisi è avvalorata anche dai parametri relativi alle statistiche di regressione nella tabella 5.

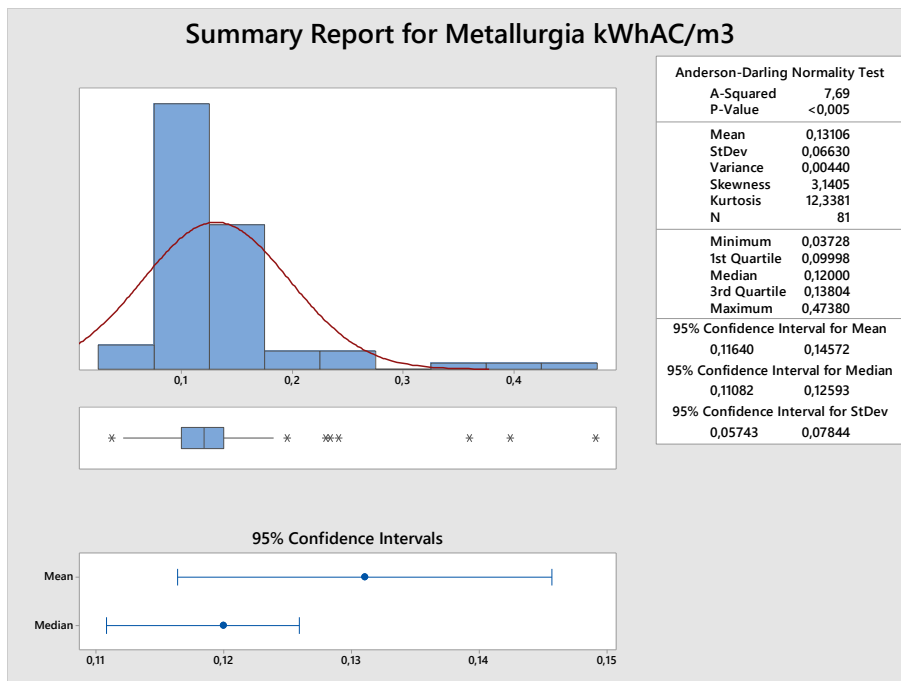


Figura 6 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/ m³ AC per il campione contenente solo i siti con dati misurati, settore metallurgia

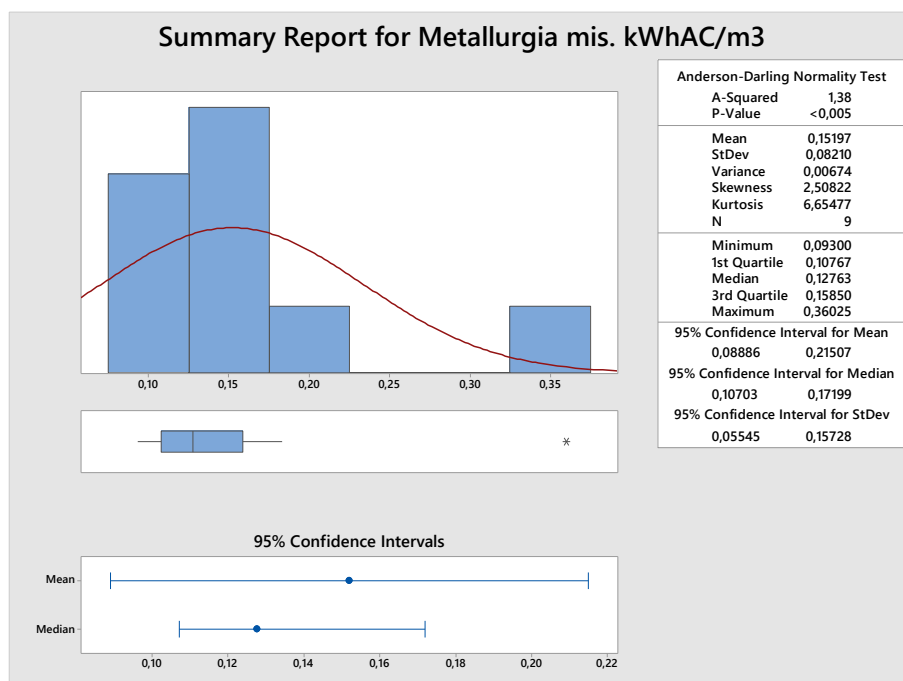


Figura 7- Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/ m³ AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati misurati), settore metallurgia

Tabella 5 - Descrizione del coefficiente di correlazione nel caso della totalità dei dati, solo dati misurati, solo dati stimati. Descrizione della significatività dei coefficienti di regressione lineare considerando tutti i dati disponibili o soltanto i dati misurati; settore metallurgia

Settore	Correlazione			Regressione Lineare			
	Totale	Misurato	Stimato	Totale		Misurato	
				Intercetta	Pendenza	Intercetta	Pendenza
Metallurgia	0,983	0,983	0,986	0,025	4.69E-61	0,132	1.03E-6

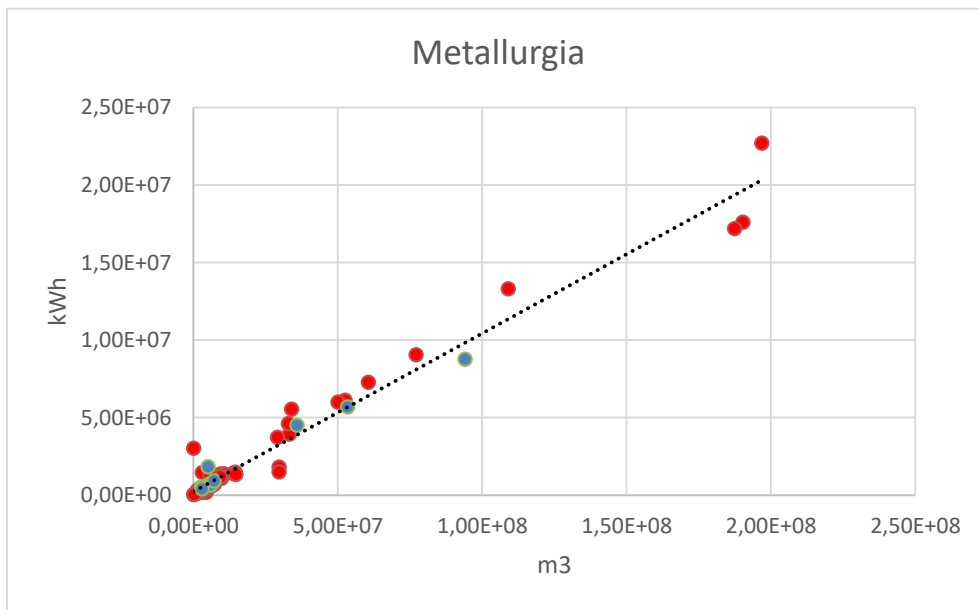


Figura 8 - Grafico di dispersione dei valori di consumo energetico per l'aria compressa espresso in kWh in funzione della quantità di aria compressa prodotta espressa in m³. In rosso i valori relativi a dati stimati, in blu i valori dei dati misurati, in nero la linea di tendenza; settore metallurgia.

2.3.4 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 [16].

Il campione di dati dovuti a misurazioni è risultato molto scarso in termini numerici quindi l’analisi non è stata possibile. Dall’istogramma in figura 9 si nota una certa dispersione dei valori nonostante siano preventivamente stati eliminati i valori fuori controllo. La distribuzione non è di tipo normale e ciò è sottolineato dal test di Anderson-Darling. Anche i valori di kurtosis e skewness evidenziano questa caratteristica. L’analisi di correlazione in tabella 6 mostra valori maggiori nel caso di dati misurati rispetto a quelli calcolati.

Il grafico relativo alla retta di regressione su piano cartesiano (figura 10) indica una certa variabilità dei dati con una distribuzione abbastanza ampia attorno alla retta di tendenza. I valori dovuti a misurazioni, che sono i più attendibili, sono relativi a quantità di aria compressa generata molto bassa quindi non influiscono molto sull’andamento della retta di tendenza.

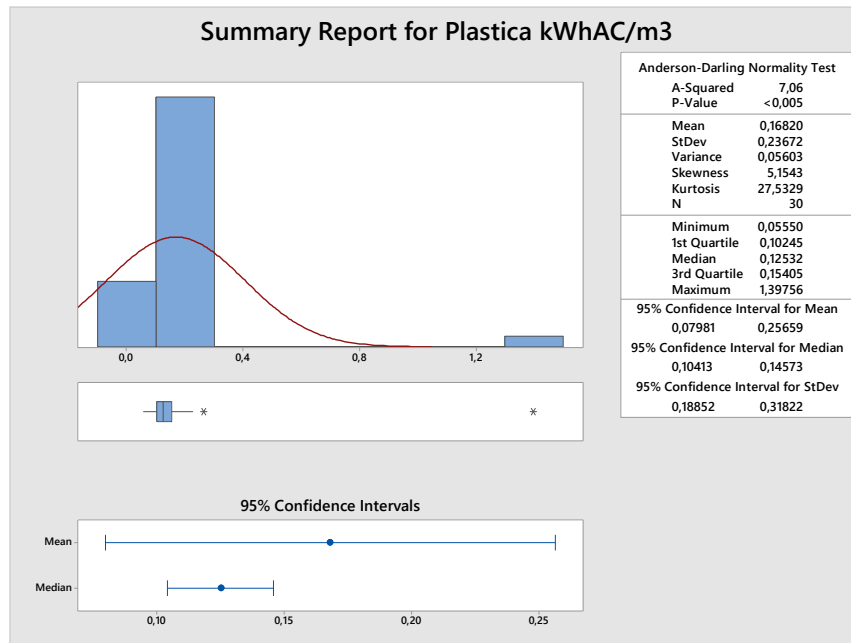


Figura 9 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati misurati), settore plastica

Tabella 6 - Descrizione del coefficiente di correlazione nel caso della totalità dei dati, solo dati misurati, solo dati stimati. Descrizione della significatività dei coefficienti di regressione lineare considerando tutti i dati disponibili o soltanto i dati misurati; settore plastica

Settore	Correlazione			Regressione Lineare			
				Totale		Misurato	
	Totale	Misurato	Stimato	Intercetta	Pendenza	Intercetta	Pendenza
Plastica	0,969	0,998	0,955	0,899	2,64E-45	0,027	5,27E-06

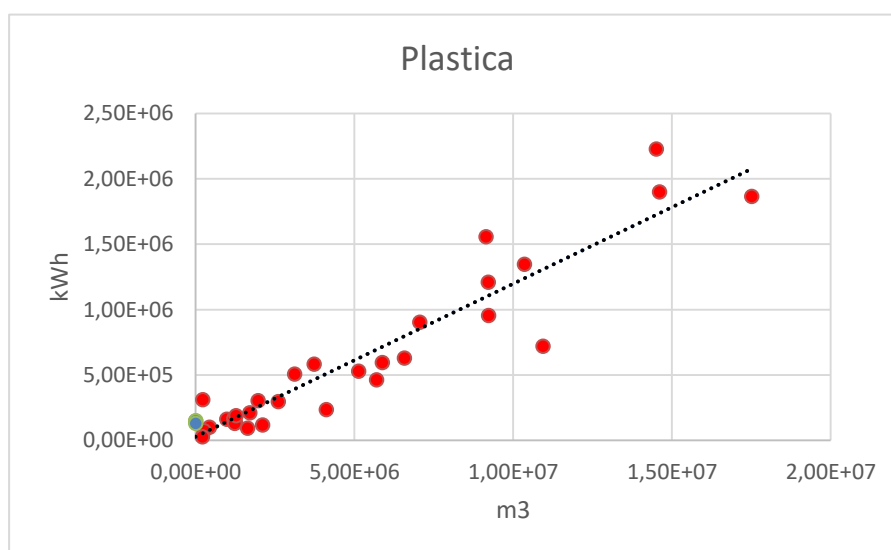


Figura 10 - Grafico di dispersione dei valori di consumo energetico per l'aria compressa espresso in kWh in funzione della quantità di aria compressa prodotta espressa in m³. In rosso i valori relativi a dati stimati, in blu i valori dei dati misurati, in nero la linea di tendenza; settore plastica.

2.3.5 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].

Dagli istogrammi in figura 11 e 12 è facilmente individuabile che esiste una notevole dispersione dei dati. Il test di Anderson-Darling indica che i dati raccolti non hanno distribuzione normale e che sono sbilanciati rispetto al valor medio dal lato dei valori minori (indice di skewness). Per quanto riguarda i dati misurati, la distribuzione presenta una grande dispersione e anche se l'indice di normalità migliora. Visivamente la distribuzione presenta delle colonne nulle dovute alla scarsità di dati rilevati. L'analisi di correlazione indica una certa stabilità nei valori (tabella7).

Dall'analisi di regressione (figura 13) si può notare una certa affidabilità nell'indicazione della pendenza della retta sia per i dati totali che per quelli dovuti a misurazioni. I tre valori maggiori, sebbene possano sembrare outlier sono frutto di misurazioni in continuo quindi fortemente affidabili e sono molto influenti sul trend della retta.

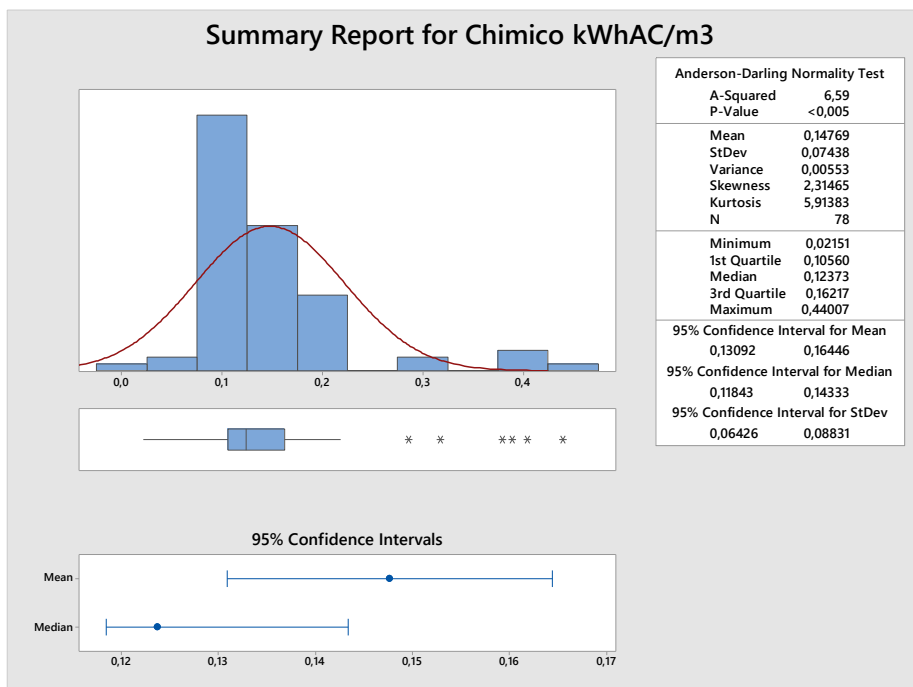


Figura 11 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati misurati), settore chimico

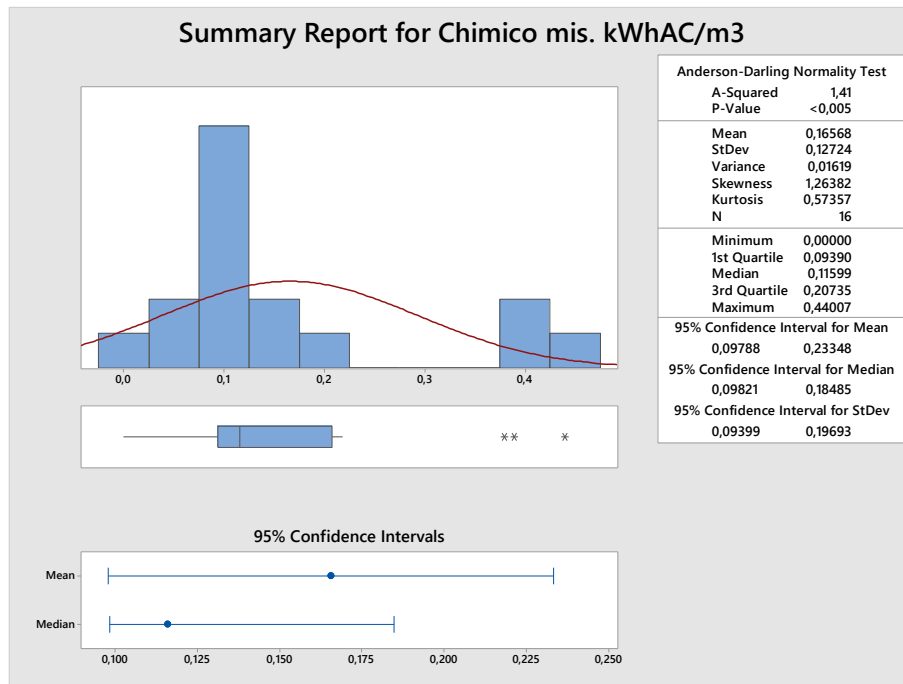


Figura 12 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente solo i siti con dati misurati, settore chimico

Tabella 7 - Descrizione del coefficiente di correlazione nel caso della totalità dei dati, solo dati misurati, solo dati stimati. Descrizione della significatività dei coefficienti di regressione lineare considerando tutti i dati disponibili o soltanto i dati misurati; settore chimico

Settore	Correlazione			Regressione Lineare			
	Totale		Stimato	Totale		Misurato	
	Totale	Misurato		Intercetta	Pendenza	Intercetta	Pendenza
Chimico	0,996	0,997	0,978	0,017	4,47E-84	0,119	1,36E-16

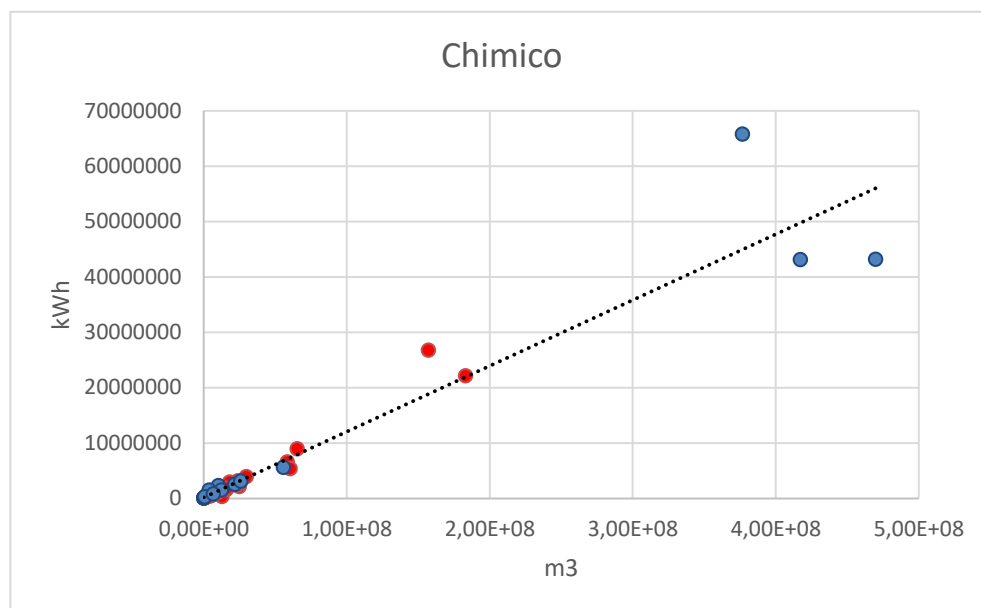


Figura 13 - Grafico di dispersione dei valori di consumo energetico per l'aria compressa espresso in kWh in funzione della quantità di aria compressa prodotta espressa in m³. In rosso i valori relativi a dati stimati, in blu i valori dei dati misurati, in nero la linea di tendenza; settore chimico.

2.3.6 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 14, 15 e 16 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per l'indicatore descritto precedentemente e calcolato sulla totalità dei dati del settore oppure sulla parte dei valori derivanti da misurazioni

La distribuzione dei dati del campione non assume la classica forma a campana dovuto ad una distribuzione gaussiana come è possibile notare dalla figura 14. La gaussiana ha valore del test di Anderson-Darling abbastanza contenuto, ciò indica una dispersione relativamente bassa, anche i valori di kurtosis e skewness non sono elevati per questo i dati sono discretamente bilanciati. Per i dati misurati non è possibile fare ulteriori affermazioni considerando la scarsità dei dati a disposizione (figura 15).

L'analisi di correlazione mostra un risultato migliore per i valori relativi ai dati misurati (tabella 8).

L'analisi della regressione indica un trend abbastanza netto anche se i dati relativi alle misurazioni sono quasi sempre al di sopra della retta di regressione, ciò indica una certa incertezza nel risultato considerando che i dati misurati sono più attendibili di quelli stimati (figura 16).

Anche considerando i fattori di significatività si nota che i valori relativi ai dati misurati sono più bassi rispetto alla totalità dei dati.

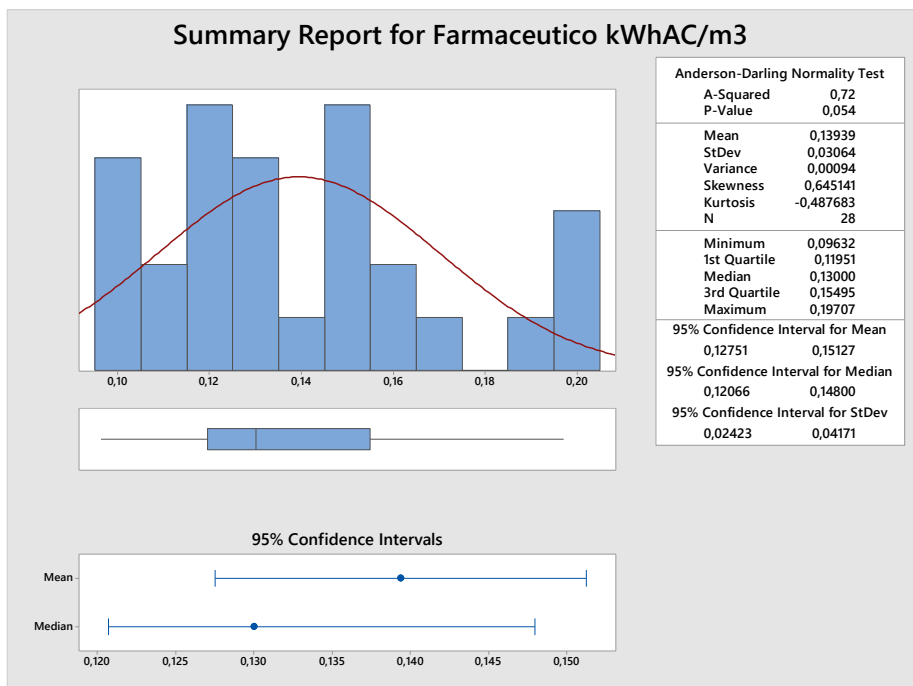


Figura 14 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati misurati), settore farmaceutico

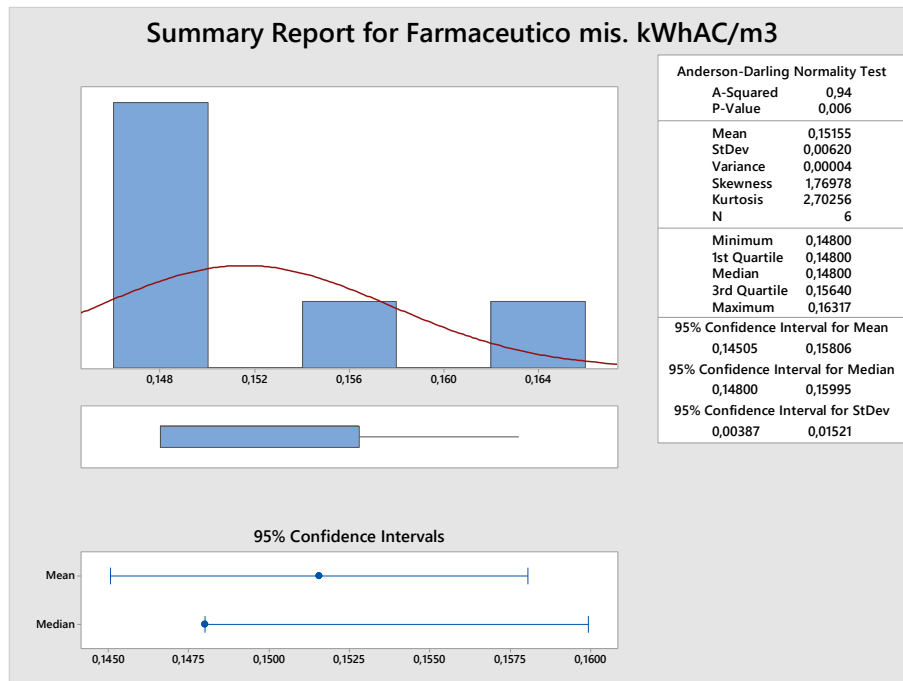


Figura 15 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente solo i siti con dati misurati, settore farmaceutico

Tabella 8 - Descrizione del coefficiente di correlazione nel caso della totalità dei dati, solo dati misurati, solo dati stimati. Descrizione della significatività dei coefficienti di regressione lineare considerando tutti i dati disponibili o soltanto i dati misurati; settore farmaceutico

Settore	Correlazione			Regressione Lineare			
	Totale	Misurato	Stimato	Totale		Misurato	
				Intercetta	Pendenza	Intercetta	Pendenza
Farmaceutico	0,865	0,821	0,991	0,811	7,15E-10	0,935	0,179

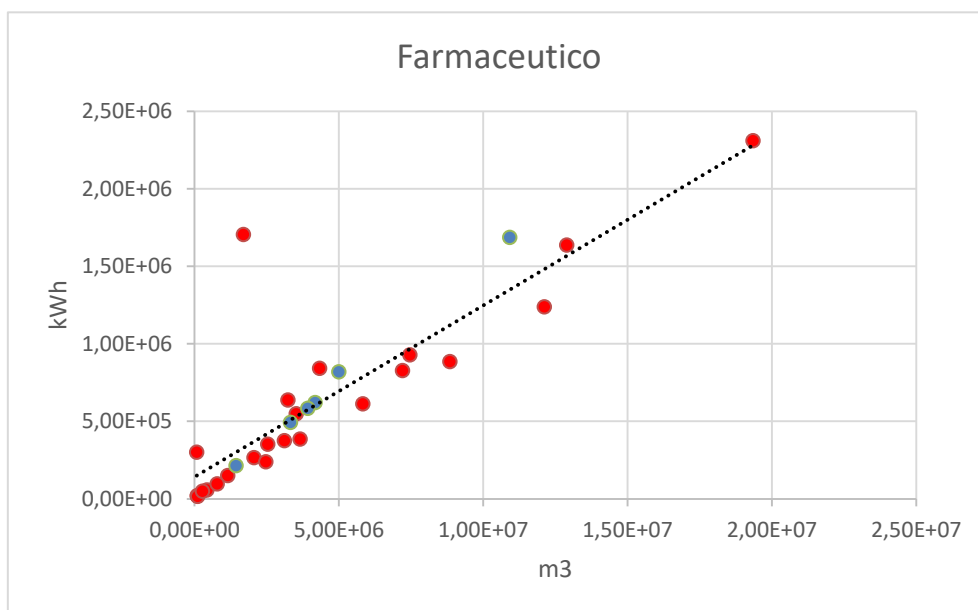


Figura 16 - Grafico di dispersione dei valori di consumo energetico per l'aria compressa espresso in kWh in funzione della quantità di aria compressa prodotta espressa in m³. In rosso i valori relativi a dati stimati, in blu i valori dei dati misurati, in nero la linea di tendenza; settore farmaceutico.

2.3.7 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 17 e 18 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per l'indicatore descritto precedentemente e calcolato sulla totalità dei dati del settore oppure sulla parte dei valori derivanti da misurazioni.

Per il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori, in base al test di normalità di Anderson-Darling, risultano non normali e non simmetriche, soprattutto per quanto riguarda l'insieme dei dati misurati. Gli outliers sono stati preventivamente eliminati in quanto erano visibilmente fuori controllo e modificavano radicalmente gli istogrammi rendendoli poco rappresentativi del campione.

Inoltre per quanto riguarda i dati provenienti da misurazioni è necessario dire che questi non rappresentano un campione rappresentativo considerata la scarsità di dati disponibili.

L'analisi di regressione (tabella 9) mostra risultati omogenei per tutti i dati analizzati.

La distribuzione sul piano cartesiano, con annessa retta di regressione (figura 19), mostra una tendenza delineata soprattutto di tutti i valori. I valori dovuti a misurazioni, che sono i più affidabili, seguono fedelmente l'andamento della retta quindi anche i dati stimati rispecchiano in maniera abbastanza fedele l'andamento del settore.

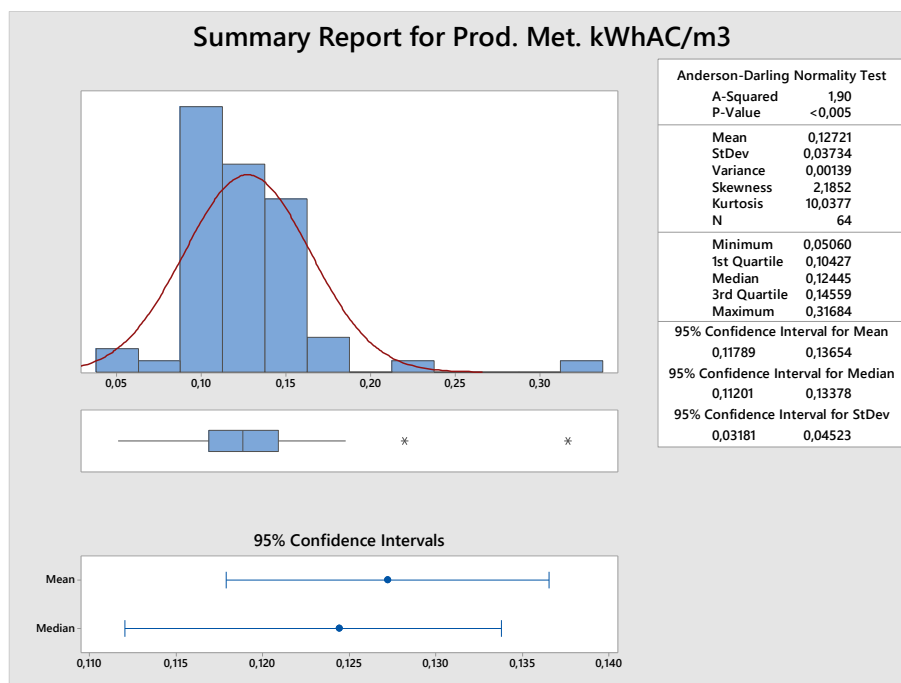


Figura 17 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati misurati), settore produzione metalli

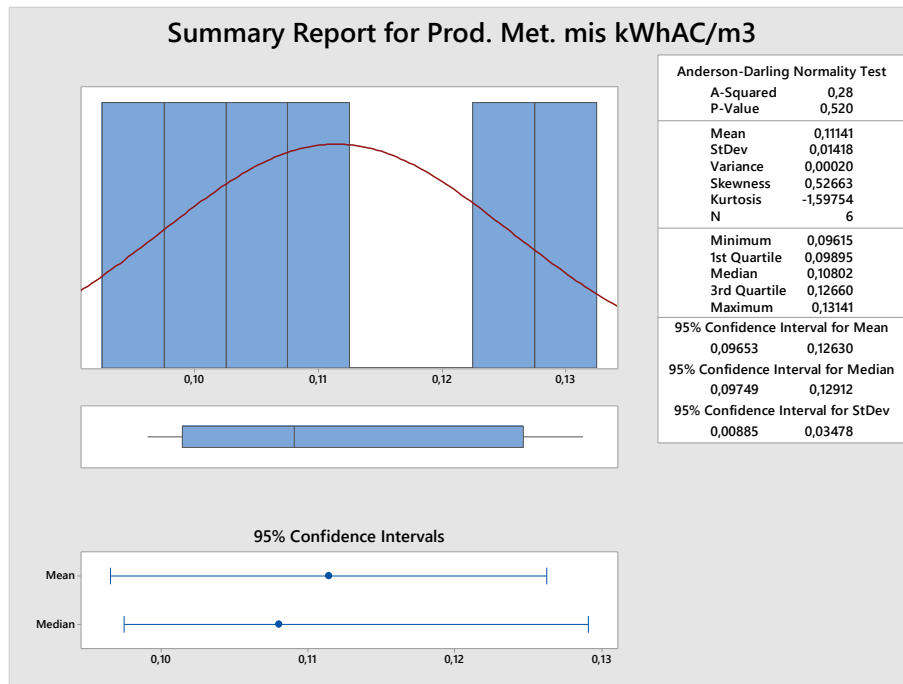


Figura 18 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente solo i siti con dati misurati, settore produzione metalli

Tabella 9 - Descrizione del coefficiente di correlazione nel caso della totalità dei dati, solo dati misurati, solo dati stimati. Descrizione della significatività dei coefficienti di regressione lineare considerando tutti i dati disponibili o soltanto i dati misurati; settore produzione metalli

Settore	Correlazione			Regressione Lineare			
	Totale	Misurato	Stimato	Totale		Misurato	
				Intercetta	Pendenza	Intercetta	Pendenza
Prodotti in metallo	0,974	0,978	0,974	0,248	2,67E-44	0,726	5,07E-06

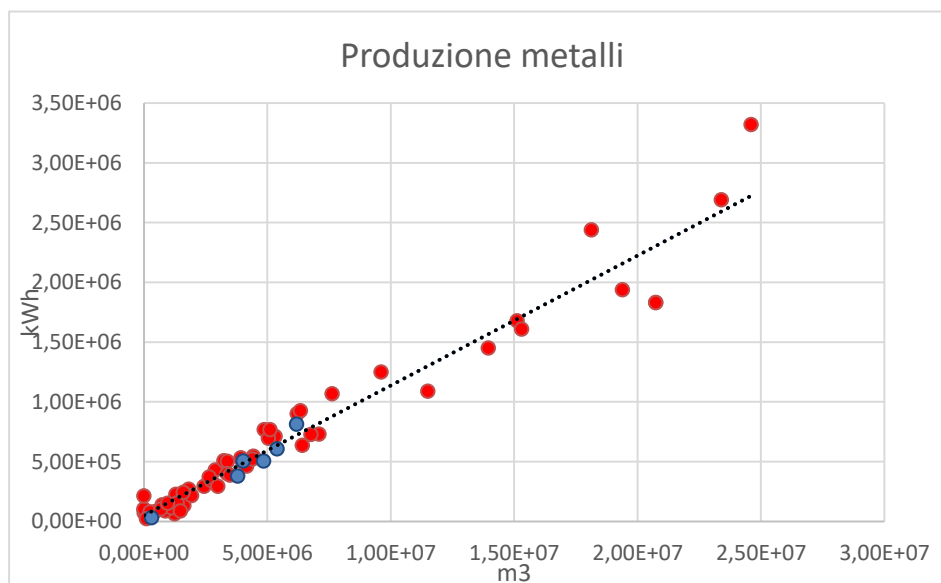


Figura 19 - - Grafico di dispersione dei valori di consumo energetico per l'aria compressa espresso in kWh in funzione della quantità di aria compressa prodotta espressa in m³. In rosso i valori relativi a dati stimati, in blu i valori dei dati misurati, in nero la linea di tendenza; settore produzione metalli.

2.3.8 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 20, 21 e 22 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per l'indicatore descritto precedentemente e calcolato sulla totalità dei dati del settore oppure sulla parte dei valori derivanti da misurazioni.

Per il settore in questione la distribuzione statistica dei valori risulta non normale e non simmetriche sia per i dati totali sia per quelli misurati.

Per il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori, in base al test di normalità di Anderson-Darling, risultano non normali e non simmetriche, soprattutto per quanto riguarda l'insieme dei dati misurati.

Inoltre per quanto riguarda i dati provenienti da misurazioni è necessario dire che questi non rappresentano un campione rappresentativo considerata la scarsità di dati disponibili.

La correlazione ha valori alti per tutti e tre i casi (tabella 10).

La distribuzione sul piano cartesiano mostra una debole tendenza inoltre i valori delle statistiche relative all'affidabilità della regressione dati misurati sono alquanto bassi, indice di una tendenza non perfettamente definita.

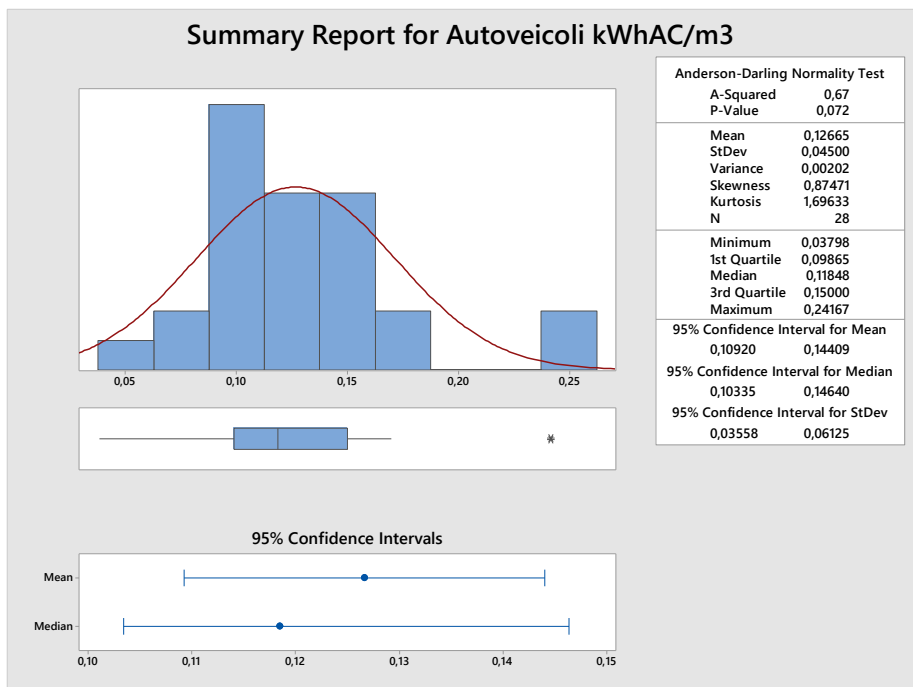


Figura 20 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati misurati), settore autoveicoli

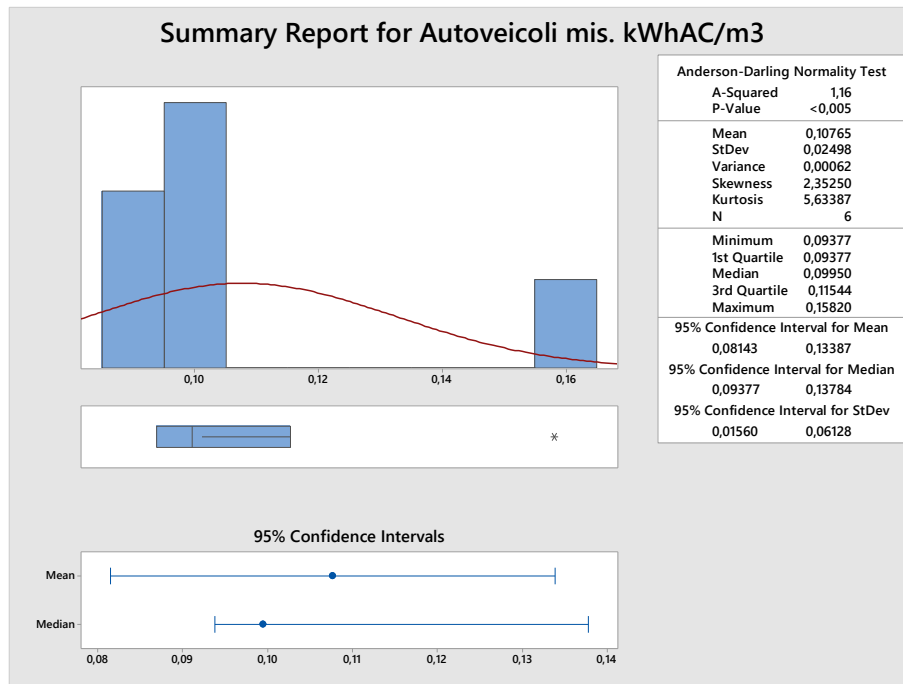


Figura 21 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente solo i siti con dati misurati, settore autoveicoli

Tabella 10 - Descrizione del coefficiente di correlazione nel caso della totalità dei dati, solo dati misurati, solo dati stimati. Descrizione della significatività dei coefficienti di regressione lineare considerando tutti i dati disponibili o soltanto i dati misurati; settore autoveicoli

Settore	Correlazione			Regressione Lineare			
	Totale	Misurato	Stimato	Totale		Misurato	
				Intercetta	Pendenza	Intercetta	Pendenza
Automobilistico	0,949	0,999	0,955	0,049	1,69E-14	0,288	0,027

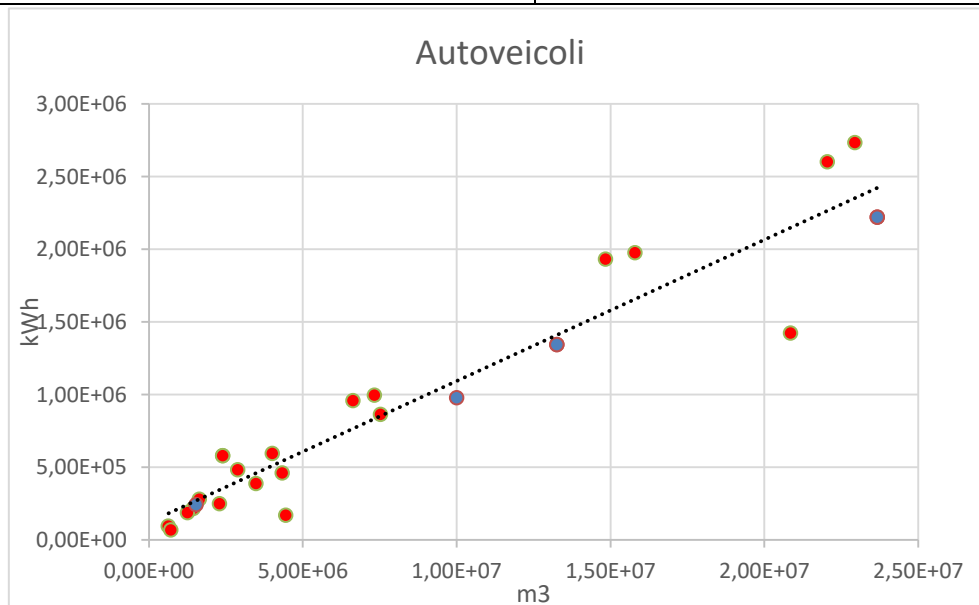


Figura 22 - Grafico di dispersione dei valori di consumo energetico per l'aria compressa espresso in kWh in funzione della quantità di aria compressa prodotta espressa in m³. In rosso i valori relativi a dati stimati, in blu i valori dei dati misurati, in nero la linea di tendenza; settore autoveicoli.

2.3.9 Industria tessile

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 23, 24 e 25 sono riportate le analisi statistiche e i grafici realizzati per l'indicatore descritto precedentemente e calcolato sulla totalità dei dati del settore oppure sulla parte dei valori derivanti da misurazioni. Gli outliers sono stati preventivamente eliminati in quanto erano visibilmente fuori controllo e modificavano radicalmente gli istogrammi rendendoli poco rappresentativi del campione. Questi ultimi 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 il settore in questione le distribuzioni statistiche dei valori, in base al test di normalità di Anderson-Darling, risultano non normali e non simmetriche.

L'indice di correlazione ha un valore alto per tutti i 3 casi analizzati: totale, misurato e stimato. La distribuzione sul piano cartesiano, con annessa retta di regressione, mostra una tendenza delineata soprattutto dai valori dovuti a stime. I valori dovuti a misurazioni, che sono i più affidabili, sono quasi tutti al di sotto della linea di tendenza, ciò denota alcune difficoltà nell'analisi che va approfondita ulteriormente considerata anche la scarsità di dati disponibile.

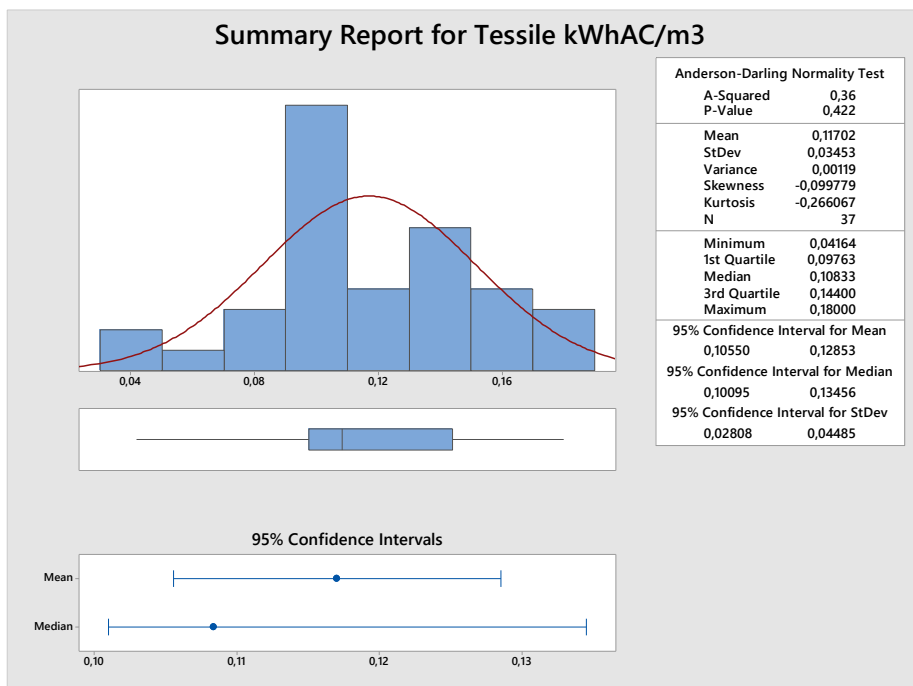


Figura 23 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente tutti i siti (compresi quelli con dati misurati), settore tessile

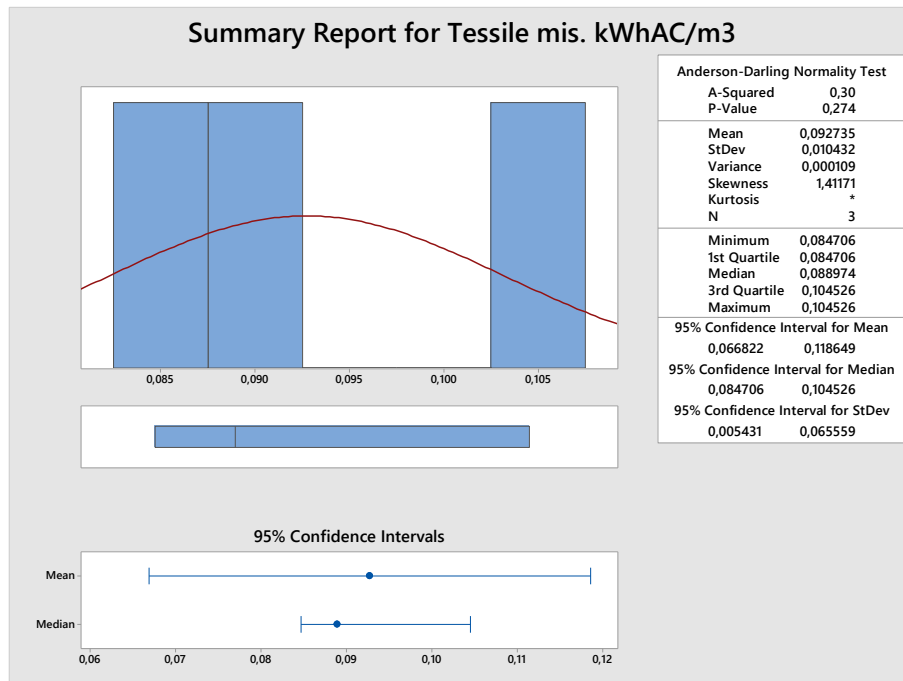


Figura 24 - Analisi statistica dei valori dell'indicatore kWh_e AC/m³ AC per il campione contenente solo i siti con dati misurati, settore tessile

Tabella 11 - Descrizione del coefficiente di correlazione nel caso della totalità dei dati, solo dati misurati, solo dati stimati. Descrizione della significatività dei coefficienti di regressione lineare considerando tutti i dati disponibili o soltanto i dati misurati; settore tessile

Settore	Correlazione			Regressione Lineare			
				Totale		Misurato	
	Totale	Misurato	Stimato	Intercetta	Pendenza	Intercetta	Pendenza
Tessile	0,997	1,000	0,999	0,142	1,30E-42	0,947	0,118

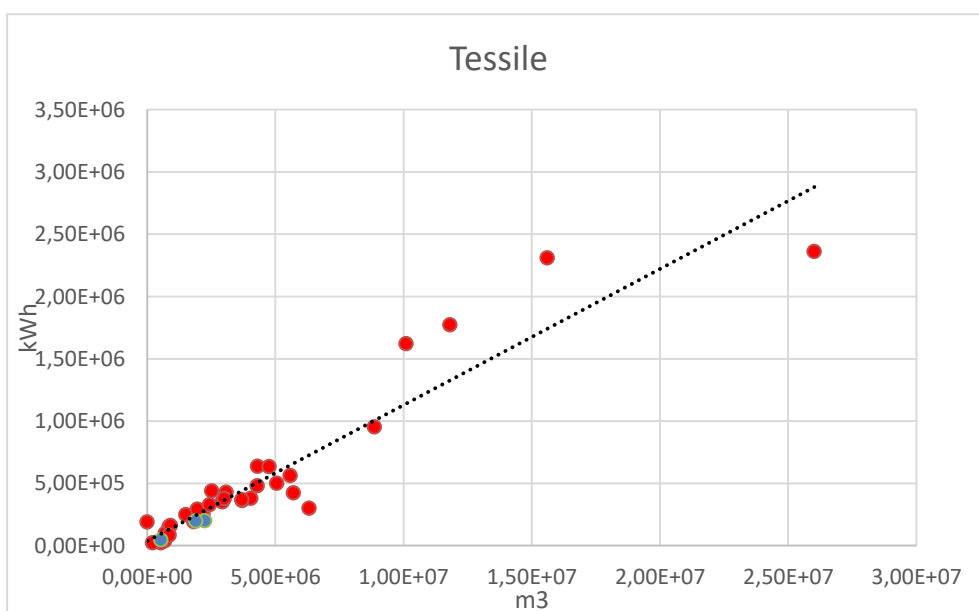


Figura 25 - Grafico di dispersione dei valori di consumo energetico per l'aria compressa espresso in kWh in funzione della quantità di aria compressa prodotta espressa in m³. In rosso i valori relativi a dati stimati, in blu i valori dei dati misurati, in nero la linea di tendenza; settore tessile.

2.4 Proposta metodologica

Dalle prime analisi sono state individuate alcune variabili che possono falsare il benchmark per questo occorre perfezionare la raccolta dei dati aggiungendo alcune importanti ulteriori informazioni. Per ottenere un'analisi di buon livello è necessario conoscere alcune ulteriori informazioni sulle condizioni di generazione dell'aria compressa, informazioni sul parco compressori e sulla loro gestione. Considerati, quindi, i risultati ottenuti dalle analisi descritte, il problema fondamentale del dataset è la generale mancanza di dati certi dovuti a misurazioni. Per questo motivo si è deciso di sviluppare uno standard per indagare il livello di prestazioni dei sistemi appartenenti alle varie aziende anche se appartenenti a settori industriali completamente diversi.

Per intraprendere un'analisi di benchmark completa è possibile utilizzare vari tipi di indicatori utilizzando diverse tipologie di dati. Il primo tipo di indicatori è utile per calcolare le prestazioni dei diversi sistemi secondo [42].

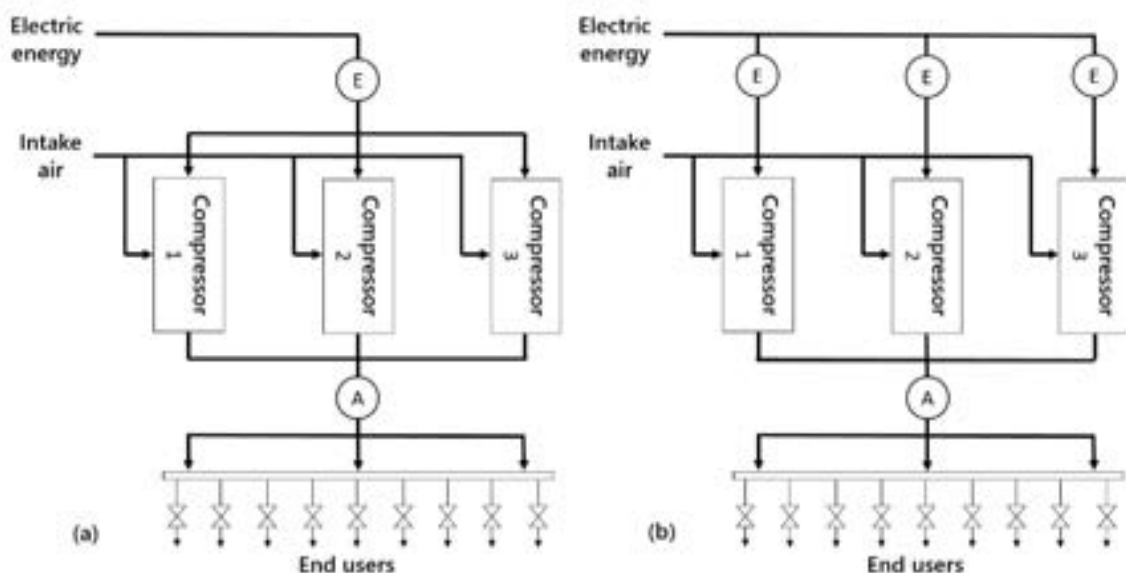


Figura 26 – Configurazione minima (a) e ottimale (b) per un sistema di misura delle prestazioni del reparto di generazione dell'aria compressa

Per calcolare altri indicatori di prestazioni sarebbe necessario avere:

- maggiore disponibilità di dati provenienti da misurazioni certe e continue; in questo caso potrebbero essere definiti due sistemi di misurazione della quantità di energia utilizzata e dell'aria prodotta. Nello specifico può essere definita una configurazione minima per misurare la quantità di aria compressa prodotta da tutti i compressori e l'energia utilizzata da tutto il parco dei compressori comprendendo anche le pompe del sistema di raffreddamento (figura 26a). Contestualmente è possibile definire anche un sistema ottimale di misurazione che monitora le varie utenze elettriche singolarmente così da rendere possibili i dati per un'analisi più approfondita delle prestazioni e del rendimento in funzione del profilo di carico e della sequenza di accensione dei motori (figura 26b). Con queste due configurazioni è possibile calcolare in maniera esatta i vari indici di performance definiti in precedenza come il rapporto tra il consumo elettrico dovuto al reparto aria compressa e il consumo generale di impianto ($\text{kWh}_e \text{ AC} / \text{kWh}_e \text{ TOT}$) e il rapporto tra consumo elettrico dell'impianto aria compressa e il quantitativo di aria generata in m^3 ;
- informazioni sulla pressione dell'aria compressa generata e sui livelli di pressione dell'impianto. Nel caso in cui il sistema abbia livelli di pressione multipli, sarebbe utile sviluppare un sistema di analisi statistica che consideri l'effetto della pressione e sviluppa diversi parametri di riferimento in base al

livello di pressione. Un ulteriore percorso potrebbe essere lo sviluppo di un sistema di riferimento più complesso capace di livelli di pressione diversi;

- ulteriori informazioni sul parco compressori come ad esempio: le dimensioni del compressore, il tipo di compressore, il tipo di modulazione (presenza di inverter o no, presenza o meno di una centralina elettronica per l'accensione e l'arresto di singoli compressori);
- ulteriori informazioni, quando possibile, sulla percentuale di consumo energetico di ogni compressore rispetto al totale oppure avere almeno una stima delle ore di esercizio annuali del singolo compressore;
- un'indicazione di massima della variabilità della domanda di aria nel tempo attraverso l'installazione, probabilmente molto complessa, di misuratori di portata sulle singole utenze o almeno sugli snodi dei vari settori di produzione nel caso in cui l'aria compressa serva vari reparti. In questo modo sarebbe possibile confrontare le prestazioni dei diversi sistemi, fornire informazioni sui sistemi più efficienti e sui risparmi che si possono ottenere utilizzando questi sistemi;
- ulteriori informazioni sulla gestione del sistema. Può essere molto utile conoscere alcune informazioni sulla pianificazione della manutenzione, sull'analisi dei costi e, soprattutto, su qualsiasi possibilità di efficienza energetica.

La seconda tipologia di indicatori vuole studiare e confrontare varie caratteristiche dell'aria compressa come: tipo di utilizzo, qualità e pressione. I dati provenienti da aziende potrebbero essere utilizzati per un clustering preliminare e successivamente eseguire l'analisi cluster per cluster.

Utilizzando i dati provenienti dalle indagini, è possibile stimare il potenziale per il risparmio energetico e una valutazione generale del livello di prestazione dell'azienda nel tempo.

L'introduzione di un sistema di misura orientato alle prestazioni è il primo passo nello sviluppo di un sistema di gestione delle prestazioni energetiche e di un sistema informativo basato su un sistema di gestione dell'energia [7].

Ogni azienda può anche sviluppare una linea di base per il benchmarking delle prestazioni interne, monitorarle attraverso l'utilizzo di grafici di controllo e migliorarli. Il metodo di regressione che utilizza dati misurati può aiutare le aziende a analizzare il loro consumo elettrico e grazie ai grafici di controllo e CUSUM possono avere un sistema di monitoraggio in tempo reale.

Questo tipo di procedura consente di avere segnali di allarme relativi a malfunzionamenti e consumi eccessivi che garantiscono risparmi significativi [43].

2.5 Disseminazione dei risultati

Il lavoro descritto in questa parte è stato oggetto di divulgazione scientifica attraverso:

- Presentazione alla conferenza "The 8th International Conference on Applied Energy – ICAE2016" con titolo "Assessing and improving Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use: findings from an explorative study in large and energy-intensive industrial firms" successivamente pubblicato su "Procedia" come atto di convegno.
- Articolo sulla rivista internazionale "Applied Energy" con titolo "Explorative study on Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use: First steps toward the creation of a benchmarking system for large and energy-intensive industrial firms", vincitore del premio "Best Paper 2017".
- Presentazione alla conferenza "World Engineers Summit – Applied Energy Symposium & Forum: Low Carbon Cities & Urban Energy Joint Conference, WES-CUE 2017, 19–21 July 2017, Singapore" avente come titolo: "Monitoring compressed air systems energy performance in industrial production: lesson learned from an explorative study in large and energy-intensive industrial firms." Del lavoro, considerato l'interesse suscitato, è stata richiesta la versione estesa per una pubblicazione su rivista internazionale.

2.6 Conclusioni del capitolo

Nel presente capitolo viene proposta l'applicazione di una metodologia di benchmarking dell'efficienza energetica dei sistemi di produzione e trasporto di aria compressa, basata sui valori di consumo di energia elettrica (misurati o stimati) per la produzione dell'aria compressa e sui valori di produzione di aria compressa.

Il lavoro mostra l'applicazione della metodologia sui dati relativi a 9 settori industriali di interesse. I dati di consumo interessano l'intero comparto aria compressa e non soltanto quello relativo alla generazione (che sicuramente è il più influente sul totale).

Per quanto riguarda la valutazione dei risultati ottenuti è chiaramente visibile dai grafici, e dai relativi parametri di supporto, che in nessun campione è presente una distribuzione dei dati di tipo normale, indicazione di situazioni anomale o comunque non ben delineate.

Considerando inoltre la tipologia di dati utilizzati è chiaramente valutabile l'impossibilità di utilizzare un indicatore di performance, quale il rapporto energia assorbita su aria compressa prodotta (kWh AC/m³AC), dai i dati derivanti dalla campagna di raccolta dell'ENEA poiché nonostante siano in numero adeguato, derivano da stime e calcoli effettuali con modalità incognite e ciò crea grandi indeterminanze nella significatività dei dati.

Come già descritto nel report precedente l'indicatore utilizzato, in tutti casi, pone il suo valor medio in linea con il range definito dall'Unione Europea attraverso il [44]. I valori estremi delle distribuzioni (non considerando gli outliers) assumono tuttavia valori molto più elevati che arrivano a triplicare il valore medio, ciò è ancora una volta indice di una necessità di maggiore chiarezza per quanto il funzionamento dei vari impianti che potrebbe avere rendimenti differenti a seconda del tipo di utilizzo e delle caratteristiche di impianto.

Tale indeterminanza sottolinea anche quanto sia grande la necessità di una strategia di raccolta dati omogenea per tutte le aziende e fondata su campagne di misurazioni effettuate in continuo.

A questo fine il lavoro propone alcune soluzioni impiantistiche e gestionali utili per il miglioramento del database a disposizione arricchendolo di importanti informazioni riguardanti alcuni particolari di funzionamento altrimenti difficilmente deducibili. Si presume che affrontando una raccolta di dati avendo a disposizione uno schema del sistema di misurazione in 2 possibili configurazioni, minima ed ottimale, sia possibile entrare in possesso di dati omogenei, con una buona affidabilità e buon livello di completezza.

3 Conclusioni

Nel presente report sono stati presentati un sistema di linee guida per il miglioramento dell'efficienza dei sistemi di produzione, trasporto ed utilizzo dell'aria compressa e una metodologia di benchmark dell'efficienza energetica.

Partendo dal questionario di maturità sviluppato nella precedente annualità, il lavoro ha dapprima definito delle buone pratiche di settore ricorrendo all'analisi bibliografica e successivamente ha definito delle linee guida a partire dalle domande stesse.

Le linee guida vogliono essere un punto di riferimento per il processo di miglioramento dell'efficienza energetica.

La strategia di utilizzo delle linee guida fa parte di una procedura articolata in tre fasi:

- somministrazione del questionario di autovalutazione (modello di maturità) all'azienda che vuole intraprendere il percorso di miglioramento dell'efficienza energetica;
- individuazione degli aspetti di maggiore debolezza (minore maturità) per quanto riguarda l'efficienza energetica attraverso l'analisi delle risposte date al questionario e quindi in base al livello raggiunto rispetto a quello a cui l'azienda aspira nel breve/medio termine. Suggerimento delle linee guida relative all'aspetto più critico;
- realizzazione di strumenti di supporto delle decisioni per facilitare l'azienda nella scelta delle azioni da intraprendere (questa fase verrà sviluppata nella prossima annualità).

L'analisi di benchmark è stata proposta per i 9 settori industriali di interesse utilizzando come unità di riferimento il consumo di energia elettrica per volume di aria compressa prodotta (kWhAC/m³AC). Dall'analisi, i dati a disposizione sono risultati inadeguati per delineare un quadro preciso della situazione. Questa difficoltà è dovuta alla scarsità di dati misurati, e quindi certi, relativi a consumi elettrici e alla produzione di aria.

La grande percentuale di dati stimati ha reso quindi necessaria un'azione ulteriore che ha portato alla definizione di uno schema di impianto di misurazione per la produzione di aria compressa e per il consumo di energia elettrica che ne deriva. Per il sistema di misurazione sono state delineate 2 possibili configurazioni, una minima ed una ottimale, che possono facilitare la raccolta sistematica di dati e la successiva analisi.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] M. Benedetti, I. Bertini, F. Bonfà, S. Ferrari, D. Santino, and S. Ubertini, "Assessing and improving Compressed Air Systems' energy efficiency in production and use: findings from an explorative study in large and energy-intensive industrial firms" ICAE2016 Oct 8-11, Beijing, China.
- [2] E. Worrell, P. Blinde, M. Neelis, E. Blomen, and E. Masanet, "Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry - An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers" Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, 2011.
- [3] E. Worrell and C. Galitsky, "Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers" Energy Star, 2013.
- [4] A. Vuorio, J. Stoop, and C. Johnson, "The need to establish consistent international safety investigation guidelines for the chemical industries" Saf. Sci., vol. 95, pp. 62–74, 2017.
- [5] K. Ritter, S. Nordrum, M. T. McMahon, C. Loreti, T. M. Shires, and M. Lev-On, "Consistent guidelines, methodologies and tools for estimating greenhouse gas emissions in the petroleum industry BT-Greenhouse Gas Control Technologies 7" Oxford: Elsevier Science Ltd, 2005, pp. 2341–2344.
- [6] J. P. Rudolph and C. Emmelmann, "Analysis of Design Guidelines for Automated Order Acceptance in Additive Manufacturing" Procedia CIRP, vol. 60, pp. 187–192, 2017.
- [7] V. Introna, V. Cesarotti, M. Benedetti, S. Biagiotti, and R. Rotunno, "Energy Management Maturity Model: An organizational tool to foster the continuous reduction of energy consumption in companies" J. Clean. Prod., vol. 83, pp. 108–117, 2014.
- [8] "Best practice, migliore pratica" www.treccani.it, consultato settembre 2017.
- [9] R. Saidur, N. A. Rahim, and M. Hasanuzzaman, "A review on compressed-air energy use and energy savings" Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 14, no. 4, pp. 1135–1153, 2010.
- [10] R. Dindorf, "Estimating Potential Energy Savings in Compressed Air Systems" Procedia Eng., vol. 39, pp. 204–211, 2012.
- [11] Atlas Copco, "Compressed air manual - 8th edition", 2010.
- [12] J. R. Neale and P. J. J. Kamp, "Compressed air system best practice programmes: What needs to change to secure long-term energy savings for New Zealand?" Energy Policy, vol. 37, no. 9, pp. 3400–3408, 2009.
- [13] S. Mousavi, S. Kara, and B. Kornfeld, "Energy efficiency of compressed air systems" Procedia CIRP, vol. 15, pp. 313–318, 2014.
- [14] Compressed air challenge, "Introduction to best practices for compressed air systems".
- [15] Sustainability Victoria, "Energy Efficiency. Best Practice Guide. Compressed Air Systems", 2009.
- [16] CARE+, "Il manuale delle migliori prassi per l'efficienza energetica", 2010.
- [17] Q. Hongbo and A. McKane, "Improving energy efficiency of compressed air system based on system audit" Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.
- [18] R. Cipollone and D. Vittorini, "Energy Saving Potential in Existing Compressors" Energy, 2016.
- [19] D. M. McCulloch, F. Moskowitz and R. Marshall, "The 14 Rs of compressed air efficiency." www.plantservices.com/articles/2014/the-14-rs-of-compressed-air-efficiency/?show=all. [20] U.S Department of Energy, "Improving Compressed Air System Performance," Compress. Air Chall., pp.

3–69, 2003.

- [21] Friulair, “I quaderni dell’Aria Compressa”, 2014.
- [22] Carbon Trust, “Maintenance checklist - Compressed Air”
- [23] Sustainable Energy Management, “Energy Management –Implementation”, 2013.
- [24] Bureau of Energy Efficiency, “Compressed Air System” pp. 48–76.
- [25] “Decreto Legislativo 4 luglio 2014, n. 102”, 2014.
- [26] “Direttiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012”, 2012.
- [27] “DECRETO-LEGGE 22 giugno 2012 , n. 83”, 2012.
- [28] G. Festel and M. Würmseher, “Benchmarking of industrial park infrastructures in Germany” *Journal of Cleaner Production*, vol. 70, pp. 15-26, 2014
- [29] J. Ke, L. Price, M. McNeil, N. Z. Khanna, and N. Zhou, “Analysis and practices of energy benchmarking for industry from the perspective of systems engineering” *Energy*, vol. 54, pp. 32–44, 2013.
- [30] W. Chung, “Review of building energy-use performance benchmarking methodologies,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 5, pp. 1470–1479, 2011.
- [31] D. Phylipsen, K. Blok, E. Worrell, and J. De Beer, “Benchmarking the energy efficiency of Dutch industry: An assessment of the expected effect on energy consumption and CO2 emissions,” *Energy Policy*, vol. 30, no. 8, pp. 663–679, 2002.
- [32] K. W. Mui, L. T. Wong, and L. Y. Law, “An energy benchmarking model for ventilation systems of air-conditioned offices in subtropical climates,” *Appl. Energy*, vol. 84, no. 1, pp. 89–98, 2007.
- [33] L. K. Sahoo, S. Bandyopadhyay, and R. Banerjee, “Benchmarking energy consumption for dump trucks in mines,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1382–1396, 2014.
- [34] W. Chung, Y. V. Hui, and Y. M. Lam, “Benchmarking the energy efficiency of commercial buildings,” *Appl. Energy*, vol. 83, no. 1, pp. 1–14, 2006.
- [35] P. Radgen and E. Blaustein, *Compressed Air Systems in the European Union*. 2001.
- [36] B. W. Ang, “Monitoring changes in economy-wide energy efficiency: From energy-GDP ratio to composite efficiency index,” *Energy Policy*, vol. 34, no. 5, pp. 574–582, 2006.
- [37] S. Longo et al., “Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement,” *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 1251–1268, 2016.
- [38] E. O’Driscoll, D. Og Cusack, and G. E. O’Donnell, “The development of energy performance indicators within a complex manufacturing facility” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 68, pp. 2205–2214, 2013.
- [39] T. T. W. Anderson and D. a. Darling, “Asymptotic theory of certain ‘ goodness of fit’ criteria based on stochastic processes” *Ann. Math. Stat.*, vol. 23, no. 2, pp. 193–212, 1952.
- [40] S. L. Crawford, “Correlation and regression” *Circulation*, vol. 114, no. 19, pp. 2083–2088, 2006.
- [41] Istat, “Classificazione delle attività economiche Ateco 2007”.
- [42] V. Cesarotti, B. D. I. Silvio, and V. Introna, “Plant energy consumption reduction through monitoring and control system based on quality management concepts and tools” MITIP2006, 11-12 September, Budapest.
- [43] V. Cesarotti, S. D. Orazi, and V. Introna, “Improve Energy Efficiency in Manufacturing Plants through

Consumption Forecasting and Real Time Control: Case Study from Pharmaceutical Sector”

[44] European Comission, “Reference document on best available techniques for energy efficiency”.

5 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 ordinario di macchine e sistemi per l'energia e l'ambiente;
- Vito Introna, ricercatore universitario di impianti meccanici;
- Mauro Villarini, ricercatore di macchine e sistemi per l'energia e l'ambiente;
- Andrea Facci, ricercatore di macchine e sistemi per l'energia e l'ambiente;
- Simone Salvatori, dottorando del gruppo di impianti meccanici.