



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo e dimostrazione di sistemi di monitoraggio e controllo dei consumi di energia legati alla produzione di aria compressa

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



SVILUPPO E DIMOSTRAZIONE DI SISTEMI DI MONITORAGGIO E CONTROLLO DEI CONSUMI DI ENERGIA LEGATI ALLA PRODUZIONE DI ARIA COMPRESSA

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

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

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: Francesca Bonfà

Responsabile scientifico Università degli Studi della Tuscia: Stefano Ubertini

Indice

SOMMARIO.....	5
INTRODUZIONE.....	6
1 MODELLI MATEMATICI	8
1.1 MODELLAZIONE ATTRAVERSO INTELLIGENZA ARTIFICIALE	8
2 METODOLOGIA DI MONITORAGGIO E CONTROLLO DELLE PRESTAZIONI	10
2.1 INDICATORI DI PRESTAZIONE	10
2.2 SELEZIONE DEI DATI	11
2.2.1 <i>Tipologia di dati da raccogliere</i>	11
2.2.2 <i>Definizione del periodo di osservazione</i>	12
2.2.3 <i>Livello di dettaglio e frequenza di raccolta dati</i>	12
2.3 CARATTERIZZAZIONE DEI CONSUMI	13
2.3.1 <i>Metodi analitici per la caratterizzazione del processo</i>	13
2.3.2 <i>Metodo empirico per la caratterizzazione dei processi</i>	14
2.3.2.1 Definizione degli energy drivers	14
2.3.2.2 Analisi di correlazione	14
2.4 CREAZIONE MODELLI MATEMATICI	15
2.5 PREVISIONE E CONTROLLO DEI CONSUMI	16
2.5.1 <i>Carta CuSum</i>	16
2.5.2 <i>Carta degli scostamenti</i>	17
2.6 CAMPAGNA DI MONITORAGGIO.....	18
2.7 ANALISI DEI POTENZIALI MIGLIORAMENTI	19
3 DESCRIZIONE DEL CASE STUDY	20
3.1 DATI GENERALI DELLO STABILIMENTO DI PRODUZIONE.....	20
3.2 IMPIANTISTICA.....	20
3.2.1 <i>Impianti termici</i>	20
3.2.2 <i>Impianti frigoriferi</i>	20
3.2.3 <i>Impianto per la produzione di aria compressa</i>	20
3.2.3.1 Linea operante a media e bassa pressione	21
3.2.3.2 Linea operante ad alta pressione.....	22
3.3 ALIMENTAZIONE DELLO STABILIMENTO	23
3.4 SISTEMA DI CONTROLLO E MONITORAGGIO	23
4 APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA DI MONITORAGGIO E CONTROLLO	25
4.1 CALCOLO DEGLI INDICI DI CONSUMO.....	25
4.2 MODELLI DELLA LINEA ALTA PRESSIONE.....	26
4.2.1 <i>Modello consumi-portata dell'intera linea ad alta pressione</i>	29
4.2.2 <i>Modello consumi-portata-temperatura dell'intero sistema alta pressione</i>	31

4.2.3	<i>Modello consumi-portata del compressore K4</i>	32
4.2.4	<i>Modello consumi-portata dei boosters</i>	33
4.3	MODELLI DELLA LINEA MEDIA PRESSIONE	35
4.3.1	<i>Modello consumi-portata</i>	36
4.3.2	<i>Modello consumi-portata-temperatura</i>	38
4.4	MONITORAGGIO IN TEMPO REALE DELLA LINEA ALTA PRESSIONE	38
4.5	MONITORAGGIO IN TEMPO REALE DELLA LINEA MEDIA E BASSA PRESSIONE.....	40
4.6	ANALISI DEI RISULTATI E PROPOSTE DI MIGLIORAMENTO	42
5	CONCLUSIONI.....	44
6	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	45
7	BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO	47

Sommario

Il presente lavoro, estensione delle attività del Piano Annuale di Realizzazione 2017, propone una metodologia di analisi e miglioramento delle prestazioni energetiche dei sistemi per la produzione e l'utilizzo di aria compressa in ambito industriale.

La procedura prevede l'analisi dei dati storici a disposizione, la caratterizzazione dei consumi e lo sviluppo di modelli matematici per la definizione della baseline di consumo ed il controllo delle prestazioni energetiche. Il confronto tra i consumi calcolati dal modello matematico e quelli misurati consente di identificare i malfunzionamenti, di definire una strategia per il miglioramento delle prestazioni e di verificarne l'efficacia. La metodologia proposte include anche l'applicazione di un modello di controllo in tempo reale in grado di verificare il funzionamento dell'impianto aria compressa ed evidenziare la presenza di segnali fuori controllo.

La procedura è validata attraverso l'applicazione della metodologia su un'azienda operante nel settore della produzione di componenti meccanici. Il caso di studio mostra le potenzialità del metodo e pone le basi per futuri ulteriori miglioramenti.

Introduzione

Negli ultimi anni, l'attenzione verso le prestazioni energetiche e verso la minimizzazione dei costi energetici è notevolmente aumentata, condizionata sia dal costo crescente dell'energia che dalle politiche volte alla limitazione dell'inquinamento. Per questi motivi, tematiche e aspetti che fino a pochi anni fa erano trascurati, come la minimizzazione dello spreco di energia per gli impianti di servizio, ricevono oggi grande attenzione sia dalla comunità scientifica che dal mondo dell'industria [1].

L'aria compressa è uno dei servomezzi più diffusi all'interno delle aziende manifatturiere italiane, grazie alla sua praticità, sicurezza e facilità d'uso [2]. Nonostante i citati vantaggi, l'efficienza dei sistemi di produzione e trasporto dell'aria compresso è piuttosto bassa, considerato che solo il 10÷15% dell'energia consumata viene effettivamente trasformata in lavoro meccanico utile [3]. Questo fattore è in parte intrinseco delle trasformazioni termodinamiche subite dall'aria stessa, in parte dovuto alla scarsa efficienza dei sistemi. Partendo da questi dati, l'attività di ricerca vuole proporre l'applicazione di metodologie per il miglioramento dell'efficienza dei sistemi di generazione dell'aria compressa con l'obiettivo di ridurre i costi legati all'utilizzo del servizio.

Il monitoraggio, il controllo nel tempo ed il confronto delle prestazioni energetiche degli impianti industriali e dei loro sottosistemi sono attività fondamentali per la comprensione del funzionamento degli stessi e per l'identificazione di opportunità di miglioramento dell'efficienza energetica. Rappresentano inoltre il primo passo per la corretta implementazione dei Sistemi di Gestione dell'Energia poiché possono aiutare nel processo di miglioramento continuo delle prestazioni e nel coinvolgimento del personale [4], [5]. In generale, l'implementazione di un sistema di monitoraggio è importante per ottenere misure attendibili e ad alta risoluzione dei consumi energetici, per dedurre il comportamento storico del sistema, per prevedere i consumi, per misurare gli scostamenti tra consumo effettivo e previsto ed infine per valutare la necessità di implementare azioni volte alla riduzione dei consumi energetici.

Il monitoraggio e il controllo delle prestazioni energetiche prevedono la raccolta sistematica ed organizzata di informazioni sull'uso dell'energia, in tutte le sue forme, con l'obiettivo di interpretarne le informazioni e prevederne l'andamento futuro, attraverso l'utilizzo di modelli matematici che calcolano il consumo energetico in funzione dei parametri più rilevanti, detti energy drivers. La creazione di un sistema di gestione dell'energia richiede, quindi, l'installazione di un accurato sistema di misurazione che deve essere adattato di volta in volta alla singola realtà [1], [6]. Il sistema di misura deve essere progettato in base agli obiettivi da raggiungere ed al livello di controllo che si intende raggiungere nel breve, nel medio e nel lungo termine.

Il lavoro presentato in questa relazione è il risultato di un'attività trimestrale, nata dalla 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 Tuscia. Nel suddetto trimestre, il gruppo di ricerca ha intrapreso lo sviluppo di una metodologia di monitoraggio e controllo dei consumi energetici. Per poter testare al meglio la metodologia, è stata avviata, inoltre, una collaborazione con un'azienda manifatturiera italiana che si è resa disponibile a fornire i dati relativi ai propri consumi energetici e a consentire sopralluoghi e interviste al personale. Tali attività hanno dimostrato l'efficacia dei sistemi di monitoraggio e controllo dei consumi energetici legati alla produzione, distribuzione e utilizzazione di aria compressa in uno stabilimento industriale.

L'attività del periodo si è quindi sviluppata secondo le fasi di seguito elencate:

- Selezione e analisi del caso di studio per la dimostrazione sul campo dell'efficacia di sistemi di monitoraggio e controllo dei consumi energetici legati all'aria compressa.
- Acquisizione dati, analisi dei possibili modelli (fisici, statistici e basati su reti neurali) e sviluppo dei modelli per l'applicazione in esame.
- Sviluppo di software per analisi dati e di carte di controllo per la caratterizzazione dei consumi energetici.

- Campagna di monitoraggio in tempo reale del caso di studio selezionato per l'individuazione di sprechi energetici (anche meccanismi di guasto in corso), analisi delle cause e definizione di attività gestionali per la riduzione dei consumi energetici.
- Verifica della riduzione di consumi e costi energetici nel caso di studio selezionato.

Il lavoro ha quindi fornito alcuni risultati sull'applicazione della metodologia ed è servito per comprenderne punti di forza e carenze. Nel presente rapporto tecnico vengono illustrate la metodologia applicata, le analisi effettuate e gli strumenti utilizzati. Successivamente viene presentata l'azienda utilizzata come case study ed infine vengono presentati e discussi i risultati dell'applicazione del metodo. Il lavoro si conclude con una breve sezione di conclusioni e di possibili sviluppi futuri.

1 Modelli matematici

Un sistema di monitoraggio si basa su sistemi in grado di misurare tutti i parametri che influenzano le prestazioni da ottimizzare. Il sistema deve inoltre garantire la possibilità di trasmettere informazioni in tempi brevi e, in generale, opportunamente decisi.

Negli anni recenti, sono stati pubblicati nella letteratura scientifica diversi studi sul monitoraggio e sulla previsione dei consumi energetici, con particolare riferimento alla modellazione matematica del consumo energetico negli stabilimenti industriali. Sono state proposte e pubblicate applicazioni di varie metodologie di analisi dei dati e sviluppi di modelli matematici per la previsione ed il controllo dei consumi energetici. Alcune tra le tecniche più semplici ed utilizzate sono: l'extrapolazione del trend attraverso la regressione lineare [7] e il modello autoregressivo a media mobile (ARMA) [8].

Quella dell'extrapolazione del trend è una tecnica molto utilizzata per la modellizzazione matematica dei processi e si basa sull'analisi di serie di dati storici relativi a tutti i parametri di interesse. Per estrapolare una linea di tendenza con cui poter prevedere con buona accuratezza il comportamento futuro, è importante disporre del maggior numero possibile di dati storici. La premessa fondamentale è che, naturalmente, le condizioni esistenti in passato che causano un determinato comportamento continueranno ad esistere nel periodo di tempo futuro di interesse. La possibilità che le condizioni cambino sottolinea la necessità che altri metodi di previsione siano utilizzati in congiunzione con le tecniche di estrapolazione del trend, soprattutto per periodi di tempo più lunghi rispetto al futuro immediato [7]. L'utilizzatore prevede di sfruttare il modello matematico sviluppato come modello di comportamento ideale del sistema, da confrontare con le prestazioni del sistema in uso. Se i dati mostrano dipendenza di tipo lineare il metodo migliore di estrazione del modello è sicuramente la regressione lineare con retta calcolata attraverso il metodo dei minimi quadrati.

Il processo autoregressivo considera la variabile da modellizzare come la combinazione lineare dei valori assunti in un numero finito di intervalli precedenti e di un rumore additivo. In un processo autoregressivo di ordine p la variabile è espressa come combinazione dei valori assunti in p intervalli precedenti [8].

Per superare gli aspetti negativi dei modelli basati su relazioni di tipo lineare, in numerosi casi si è fatto riferimento ad algoritmi più complessi, come quelli che ricadono nell'area dell'apprendimento automatico o machine learning. Le metodologie proposte riguardano la costruzione e l'utilizzo di algoritmi che apprendano e si migliorino attraverso un insieme di dati, costruendo in modo induttivo modelli matematici in grado di prevedere il funzionamento di sistemi complessi, come reti neurali artificiali e le Support Vector Machines (SVM) [9], [10], logiche fuzzy e approcci ibridi basati su smorzamento esponenziale (ESM), ARMA [11], [12].

1.1 Modellazione attraverso intelligenza artificiale

L'intelligenza artificiale propone numerose tecniche per lo sviluppo di modelli matematici. Il vantaggio più grande dell'applicazione di queste tecniche è la possibilità di fornire buoni modelli di simulazione senza dover necessariamente caratterizzare a priori le relazioni causa-effetto. Questo rende le metodologie fortemente utilizzabili in ambito industriale soprattutto in presenza di dati provenienti da strumenti di monitoraggio automatico sia di grandezze legate alla produzione, sia di variabili esterne.

Tra le tecniche più utilizzate troviamo [13]:

- Support Vector Machines;
- Reti neurali artificiali.

Le Support Sector Machines hanno, come anche molti altri metodi, la possibilità di creare modelli sia basati su relazioni causa-effetto di tipo lineare sia su relazioni fortemente non lineari. La grande utilizzabilità di questi metodi li rende ideale per ottenere risultati accurati anche in presenza di dati fortemente affetti da rumore statistico [14]. La loro grande capacità di calcolo presenta un lato fortemente negativo: per poter

creare un modello utilizzando le SVM c'è solitamente necessità di una grande mole di dati e di grandi oneri computazionali.

Le reti neurali artificiali sono, forse, gli strumenti legati all'intelligenza artificiale più noti ed utilizzati al momento. Questi strumenti consentono l'analisi di grandi moli di dati con oneri computazionali relativamente bassi e vengono proposti da numerose piattaforme sia a pagamento che gratuitamente. La particolarità che le contraddistingue, da tutti gli altri strumenti, è la loro capacità di apprendere, in maniera autonoma, le informazioni esterne e correlarle tra loro proprio come succede nella mente umana. Per questo motivo le reti hanno bisogno di una fase di training, una di validazione ed una di test prima di poterle utilizzare.

I modelli matematici che vengono proposti dalle reti sono sotto forma di "black-box". Questo significa che all'utente non è possibile risalire alle relazioni matematiche su cui è stato sviluppato il modello ma ne vengono resi noti solo i risultati. Questo fattore è molto importante in fase di monitoraggio dei sistemi poiché, in molte applicazioni, è fondamentale conoscere le cause degli eventi di miglioramento e peggioramento delle prestazioni e le reti neurali non consentono questa azione.

In generale, questi metodi forniscono indiscutibili vantaggi rispetto agli ordinari metodi statistici quali [13]:

- Possibilità di analizzare problemi complessi in cui l'uso di strumenti tradizionali non porta a buoni risultati.
- Possibilità di inserimento nell'analisi anche variabili di input totalmente ininfluenti sul fenomeno in esame. Lo strumento seleziona automaticamente le variabili più importanti ai fini della modellazione. Questo aspetto consente di limitare al minimo l'analisi dei dati in ingresso.

Inevitabilmente presentano anche alcuni svantaggi che possono limitarne l'utilizzo in ambito industriale come:

- La necessità di tempi di calcolo più lunghi rispetto ai metodi statistici;
- La necessità di un processo di sviluppo ed implementazione più complesso che potrebbe inoltre rendere necessario l'acquisto di software appositi;
- Difficile utilizzo dei dati in output; si ricorda che i metodi di machine learning non forniscono all'utente la relazione input output del sistema simulato perciò la caratterizzazione dei risultati e la ricerca delle cause del miglioramento e del peggioramento delle prestazioni potrebbe risultare complessa se non impossibile.

Nel prosieguo del lavoro verranno applicate solo tecniche di regressione lineare che verranno ampiamente trattate nella sezione di metodologia.

2 Metodologia di monitoraggio e controllo delle prestazioni

I sistemi aria compressa possono essere suddivisi in 3 parti in base alle funzioni principali: generazione, trasporto e utilizzo. La disponibilità di un buon livello di controllo sul sistema e l'attuazione di un processo di miglioramento del livello di efficienza energetica rendono necessarie la buona progettazione di tutti i sottosistemi, anche se l'esperienza mostra che alcuni aspetti devono essere considerati con maggiore attenzione ed impegno quali [15]:

- pressione di esercizio;
- portata elaborata;
- domanda delle utenze.

I tre parametri appena descritti sono quelli che solitamente condizionano in maniera più importante i consumi energetici dell'impianto e quindi anche la sua efficienza energetica.

In molti impianti industriali la misura delle prestazioni può risultare alquanto difficoltosa per via del grande numero di parametri da tenere sotto controllo. Se si considera che un impianto può essere composto da numerosi compressori di tipologia diversa, installati in epoche successive, con prestazioni differenti e con differenti tipologie di manutenzioni specifiche è semplice immaginare come la gestione di tali sistemi sia ottimizzabile soltanto con una serie di azioni attente e rigorose.

Studi dimostrano che l'approccio al monitoraggio ed al controllo, in generale, risulta necessario nella strategia di miglioramento delle prestazioni energetiche. In particolare, il controllo degli indici di prestazione permette di [16]:

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

In generale, la strategia di monitoraggio e controllo delle prestazioni definisce degli obiettivi e solo seguendo una procedura strutturata può portare a buone opportunità di risparmio energetico. La metodologia descritta fornisce indicazioni utili per l'implementazione di un sistema di misura e di monitoraggio delle prestazioni energetiche del sistema di produzione dell'aria compressa in grado di fornire informazioni sul funzionamento storico del sistema e di consentire il monitoraggio in tempo reale delle prestazioni. Nel caso in esame i modelli matematici di regressione lineare sono quelli che si sono dimostrati più efficaci ed adatti allo sviluppo della procedura di monitoraggio e controllo. Nel lavoro viene inoltre mostrata l'applicazione di tale metodologia su un caso di test e viene dimostrata la validità dell'applicazione del sistema di controllo delle prestazioni.

2.1 Indicatori di prestazione

L'uso degli indicatori sintetici di prestazione è molto importante per caratterizzare rapidamente le prestazioni di un sistema. Possono essere utilizzati su dati aggregati e servono per confrontare le prestazioni dell'azienda o del sistema specifico con altri o con lo stato dell'arte (benchmarking)[17]. Gli indicatori di prestazione vengono solitamente raggruppati in 4 categorie a seconda del tipo di valore a cui si riferiscono: indicatori di volume prodotto, di qualità degli output, di costo e di servizio.

Nelle precedenti annualità la costruzione dello strumento che consente l'analisi di benchmark si è basata solo su indicatori fisici, per via della loro maggiore utilizzabilità con i dati a disposizione. Con il termine "indicatori fisici" si intende quel gruppo di indicatori che correla il consumo di energia con la misura dell'attività svolta in termini fisicamente quantificabili (es. quantità di prodotto) o con un gruppo di consumo di energia [18].

Gli indici utilizzati sono stati scelti sulla base della letteratura tecnico-scientifica e della pratica industriale. In questo modo la metodologia è risultata facilmente assimilabile dall'industria. Gli indici utilizzati nella presente applicazione sono:

- $\frac{kWh_e AC}{kWh_e TOT}$: quantità relativa di energia elettrica utilizzata dai singoli siti industriali per la produzione dell'aria compressa. Questa misura indica l'incidenza del consumo di energia elettrica del sistema di produzione dell'aria compressa sul consumo di energia elettrica totale del singolo stabilimento.
- $\frac{kWh_e AC}{m^3 AC}$: energia elettrica utilizzata per la produzione dell'aria compressa per singolo metro cubo di aria compressa prodotta. L'indice vuole fornire la misura dell'efficienza della fase di generazione dell'aria compressa.

Partendo dalle analisi condotte nelle precedenti annualità, che hanno consentito di caratterizzare i consumi di nove settori industriali italiani, è stata impostata una caratterizzazione dei consumi di stabilimento appartenente ad un'azienda manifatturiera italiana.

In generale, i risultati delle analisi condotte sui KPI legati strettamente ai consumi di energia sono rappresentativi dei particolari settori industriali. Per questo motivo è molto difficile estrapolare indicazioni sul comparto industriale in generale. Le indicazioni possono essere estrapolate ed estese solo ad aziende dello stesso settore e di una grandezza simile.

Le prestazioni del sistema di generazione di aria compressa possono essere monitorate in modo robusto, in tempo reale, misurando la portata e il consumo di energia associato ad una varietà di carichi di sistema. Per questo motivo nel presente lavoro si è pensato di utilizzare questo KPI su base periodica così da valutare la condizione complessiva del sistema. Per utilizzare una relazione più oggettiva tra il consumo di energia per la produzione di aria compressa e la quantità di aria prodotta in m^3 si è scelto di utilizzare il KPI definito nel report 2017 $\left(\frac{kWh_e AC}{m^3 AC}\right)$ [19].

2.2 Selezione dei dati

La selezione dei dati da misurare in un processo industriale è l'attività che condiziona in maniera più importante i risultati finali del monitoraggio. Come già accennato, i sistemi di produzione di aria compressa, specialmente in impianti di grandi dimensioni, potrebbero essere suddivisi in varie linee operanti a diversi livelli di pressione, alimentate da compressori multipli e con livelli di purezza differenti. Tali possibilità rendono notevole il numero di variabili da tenere sotto controllo nel processo di monitoraggio e, in molti casi (soprattutto per impianti di notevole grandezza), tale da non poter essere considerato nella sua totalità [20]. Essendo, inoltre, la fase di raccolta dei dati storici abbastanza lunga e complessa dal punto di vista organizzativo (a causa delle varie funzioni aziendali coinvolte), l'azienda deve decidere a priori la durata limitando la possibilità di prostrarla eccessivamente nel tempo.

2.2.1 Tipologia di dati da raccogliere

Il primo passo per lo sviluppo di un sistema di misurazione e controllo per un impianto di produzione dell'aria compressa consiste nella caratterizzazione del sistema e nella scelta dei dati da raccogliere. La pratica suggerisce l'utilizzo massivo di dati provenienti da misurazioni dirette, corredati da informazioni sulla dalla metodologia di misurazione. La disponibilità di tale tipologia di dati migliora la qualità delle analisi successive diminuendone l'incertezza.

I dati e le informazioni da raccogliere includono:

- Informazioni generali sulle apparecchiature installate in grado di fornire le prime indicazioni sul numero di modelli matematici che dovrebbero essere sviluppati. Numero e tipologia di compressori utilizzati (compressori a vite o alternativi, motori a velocità fissa o variabile, ecc.), collocazione nello dello stabilimento (sale compressori interne o separate, posizione dell'aspirazione), dati di funzionamento ed eventuale storico dei guasti.

- Informazioni sui sistemi ausiliari presenti. Tipologia e numero degli essiccatori, dei refrigeratori e relativi costi di gestione. Queste informazioni sono importanti nell'analisi dei dati di consumi poiché ciascun sistema presente influisce inevitabilmente sui consumi.
- Informazioni relative alla gestione del sistema. Strategia di controllo delle fasi di accensione, tipo di regolazione della pressione e della portata, presenza di timer ecc.
- Misurazione delle prestazioni (possibilmente effettuata su ogni compressore). Potenza assorbita, portata erogata, pressione di esercizio, portate richieste e numero di ore di produzione. Queste informazioni servono per la prima caratterizzazione dei consumi e condizionano il grado di dettaglio dell'analisi. La possibilità che i misuratori siano unici per l'intero reparto riduce in maniera netta la possibilità di una buona caratterizzazione del funzionamento.
- Misurazioni di variabili ambientali quali temperatura e umidità che condizionano fortemente il livello di produzione delle macchine. La potenza assorbita dai sistemi è fortemente dipendente da questo tipo di variabili, per questo è necessario averne sotto controllo l'andamento.
- Informazioni sugli interventi di manutenzione effettuati. Modifica parziale degli impianti, pulizia dei sistemi di filtrazione ecc. possono influire sulle prestazioni dei sistemi e quindi è necessario tenerne conto durante l'analisi dei risultati.

La quantità e la qualità di dati dipendono strettamente dalla scelta dei punti di misura. I punti di misura devono essere conosciuti e distinti secondo le fasi di generazione, conversione e distribuzione da quelle di utilizzo dell'energia.

2.2.2 Definizione del periodo di osservazione

Come già descritto, la scelta degli obiettivi del monitoraggio porta alla selezione dei parametri da misurare. Nel caso del monitoraggio di un sistema di compressori, tra le variabili più importanti e considerate le più influenti sui consumi si trovano: il set di compressori in funzione, la temperatura e l'umidità dell'aria all'ingresso del sistema di aspirazione. La variazione nel tempo di queste grandezze può essere molto lenta, soprattutto per variabili come la temperatura media, perciò, in fase di misurazione, è opportuno considerare di protrarre l'attività per un intervallo di tempo che permetta di osservare la massima fluttuazione possibile, solitamente pari ad alcuni mesi o a un anno.

Un ulteriore aspetto importante da considerare è la vicinanza cronologica delle misure. Più queste sono lontane nel tempo, più è difficile reperire informazioni complete sul sistema, che permettano di migliorare la descrizione del processo; inoltre, le modifiche sul sistema che potrebbero essere intercorse ne comprometterebbero la validità. Per i motivi citati, i dati considerati devono essere i più recenti disponibili.

2.2.3 Livello di dettaglio e frequenza di raccolta dati

Il piano di raccolta dei dati deve considerare i benefici che l'analisi porterebbe, in base al risparmio stimato, ed i costi da sostenere dipendenti dal numero e dai tipi di strumenti da installare. Il livello di dettaglio ed accuratezza che gli strumenti garantiscono sono, in generale, funzione del costo di acquisto. La scelta del metodo di misurazione deve quindi essere confrontata con il livello di prestazione cercato ed il risultato di un'analisi costi-benefici [1].

Anche la frequenza di campionamento è un parametro fondamentale per la qualità del controllo. Aumentare la frequenza mette a disposizione dell'utente una quantità maggiore di dati che descrive meglio il processo ma potrebbe portare a difficoltà nell'analisi. In questa fase del processo è preferibile utilizzare la maggiore frequenza di registrazione possibile in modo da poterla ridurre in seguito, qualora fosse necessario, aggregando opportunamente i dati (sommando i valori di consumi e quantità d'aria prodotta, e mediando i valori di temperatura, umidità, potenza assorbita e portata prodotta nell'intervallo temporale scelto); come si vedrà in seguito, infatti, può capitare che per diverse fasi del processo sia necessario utilizzare gli stessi dati con frequenze di registrazione differenti.

Bisogna, inoltre, fare in modo che le misurazioni raccolte siano temporalmente sincronizzate, in modo da poter confrontare i dati.

Un altro parametro fondamentale per la buona caratterizzazione del sistema e per lo sviluppo di un modello matematico idoneo è la frequenza di raccolta e di analisi dei dati. In generale, la durata del periodo di osservazione varia a seconda della frequenza scelta, in modo da ottenere un numero sufficiente di dati, e del tipo di processo in esame (processi lunghi o che dipendono da fattori che variano lentamente nel tempo richiedono periodi di osservazione più lunghi). Non esiste una frequenza standard per tutte le analisi che si vogliono compiere. La frequenza ottimale può essere diversa a seconda dello scopo dell'analisi e dei destinatari dello studio; ad esempio, può essere bassa se lo scopo dell'analisi è quello di fornire degli indicatori dell'andamento generale dei consumi per scopi divulgativi, più alta se è quello di ottenere dei dati utili a livello operativo.

2.3 Caratterizzazione dei consumi

I dati provenienti dal sistema di misurazione potrebbero essere eccessivi o non rappresentativi del processo. L'obiettivo della raccolta dei dati è l'estrapolazione di un modello matematico che definisca una relazione che colleghi i consumi energetici ad alcuni fattori fondamentali. In questo modo è possibile costruire una baseline dei consumi da utilizzare per il confronto tra quelli rilevati dagli strumenti e quelli che, in linea teorica, dovrebbero essere i consumi del sistema per quel tipo di servizio.

I fattori la cui variazione influenza in modo significativo il consumo energetico vengono chiamati energy drivers e solitamente si può spiegare la loro relazione con i consumi attraverso un legame lineare espresso secondo la (1):

$$E = E_0 + f_1\alpha + f_2\beta + \dots \quad (1)$$

in cui con E si indica l'energia consumata dal sistema in un certo periodo di tempo, E_0 rappresenta la quota fissa di energia consumata, indipendente dalle variazioni degli energy drivers, f_i sono le funzioni che legano gli energy drivers ai consumi e α, β , etc. sono gli energy drivers stessi.

La definizione di un legame tra processo e consumo energetico non è una metodologia univoca che porta ad un unico risultato. In alcuni casi è possibile stabilire il legame causa-effetto attraverso l'analisi dei processi fisici che sono alla base del funzionamento del sistema ad esempio riscaldamento, evaporazione, compressione ecc. In altri casi, invece, la natura dei processi non è d'aiuto nell'analisi della relazione tra consumo e variabili come ad esempio per le lavorazioni meccaniche o per il miscelamento.

La modellizzazione dei processi può essere, quindi, effettuata attraverso metodi analitici o metodi empirici; la scelta del metodo dipende essenzialmente dal tipo di processo in esame, dalla disponibilità di dati e dall'obiettivo da conseguire. Quest'ultimo può essere rappresentato dalla valutazione della bontà di un progetto, dalla stima dell'impatto sul processo delle procedure operative o dal controllo dei consumi nel tempo.

Nel caso degli impianti di produzione dell'aria compressa, per ogni compressore (e per l'intero parco compressori), è opportuno individuare la legge di variazione dei consumi in funzione dell'aria prodotta, e verificare se e come questa sia influenzata dai fattori ambientali, effettuando delle analisi multi-variabile in modo da osservare l'effetto combinato di più fattori sui consumi (ad esempio, attraverso un'analisi di correlazione in cui la variazione dei consumi elettrici dei compressori è contemporaneamente funzione della portata prodotta, della temperatura, della pressione e dell'umidità).

2.3.1 Metodi analitici per la caratterizzazione del processo

I metodi analitici per la caratterizzazione del processo possono essere suddivisi in 2 gruppi in base al tipo di dati a disposizione ed al tipo di analisi che si vuole ottenere. Il primo gruppo raccoglie i modelli che considerano solo il fabbisogno energetico teorico dei processi, nel secondo i modelli considerano anche altri parametri operativi.

Nell'analisi basata sui dati di progetto il fabbisogno energetico dell'impianto viene determinato a partire dall'analisi energetica dei singoli processi produttivi che avvengono al suo interno o dei singoli elementi che lo compongono; questa analisi richiede il bilancio congiunto di massa e di energia, e si basa sulla scomposizione del processo fino ad un livello di dettaglio tale da permettere l'individuazione dei flussi (input/output) in termini qualitativi e quantitativi [21]. Attraverso questo metodo si arriva quindi all'individuazione dei consumi energetici relativi alla fase del processo produttivo analizzata.

L'analisi basata sulla procedura operativa considera, oltre ai parametri dell'analisi sui dati di progetto, anche il reale funzionamento delle macchine comprendendo quindi le procedure manutentive ed operative che sono in grado di condizionare negativamente i consumi. In questo caso l'analisi delle fasi che incorrono nel periodo di produzione (transitori, pause, ecc.) consente di determinare un legame tra consumi e produzione più realistico rispetto al precedente.

2.3.2 Metodo empirico per la caratterizzazione dei processi

Nel caso non siano disponibili dati sul legame fisico tra le grandezze misurate ed il consumo di energia, si può sviluppare un modello matematico del sistema a partire dall'analisi statistica dei dati a disposizione.

I dati disponibili solitamente riguardano consumi energetici, produzione (in termini di quantità) e altre variabili che non intervengono direttamente nel processo, come temperatura e densità, e di informazioni che completano la descrizione del processo, come cause di guasti e modifiche all'impianto [22]. L'utilizzo dei dati per l'estrapolazione del modello implica due passaggi preliminari che sono la sincronizzazione dei database utilizzati e la verifica del raggiungimento dello stesso livello di dettaglio per tutte le misurazioni.

Affinché il modello matematico elaborato rappresenti il più fedelmente possibile il comportamento dei consumi del processo in esame al variare degli energy drivers, questi devono essere scelti molto accuratamente; la scelta è fortemente determinata dalle caratteristiche dell'impianto e del processo stesso.

2.3.2.1 Definizione degli energy drivers

Gli energy drivers più comunemente utilizzati sono classificabili in due categorie [23]: legati alla produzione e non legati alla produzione. I primi sono gli energy drivers i cui valori sono dipendenti dal dato di produzione, e sono in genere legati ai volumi produttivi, ai turni o alle ore lavorate. Queste variabili sono facilmente ottenibili da tutti i processi produttivi, per questo rappresentano un set di energy drivers molto diffuso nel tessuto industriale. La variabile che indica i volumi produttivi è quasi sempre presente in questo genere di analisi, poiché permette di osservare l'associazione tra una certa quantità prodotta per periodo di tempo e il corrispondente consumo energetico per la sua produzione. La correlazione con questo energy driver è solitamente lineare con pendenza positiva. Gli energy drivers non legati alla produzione sono considerati nei casi in cui il processo sia fortemente condizionato da variabili esterne, come per esempio i gradi giorno, le variabili termoigrometriche (umidità e temperatura) e la variazione di ore di luce e buio.

2.3.2.2 Analisi di correlazione

I dati a disposizione devono essere caratterizzati, in via preliminare, in base alla loro importanza riguardo alla comprensione dei fenomeni ed alla caratterizzazione dei consumi. Per individuare quali dei parametri misurati influenzino nettamente i consumi energetici è possibile calcolare la correlazione tra i valori di questi ultimi e tutte le altre variabili. L'analisi di correlazione è uno strumento statistico fondamentale per la comprensione delle cause della variazione dei consumi, in quanto, avendo precedentemente individuato gli energy drivers, consente di stabilire quanto il legame di tipo causa-effetto possa essere forte [21]. Per costruire un diagramma di correlazione valido è necessario raccogliere un numero sufficientemente alto di coppie di dati (consumo, energy driver) e riportare tutte le coppie ordinate di valori su un grafico (diagramma di correlazione), con i consumi in ordinata e l'energy driver in ascissa. La compattezza (bassa dispersione) e la disposizione dei punti (allineamento e pendenza della retta) indicano rispettivamente la forza e la tipologia (positiva o negativa) di correlazione tra il consumo e l'energy driver considerato [21].

È possibile quantificare l'analisi finora eseguita solo graficamente introducendo degli indici numerici che permettano di valutare oggettivamente forze e tipologia della correlazione [21]:

1. Il coefficiente di correlazione r viene generalmente utilizzato per valutare la tipologia di relazione; è definito come:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

Se r è compreso nell'insieme $[-1,0)$, allora la dipendenza tra le variabili è lineare negativa; se r è uguale a zero non esiste una relazione di tipo lineare tra le due variabili (ma questo non vuol dire che la relazione non possa esistere ugualmente, ma non essere di tipo lineare); se r è compreso nell'insieme $(0,1]$, allora la dipendenza tra le variabili è lineare positiva.

2. Il quadrato del coefficiente di correlazione r^2 viene invece utilizzato per valutare la forza della correlazione; può assumere valori compresi tra 0 e 1, e quanto più si avvicina all'unità, tanto più sarà forte la correlazione. In una correlazione lineare ottenuta con almeno venti coppie di valori, si accettano valori di r^2 superiori a 0,5.

Il coefficiente r^2 è certo il parametro più importante nell'analisi ma ha un limite rappresentato dalla possibilità che la correlazione, anche elevata, possa essere dovuta ad una casualità e che, inoltre, il campione analizzato (solitamente venti coppie) non sia rappresentativo della popolazione intera.

Per superare questa limitazione, solitamente, si introduce l'indice statistico del "p-value" indicatore della significatività della correlazione. In altre parole, il p-value indica il rischio di trarre una conclusione sbagliata e si calcola tramite tabelle o software statistici; la relazione tra due variabili viene solitamente considerata significativa se il p-value assume valori inferiori a 0,05 (23).

L'analisi di correlazione può portare anche ad altre conclusioni. Se il valore di r^2 risulta basso e il p-value molto minore di 0.05 è possibile stabilire che la correlazione esiste ma viene influenzata dalla presenza di altri parametri. Inoltre, se il p-value sull'intercetta risulta troppo elevato, potrebbe essere semplicemente dovuto al fatto che i valori sono tutti lontani dall'incrocio degli assi, per cui il valore dell'intercetta varia notevolmente con piccole variazioni dell'inclinazione della retta di regressione.

2.4 Creazione modelli matematici

Una volta eseguita l'analisi di correlazione, e accertata così la presenza di una dipendenza sufficientemente forte tra due variabili, è possibile estrapolare un modello matematico che rappresenti la variazione di una variabile in funzione dell'altra attraverso la costruzione della retta di regressione:

$$y = b_0 + b_1x \quad (3)$$

in cui i parametri b_0 e b_1 vengono stimati attraverso il metodo dei minimi quadrati ossia minimizzando la somma dei quadrati degli errori casuali, differenza tra valori effettivi e valori previsti della variabile Y .

Vi sono alcuni casi in cui la relazione tra due sole variabili non consente di descrivere completamente un processo, in quanto questo può essere influenzato anche da altri fattori. In questi casi, si può ricorrere alla regressione lineare multipla, che consente di distinguere i contributi dei diversi fattori alla variabilità del processo in esame.

La regressione multi-variabile è uno strumento molto potente, ma può essere di difficile interpretazione, sia per il fatto che la rappresentazione grafica dei risultati è complessa e difficilmente leggibile, sia perché questo tipo di regressione si basa sull'assunzione che la dipendenza tra la variabile y e tutte le variabili x_i sia lineare, e che le variabili x_i non siano tra di loro dipendenti.

Quando alcune delle variabili x_i sono correlate tra loro si parla di fenomeno di multicollinearità; per evitare la multicollinearità è bene ricorrere all'analisi dei coefficienti di una matrice di correlazione, in cui vengono riportati i coefficienti di correlazione tra tutte le coppie di variabili considerate. Dalla matrice di correlazione vengono eliminate tutte le variabili x_i la cui correlazione con la variabile y presenta un p-value

troppo elevato e tutte le variabili x_i che presentano un r^2 maggiore in una correlazione con un'altra variabile x_i piuttosto che con la variabile y [21].

A questo punto, applicando il metodo dei minimi quadrati, si ottiene una stima dell'equazione di regressione:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots \quad (4)$$

2.5 Previsione e controllo dei consumi

I sistemi di cui si vuole stabilire l'efficienza possono essere soggetti a cambiamenti nel tempo che ne possono condizionare, anche pesantemente, le prestazioni. Tali cambiamenti, positivi o negativi, possono derivare da malfunzionamenti, variazioni delle condizioni di utilizzo ma anche da interventi strutturali o gestionali (più o meno volontari). Per questi motivi, la creazione dei modelli matematici per la previsione dei consumi deve essere effettuata considerando le inevitabili variazioni di prestazione nel tempo attraverso un'oculata organizzazione della fase di raccolta dati che includa o escluda (a seconda delle necessità) la presenza di malfunzionamenti e variazioni di prestazione. L'analisi della serie temporale dei dati raccolti deve essere particolarmente attenta al fine di individuare eventuali variazioni nel comportamento del sistema e garantire un livello adeguato di stabilità e attualità al modello. Inoltre, nell'eventualità in cui vengano individuati periodi in cui il comportamento del sistema sia cambiato positivamente, bisogna tentare di stabilizzare le cause di tali benefici, mentre se fosse cambiato negativamente, si dovrebbe cercare di individuare le cause del cambiamento e di eliminarle.

Una volta che il modello matematico è stato ottenuto può essere facilmente utilizzato nella fase di controllo delle prestazioni nel tempo. A questo scopo, uno strumento decisamente utile è la carta di controllo delle somme cumulate o carta CuSum. Costruendo la carta CuSum e la carta degli scostamenti, si può verificare la deviazione dei dati rispetto al modello ottenuto (la quale deve essere adeguatamente superiore all'errore stimato dei vari strumenti di misura per essere considerata rilevante), nel periodo di osservazione; queste carte devono essere successivamente confrontate qualitativamente con dei grafici che rappresentino l'andamento nel tempo del consumo di ciascun compressore (o, in mancanza di tali dati, dello stato di ciascun compressore), come ad esempio delle run charts (grafici dell'andamento delle variabili nel tempo) o, in alternativa, delle bar charts (grafici a barre), e con le informazioni raccolte circa i guasti o le modifiche occorse nel periodo di osservazione all'intero sistema, cercando di stabilire, per ogni evento anomalo, la causa del discostamento dal modello. L'utilizzo di questo strumento permette, quindi, di prevedere le variazioni del comportamento del sistema, siano esse positive o negative, e di reagire rapidamente ai cambiamenti.

2.5.1 Carta CuSum

La carta CuSum è uno strumento molto versatile per l'utilizzazione del modello matematico sviluppato nella fase di controllo. Questo tipo di carta di controllo consente l'identificazione dell'istante temporale in cui un processo si discosta dalla previsione, segnalando la presenza di eventi in cui si manifestano deviazioni dal modello non giustificate dalla natura stessa del processo, assumendo che il modello matematico di previsione sia stato correttamente costruito e tenga conto di tutte le variabili in gioco.

L'oggetto del controllo è, in questo caso, la legge di previsione dei consumi energetici ottenuta dalla caratterizzazione del processo, mentre la variabile di riferimento è costituita dallo scarto tra i valori di consumo effettivi e quelli previsti [24].

La carta si costruisce considerando, per l' i -esimo dato della serie temporale, la somma degli scarti tra dati misurati e previsioni fino a quell'istante:

$$S_i = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) = S_{i-1} + (y_i - \bar{y}) \quad (5)$$

Se i consumi sono sotto controllo, i residui saranno caratterizzati da un valore medio nullo e da una varianza naturale dovuta a cause comuni ed il relativo grafico mostrerà una certa stabilità nel tempo. Se i consumi sono fuori controllo, il grafico rivela un comportamento instabile, in quanto i residui saranno caratterizzati da un valore medio diverso da zero, situazione che segnala la presenza di una o più cause speciali. La divergenza della somma cumulata aumenta all'aumentare dei dati consecutivi della serie temporale che presentano la stessa variazione rispetto al modello iniziale, indicando pertanto una possibile variazione del modello [24].

Le carte CuSum sono molto sensibili e consentono di visualizzare in maniera immediata l'impatto economico delle deviazioni dal modello (aiutando a definire una priorità di intervento); non sempre, però, le cause di queste deviazioni sono di facile individuazione. Sono uno strumento molto utile in caso di modello multi-variabile, in quanto all'aumentare dei fattori considerati questo tipo di carte rimangono funzione di una sola variabile, il tempo [25]. Un esempio di carta CuSum è riportato in figura 1.

Per stabilire la significatività statistica dei cambiamenti nel comportamento del sistema evidenziati da una carta CuSum, e quindi individuare le fluttuazioni che rientrano nella variabilità normale del processo in esame, si ricorre generalmente ad un'analisi dei residui: il cambiamento viene giudicato significativo se le popolazioni cui appartengono due gruppi di residui hanno diverse medie e/o diverse varianze.

Per confrontare le medie e le varianze di due popolazioni si ricorre a dei test d'ipotesi, ovvero al "test F" di Fisher sull'uguaglianza di due varianze [26] e al "test t" di Student sull'uguaglianza di due medie [27].

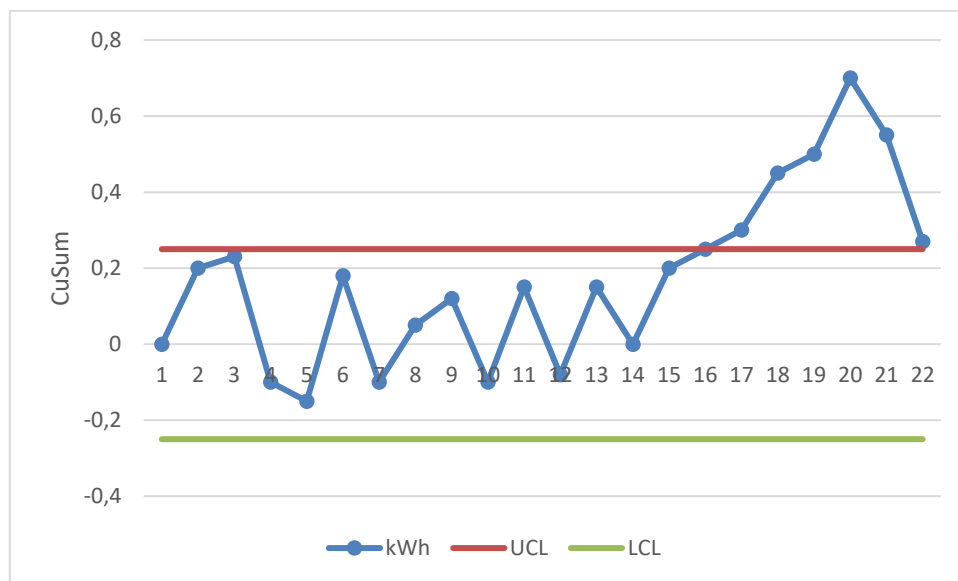


Figura 1 – Esempio di carta CuSum. In verde il limite di controllo inferiore ed in rosso il limite superiore

2.5.2 Carta degli scostamenti

La carta degli scostamenti è un altro valido strumento di controllo che consente una maggiore immediatezza nella costruzione e nell'utilizzo rispetto alla CuSum, ma risulta meno sensibile ai cambiamenti.

La carta degli scostamenti è un grafico in cui vengono riportati tutti gli scostamenti delle rilevazioni rispetto al valore dettato dal modello matematico per ogni istante temporale. Nella carta vengono generalmente inseriti almeno 2 limiti, uno superiore ed uno inferiore al superamento dei quali il processo viene considerato fuori controllo. Il fuori controllo viene individuato, oltre all'eventualità già definita, anche da un andamento non casuale del processo nel tempo come ad esempio la ripetizione di segnali positivi o negativi anche se all'interno del limite di controllo.

Per poter segnalare con una buona prontezza l'insorgere di una causa speciale e quindi il verificarsi di un fuori controllo, le bande di controllo devono essere sufficientemente strette da consentire una segnalazione tempestiva ma anche abbastanza ampie da evitare segnali di falso allarme. Per cercare di

limitare il numero di falsi allarmi è possibile aggiungere al grafico una banda di pre-allarme che consenta di individuare il momento in cui è opportuno prepararsi ad intervenire sul sistema perché con buona probabilità si sta per verificare un fuori controllo [25]. Per stabilire i limiti di controllo, è possibile utilizzare l'escursione sulla media mobile, ovvero stimare σ come la media delle differenze in valore assoluto tra scostamenti successivi, divisa per un fattore valutato empiricamente e solitamente pari a 1,128; come valore dei limiti di controllo posso quindi porre un multiplo di σ (generalmente 3σ).

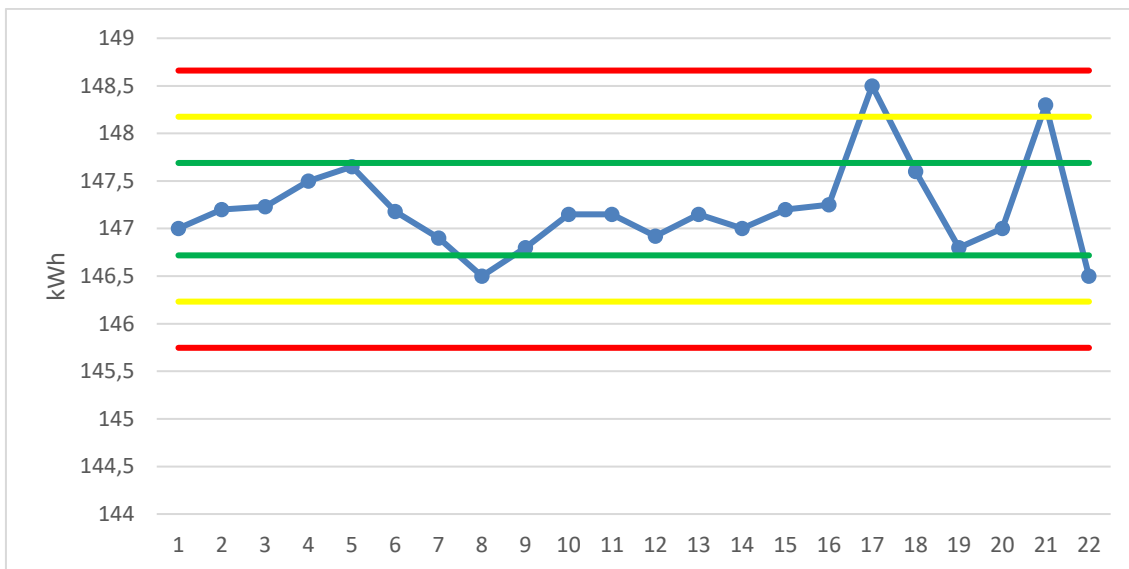


Figura 2 – Esempio di carta degli scostamenti con limiti di controllo.

2.6 Campagna di monitoraggio

Il monitoraggio dei dati prevede due fasi, la prima in cui si utilizzano i dati storici, la seconda in cui si usano rilevazioni molto recenti per l'impostazione di un monitoraggio in tempo reale.

La prima parte è utile per la caratterizzazione delle grandezze in esame e per la costruzione delle baseline dei consumi considerando la disponibilità di dati rilevati con cadenza oraria. In questa fase vengono scelti gli indicatori chiave di prestazione, o key performance indicators (KPI), vengono caratterizzati i legami tra le grandezze in gioco e vengono costruiti i modelli matematici. L'utilizzo dei modelli statistici di regressione con i dati storici e la proposizione delle carte di controllo che ne derivano servono per valutarne l'efficacia anche confrontando gli eventuali segnali di fuori controllo con eventi effettivamente accaduti. Questa fase serve quindi come banco di prova per la successiva implementazione dei modelli di controllo in tempo reale.

L'analisi dei dati storici e l'implementazione dei modelli per il monitoraggio permette di facilitare l'implementazione di un sistema stabile per il controllo sistematico dei consumi nel tempo. Per implementare un sistema di controllo di questo tipo è sufficiente scegliere un periodo di tempo in cui c'è la certezza che i misuratori forniscano dati corretti ed utilizzare questi ultimi per costruire un modello matematico simile a quello di riferimento, utilizzando gli stessi KPI, con cui confrontare i dati di funzionamento successivi.

La metodologia è stata quindi applicata impostando i modelli su una piattaforma di controllo disponibile in commercio con l'obiettivo di monitorare il funzionamento dei sistemi e lanciare allarmi nel caso di segnali fuori controllo.

2.7 *Analisi dei potenziali miglioramenti*

I segnali di fuori controllo devono essere indagati al fine di stabilire le cause del malfunzionamento e individuare le azioni appropriate da attuare per il miglioramento delle prestazioni [1].

In generale l'aumento dei consumi può essere dovuto a molteplici cause, come la mancanza di manutenzione o operazioni di processo non corrette. L'identificazione rapida e la rimozione di questo tipo di cause consente al sistema di utilizzare l'energia minima richiesta e migliorare la sua efficienza energetica. Allo stesso modo, anche le riduzioni del consumo possono essere dovute a diverse cause. La più probabile è rappresentata dall'implementazione di un'azione efficace per il miglioramento dell'efficienza energetica. Nel caso in cui la riduzione sia il frutto di un evento inaspettato, occorre indagare approfonditamente al fine di intraprendere l'azione necessaria per stabilizzare il miglioramento avvenuto.

Il manifestarsi di una deviazione, sia essa positiva o negativa, se è stabile e continuativa nel tempo, rende necessario l'aggiornamento del modello per continuare a eseguire il controllo rispetto alla nuova dinamica del consumo.

3 Descrizione del Case study

3.1 Dati generali dello stabilimento di produzione

L'azienda presa in considerazione opera nel settore della produzione di componenti meccaniche. Lo stabilimento è composto di differenti edifici quali:

- Fabbricato Produzione
- Centrale termica e sala compressori
- Uffici Tecnici e Amministrativi

3.2 Impiantistica

3.2.1 Impianti termici

La centrale termica dello stabilimento produttivo è composta da due generatori di vapore alimentati a metano. Per garantire una affidabilità adeguata al sistema, solamente uno dei due generatori viene tenuto in funzione, mentre il secondo è di riserva (riserva calda). In questo modo è possibile evitare l'interruzione della produzione che porterebbe a delle perdite, anche in termini di costi, inaccettabili. All'interno dello stesso edificio sono presenti, inoltre, le tubazioni per il passaggio del vapore e dell'acqua calda ed i sistemi di pompaggio e accumulo per il ritorno della condensa dall'impianto di recupero, che permettono di ridurre la quantità di combustibile necessaria ad ottenere le condizioni desiderate del vapore in uscita dal GV e di limitare la necessità di reintegro di acqua demineralizzata nel sistema. In centrale è presente, infine, una caldaia per la produzione di acqua calda adibita al soddisfacimento del fabbisogno termico invernale degli uffici.

L'attività di processo all'interno dello stabilimento produttivo prevede l'utilizzo di vapore ad elevata pressione, variabile a seconda della specifica lavorazione. In principio il vapore è prodotto dal GV ad una pressione impostata e fissata leggermente superiore a quella di processo, con naturali fluttuazioni nell'intorno del set-point, che successivamente viene ridotta lungo il sistema di distribuzione a causa di perdite, sia concentrate, sia distribuite, in modo tale da assicurare la pressione desiderata per ogni specifica applicazione.

Parte del vapore prodotto ed inviato al reparto produzione viene "perso" a causa di un sistema di distribuzione non perfettamente ermetico, parte a causa del funzionamento intrinseco di alcune lavorazioni. Tali perdite rendono necessario il reintegro di acqua all'interno del serbatoio condense.

3.2.2 Impianti frigoriferi

Oltre alla domanda di energia termica, è presente nello stabilimento anche una richiesta di energia frigorifera, necessaria a differenti applicazioni. A tale scopo sono, perciò, presenti quattro gruppi frigoriferi destinati alla produzione di acqua refrigerata a coprire i fabbisogni di processo, presenti sia nel periodo estivo, sia in quello invernale, e il fabbisogno per il condizionamento, presente solo in quello estivo.

3.2.3 Impianto per la produzione di aria compressa

L'aria compressa è uno dei principali servomezzi dello stabilimento produttivo in esame. Essa, infatti viene utilizzata in tutti i processi ed in tutte le lavorazioni principali. Viene usata come fluido di lavoro, insieme al vapore, negli attuatori meccanici, per la movimentazione di materiali e macchine, e nelle valvole pneumatiche, per consentirne l'apertura e la chiusura. Sono, inoltre, presenti nello stabilimento numerose pistole pneumatiche, che servono per la pulizia delle parti prodotte. La produzione di aria compressa da parte dell'impianto segue, quindi, i tempi della produzione, comportando consumi elevati dal lunedì al sabato e bassi consumi durante la domenica, in cui viene utilizzata solo per alcune ore, per lavori di pulizia e per alimentare le attività della sala prove.

La disposizione delle prese d'aria delle macchine è sul lato nord della sala compressori ad un'altezza di circa 3 m da terra. Questa è una condizione ottimale dal punto di vista della tipologia di impianto, dal momento

che l'aria aspirata, a parità di condizioni esterne, risulta essere più fresca, consentendo un incremento del rendimento del sistema, e, inoltre, la disposizione ad una certa quota dal suolo riduce la possibilità di aspirazione di particelle solide in sospensione e polveri da parte dei filtri di aspirazione, con conseguenti minori perdite di carico in fase di esercizio degli stessi.

La manutenzione ordinaria e straordinaria di tutti i compressori è affidata ad una ditta esterna che riceve dal sistema gli input sia per quanto riguarda interventi preventivi (ad esempio in funzione del numero di ore di funzionamento) sia per situazioni di allarme.

L'intero sistema di produzione dell'aria compressa può essere suddiviso in due linee, una di media e bassa pressione (MP) e l'altra di alta pressione (AP).

3.2.3.1 Linea operante a media e bassa pressione

L'impianto della linea a media - bassa pressione presenta i seguenti componenti:

- condotte di aspirazione più filtri;
- compressori a vite NON equipaggiati con Inverter;
- 1 compressore a vite equipaggiato con inverter;
- 3 serbatoi;
- Essiccatore di aria;
- Condotte di mandata.

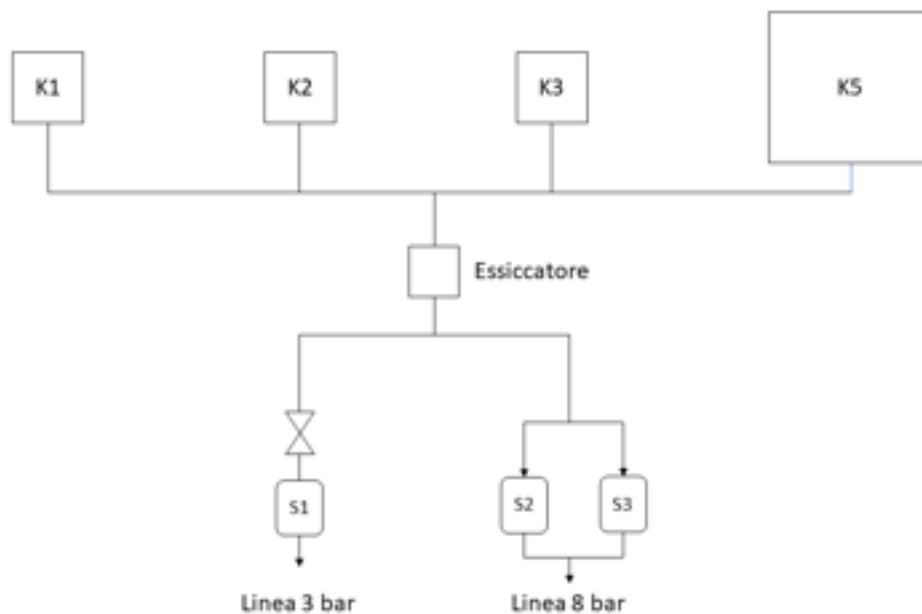


Figura 3 – Schema di massima dell'impianto di media-bassa pressione.

Come facilmente intuibile dalla figura 3 la rete è suddivisa in 2 parti differenti: una operante ad una pressione di 3 bar e una con una pressione di 8 bar.

In questo sistema la separazione delle due linee avviene nel condotto a valle dell'essiccatore. L'impianto di produzione comprime tutta la portata ad una pressione di 8 bar che poi viene ridotta a 3 bar tramite una valvola su una delle due derivazioni.

In condizioni di normale funzionamento la gestione della sequenza di accensione e spegnimento dei compressori viene comandata dalla centralina unica a cui sono collegate tutte le macchine.

Il sistema di controllo riceve in ingresso un segnale relativo alla domanda fornito da un indicatore di pressione del serbatoio e in base all'entità dell'abbassamento della pressione determina la modalità con cui intervenire.

Questo sistema riceve in ingresso un segnale della domanda di pressione dalla rete, dopodiché gestisce il dato e determina la modalità in cui verrà soddisfatto. La sequenza di accensione delle macchine può essere impostata manualmente o lasciata in automatico, in modo da garantire una corretta rotazione. L'avviamento di ogni compressore è subordinato all'esigenza di un maggiore volume d'aria, che è determinato in funzione di un segnale di abbassamento di pressione nel serbatoio. Superato un valore di soglia di questa pressione si attiverà il successivo compressore in ordine di programmazione, compatibilmente con le prestazioni dello stesso.

Una eventuale disinserzione del sistema di controllo dei compressori, imposta o meno (assenza di alimentazione), non causa il collasso del sistema ma si traduce semplicemente in una commutazione sulla modalità di controllo dei compressori che passa da centralizzata a locale: ogni compressore si comporta di fatto come una "isola" che autonomamente risponde ad una richiesta di aria compressa segnalata mediante una sonda di pressione all'interno della macchina stessa.

Questa centralina di controllo inizialmente è stata progettata per azionare i tre compressori senza inverter di cui era composto l'impianto prima dell'aggiunta del compressore a velocità variabile. Dopo l'installazione del quarto compressore, avvenuta nel 2016, l'azienda ha aggiornato il programma di regolazione dei compressori aggiungendo una parte relativa alla regolazione di una macchina con variatore di velocità. Come si vedrà in seguito, però, la regolazione attualmente non è ottimale.

3.2.3.2 Linea operante ad alta pressione

La linea ad alta pressione è costituita dalla successione di macchine operanti tra due livelli di pressione e risponde anch'essa in funzione della domanda in ingresso al sistema.

L'impianto è così costituito:

- Condotta di aspirazione più filtro
- 1 compressore a vite equipaggiato con Inverter
- Serbatoio primo livello
- Essiccatore di aria
- 2 booster
- Serbatoio secondo livello
- Condotte di mandata

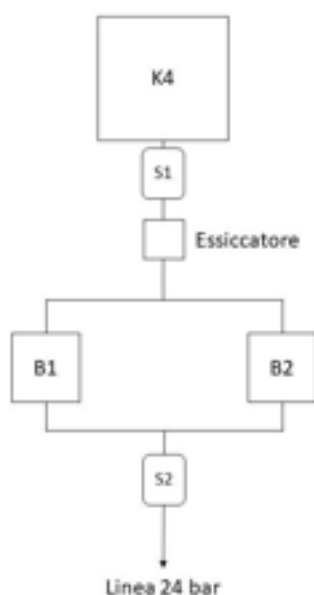


Figura 4 – Schema di massima della linea ad alta pressione.

La compressione dell'aria in questa linea avviene in due stadi secondo lo schema di figura 4: inizialmente l'aria è aspirata e inviata ad un compressore a vite con inverter, la cui funzione è quella di comprimerla fino a raggiungere il primo livello di Alta Pressione all'interno di un serbatoio; il secondo livello di Alta Pressione è poi raggiunto per mezzo di due booster, i quali spingono l'aria all'interno del serbatoio di raccolta. Dal serbatoio di alta pressione, le portate d'aria richieste dal sistema sono, infine, inviate alle utenze.

Per quanto riguarda il sistema di gestione della linea, il primo stadio è comandato secondo il funzionamento ad "isola", mentre il funzionamento del secondo stadio è governato in maniera centralizzata, come nel caso della linea a bassa pressione, da un apposito sistema di gestione.

3.3 Alimentazione dello stabilimento

Lo stabilimento acquista da fornitori esterni il vettore energetico "energia elettrica". La tipologia di prezzo associata appartiene alla categoria "peak – off-peak": si hanno, cioè, solamente due fasce giornaliere, sulle quali andranno calcolati i costi dell'energia assorbita (Tabella 1).

Tabella 1 – Fasce orarie Peak / Off-Peak

Fasce orarie Peak/Off-Peak (applicabili solo a contatori orari con rilievo della curva oraria) - Descrizione:
Peak: Ore di punta
 Nei giorni dal Lunedì al Venerdì dalle ore 8.00 alle ore 20.00.
Off-Peak: Ore fuori punta
 Nei giorni dal Lunedì al Venerdì dalle ore 20.00 alle ore 8.00 e nei giorni di Sabato, Domenica e festivi.
 Festivi: 1 e 6 Gennaio, Lunedì di Pasqua, 25 Aprile, 1 Maggio, 2 Giugno, 15 Agosto, 1 Novembre, 8 Dicembre, 25 e 26 Dicembre.

FASCE ORARIE PEAK/OFF-PEAK																								
Giorno	SETTIMANA																							
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Lunedì	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Martedì	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Mercoledì	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Giovedì	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Venerdì	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Sabato	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
Domenica	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
FESTIVITÀ INFRASETTIMANALI (*)																								
Giorno	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1 gen - 31 dic	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off

(*) 1 e 6 gennaio, Lunedì di Pasqua (dell'Angelo), 25 aprile, 1 maggio, 2 giugno, 15 agosto, 1 novembre, 8 dicembre, 25 e 26 dicembre

La tensione di alimentazione dell'impianto è di 20.000 V, cioè in media tensione (MT). L'impianto dispone di quattro trasformatori nelle rispettive cabine di trasformazione per la riduzione del voltaggio ai valori tipici di bassa tensione (BT) a 230V, per la monofase, e 400V per la trifase.

La potenza disponibile da contratto supera i 2.000,00 kW ed insieme al valore di tensione descritto in precedenza vanno a definire l'opzione tariffaria: "MT con potenza disponibile superiore a 500 kW".

Procedendo per il riepilogo dei consumi fatturati per il POD (Point Of Distribution) definiti per la mensilità in corso, la suddivisione delle misurazioni è effettuata in relazione ad:

- Energia attiva (in kWh)
- Energia reattiva (in kVAR)
- Potenza (di picco prelevata durante la mensilità – in kW).

3.4 Sistema di controllo e monitoraggio

Come già detto, lo stabilimento viene alimentato da corrente elettrica in media tensione che viene trasformata in bassa tensione attraverso tre cabine di trasformazione MT/BT.

Il sistema di misurazione della potenza prevede un contatore in ogni cabina di trasformazione ed un ulteriore contatore su ogni interruttore tale da rendere disponibili dati sull'utilizzo delle varie macro-utenze. In alcuni casi sono stati installati contatori direttamente sui quadri di distribuzione, in altri, come visto nel caso dei compressori, l'energia può essere misurata direttamente a livello di utenza.

L'azienda raccoglie tutti i dati provenienti dai contatori grazie ad una piattaforma fornita da una società esterna la quale consente di configurare ed acquisire dati provenienti da contatori di diversa tipologia e marca. Tutti i dati misurati possono essere archiviati ed elaborati utilizzando un software apposito messo a disposizione dalla società fornitrice della piattaforma di acquisizione.

Oltre all'energia elettrica, il software permette di acquisire anche dati relativi ai diversi Energy Drivers che possono influenzare i consumi. In linea generale possono essere definite due principali categorie di Energy Drivers: legati alla produzione e non legati alla produzione.

I primi sono:

- I volumi produttivi;
- I turni lavorati;
- Il consumo di materie prime.

Quelli non legati alla produzione sono:

- I gradi giorno caldo (GGc);
- I gradi giorno freddo (GGf);
- L'umidità;
- Le variazioni ore-buio (VOB);
- Ore di attività;
- L'irraggiamento solare.

È facile immaginare come un sistema di controllo così ben sviluppato renda possibili numerose caratterizzazioni dell'azienda dal punto

La possibilità di acquisire tante differenti tipologie di misure rende possibile la caratterizzazione dei consumi energetici, finalizzata al loro controllo. Caratterizzare i consumi energetici significa individuare delle relazioni matematiche che legano i consumi di energia di uno stabilimento o di un impianto, ad un certo numero di Energy Drivers, tramite la costruzione di modelli che siano in grado di stimare il valore dei consumi energetici partendo dal valore degli Energy Drivers identificati.

I modelli validati possono essere impiegati per il controllo dei consumi energetici utilizzando la carta CuSum che permette un confronto grafico nel tempo tra i dati di consumo provenienti da un contatore ed i valori previsti sulla base del modello. L'osservazione della CuSum dei residui consente un rapido controllo della situazione del contatore monitorato. Il controllo consente quindi di tenere sotto controllo le prestazioni ed indagare le eventuali cause di fuori controllo.

4 Applicazione della metodologia di monitoraggio e controllo

L'obiettivo del lavoro è applicare la metodologia per il miglioramento dell'efficienza energetica nella produzione e nel trasporto di aria compressa in uno stabilimento industriale, in modo da poter calcolare il potenziale di efficientamento e poter indicare azioni per il miglioramento continuo. La metodologia sviluppata è stata applicata su differenti set di dati così da poter caratterizzare al meglio i sistemi in esame e poter confrontare le prestazioni dei singoli sottosistemi.

In una prima fase, la metodologia è stata applicata per l'analisi dei dati storici della linea ad alta pressione e di quella a bassa pressione per verificarne il funzionamento e riconoscere i malfunzionamenti e le rispettive cause. In seguito, dopo aver selezionato degli intervalli di funzionamento in condizioni ottimali da prendere come riferimento, la metodologia è stata impostata su un software commerciale in grado di acquisire, a frequenza definita, i dati dalla piattaforma di monitoraggio in modo da poter sviluppare un primo modello di monitoraggio in tempo reale.

Tutti i dati su cui sono stati calcolati gli indici di prestazione e su cui sono stati sviluppati i modelli matematici sono riferiti agli anni 2017 e 2018.

4.1 Calcolo degli indici di consumo

Il primo indicatore ad essere stato calcolato è il rapporto tra consumo di energia del reparto di generazione dell'aria compressa e il consumo totale di stabilimento. Il risultato del rapporto è.

$$\frac{kWh_{eAC}}{kWh_{eTOT}} = 11.02\%$$

Il valore del primo indicatore di prestazione calcolato è di 11.02% e risulta leggermente superiore al valore che si trova in letteratura del 10%. Questo dato conferma il grande utilizzo dell'aria compressa che si fa in azienda e dimostra come sicuramente ci siano elevati margini di miglioramento, in un'ottica di gestione dei consumi più organizzata e consapevole. In figura 5 sono riportati gli andamenti nel tempo dei consumi di stabilimento e del sistema di generazione di aria compressa relativi all'anno 2017.

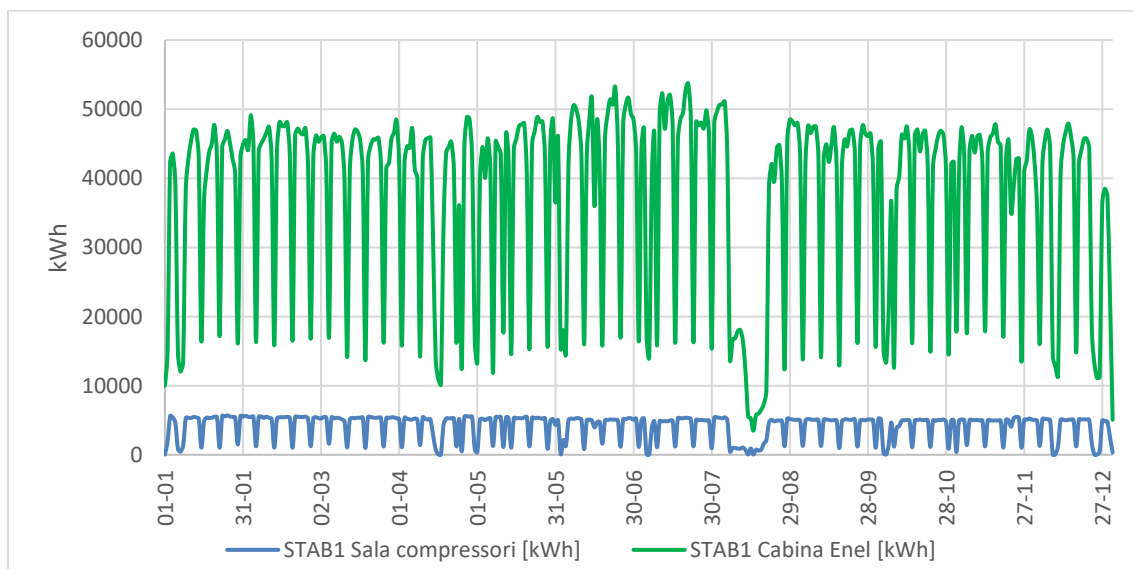


Figura 5 – Consumi totali dello stabilimento (curva verde) e consumi della sala compressori (curva blu)

Il secondo indicatore calcolato è il rapporto tra consumi energetici del reparto aria compressa e la quantità di aria compressa elaborata. Per il calcolo non è stato possibile considerare i dati relativi a tutto il 2017 poiché il sistema di misurazione non ha garantito un'acquisizione continuativa della misura di portata e quindi non si è potuto risalire alla quantità totale di aria compressa prodotta. Si è scelto, perciò, di fare

riferimento ai dati orari di un mese in cui entrambi i set di misure erano completi, ed in figura 6 sono riportati, quindi i dati di consumo e portata di luglio 2018. Il risultato ottenuto è:

$$\frac{kWh_e AC}{m^3} = 0.175$$

Il valore calcolato di 0.175 kWh/m³, ricade nel primo range individuato in [28], ma si avvicina al limite superiore ed anche in questo caso, quindi, esiste la possibilità di ottimizzare il sistema, rendendolo più efficiente nella fase di generazione dell'aria compressa.

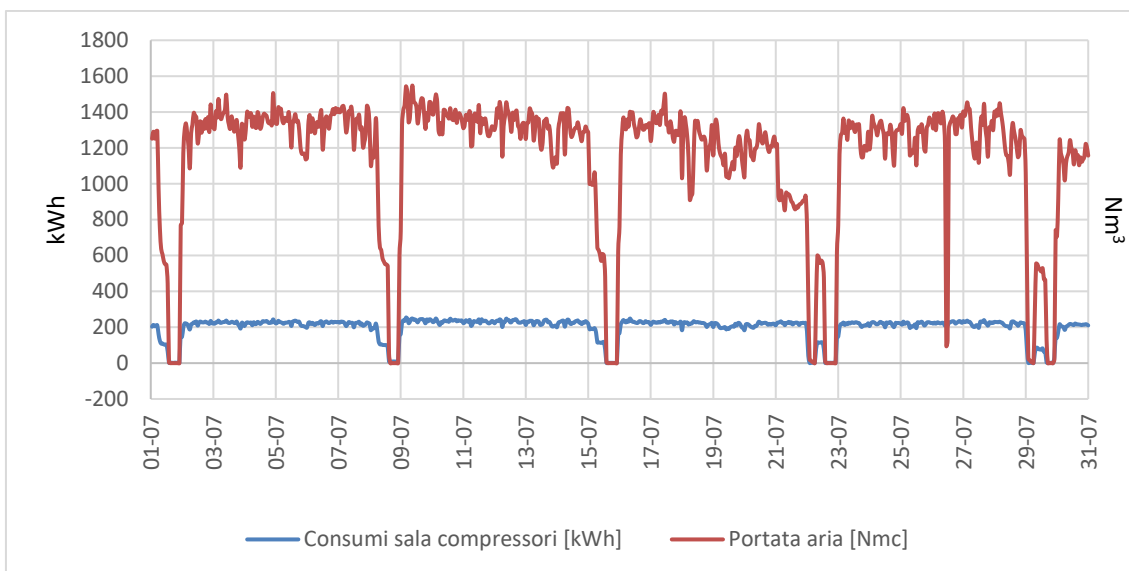


Figura 6 – Consumi della sala compressori (curva rossa) e quantità di aria compressa prodotta (curva blu).

4.2 Modelli della linea alta pressione

Per la creazione dei modelli della linea di alta pressione sono stati presi in considerazione i dati che vanno dal 27/11/2017 fino al 01/08/2018. Il sistema, come mostrato in precedenza, è composto da un compressore e due boosters ed il sistema di misurazione mette a disposizione le seguenti variabili misurate su base oraria:

- Consumi del compressore K4 in kWh;
- Consumi del booster B1 in kWh;
- Consumi del booster B2 in kWh;
- Totale consumi in kWh della linea;
- Portata d'aria elaborata nella linea in Nm³;
- Pressione dell'aria all'uscita del compressore K4 (set point fissato a 10 bar);
- Pressione dell'aria in uscita dai due boosters (set point fissato a 24 bar);
- Temperatura esterna in °C;
- Umidità esterna in %;

Il periodo è stato scelto in base alla disponibilità di dati acquisiti dal sistema di misura e di seguito sono riportati i grafici temporali, con frequenza oraria, delle variabili appena elencate.

In base ai dati disponibili si è optato per lo sviluppo di 3 modelli matematici differenti: uno che considera la linea alta pressione nella sua interezza, uno soltanto per il compressore a bassa pressione K4 ed uno per i boosters.

Prima di utilizzare i dati provenienti dagli strumenti di misura per la costruzione del modello matematico è stato necessario intraprendere una fase di “pulizia” dei dati ossia di eliminazione dei valori evidentemente affetti da errori.

Sono stati individuati ed eliminati i seguenti range di misure anomale:

- Dall’08/06/2018 alle 17:00 al 19/06/2018 alle 09:00 si è verificata una mancata acquisizione dei dati di portata, di temperatura e di umidità perché lo strumento di misura aveva subito un danneggiamento a causa di infiltrazioni di acqua.
- È stata registrata una serie di punti a portata nulla ma con presenza di consumi in prossimità dell’istante di accensione dei compressori dopo periodo di spegnimento dell’impianto durato un intero giorno. Questi outliers potrebbero essere dovuti alla non perfetta sincronia nella fase di acquisizione dati provenienti dai misuratori di portata e dei consumi, perciò è possibile che quando i compressori si sono accesi ed hanno iniziato ad elaborare portata, questa non fosse registrata dai contatori. Altra causa potrebbe essere la presenza di un intervallo di tempo tra l’accensione dei compressori e l’utilizzo dell’aria compressa da parte delle utenze. Il misuratore di energia misura quindi valori diversi da zero anche se la portata erogata alle utenze rimane nulla (dati cerchiati in rosso in figura 7).
- Una serie di punti a consumo nullo e presenza di portata che si verificano dalle 02:00 alle 05:00, nella fase di spegnimento della domenica notte, quando, evidentemente, i compressori si spengono ma nei serbatoi continua ad esserci aria che fluisce nei misuratori (dati cerchiati in verde in figura 7).

I dati cerchiati che rappresentano misurazioni chiaramente anomale sono stati eliminati successivamente nella creazione dei modelli.

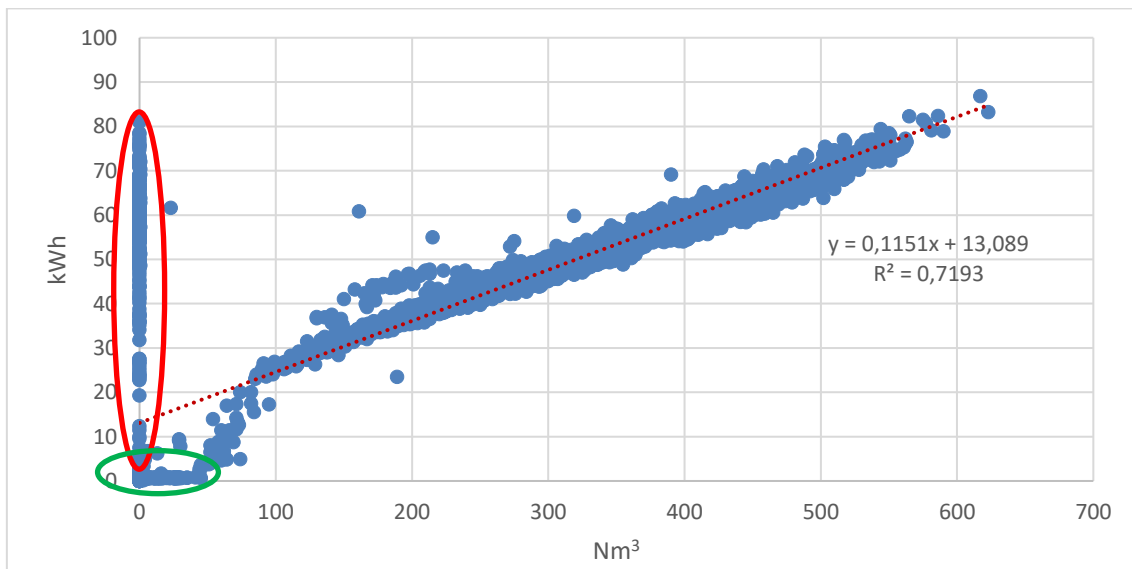


Figura 7 – Grafico a dispersione dei consumi in funzione della portata elaborata, in rosso la retta di regressione. L’equazione rappresenta la retta interpolante ottenuta con il metodo dei minimi quadrati.

Come definito nella sezione riguardante la metodologia, lo sviluppo del modello matematico comporta la scelta degli energy drivers all’interno dei parametri misurati. Per poter avere una valutazione oggettiva dell’influenza di tutte le variabili sul consumo totale, e quindi identificare gli energy drivers, sono state effettuate analisi di correlazione tra tutte le variabili. Per una più facile visualizzazione i dati sono riportati all’interno delle matrici della correlazione (tabelle 6, 7 e 8)

La prima matrice, riportata nella tabella 2, sono stati calcolati gli indici di correlazione tra il totale dei consumi delle tre macchine, la portata elaborata e la temperatura e l'umidità esterna.

Tabella 2 – Matrice di correlazione tra il totale dei consumi, la portata, e le condizioni ambientali di temperatura e umidità.

	<i>Totale consumi [kWh]</i>	<i>Portata aria AP [Nmc]</i>	<i>Temperatura est [°C]</i>	<i>Umidità est [%]</i>
Totale consumi [kWh]	1			
Portata aria AP [Nmc]	0,981657803	1		
Temperatura est [°C]	0,245647077	0,266902475	1	
Umidità est [%]	0,016525529	0,015927109	-0,342732584	1

I risultati mostrano una forte correlazione dei consumi con la portata, mentre con la temperatura la correlazione risulta più debole.

La seconda matrice di correlazione, illustrata in tabella 3, considera solo i consumi del compressore K4, la portata di aria prodotta, la pressione a 10 bar e le condizioni ambientali.

Tabella 3 – Matrice di correlazione tra i consumi del compressore K4, la portata d'aria prodotta, la pressione dell'aria, e le condizioni ambientali di temperatura e umidità.

	<i>Compressore K4 [kWh]</i>	<i>Portata aria AP [Nmc]</i>	<i>Pressione aria AP 10 [bar]</i>	<i>Temperatura est [°C]</i>	<i>Umid. Est. [%]</i>
Compressore K4 [kWh]	1				
Portata aria AP [Nmc]	0,849840964	1			
Pressione aria AP 10 [bar]	0,808392328	0,674089173	1		
Temperatura est [°C]	0,181857675	0,319152069	0,079418754	1	
Umidità est [%]	-0,077621541	0,189288049	0,003454855	-0,091893112	1

Anche in questo caso consumi e portata hanno un buon grado di correlazione, così come anche i consumi con la pressione e la portata con la pressione, mentre la correlazione tra consumi e temperatura continua a risultare molto debole

La terza matrice, infine, è stata compilata considerando la somma dei consumi dei due booster, la portata, la pressione elevata a 23 bar e le condizioni ambientali di temperatura e umidità.

Tabella 4 – Matrice di correlazione tra la somma dei consumi dei due booster, la portata, la pressione e le condizioni ambientali di temperatura e umidità.

	<i>Totale consumi Booster [kWh]</i>	<i>Portata aria AP [Nmc]</i>	<i>Pressione aria AP 24 [bar]</i>	<i>Temperatura est [°C]</i>	<i>Umidità est [%]</i>
Totale consumi Booster [kWh]	1				
Portata aria AP [Nmc]	0,836193042	1			
Pressione aria AP 24 [bar]	0,91488259	0,725702045	1		
Temperatura est [°C]	0,136190148	0,319152069	0,03968854	1	
Umidità est [%]	-0,052914112	0,189288049	0,008237225	-0,091893112	1

Anche in questo caso restano valide le stesse considerazioni fatte per la precedente matrice.

Dopo aver compreso quali variabili fossero maggiormente influenti nella caratterizzazione dei consumi sono stati sviluppati i modelli matematici.

4.2.1 Modello consumi-portata dell'intera linea ad alta pressione

Nel primo modello elaborato, l'analisi di regressione è stata sviluppata considerando i dati dei consumi totali delle tre macchine che lavorano sulla linea di alta pressione e la portata complessiva prodotta. In figura 8 è riportato il diagramma di correlazione tra le due grandezze selezionate, private dei punti anomali descritti precedentemente. Da una prima analisi visiva è possibile notare come vi sia una forte correlazione tra consumi energetici e portata di aria compressa.

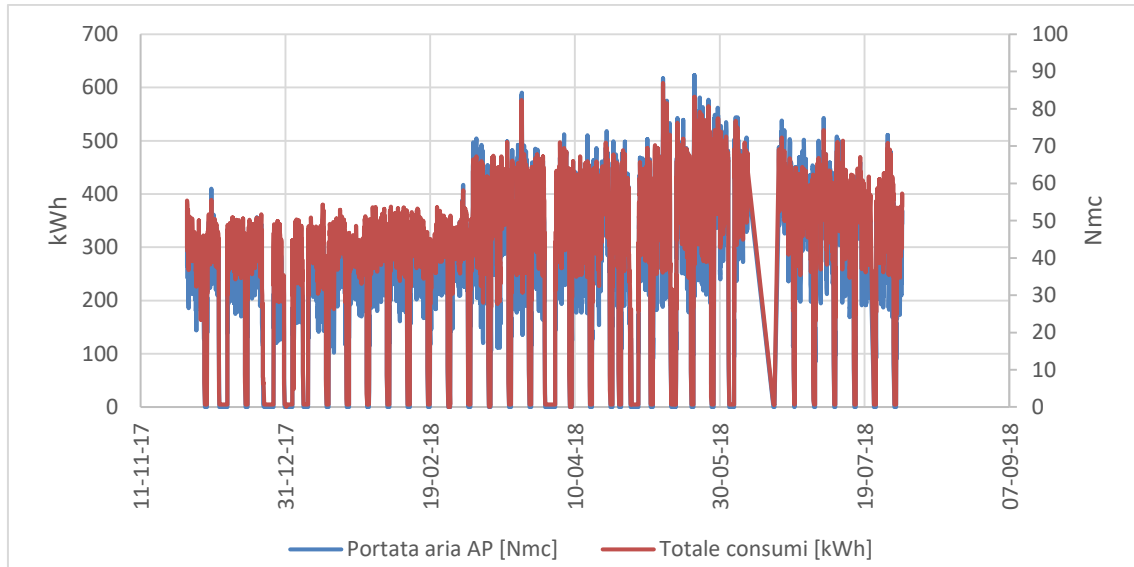


Figura 8 – Confronto tra i consumi reali dei compressori e quelli previsti dal modello creato.

Un ulteriore esame della significatività dell'analisi è stato condotto attraverso il calcolo del p-value, che, come mostrato nella tabella 5, risulta nullo sia per l'intercetta sia per la portata ed è, quindi, più che accettabile.

Tabella 5 – P-value relativi alla retta di regressione considerata.

	Valore di significatività
Intercetta	0
Portata aria AP [Nmc]	0

L'analisi di regressione lineare mostra come il sistema non mantenga un comportamento omogeneo durante tutto l'arco di utilizzo. Si nota come durante i fine settimana si abbia un utilizzo notevolmente differente da quello dei giorni feriali con consumi conseguentemente molto ridotti. Questo comporta un problema nell'utilizzo del modello poiché poco corrispondente al funzionamento dei giorni feriali (alti consumi e produzioni) e di quelli festivi (bassi consumi e produzioni). Per i giorni festivi, in cui la portata erogata è nulla, il consumo dovrebbe essere nullo, nella realtà esiste una soglia minima di 5kWh. La presenza di un consumo di base non nullo dovrebbe essere successivamente indagata.

Le considerazioni appena riportate rendono necessaria la separazione dei punti relativi ai bassi consumi, da quelli a consumi più elevati. Come visibile in figura 9 esistono due tipi di comportamenti diversi, con due relative rette di regressione differenti. Per la creazione del modello, quindi si è deciso di prendere in considerazione il funzionamento ad alti consumi, in blu, che è rappresentativo del comportamento normale dell'impianto. Gli altri punti, infatti, cadono durante le domeniche o i giorni festivi, in cui il sistema non viene utilizzato per alimentare la produzione, ma solo per attività di pulizia o secondarie.

Ripetendo l'analisi di regressione con i soli punti relativi ai giorni feriali (blu in figura 9), sono state ottenute la carta degli scostamenti, in figura 10 e la carta CuSum, in figura 11.

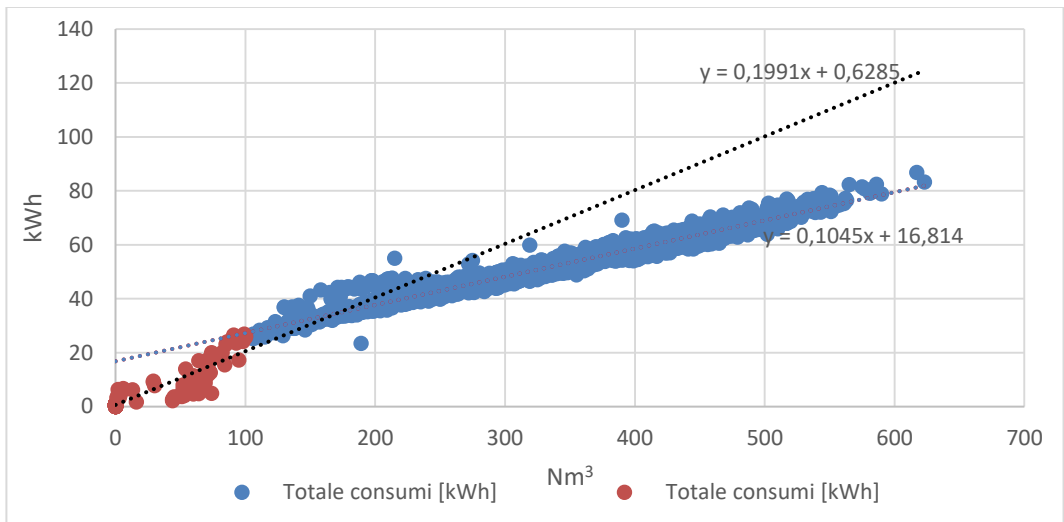


Figura 9 – Grafico di correlazione tra consumi e portata: in arancione il comportamento a bassi consumi, in blu il comportamento ad elevati consumi. Le rette di regressione (nera per tutto il dataset e grigia soltanto per i giorni feriali) indicano i differenti comportamenti del sistema.

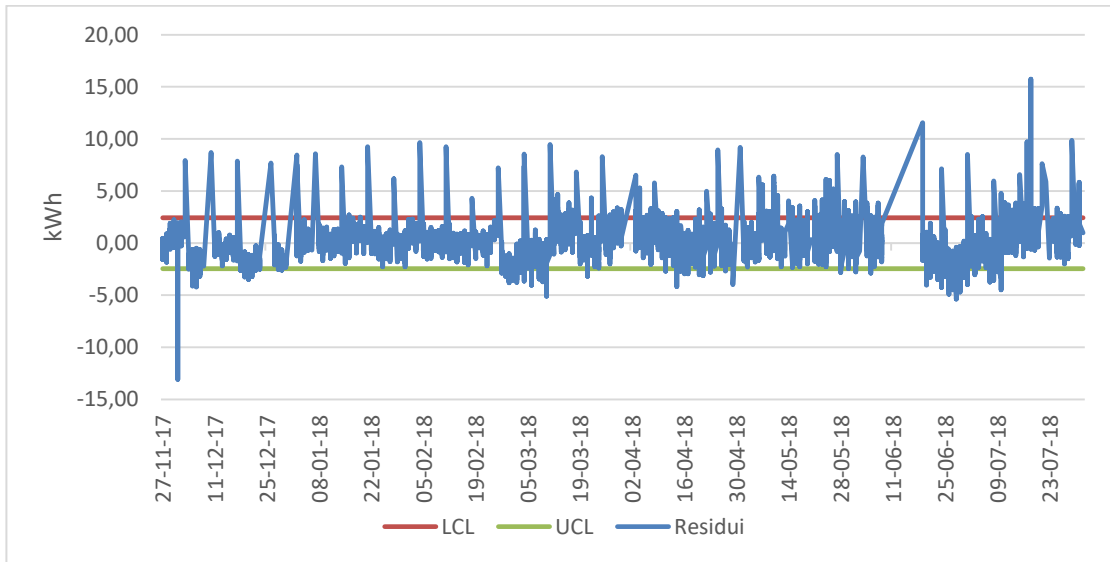


Figura 10 – Carta degli scostamenti per il modello consumi-portata.

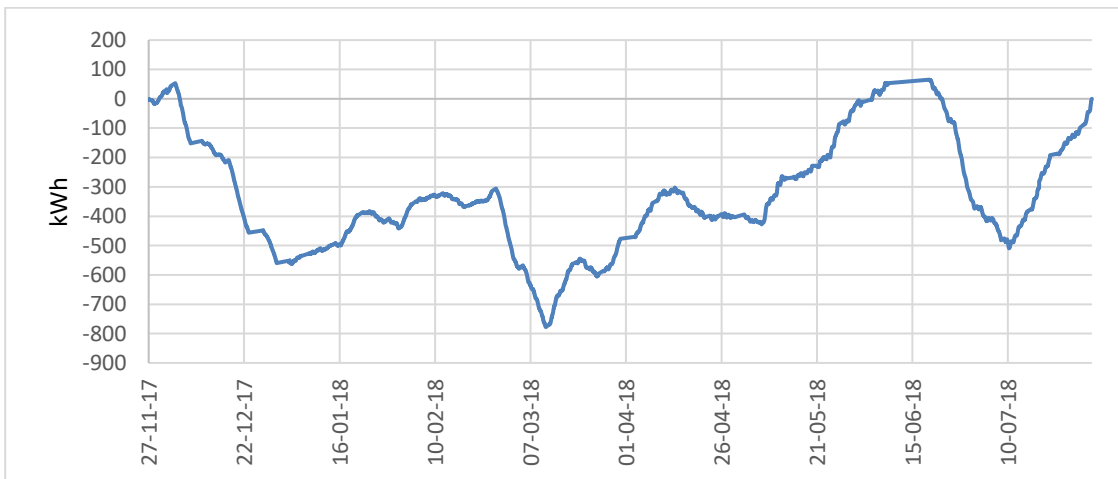


Figura 11 – Carta CuSum per il modello consumi-portata.

I periodici fuori controllo che si notano subito nella carta degli scostamenti cadono tutti di domenica, all'incirca alla stessa ora, in cui i compressori sono in fase di riaccensione, dopo essere stati spenti durante il fine settimana. Questo comportamento indica che nella fase di accensione le macchine hanno delle scarse performance che provocano un aumento dei consumi indesiderato, probabilmente dovuto alla commutazione stella-triangolo, che avviene nella fase di partenza dell'inverter. Inoltre, dall'osservazione della carta degli scostamenti e dal confronto con la carta CuSum, si può notare la presenza di diversi trend che fanno spostare la media sulla prima carta e provocano pendenze positive o negative nella seconda. Le variazioni del trend indicano la presenza di singolarità nel comportamento del sistema, che sarebbero dovute essere individuate tempestivamente ed eliminate nel caso di performance peggiori, sistematizzate nel caso di miglioramento dell'efficienza.

I modelli successivi sono stati elaborati per stabilire se questi trend possano essere stati, in qualche modo, influenzati dalla temperatura di aspirazione dell'aria, oppure possano essere attribuiti al comportamento di una macchina in particolare, o siano rappresentativi dell'impianto generale.

I punti che causano le variazioni nella pendenza della carta CuSum sono riportati nel grafico della figura 12 ed indicati, a seconda dei casi, con colori differenti. I punti in arancione, lontani dalla baseline di riferimento indicano consumi eccessivi per la portata erogata. I punti colorati in rosso sono, invece, gli ulteriori fuori controllo positivi che si sono verificati nel periodo considerato, in cui il sistema ha avuto performance peggiori. Viceversa, i punti in verde sono fuori controllo negativi, in cui le prestazioni dell'impianto sono state migliori.

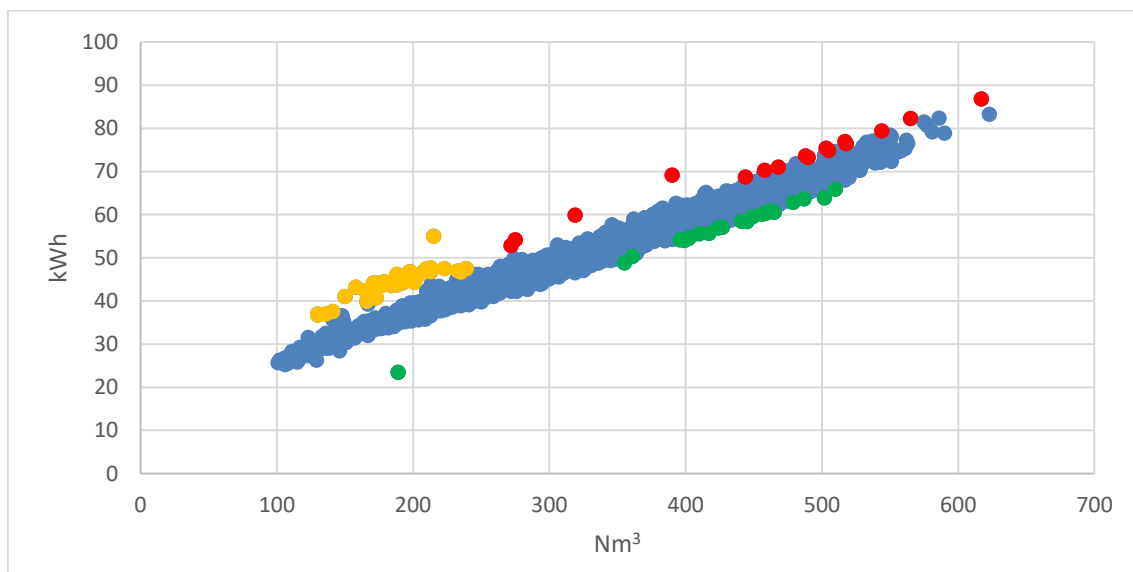


Figura 12 – Diagramma di correlazione con punti fuori controllo evidenziati

4.2.2 Modello consumi-portata-temperatura dell'intero sistema alta pressione

Il modello consumi-portata-temperatura è stato sviluppato con l'obiettivo di migliorare i risultati dell'analisi precedente e di rendere il funzionamento più aderente alle condizioni reali. Per questo motivo, nell'analisi di regressione, è stata inclusa un'ulteriore variabile rappresentata dalla temperatura.

L'analisi del p-value è risultato accettabile per entrambe le variabili, come dimostra la tabella 6.

Tabella 6 – P-value relativi alla retta di regressione considerata

	<i>Valore di significatività</i>
Intercetta	0
Portata aria AP [Nmc]	0
Temperatura est [°C]	4,25E-11

Per il modello consumi-portata-temperatura è stata ripetuta la stessa procedura utilizzata per il modello con 2 variabili. Sono state, quindi, prodotte ed analizzate le stesse carte del precedente modello, e dal confronto tra i due è possibile capire quanta influenza abbia la temperatura esterna sui consumi dei compressori della linea considerata.

La carta degli scostamenti, in figura 13, presenta gli stessi trend evidenziati nel modello precedente.

I risultati indicano che effettivamente la temperatura influenza i consumi della linea, sebbene la permanenza dei trend indichi che le rispettive variazioni di comportamento non siano attribuibili a questo energy driver aggiunto. Gli stessi comportamenti già osservati portano ad un aumento dei consumi, fino ad un massimo di 750 kWh, cumulato all’inizio di giugno. Rispetto ai dati di targa dei compressori, questo valore equivale a 5 ore e mezza di funzionamento aggiuntivo che non rappresenta un dato allarmante rispetto all’intervallo di tempo considerato.

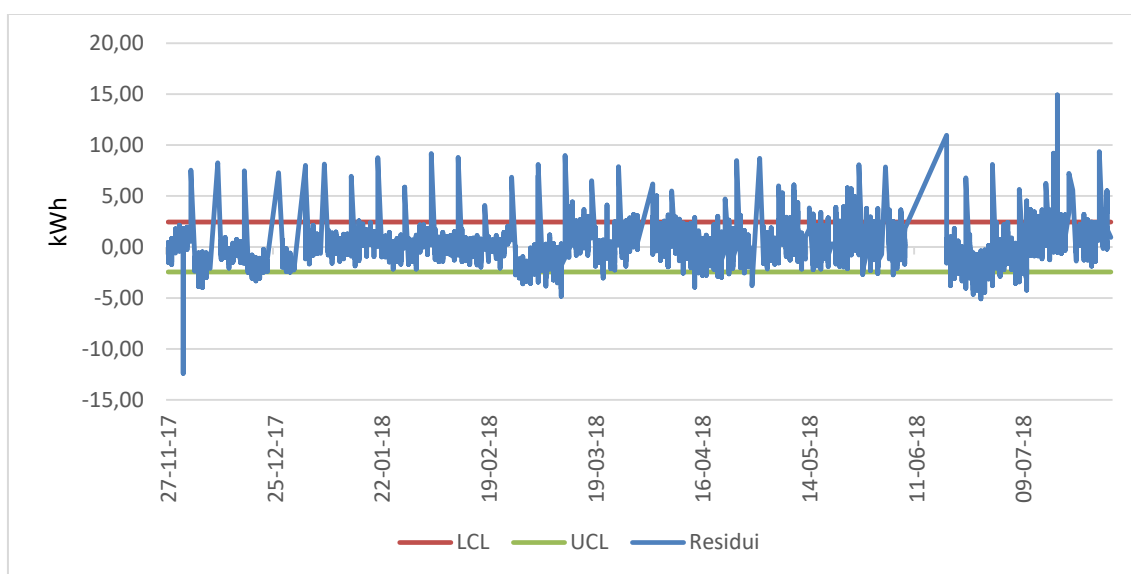


Figura 13 – Carta degli scostamenti del modello consumi-portata-temperatura

4.2.3 Modello consumi-portata del compressore K4

Dopo aver analizzato i consumi dell’impianto alta pressione nella sua interezza, sono stati suddivisi i consumi relativi al compressore di bassa pressione (K4) e ai boosters. Questa suddivisione consente di comprendere quale delle 2 parti condizioni maggiormente l’andamento generale dei consumi o se il comportamento risulta omogeneo.

Dal momento che K4 è l’unica macchina, tra le tre della linea, che aspira l’aria dall’esterno, è ragionevole pensare che i suoi consumi siano influenzati dalla temperatura ambientale, e, quindi, questo modello mette in relazione i consumi del compressore K4, la portata di aria prodotta e la temperatura esterna. La tabella 7 conferma la significatività dell’analisi condotta.

Tabella 7 – P-value relativi alla retta di regressione considerata

	Valore di significatività
Intercetta	0
Portata aria AP [Nmc]	0
Temperatura est [°C]	1.7161E-275

Dalle successive analisi si può affermare che l’andamento definito dal modello, che correla i consumi totali con la portata elaborata dal solo K4 e la temperatura, rispecchia fedelmente il comportamento dell’impianto generale e che quindi non necessita di essere trattato separatamente.

4.2.4 Modello consumi-portata dei boosters

Quest'ultimo modello, sviluppato per la linea ad alta pressione, prende in considerazione, come anticipato, solamente la somma dei consumi dei due booster e la portata prodotta. Tale valore, considerando che le due macchine sono in serie al compressore K4, è lo stesso preso in esame in tutti i precedenti modelli (assumendo plausibilmente le perdite nulle). L'analisi, come in tutti gli altri casi, risultata significativa grazie ai valori nulli dei p-value (vedi tabella 8).

Tabella 8 – P-value relativi alla retta di regressione considerata

	Valore di significatività
Intercetta	0
Portata aria AP [Nmc]	0

Dall'osservazione della carta degli scostamenti (figura 14) si nota che, a partire da fine febbraio, le oscillazioni intorno alla media aumentano di ampiezza. Questo fenomeno avviene compatibilmente con l'aumento dei consumi che si ha in quello stesso periodo. Inoltre, dallo studio della CuSum si nota come questa parte dell'impianto sembri essere sotto controllo, ad eccezione dei trend evidenziati, che si notano soprattutto dal grafico in figura 15.

Il confronto finale tra le carte CuSum degli ultimi 3 modelli (figura 16) mostra che, in generale, l'andamento dell'impianto è influenzato soprattutto dal comportamento del K4. Per il periodo che va da metà aprile a metà giugno, invece, la carta CuSum del modello totale è determinata dal cambiamento di performance dei booster.

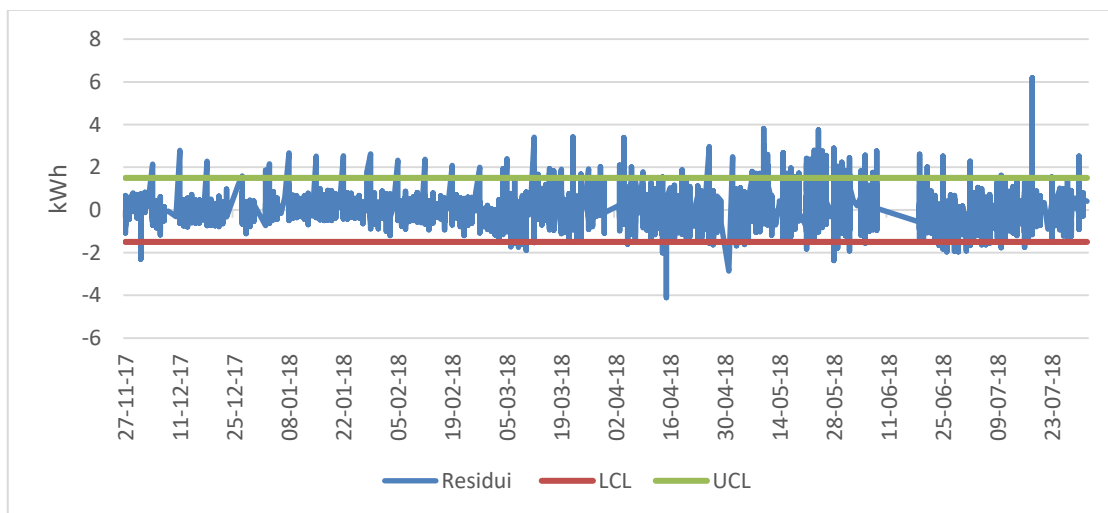


Figura 14 – Carta degli scostamenti del modello consumi-portata relativi ai boosters

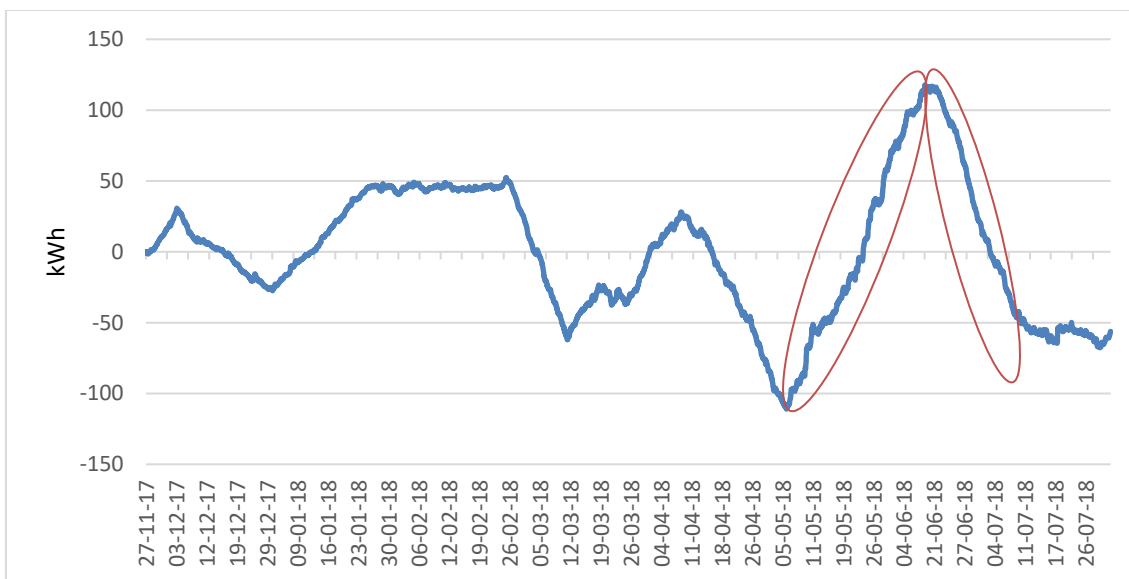


Figura 15 – CuSum del modello consumi-portata per i boosters, cerchiati i trend fuori controllo

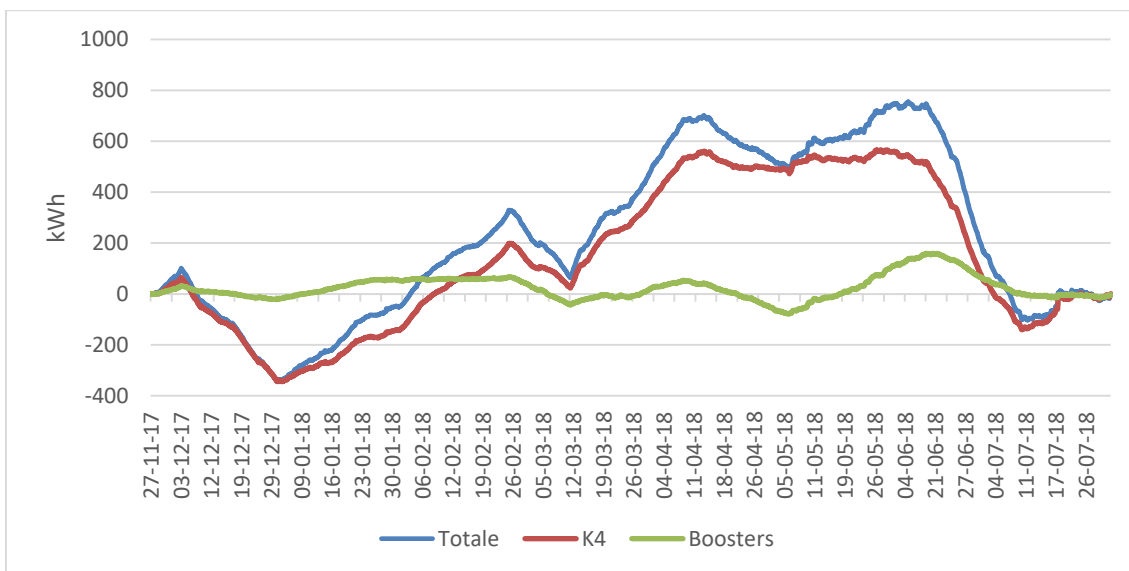


Figura 16 – Confronto tra le carte CuSum dei 3 modelli: in blu la curva del modello consumi-portata-temperatura per tutto il sistema alta pressione, in rosso la curva del modello consumi-portata-temperatura relativo al K4, in verde la curva del modello consumi-portata per i boosters.

Le variazioni di performance indicate potrebbero essere indagate per individuarne le cause ed eliminarle, o comunque essere utilizzate per riconoscere successivi malfunzionamenti con condizioni analoghe.

Dall’osservazione dei dati a disposizione, i cambiamenti nel comportamento delle macchine non sembrano dovuti né alla fluttuazione della pressione in uscita, né alle variazioni nella logica di accensione e spegnimento, e neppure alle modifiche per quanto riguarda i compressori in funzione. Le cause andrebbero allora ricercate in eventuali interventi di manutenzione, come ad esempio la pulizia dei filtri, che tendono ad ostruirsi a causa della presenza di polline nell’aria, oppure interventi sui separatori di condensa. L’azienda dovrebbe, quindi, tenere traccia di tutte le operazioni che vengono effettuate sull’impianto, in modo da rendere l’analisi dei dati e la ricerca delle cause di comportamenti anomali più facile, anche in previsione della possibilità di impostare il monitoraggio in tempo reale.

4.3 Modelli della linea media pressione

Per la creazione dei modelli della linea di alta pressione sono stati presi in considerazione i dati che vanno dal 18/07/2017 fino al 04/08/2018. Il sistema di misurazione mette a disposizione le seguenti variabili:

- Consumi del compressore K1 in kWh;
- Consumi del compressore K2 in kWh;
- Consumi del compressore K3 in kWh;
- Consumi del compressore K5 in kWh;
- Totale consumi in kWh;
- Portata dell'aria di bassa pressione in Nm³;
- Portata dell'aria di media pressione in Nm³;
- Totale portata in Nm³;
- Pressione dell'aria a 3 bar;
- Pressione dell'aria a 8 bar;
- Temperatura esterna in °C;
- Umidità esterna in %.

La frequenza di acquisizione dei dati è ancora una volta oraria. Anche per questo caso è stata necessaria una fase di pulizia dei dati. I risultati hanno mostrato un numero di anomalie molto inferiori rispetto alle misurazioni del sistema alta pressione. In questo caso non erano presenti intervalli temporali con misurazioni non sincrone di consumi e portata, come invece accade per la linea di alta pressione. Gli intervalli di dati eliminati sono:

- dal 15/11/2017 alle 22:00 al 23/11/2017 alle 21:00 poiché mancanti dei dati relativi alla portata di media pressione e ambientali;
- alcuni picchi di consumo non giustificati né da picchi di portata, né da aumenti di pressione e che, quindi, sono imputabili a semplici anomalie di misura.

La matrice di tabella 9 mostra un'ottima correlazione tra il totale dei consumi e la portata complessiva elaborata.

Tabella 9 – Matrice di correlazione tra totale dei consumi, totale della portata e variabili ambientali

	<i>Totale consumi [kWh]</i>	<i>Totale portata [Nmc]</i>	<i>Temperatura est [°C]</i>	<i>Umidità est</i>
Totale consumi [kWh]	1			
Totale portata [Nmc]	0,980714577	1		
Temperatura est [°C]	-0,093519385	-0,176883262	1	
Umidità est	0,031134367	0,086418883	-0,519943388	1

Per questo modello non sono state possibili ulteriori suddivisioni, ad esempio andando a considerare i singoli compressori, poiché le misure di portata riguardano solo i due flussi d'aria a valle della produzione e non si può, quindi, risalire alla portata elaborata nello specifico da ciascuna macchina. Dal momento che i dati di portata a disposizione sono espressi in Nm³, le due portate possono essere sommate tra loro andando a costituire la portata totale prodotta dall'insieme dei compressori.

Per questi motivi sono stati creati due modelli: uno correlando consumi totale e portata totale e uno aggiungendo agli energy driver anche la temperatura.

4.3.1 Modello consumi-portata

In analogia con tutti gli altri modelli elaborati, la prima analisi ad essere stata condotta è la verifica della significatività dei dati attraverso il p-value, che, come riportato nella tabella 10 risulta ancora una volta accettabile.

Tabella 10 – P-value relativi alla retta di regressione considerata

	Valore di significatività
Intercetta	3.54E-17
Portata aria AP [Nmc]	0

La verifica della significatività ha permesso di procedere con l’analisi di correlazione tra i consumi e la portata e di seguito sono rappresentati tutti i grafici di questo modello. Partendo con l’esame del primo, in figura 17, si nota come il modello non riesca a prevedere sempre al meglio i consumi. Il grafico mostra come nella parte sinistra (dati registrati fino al 01/10/2017) e nella parte finale (dal 15/03/2018) il modello sottostimi i consumi.

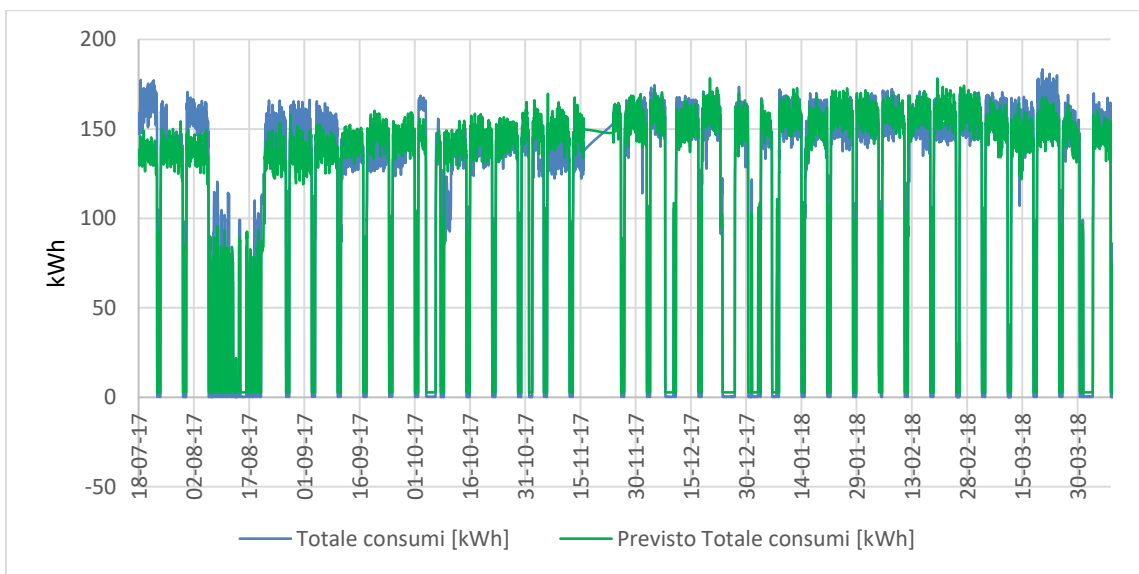


Figura 17 – Confronto tra i consumi reali dell’impianto e quelli previsti dal modello elaborato

Gli intervalli di sovrastima e sottostima coincidono, inoltre, con i segnali fuori controllo cerchiati in rosso nella carta degli scostamenti di figura 18, che, confrontati con l’andamento temporale dei consumi, risultano cadere in corrispondenza delle settimane in cui il compressore dotato di inverter non modula come dovrebbe. Questi risultati rappresentano un’ulteriore conferma del fatto che andrebbe rivista la logica di regolazione della centralina a cui sono collegate le macchine.

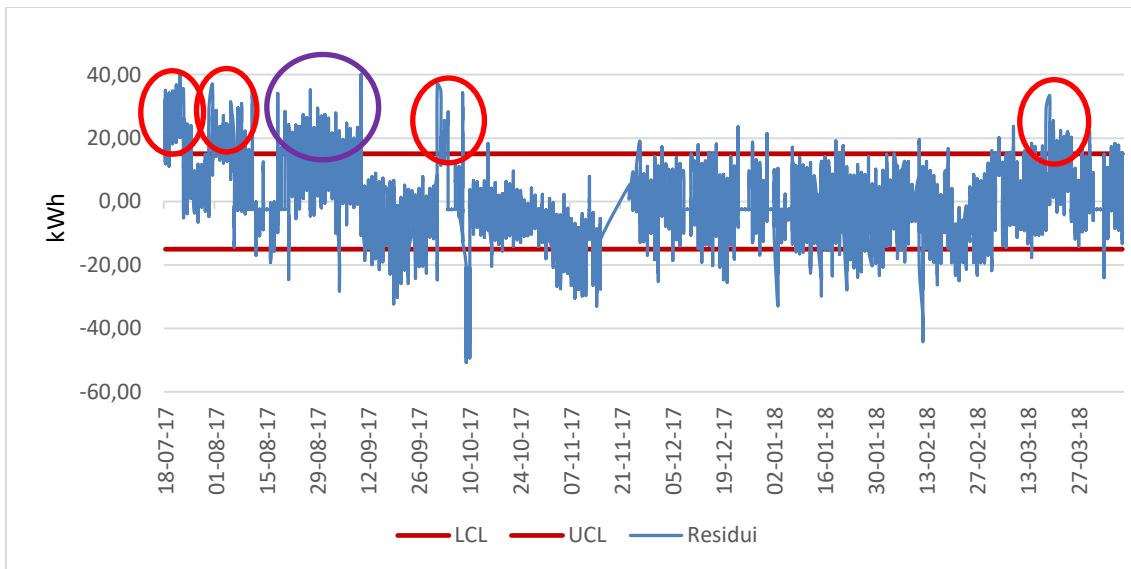


Figura 18 – Carta degli scostamenti del modello consumi totali-portata

Dall'analisi della carta degli scostamenti illustrata in figura 18 si può notare la presenza di diversi trend che, confrontati con l'andamento nel tempo dei consumi delle 4 macchine, risultano dipendere dal set di compressori in funzione al momento. Il periodo di fuori controllo cerchiato in viola in figura 18, ad esempio, corrisponde ad un intervallo di elevata attività del compressore K1, seguito poi da un trend di fuori controllo negativo, in cui lo stesso compressore ha funzionato con un consumo più basso, indicando, quindi, un'anomalia di servizio di questa macchina. Nel periodo subito successivo infatti, nonostante i consumi totali abbiano mantenuto lo stesso andamento, il K1 è stato tenuto fermo, fino al successivo fuori controllo negativo, in cui ha ripreso a funzionare, con un'efficienza evidentemente migliore.

La CuSum, in figura 19, conferma questi stessi andamenti, registrando somme cumulate positive nei periodi di inefficiente modulazione da parte dell'inverter e tornando a diminuire nei momenti in cui l'inverter riesce a regolare la portata in maniera migliore. Le carte sembrano stabilizzarsi nell'ultima parte del periodo totale preso in esame, assumendo un andamento pressoché costante vicino lo zero.

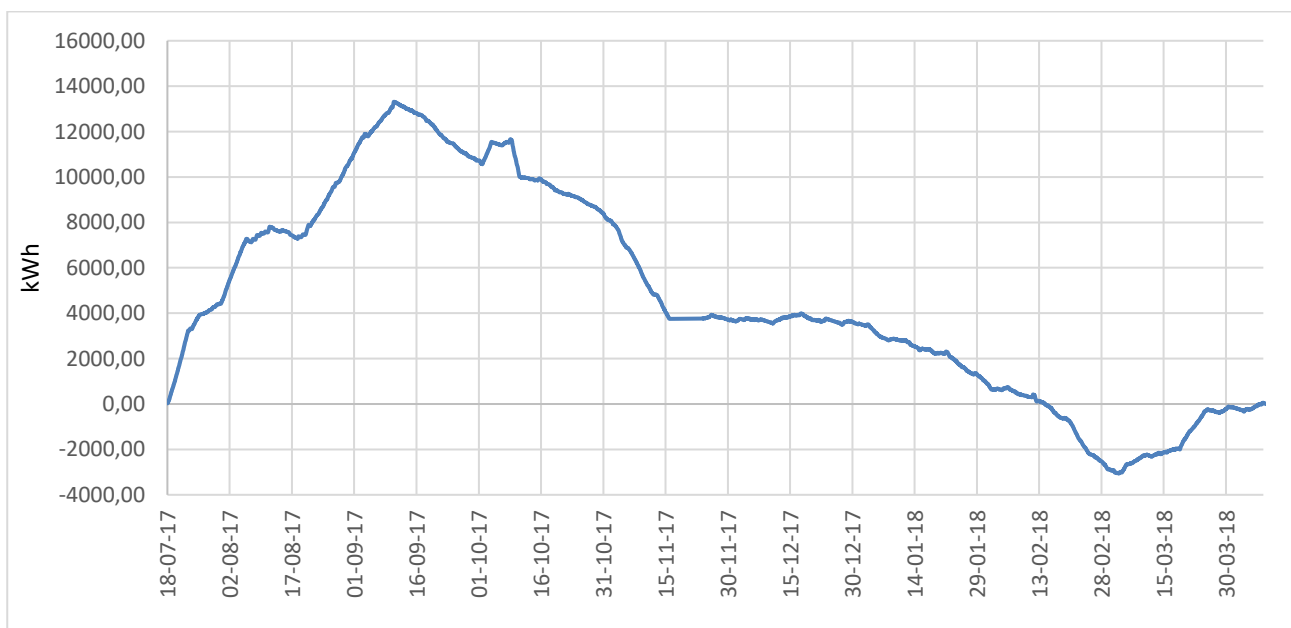


Figura 19 – Carta CuSum del modello consumi totali-portata

4.3.2 Modello consumi-portata-temperatura

Aggiungendo anche in questo caso la temperatura tra gli energy driver dell’analisi di regressione si ottengono gli stessi trend analizzati nel caso precedente

Tabella 11 – P-value della retta di regressione considerata.

	Valore di significatività
Intercetta	3.54E-17
Portata aria AP [Nmc]	0
Temperatura est [°C]	2.892E-256

La metodologia di analisi ricalca la stessa per tutte quelle effettuate in precedenza. Dal confronto dei due modelli attraverso la CuSum è risultato che la linea definita del modello che include anche la temperatura risulta spostata verso il basso rispetto a quella che ne è priva (figura 20). Questo effetto indica che i consumi hanno effettivamente una I modello con forte dipendenza dalla temperatura, che quindi giustifica gli aumenti che erano stati riscontrati nel modello con solo la portata.

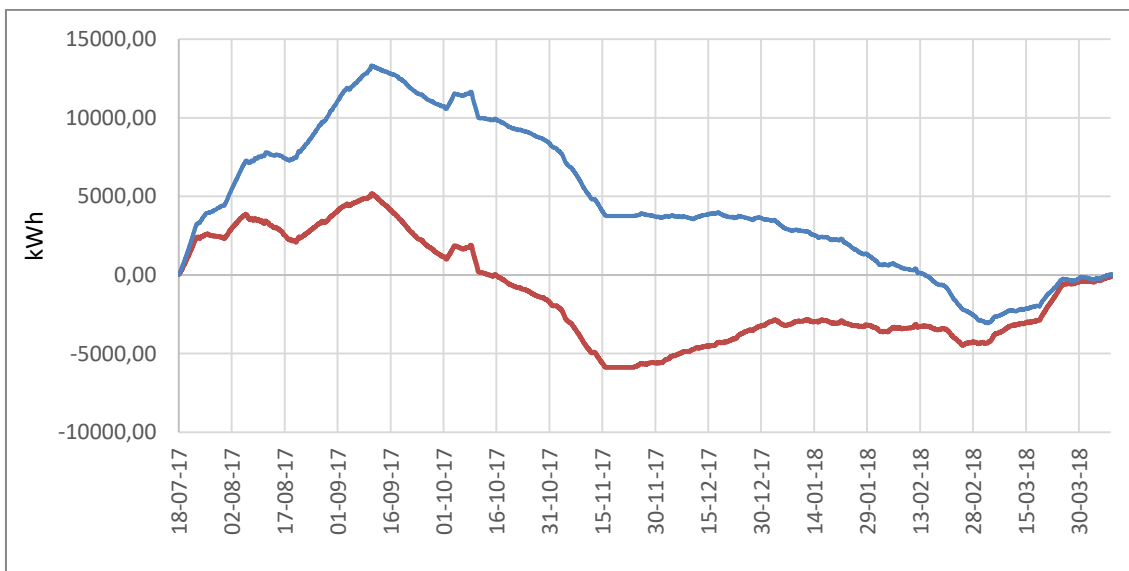


Figura 20 – Confronto tra le carte CuSum dei due modelli: in blu quella del modello che ha come energy driver solo la portata e in arancione quella del modello che include anche la temperatura

4.4 Monitoraggio in tempo reale della linea alta pressione

Le analisi mostrate fino a questo punto hanno consentito di indicare gli energy drivers dei processi e comprendere quali fossero state le anomalie nel tempo.

L’obiettivo finale è quello di impostare un monitoraggio in tempo reale in grado di prevedere ed eliminare potenziali fonti di perdita di efficienza energetica. Per sviluppare un modello di questo tipo è stato usato un software commerciale tipico delle applicazioni industriali. Quest’ultimo ha permesso di implementare dei modelli matematici partendo da un range temporale più piccolo in grado, quindi, di rappresentare le baseline di riferimento con cui confrontare i successivi consumi misurati. Il periodo scelto per la creazione del modello va dal 20 Agosto, giorno di riapertura dello stabilimento, dopo la manutenzione estiva, fino al 30 Settembre.

Per la linea ad alta pressione è stato utilizzato il modello matematico che correla portata e temperatura esterna ai consumi totali dei tre compressori, non sono stati quindi considerati i compressori singoli.

La carta CuSum prodotta (figura 21) mostra che il comportamento durante le prime 4 settimane è pressoché costante mentre durante la quinta settimana le performance sono cambiate drasticamente. La variazione, facilmente visibile nella carta CuSum, è indicata dalla variazione di pendenza della curva. La variazione registrata non raggiunge valori allarmanti, in quanto durante la quinta settimana i consumi sono aumentati del 4,2% rispetto al consumo previsto, che corrisponde economicamente a circa 100 € di spesa per l'energia in più. In ogni caso il cambiamento visibile è un'indicazione forte della necessità di un'indagine approfondita sulle cause del peggioramento delle prestazioni.

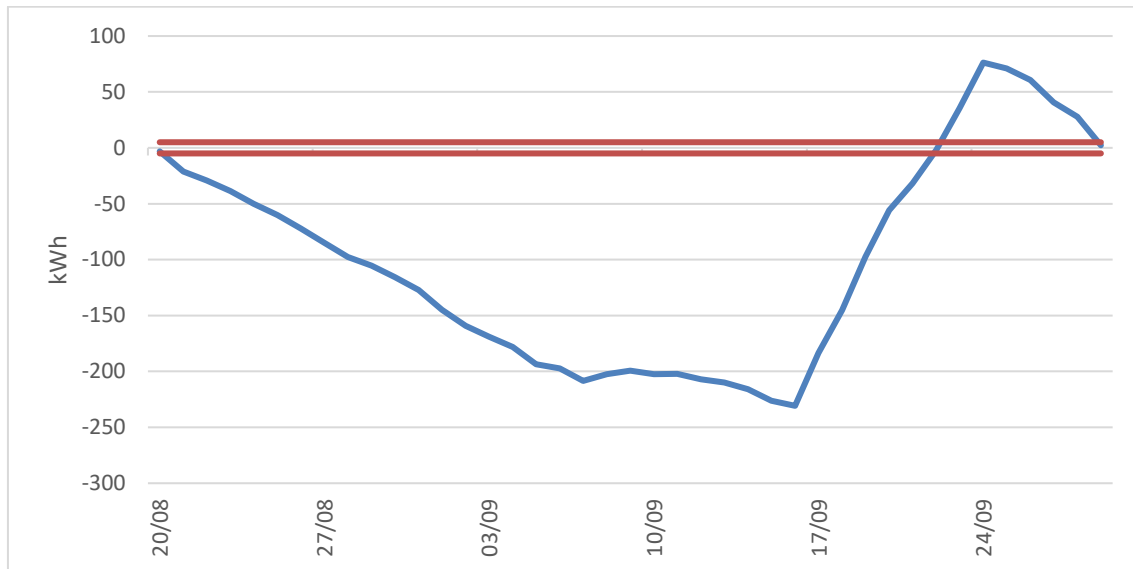


Figura 21 – Carta CuSum del modello della linea AP consumi-portata-temperatura con limiti di controllo

Considerando i risultati ottenuti si è proposto all'azienda di impostare il monitoraggio in tempo reale partendo dalla baseline definita in questa fase.

Il periodo mostrato è stato quindi preso come modello di riferimento per l'attivazione di un sistema di monitoraggio in tempo reale che permetta di cogliere i cambiamenti nelle performance in breve tempo e dia la possibilità di individuarne tempestivamente le cause. Le successive analisi potranno essere effettuate attraverso l'utilizzo delle carte CuSum.

Dal monitoraggio della prima settimana di ottobre è stato possibile estrapolare la carta CuSum in figura 22. Il grafico mostra che, durante la settimana presa in considerazione, i consumi si mantengono inizialmente sotto controllo, finché la curva non inizia a scendere. Per questa settimana la pendenza della curva non è da considerarsi anomala, ma se nelle prossime settimane dovesse continuare con lo stesso andamento, si dovrebbe indagare la causa della riduzione dei consumi, renderli stabili e costruire un nuovo modello di riferimento. È possibile inoltre separare nuovamente i modelli per il compressore K4 e i due booster, per capire se il cambiamento è dovuto nello specifico ad una delle macchine, o è attribuibile al sistema in generale.

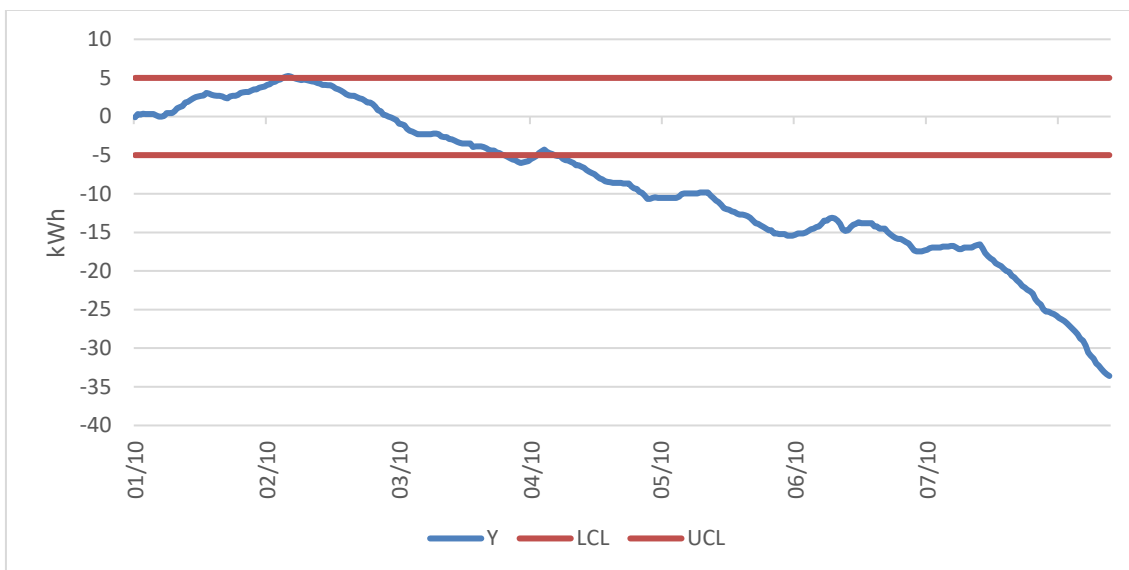


Figura 22 – Carta CuSum riferita al modello precedentemente creato, dal 1 al 7 ottobre 2018 con limiti di controllo

4.5 Monitoraggio in tempo reale della linea media e bassa pressione

Per il monitoraggio della linea a media e bassa pressione è stato utilizzato un periodo di riferimento differente rispetto a quello adottato per la linea alta pressione.

L’intervallo di riferimento, che va dal 20/08/2018 al 30/09/2018, comprende periodi di funzionamento considerato buono con altri in cui la gestione della sequenza di accensione non era ottimale (figura 28). Questa scelta è dovuta alla necessità di simulare il sistema nel suo funzionamento reale e non in quello ideale. Sarebbe inutile, dunque, prendere come baseline di riferimento solamente la settimana ideale, perché questo tipo di funzionamento capita molto raramente e, quindi, non sarebbe rappresentativo del normale andamento dei consumi dei compressori. La soluzione migliore è quella di lasciare come modello di confronto questo elaborato nelle sei settimane, in cui sono capitati sia il caso peggiore, nella seconda settimana, in cui il K5 è spento, sia il caso ottimale nella quarta.

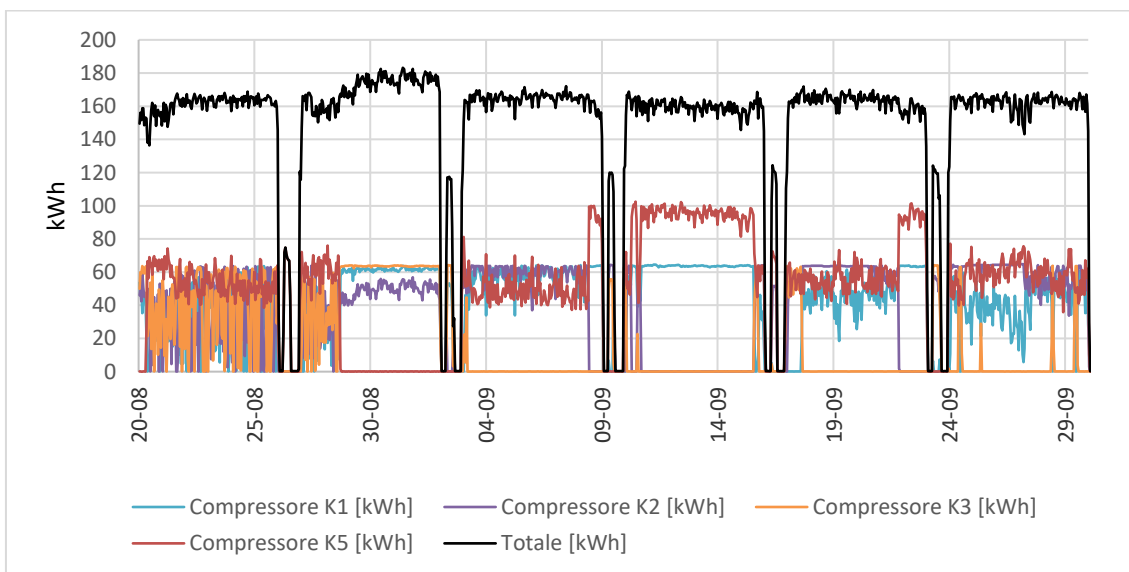


Figura 23 – Consumi orari delle 4 macchine della linea di media e bassa pressione, nel periodo che va da 20 agosto al 30 settembre.

Il monitoraggio periodico dovrà prevedere il confronto tra due report, uno che riporta l'andamento dei consumi nel tempo e l'altro riporta la carta CuSum elaborata con i dati dell'intervallo considerato, in rapporto alla baseline di riferimento. Un eventuale aumento della somma cumulata, potrà quindi essere riportata al tipo di regolazione effettuata nella settimana esaminata, oppure a possibili malfunzionamenti da eliminare; viceversa la diminuzione della carta CuSum può essere dovuta ad una migliore modulazione, oppure ad un intervento migliorativo dell'impianto.

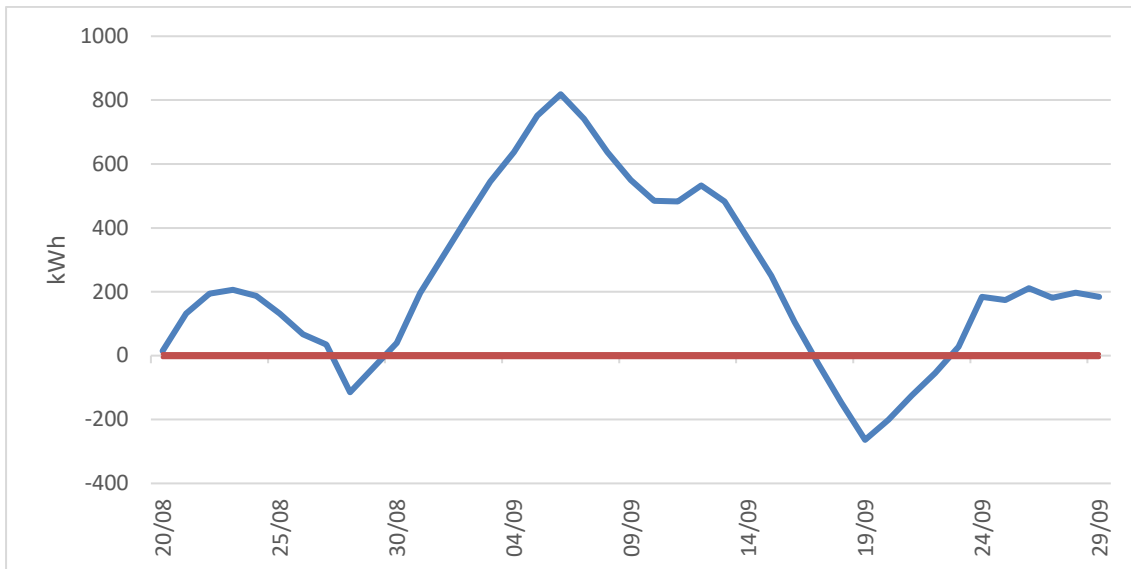


Figura 24 – Carta CuSum del modello della linea MP consumi-portata-temperatura con limiti di controllo

Dall'osservazione della carta CuSum sul periodo preso come baseline (figura 24) è possibile, inoltre, osservare che nella settimana peggiore, la curva passa da un valore di circa -250 kWh a un valore di 800 kWh, che significa che il consumo aggiuntivo dovuto ad una cattiva regolazione è di circa 1050 kWh. Questo valore può essere, quindi, considerato come valore di soglia dell'aumento della carta CuSum in una settimana, oltre il quale si deve ricercare una possibile ulteriore causa di malfunzionamento del sistema.

Di seguito è riportato un esempio di sperimentazione del monitoraggio della linea di media e bassa pressione, anche in questo caso fatto sulla prima settimana di ottobre.

Il primo report in figura 25 rappresenta l'andamento orario dei consumi dei quattro compressori che compongono la linea di MP, dal 1 al 7 ottobre 2018. Dal grafico nota come la regolazione, nel primo periodo, abbia un comportamento analogo a quello avuto nella parte finale della sesta settimana del modello precedentemente creato, in cui modulano, oltre al K5, anche il K1 e il K2, e che ha determinato una carta CuSum con pendenza negativa nella figura 26.

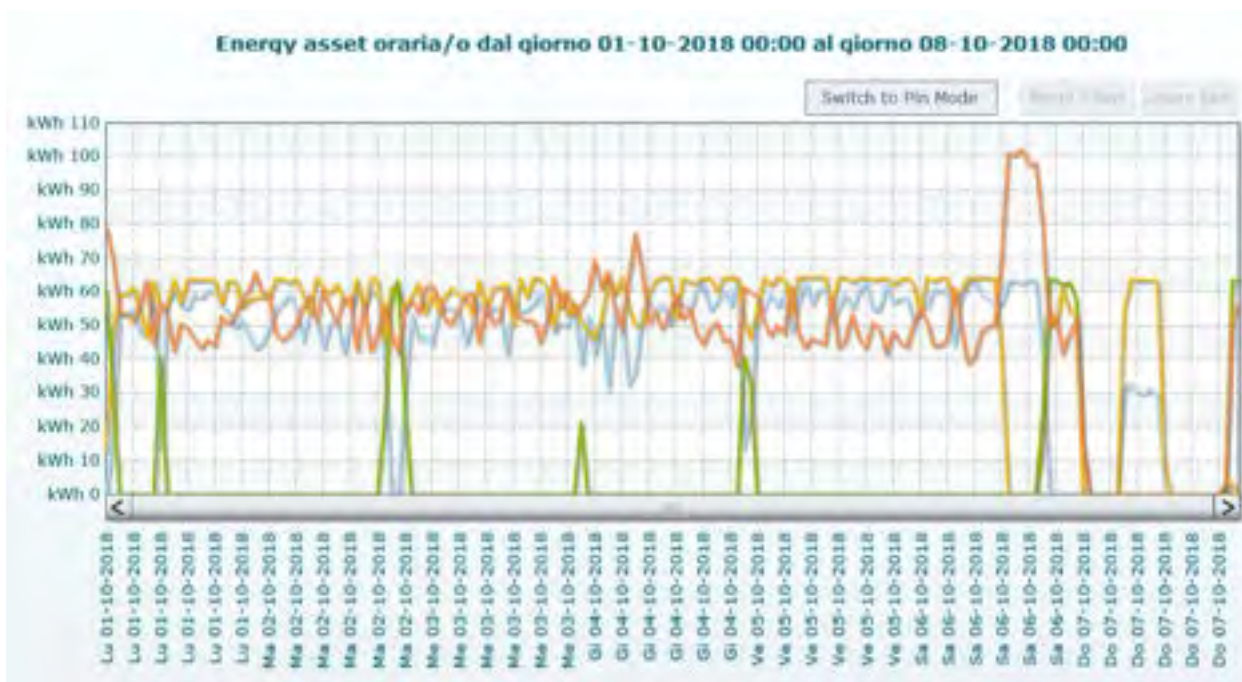


Figura 25 – Consumi orari dei quattro compressori della linea MP dal 1 al 7 ottobre 2018. in azzurro i consumi di K1, in giallo i consumi di K2, in verde i consumi di K3 e in arancione i consumi di K5

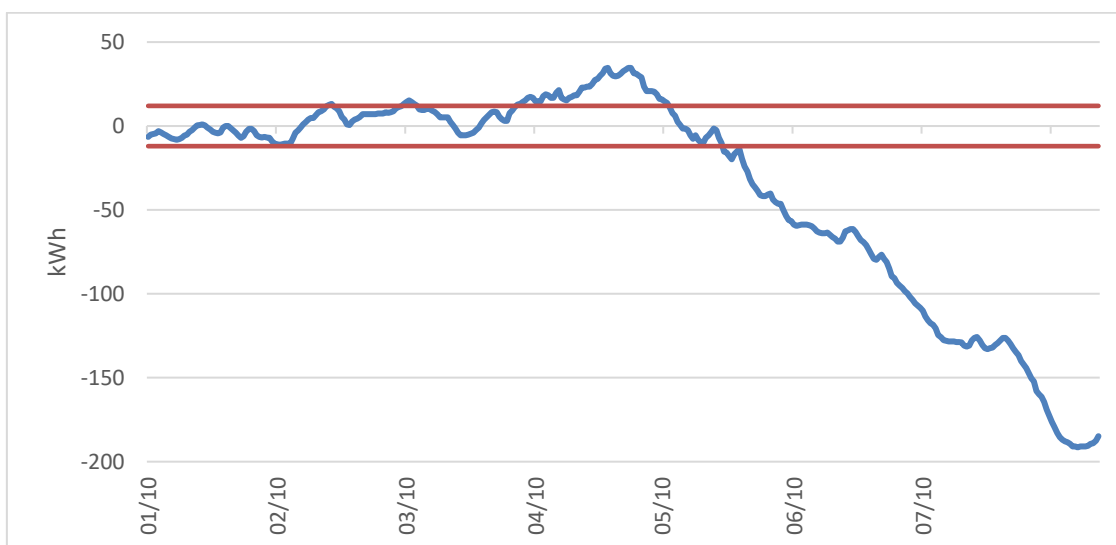


Figura 26 – Carta CuSum riferita al modello precedentemente creato, dal 1 al 7 ottobre 2018 con limiti di controllo

La carta CuSum, infatti, fino al 4 ottobre mostra che il sistema è sotto controllo, oscillando intorno allo zero. Dal 5 ottobre, invece, c'è un cambiamento nel modo di modulare, che rende i consumi del K2 più stabili, con accensioni e spegnimenti minori, fino ad arrivare al 6 ottobre, in cui per un breve intervallo, si è verificata la regolazione ottimale. La carta CuSum, quindi, tende a diminuire fino a stabilizzarsi ad un valore di circa -200 kWh.

Tra i due report, perciò, si trova una corrispondenza come quella avuta in fase di creazione del modello e si può concludere che, nella settimana considerata, i consumi sono sotto controllo.

4.6 Analisi dei risultati e proposte di miglioramento

L'analisi dei dati a disposizione e l'implementazione dei vari modelli per il monitoraggio ha permesso di

implementare un sistema stabile per il controllo sistematico dei consumi nel tempo. Il sistema di monitoraggio permette di comprendere come l'energia venga impiegata e consente di caratterizzare economicamente tutti cambiamenti che si registrano nelle performance dell'impianto.

La fase di studio dei dati storici e analisi dei modelli ha consentito, come già accennato, di identificare le grandezze che influenzano maggiormente i consumi e come siano correlate ad essi. I modelli sviluppati ne prevedono l'andamento nel tempo e le carte di controllo permettono la valutazione degli scostamenti tra i valori reali e quelli previsti dalla baseline. Dal momento che sono stati utilizzati dati orari, le carte elaborate risultano essere molto sensibili e registrano come fuori controllo anche variazioni di pochi kWh. In ogni caso lo scopo di questa fase non era quello di valutare ed indagare i vari fuori controllo e variazioni di comportamento riscontrate, che sarebbe comunque risultato difficile a distanza di tempo, ma quello di valutare la funzionalità delle carte.

L'analisi ha permesso di stabilire le variabili con cui correlare i consumi per le due linee di pressione, infine è stato impostato un sistema per il controllo sistematico. Per questa fase è stato scelto un periodo di tempo più breve e più recente, in cui si era certi che tutti i vari contatori stessero misurando correttamente, ed è stato costruito un modello di riferimento con cui confrontare periodicamente i consumi reali. Dalla sperimentazione fatta sulla prima settimana di ottobre il sistema funziona correttamente e consente di tenere sotto controllo le performance dell'impianto ed indagare tempestivamente le cause di eventuali anomalie.

Alla luce dei risultati ottenuti e considerando le difficoltà incontrate nell'impostazione del sistema di monitoraggio dell'impianto, alcune azioni possono essere proposte all'azienda con l'obiettivo di migliorare il monitoraggio:

- Controllare il funzionamento continuo e privo di errori di tutti i misuratori installati.
- Compilare un registro degli interventi che vengono effettuati sull'impianto, anche se la manutenzione è affidata ad una ditta esterna, per facilitare la ricerca delle cause dei miglioramenti o peggioramenti delle performance dell'impianto.
- Valutare la possibilità di effettuare il controllo attraverso carte elaborate sulla base di dati giornalieri o settimanali. Come si è visto, le carte di controllo, utilizzando dati campionati con frequenza oraria, risultano essere molto sensibili e spesso rischiano di segnalare come fuori controllo anche piccole oscillazioni nei consumi dovute al naturale utilizzo dei sistemi. Utilizzare carte con dati acquisiti con frequenza minore potrebbe rendere più significativi i segnali di fuori controllo ed inoltre renderebbe più semplice la pulizia iniziale dei dati, eliminando ad esempio le anomalie registrate nelle fasi di accensione.
- Elaborare ogni settimana, eventualmente con una procedura automatizzata, i report sui consumi dell'ultimo periodo. In questo senso l'azienda potrebbe pensare di stabilire un ruolo specifico per il controllo settimanale o mensile dei consumi, che abbia la responsabilità di analizzare le performance dell'impianto, individuarne i cambiamenti in modo rapido e che abbia l'autorità di intervenire in caso di malfunzionamenti.
- Stabilire dei valori di allarme per i consumi, oltre i quali il software in automatico mandi degli alert alle persone coinvolte. In base alla scelta della frequenza di acquisizione dei dati, i valori di allarme avranno chiaramente ordini di grandezza diversi. Questo meccanismo potrebbe rendere le analisi delle carte meno frequenti, pur continuando ad avere il controllo dei consumi.

5 Conclusioni

Il presente report raccoglie e riassume i risultati dell'attività di ricerca svolta nel trimestre Ottobre-Dicembre 2018 in 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 Tuscia.

Nel lavoro di ricerca è stata sviluppata una metodologia di controllo e monitoraggio dei consumi energetici nella produzione e nel trasporto dell'aria compressa ad uso industriale. La procedura può essere facilmente estesa a tutti i sistemi per la produzione di aria compressa con l'obiettivo di ridurre i consumi e migliorarne il funzionamento.

La metodologia, che parte dall'analisi dei dati a disposizione, arriva all'implementazione di un sistema di controllo delle prestazioni in tempo reale all'interno di un'azienda scelta come case study. I risultati dell'applicazione del modello hanno dimostrato il buon funzionamento della procedura e hanno illustrato la presenza di margini di miglioramento per l'azienda in questione. Gli strumenti di analisi, carte degli scostamenti e carte CuSum, si sono dimostrati fondamentali per l'identificazione dei malfunzionamenti e per la caratterizzazione degli stessi.

Il metodo sviluppato può essere ulteriormente migliorato, ampliando l'orizzonte dei modelli matematici utilizzabili e consentendone l'applicazione per il monitoraggio di altri sistemi.

6 Riferimenti bibliografici

- [1] V. Cesarotti, S. D. Orazi, and V. Introna, "Improve Energy Efficiency in Manufacturing Plants through Consumption Forecasting and Real Time Control : Case Study from Pharmaceutical Sector," in *International Conference on Advances in Production Management Systems (APMS 2010)*, ISBN 9788864930077, 11e13 October 2010, Cernobbio, Como, Italy., 2010.
- [2] European Commission, "Reference document on best available techniques for energy efficiency," no. February, pp. 1–430, 2009.
- [3] 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. 00, pp. 1–6, 2016.
- [4] UNI CEI EN ISO 50006:2014, "Energy management systems - Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) - General principles and guidance." .
- [5] UNI CEI EN ISO 50001:2011, "Sistemi di gestione dell'energia - Requisiti e linee guida per l'uso." .
- [6] S. Salvatori, M. Benedetti, F. Bonfà, V. Introna, and S. Ubertini, "Inter-sectorial benchmarking of compressed air generation energy performance: Methodology based on real data gathering in large and energy-intensive industrial firms," *Appl. Energy*, vol. 217, 2018.
- [7] A. B. Nutt, R. C. Lenz, H. W. Lanford, and M. J. Cleary, "Data sources for trend extrapolation in technological forecasting," *Long Range Plann.*, vol. 9, no. 1, pp. 72–76, 1976.
- [8] C. M. Lee and C. N. Ko, "Short-term load forecasting using lifting scheme and ARIMA models," *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 5, pp. 5902–5911, 2011.
- [9] F. Wahid, R. Ghazali, M. Fayaz, and A. S. Shah, "Statistical Features Based Approach (SFBA) for Hourly Energy Consumption Prediction Using Neural Network," *Int. J. Inf. Technol. Comput. Sci.*, vol. 9, no. 5, pp. 23–30, 2017.
- [10] H. T. Pao, "Forecasting energy consumption in Taiwan using hybrid nonlinear models," *Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 1438–1446, 2009.
- [11] S. Gonzales Chavez, J. Xiberta Bernat, and H. Llaneza Coalla, "Forecasting of energy production and consumption in Asturias (northern Spain)," *Energy*, vol. 24, no. 3, pp. 183–198, 1999.
- [12] P. Sen, M. Roy, and P. Pal, "Application of ARIMA for forecasting energy consumption and GHG emission: A case study of an Indian pig iron manufacturing organization," *Energy*, vol. 116, pp. 1031–1038, 2016.
- [13] C. Kuster, Y. Rezgui, and M. Mourshed, "Electrical load forecasting models: A critical systematic review," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 35, no. July, pp. 257–270, 2017.
- [14] J. Han, J. Pei, and M. Kamber, *Data mining: concepts and techniques*. Elsevier., 2011.
- [15] 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.
- [16] R. Palacin and P. Batty, "Optimal energy management of urban rail systems : Key performance indicators," vol. 90, pp. 282–291, 2015.
- [17] F. Bonfà, S. Salvatori, M. Benedetti, V. Introna, and S. Ubertini, "Monitoring compressed air systems energy performance in industrial production: Lesson learned from an explorative study in large and

- energy-intensive industrial firms.," in *Energy Procedia*, 2017, vol. 143.
- [18] W. Chung, "Review of building energy-use performance benchmarking methodologies," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 5, pp. 1470–1479, 2011.
- [19] E. O'Driscoll, D. P. Cusack, and G. E. O'Donnell, "The development of energy performance indicators within a complex manufacturing facility," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 68, no. 9–12, pp. 2205–2214, 2013.
- [20] P. Radgen and E. Blaustein, *Compressed Air Systems in the European Union*. 2001.
- [21] Z. K. Morvay and D. D. Gvozdenac, *Applied Industrial Energy and Environmental Management*. 2008.
- [22] M. Benedetti, V. Introna, A. Facci, and S. Ubertini, "Efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa: metodologia di benchmarking delle prestazioni e strumento di supporto alle decisioni per l'efficientamento energetico. Report Ricerca di Sistema Elettrico 2015."
- [23] Carbon Trust, "Monitoring and targeting - Techniques to help organisations control and manage their energy use," 2012.
- [24] Carbon Trust, "Metering - Introducing the techniques and technology for energy data management," 2012.
- [25] F. Beretta, F. De Carlo, V. Introna, and D. Saccardi, *Progettare e gestire l'efficienza energetica*. .
- [26] S. Eherson, "The f statistic and comparable measures in linear free-energy relationship fittings," *J. Org. Chem.*, vol. 44, pp. 1793–1797, 1979.
- [27] G. . Kuder and M. W. Richardson, "The theory of the estimation of test reliability," *Psychometria*, vol. 2, no. 3, pp. 151–160, 1937.
- [28] M. Benedetti, V. Introna, A. Facci, and S. Ubertini, "Efficienza energetica dei Sistemi Aria Compressa: metodologia di benchmarking delle prestazioni e strumento di supporto alle decisioni per l'efficientamento energetico," 2016.

7 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;
- Andrea Facci, ricercatore di macchine e sistemi per l'energia e l'ambiente;
- Simone Salvatori, dottorando del gruppo di impianti meccanici.