



Ricerca di Sistema elettrico

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

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 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

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

Progetto: "Processi e macchinari industriali"

Obiettivo: B "Efficientamento di processi industriali"

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA

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

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Francesca Bonfà

Responsabile scientifico Università degli Studi della Tuscia: Stefano Ubertini

## Indice

SOMMARIO.....	4
INTRODUZIONE.....	5
1 SPERIMENTAZIONE DEL MODELLO DI MATURITÀ (CASEEMM) SU CASI DI STUDIO AZIENDALI.....	6
1.1 METODOLOGIA.....	7
1.1.1 <i>Selezione delle aziende</i> .....	8
1.1.2 <i>Somministrazione del modello di maturità</i> .....	8
1.2 RISULTATI.....	9
1.2.1 <i>Azienda farmaceutica (1)</i> .....	9
1.2.2 <i>Azienda cartiera</i> .....	13
1.2.3 <i>Azienda farmaceutica (2)</i> .....	16
1.2.4 <i>Azienda del settore alimentare</i> .....	18
1.2.5 <i>Azienda del settore della plastica</i> .....	21
1.3 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	23
2 SVILUPPO DI STRUMENTI DI SUPPORTO ALLE DECISIONI (DSS, DECISION SUPPORT TOOLS).....	25
2.1 INTRODUZIONE.....	25
2.2 STATO DELL'ARTE SUGLI STRUMENTI PER IL SUPPORTO ALLE DECISIONI IN MATERIA DI EFFICIENZA ENERGETICA.....	26
2.3 METODOLOGIA.....	29
2.3.1 <i>Scelta degli strumenti da implementare</i> .....	29
2.3.2 <i>Sviluppo degli strumenti</i> .....	30
2.4 RISULTATI.....	31
2.4.1 <i>Scelta degli strumenti da implementare</i> .....	31
2.4.2 <i>Strumenti sviluppati</i> .....	39
2.5 CONCLUSIONI DEL CAPITOLO.....	57
3 CONCLUSIONI.....	58
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	59
5 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	61
APPENDICE A: CONSIDERAZIONI SUI KPI.....	62

## Sommario

L'utilizzo dell'aria compressa come veicolo di trasporto dell'energia all'interno degli impianti industriali è molto diffuso in tutto il settore produttivo. Come per tutti i servomezzi, l'utilizzo dell'aria compressa non comporta aumento nel valore aggiunto dei beni prodotti. Per questo motivo la produzione, il trasporto e l'utilizzo dell'aria compressa devono essere i più efficienti possibile, così da ridurre al minimo il quantitativo di energia elettrica utilizzata dal sistema. Nonostante la notevole diffusione dei sistemi, spesso il loro buon funzionamento non viene opportunamente considerato portando a far innalzare drasticamente i consumi energetici. Strumenti e metodologie per il benchmark delle prestazioni e il supporto alle decisioni sono ancora difficilmente disponibili e scarsamente diffuse.

Le attività della presente annualità hanno riguardato la continuazione del lavoro svolto nelle due annualità precedenti. Nella prima sono stati definiti alcuni indici di prestazione ed è stato sviluppato un questionario di autovalutazione della maturità aziendale sulla gestione dei sistemi aria compressa. Nella seconda annualità è stata condotta un'analisi di benchmark su 9 settori appartenenti all'industria italiana ed inoltre è stato definito un set di linee guida basate sulle best practices per il settore in grado di facilitare il processo di miglioramento dell'efficienza energetica dei sistemi. L'attività di questa ultima annualità ha riguardato l'utilizzo delle linee guida e delle BP come spunto per lo sviluppo di strumenti software in grado di supportare le aziende nelle decisioni riguardanti la gestione di alcuni sistemi per la produzione di aria compressa.

Tutti gli strumenti sviluppati sono stati verificati su alcuni casi di test scelti per la loro significatività e per la disponibilità di dati.

## Introduzione

Il lavoro presentato in questa relazione è il risultato della terza annualità di un'attività triennale, che vede la collaborazione tra l'Unità Tecnica Efficienza Energetica dell'ENEA e il Centro per l'Innovazione Tecnologica e lo Sviluppo del Territorio (CINTEST) dell'Università degli studi della Toscana. Gli obiettivi principali della collaborazione sono l'individuazione di indici di benchmark e la costruzione di una baseline per settore produttivo, la definizione di linee guida e buone pratiche per la riduzione dei consumi degli impianti di produzione, trattamento, distribuzione e utilizzo dell'aria compressa e la realizzazione di strumenti di supporto alle decisioni (DSS, Decision Support Systems) in grado di indirizzare le aziende di vari settori produttivi verso l'adozione di tali buone pratiche, secondo le modalità e le specifiche esigenze del settore e dell'impianto.

Nel suo sviluppo integrale, l'attività svolta nel triennio ha consentito di definire una procedura che guidi le aziende che vogliono intraprendere un percorso di miglioramento delle prestazioni energetiche. La procedura è stata pensata per essere sufficientemente generale da coprire gran parte dei settori industriali ma al tempo stesso opportunamente diversificata per tenere conto delle esigenze specifiche e soprattutto della maturità nella gestione delle risorse energetica aria compressa della singola azienda.

Nella terza annualità il gruppo di ricerca ha mantenuto le aziende del settore industriale italiano come fulcro attorno a cui far ruotare tutte le attività. Le aziende si sono sempre dimostrate molto vicine al gruppo sia mostrando forte interesse all'argomento e grande apertura alle soluzioni per l'efficientamento, sia fornendo dati di consumi e produzione.

L'attività della presente annualità è articolata nelle due parti di seguito elencate:

1. sperimentazione del modello di maturità CASEEMM (Compressed Air System Energy Efficiency Maturity Model) sviluppato nelle precedenti annualità con un campione di aziende del settore industriale italiano; l'attività ha riguardato interviste e redazione dei report di valutazione della maturità, la validazione dei risultati e l'individuazione di specifici piani di miglioramento;
2. sviluppo di una serie di strumenti di supporto alle decisioni (DSS, Decision Support Systems) in grado di aiutare le aziende nelle scelte in merito al miglioramento dell'efficienza energetica per la produzione e gestione dell'aria compressa industriale, sulla base di valutazioni tecnico-economiche.

L'obiettivo finale del lavoro è 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. Nella prima parte del lavoro, le attività hanno riguardato la definizione e lo svolgimento di una campagna di interviste effettuate in diverse aziende afferenti a diversi settori industriali. Le interviste hanno avuto l'obiettivo di entrare in contatto con le aziende al fine di somministrare il modello di maturità CASEEMM. Dai risultati è stato possibile avere una prima conoscenza del livello di maturità che emerge dall'applicazione del modello ed evidenziare le principali carenze nella valutazione tecnico-economiche delle azioni di miglioramento. Nella seconda parte, l'attività ha riguardato la valutazione delle possibilità di efficientamento attraverso lo sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni. Tali strumenti sono importanti per caratterizzare a livello tecnico-economico gli interventi di efficientamento e fornire alle aziende un feedback sulle potenzialità di ridurre i consumi energetici legati alla generazione, trasporto e utilizzo dell'aria compressa. Lo sviluppo ha visto dapprima una fase di definizione delle possibili opzioni grazie ad una preliminare analisi delle best practices di riferimento e successiva valutazione della possibilità di essere raggiunte grazie all'utilizzo di uno strumento di controllo. Il lavoro è poi proseguito con la selezione degli strumenti più interessanti in base alle caratteristiche di utilizzabilità e impatto, infine ha visto lo sviluppo degli stessi sotto forma di software allo stadio prototipale. Per l'implementazione si è scelto di usare piattaforme ampiamente diffuse e disponibili gratuitamente (es. fogli di calcolo elettronici) così da rendere gli strumenti maggiormente fruibili. Tale sviluppo rappresenta l'ultimo passo per il completamento di una metodologia facilmente sfruttabile dalle aziende per individuare, valorizzare e migliorare l'efficienza energetica dei propri impianti di produzione dell'aria compressa.

## 1 Sperimentazione del modello di maturità (CASEEMM) su casi di studio aziendali

I modelli di maturità sono strumenti che consentono di quantificare il livello di “crescita organizzativa” di un’organizzazione, ovvero il percorso che l’organizzazione persegue per conseguire cambiamenti nel tempo.

Tali strumenti sono quindi un metodo per rappresentare qualitativamente e quantitativamente la capacità di cambiamento di un elemento con l’obiettivo di misurare i miglioramenti rispetto ad una grandezza di interesse [1]. I modelli consentono quindi di valutare il livello di crescita di un’organizzazione in materia di gestione dell’energia ed efficienza energetica e, dopo aver individuato le dimensioni coinvolte nel cambiamento, di monitorarne i progressi nel cammino verso il raggiungimento dei propri obiettivi. Per maturità, in questo ambito, si intende la capacità di gestire al meglio l’utilizzo di energia basandosi sulle migliori pratiche e sulle migliori tecnologie presenti.

Nel corso degli anni numerose organizzazioni ed enti di ricerca hanno proposto modelli e strumenti interessanti per la valutazione autonoma dell’efficienza energetica e della maturità in materia di gestione dell’energia e delle tecnologie disponibili. Alcuni esempi di questo tipo di applicazione sono le soluzioni - proposte da Carbon Trust [2], dall’Osservatorio Italiano sull’Energy Management [3], da Energy Star [4] e da molte altre organizzazioni.

Nonostante il tentativo delle organizzazioni citate, in molti casi i lavori non hanno portato allo sviluppo di strumenti strutturati al meglio e che consentono di effettuare analisi dettagliate soprattutto nel caso in cui l’obiettivo sia controllo ed il miglioramento del funzionamento di una singola utility.

In base alle problematiche evidenziate nello studio della letteratura tecnico-scientifica, il modello di maturità realizzato consente l’assessment del livello di efficienza energetica dei sistemi di produzione e trasporto dell’aria compressa per uso industriale. Il modello permette di quantificare quale sia il livello di crescita e di sviluppo dell’organizzazione in esame sia su aspetti di carattere generale sia rispetto alla diffusione e l’implementazione delle migliori pratiche e delle migliori tecniche. La struttura del modello è quella di un questionario a risposta chiusa dalla cui valutazione è possibile definire in via autonoma il livello di maturità raggiunta. Per la creazione del questionario si è scelto di adottare una struttura di tipo a stadi in maniera tale da consentire una più immediata comprensione dei risultati più facilmente interpretabili. I risultati sono forniti in forma grafica, più facile e sintetica per l’utente aziendale e prevedono l’analisi dello sviluppo dell’azienda lungo i livelli e le dimensioni, nonché l’identificazione di un possibile percorso di sviluppo.

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

Le quattro dimensioni di maturità sono:

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

La prima dimensione considera differenti aspetti tra cui la consapevolezza del personale, le conoscenze utili alla gestione dei miglioramenti e le competenze per una gestione ottimale dell’energia.

La seconda dimensione comprende la conoscenza di metodi e strumenti per poter migliorare l’efficienza dei sistemi, e il tipo di approccio utilizzato tra quelli definiti in letteratura: Quick Fixes, Energy Projects e Comprehensive Energy Management. I tre approcci denotano una maturità crescente dell’organizzazione.

La terza dimensione considera le modalità di gestione delle prestazioni e la tipologia di sistema informativo disponibile all’organizzazione e comprende anche la presenza di figure all’interno dell’organizzazione che

abbiano la responsabilità di guidare l'intera organizzazione al conseguimento degli obiettivi prefissati in termini di efficienza energetica del Sistema Aria Compressa.

La quarta dimensione fa riferimento al tipo di valutazione che l'organizzazione fa a proposito degli interventi di efficientamento dei sistemi. La valutazione viene fatta soprattutto in base ad aspetti tecnici ed economici e con il livello di maturità crescente cresce anche la consapevolezza e l'attitudine agli interventi di efficientamento.

Per ogni dimensione, sono stati definiti cinque livelli di maturità:

1. Iniziale: l'azienda non si interessa dei consumi del sistema aria compressa;
2. Occasionale: l'azienda si interessa dei consumi ed arriva alla nomina di un responsabile dell'impianto;
3. Sistemático ma non continuo: l'organizzazione sviluppa delle strategie di efficientamento;
4. Integrato: l'azienda attua in maniera continua e rigorosa le strategie di efficientamento;
5. Ottimizzato: il sistema è stabile ed il miglioramento continuo.

Come suggerisce la sequenza dei livelli, le capacità richieste all'organizzazione rispetto alle differenti dimensioni, crescono di intensità e complessità con il livello di maturità.

Il risultato dell'assessment, visto come indicatore di crescita del sistema di cui si è proposta la valutazione, può essere considerato come il punto di partenza per il suggerimento di una strategia di crescita basata sulla promozione di alcune linee guida utili per il raggiungimento del livello desiderato. Come descritto nella attività dell'anno precedente, viene definita quindi una metodologia completa di analisi delle performance e una strategia di miglioramento dell'efficienza energetica ed in generale del modo di gestire il sistema di produzione dell'aria compressa.

Le differenze costruttive e gestionali dei vari impianti produttivi rendono necessaria la conoscenza del singolo caso con un livello di dettaglio difficilmente raggiungibile attraverso descrizioni sommarie o semplici dati numerici di consumi. Sopralluoghi e contatti diretti con le aziende consentono di comprendere al meglio la situazione generale delle aziende. La conoscenza delle tipologie di impianti e la conoscenza delle peculiarità nella gestione sono fattori fondamentali per poter valutare al meglio le potenzialità di miglioramento del processo. Inoltre, gli incontri con le aziende consentono una attenta valutazione della rispondenza del livello di maturità che emerge dall'applicazione del modello e quanto rilevato dai sopralluoghi.

Come già detto, i sopralluoghi fornendo una visione di insieme degli impianti permettono di stabilire con maggiore attenzione quali siano le misure da intraprendere per innalzare il livello di maturità e migliorare le prestazioni dei sistemi.

L'obiettivo di questa parte di lavoro è quindi descrivere la strategia che ha portato ad entrare a contatto con le aziende che costituiscono il tessuto industriale italiano, arrivare ad una conoscenza approfondita delle caratteristiche e delle problematiche degli impianti di produzione di aria compressa in uso e individuare alcune misure utili per il miglioramento delle prestazioni e la diminuzione dei consumi energetici.

## 1.1 Metodologia

La disponibilità di un potente strumento di analisi del livello di maturità, unitamente alla conoscenza delle prestazioni energetiche di molte aziende del territorio italiano, dovuto all'analisi dei consumi svolte nelle annualità precedenti, ha reso possibile la definizione di una strategia di lavoro che prevedesse il contatto con l'azienda e la somministrazione del modello di maturità.

La metodologia delineata ha previsto quindi:

- La selezione di un gruppo di aziende alle quali proporre l'assessment attraverso il modello CASEMM;



- La somministrazione del questionario alle aziende che si sono rese disponibili attraverso intervista al loro personale da parte di esperti di applicazione del metodo CASEEMM;
- La valutazione del livello di maturità delle aziende secondo il modello CASEEMM per le aziende che hanno fornito tutte le informazioni necessarie;
- L'elaborazione e l'invio alle aziende del risultato dell'assessment e di un feedback sul loro operato in materia di miglioramento dell'efficienza energetica anche attraverso il suggerimento di linee guida.

Tale metodologia è stata pensata per coinvolgere maggiormente le aziende all'interno del processo di efficientamento del settore aria compressa e cercare di rafforzare quel contatto che era già iniziato nel momento della consegna dei risultati degli audit energetici del 2015.

### 1.1.1 Selezione delle aziende

Le aziende che componevano il campione disponibile alla valutazione sono le stesse che sono state analizzate nelle precedenti annualità.

Come noto i dati dei consumi sono relativi centinaia di aziende appartenenti a 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.

Tale differenziazione all'interno del campione è di fondamentale importanza per la possibilità di identificare differenti problematiche derivanti da utilizzi diversificati dell'aria compressa. A partire da questo campione è stato selezionato un sottocampione per la somministrazione del questionario da parte dell'ENEA.

### 1.1.2 Somministrazione del modello di maturità

Tale fase ha visto la somministrazione del CASEEMM in maniera tale da entrare in possesso di una valutazione oggettiva ed univoca del livello di maturità dell'azienda. La compilazione non è avvenuta in modalità self-assessment da parte dell'azienda, ma con l'ausilio e la supervisione degli autori del questionario, in modo tale che da un lato fosse più semplice per l'azienda risolvere alcuni dubbi legati alla formulazione delle domande e dall'altro che fosse possibile per gli autori raccogliere utili feedback sugli stessi.

L'analisi è servita da banco di prova per poter verificare:

- la semplicità di applicazione del modello che prevede domande alle quali il personale aziendale coinvolto nella gestione energetica può rispondere facilmente;
- la generalità del modello che si presta ad essere applicato indipendentemente dalle dimensioni aziendali, dalle caratteristiche dell'impianto e dal livello di maturità dell'organizzazione;
- la capacità del modello di discriminare i diversi livelli di maturità aziendale;
- la capacità del modello di analizzare l'azienda dai diversi punti di vista corrispondenti alle 4 dimensioni che concorrono ad una gestione energetica efficace ed efficiente (Consapevolezza, conoscenza e



competenza; Implementazione “Best Practices” e adozione di “Best Available Technologies”; Approccio metodologico; Gestione delle prestazioni energetiche);

- la capacità del modello di fornire una base di partenza per sviluppare un piano di crescita “personalizzato” per le aziende, individuando le best practices tecniche o gestionali prioritarie da implementare previa valutazione tecnico-economica supportata dai DSS sviluppati nel progetto.

## 1.2 Risultati

Le aziende di cui vengono riportati i risultati poiché maggiormente significative sono:

1. Due aziende operanti nella produzione farmaceutica;
2. Un’azienda operante nel settore alimentare;
3. Un’azienda impegnata nella lavorazione della plastica;
4. Un’azienda impegnata nella produzione di carta.

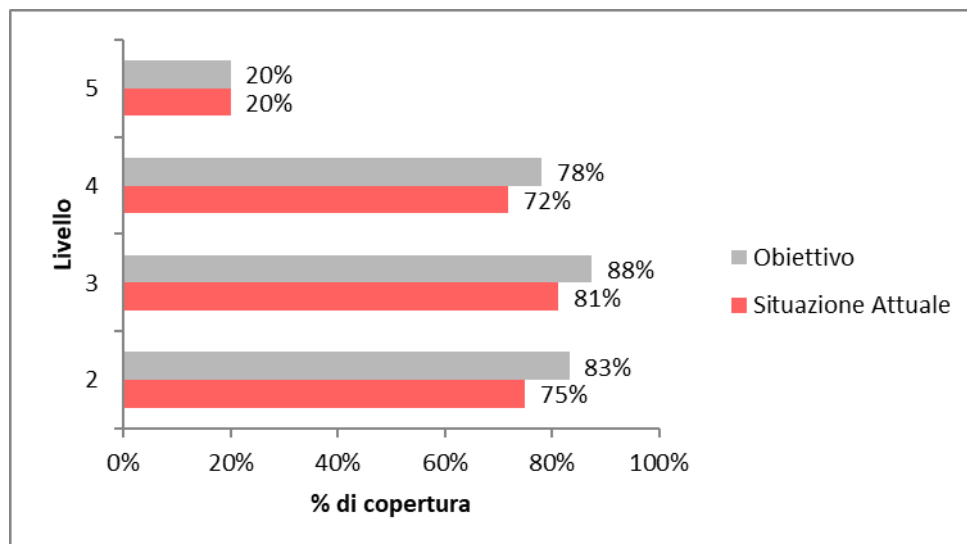
### 1.2.1 Azienda farmaceutica (1)

#### Descrizione impianto

L’organizzazione presa in esame è un’azienda operante nel settore farmaceutico.

#### Risultati della somministrazione del modello di maturità

La somministrazione CASEEMM ha consentito di valutarne il livello di maturità e confrontare i risultati con quelli derivabili da una conoscenza diretta. Durante l’intervista sono stati indagati anche i propositi di miglioramento dell’azienda che sono stati riformulati in termini di obiettivi di miglioramento per livello e per dimensione.



**Figura 1 – Grafico a barre per la valutazione della copertura percentuale dei livelli e della copertura percentuale dei livelli desiderata**

L’esito della valutazione effettuata dal modello di maturità è risultata pienamente coerente con l’impressione derivata dal colloquio con l’azienda, fornendo in particolare i seguenti risultati:

- Indicatore sintetico di maturità. Il valore dell’indicatore è 3.23. Il valore raggiunto è medio-alto e indica che l’azienda si sta muovendo bene verso il miglioramento della gestione dei sistemi e che l’organizzazione è ormai strutturata e ben operante. Il valore obiettivo è di 3.52 e come prevedibile non si discosta molto dal livello attuale. Tale fattore è dovuto alla recente evoluzione dell’azienda e

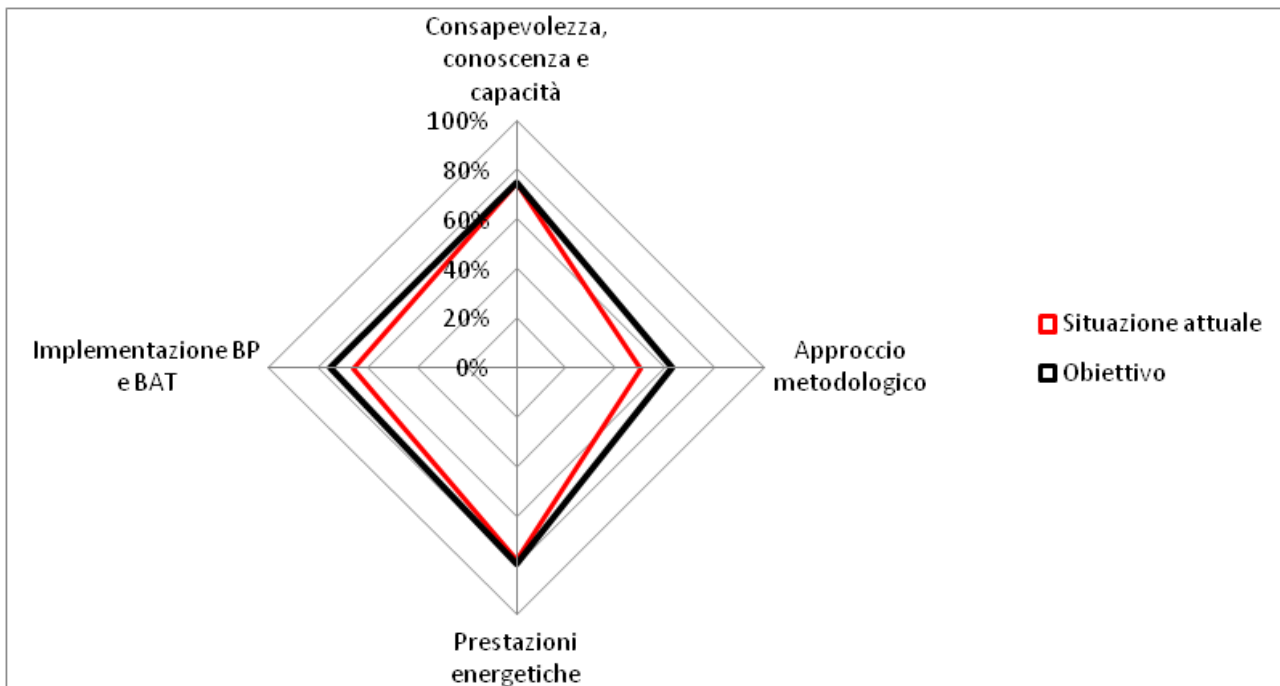
la necessità di consolidare delle procedure e delle metodologie prima di cercare ulteriore miglioramento.

- Grado di copertura dei livelli. Il valore più alto di copertura appartiene al livello 3 (81%), molto vicini il livello 2 (75%) e il livello 4 (72%), l'ultimo livello risulta molto distante (20%). Per un corretto sviluppo di un sistema di gestione dei consumi d'impianto è auspicabile il completamento di circa l'85% ÷ 90% del livello più basso prima di implementare gli strumenti del livello successivo. I risultati indicano un buon livello di sviluppo dell'organizzazione che ha lavorato costantemente e con metodo per raggiungere livelli elevati. Come è intuibile l'organizzazione ha quasi completato il processo per il completamento delle conoscenze di livello 3 e intrapreso la crescita del livello 4. La struttura aziendale può quindi raggiungere le conoscenze dell'ultimo livello in breve tempo. In Figura 1 il riassunto dei risultati.

Considerando la copertura desiderata, la crescita stimata dei vari livelli si rivela essere molto omogenea anche se la crescita ottimale sarebbe rappresentata dal pieno raggiungimento di un livello prima di intervenire sugli aspetti del livello successivo. Tuttavia, l'azienda nel prossimo futuro raggiungerebbe una buona quota di sviluppo per il livello 2, la quota ottimale per il livello 3 e per questo valorizzerebbe anche gli aspetti del livello 4.

- Sviluppo della maturità rispetto alle quattro dimensioni. La crescita del sistema di gestione dovrebbe prevedere uno sviluppo sostanzialmente bilanciato delle diverse dimensioni, rappresentate nel diagramma RADAR riportato in Figura 2. La differenza tra la dimensione dell'approccio metodologico e le restanti tre è maggiore del 20% e rappresenta un'anomalia da dover considerare. In generale, spiccate differenze nella crescita della maturità rispetto alle varie dimensioni indicano che l'azienda non muove in maniera organizzata cercando di approfondire tutti gli aspetti che portano ad un miglioramento dell'efficienza energetica ma approfondisce alcuni aspetti piuttosto che altri. In particolare, il livello inferiore rispetto alla media per quanto riguarda la dimensione dell'approccio metodologico indica che l'azienda dovrebbe approfondire alcuni aspetti riguardanti l'analisi dei dati provenienti dagli strumenti di misurazione e inoltre organizzare al meglio gli interventi possibili e valutare le possibili ricadute che tali interventi possono avere. Per questo motivo le forze qui messe in campo in termini di formazione del personale e sviluppo tecnologico, potrebbero risultare effettivamente non efficaci per il raggiungimento del fine preposto.

Analizzando gli obiettivi di crescita delle 4 dimensioni nel medio termine, si nota come l'organizzazione si stia ancora una volta muovendo nella direzione giusta considerando l'intenzione di sviluppare la dimensione dell'approccio metodologico in maniera molto superiore rispetto alle altre in maniera tale da diminuire la differenza eccessiva tra le varie quote. In particolare l'impegno dell'azienda sarà spostato verso l'analisi attenta dei dati e la crescita di un sistema di monitoraggio delle prestazioni.



**Figura 2 - Grafico radar per la valutazione della copertura percentuale delle dimensioni e della copertura percentuale delle dimensioni desiderata**

### Criticità e proposte di miglioramento

L'azienda si è dimostrata molto attenta alla gestione dell'impianto aria compressa. Ciò viene dimostrato dalle campagne di ricerca delle perdite già effettuate e dalle misure di prestazioni portate avanti in vario modo negli anni precedenti. La decisione di impegnare le proprie risorse per il conseguimento della certificazione ISO 50001 relativa al Sistema di Gestione dell'Energia è un altro aspetto fondamentale che dimostra l'importanza che la gestione dell'energia ricopre all'interno dell'azienda.

In questa ottica alcune soluzioni sono consolidate ed eventuali interventi su queste non vengono considerati, altre sono state già individuate o preventivate, altre ancora possono essere proposte e valutate.

Tra le prime troviamo:

- La presenza di compressori con strategie di controllo load-unload piuttosto che più moderni compressori a velocità variabile gestiti tramite inverter. Questa assunzione è dovuta alla particolare stabilità del carico nel tempo che fa preferire la soluzione tradizionale ad una che utilizza un compressore a velocità variabile. Inoltre, il personale addetto considera gli inverter poco affidabili e quindi potenziali cause dell'aumento del rischio di interruzione di servizio.
- La manutenzione dei sistemi seguendo i tempi ed i modi suggeriti dall'azienda costruttrice secondo una strategia di manutenzione preventiva. Per la manutenzione delle linee e dei sistemi in generale l'azienda ha definito delle procedure di controllo che devono avvenire quotidianamente in maniera tale garantire il buon funzionamento delle apparecchiature.
- La presenza di una consolidata pratica di analisi mensile di tutte le variabili di controllo del sistema (pressione, portata, potenza) in maniera tale da evidenziare e valutare le differenze di comportamento dei sistemi nel tempo.
- L'utilizzo di analisi di dettaglio periodiche sulle prestazioni dei compressori attraverso termografie ed analisi vibrazionali.
- La progressiva sostituzione di alcune utenze finali precedentemente azionate ad aria compressa con altre azionate elettricamente.

Tra le seconde troviamo:

- La possibilità di monitorare le perdite con frequenza maggiore dei 2 anni precedenti. L'azienda ha sottolineato che durante l'arco temporale di 2 o più anni l'impianto di distribuzione può essere modificato secondo le necessità e ogni aggiunta di raccordi e tubazioni potrebbe comportare la creazione di nuove perdite di aria compressa.
- La possibilità di sostituire il proprio compressore più datato, in uso dal 1983, con uno di più recente costruzione. L'azienda sta valutando la convenienza economica della sostituzione di un compressore funzionante ma ormai datato con uno più moderno con prestazioni differenti;
- La possibilità di rinnovamento di quelle parti di rete di distribuzione la cui modifica, variazione di posizione e ampliamento hanno reso soggette a perdite eccessive.

Le possibili proposte di miglioramento sono:

- L'installazione di uno strumento di controllo del consumo elettrico e della portata erogata per ogni compressore. Attualmente il controllo avviene soltanto sulla produzione e sui consumi dell'intero reparto. Come suggerito da molti testi in letteratura tecnica e scientifica, 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. Questo effetto si ha soltanto se la misurazione dei consumi è affiancata da un'attenta analisi dell'andamento nel tempo delle prestazioni valutate ad esempio utilizzando i KPI del settore (si vedano a tal proposito le relazioni delle annualità 2016 e 2017). La misurazione dei dati permette di valutare la presenza di segnali fuori controllo dovuti a peggioramento delle prestazioni, guasti e malfunzionamenti e inoltre consente di valutare in maniera oggettiva i risultati dell'applicazione delle opportunità di efficientamento energetico (EMO).
- L'abbassamento della pressione di set point. Considerando la vastità dell'impianto e l'elevato numero di utenze collegate (l'aria è necessaria per i processi ma anche per l'attuazione delle servovalvole e per lo spostamento del materiale), l'azienda tende a produrre aria con una pressione leggermente superiore alla minima necessaria per evitare malfunzionamenti e blocchi delle apparecchiature. L'azienda potrebbe valutare di condurre alcune prove di funzionamento con pressione di esercizio del sistema leggermente inferiore a quella attuale. Questa pratica diminuirebbe i costi per la produzione di aria compressa tenendo comunque basso il livello di rischio di malfunzionamenti.
- La valutazione delle perdite di carico a fine linea. Considerando la vastità dell'impianto e le continue modifiche a cui la rete è stata soggetta, l'azienda dovrebbe valutare la possibilità di misurare le perdite di carico a fine linea dovute a dimensionamenti non ottimali della rete. Tale valutazione consentirebbe di valutare i costi ed i benefici di un'eventuale modifica della rete di trasporto dell'aria così da ottimizzare i diametri delle tubazioni e minimizzare le perdite di carico fonti di spreco di energia.
- L'adozione di uno strumento per la stima delle perdite di aria e la valutazione della necessità di intervento di manutenzione. Come noto, le perdite di aria compressa sono la più importante causa di spreco di energia, per questo motivo la ricerca delle perdite è la prima azione da intraprendere per iniziare una strategia di efficientamento del sistema. Nel caso in esame, la vastità della rete comporta numerose difficoltà, soprattutto in termini di risorse per quanto riguarda la ricerca delle perdite. Per questo motivo può essere sia tecnicamente ed economicamente vantaggioso stimare l'entità delle perdite di aria compressa attraverso delle prove a vuoto sul sistema ad esempio calcolando il tempo di svuotamento del serbatoio.
- L'utilizzo di uno strumento di raccolta informazioni. L'azienda potrebbe disporre di un registro formale che raccoglie le opportunità di efficientamento individuate non solo durante campagne di ricerca delle perdite ma soprattutto durante l'utilizzo quotidiano dei sistemi. Il registro formale 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.

### 1.2.2 Azienda cartiera

#### Descrizione impianto

L'azienda presa in esame è una cartiera impegnata nella produzione di numerose tipologie di prodotto dalla carta comune a quella per rivestimento di mobili.

#### Risultati della somministrazione del modello di maturità

La somministrazione CASEEMM ha consentito di valutarne il livello di maturità e confrontare i risultati con quelli derivabili da una conoscenza diretta. Durante l'intervista sono stati indagati anche i propositi di miglioramento dell'azienda che sono stati riformulati in termini di obiettivi di miglioramento per livello e per dimensione.

L'esito della valutazione effettuata dal modello di maturità è risultata pienamente coerente con l'impressione derivata dal colloquio con l'azienda, fornendo in particolare i seguenti risultati:

- Indicatore sintetico di maturità. Il valore dell'indicatore è 2.6. Il valore rappresenta un livello medio e riassume a pieno la situazione dell'azienda. Il livello di organizzazione è buono ed il valore medio indica che l'organizzazione si sta muovendo verso il miglioramento della propria situazione avendo a disposizione una struttura organizzativa consapevole delle necessità. Il valore obiettivo di 3.75 è un livello alquanto elevato, decisamente sfidante nel breve termine e potrà essere raggiungibile attraverso un lavoro ben organizzato secondo le linee guida dettate.
- Grado di copertura dei livelli. Il valore più alto di copertura appartiene al livello 3 (63%), vicino il livello 2 (56%), il livello 4 (47%) e l'ultimo livello (40%) risultano moderatamente distanti. L'omogeneità nei valori indica che l'azienda non ha lavorato per cercare di completare i livelli più bassi e passare al successivo. Ciò indicherebbe uno sviluppo non organico infatti l'organizzazione dovrebbe concentrare i propri sforzi per il completamento di un livello prima di passare al successivo. Questa metodologia porterebbe a non concentrare gli sforzi su un solo aspetto portando ad una crescita omogenea tutta l'organizzazione.

Per quanto riguarda la copertura desiderata dei vari livelli, la crescita dall'azienda nel medio termine porta a risultati ancora omogenei facendo aumentare i valori di circa il 13% facendo arrivare la copertura del livello 2 al 69%, del livello 3 al 77%, del livello 4 al 40% e del livello 5 ottimisticamente al 100%. L'analisi di questi dati conferma la volontà dell'azienda di ottenere miglioramenti considerevoli ma al tempo stesso è sintomo probabilmente di una percezione non chiara del proprio livello di maturità e di una mancanza di consapevolezza di non aver ancora completato la copertura dei livelli più bassi. Riuscire a coprire i livelli più elevati senza aver prima completato buona parte dei livelli più bassi può infatti risultare decisamente inefficiente se non addirittura impossibile. I risultati sono raccolti in Figura 3.

- Sviluppo della maturità rispetto alle quattro dimensioni. La crescita del sistema di gestione dovrebbe prevedere uno sviluppo sostanzialmente bilanciato delle diverse dimensioni, rappresentate nel diagramma RADAR riportato in Figura 4. La differenza tra la dimensione della performance energetica e le altre tre maggiore del 20% è un'anomalia da dover considerare. In particolare, tale risultato è dovuto soprattutto alla mancanza all'interno dell'azienda di un sistema di misurazione dell'aria compressa prodotta (è presente solo un misuratore dei consumi elettrici).

Lo sviluppo desiderato invece mostra invece come la situazione generale porti ad un certo equilibrio nella crescita dei vari aspetti dimostrando grande attenzione verso l'aspetto delle performance energetiche. L'organizzazione ha quindi l'obiettivo di installare dei misuratori di portata e di consumi così da poter monitorare le performance energetiche del sistema.

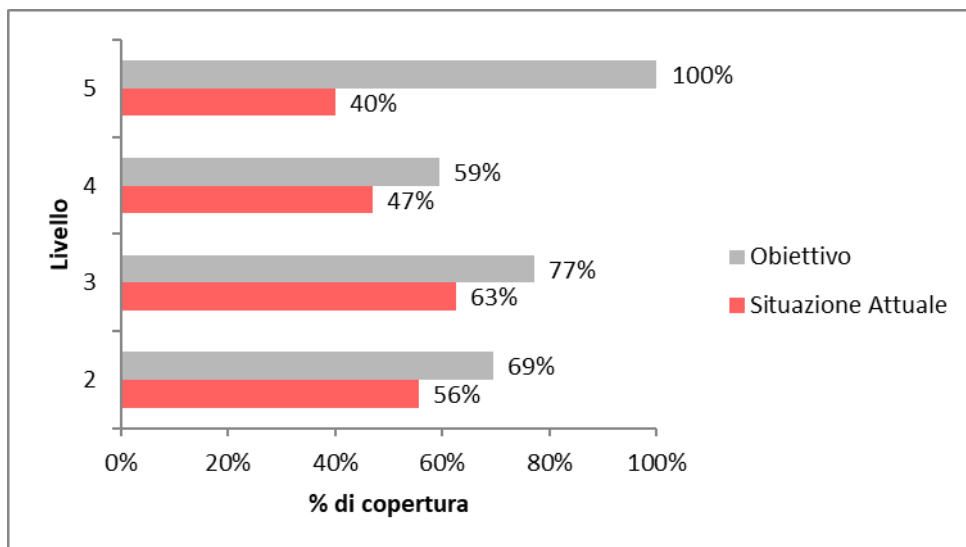


Figura 3 - Grafico a barre per la valutazione della copertura percentuale dei livelli e della copertura percentuale dei livelli desiderata

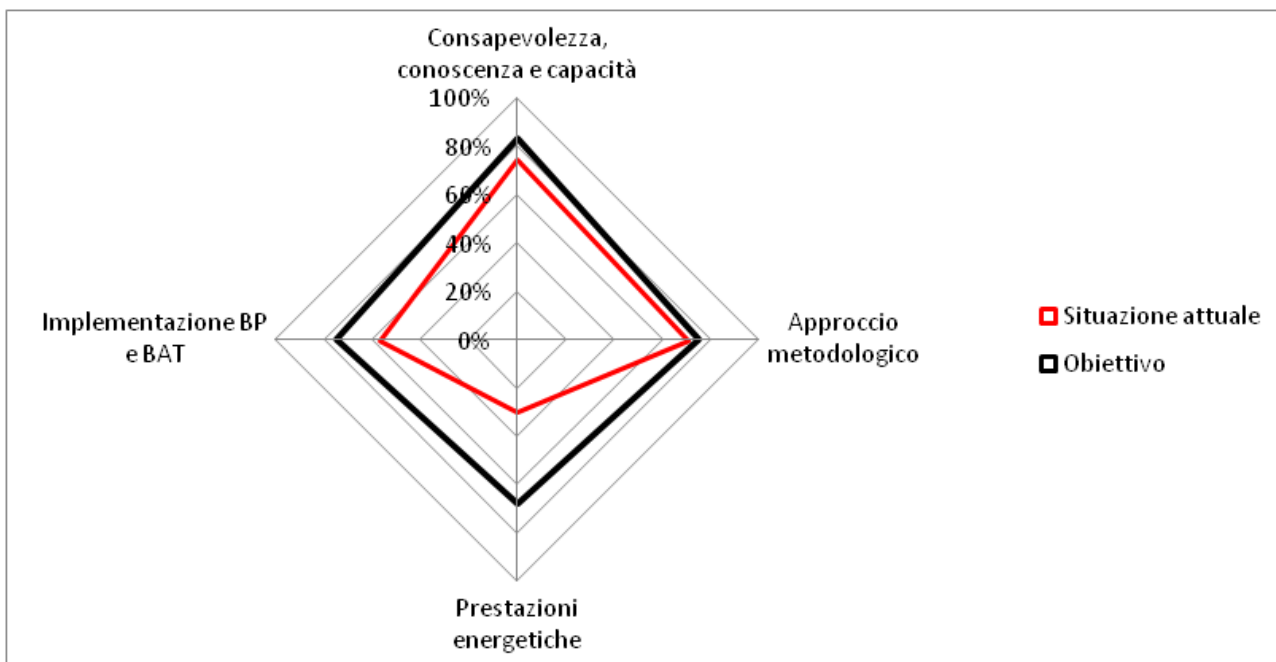


Figura 4 - Grafico radar per la valutazione della copertura percentuale delle dimensioni e della copertura percentuale delle dimensioni desiderata.

**Criticità e proposte di miglioramento**

L’azienda si è dimostrata molto attenta alla gestione dell’impianto aria compressa e nella gestione dell’energia in particolare. L’organizzazione è infatti certificata ISO 50001 ed è presente all’interno dell’organico la figura dell’energy manager. Nonostante l’impegno alcune problematiche sono state riscontrate soprattutto per via della bassa importanza dei consumi dell’impianto aria compressa rispetto al consumo di stabilimento. In questa ottica alcune soluzioni sono consolidate ed eventuali interventi su queste non vengono considerati, altre ancora possono essere proposte e valutate.

Tra le prime troviamo:

- La presenza di compressori con strategie di controllo load-unload piuttosto che più moderni compressori a velocità variabile gestiti tramite inverter. Questa assunzione è dovuta all'andamento del fabbisogno di aria compressa nel tempo che presenta una certa stabilità ad esclusione di pochi picchi temporanei dovuti ad alcune lavorazioni particolari. Questa motivazione fa preferire la soluzione tradizionale ad una che utilizza un compressore a velocità variabile. Tale soluzione a volte si rivela non idonea facendo rischiare all'azienda il blocco o il rallentamento delle attività tuttavia la possibilità di installare compressori a velocità variabile gestiti tramite inverter non viene considerata perché il costo per l'investimento avrebbe tempi di ritorno troppo elevati.
- La bassa considerazione dell'importanza dell'efficienza della produzione di aria compressa per lo stabilimento. Tale sistema è energeticamente poco importante rispetto alle altre produzioni, per questo motivo non vengono considerati grandi investimenti sul reparto.
- La possibilità di utilizzare energia a basso costo. L'azienda è dotata di un sistema di cogenerazione in grado di produrre il triplo dell'energia elettrica necessaria allo stabilimento e di generare una parte del vapore necessario per i processi. Questa soluzione consente di ridurre ad un terzo i costi relativi all'approvvigionamento dell'energia elettrica rispetto al prelievo dalla rete. Questa convenienza rende poco appetibili gli sforzi verso l'efficientamento del sistema aria compressa.

Tra le soluzioni che possono essere proposte e valutate si trovano:

- L'attuazione di una campagna di ricerca delle perdite di aria compressa. Le perdite di aria sono la più importante causa di spreco di energia e possono portare ad un innalzamento notevole dei consumi per la produzione di aria compressa. La ricerca delle perdite attraverso l'uso di strumenti ad ultrasuoni e la valutazione delle perdite sono quindi le prime attività da intraprendere per migliorare l'efficienza energetica. Le difficoltà tecniche economiche di una campagna di ricerca possono suggerire il calcolo delle perdite per via indiretta attraverso la valutazione del tempo di svuotamento del serbatoio ad utenze spente.
- L'installazione dei misuratori di portata elaborata dai compressori e dei misuratori di energia elettrica consumata dai compressori. Tale installazione renderebbe semplice l'analisi dei consumi e faciliterebbe il processo di riduzione degli stessi. Attualmente il controllo avviene solo sul consumo elettrico del reparto, avere a disposizione misure continue o periodiche consentirebbe di avere un primo livello di controllo per quanto riguarda l'efficienza energetica del sistema. La disponibilità di dati misurati in continuo o in maniera periodica può aiutare l'azienda nella definizione di una baseline di consumi, visualizzare gli scostamenti ed eventualmente definire una strategia di intervento. Nel caso in cui le installazioni siano troppo costose o tecnicamente difficili si potrebbe pensare di utilizzare provvisoriamente dei misuratori portatili così da poter delineare almeno il quadro della situazione.
- L'installazione di un soffiatore da sostituire ad alcune utenze alimentate ad aria compressa. L'azienda ha bisogno di aria per la pulizia di alcune apparecchiature, la sostituzione dell'aria compressa a 7 bar con quella proveniente da un soffiatore (1 ÷ 1.7 bar) consente di abbattere i costi relativi alla compressione eccessiva della portata d'aria per l'uso.
- La revisione dei diametri della rete. La rete di distribuzione è stata in passato oggetto di modifiche ed aggiunte. Per questo motivo sarebbe opportuna una revisione dei diametri e delle lunghezze delle tubazioni in funzione delle portate necessarie per le varie sezioni dell'impianto. Una rete dimensionata in maniera sbagliata potrebbe portare a problemi di eccessive perdite di carico nel caso in cui il diametro sia troppo piccolo e problemi di condensa nel caso di diametri eccessivi. La valutazione dei costi e dei benefici di tali interventi è facilmente attuabile.
- La valutazione delle perdite di carico a fine linea. Considerando la vastità dell'impianto e le continue modifiche a cui la rete è stata soggetta, l'azienda dovrebbe valutare la possibilità di misurare le perdite di carico a fine linea dovute a dimensionamenti non ottimali della rete. Tale valutazione



consentirebbe di valutare i costi ed i benefici di un'eventuale modifica della rete di trasporto dell'aria così da ottimizzare i diametri delle tubazioni e minimizzare le perdite di carico fonti di spreco di energia.

- Il sezionamento della rete. L'azienda dovrebbe valutare il sezionamento della rete in più parti in maniera tale da poter escludere alcuni i rami che temporaneamente non vengono utilizzati. In questo modo solo la parte con le utenze collegate ed in funzione verrebbe tenuta in pressione diminuendo la possibilità che si verifichino delle perdite d'aria nelle sezioni con utenze non utilizzate.

### 1.2.3 Azienda farmaceutica (2)

#### Descrizione impianto

L'organizzazione presa in esame è un'azienda operante nel settore farmaceutico.

#### Risultati della somministrazione del modello di maturità

La somministrazione CASEEMM ha consentito di valutarne il livello di maturità e confrontare i risultati con quelli derivabili da una conoscenza diretta.

Durante l'intervista sono stati indagati anche i propositi di miglioramento dell'azienda che sono stati riformulati in termini di obiettivi di miglioramento per livello e per dimensione.

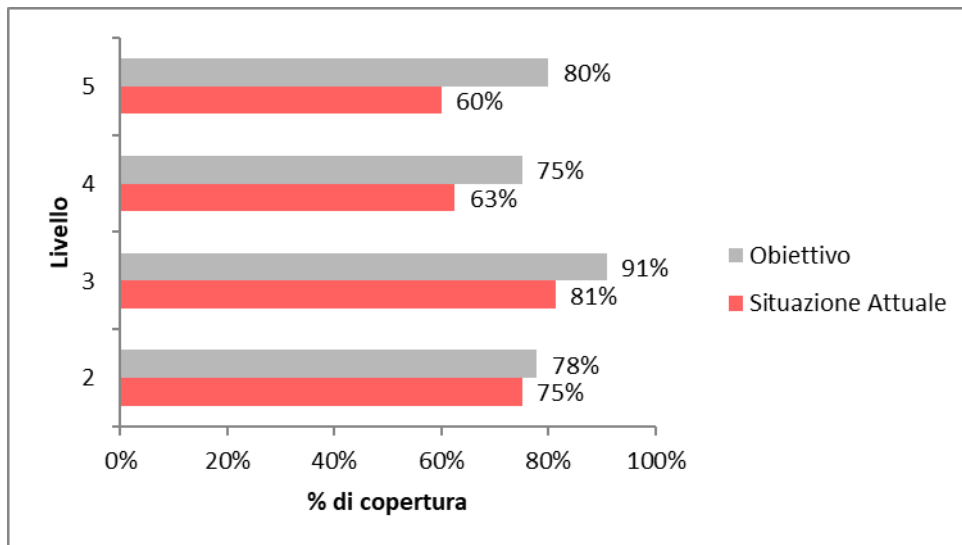
L'esito della valutazione effettuata dal modello di maturità è risultata pienamente coerente con l'impressione derivata dal colloquio con l'azienda, fornendo in particolare i seguenti risultati:

- Indicatore sintetico di maturità. Il valore dell'indicatore è 3.66. Il valore è alto e indica che l'azienda si sta muovendo bene verso il miglioramento della gestione dei sistemi e che l'organizzazione è ormai strutturata e ben operante. Il valore obiettivo è di 4.05, un miglioramento significativo che appare alla portata dell'organizzazione.
- Grado di copertura dei livelli. Il valore più alto di copertura appartiene al livello 3 (81%), ma anche gli altri livelli sono molto vicini: 75% per il livello 2, 63% per il livello 4 e 60% per l'ultimo livello. Per un corretto sviluppo di un sistema di gestione dei consumi d'impianto è auspicabile il completamento di circa l'85% ÷ 90% del livello più basso prima di implementare gli strumenti del livello successivo e in questo aspetto i risultati sono ottimi. Ciò è indice di uno sviluppo dell'organizzazione che ha lavorato costantemente per migliorare tutti gli aspetti con metodo per raggiungere livelli elevati. L'azienda ha quindi un livello elevato e può facilmente aspirare a raggiungere le soglie previste prima di sviluppare le conoscenze dell'ultimo livello. In Figura 5 il riassunto dei risultati.

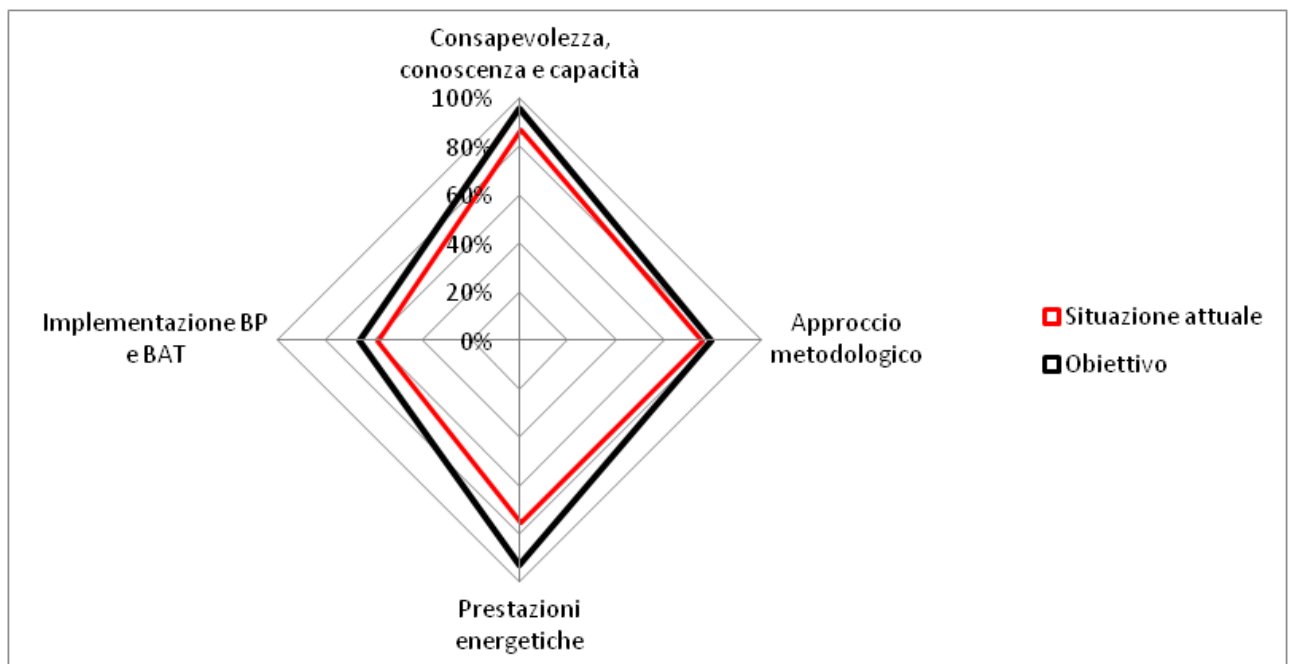
Considerando la copertura desiderata, la crescita stimata dei vari livelli si rivela essere molto omogenea come già detto la crescita ottimale sarebbe rappresentata dal pieno raggiungimento di un livello prima di intervenire sugli aspetti del livello successivo. Tuttavia, l'azienda nel prossimo futuro non aumenterebbe la quota del livello 2, raggiungerebbe la quota ottimale per il livello 3 e per questo valorizzerebbe anche gli aspetti del livello 4 raggiungendo quasi la quota ottimale (78%).

- Sviluppo della maturità rispetto alle quattro dimensioni. La crescita del sistema di gestione dovrebbe prevedere uno sviluppo sostanzialmente bilanciato delle diverse dimensioni, rappresentate nel diagramma RADAR riportato in Figura 6. La differenza tra la dimensione della consapevolezza le altre tre è notevole. In generale, spiccate differenze nella crescita della maturità rispetto alle varie dimensioni indicano che l'azienda non muove in maniera organizzata cercando di approfondire tutti gli aspetti che portano ad un miglioramento dell'efficienza energetica ma approfondisce alcuni aspetti piuttosto che altri. In questo caso però, il livello superiore rispetto alla media indica che l'azienda è ben consapevole dell'importanza dell'efficienza energetica e cerca in tutti i modi di raggiungere questo obiettivo. Analizzando gli obiettivi di crescita delle 4 dimensioni nel medio termine, si nota come l'organizzazione si stia ancora una volta muovendo nella direzione della consapevolezza e della performance energetica. Questo aspetto rende lo sviluppo meno omogeneo e

suggerisce all'azienda di spostare i propri sforzi verso l'implementazione di BP e verso la ricerca di BAT.



**Figura 5 - Grafico a barre per la valutazione della copertura percentuale dei livelli e della copertura percentuale dei livelli desiderata**



**Figura 6 - Grafico radar per la valutazione della copertura percentuale delle dimensioni e della copertura percentuale delle dimensioni desiderata**

### Criticità e proposte di miglioramento

Alcune osservazioni possono essere fatte sia per quanto riguarda gli impianti e il loro efficientamento. In questa ottica alcune soluzioni sono consolidate ed eventuali interventi su queste non vengono considerati, altre ancora possono essere proposte e valutate.

Tra le prime troviamo:

- L'utilizzo di un'incentivazione interna per la scoperta di perdite. L'azienda quindi oltre ad aver preventivato una campagna di ricerca delle perdite attraverso l'uso di strumenti ad ultrasuoni, spinge i propri dipendenti attraverso incentivi a trovare le perdite e a segnalarle all'energy manager.

- Installazioni di compressori a velocità variabile. La produzione di aria compressa ha un andamento piuttosto variabile nel tempo per questo motivo viene utilizzata una strategia di controllo mista load-unload e inverter. Il carico di base viene prodotto attraverso i compressori con regolazione load-unload, la parte variabile viene prodotta con i compressori a velocità variabile. L'accensione e il funzionamento di tutti i compressori viene regolato da una centralina prodotta dall'azienda produttrice dei compressori. Tale regolazione si basa su uno storico di un mese ed è per questo ottimizzata.
- Analisi dei consumi con cadenza maggiore del periodo di fatturazione. L'azienda dispone di un sistema di monitoraggio delle prestazioni che rende possibili analisi delle prestazioni con cadenza settimanale.

Tra le proposte troviamo:

- L'attuazione di una campagna di ricerca delle perdite di aria compressa. Le perdite di aria sono la più importante causa di spreco di energia e possono portare ad un innalzamento notevole dei consumi per la produzione di aria compressa. La ricerca delle perdite attraverso l'uso di strumenti ad ultrasuoni e la valutazione delle perdite sono quindi le prime attività da intraprendere per migliorare l'efficienza energetica. L'azienda ha già messo in preventivo una campagna di ricerca delle perdite per il prossimo futuro.
- Installazione di un sistema di misura per ogni unità di produzione. Il sistema è formato da molte unità di produzione che lavorano contemporaneamente, questa peculiarità rende opportuna l'installazione di un sistema di misurazione della portata e dei consumi elettrici per ogni compressore. Tale installazione renderebbe semplice l'analisi dei consumi e faciliterebbe il processo di riduzione degli stessi. La disponibilità di dati misurati in continuo o in maniera periodica può aiutare l'azienda nella definizione di una baseline di consumi, visualizzare gli scostamenti ed eventualmente definire una strategia di intervento. Nel caso in cui le installazioni siano troppo costose o tecnicamente difficili si potrebbe pensare di utilizzare provvisoriamente dei misuratori portatili così da poter delineare almeno il quadro della situazione.
- La valutazione delle perdite di carico a fine linea. Considerando la vastità dell'impianto e le continue modifiche a cui la rete è stata soggetta, l'azienda dovrebbe valutare la possibilità di misurare le perdite di carico a fine linea dovute a dimensionamenti non ottimali della rete. Tale valutazione consentirebbe di valutare i costi ed i benefici di un'eventuale modifica della rete di trasporto dell'aria così da ottimizzare i diametri delle tubazioni e minimizzare le perdite di carico fonti di spreco di energia.
- Utilizzo di sistemi a più livelli di pressione. Considerando la divisione dell'impianto in due sezioni che necessitano di pressioni di alimentazione differenti, l'azienda dovrebbe misurare o stimare il quantitativo di aria compressa utilizzata per ciascun livello di pressione e valutare la possibilità tecnico economica modificare il sistema e di far lavorare i vari compressori a pressioni differenti.
- La campagna di analisi delle perdite è stata effettuata molti anni fa, è necessario riorganizzare una campagna di misurazione delle perdite anche alla luce delle modifiche apportate all'impianto nel corso degli anni.

#### 1.2.4 Azienda del settore alimentare

##### **Descrizione impianto**

L'azienda in esame appartiene al settore dell'industria alimentare, in particolare si occupa di lavorazione e vendita di latte e derivati.

##### **Risultati della somministrazione del modello di maturità**

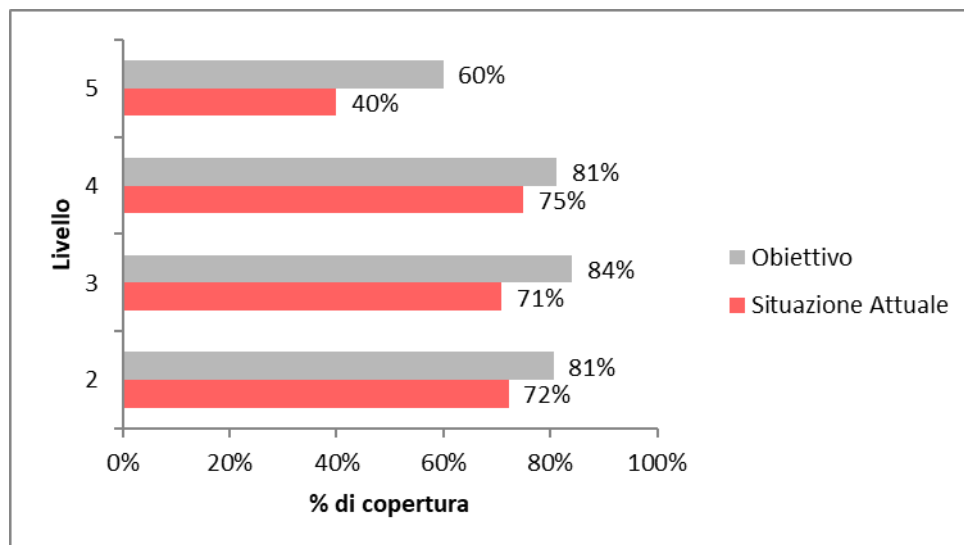
La somministrazione CASEEMM ha consentito di valutarne il livello di maturità e confrontare i risultati con quelli derivabili da una conoscenza diretta.

Durante l'intervista sono stati indagati anche i propositi di miglioramento dell'azienda che sono stati riformulati in termini di obiettivi di miglioramento per livello e per dimensione.

L'esito della valutazione effettuata dal modello di maturità è risultata pienamente coerente con l'impressione derivata dal colloquio con l'azienda, fornendo in particolare i seguenti risultati:

- **Indicatore sintetico di maturità.** Il valore dell'indicatore è 3.30. Il valore è medio e indica che l'azienda si sta muovendo verso il miglioramento della gestione dei sistemi e che l'organizzazione sta operando nella giusta direzione. Il valore obiettivo è di 3.86, un miglioramento decisamente significativo che appare piuttosto sfidante per l'azienda nel breve periodo ma sicuramente alla portata dell'organizzazione in un periodo un po' più esteso.
- **Grado di copertura dei livelli.** Il valore più alto di copertura appartiene al livello 3 (81%), ma anche gli altri livelli sono molto vicini: 75% per il livello 2, 63% per il livello 4 e 60% per l'ultimo livello. Ciò è indice di uno sviluppo dell'organizzazione che ha lavorato costantemente per migliorare tutti gli aspetti con metodo per raggiungere livelli elevati. In Figura 7 il riassunto dei risultati.

Considerando la copertura desiderata, la crescita stimata dei vari livelli si rivela essere molto omogenea come già detto la crescita ottimale sarebbe rappresentata dal pieno raggiungimento di un livello prima di intervenire sugli aspetti del livello successivo. Tuttavia, l'azienda nel prossimo futuro aumenterebbe tutte le quote in maniera da arrivare a coperture oltre ben oltre l'80% per i primi livelli e considerando di poter operare sull'ultimo livello per uno sviluppo più lontano nel tempo.



**Figura 7 - Grafico a barre per la valutazione della copertura percentuale dei livelli e della copertura percentuale dei livelli desiderata.**

- **Sviluppo della maturità rispetto alle quattro dimensioni.** La crescita del sistema di gestione dovrebbe prevedere uno sviluppo sostanzialmente bilanciato delle diverse dimensioni, rappresentate nel diagramma RADAR riportato in Figura 8. La differenza tra la dimensione della consapevolezza e le altre tre è notevole. In generale, spiccate differenze nella crescita della maturità rispetto alle varie dimensioni indicano che l'azienda non muove in maniera organizzata cercando di approfondire tutti gli aspetti che portano ad un miglioramento dell'efficienza energetica ma approfondisce alcuni aspetti piuttosto che altri. In questo caso però, il livello superiore rispetto alla media indica che l'azienda è ben consapevole dell'importanza dell'efficienza energetica e cerca in tutti i modi di raggiungere questo obiettivo. Analizzando gli obiettivi di crescita delle 4 dimensioni nel medio termine, si nota come l'organizzazione si stia muovendo bene cercando di portare tutte le dimensioni allo stesso livello di copertura. Questo aspetto renderebbe lo sviluppo omogeneo e ben definito.

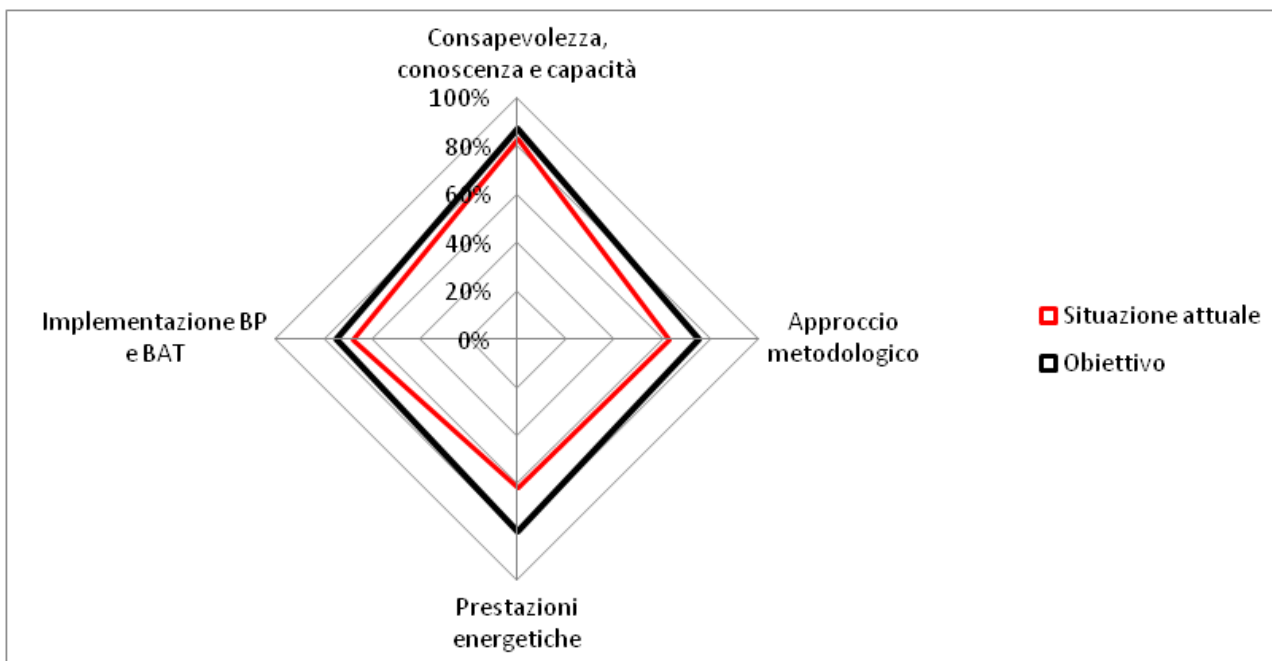


Figura 8 - Grafico radar per la valutazione della copertura percentuale delle dimensioni e della copertura percentuale delle dimensioni desiderata

### Criticità e proposte di miglioramento

Alcune osservazioni possono essere fatte sia per quanto riguarda gli impianti che per quanto riguarda la gestione. In questa ottica alcune soluzioni sono consolidate ed eventuali interventi su queste non vengono considerati, altre ancora possono essere proposte e valutate.

Tra le prime troviamo:

- Utilizzo del sistema di monitoraggio capillare a disposizione. L'azienda ha la possibilità di monitorare tutte le portate e tutti i consumi relativi ad ogni compressore.
- Valutazione delle perdite di aria. Come già detto sono il problema più importante per raggiungere l'efficienza energetica. L'azienda le ha limitate notevolmente negli ultimi periodi attraverso una campagna di misura capillare delle perdite.
- Sostituzione degli strumenti alimentati ad aria compressa con altri alimentati elettricamente. Una causa di perdita di energia è l'utilizzo dell'aria compressa, questo porta a suggerire la sostituzione di strumenti pneumatici con quelli elettrici minimizzando la lunghezza delle reti aria compressa e limitando la possibilità di perdite di aria.

Tra le seconde troviamo:

- Verificare che i programmi di gestione del carico dei compressori operino al meglio ottimizzando i consumi anche a seguito delle modifiche apportate alla linea. L'attivazione errata dei compressori comporta perdite di energia dovuta all'aumento dell'assorbimento durante le fasi di transitorio.
- Le modifiche al micro-layout in alcuni reparti hanno portato all'inutilizzo di alcuni rami della rete. La possibilità di distaccare di tali rami dalla rete principale rende possibile l'eliminazione di eventuali perdite d'aria all'interno dei rami che rimarrebbero in pressione anche se non utilizzati.
- Minimizzazione della pressione di set point. L'installazione di un nuovo macchinario ha reso necessario l'innalzamento della pressione di set point per permettere il buon funzionamento della stessa. L'inserimento di un sistema di innalzamento della pressione locale a monte della macchina

operante a pressione maggiore potrebbe permettere di risparmiare l'energia spesa per innalzare inutilmente la pressione di tutto il sistema.

- Ottimizzazione del sistema di controllo sulla base dei consumi orari. Il profilo di richiesta dell'aria è cambiato notevolmente nell'ultimo periodo e il sistema di gestione è sviluppato sul concetto di suddividere in maniera equa le ore di funzionamento di tutti i compressori. Per questo motivo si potrebbe suggerire all'azienda un sistema di gestione alternativo che consideri anche i rendimenti delle macchine ed i costi di gestione ottimizzando lo scenario.

### 1.2.5 Azienda del settore della plastica

#### Descrizione impianto

L'azienda in esame appartiene al settore lavorazione della plastica per produzione di bottiglie e flaconi.

#### Risultati della somministrazione del modello di maturità

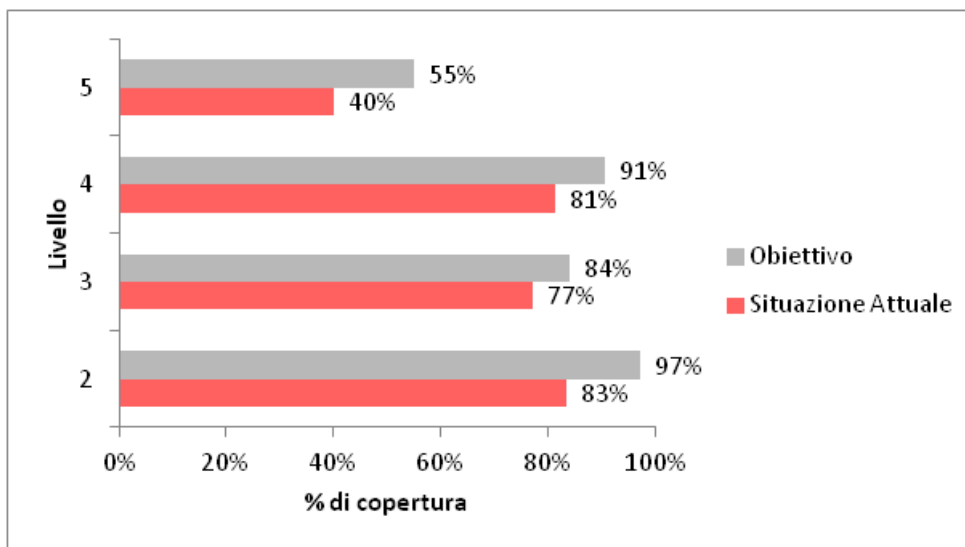
La somministrazione CASEEMM ha consentito di valutarne il livello di maturità e confrontare i risultati con quelli derivabili da una conoscenza diretta.

Durante l'intervista sono stati indagati anche i propositi di miglioramento dell'azienda che sono stati riformulati in termini di obiettivi di miglioramento per livello e per dimensione.

L'esito della valutazione effettuata dal modello di maturità è risultata pienamente coerente con l'impressione derivata dal colloquio con l'azienda, fornendo in particolare i seguenti risultati:

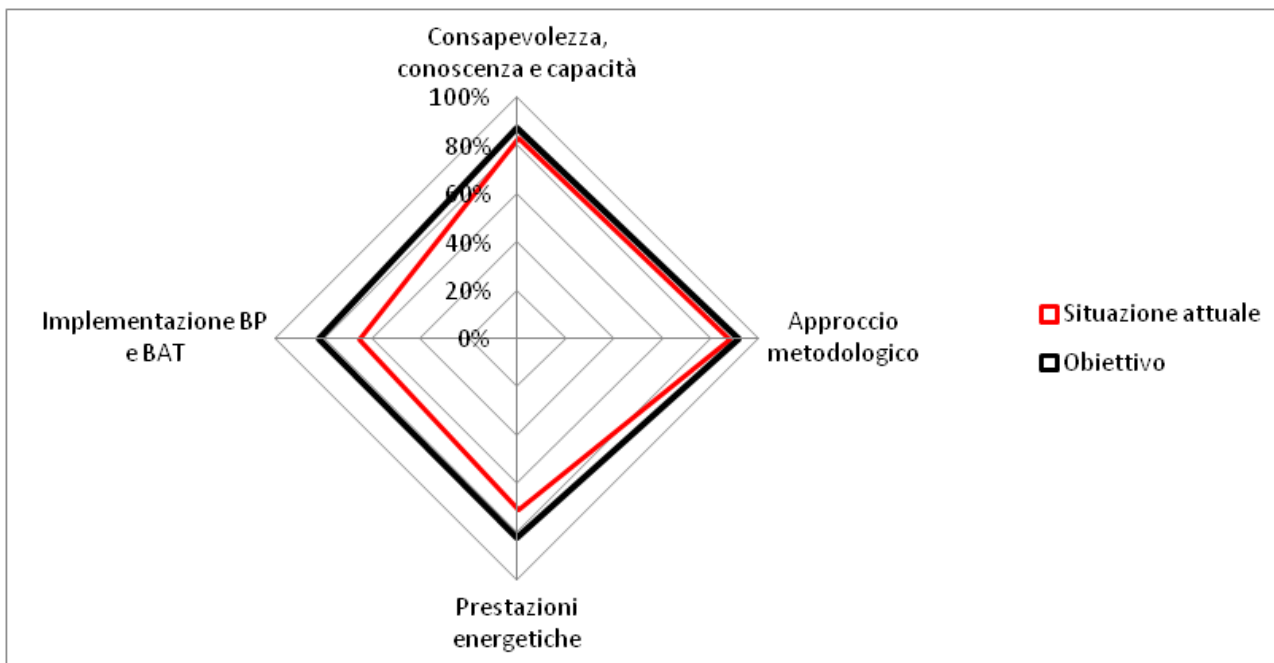
- Indicatore sintetico di maturità. Il valore dell'indicatore è 3.65. Il valore è alto e indica che l'azienda si sta muovendo bene verso il miglioramento della gestione dei sistemi e che l'organizzazione è ormai strutturata e ben operante. Il valore obiettivo è di 4.24, un miglioramento decisamente significativo che appare piuttosto sfidante per l'azienda nel breve periodo ma sicuramente alla portata dell'organizzazione in un periodo un po' più esteso.
- Grado di copertura dei livelli. Il valore più alto di copertura appartiene al livello 2 (83%), ma anche gli altri livelli sono molto vicini: 81% per il livello 4, 77% per il livello 3 e più distante il livello 5 al 40%. Ciò è indice di uno sviluppo dell'organizzazione che ha lavorato costantemente per migliorare tutti gli aspetti con metodo per raggiungere livelli elevati. Per un corretto sviluppo di un sistema di gestione dei consumi d'impianto è auspicabile il completamento di circa l'85% ÷ 90% del livello più basso prima di implementare gli strumenti del livello successivo e in questo aspetto i risultati sono ottimi. L'azienda ha quindi lavorato nella giusta direzione raggiungendo prima ottimi risultati nei livelli più bassi per poi salire con quelli più alti. In Figura 9 il riassunto dei risultati.

Considerando la copertura desiderata, la crescita stimata dei vari livelli si rivela essere ideale raggiungendo la completezza per il livello 2 e facendo crescere notevolmente i livelli 3 e 4 omogenea e porterebbe al pieno completamento di tutti i livelli anche se sarebbe auspicabile un intervento progressivo prima su quelli più bassi.



**Figura 9 - Grafico a barre per la valutazione della copertura percentuale dei livelli e della copertura percentuale dei livelli desiderata**

- Sviluppo della maturità rispetto alle quattro dimensioni. La crescita del sistema di gestione dovrebbe prevedere uno sviluppo sostanzialmente bilanciato delle diverse dimensioni, rappresentate nel diagramma RADAR riportato in Figura 10. Dai risultati la differenza tra la dimensione dell’approccio metodologico e quella dell’implementazione delle BAT e delle BP è notevole. In generale, spiccate differenze nella crescita della maturità rispetto alle varie dimensioni indicano che l’azienda non muove in maniera organizzata cercando di approfondire tutti gli aspetti che portano ad un miglioramento dell’efficienza energetica ma approfondisce alcuni aspetti piuttosto che altri. In questo caso, l’azienda ha delle grosse carenze nella di gestione della pressione di erogazione e nella valutazione delle portate elaborate che abbassano notevolmente la copertura della dimensione. Considerando gli obiettivi di crescita per il prossimo periodo l’organizzazione intende adottare soluzioni in grado di far crescere le dimensioni in maniera differenziata così da raggiungere un livello di crescita più omogeneo dell’attuale.



**Figura 10 - Grafico radar per la valutazione della copertura percentuale delle dimensioni e della copertura percentuale delle dimensioni desiderata**



## Criticità e proposte di miglioramento

Alcune osservazioni possono essere fatte sia per quanto riguarda gli impianti che per quanto riguarda la gestione. In questa ottica alcune soluzioni sono consolidate ed eventuali interventi su queste non vengono considerati, altre sono state preventivate, altre ancora possono essere proposte e valutate.

Tra le prime troviamo:

- Le misurazioni dei consumi e delle produzioni di plastica vengono monitorate quotidianamente. In questo modo è possibile definire una baseline di consumi e valutare gli scostamenti.
- Le perdite di aria compressa, primo motivo di spreco di energia per importanza, sono state monitorate attentamente attraverso una campagna di sopralluoghi che hanno consentito di ridurre del 14% il consumo di energia elettrica.
- Ottimizzazione dei diametri della rete. La rete è stata rivista nei diametri che sono stati ottimizzati nell'ultimo anno in funzione delle nuove necessità. I nuovi macchinari infatti hanno bisogno di un quantitativo superiore di aria compressa per poter funzionare. In questo modo è stato possibile limitare le perdite di carico a fine linea e diminuire la pressione di erogazione dell'aria.
- Utilizzo di e ricerca continua di BAT. Il parco compressori è dotato di macchine con supporti a levitazione che rappresentano la BAT del settore. In questo modo è possibile diminuire i consumi energetici a vantaggio di una gestione efficiente.

Tra le soluzioni preventivate troviamo:

- L'installazione di un misuratore sulle portate di aria compressa erogata. Non essendo in possesso di un sistema di misurazione delle portate, per avere delle valutazioni migliori dell'efficienza del sistema, l'organizzazione ha deciso di installare un misuratore di portata.

Alcune osservazioni possono essere fatte infine sia per quanto riguarda gli impianti che per quanto riguarda la gestione.

- Data la continua innovazione del sistema produttivo e la continua modifica delle apparecchiature collegate alla rete, potrebbero essere condotte alcune prove diminuendo la pressione di esercizio dei sistemi in modo tale da verificare la presenza di un eventuale margine di riduzione dei consumi dovuti alla compressione di aria a pressione eccessiva.
- L'installazione di un sistema di misura delle portate può favorire il controllo dei consumi e l'individuazione di malfunzionamenti e perdite di aria compressa. La misurazione continua o periodica consente di avere un quadro della situazione migliore di quello delineato attraverso l'analisi dei consumi derivata da altre tipologie di misurazioni.

## 1.3 Conclusioni del capitolo

Nel presente capitolo sono stati proposti i risultati dell'utilizzo dello strumento di valutazione delle performance e di supporto alle decisioni per l'efficientamento dei sistemi aria compressa ad un campione di aziende. Lo strumento utilizzato è stato il modello di maturità (CASEEMM) con il quale le organizzazioni possono valutare la propria maturità in materia di efficienza energetica in maniera autonoma.

Questa fase ha visto il coinvolgimento di numerose aziende del tessuto industriale italiano che hanno risposto con grande disponibilità e apertura. L'attività ha quindi riguardato un primo contatto con l'organizzazione, la conoscenza delle caratteristiche e delle problematiche delle stesse e la valutazione del livello di conoscenze e di efficienza energetica attraverso il CASEEMM.

Dalle informazioni ottenute sono emerse differenti situazioni relative a differenti modi di utilizzare l'aria compressa e differenti modi di gestirne la produzione. L'elemento comune a tutte le aziende è la particolare attenzione verso l'efficienza energetica che si cerca di raggiungere attraverso numerose soluzioni.

Per ogni azienda visitata sono quindi state definite delle pratiche per il raggiungimento dell'efficienza energetica del settore.

## 2 Sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni (DSS, decision support tools)

### 2.1 Introduzione

L'efficienza energetica è un aspetto che al giorno d'oggi viene considerato di primaria importanza in ogni settore e in ogni tipo di applicazione industriale. La minimizzazione dei costi per l'energia e più in particolare per quella utilizzata per l'aria compressa ad uso industriale è uno degli obiettivi più perseguiti dalla ricerca scientifica a causa del forte impatto che la produzione di aria compressa ha sull'industria. L'aria compressa supporta molti processi industriali ed è un'applicazione ampiamente utilizzata nelle industrie manifatturiere grazie alla sua pulizia, praticità e facilità d'uso. Viene utilizzata per azionare utensili e nei processi come agitazione, soffiaggio, stampaggio e smistamento [5]. La fonte di energia utilizzata per la produzione di aria compressa è spesso l'elettricità. Nonostante la diffusione dell'aria compressa, l'efficienza dei sistemi è piuttosto bassa infatti sono il 10 ÷ 15% del lavoro immesso viene trasformato in lavoro utile all'utilizzatore [6]. In questo quadro si inserisce la presente attività di ricerca in cui si vuole approfondire e sviluppare il tema dell'efficienza energetica del settore e generare soluzioni adatte per le imprese.

L'attività di ricerca vuole portare a compimento, nell'arco di tre anni, uno studio approfondito sulla situazione energetica del settore aria compressa in Italia, e trovare delle metodologie per migliorarne l'aspetto energetico riducendone l'impatto. Nel suo sviluppo integrale, l'attività vuole arrivare a definire una procedura che guidi l'azienda, che vuole iniziare il percorso di miglioramento delle prestazioni, attraverso alcuni step intermedi, nella strada verso il miglioramento dell'efficienza energetica.

Il primo anno di attività ha riguardato l'analisi dei dati raccolti a seguito del D.Lgs 102/2014 ed elaborati da ENEA. Attraverso questa analisi è stato possibile evidenziare delle importanti caratteristiche e definire alcuni indici di prestazione energetica. Gli indici sono fondamentali per la caratterizzazione delle prestazioni e per il confronto all'interno dei settori (si veda appendice A). L'analisi dei dati è stata integrata con lo sviluppo di un fondamentale strumento per l'assessment autonomo dell'azienda riguardo l'efficienza energetica del settore aria compressa: il modello di maturità (CASEEMM).

Il modello di maturità consiste in 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. Il questionario è suddiviso in 4 sezioni chiamate "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.

Il secondo anno di attività ha riguardato lo sviluppo di un set di linee guida impiantistiche e gestionali per il miglioramento delle prestazioni energetiche. Le linee guida sono state descritte a partire dall'analisi della bibliografia tecnico-scientifica e dalla definizione di alcune best practices legate alla progettazione e gestione degli impianti aria compressa. Le best practices definite sono state poi affiancate al questionario del modello di maturità ed in base alla corrispondenza tra le necessità definite dalle domande e le soluzioni fornite dalle best practices sono state definite delle linee guida indirizzate al raggiungimento delle best practices stesse.

In questo modo è stata definita una procedura in 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.

Il terzo anno di attività ha riguardato la valutazione delle possibilità di efficientamento attraverso lo sviluppo di strumenti di supporto alle decisioni. Tali strumenti sono importanti per caratterizzare a livello tecnico-economico gli interventi di efficientamento e fornire alle aziende un feedback sulle potenzialità di efficientamento derivanti da una possibile azione.

Lo sviluppo degli strumenti ha visto una prima fase di definizione delle possibili opzioni, una seconda di caratterizzazione delle opzioni in base alla difficoltà di utilizzo e di implementazione, una terza fase di scelta e l'ultima fase di sviluppo vero e proprio degli strumenti.

Tutti gli strumenti sono stati sviluppati con software commerciali disponibili gratuitamente così da essere maggiormente fruibili e rappresentano l'ultimo passo per il completamento di una metodologia facilmente sfruttabile dalle aziende per individuare, valorizzare e migliorare l'efficienza energetica dei propri impianti di produzione dell'aria compressa.

## *2.2 Stato dell'arte sugli strumenti per il supporto alle decisioni in materia di efficienza energetica.*

È universalmente riconosciuto che i le aziende energivore (e non solo) necessitano di metodi e di strumenti per ottimizzare la gestione dei propri processi tenendo in considerazione i consumi di energia [7]. Indicativamente, cambiamenti accurati su risorse o processi possono ridurre il consumo di energia [8]. Studi preliminari sono stati condotti con l'obiettivo di valutare il carico energetico delle diverse fasi del processo [9] e poi essere utilizzati come tabella di marcia per identificare le modifiche in questi passaggi. Tali modifiche potrebbero imporre un investimento significativo in quanto comporterebbero cambiamenti radicali nel processo di produzione [10]. Un'alternativa meno costosa potrebbe essere rappresentata dalla modifica delle impostazioni di produzione come la temperatura delle macchine; sebbene diversi studi si concentrino su tali cambiamenti [10], questi riguardano solitamente processi specifici e potrebbero avere effetti collaterali come una diminuzione del livello qualità del prodotto [11].

La scelta di operare modifiche a cicli o a sistemi è molto complessa e comporta la necessità di valutare numerose alternative e di scegliere quella più conveniente, spesso dal punto di vista economico. Per la valutazione di alternative o più semplicemente la caratterizzazione della fattibilità tecnico-economica delle scelte è spesso necessario valutare in maniera quantitativa i benefici e i costi di ogni alternativa. Numerose aziende hanno già sviluppato buone capacità di gestione dell'energia tuttavia la maggior parte di queste si limita al monitoraggio e non si spinge fino alla previsione o alla simulazione di scenari alternativi [7].

Per poter valutare scelte che potrebbero portare a cambiamenti nei sistemi e negli impianti la letteratura scientifica mette a disposizione numerosi strumenti chiamati "Strumenti di supporto alle decisioni" (in inglese Decision Support Systems, di seguito denominati DSS).

Secondo [12] i DSS sono strumenti che hanno iniziato il proprio sviluppo con l'avvento e la diffusione dei minicomputer.

I DSS possono essere raccolti in sei grandi categorie:

- communication-driven;
- data-driven;
- document-driven;
- knowledge-driven;
- model-driven;
- web-based systems.

Per quanto riguarda le tipologie di analisi che possono essere svolte solitamente si fa riferimento a tre tipologie di studi [13]:

- Life Cycle Analysis (LCA) in cui si analizza l'impatto ambientale di un prodotto, processo o attività durante tutto il suo ciclo di vita. L'analisi identifica e quantifica energia e materiali usati e rifiuti

rilasciati nell'ambiente e inoltre valuta l'impatto di quegli e possibili miglioramenti in materia di impatto ambientale.

- L'analisi costi-benefici (CBA) offre un modo alternativo di sintetizzare le prestazioni in diversi aspetti di valutazione traducendo tutte le categorie di impatto in termini monetari. Questo approccio ha il vantaggio di fornire risultati su una scala compatibile con il meccanismo di mercato e più comprensibile per i decision-maker. L'analisi costi-benefici comporta il confronto dei costi e dei benefici totali associati a un progetto o una politica.
- Multi-Criteria Decision Making (MCDM) sono tecniche utilizzate nella gestione dell'energia sostenibile e che forniscono soluzioni ai problemi che coinvolgono obiettivi in conflitto e multipli. Utilizzano diversi metodi basati su medie ponderate, impostazione delle priorità, superamento, principi fuzzy e loro combinazioni sono impiegati per le decisioni di pianificazione energetica. Gli obiettivi sono in genere contraddittori e quindi la soluzione dipende fortemente dalle preferenze del decisore e deve essere un compromesso. Le applicazioni di MCDM comprendono aree come l'analisi della politica energetica, la pianificazione dell'energia elettrica, la scelta della tecnologia e la valutazione del progetto e l'analisi dell'impatto ambientale.

Dalla loro nascita negli anni '60 del secolo scorso numerose applicazioni di DSS sono state sviluppate per cercare di migliorare la comprensione e il funzionamento dei vari sistemi. Le principali applicazioni dei DSS sono indirizzate alla manipolazione di modelli quantitativi, all'accesso e all'analisi di grandi quantità di dati e al supporto ai gruppi nel processo decisionale. In letteratura sono presenti decine e decine di documenti che attestano lo sviluppo e l'applicazione di DSS ai campi di applicazione più vari.

Alcuni esempi di applicazioni dei DSS sono raccolti in Tabella1.

**Tabella 1 – Esempi di strumenti di supporto alle decisioni**

Riferimento	Descrizione
[11]	Il documento presenta una revisione degli studi riguardanti l'uso dell'analisi spaziale nell'implementazione della politica delle energie rinnovabili e una proposta per l'uso del sistema di supporto alle decisioni spaziali multicriterio basato sui sistemi di informazione geografica.
[14]	Il documento presenta il sistema di supporto alle decisioni per la pianificazione e l'ottimizzazione dell'utilizzo di un impianto idroelettrico. Lo strumento è stato sviluppato per assistere gli ingegneri delle operazioni SHEP al fine di migliorare efficienza operativa del sistema idroelettrico e per prendere decisioni operative e commerciali ottimali o quasi ottimali rispettando i vincoli. L'utilizzo del software può comportare significativi miglioramenti della produzione e dei ricavi energetici giornalieri.
[15]	Si descrive un sistema di supporto alle decisioni per la scelta dei siti ottimali per le centrali fotovoltaiche collegate alla rete. Questo sistema combina l'analisi multicriteria e il processo di analisi gerarchica con la tecnologia dei sistemi di informazione geografica (GIS) e allo stesso tempo tiene conto dell'ambiente, dell'orografia, della posizione e dei fattori climatici.
[13]	Viene descritto lo sviluppo di uno strumento di valutazione, classificazione e selezione di un sistema di riscaldamento dell'acqua domestico più sostenibile (con il più basso impatto economico, ambientale e sociale) che possa essere applicato in qualsiasi luogo e con qualsiasi richiesta. Viene utilizzata un'analisi decisionale multicriteria per accertare quale sistema di riscaldamento sia il più sostenibile in luoghi con radiazioni climatiche definite.
[16]	Viene descritto lo sviluppo di uno strumento di supporto alle decisioni con approccio ibrido in grado di fornire un supporto per la gestione dell'energia negli edifici pubblici.

[17]	Il documento propone un sistema di supporto alle decisioni per la selezione ottimizzata dei parametri di progettazione e funzionamento di un sistema di trasporto di calore a lunga distanza. Il metodo consente di valutare la fattibilità e l'efficacia del trasporto del calore dalle fonti di calore considerate verso l'area da servire con teleriscaldamento.
[18]	Il sistema descritto fornisce un toolbox per il supporto decisionale che consente agli agricoltori di caricare i propri dati, utilizzare diversi metodi di analisi e avere i propri risultati. Gli strumenti implementati includono la modellazione predittiva con spiegazione, valutazione di accuratezza, clustering di serie temporali e scomposizione e rilevamento di modifiche strutturali. Possono aiutare gli utenti a fare previsioni per scenari simulati.

Nonostante nel corso degli anni siano stati proposti numerosi lavori di ricerca con l'obiettivo di definire e sviluppare degli strumenti di supporto alle decisioni utilizzabili in ambito industriale, a conoscenza degli autori solo pochi lavori hanno riguardato lo sviluppo di programmi in grado di supportare le aziende per quanto riguarda le decisioni da prendere sulla gestione del sistema aria compressa.

Alcuni esempi di software sviluppati sono presenti nella Tabella 2.

**Tabella 2 – Esempi di strumenti per il supporto alle decisioni per la gestione degli impianti aria compressa**

Riferimento	Descrizione
[19]	AIRMaster + è uno strumento software online gratuito che aiuta gli utenti ad analizzare l'uso di energia e le opportunità di risparmio nei sistemi industriali ad aria compressa. Può essere utilizzato per valutare i miglioramenti nel funzionamento del sistema esistente e valutare i risparmi energetici ed economici dovuti all'aumento dell'efficienza energetica. AIRMaster + fornisce un approccio sistematico per valutare i sistemi di aria compressa, analizzare i dati raccolti e riportare i risultati.
[20]	Nel lavoro viene descritto uno strumento in grado di determinare la migliore configurazione del sistema di produzione dell'aria compressa con l'obiettivo di risparmiare energia.
[21]	Nel lavoro viene proposto uno strumento in grado di simulare il controllo di accensione e spegnimento di un gruppo di compressori che lavorano in parallelo. Lo strumento vuole essere d'aiuto all'azienda per definire la strategia di controllo migliore per poter minimizzare i consumi energetici.
[22]	Il lavoro descrive lo sviluppo di uno strumento per la simulazione e l'ottimizzazione della posizione della centrale di produzione dell'aria compressa in uno stabilimento industriale in base alla forma della rete ed alle necessità delle utenze.

Nonostante alcuni problemi siano stati affrontati nei lavori descritti, alla conoscenza degli autori, non esistono procedure sviluppate in maniera così dettagliata da poter seguire l'azienda in tutto il processo di sviluppo e di miglioramento delle prestazioni per quanto riguarda il settore di produzione e trasporto di aria compressa.

Considerando il lavoro definito nell'annualità precedente e ricordando l'importanza che le best practices e le best available techniques ricoprono nella crescita delle organizzazioni e nel processo di efficientamento energetico, il lavoro definito in questa annualità definisce degli strumenti di supporto alle decisioni che mirano al raggiungimento del livello definito dalle best practices di settore.

Per queste motivazioni gli strumenti che verranno illustrati nei prossimi paragrafi hanno come punto di partenza quello di rappresentare un metodo di confronto delle soluzioni in base alle prestazioni garantite dai sistemi.

Con gli strumenti definiti vengono proposte delle soluzioni alternative alle attuali la cui implementazione potrebbe portare a miglioramento dell'efficienza energetica ma che lasciano libera scelta all'utilizzatore. Tutte le soluzioni e i dati in uscita dai tools sono valutazioni di carattere generale che considerano i sistemi nella loro configurazione ottimale, le valutazioni sulla fattibilità tecnico economica degli interventi devono essere fatte in separata sede, tenendo presente tutte le singolarità del caso.

## 2.3 Metodologia

L'obiettivo di questa parte di attività è descrivere lo sviluppo di un insieme di strumenti di supporto delle decisioni utili per caratterizzare le condizioni di funzionamento del sistema nelle condizioni attuali e valutare la convenienza in termini energetici ed economici di eventuali modifiche al sistema di produzione dell'aria compressa. Le modifiche sono motivate dal presupposto che la possibilità di raggiungere il livello definito dalle best practices sia un passo fondamentale verso l'efficienza energetica. Considerando che gli ambiti in cui è possibile intervenire e sono numerose le best practices per il settore, numerosi strumenti sono stati valutati e successivamente sviluppati.

Lo sviluppo degli strumenti è stato un lavoro che ha comportato la definizione di più fasi partendo dall'identificazione dei problemi, passando per la valutazione qualitativa delle difficoltà di implementazione e di utilizzo dello strumento fino ad arrivare alla scelta degli strumenti più efficaci, al loro sviluppo e al loro utilizzo.

### 2.3.1 Scelta degli strumenti da implementare

La scelta degli strumenti da implementare è stata sicuramente una delle fasi più importanti per lo sviluppo del lavoro poiché ha definito la lista delle possibili problematiche da risolvere ed ha stabilito quali avessero priorità rispetto alle altre.

La lista completa delle problematiche da affrontare per poter innalzare il livello di efficienza di un sistema aria compressa è stata definita in base alle best practices e alle linee guida definite nell'annualità precedente. Attraverso un'ulteriore ed attenta ricerca in letteratura scientifica altre caratteristiche importanti sono state evidenziate ed aggiunte alla lista delle possibili problematiche da affrontare.

Le soluzioni così definite sono state valutate in base ad una votazione finale attribuita a ciascuna di esse frutto del prodotto di parametri relativi alla difficoltà di implementazione. Per poter valutare la difficoltà di utilizzo e implementazione di ogni strumento, per ciascuno di essi è stato stilato l'elenco delle variabili che devono essere immesse dall'utente nel futuro utilizzo. Ciascuna delle variabili è stata valutata in base ad una scala con voti da 1 a 5 sia per quanto riguarda la difficoltà di raccolta dati da parte dell'azienda, sia per quanto riguarda la possibilità di essere implementato all'interno di un modello.

Per poter valutare in maniera obiettiva la validità dello strumento e la difficoltà del suo utilizzo è stata necessaria una prima indagine riguardante la letteratura tecnico-scientifica. In particolare, sono stati ricercati lavori ed applicazioni in cui venivano trattati gli aspetti misurati e valutati attraverso gli strumenti da definire in maniera tale da giustificare un simile sforzo per l'implementazione degli strumenti.

La valutazione finale dei modelli è stata ottenuta moltiplicando il risultato del precedente prodotto per un valore, sempre su scala da 1 a 5 riguardante la fattibilità tecnico economica dell'intervento di efficientamento suggerito.

La lista degli strumenti si presenta quindi come nella Tabella 3 di esempio:



- nella prima colonna si trova la descrizione del problema che si vuole prendere in considerazione con l'utilizzo dello strumento;
- nella seconda colonna si trova l'elenco dei dati necessari per l'utilizzo dello strumento;
- nella terza colonna si trova la valutazione della difficoltà di reperimento dei dati;
- nella quarta colonna si trova la valutazione della difficoltà di sviluppo dello strumento;
- nella quinta colonna si trova la valutazione della complessità di realizzazione dell'intervento in termini organizzativi, tecnici o economici;
- nella sesta il giudizio sintetico sullo strumento.

**Tabella 3 – Esempio di utilizzo del metodo di valutazione**

Problema	Dati necessari	Difficoltà reperimento dati	Difficoltà sviluppo strumento	Difficoltà realizzazione intervento	Giudizio
Problema 1	Dato 1	1	3	3	12
	Dato 2	2	4		
	Dato 3	1	2		

Il giudizio sintetico è dato dal prodotto della media dei valori della terza colonna, della media dei valori della quarta colonna e del valore della quinta. Il metodo per il calcolo dell'indice per la valutazione dello strumento è quindi riassumibile attraverso la (1):

$$\frac{\text{Difficoltà di reperire dati} \times \text{Difficoltà di sviluppo strumento}}{\times \text{Difficoltà di realizzazione}} = \text{Valutazione} \quad (1)$$

Gli strumenti con giudizi sintetici più bassi sono quelli ritenuti più validi da un punto di vista dell'implementazione e dell'utilizzo da parte dell'utente finale.

### 2.3.2 Sviluppo degli strumenti

Dopo aver definito il metodo di selezione degli strumenti e aver quindi delineato quali siano quelli che per impatto e per utilizzabilità risultano migliori, si è passati alla fase di implementazione vera e propria.

L'idea principale alla base del lavoro è quella di realizzare alcuni strumenti di supporto alle decisioni che siano facilmente utilizzabili dal personale interessato senza rendere obbligatorio l'acquisto di software specifici. Questa decisione ha fortemente condizionato lo sviluppo dei software restringendo il range dei programmi utilizzabili. La scelta è quindi ricaduta sull'utilizzo di fogli di calcolo con attivazioni di macro per tutti gli strumenti tranne uno che necessita l'installazione di un software gratuito.

La definizione degli strumenti da sviluppare e dei software da utilizzare ha portato fase di sviluppo vero e proprio dei programmi che, come ci si aspettava, è risultata tra le più impegnative.

L'implementazione ha seguito una strategia in più punti definita di seguito.

- Analisi del problema. Ciascun problema precedentemente definito è stato analizzato nel dettaglio e di ciascuno sono state definite le relazioni fisiche che regolano il fenomeno descritto.

- Implementazione del programma. Le relazioni definite sono state impiegate nella scrittura dei programmi. Una volta implementate le routines, delle semplici interfacce grafiche sono state messe appunto per facilitare l'utilizzo da parte dell'utente esterno.
- Test del programma. Ciascun programma è stato testato immettendo valori relativi a possibili scenari e valutando l'effettiva rispondenza dei dati in uscita.
- 

## 2.4 Risultati

### 2.4.1 Scelta degli strumenti da implementare

La metodologia definita per la scelta degli strumenti da sviluppare ha portato a valutare la possibilità di sviluppare 19 strumenti di efficientamento energetico. Nella Tabella 4 sono riportate tutte le possibilità di efficientamento dei sistemi individuate dall'analisi delle best practices e della letteratura. Per ciascuna viene fornita una breve motivazione che ha portato all'analisi della soluzione.

**Tabella 4 – Elenco dei possibili strumenti da realizzare**

#	Problema	Motivazione
1	Cambio della posizione dell'aspirazione e del compressore	<p>La temperatura dell'aria in ingresso al compressore è un fattore fondamentale per il rendimento. Limitare la temperatura in ingresso consente di innalzare il rendimento di compressione e quindi diminuire i consumi elettrici. Dalla fisica del problema si dimostra che diminuendo di 3°C la temperatura di aspirazione è possibile risparmiare l'1% dell'energia elettrica [23], [24].</p> <p>L'abbassamento della temperatura è possibile installando un sistema di prelievo dell'aria esterna dove non presente, dove presente spostare la presa d'aria orientata a nord possibilmente in un posto non esposto a luce solare diretta. Nel calcolo delle prestazioni della nuova soluzione occorre prestare attenzione al possibile aumento delle perdite di carico dovute al possibile allungamento delle condotte di immissione dell'aria.</p>
2	Adozione di un sistema di interrefrigerazione dove non presente	<p>Compressori con sistemi di interrefrigerazione hanno generalmente prestazioni migliori in termini di rendimento rispetto a quelli sprovvisti [24]. L'adozione di un sistema di questo tipo deve essere valutata soprattutto in termini di disponibilità economiche e di possibile modifica del layout di impianto.</p>
3	Adozione di un sistema a più livelli di pressione	<p>All'interno di uno stabilimento industriale le apparecchiature collegate con l'impianto di distribuzione dell'aria compressa non necessitano tutte dello stesso livello di pressione. In alcuni casi i sistemi di compressione dell'aria vengono settati sulla massima pressione necessaria elaborando inutilmente tutta la portata a quel livello di pressione.</p> <p>L'inserimento di un innalzatore di pressione per le utenze che necessitano di pressioni più alte potrebbe portare ad un abbassamento della pressione di set point dell'impianto principale e quindi a risparmiare energia [24].</p>

		Per la valutazione dell'intervento è necessario conoscere i fabbisogni in termini di portate per i singoli livelli di pressione.
4	Revisione della forma e dei diametri della rete	<p>La forma e la dimensione della rete di distribuzione condiziona fortemente il funzionamento dell'impianto di produzione dell'aria compressa. Impianti datati e sottoposti a modifiche, aggiunte ed esclusioni possono risultare non ottimizzati per il fabbisogno di aria compressa attuale. Una rete non ottimizzata comporta perdite di carico eccessive che solitamente vengono combattute innalzando la pressione di funzionamento dell'impianto quindi facendo innalzare i consumi per la produzione di aria compressa [25].</p> <p>Uno strumento che consenta di ottimizzare forma e dimensione della rete avrebbe un impatto notevole sulla gestione del servizio. Per la creazione del sistema e per l'eventuale utilizzo sarebbe necessario avere a disposizione dati relativi a posizione, diametri, lunghezze e singolarità di tutta la rete. Questo fattore renderebbe molto complesso l'utilizzo del tool.</p>
5	Revisione della forma e dei diametri del primo tratto della rete	<p>La forma e la dimensione della rete di distribuzione condiziona fortemente il funzionamento dell'impianto di produzione dell'aria compressa [25]. Uno strumento di revisione del diametro di tutta la rete sarebbe molto complesso da utilizzare tuttavia l'ottimizzazione del primo tratto di rete e dell'anello principale sarebbe un primo passo verso l'ottimizzazione del sistema.</p>
6	Sistema di filtraggio	<p>Il trattamento dell'aria compressa, operata attraverso passaggi in filtri ed essiccatori, comporta la creazione di perdite di carico anche ingenti [26]. Il controllo e la sostituzione dei filtri potrebbe far diminuire le perdite di carico dovute all'accumulazione di impurità sulle superfici da attraversare e quindi far risparmiare energia.</p> <p>Lo strumento dovrebbe valutare convenienza della sostituzione di un filtro con uno nuovo e definire il numero ottimale di ore di utilizzo dopo cui un filtro peggiora notevolmente le prestazioni del sistema.</p>
7	Controllo accensione e spegnimento, modulazione.	<p>Considerando che la richiesta di aria compressa al sistema nella maggior parte dei casi è una funzione piuttosto variabile nel tempo, si può definire una strategia di controllo dell'accensione e degli spegnimenti dei compressori in modo tale da minimizzare i consumi nel tempo. Nel caso di presenza di inverter lo strumento dovrebbe poter modulare la potenza del compressore in base al carico richiesto dall'impianto ad ogni intervallo di tempo [23].</p>
8	Sostituzione dell'aria compressa con altre forme di energia.	<p>In molti casi l'aria compressa può non rappresentare la migliore fonte di energia per l'alimentazione di macchinari [27]. La sostituzione di attrezzatura alimentata ad aria compressa (anche in funzione delle caratteristiche dell'aria e della posizione nella rete) con altra</p>

		alimentata elettricamente potrebbe aiutare l'azienda a ridurre i consumi energetici.
9	Controllo della qualità dell'aria	<p>Il trattamento dell'aria compressa, operata attraverso passaggi in filtri ed essiccatori, comporta la creazione di perdite di carico anche ingenti [26].</p> <p>L'utilizzo di aria compressa di minore qualità comporta minori filtrazioni e minori trattamenti per abbassare il punto di rugiada.</p> <p>Lo strumento serve per valutare la possibilità di diminuire la qualità dell'aria in maniera tale da ridurre le perdite di carico e diminuire i costi per la manutenzione dei sistemi di trattamento dell'aria.</p>
10	Recupero di calore	<p>La compressione di aria comporta necessariamente una produzione di calore a bassa temperatura.</p> <p>L'azienda potrebbe utilizzare questo tipo di calore soprattutto se in grande quantità e con flusso continuo nel tempo [23].</p> <p>Lo strumento aiuterebbe l'azienda calcolare la quantità di calore disponibile ed effettuare un'analisi costi-benefici sull'eventuale installazione di un sistema di recupero di calore tramite scambiatori.</p>
11	Profilo di richiesta dell'aria e serbatoi	<p>La variabilità della richiesta d'aria da parte delle utenze comporta il verificarsi di numerosi cicli di attivazione e spegnimento dei compressori (nel caso di gestione load-unload) e di modulazione del carico (nel caso di gestione tramite inverter) [28]. L'utilizzo di serbatoi di accumulo potrebbe limitare questi cicli e far diminuire i consumi.</p> <p>Lo strumento potrebbe calcolare il volume ottimale del serbatoio in base alla richiesta delle utenze.</p>
12	Riduzione del carico di base e modello di previsione dei consumi	<p>La variabilità della richiesta d'aria da parte delle utenze comporta il verificarsi di numerosi cicli di attivazione e spegnimento dei compressori (nel caso di gestione load-unload) e di modulazione del carico (nel caso di gestione tramite inverter) [28]. La conoscenza del profilo di carico o alternativamente della dipendenza dei consumi di aria compressa dalla produzione principale può aiutare a gestire al meglio il carico e ridurre al minimo quello di base.</p> <p>Lo strumento potrebbe identificare le dipendenze dei consumi di aria compressa dal tempo e dalle produzioni principali e ottimizzare il carico dei compressori minimizzando i consumi.</p>
13	Sistemi di misurazione	<p>La dotazione dell'organizzazione di un sistema di misura delle prestazioni e analisi degli andamenti è il primo passo verso il miglioramento dell'efficienza energetica [29].</p> <p>Lo strumento dovrebbe poter analizzare i dati di consumo e definire gli eventi di fuori controllo attraverso l'utilizzo di analisi di regressione, delle carte di controllo Cusum e della carta degli scostamenti per l'analisi delle prestazioni.</p>

14	Installazione di motori ad alta efficienza, inverter, cuscinetti a levitazione (BAT).	<p>I motori ad alta efficienza dotati di inverter per la regolazione del carico e rotanti su cuscinetti a levitazione magnetica rappresentano alcune delle BAT di settore. L'introduzione di questo tipo di tecnologie comporta la riduzione dei consumi energetici dei sistemi [24].</p> <p>Lo strumento di supporto potrebbe aiutare l'organizzazione a scegliere quali BAT installare in base alla definizione della posizione attuale e ad un'analisi dei costi e dei benefici di tale installazione.</p>
15	Adeguamento alle nuove necessità dell'impianto	<p>La grande dinamicità del mercato e delle industrie comporta cambiamenti continui all'interno delle stesse e rende necessari continui aggiornamenti degli impianti industriali. Non sempre però gli aggiornamenti comportano effettive riprogettazioni e ottimizzazioni dei sistemi. Nel caso degli impianti datati è possibile che i sistemi vengano fatti lavorare in condizione di rendimento non ottimale poiché mai adeguati al cambiamento (es. compressori fuori taglia, rete inadeguata, macchine spente, trattamento eccessivo, ecc.).</p> <p>Lo strumento di supporto dovrebbe analizzare la situazione attuale definendo un quadro e proponendo una soluzione migliore che riduca i consumi energetici.</p>
16	Quantificazione delle perdite	<p>Le perdite di aria sono la causa principale di aumento dei consumi energetici dei sistemi tuttavia la ricerca delle perdite attraverso strumenti ad ultrasuoni è una pratica molto efficiente ma anche molto dispendiosa in termini di tempo soprattutto per impianti di grande estensione [24]. La possibilità di stimare le perdite attraverso un metodo di misura indiretta potrebbe rappresentare un punto di partenza per la valutazione della necessità di controllo delle perdite.</p> <p>Lo strumento tramite misurazione dell'abbassamento della pressione del serbatoio potrebbe fornire una prima stima delle perdite di aria all'interno della rete di distribuzione.</p>
17	Pianificazione della manutenzione	<p>La manutenzione è una fonte di costi notevoli per quanto riguarda la gestione dei sistemi [27]. La gestione ottimale della funzione della manutenzione consente di minimizzare i costi e mantenere i sistemi efficienti.</p> <p>Lo strumento potrebbe aiutare a definire le scadenze per la manutenzione, evidenziarne i costi e gli eventuali benefici.</p>
18	Confronto tra prestazioni teoriche e reali	<p>I sistemi aria compressa possono perdere di efficienza con l'utilizzo e l'usura. Lo strumento potrebbe simulare il sistema installato e grazie alle prestazioni teoriche stabilire lo scostamento con le prestazioni reali. Questo metodo potrebbe essere utile per la valutazione e la localizzazione delle perdite energetiche e aiutare a suggerire possibili modifiche al sistema.</p>

19	Life cost analysis	<p>Il Life Cost Analysis (LCA) permette di valutare tutti i costi relativi ad un determinato componente o sistema, dalla progettazione allo smaltimento. Si prendono in considerazione, infatti, i costi iniziali (acquisto, installazione, etc.), i costi di gestione (spese energetiche, manutenzione, oneri finanziari, etc.), fino ad arrivare ai costi di smaltimento e recupero.</p> <p>Lo strumento potrebbe aiutare l'organizzazione nel considerare i costi totali del sistema e motivare l'acquisto di parti nuove e più efficienti attraverso una valutazione economica.</p>
----	--------------------	---

Ogni strumento presente nell'elenco può essere utile per la valutazione di un possibile risparmio energetico tuttavia non tutti gli strumenti sono facilmente utilizzabili ed implementabili, per queste ragioni sono stati valutati in base ai parametri definiti dalla metodologia.

Nella Tabella 5 sono riportati tutti gli strumenti dell'elenco, tutte le grandezze che devono essere inserite per l'utilizzo dello strumento stesso e le valutazioni di difficoltà di raccolta dati, di difficoltà di sviluppo dello strumento e di difficoltà di realizzazione dell'intervento.

**Tabella 5 – Lista degli strumenti definiti, delle grandezze da considerare e valutazione finale**

	Problema	Dati necessari	Difficoltà reperimento dati	Difficoltà sviluppo strumento	Difficoltà realizzazione e intervento	Valutazione finale
1	Cambio della posizione dell'aspirazione e del compressore	Temperatura ambiente	2	1	3	6.7
		Pressione esercizio	1	1		
		Tempo utilizzo annuo	2	2		
2	Adozione di un sistema di interrefrigerazione	Taglia	2	2	5	20
		Portata	2	2		
		Pressione	2	2		
3	Adozione di un sistema a più livelli di pressione	Temperatura ambiente	2	1	3	8
		Alta pressione	1	1		
		Bassa pressione	1	1		
		Tempo utilizzo annuo	2	2		
		Portata	2	2		
		Percentuale portata AP/Tot	4	1		
4	Revisione della forma e dei diametri della rete	Portata	2	2	4	40.3
		Velocità	4	2		
		Lunghezza	5	2		

		Singularità numero	5	2		
		Singularità tipo	5	4		
5	Revisione della forma e dei diametri del primo tratto della rete	Portata	2	2	3	17.3
		Velocità	4	2		
		Lunghezza	2	2		
		Singularità numero	2	2		
		Singularità tipo	2	4		
6	Sistema di filtraggio	Portata	2	2	3	15.2
		Pressione	2	2		
		Tempo utilizzo annuo	2	2		
		Intervallo cambio filtro	3	4		
		Costo filtro	1	1		
		Delta P per cambio	3	3		
7	Controllo accensione e spegnimento, modulazione.	Portata	2	2	1	4.7
		Pressione	2	2		
		Taglia e tipo di compressori	2	1		
		Livelli di pressione	2	5		
		Presenza di serbatoi	1	3		
		Profilo di carico	4	1		
8	Sostituzione dell'aria compressa con altre forme di energia.	Distanza dalla rete principale	4	4	4	17.1
		Pressione esercizio alta	1	1		
		Pressione bassa	1	1		
		Tempo funzionamento	2	2		
		Portata	2	2		
		Percentuale portata AP/Tot	4	1		
9	Controllo della qualità dell'aria	Portata	2	2	2	24.5
		Pressione	2	2		
		Tipo di utenze (qualità necessaria)	3	4		
		Presenza di polvere	5	5		
		Umidità aria	5	5		



		Posizionamento della presa (interno/esterno, N-S-E-W) (influisce sulla qualità e sulla temperatura)	1	4		
10	Recupero di calore	Portata	2	2	5	38.4
		Pressione	2	2		
		Quantificare calore disponibile	5	5		
		Necessità di calore a bassa temperatura	2	3		
		Disponibilità di locali	1	4		
11	Profilo di richiesta dell'aria e serbatoi	Portata	2	2	5	35.6
		Pressione	2	2		
		Livelli di pressione	5	5		
		Disponibilità di locali	1	1		
		Classificazione delle utenze	5	5		
		Tipo di rete (anello, maglia, pettine)	1	1		
12	Riduzione del carico di base e modello di previsione dei consumi.	Tipo di produzione principale	3	2	2	16.3
		Portata	2	2		
		Pressione	2	2		
		Taglia e tipo di compressori	2	2		
		Qualità necessaria	3	4		
		Piano di produzione	5	3		
		Consumi elettrici/aria compressa	4	4		
13	Sistemi di misurazione	Disponibilità economica	1	1	3	22.5
		Capacità di analisi dati	4	5		
14	Installazione di motori ad alta efficienza, inverter, cuscinetti	Disponibilità economica	1	1	5	27.1
		Portata	2	2		
		Pressione	2	2		

	a levitazione (BAT).	Profilo di carico	4	2		
		Taglia e tipo di compressori	2	2		
		Consumi elettrici/aria compressa	4	4		
15	Adeguamento alle nuove necessità dell'impianto	Portata	2	2	4	26.8
		Pressione	2	2		
		Profilo di carico	4	2		
		Taglia e tipo di compressori	2	2		
		Consumi elettrici/aria compressa	4	4		
16	Quantificazione delle perdite	Capacità serbatoio	1	1	4	11.2
		Pmax	1	1		
		Pmin	1	1		
		Tempo svuotamento	5	2		
		Potenza compressore	2	2		
17	Pianificazione della manutenzione	Tipo e frequenza di manutenzione	4	5	3	48
		Spese per la manutenzione	4	3		
		Qualità necessaria	3	4		
		Presenza di polvere	5	4		
18	Confronto tra prestazioni teoriche e reali	Prestazioni teoriche dell'impianto	5	4	2	18.8
		Portata	2	2		
		Pressione	2	2		
		Qualità necessaria	4	4		
		Profilo di carico	4	2		
		Taglia e tipo di compressori	2	2		
		Livelli di pressione	2	5		
		Perdite di carico	4	3		
		Profilo di carico	4	2		
Funzionamento on/off, ecc	3	2				

19	Conoscenza di tutti i macchinari e le attrezzature	5	5	3	75
	Conoscenza di tutte le lavorazioni	5	5		

Dalla Tabella 5 si deduce come gli strumenti che sono stati sviluppati siano quelli con valore dell'indice sintetico più basso (sulla tabella sono stati evidenziati con colori tendenti al verde ed al giallo).

Gli strumenti implementati sono quindi:

- Strumento per la valutazione delle perdite di carico nella distribuzione di aria compressa;
- Strumento per la valutazione delle perdite di carico nella fase di aspirazione dell'aria esterna;
- Strumento per la valutazione del sistema di gestione dei filtri;
- Strumento di calcolo dei consumi nel caso di utilizzo di sistemi a 2 livelli di pressione;
- Strumento per la valutazione della posizione della presa d'aria del compressore;
- Strumento per la valutazione delle perdite di aria per via indiretta;
- Strumento di controllo della modulazione del compressore con inverter.

#### 2.4.2 Strumenti sviluppati

In questa sezione vengono descritti gli strumenti sviluppati e le motivazioni che hanno portato alle scelte operate

##### **Strumento per la valutazione delle perdite di carico nella distribuzione di aria compressa**

Lo sviluppo di questo strumento ha come obiettivo la possibilità di fornire, al personale dell'organizzazione che lo utilizza, una valutazione della buona progettazione del primo tratto di rete ovvero quello che collega la sala compressori con le dorsali principali.

La valutazione viene fatta sulla base delle perdite di carico del tratto in esame valutandole in base alla lunghezza del ramo e alla presenza di varie singolarità (valvole, curve, ecc.). Lo strumento è utile anche per la valutazione di qualsiasi altro ramo della rete di distribuzione.

I dati che l'utente deve immettere per la valutazione sono:

- Portata di aria compressa che attraversa il tratto (definita in  $Nm^3/h$ );
- Temperatura ingresso aria;
- Pressione aria compressa;
- Delta T dell'aria in uscita dal compressore;
- Velocità desiderata dell'aria nel tratto di tubazione (espressa in m/s);
- Lunghezza del tratto (espressa in m);
- Diametro delle tubazioni (espresso in pollici);
- Numero di singolarità tra cui:
  - Valvole a flusso avviato;
  - Valvole a diaframma;
  - Saracinesche;

- Gomiti;
- Curva (raggio uguale al diametro);
- Curva (raggio uguale al doppio del diametro);
- Intersezioni a T;
- Riduzioni di diametro.

Per il calcolo delle perdite di carico la formula empirica (2) è stata utilizzata ed implementata:

$$\Delta P = 1.6 \cdot 10^8 \cdot \frac{Q^{1.85} \cdot L}{d^5 \cdot p_0} \quad (2)$$

In cui:

$\Delta P$  è la perdita di carico espressa in bar;

$Q$  è la portata d'aria in Nm<sup>3</sup>/min;

$d$  è il diametro interno delle tubazioni espresso in mm;

$p_0$  è la pressione dell'aria compressa in kg/cm<sup>2</sup>;

$L$  è la lunghezza equivalente della condotta considerando anche la presenza di singolarità.

Lo strumento, sviluppato in ambiente Office Excel, si presenta quindi come un semplice foglio di calcolo in cui si devono inserire i dati definiti in precedenza. Per il calcolo dei risultati è sufficiente fare click con il puntatore sul pulsante "calcola" e automaticamente il programma viene attivato. In Figura 11 è riportata l'interfaccia grafica del tool.

Dimensionamento delle dorsali								
Portata utenze (Nm3/h)			Temp. Ingresso (°C)			Press. Compr. (bar)		
Delta T aria (°C)			Velocità (m/s)			Lunghezza (m)		
Singolarità (n°)								
Diametro attuale (inch)	Valvola a flusso avviato	Valvola a diaframma	Saracinesca	Gomito	Curva R=d	Curva R=2d	T	Riduzione
Risultati								
	Soluzione attuale		Soluzione diametro minimo			Soluzione diametro massimo		
Diametro (inch)								
Velocità (m/s)								
Perdite di carico totali (Pa)								

Calcola
Pulisci

Figura 11 – Interfaccia grafica dello strumento sviluppato

I risultati resi disponibili sono relativi alla soluzione attuale ed a due soluzioni con diametro commerciale immediatamente inferiore ed immediatamente superiore a quello ottimale.

Per ogni soluzione vengono quindi resi disponibili dati su:

- Diametro delle tubazioni;
- Numero di Reynhold;
- Perdite di carico totali della linea.

Lo strumento fornisce quindi un valido supporto per la valutazione del dimensionamento della rete. Fornendo due valori in uscita, si lascia all'utilizzatore la possibilità di scelta su quale soluzione sia migliore potendole valutare sia in termini di velocità del flusso, sia in termini di perdite di carico totali.

#### Test dello strumento

Lo strumento è stato oggetto di alcune prove per quanto riguarda il funzionamento e il calcolo delle perdite di carico.

È stato ipotizzato uno scenario in cui sono presenti:

- Un compressore con portata elaborata di 500 Nm<sup>3</sup>/h;
- Lunghezza del tubo 100 m;
- Velocità ottimale nel tubo di 8 m/s;
- Presenti una saracinesca, un gomito e una riduzione lungo la tubazione;
- Diametro della tubazione attuale di 4".

Utilizzando lo strumento è stato possibile calcolare le perdite di carico della tubazione presente e stimare quelle che si avrebbero ottimizzando i diametri.

I risultati raccolti in Tabella 6 mostrano che per lo scenario definito il diametro ottimale per quanto riguarda la velocità dell'aria e la minimizzazione delle perdite di carico è di 2" 1/2. La soluzione ottenuta dal test riportato mostra inoltre che l'azienda può scegliere anche una soluzione in cui il diametro della tubazione è inferiore rispetto alla ottimale facendo aumentare le perdite di carico ma diminuendo i costi per l'acquisto. La valutazione finale della convenienza dell'intervento rimane appannaggio dell'organizzazione.

**Tabella 6 – Riassunto dei risultati della simulazione di funzionamento dello strumento**

	<b>Soluzione attuale</b>	<b>Soluzione diametro minimo</b>	<b>Soluzione diametro massimo</b>
<b>Diametro (inch)</b>	4	2	2 ½
<b>Velocità (m/s)</b>	2.3	9.1	5.4
<b>Perdite di carico totali (Pa)</b>	10.1	305.1	78.1

#### **Strumento per la valutazione delle perdite di carico nella fase di aspirazione dell'aria esterna**

Lo sviluppo di questo strumento ha come obiettivo la possibilità di fornire, al personale dell'organizzazione che lo utilizza, una valutazione della buona progettazione del condotto di aspirazione del compressore ovvero del tratto di tubazione che collega il compressore con l'esterno.

La valutazione viene fatta sulla base delle perdite di carico del tratto in esame valutandole in base alla lunghezza del ramo e alla presenza di varie singolarità (valvole, curve, ecc.).

I dati che l'utente deve immettere per la valutazione sono:

- Portata di aria compressa che attraversa il tratto (definita in Nm<sup>3</sup>/h);
- Velocità desiderata dell'aria nel tratto di tubazione (espressa in m/s);
- Lunghezza del tratto (espressa in m);
- Diametro delle tubazioni (espresso in pollici);
- Numero di singolarità tra cui:

- Valvole a flusso avviato;
- Valvole a diaframma;
- Saracinesche;
- Gomiti;
- Curva (raggio uguale al diametro);
- Curva (raggio uguale al doppio del diametro);
- Intersezioni a T;
- Riduzioni di diametro.

Per il calcolo delle perdite di carico si è fatto riferimento alla (2).

Lo strumento, sviluppato in ambiente Office Excel, si presenta quindi come un semplice foglio di calcolo in cui si devono inserire i dati definiti in precedenza. Per il calcolo dei risultati è sufficiente fare click con il puntatore sul pulsante “calcola” e automaticamente il programma viene attivato. In Figura 12 è riportata l’interfaccia grafica del tool.

Dimensionamento della condotta di aspirazione								
Portata utenze (Nm <sup>3</sup> /h)			Velocità (m/s)			Lunghezza (m)		
Singolarità (n°)								
Diametro attuale (inch)	Valvola a flusso avviato	Valvola a diaframma	Saracinesca	Gomito	Curva R=d	Curva R=2d	T	Riduzione
Risultati								
	Soluzione attuale		Soluzione diametro minimo			Soluzione diametro massimo		
Diametro (inch)								
Velocità (m/s)								
Re								
<b>R perdite di carico (Pa/m)</b>								
Perdite di carico totali (Pa)								

Calcola
Pulisci

**Figura 12 – Interfaccia grafica dello strumento sviluppato**

I risultati resi disponibili sono relativi alla soluzione attuale ed a due soluzioni con diametro commerciale immediatamente inferiore ed immediatamente superiore a quello ottimale.

Per ogni soluzione vengono quindi resi disponibili dati su:

- Diametro delle tubazioni;
- Velocità dell’aria;
- Numero di Reynhold;
- Perdite di carico equivalenti su unità di lunghezza;
- Perdite di carico totali della linea.

Lo strumento fornisce quindi un valido supporto per la valutazione del dimensionamento della rete. Fornendo due valori in uscita, si lascia all’utente la possibilità di scelta su quale soluzione sia migliore potendole valutare sia in termini di velocità del flusso, sia in termini di perdite di carico totali.

Test dello strumento

Lo strumento è stato oggetto di alcune prove per quanto riguarda il funzionamento e il calcolo delle perdite di carico.

È stato ipotizzato uno scenario in cui sono presenti:

- Un compressore con portata elaborata di 500 Nm<sup>3</sup>/h;
- Lunghezza del tubo 15 m;
- Velocità ottimale nel tubo di 8 m/s;
- Presenti una saracinesca, due gomiti e due curve lungo la tubazione;
- Diametro della tubazione attuale di 4”.

Utilizzando lo strumento è stato possibile calcolare le perdite di carico della tubazione presente e stimare quelle che si avrebbero ottimizzando i diametri.

I risultati raccolti in Tabella 7 mostrano che per lo scenario definito il diametro ottimale per quanto riguarda la velocità dell’aria e la minimizzazione delle perdite di carico è di 6”. La soluzione ottenuta dal test riportato mostra inoltre che l’azienda può scegliere anche una soluzione in cui il diametro della tubazione è inferiore rispetto alla ottimale facendo aumentare le perdite di carico ma diminuendo plausibilmente i costi per l’acquisto. La valutazione finale della convenienza dell’intervento rimane appannaggio dell’organizzazione.

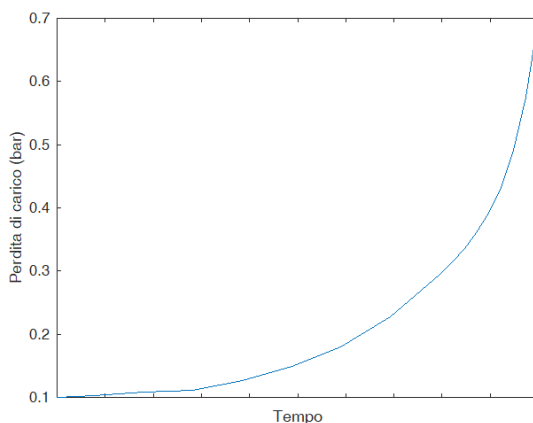
**Tabella 7 - Riassunto dei risultati della simulazione di funzionamento dello strumento**

	<b>Soluzione attuale</b>	<b>Soluzione minimo diametro</b>	<b>Soluzione massimo diametro</b>
Diametro (inch)	4	5	6
Velocità (m/s)	17.68	11.32	7.86
Numero di Reynolds	235785	188628	157190
R perdite di carico (Pa/m)	107.6	37.3	15.7
Perdite di carico totali (Pa)	3454	1454	792

### **Strumento per la valutazione del sistema di gestione dei filtri**

Numerosi studi sono stati portati a termine negli anni passati circa l’utilizzo dei sistemi di filtrazione dell’aria e la dinamica del loro sporcoamento [26], [30]. Come è noto lo sporcoamento del filtro comporta una minore capacità di pulizia dell’aria e soprattutto una maggiore perdita di carico concentrata. La maggiore perdita di carico concentrata può essere ricondotta ovviamente alla necessità di comprimere maggiormente l’aria da far arrivare alle utenze impiegando più energia del dovuto. La pulizia dei filtri è quindi un aspetto fondamentale per in buon funzionamento dei sistemi e per il risparmio di energia.

La velocità di sporcoamento dei filtri dipende sostanzialmente soltanto dalla quantità di impurità sotto forma di polvere e vapore rimane sospesa in aria e da quanta aria attraversa le superfici filtranti. Dalla Figura 13 è possibile notare come la perdita di carico dovuta allo sporcoamento del filtro non abbia andamento lineare e quindi possa portare ad un innalzamento repentino e ad un conseguente peggioramento delle prestazioni. Per questo motivo è consigliabile non arrivare mai alla sostituzione del filtro dopo che la perdita di carico sia eccessiva.



**Figura 13 – Andamento tipico delle perdite di carico nel tempo dovuto allo sporcamento del filtro**

Lo strumento ha l’obiettivo di aiutare l’organizzazione nella definizione della strategia migliore per la manutenzione dei filtri. In altre parole, lo strumento sviluppato confronta i costi della gestione attuale, impostando alcuni parametri come la frequenza del cambio filtro, con i costi che si avrebbero aumentando la frequenza delle sostituzioni diminuendo così la caduta di pressione media durante il funzionamento.

Lo strumento si basa su un concetto molto semplice: come è visibile dalla Figura 13 diminuendo il tempo di utilizzo del filtro è meno probabile che si raggiungano perdite di carico elevate e quindi è possibile diminuire il consumo energetico per superare l’abbassamento di pressione. Di contro una strategia di sostituzione troppo frequente dei filtri comporterebbe dei costi di manutenzione eccessivi.

Per l’utilizzo del tool, i parametri da inserire sono:

- Tempo di utilizzo annuo del compressore (espresso in h);
- Intervallo di cambio dei filtri (espresso in h);
- Costo dell’intervento (€);
- Portata media del compressore (espresso in Nm<sup>3</sup>/h);
- Delta P massimo per il cambio filtro (espresso in bar);
- Pressione di funzionamento dell’impianto (espressa in bar).

Lo strumento confronta i costi annui relativi alla gestione attuale con quelli che si avrebbero sostituendo i filtri quando la perdita di carico raggiunta fosse minore di 0.1, 0.2 e 0.3 bar rispetto a quella impostata.

In Figura 14 è visibile l’interfaccia dello strumento sviluppato.

I risultati descrivono quindi gli intervalli di sostituzione calcolati, il costo annuo e il risparmio annuo delle varie soluzioni.

#### Test dello strumento

Lo strumento è stato oggetto di alcune prove per quanto riguarda il funzionamento e il calcolo del risparmio economico dovuto alla rivalutazione della strategia di manutenzione dei filtri.

È stato ipotizzato uno scenario in cui:

- È presente un compressore con portata media elaborata di 500 Nm<sup>3</sup>/h a 8 bar e che viene utilizzato per 2500 ore all’anno;
- I filtri vengono mantenuti mediamente ogni 400 h di utilizzo che è il tempo in cui la perdita di carico arriva a 0.9 bar;



- Un intervento di manutenzione costa mediamente 50 €;
- L'energia elettrica viene pagata al fornitore 0.15 €/kWh.

Stumento per la valutazione del sistema di gestione dei filtri			
Tempo di utilizzo totale (h/anno)	Portata media (Nm <sup>3</sup> /h)	Pressione impianto (bar)	C. energia (€/kWh)
Intervallo cambio filtro (h)	Delta P per cambio (bar)	Costo filtro (€)	
Intervallo sostituzione calcolato (h)			
Costo annuo sistema di compressione (€/anno)			
Risparmio annuo uso filtro (€/anno)			

**Figura 14 - Interfaccia grafica dello strumento sviluppato**

Utilizzando lo strumento è stato possibile calcolare il risparmio dovuto alla variazione del periodo manutenzione del sistema filtrante in base alla caduta di pressione massima ammessa.

In particolare, diminuendo la caduta di pressione massima da 0.9 a 0.6 bar l'intervallo di tempo che intercorre tra due interventi di manutenzione consecutivi viene ridotto del 23%. Nonostante i costi annuali per la manutenzione siano proporzionali al numero di interventi, la caduta di pressione inferiore consente di diminuire i costi per l'energia di un quantitativo superiore all'aumento della spesa per la manutenzione. Il risparmio raggiungibile con questo scenario è quindi di circa 300 € all'anno sul costo di gestione dell'impianto. Il dettaglio dei risultati è raccolto in Tabella 8.

**Tabella 8 – Riassunto dei risultati della simulazione di funzionamento dello strumento**

<b>Intervallo sostituzione calcolato (h)</b>	405.35	381.83	352.80	314.85
<b>Costo annuo sistema di compressione (€/anno)</b>	24090	23979	23874	23784
<b>Risparmio annuo uso filtro (€/anno)</b>		111.20	215.58	305.35

### Strumento di calcolo dei consumi nel caso di utilizzo di sistemi a 2 livelli di pressione

Le apparecchiature installate all'interno di un impianto industriale e collegate alla rete di distribuzione dell'aria compressa non devono essere alimentate tutte alla stessa pressione. Nei casi in cui la rete ed il compressore siano unici, il set point di funzionamento dei sistemi di compressione dell'aria viene impostato sul livello massimo necessario alle utenze. In questo modo si adotta un comportamento cautelativo minimizzando i rischi di malfunzionamento ma rischiando di innalzare notevolmente i consumi.

Nel caso in cui siano presenti utenze la cui pressione di funzionamento è notevolmente differente (>0.5÷1 bar) e in cui le portate siano maggiormente utilizzate dagli strumenti con pressione di esercizio più alta, potrebbe essere conveniente valutare l'adozione di un sistema a due livelli di pressione.

Il sistema potrebbe essere visto sia come l'accoppiamento di più compressori operanti a pressioni diverse e collegate a linee di trasporto differenti oppure come un sistema in serie con un compressore a bassa

pressione e un sistema di innalzamento della pressione nella vicinanza delle utenze che necessitano di alimentazione a pressione maggiore.

Lo strumento sviluppato ha l'obiettivo di aiutare l'organizzazione nella valutazione della convenienza dell'adozione di un sistema a più livelli di pressione confrontando i consumi di un sistema che elabora tutta la portata ad un solo livello di pressione con un sistema in cui una parte della portata viene elaborata a pressione minore.

Lo strumento simula i differenti scenari attraverso il calcolo dei lavori di compressione dell'aria utilizzando semplici considerazioni termodinamiche.

Per l'utilizzo del tool i valori da inserire sono:

- Portata d'aria compressa richiesta (indicata in Nm<sup>3</sup>/h);
- Alta pressione (indicata in bar);
- Bassa pressione (indicata in bar);
- Tempo di funzionamento annuo (indicato in h);
- Rapporto tra la portata ad alta pressione e la portata totale (indicata in %);
- Temperatura di immissione dell'aria nel compressore.

Con tali dati lo strumento consente di valutare il consumo attuale per la produzione di aria compressa, quello che si avrebbe installando un sistema a due livelli di pressione.

L'interfaccia grafica si presenta come un semplice foglio di calcolo in cui devono essere inseriti i valori richiesti e che dopo aver cliccato con il puntatore il pulsante "Calcola" restituisce i valori descritti. In Figura 15 è rappresentato lo strumento così come si presenta.

Calcolo dei consumi nel caso di utilizzo di sistemi a 2 livelli di pressione		
Portata richiesta (Nm <sup>3</sup> /h)	Alta pressione (bar)	Bassa pressione (bar)
Tempo di funzionamento (h/anno)	Percentuale Qap/Qtot (%)	Temperatura Presa d'aria (°C)
<b>Costo energia (€/kWh)</b>		<input type="button" value="Calcola"/>  <input type="button" value="Pulisci"/>
<b>Consumo attuale (kWh)</b>		
<b>Consumo con 2 livelli di pressione (kWh)</b>		
<b>Costo attuale (€/anno)</b>		
<b>Costo 2 livelli (€/anno)</b>		

Figura 15 - Interfaccia grafica dello strumento sviluppato

Test dello strumento

Lo strumento è stato oggetto di alcune prove per quanto riguarda il funzionamento e il calcolo risparmio economico dovuto alla possibilità di utilizzare sistemi a 2 livelli di pressione in luogo di un sistema con regolazione sulla pressione massima.

È stato ipotizzato uno scenario in cui:

- È presente un compressore che elabora una portata media di 500 Nm<sup>3</sup>/h con una pressione che varia da 4 a 10 bar. In particolare, il 70% della portata è destinato ad utenze alimentate a 7 bar mentre il restante 30% serve per utenze che necessitano di una pressione di 4 bar;

- La temperatura esterna è di 20° C;
- Il compressore viene usato mediamente 3000 h/anno;
- La fornitura di energia elettrica costa 0.15 €/kWh.

Partendo da questi dati lo strumento ha valutato il risparmio economico che si avrebbe introducendo un sistema di compressione dell'aria a bassa pressione per la portata che necessita di 4 bar e di un sistema di compressione separato per la portata più alta.

In particolare, lo strumento stima che il consumo attuale può essere diminuito del 15% utilizzando un sistema a 2 livelli di pressione. Il risparmio economico passando da una soluzione all'altra è notevole e si aggira attorno agli 4200 €.

Il dettaglio dei risultati è riportato in Tabella 9.

**Tabella 9 – Riassunto dei risultati della simulazione di funzionamento dello strumento**

<b>Consumo attuale (kWh)</b>	190762
<b>Consumo con 2 livelli di pressione (kWh)</b>	162741
<b>Costo attuale (€/anno)</b>	28614
<b>Costo 2 livelli (€/anno)</b>	24411

#### **Strumento per la valutazione della posizione della presa d'aria del compressore**

Come noto, l'utilizzo di aria proveniente dall'esterno (e quindi solitamente più fresca) potrebbe ridurre il lavoro di compressione. Per un compressore a flusso sostanzialmente costante ridurre la temperatura dell'aria in ingresso al compressore porta alla riduzione dei consumi dello stesso. La strategia più semplice per prelevare l'aria alla temperatura più bassa possibile è quella di posizionare la presa d'aria rivolta a nord in una zona possibilmente non colpita da luce solare diretta e sollevata rispetto al livello del terreno. Una valutazione approssimativa suggerisce che la riduzione di 3°C della temperatura di ingresso fa diminuire il lavoro di compressione dell'1% [23], [24]. Tale riduzione è semplicemente esplicabile attraverso considerazioni termodinamiche.

Lo strumento sviluppato vuole consentire all'utente di valutare la possibilità di ridurre i consumi dell'impianto di compressione dell'aria attraverso lo spostamento della presa d'aria dall'interno all'esterno.

Per l'utilizzo dello strumento i seguenti dati devono essere immessi:

- Temperatura ambiente (espressa in °C);
- Pressione di esercizio (espressa in bar);
- Numero di stadi del compressore;
- Rapporto di compressione del primo stadio;
- Temperatura uscita interrefrigeratore;
- Portata elaborata (espressa in Nm<sup>3</sup>/h);
- Tempo di utilizzo annuo (espresso in h);
- Costo dell'energia (espresso in €/kWh)

Calcolo dei consumi riducendo la temperatura di immissione dell'aria			
Temp. ambiente (°C)	Pressione (bar)	N. stadi	Beta 1
Delta T interref. (°C)	Portata (Nm <sup>3</sup> /h)	Tempo utilizzo (h/anno)	C. energia (€/kWh)
Temp. Amb. (°C)	Temp. Amb. -3 (°C)	Temp. Amb.-6 (°C)	Temp. Amb. -9 (°C)
Potenza richiesta (kW)			
Costo (€/anno)			
Risparmio (€/anno)			

Calcola

Pulisci

Figura 16 - Interfaccia grafica dello strumento sviluppato

Lo strumento consente quindi di valutare il risparmio in termini energetici ed economici dell'immissione della presa d'aria esterna e del conseguente abbassamento della temperatura in uscita. I valori forniti consentono di valutare costi, consumi e risparmio relativi ad un abbassamento della temperatura di 3, 6 e 9 °C rispetto alla soluzione presente.

Test dello strumento

Lo strumento è stato oggetto di alcune prove per quanto riguarda il funzionamento e il calcolo risparmio economico dovuto alla possibilità di utilizzare punti di prelievo dell'aria esterna differenti da quello attuale con la possibilità di abbassare la temperatura di dell'aria aspirata fino a 9° C.

Per la simulazione è stato ipotizzato uno scenario in cui:

- È presente un compressore che elabora una portata media di 500 Nm<sup>3</sup>/h con una pressione di 10 bar. In particolare, il salto di pressione viene elaborato in due fasi attraverso un compressore a 2 stadi con interrefrigerazione con rapporto di compressione del primo stadio pari a 3 e temperatura all'uscita dall'interrefrigeratore di 30° C superiore alla temperatura di ingresso dell'aria;
- La temperatura esterna è di 20° C;
- Il compressore viene usato mediamente 3500 h/anno;
- La fornitura di energia elettrica costa 0.15 €/kWh.

Partendo da questi dati lo strumento ha valutato il risparmio economico che si avrebbe introducendo aria a temperatura inferiore rispetto alla temperatura dell'aria attualmente utilizzata.

Il risparmio economico viene calcolato per 3 soluzioni nel caso in cui si riesca ad abbassare la temperatura di 3,6 o 9° C. Per avere una valutazione completa dell'efficacia della soluzione, il risparmio annuo dovrebbe essere confrontato con il costo di un eventuale intervento di modifica del punto di aspirazione dell'aria.

Il dettaglio dei risultati è riportato in Tabella 10.

**Tabella 10 – Riassunto dei risultati della simulazione di funzionamento dello strumento**

	Temp. Amb. (°C)	Temp. Amb. -3 (°C)	Temp. Amb. -6 (°C)	Temp. Amb. -9 (°C)
<b>Potenza richiesta (kW)</b>	69.89	69.18	68.48	67.78
<b>Costo (€/anno)</b>	36692.48	36323.61	35954.62	35585.50
<b>Risparmio (€/anno)</b>		368.86	737.85	1106.97

### Strumento per la valutazione delle perdite di aria per via indiretta

Le perdite d’aria dalla rete di distribuzione sono il problema più grave da gestire per poter innalzare l’efficienza energetica del sistema. Le perdite sono l’aspetto più importante da prevedere e da considerare poiché potrebbero innalzare in maniera notevole i consumi energetici, stime dicono che una rete di distribuzione non ben mantenuta possa arrivare a disperdere il 20% della portata che trasporta [23], [25], [29], [31], [32]. Inoltre, le perdite possono rendere le attrezzature connesse alla rete meno efficienti e influire negativamente sulla produzione, ridurre la durata delle apparecchiature, rendere necessari interventi di manutenzione aggiuntivi e tempi di fermo macchina non programmati.

Il controllo delle perdite è quindi il primo passo da fare per definire una strategia di efficientamento energetico. Effettuare un controllo capillare è tuttavia un’attività molto complessa che può comportare ingenti costi all’azienda. Il controllo e la valutazione delle perdite di aria vengono effettuate solitamente direttamente dal personale analizzando i tratti di rete con un fonometro portatile in grado di identificare le perdite grazie alla tipica emissione di ultrasuoni.

È possibile valutare in via preventiva, attraverso il controllo dei consumi, il quantitativo di aria compressa persa e quindi valutare la necessità di un intervento di monitoraggio e ricerca delle perdite.

Lo strumento sviluppato serve proprio a valutare in via preventiva il quantitativo di aria compressa persa dalla rete e fornire un primo dato di costo del problema. Il funzionamento dello strumento si basa sul calcolo della portata persa dall’impianto attraverso la valutazione del tempo di abbassamento della pressione del serbatoio. Per misurare le perdite è quindi necessario che tutte le apparecchiature collegate alla rete siano spente e che il sistema sia alla pressione di set point. Conoscendo la capacità del serbatoio e il tempo in cui la pressione scende di un determinato  $\Delta P$  è possibile avere una stima della portata persa e dell’energia consumata a causa delle perdite.

In Figura 17 viene mostrata l’interfaccia grafica dello strumento.

Calcolo delle perdite di aria per via indiretta		
Capacità serbatoio	(m3)	
Pmax	(bar)	
Pmin	(bar)	
T svuotamento	(min)	
Potenza compressore	(kW)	
Risultati		
Portata persa	% tot	
Potenza persa	(kW)	



**Figura 17 - Interfaccia grafica dello strumento sviluppato**

Per l’utilizzo del tool i dati da immettere sono:

- Capacità del serbatoio (espressa in m<sup>3</sup>);
- Pressione massima di funzionamento (espressa in bar);
- Pressione minima (espressa in bar);
- Tempo di passaggio della pressione dal livello massimo al livello minimo (espresso in minuti);
- Potenza del compressore (espressa in kW);
- Portata persa (espressa come frazione % della totale);
- Potenza sprecata (espressa in kW).

Lo strumento consente quindi di valutare in termini energetici quanta potenza viene utilizzata per la produzione di aria compressa che poi viene persa.

Attraverso questo strumento è quindi possibile valutare la fattibilità di un intervento di ricerca e riduzione delle perdite nella rete.

#### Test dello strumento

Lo strumento è stato oggetto di alcune prove per quanto riguarda il funzionamento e il calcolo per via indiretta della portata d'aria persa dalla rete di distribuzione dell'aria.

Per la simulazione è stato ipotizzato uno scenario in cui:

- È presente un serbatoio con capacità di 10 m<sup>3</sup>;
- Si decide di misurare il tempo di abbassamento della pressione all'interno del serbatoio ad utenze spente tenendo di conto che la pressione di partenza è di 7.5 bar e quella minima è di 5 bar;
- Il tempo di passaggio della pressione dal valore massimo al minimo è stato misurato in 25 minuti;
- Il compressore a servizio dell'impianto ha una potenza di 50kW.

Partendo da questi dati lo strumento ha calcolato che la portata persa è circa il 10% del totale erogata dal compressore che equivale ad uno spreco di potenza di circa 7kW. Dai risultati è possibile fare delle successive valutazioni sulla convenienza di una campagna di ricerca delle perdite basata soprattutto su valutazioni economiche sui costi di intervento e sugli eventuali benefici.

#### **Strumento di controllo della modulazione del compressore con inverter**

Solitamente nelle applicazioni in cui il fabbisogno di aria compressa è stabile nel tempo è possibile installare con successo compressori con gestione dell'accensione e dello spegnimento di tipo Load-unload. La domanda di aria compressa da parte delle apparecchiature collegate alla rete di distribuzione è in molti casi poco stabile nel tempo. Tale instabilità porterebbe i compressori regolati attraverso logiche load-unload ad avere continui cicli di accensione e spegnimento rischiando così il precoce deterioramento delle macchine. Il serbatoio è un ottimo sistema per disaccoppiare dal punto di vista temporale le fluttuazioni del carico dalle fasi di accensione e spegnimento.

La letteratura tecnico-scientifica considera che l'utilizzo di compressori a velocità variabile (VSD) comandati tramite variazione della frequenza operata da appositi inverter possa portare alla diminuzione dei consumi e alla riduzione dei problemi relativi ai continui cicli di accensione e spegnimento [33].

Nonostante l'utilizzo degli inverter sia una pratica ormai diffusa in tutto il tessuto industriale, in molti casi la potenzialità di tali strumenti non viene sfruttata a pieno.

Proprio la scarsa cura nell'utilizzo dei compressori a velocità variabile ha dato l'input per lo sviluppo di un tool di simulazione del sistema di gestione attraverso i compressori a velocità variabile.

Per lo sviluppo di questo strumento, al contrario di quelli visti in precedenza non è stato utilizzato il foglio di calcolo di Office Excel ma il software di analisi numerica gratuito Octave. Tale scelta è motivata dalla

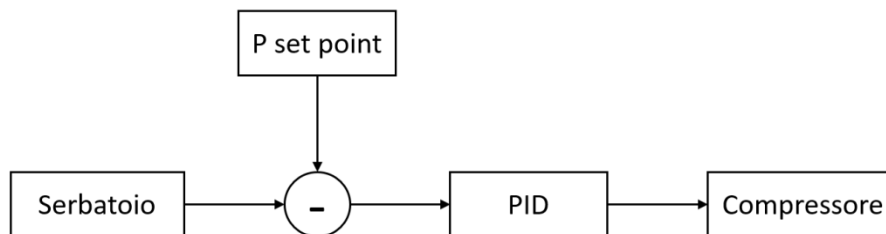
possibilità di lettura dei dati da parte del programma e dalla possibilità di manipolare in maniera più semplice anche grandi moli di dati. Il software inoltre consente la creazione di grafici in maniera autonoma.

Il principio di funzionamento dello strumento definito si basa sulla lettura della pressione del sistema e sul tentativo da parte del compressore (opportunamente modulato in potenza) di mantenere la pressione al livello settato.

Il funzionamento del programma prevede quindi che l'impianto di distribuzione dell'aria abbia un sistema di monitoraggio della pressione del serbatoio e della portata in uscita dal compressore.

Il grafico in Figura 18 illustra il funzionamento del programma spiegato di seguito.

- Il segnale proveniente dal sensore di pressione sul serbatoio relativo al periodo  $n$  viene sottratto al segnale relativo alla pressione di set point impostata;
- La differenza delle pressioni viene inviata ad un regolatore di tipo PID il quale opera una trasformazione del segnale trasformandolo in un segnale in potenza da inviare al compressore
- Il compressore al periodo  $n$  produce il quantitativo di aria che riporta il serbatoio alla pressione di set point.



**Figura 18 – Diagramma di flusso del funzionamento dello strumento**

Essendo il segnale relativo ad un istante  $n$  ed essendo il sistema in funzione durante l'intervallo tra due misurazioni il compressore non riesce ad erogare tutta la portata necessaria al raggiungimento del set point a meno di presenza di portate molto stabili nel tempo.

Lo strumento sviluppato necessita quindi dei seguenti dati in ingresso:

- Pressione di set point del serbatoio (indicata in bar);
- Pressione minima del serbatoio (indicata in bar);
- Temperatura ambiente (espressa in °C);
- Profilo di richiesta dell'impianto aria compressa (espresso in  $\text{Nm}^3/\text{h}$ );
- Volume del serbatoio (espresso in  $\text{m}^3$ );
- Profilo dei consumi elettrici (kWh).

Il programma così definito ha la capacità di definire un profilo di carico alternativo rispetto a quello rilevato basato sulla logica di simulazione definita precedentemente e consente di visualizzare i risultati relativi alla possibile applicazione del metodo.

I risultati in uscita dal programma sono:

- Grafico di confronto nel tempo tra il profilo di carico delle portate prodotte in base alla logica definita ed il profilo di carico delle portate prodotte con il sistema di gestione utilizzato dall'azienda;
- Grafico del confronto nel tempo tra l'andamento del carico del compressore valutato in base alla logica definita ed il carico del compressore valutato secondo la logica di gestione dell'azienda;

- Grafico dell'andamento della pressione del serbatoio nel tempo secondo il sistema di gestione sviluppato;
- Indicatore numerico del risparmio sui consumi conseguito con l'utilizzo del sistema.

### **Validazione del sistema di gestione del carico attraverso un test case.**

Il sistema descritto è stato validato attraverso l'utilizzo sui dati forniti da una delle aziende intervistate durante la fase dei sopralluoghi definita nella prima sezione di questo rapporto tecnico.

L'azienda in questione è quella operante nel settore della lavorazione del latte.

I dati che l'azienda ha fornito sono quelli relativi ad una settimana di ordinario utilizzo dei tre compressori del proprio impianto.

In particolare, i dati contengono delle rilevazioni effettuate ogni minuto sulle seguenti grandezze:

- Data e ora della rilevazione;
- Temperatura ambiente (°C);
- Umidità relativa dell'ambiente (%);
- Portata dei tre compressori (Nm<sup>3</sup>/h);
- Portata totale utilizzata dalle utenze (Nm<sup>3</sup>/h);
- Potenza elettrica dei tre compressori (kW);
- Pressione dell'aria in uscita dal compressore (bar).

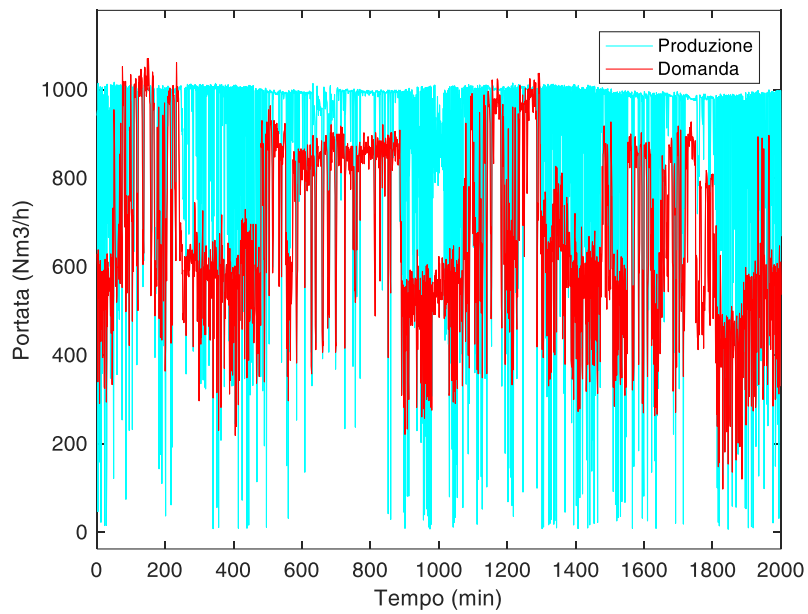
### Analisi preliminare dei dati

I dati relativi al compressore dotato di regolazione con inverter sono stati preliminarmente analizzati per caratterizzarne l'andamento e carpirne alcune informazioni.

Dopo aver pulito i dati da eventuali outliers sono state effettuate alcune analisi sui profili di carico.

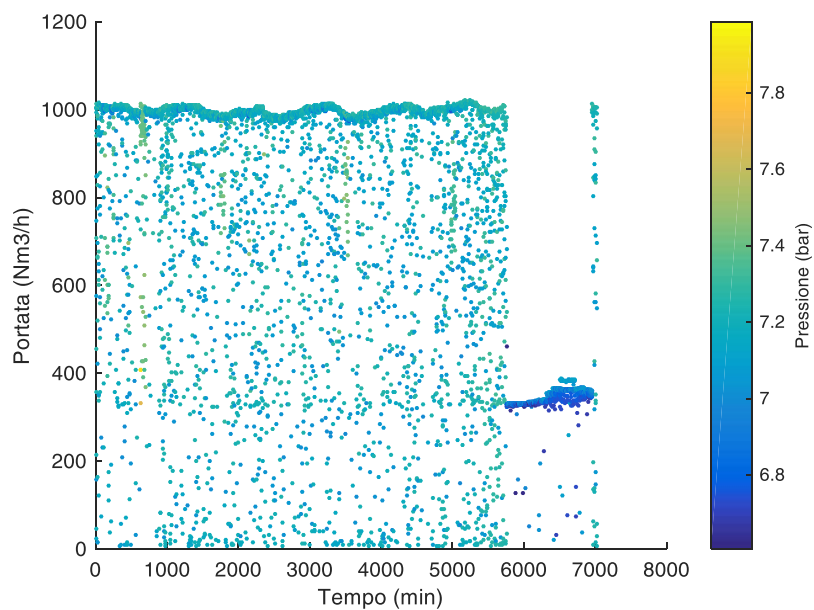
- Analisi del carico nel tempo. Dalla visualizzazione dei risultati è possibile notare che nonostante il compressore sia dotato di inverter e la portata richiesta abbia un andamento piuttosto variabile nel tempo il compressore lavora per la maggior parte del tempo a piena potenza. Questo fattore è già un possibile indice di uso non corretto del sistema dotato di inverter e ciò rendere molto interessante l'utilizzo di un sistema di controllo alternativo. In Figura 19 sono riportate le curve relative alle portate erogate dal compressore e assorbite dall'impianto.



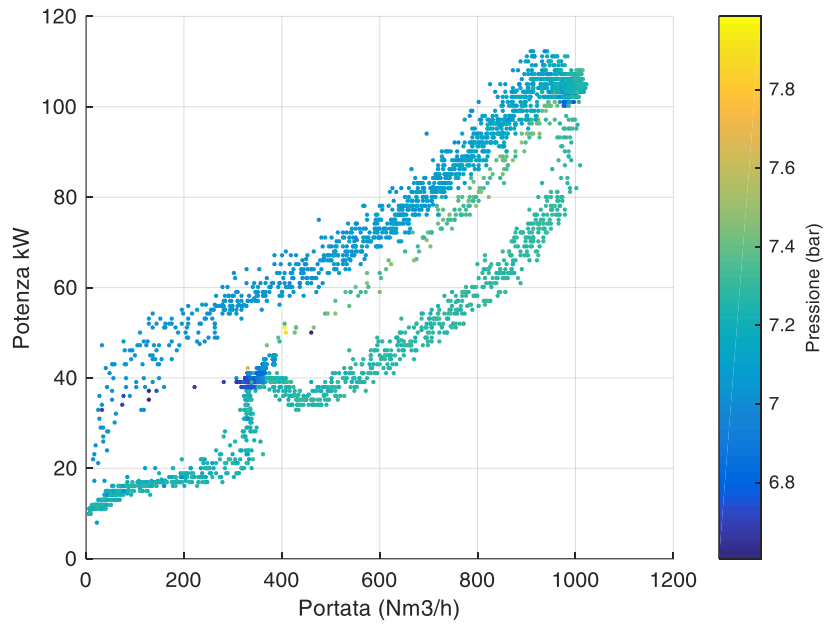


**Figura 19 – Rappresentazione delle curve relative alla portata erogata dal compressore e della portata richiesta dall'impianto**

A conferma di quanto detto, in Figura 20 il grafico a punti indica che la concentrazione dei punti (ognuno indica una rilevazione) è concentrata nella parte alta vicino al massimo carico.

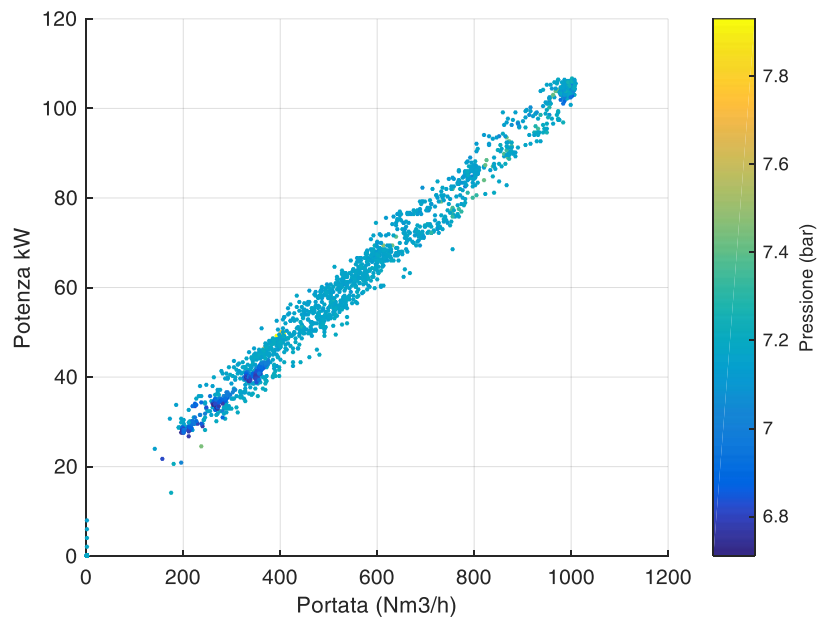


**Figura 20 – Grafico a punti portata-tempo indicante la concentrazione dei valori. La scala cromatica è indicativa della pressione**



**Figura 21 – Grafico a punti potenza-portata. La scala cromatica è indicativa della pressione**

- Analisi su diagramma potenza-portata. Dal grafico in Figura 21 è possibile notare come l'andamento delle portate e delle potenze non sia del tutto lineare e come la dipendenza della potenza utilizzata sia al contrario di come ci si aspetterebbe.



**Figura 22 - Grafico a punti potenza-portata con valori mediati con periodo di 5 minuti. La scala cromatica è indicativa della pressione**

- Analisi dati mediati. I dati rilevati ogni minuto hanno mostrato alcune particolarità che sono però scomparse mediando i dati sulla base di un periodo di 5 minuti. Dal grafico è possibile notare come i dati della potenza abbiano una dipendenza netta dalla portata e come la pressione influenzi in maniera diretta la potenza.

## Risultati

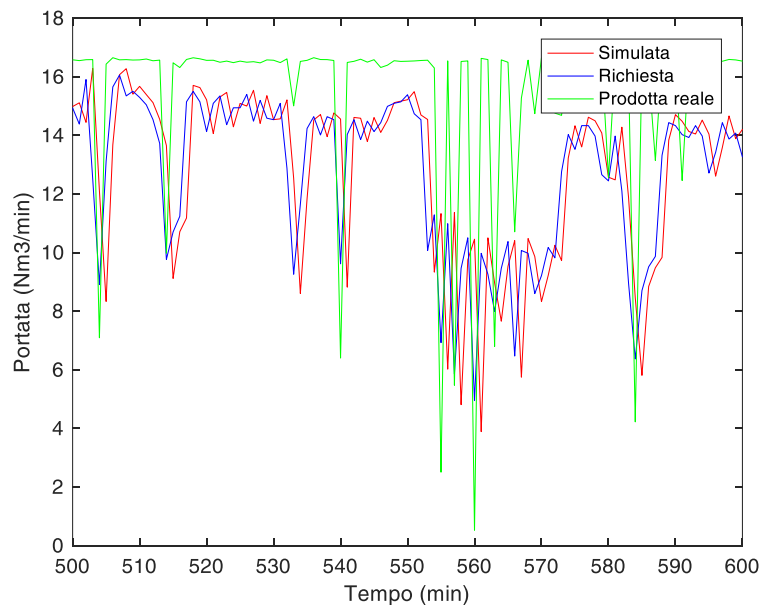
Utilizzando i parametri rilevati dal sistema di monitoraggio durante una settimana di funzionamento ordinario è stato possibile simulare il funzionamento del programma sviluppato e valutare l'effettivo miglioramento delle prestazioni. Occorre precisare che il compressore, essendo inserito in un reparto con altre 2 macchine, non lavora per la totalità del tempo ma viene gestito secondo una logica di distribuzione uniforme del carico tra le macchine.

Il programma sviluppato è quindi in grado di leggere i dati misurati dai vari strumenti installati sul sistema di produzione dell'aria e successivamente, in base al carico richiesto, simulare la presenza di un compressore con un tipo differente di regolazione.

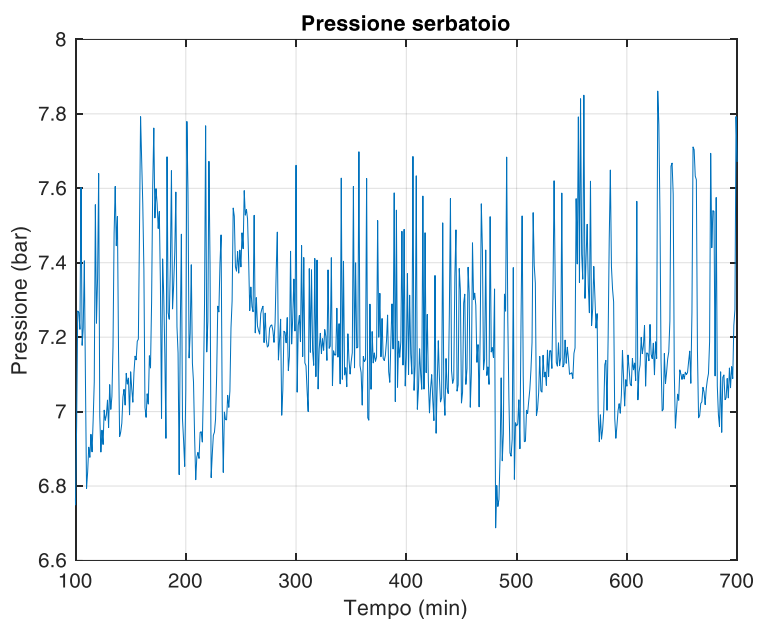
I risultati conseguiti dall'utilizzo del programma mostrano grossi margini di miglioramento per quanto riguarda il sistema di gestione della regolazione della potenza del compressore.

Come è possibile notare dalla Figura 23 l'andamento della portata che il sistema produce (curva verde) è particolarmente stabile nel tempo attestandosi per molti minuti sul livello massimo. Le variazioni repentine di carico non sono indice di buon funzionamento del compressore dotato di inverter. Tale tecnologia infatti consentirebbe di regolare il carico in maniera più aderente alle necessità parzializzando la potenza e la conseguente portata erogata dal compressore. Inoltre, la distanza tra la curva della portata richiesta (curva blu) e la curva verde indica che il sistema per molto tempo produce una portata superiore alla necessaria per poi diminuire drasticamente il carico nel caso in cui la portata necessaria sia inferiore.

La curva della portata che il sistema produrrebbe utilizzando il sistema sviluppato (curva rossa) è quindi molto più vicina alla reale necessità del sistema e questo è un primo indice di un possibile miglioramento delle prestazioni del sistema. Come facilmente intuibile il programma di simulazione asseconda abbastanza bene i carichi parziali limitando la differenza tra portata erogata e quella necessaria.



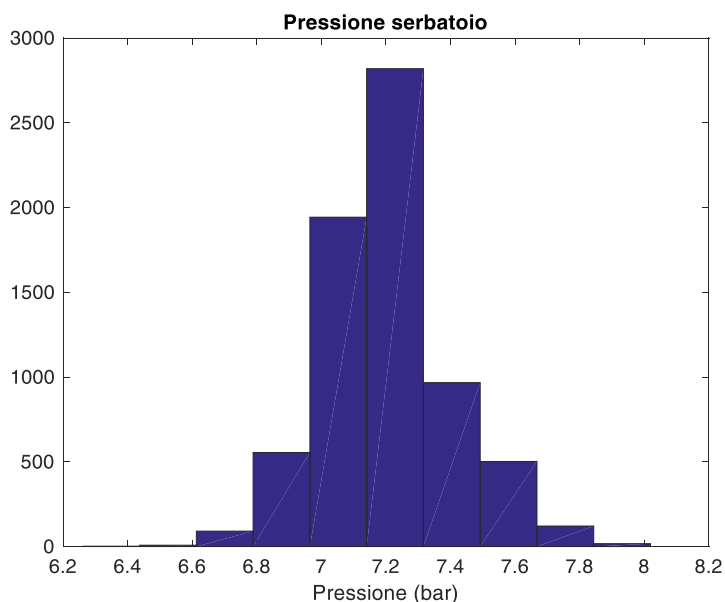
**Figura 23 – Andamento delle portate misurate e simulate dal programma**



**Figura 24 – Fluttuazione nel tempo della pressione del serbatoio simulata dal programma**

L’analisi della pressione del serbatoio mostra che l’andamento è abbastanza costante nel tempo e si attesta molto vicino al livello indicato da set point di 7.2bar. In Figura 24 la curva rappresentativa dell’andamento della pressione.

Anche riportando i dati in un istogramma in funzione della pressione è possibile notare che l’intervallo di valori più numeroso per quanto riguarda la pressione del serbatoio si attesta nelle vicinanze del set point fissato a 7.2 bar. In Figura 25 è riportato l’istogramma in questione.



**Figura 25 – Istogramma della pressione del serbatoio**

L’ultima considerazione e forse la più importante va fatta sulla potenza utilizzata dal sistema. Dall’analisi dei consumi energetici si evince che utilizzando il metodo implementato di arriva a risparmiare il 18% dell’energia utilizzata dal compressore.

## 2.5 Conclusioni del capitolo

Nel presente capitolo sono stati introdotti alcuni strumenti per il supporto alle decisioni in termini di gestione dei sistemi aria compressa con l'obiettivo di migliorarne l'efficienza energetica.

Tali strumenti consistono in 7 soluzioni per la valutazione della convenienza economica dell'adozione delle misure di efficientamento energetico proposto. Per poter sviluppare tali strumenti è stato necessario caratterizzare i problemi e identificarne l'importanza attraverso una fase di ricerca in letteratura tecnico-scientifica. Dopo aver definito tutti gli strumenti che sarebbero potuti essere sviluppati si è passati alla scelta di quelli che per motivazioni varie fossero i migliori.

La scelta ha portato allo sviluppo di 6 fogli di calcolo più un software con l'obiettivo di fornire all'utente una prima valutazione dei possibili risparmi in termini energetici ed economici dovuti all'implementazione delle soluzioni proposte nel tentativo di raggiungere il livello definito dalle best practices.

Per uno strumento, relativo al controllo del carico del compressore, è stato possibile testarne il funzionamento su dati di consumo provenienti dal sistema di monitoraggio di un'azienda del settore alimentare. Il test ne ha caratterizzato il buon funzionamento e mostrato che dall'utilizzo di tale strumento è possibile garantire all'azienda un risparmio del 15% dei costi relativi all'energia utilizzata dal compressore.

### 3 Conclusioni

Nel presente rapporto tecnico sono stati presentati alcuni casi di applicazione del Compressed Air Systems Energy Efficiency Maturity Model e lo sviluppo di una serie di Strumenti per il Supporto alle Decisioni.

Partendo da una serie di aziende del settore industriale italiano scelte all'interno del campione i cui dati sono disponibili, il lavoro ha dapprima visto la somministrazione dei CASEEMM per tutte le aziende ed in seguito sono stati analizzati i risultati classificando le aziende in base ai livelli di conoscenze e di crescita raggiunti.

I risultati hanno consentito di verificare la semplicità di applicazione del modello, la generalità del modello e l'applicabilità in ogni tipologia di impianto, la capacità del modello di discriminare i diversi livelli di maturità aziendale, la capacità del modello di analizzare l'azienda dai diversi punti di vista corrispondenti alle 4 dimensioni che concorrono ad una gestione energetica efficace ed efficiente e la capacità del modello di fornire una base di partenza per sviluppare un piano di crescita "personalizzato" per le aziende. I dati sono quindi stati utilizzati per il suggerimento di alcune attività, basate sulle linee guida sviluppate nella precedente annualità, in grado di poter migliorare l'efficienza energetica dei sistemi in questione. Il confronto dei risultati ha mostrato una grande attenzione delle aziende verso tutti gli ambiti di efficientamento energetico in particolare verso la riduzione dei costi legati all'energia.

La seconda parte è invece iniziata con l'analisi della letteratura tecnico-scientifica del settore che ha consentito di individuare i vari strumenti di supporto disponibili e di associarli alle BP contenute nelle linee guida sviluppate precedentemente nel modello CASEEMM. È proseguita successivamente con la scelta degli strumenti di supporto alle decisioni più opportuni da sviluppare in base al possibile impatto generato dall'utilizzo dello strumento in termini di risparmio energetico e la probabilità di utilizzo da parte di un utente di un livello di maturità medio-basso. Una volta effettuata la scelta degli strumenti, si è concentrata l'attenzione sullo sviluppo dei seguenti strumenti:

- Strumento per la valutazione delle perdite di carico nella fase di aspirazione dell'aria esterna;
- Strumento per la valutazione delle perdite di carico nella distribuzione di aria compressa
- Strumento per la valutazione del sistema di gestione dei filtri
- Strumento di calcolo dei consumi nel caso di utilizzo di sistemi a 2 livelli di pressione
- Strumento di controllo della modulazione del compressore con inverter
- Strumento per la valutazione della posizione della presa d'aria del compressore
- Strumento per la valutazione delle perdite di aria per via indiretta

Per tutti gli strumenti è seguita una fase di test ed in particolare lo strumento per la valutazione delle performance del sistema di gestione di un compressore dotato di inverter è stato applicato su un caso test. Dall'analisi dei risultati si ricava che adottando lo strumento di controllo della modulazione è possibile ridurre la differenza tra la portata elaborata e quella richiesta. Utilizzando questo strumento si stima che l'azienda possa risparmiare circa il 20% dell'energia elettrica impiegata dal compressore.

## 4 Riferimenti bibliografici

- [1] V. Introna, “Modelli di maturità a confronto,” *Proj. Manag.* 1 e 2, 2010.
- [2] Carbon Trust, “CTG054 – Energy Management – A comprehensive guide to controlling energy use,” pp. 34–42, 2011.
- [3] Osservatorio Italiano sull’Energy Management, “Il livello di maturità dell’Energy Management,” 2011. [Online]. Available: [http://energia24club.it/articoli/0,1254,51\\_ART\\_142539,00.htm](http://energia24club.it/articoli/0,1254,51_ART_142539,00.htm).
- [4] E. Curry, G. Conway, B. Donnellan, C. Sheridan, and K. Ellis, “A Maturity Model For Energy Efficiency in Mature Data Centres,” *1st Int. Conf. Smart Grids Green IT Syst.*, pp. 263–267, 2012.
- [5] European Commission, “Reference document on best available techniques for energy efficiency,” no. February, pp. 1–430, 2009.
- [6] 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,” vol. 0, pp. 1–6, 2016.
- [7] K. Bunse, M. Vodicka, P. Schönsleben, M. Brühlhart, and F. O. Ernst, “Integrating energy efficiency performance in production management - gap analysis between industrial needs and scientific literature,” *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 6–7, pp. 667–679, 2011.
- [8] S. Karnouskos, A. W. Colombo, J. L. M. Lastra, and C. Popescu, “Towards the energy efficient future factory,” in *7th IEEE International Conference*, 2009, pp. 367–371.
- [9] Y. Sakamoto, Y. Tonooka, and Y. Yanagisawa, “Estimation of energy consumption for each process in the Japanese steel industry : a process analysis,” vol. 40, 1999.
- [10] Z. M. Bi and L. Wang, “Optimization of machining processes from the perspective of energy consumption : A case study,” vol. 31, pp. 420–428, 2012.
- [11] E. Adam, C. Pach, T. Berger, Y. Sallez, and D. Trentesaux, “Computers in Industry Reactive and energy-aware scheduling of flexible manufacturing systems using potential fields ´ re,” vol. 65, pp. 434–448, 2014.
- [12] D. J. Power, “A Brief History of Decision Support Systems,” 2007. [Online]. Available: <http://dssresources.com/history/dsshistory.html>.
- [13] M. M. Casanovas-rubio and J. Armengou, “Decision-making tool for the optimal selection of a domestic water-heating system considering economic , environmental and social criteria : Application to Barcelona ( Spain ),” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, no. December 2017, pp. 741–753, 2018.
- [14] R. N. Sharma, N. Chand, V. Sharma, and D. Yadav, “Decision support system for operation , scheduling and optimization of hydro power plant in Jammu and Kashmir region,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 1099–1113, 2015.
- [15] J. Ara, M. Z. Toro, M. Rodri, and A. R. Ridao, “Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas : Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants,” vol. 12, pp. 2358–2380, 2008.
- [16] F. Lolli, A. Ishizaka, R. Gamberini, B. Rimini, E. Balugani, and L. Prandini, “Requalifying public buildings and utilities using a group decision support system,” *J. Clean. Prod.*, vol. 164, pp. 1081–1092, 2017.
- [17] P. Hirsch, M. Grochowski, and K. Duzinkiewicz, “Energy & Buildings Decision support system for design of long distance heat transportation system,” *Energy Build.*, vol. 173, pp. 378–388, 2018.

- [18] R. Rupnik, M. Kukar, P. Vra, D. Ko, D. Pevec, and Z. Bosni, "AgroDSS : A decision support system for agriculture and farming," no. February, 2018.
- [19] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, "AIRMaster+," 2014. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/airmaster>.
- [20] P. Pondrano, N. Anglani, and G. Petrecca, "SIMULATION , PLANNING AND CONTROL OF A CENTRAL COMPRESSED AIR PLANT FOR A MORE EFFICIENT ENERGY USE," 2001.
- [21] S. Murphy, J. K. Kissock, and S. Murphy, "Simulating Energy Efficient Control of Multiple- Compressor Compressed Air Systems," 2015.
- [22] J. Zahlan and S. Asfour, "A multi-objective approach for determining optimal air compressor location in a manufacturing facility Optimization of Overall Process Optimizaed Drive Sy stem," *J. Manuf. Syst.*, vol. 35, pp. 176–190, 2015.
- [23] 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.
- [24] R. Dindorf, "Estimating Potential Energy Savings in Compressed Air Systems," *Procedia Eng.*, vol. 39, pp. 204–211, 2012.
- [25] 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.
- [26] D. Thomas, P. Penicot, P. Contal, D. Leclerc, and J. Vendel, "Clogging of ybrous ylters by solid aerosol particles Experimental and modelling study," vol. 56, pp. 3549–3561, 2001.
- [27] Q. Hongbo and A. McKane, "Improving energy efficiency of compressed air system based on system audit, "Lawrence Berkeley National Laboratory," vol. 6, no. 13, 2008.
- [28] Compressed Air Challenge, "Introduction to best practices for compressed air systems."
- [29] C. de indústrias químicas européias CEFIC, "Il Manuale Delle Migliori Prassi Per L ' Efficienza Energetica," *Energy*, p. 98, 2010.
- [30] S. Calle, "Description of the clogging and cleaning cycles of filter media," pp. 40–52, 2002.
- [31] S. Mousavi, S. Kara, and B. Kornfeld, "Energy efficiency of compressed air systems," *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 313–318, 2014.
- [32] Sustainability Victoria, "Energy Efficiency. Best Practice Guide. Compressed Air Systems," 2009.
- [33] Atlas Copco, *Atlas Copco Compressed Air Manual*. 2010.



## 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, professore associato 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.

## Appendice A: Considerazioni sui KPI

Nelle passate annualità di progetto sono state descritte alcune metodologie di benchmarking basate sull'uso di indicatori di prestazioni energetiche (Key Performance Indicators – KPI). L'uso di questi indicatori nella fase di monitoraggio delle prestazioni è fondamentale nella comprensione delle modalità di consumo. I KPI rappresentano la prima valutazione per le opportunità di efficientamento energetico.

L'utilizzo di dati relativi alle performance energetiche con l'obiettivo di stabilire valori di benchmark affidabili ha come presupposto fondamentale la disponibilità di un campione sufficientemente esteso di dati da confrontare in modo da considerare le condizioni reali di funzionamento dei sistemi e non semplicemente quelle nominali, difficilmente ottenibili nella conduzione e gestione degli impianti quotidiana.

Per questa serie di motivi durante i precedenti anni di lavoro sono stati sviluppati alcuni KPI in grado di permettere il confronto tra varie realtà. I KPI sviluppati sono:

- **kWh<sub>e</sub> AC** - Entità, in termini assoluti, dell'energia elettrica utilizzata dai singoli siti industriali per la produzione dell'aria compressa;
- **kWh<sub>e</sub> AC/kWh<sub>e</sub> TOT** - Entità, in termini relativi, dell'energia elettrica utilizzata dai singoli siti industriali per la produzione dell'aria compressa;
- **kWh<sub>e</sub> AC/t** - Entità, in termini relativi, dell'energia elettrica utilizzata dai singoli siti industriali per la produzione dell'aria compressa;
- **kWh<sub>e</sub> AC/t** - Entità dell'energia elettrica utilizzata per la produzione dell'aria compressa per singola tonnellata di prodotto;
- **kWh<sub>e</sub> AC/m<sup>3</sup>** - Entità dell'energia elettrica utilizzata per la produzione dell'aria compressa per singolo metro cubo di aria compressa prodotta;
- **m<sup>3</sup>/t** - Metri cubi di aria compressa utilizzati per la produzione della singola tonnellata di prodotto finito.

La definizione dei KPI sviluppati è partita dalla necessità di avere degli indici di confronto per le prestazioni dei sistemi di produzione di aria compressa oltre l'unico disponibile in letteratura definito nel 2009 dalla Comunità Europea nel "Documento di riferimento sulle Best Available Techniques per l'Efficienza Energetica" [5] che riporta:

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

$$85 \text{ Wh/Nm}^3 < \text{SEC} < 130 \text{ Wh/Nm}^3 \text{ (...)}$$

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

Nel documento viene quindi proposto un metodo per la valutazione delle prestazioni ma non si fa riferimento a due importanti fattori di restrizione del metodo. In particolare, si parla di impianti ben dimensionati e ben gestiti e di condizioni di funzionamento costanti con aria prodotta a 7 bar.

Le realtà aziendali operano spesso in condizioni differenti da quelle ideali, per questo le condizioni per espresse nel documento sono difficilmente rispettate e quindi occorre fare ricorso ad approssimazioni e proporzioni per tenere conto delle inefficienze inevitabili derivanti dall'uso costante dei sistemi di produzione di aria compressa.

Per i motivi spiegati fino a questo punto non è mai stata condotta un'analisi di benchmark che comprendesse l'utilizzo di KPI che considerano anche il livello di pressione dell'aria prodotta. Il KPI ideale per questo tipo di analisi potrebbe essere rappresentato da una variazione del KPI suggerito nel documento di riferimento dell'Unione Europea con l'aggiunta di un parametro relativo alla pressione di utilizzo.

La non linearità della dipendenza dei consumi energetici dalla pressione di esercizio rende la definizione del rapporto molto complessa, inoltre la scarsità di informazioni deducibili dai database disponibili non hanno consentito di risolvere completamente il problema.

Una parziale soluzione al problema è possibile averla dall'utilizzo dello strumento di valutazione della convenienza dell'utilizzo di un sistema a due livelli di pressione.

Immettendo come input:

- Portata richiesta in  $\text{Nm}^3/\text{h}$ ;
- Pressione di esercizio (indicata in bar);
- Tempo di funzionamento annuo (indicato in h);
- Rapporto tra la portata ad alta pressione e la portata totale (indicata in %) pari a 100;
- Temperatura di immissione dell'aria nel compressore;
- Costo dell'energia;

è possibile avere in output:

- una valutazione dei consumi annuali;
- una valutazione dei costi annuali dovuti al funzionamento del sistema.

Partendo da queste stime è possibile stabilire, attraverso un semplice rapporto, il valore del KPI definito e confrontarlo con il valore proveniente dalle misurazioni delle prestazioni del proprio impianto.

Il risultato riportato dallo strumento di simulazione rappresenta il funzionamento di un compressore con interrefrigerazione operante in condizioni di funzionamento realistiche.