



Ricerca di Sistema elettrico

Applicazione della metodologia per il controllo dei consumi dell'impianto aria compressa ad una realtà industriale

F. Bonfà, I. Bertini, A. Salama

APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA PER IL CONTROLLO DEI CONSUMI DELL'IMPIANTO ARIA COMPRESSA AD
UNA REALTA' INDUSTRIALE

F. Bonfà, I. Bertini, A. Salama (ENEA)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

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

Progetto: "Processi e macchinari industriali"

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

Responsabile del Progetto: Ing. Ilaria Bertini, ENEA

Responsabile scientifico attività dell'obiettivo: ing. Francesca Bonfà



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 METODOLOGIA DI CONTROLLO DEI CONSUMI.....	6
2.1 RACCOLTA DATI.....	6
2.2 SCELTA DELLE VARIABILI RILEVANTI.....	8
2.3 COSTRUZIONE DEL MODELLO MATEMATICO DEL CONSUMO ENERGETICO (BASELINE).....	10
2.4 COSTRUZIONE DELLE CARTE DI CONTROLLO PER LA VALIDAZIONE DEL MODELLO.....	10
2.5 COSTRUZIONE DELLE CARTE DI CONTROLLO PER IL CONTROLLO NEL TEMPO.....	11
3 DESCRIZIONE E STATO ENERGETICO DEL SISTEMA ARIA COMPRESSA NEL CASO IN ESAME.....	12
3.1 DATI DISPONIBILI E PRIMA ELABORAZIONE.....	12
3.2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI PRODUZIONE DELL'ARIA COMPRESSA IN ESAME E DEL SUO STATO ENERGETICO.....	14
4 APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA DI CONTROLLO DEI CONSUMI AL CASO IN ESAME.....	17
4.1 ANALISI DEL COMPRESSORE C2.....	17
4.1.1 <i>Scelta delle variabili rilevanti</i>	17
4.1.2 <i>Costruzione del modello matematico del consumo energetico (baseline)</i>	18
4.1.3 <i>Costruzione delle carte di controllo per la validazione del modello e il controllo nel tempo</i>	19
4.2 ANALISI DEL COMPRESSORE C3.....	21
4.2.1 <i>Scelta delle variabili rilevanti</i>	22
4.2.2 <i>Costruzione del modello matematico del consumo energetico (baseline)</i>	23
4.2.3 <i>Costruzione delle carte di controllo per la validazione del modello e il controllo nel tempo</i>	24
5 CONCLUSIONI.....	24
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	25

Sommario

Il presente rapporto descrive le attività svolte dal gruppo di lavoro ENEA durante l'estensione trimestrale delle attività. Tali attività riguardano la validazione della metodologia per il controllo dei consumi dell'impianto aria compressa nel tempo e alla sua applicazione ad una realtà industriale, e costituiscono l'applicazione sperimentale degli strumenti sviluppati nell'annualità precedente. La metodologia applicata si basa sull'analisi statistica dei dati e utilizza strumenti frequentemente già in uso nelle aziende in ambito qualità (come ad esempio le carte di controllo) trasferendoli al contesto del controllo dei consumi energetici. In questo modo è possibile introdurre strumenti efficaci con una bassa resistenza da parte del personale che è coinvolto nella loro gestione e nel loro utilizzo, in quanto già familiari. La metodologia messa a punto parte quindi da tali strumenti esistenti e da altre metodologie già in uso nel mondo della gestione dell'energia, principalmente in ambito Misura & Verifica delle prestazioni, adattandole/modificandole per renderle più facilmente applicabili ai sistemi ausiliari in generale e ai sistemi aria compressa in particolare (anche sulla base di quanto precedentemente evidenziato dalle attività di progetto). La metodologia proposta si basa su una logica di "controllo" piuttosto che di "monitoraggio" dei consumi energetici. La differenza fondamentale sta nel fatto che non ci si limita ad osservare l'andamento del consumo nel tempo, ma lo si confronta in tempo reale con un riferimento (una baseline), ottenendo quindi in maniera visuale e rapida informazioni utili circa le reali performance del sistema rispetto a performance non teoriche ma reali, già verificate nel passato. Questo consente una valutazione più obiettiva ed efficace e una più realistica definizione degli obiettivi di efficienza. La metodologia applicata a due compressori d'aria di un'azienda del settore alimentare ha consentito quindi di verificare l'applicabilità ed efficacia della metodologia stessa e degli strumenti proposti, consentendo di ottenere una fotografia esaustiva del sistema in esame e della sua performance energetica, ed evidenziando come le carte di controllo siano effettivamente in grado di identificare variazioni di efficienza energetica e quindi fornire utili informazioni relative alla gestione energetica dell'impianto.

1 Introduzione

Il presente rapporto descrive le attività svolte dal gruppo di lavoro ENEA durante l'estensione trimestrale delle attività. Tali attività riguardano la validazione della metodologia per il controllo dei consumi dell'impianto aria compressa nel tempo e alla sua applicazione ad una realtà industriale, e costituiscono l'applicazione sperimentale degli strumenti sviluppati nell'annualità precedente. La possibilità di applicare quanto elaborato ad un caso di studio reale è stata ritenuta fondamentale in quanto consente di avere un feedback immediato riguardo l'efficacia degli strumenti, grazie anche alla collaborazione degli Energy Manager intervistati. Questo legame con la realtà industriale ha rappresentato una costante in tutte le attività di progetto e ha consentito di raccogliere informazioni circa le reali necessità delle aziende relative all'ottimizzazione e razionalizzazione della produzione di aria compressa, alla riduzione dei consumi e all'ottenimento di un buon livello di efficientamento, e quindi di sviluppare strumenti che rispondessero direttamente a tali necessità.

Le attività qui descritte dimostrano l'importanza di effettuare la gestione energetica mediante strumenti di controllo nel tempo in grado di cogliere i cambiamenti nel comportamento del sistema (in particolare sfruttando strumenti informatici di raccolta ed elaborazione dei dati in tempo reale sempre più studiati in ottica "Industria 4.0"), tema di grande rilevanza soprattutto negli ultimi anni (si vedano ad esempio [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]).

La metodologia applicata si basa sull'integrazione di diversi strumenti esistenti e sul loro adattamento alle specificità dell'impianto aria compressa. Gli strumenti utilizzati vanno dall'analisi statistica dei dati a strumenti avanzati di gestione della qualità del processo. Tali strumenti risultano frequentemente già in uso nelle aziende (come ad esempio le carte di controllo), ma sono ancora scarsamente applicati al controllo dei consumi energetici. In questo modo è possibile introdurre strumenti efficaci con una bassa resistenza da parte del personale che è coinvolto nella loro gestione e nel loro utilizzo, in quanto già familiari. La metodologia è stata quindi messa a punto partendo da tali strumenti esistenti e da altre metodologie già in uso nel mondo della gestione dell'energia, principalmente in ambito Misura & Verifica delle prestazioni [1, 2], e adattandole/modificandole per renderle più facilmente applicabili ai sistemi ausiliari in generale e ai sistemi aria compressa in particolare (anche sulla base di quanto precedentemente evidenziato dalle attività di progetto [8]). I passi principali della metodologia che è stata applicata al caso di studio sono riassunti in figura 1.

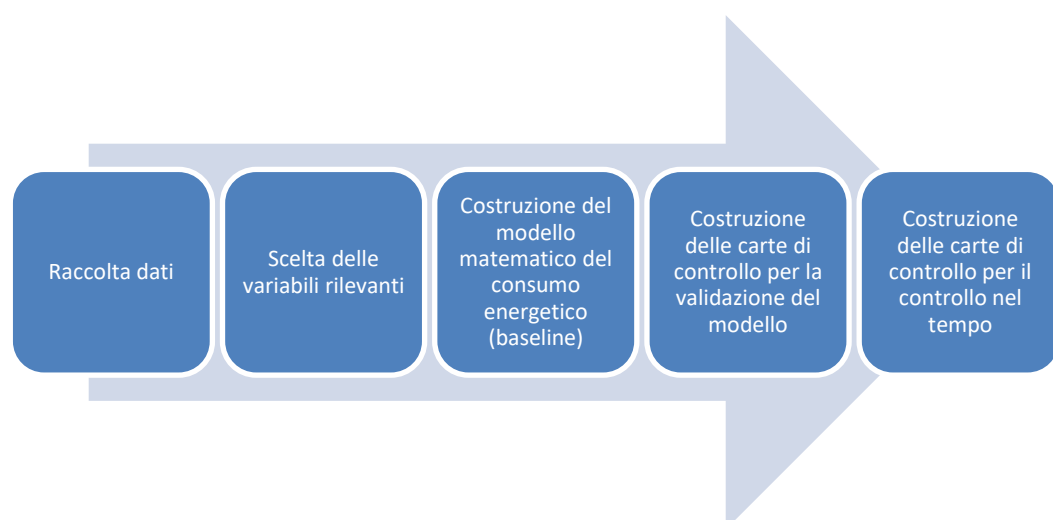


Figura 1: Sintesi dei passi principali della metodologia di controllo dei consumi sviluppata

La metodologia utilizzata si basa su una logica di "controllo" piuttosto che di "monitoraggio" dei consumi energetici. La differenza fondamentale sta nel fatto che non ci si limita ad osservare l'andamento del

consumo nel tempo, ma lo si confronta in tempo reale con un riferimento (una baseline), ottenendo quindi in maniera visuale e rapida informazioni utili circa le reali performance del sistema rispetto a performance non teoriche ma reali, già verificate nel passato. Questo consente una valutazione più obiettiva ed efficace e una più realistica definizione degli obiettivi di efficienza.

La scelta delle aziende per la sperimentazione è stata effettuata in base al consumo specifico di aria compressa e alla tipologia di impianto (pressione, tipo di distribuzione, controllo del funzionamento). In particolare, sono state individuate le aziende che utilizzano un sistema di raccolta e monitoraggio dati che consentisse un livello di dettaglio adeguato per l'analisi. Tali aziende, una appartenente al settore farmaceutico e una appartenente al settore alimentare sono state in seguito contattate per richiedere l'invio dei dati di consumo del proprio impianto aria compressa e dei relativi energy drivers (fattori che influiscono sul consumo energetico dell'impianto). Entrambe le aziende hanno inviato i dati a loro disposizione, che sono stati poi analizzati dal gruppo di lavoro per focalizzare l'ambito di analisi. La scelta è ricaduta sull'azienda del settore alimentare in quanto i dati forniti dall'azienda del settore farmaceutico, seppure relativi ad un periodo di tempo più lungo (un anno invece di una settimana), da una rapida valutazione mostravano problemi e alcune lacune e presentavano una qualità e affidabilità inferiore. Infatti, dati relativi a 187 giorni su 365 risultavano non utilizzabili principalmente a causa di guasti ai misuratori sia dell'aria compressa che dell'assorbimento elettrico dei compressori, che comportavano mancate o parziali misure e quindi presentavano un elevato impatto sull'affidabilità del sistema di controllo dei consumi.

Precisamente, la metodologia applicata a due compressori d'aria ha consentito quindi di verificare l'applicabilità ed efficacia della metodologia stessa e degli strumenti proposti, consentendo di ottenere una fotografia esaustiva del sistema in esame e della sua performance energetica, ed evidenziando come le carte di controllo siano effettivamente in grado di identificare variazioni di efficienza energetica e quindi fornire utili informazioni relative alla gestione energetica dell'impianto.

2 Metodologia di controllo dei consumi

Nel presente capitolo è descritta la metodologia elaborata per la creazione di un sistema di controllo dei consumi dell'impianto aria compressa nel tempo, basato sulla definizione di un consumo di riferimento (baseline) e la conseguente costruzione di carte di controllo utilizzate dal responsabile della gestione dell'energia o della gestione degli impianti e da rendere disponibili al personale a cui ne è affidata la gestione, al fine di individuare ed effettuare gli interventi più adatti alle esigenze aziendali e di produzione. Tale metodologia si articola in diverse fasi che verranno descritte di seguito:

- Raccolta dati;
- Scelta delle variabili rilevanti;
- Costruzione del modello matematico del consumo energetico (baseline);
- Costruzione delle carte di controllo per la validazione del modello;
- Costruzione delle carte di controllo per il controllo nel tempo.

2.1 Raccolta dati

Per costruire un sistema di controllo dei consumi il primo, fondamentale passo è quello di definire un piano di raccolta dati. All'interno del piano di raccolta dati è necessario dettagliare i dati già a disposizione, quelli da raccogliere (con relativi punti di misura all'interno dello stabilimento), il tipo di strumento di misura utilizzato/da utilizzare, la frequenza di registrazione dei dati desiderata e il periodo di osservazione.

In particolare, per quanto riguarda i sistemi aria compressa, è fondamentale comprendere se si vuole mettere sotto controllo il sistema di produzione dell'aria compressa, il sistema di utilizzo dell'aria compressa (solitamente il processo produttivo o sue sotto parti) o entrambi, e con quale livello di dettaglio. Decisioni diverse relative al grado di dettaglio con il quale si vogliono monitorare parti diverse dell'impianto

porteranno a decisioni diverse anche relativamente ai punti di misura e alle variabili da monitorare. Tali decisioni vengono generalmente prese considerando un trade-off tra costi del monitoraggio (in termini di strumenti e di risorse necessarie al mantenimento del sistema nel tempo) e benefici derivanti da tale attività (e quindi solitamente dai potenziali risparmi ottenibili e dalla taglia dell'impianto da controllare). Per maggiore chiarezza, nella figura sottostante si riporta un generico e sintetico schema di un impianto aria compressa (generazione e utilizzo) con evidenziate tutte le variabili solitamente monitorate, ovvero i principali fattori (controllabili, cioè modificabili liberamente dall'operatore, e non controllabili) potenzialmente influenti sul consumo energetico e gli input e gli output dell'impianto (riquadro a). Nella stessa figura sono anche riportate, a titolo di esempio, diverse possibilità di configurazioni per il monitoraggio (b-c-d).

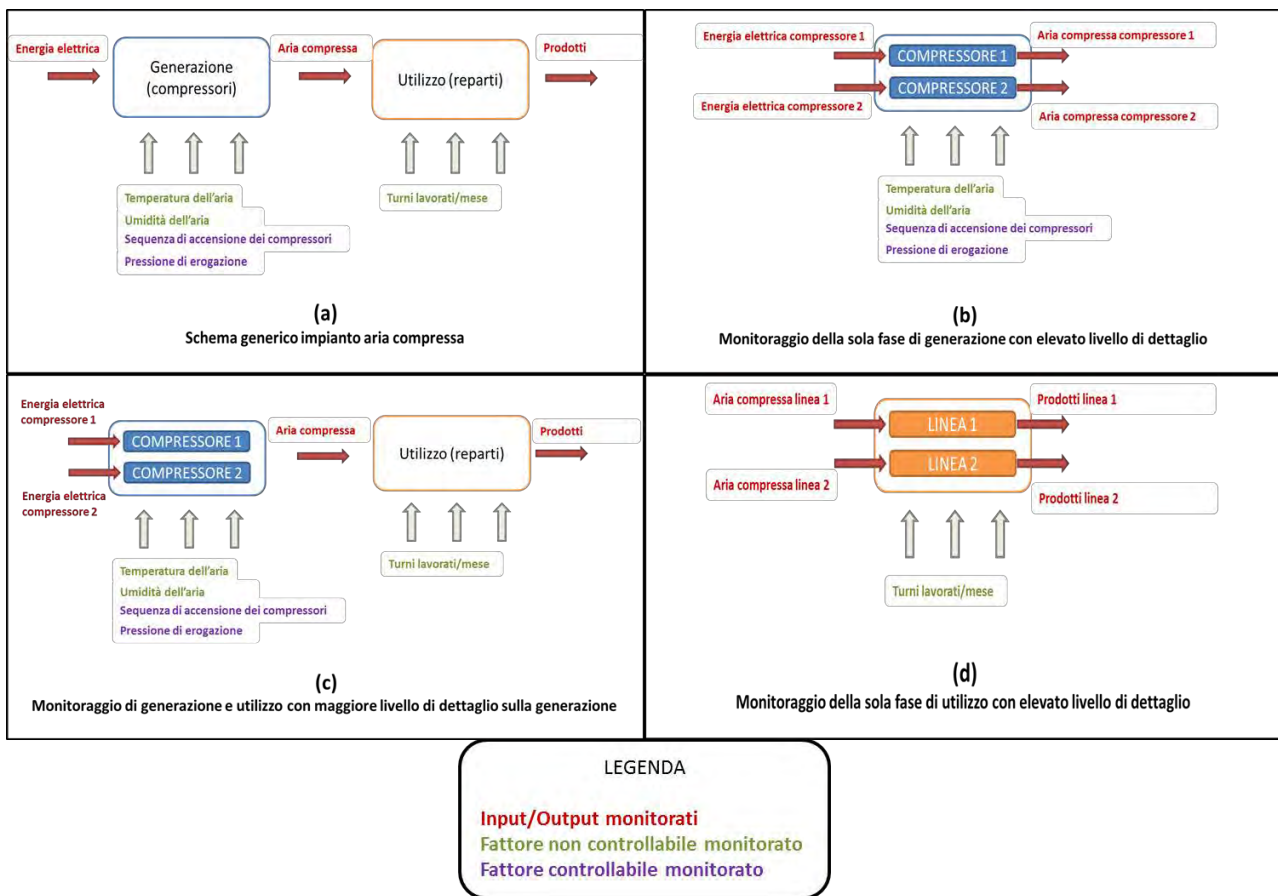


Figura 2: Schema generico impianto aria compressa con relative variabili rilevanti (a) e possibili configurazioni dei punti di misura (b-c-d)

I fattori che influenzano il consumo del processo (controllabili e non controllabili) sono detti “energy drivers”, e il loro legame con il processo stesso può essere rappresentato dalla seguente relazione con il consumo energetico (equazione 1) [5]:

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

Nella precedente equazione E è l'energia consumata dal sistema in un certo periodo di tempo, E_0 è 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.

I processi industriali non possono essere analizzati tutti con lo stesso criterio, ma vengono classificati considerando l'energia consumata come risultato della fisica di processo (riscaldamento, evaporazione, compressione, etc.) oppure analizzando la natura del processo (lavorazioni meccaniche, miscelamento,

etc.) poiché la fisica fornisce scarse indicazioni sull'uso dell'energia. Nel caso dell'impianto aria compressa, i possibili energy drivers della fase di generazione possono facilmente essere individuati sulla base della fisica del processo, mentre la fase di utilizzo è più legata alla gestione dell'impianto (si vedano gli schemi in figura 1). Il piano di raccolta dati deve comprendere la misurazione dei possibili energy drivers, che deve essere sincronizzata con quella dei consumi energetici.

La definizione della frequenza di raccolta/analisi dei dati (sia di consumo che relativi agli energy drivers) è fondamentale per un efficace funzionamento del sistema di controllo dei consumi. 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 dei consumi alla direzione, più alta se è quello di ottenere dei dati utili a livello operativo.

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).

2.2 Scelta delle variabili rilevanti

Una volta raccolti i dati di consumo e i dati relativi ai possibili energy drivers secondo quanto descritto nel paragrafo precedente, è necessario analizzare i dati raccolti per capire quali sono gli energy drivers reali, ovvero i fattori che hanno effettivamente un'influenza sul consumo energetico del sistema e ne determinano la variazione. L'analisi di correlazione e la regressione sono strumenti statistici fondamentali per la comprensione delle cause della variazione dei consumi, in quanto, avendo precedentemente individuato i possibili energy drivers, consentono di stabilire se esiste effettivamente un legame tra questi e i consumi energetici e se questo tipo di legame può essere di causa-effetto [2, 5].

Per costruire un diagramma di correlazione è necessario raccogliere almeno venti 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. A questo punto si può procedere all'analisi qualitativa del diagramma così ottenuto, valutando la compattezza e la disposizione dei punti, indici rispettivamente della forza e della tipologia (positiva o negativa) della correlazione tra il consumo e l'energy driver considerato [5].

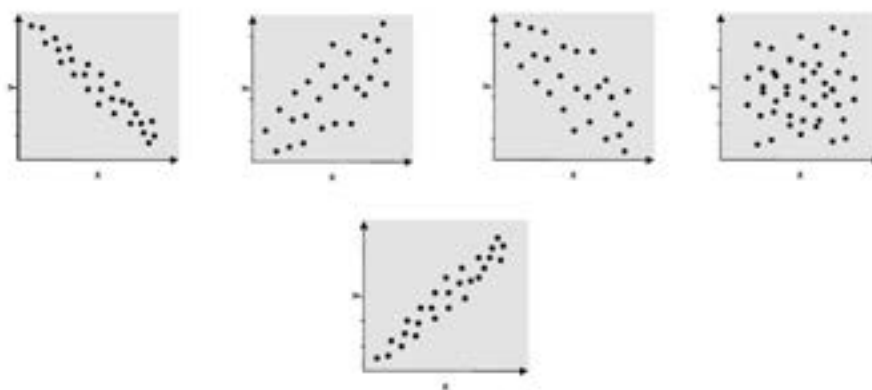


Figura 3: Esempi di correlazione lineare tra due variabili. Da sinistra: negativa forte, positiva debole, negativa debole, nessuna correlazione, positiva forte [9]

È possibile quantificare l'analisi finora eseguita solo graficamente introducendo degli indici numerici che permettano di valutare oggettivamente forza e tipologia della correlazione [2, 5, 10]:

- Il coefficiente di correlazione r viene generalmente utilizzato per valutare la tipologia di relazione; è definito come (equazione 2):

$$r = \frac{\sum(X_i - X_{media})(Y_i - Y_{media})}{\sqrt{\sum(X_i - X_{media})^2 \sum(Y_i - Y_{media})^2}} \quad (2)$$

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.

- 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.

Un valore elevato di R^2 , però, non esclude che l'elevata forza della correlazione sia dovuta semplicemente ad una casualità, e che il campione analizzato (le venti coppie di valori considerate) non rappresenti affatto la popolazione (tutte le coppie di valori verificate nella realtà, frutto del processo in esame). Per questo motivo si introduce un ulteriore indice statistico, il "p-value", che indica la significatività della correlazione (o, in altre parole, 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 [9].

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 questo caso, si può ricorrere alla correlazione lineare multipla, che consente di distinguere i contributi dei diversi fattori alla variabilità del processo in esame [5].

La correlazione multivariabile è uno strumento molto potente, ma può essere di difficile interpretazione, sia per il fatto che i risultati non sono visualizzabili graficamente, sia perché questo tipo di correlazione 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 [5].

	Y	X1	X2	X3	X4
Y	1	$r_{Y,X1}$	$r_{Y,X2}$	$r_{Y,X3}$	$r_{Y,X4}$
X1	$r_{Y,X1}$	1	$r_{X1,X2}$	$r_{X1,X3}$	$r_{X1,X4}$
X2	$r_{Y,X2}$	$r_{X1,X2}$	1	$r_{X2,X3}$	$r_{X2,X4}$
X3	$r_{Y,X3}$	$r_{X1,X3}$	$r_{X2,X3}$	1	$r_{X3,X4}$
X4	$r_{Y,X4}$	$r_{X1,X4}$	$r_{X2,X4}$	$r_{X3,X4}$	1

Figura 4: Esempio di matrice di correlazione

2.3 Costruzione del modello matematico del consumo energetico (baseline)

Una volta eseguita l'analisi di correlazione, e accertata così la presenza di una dipendenza sufficientemente forte tra due o più variabili, è possibile estrapolare un modello matematico che rappresenti la variazione del consumo in funzione degli energy drivers. Tale modello può essere estrapolato attraverso una regressione matematica. Nella maggior parte dei casi, il consumo energetico dei sistemi industriali viene efficacemente rappresentato da un modello ottenuto tramite regressione lineare, che quindi verrà di seguito approfondita.

Ad esempio, se l'energy driver scelto è unico, la retta di regressione sarà del tipo indicato nell'equazione 3 [1, 2, 5, 10]:

$$Y(x) = b_0 + b_1 * x \quad (3)$$

Nella precedente equazione i parametri b_0 e b_1 vengono stimati attraverso il metodo dei minimi quadrati (minimizzando la somma dei quadrati degli errori casuali, differenza tra valori effettivi e valori previsti della variabile Y) [1, 2, 5, 10], come riportato in equazione 4 ed equazione 5:

$$b_1 = \frac{\sum(X_i - X_{media})(Y_i - Y_{media})}{\sum(X_i - X_{media})^2} \quad (4)$$

$$b_0 = Y_{media} - b_1 * X_{media} \quad (5)$$

Se invece gli energy drivers sono molteplici, calcolando i parametri b_i sempre attraverso il metodo dei minimi quadrati, si otterrà un'equazione del tipo riportato in equazione 6 [1, 2, 5, 10]:

$$Y(x_i) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots \quad (6)$$

2.4 Costruzione delle carte di controllo per la validazione del modello

Il modello così ottenuto permette di effettuare delle previsioni dei consumi monitorando le variazioni degli energy drivers, ma bisogna tenere conto del fatto che i sistemi possono spesso cambiare comportamento (in positivo o in negativo) nel tempo, a causa ad esempio di interventi strutturali o gestionali (più o meno volontari).

Se il sistema cambia comportamento nel periodo di osservazione considerato per la raccolta dei dati, la caratterizzazione energetica può risultare imprecisa; bisogna dunque procedere ad un'attenta analisi della serie temporale dei dati raccolti al fine di individuare eventuali variazioni nel comportamento del sistema e di garantire un livello adeguato di stabilità e attualità al modello. Inoltre, se vengono individuati periodi in cui il comportamento del sistema è cambiato positivamente, bisogna tentare di stabilizzare le cause di tali benefici, mentre se è cambiato negativamente, si deve cercare di individuare le cause del cambiamento e di eliminarle [9].

A questo scopo, uno strumento decisamente utile è la carta di controllo delle somme cumulate o carta CuSum. La carta CuSum è uno strumento molto versatile, che si presta sia alla validazione del modello matematico scelto per rappresentare un processo, sia al controllo dei consumi nel tempo; la CuSum consente di identificare l'istante temporale in cui un processo si discosta dalle caratteristiche volute, segnalando la presenza di "cause speciali" (non giustificate dalla natura stessa del processo) di deviazione dal modello [1, 9].

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 [9].

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, come da equazione 7:

$$S_i = \sum_{l=1}^i (y_l - \bar{y}_l) = S_{i-1} + (y_i - \bar{y}_i) \quad (7)$$

Se i consumi sono sotto controllo, il grafico rivela un andamento stabile (pendenza nulla), in quanto i residui saranno caratterizzati da un valore medio nullo e da una varianza naturale, dovuta a cause comuni. 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; se la carta CuSum viene usata per la validazione di un modello, il suo ultimo valore è sempre nullo [1].

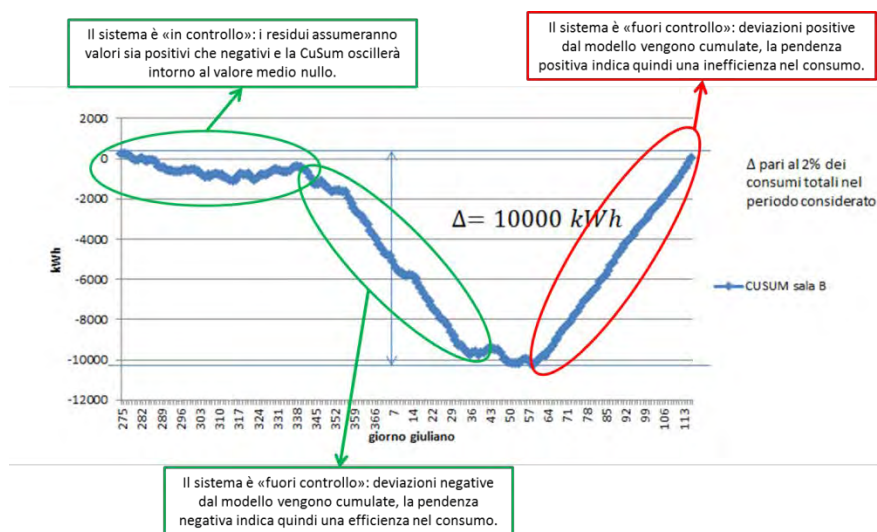


Figura 5: Possibili andamenti della carta CuSum [11]

Una volta separati i periodi temporali caratterizzati da modelli differenti, bisogna stabilire se la variazione di comportamento è significativa o meno a livello statistico [9], e quindi scegliere come riferimento per una nuova e più precisa caratterizzazione i dati del periodo più recente (se l'orizzonte temporale delle misure è molto dilatato), di quello in cui si sono verificati i consumi più bassi (se si vuole avere una baseline di confronto molto sfidante) o di quello che fornisce i consumi medi (se si vuole mantenere una certa cautela nel definire gli obiettivi).

2.5 Costruzione delle carte di controllo per il controllo nel tempo

Come accennato nel paragrafo precedente, le carte CuSum, oltre che per la validazione del modello matematico, possono essere utilizzate anche nella fase di controllo dei consumi nel tempo [1]. Queste carte 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 multivariabile, in quanto all'aumentare dei fattori considerati questo tipo di carte rimangono funzione di una sola variabile, il tempo [11].

Uno strumento meno sensibile, ma molto più immediato e di più facile costruzione rispetto alla CuSum, è la carta degli scostamenti, ovvero un grafico in cui sono riportati gli scostamenti dal modello in ogni istante temporale, insieme a due limiti di controllo, superiore (UCL, Upper Control Limit) ed inferiore (LCL, Lower Control Limit), per segnalare i fuori controllo [1]. Quando un punto cade al di fuori dei limiti di controllo, o si verifica un andamento non casuale degli scostamenti nel tempo, il processo viene considerato fuori

controllo. Le bande di controllo devono essere abbastanza strette da segnalare con una buona prontezza l'insorgere di una causa speciale e quindi il verificarsi di un fuori controllo, ma al contempo abbastanza larghe da non provocare dei falsi allarmi; si può 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 [11].

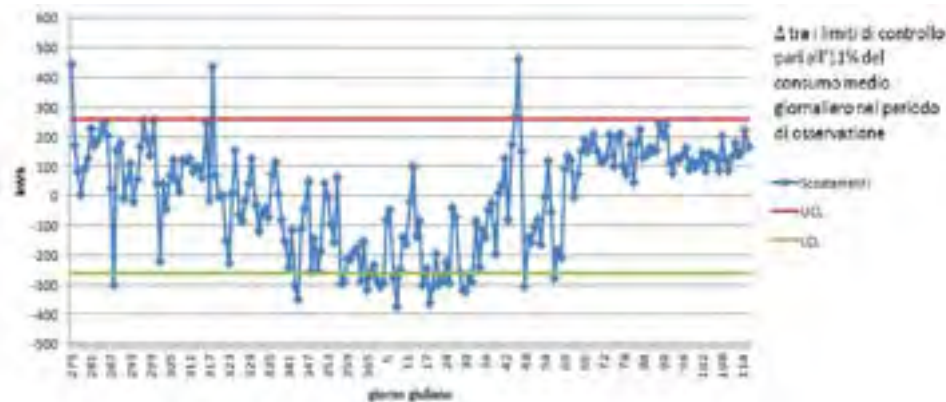


Figura 6: Esempio di carta degli scostamenti

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) [10].

Anche in questo caso, come già accennato per la validazione del modello, le carte di controllo si limitano a segnalare la presenza di anomalie o deviazioni da un comportamento considerato "di riferimento" (baseline). È poi necessario integrare le informazioni ricevute dalle carte con ulteriori analisi del sistema e interviste agli operatori/manutentori per comprendere le effettive cause di tali anomalie e procedere a eliminare i problemi rilevati.

3 Descrizione e stato energetico del sistema aria compressa nel caso in esame

3.1 Dati disponibili e prima elaborazione

I dati messi a disposizione dall'azienda relativamente all'impianto di produzione dell'aria compressa sono riportati nella tabella 1, con le unità di misura in parentesi quadre accanto all'etichetta, come da file di report del database originale (in formato Excel). La tabella mostra le etichette delle diverse colonne e dati della prima riga del file di report insieme ad una breve descrizione. I dati sono forniti con frequenza di registrazione pari ad 1 minuto e per un intervallo temporale pari ad una settimana, dal 28/05/2018 al 03/06/2018, per un totale teoricamente quindi pari a 10080 minuti.

Tuttavia, dopo una prima verifica, le entrate (righe) del database fornito risultano essere 10006, con 74 righe mancanti rispetto a quanto atteso. Si è proceduto quindi ad un'analisi puntuale delle righe del database, verificando la mancanza di registrazioni per 45 minuti isolati gli uni dagli altri e distribuiti più o meno in maniera uniforme nei diversi giorni della settimana e di un blocco di 29 minuti tra le 18:01 e le 18:30 del 01/06/2018. Per quanto riguarda i 45 minuti isolati si è proceduto all'integrazione dei dati mancanti per interpolazione tra il dato registrato nel minuto precedente e quello registrato nel minuto seguente, mentre per quanto riguarda i 29 minuti consecutivi, si è assunto per semplicità che i dati rimanessero costanti nella mezz'ora. Questa integrazione dei dati mancanti è stata ritenuta necessaria e valida in quanto ha consentito di minimizzare l'impatto di errori nella raccolta dati (minuti mancanti)

sull'analisi statistica dei dati orari, senza alterarne significativamente la rigorosità. Per completezza si riporta l'elenco delle righe del database mancanti (data e ora) nella tabella seguente

Tabella 1: Dati messi a disposizione dall'azienda

ETICHETTA DELLA COLONNA	DATI DELLA PRIMA RIGA	DESCRIZIONE DEL DATO
DATA	28/05/2018	Data di registrazione dei dati della riga
ORA	0.00.53	Ora di registrazione dei dati della riga
Tamb [°C]	21,719	Temperatura ambiente
RH [%]	76,302	Umidità relativa
Portata C1 [Nm ³ /h]	0	Portata di aria compressa prodotta dal compressore C1
Potenza El. C1 [kW]	0	Assorbimento di potenza del compressore C1
Pressione C1 [bar]	6,986	Pressione di esercizio del compressore C1
Temperatura C1 [°C]	26,5	Temperatura alla mandata del compressore C1
Carico C1 [%]	0	Carico del compressore C1
Portata C2 [Nm ³ /h]	0,365	Portata di aria compressa prodotta dal compressore C2
Potenza El. C2 [kW]	10,062	Assorbimento di potenza del compressore C2
Pressione C2 [bar]	7,06	Pressione di esercizio del compressore C2
Temperatura C2 [°C]	28,7	Temperatura alla mandata del compressore C2
Carico C2 [%]	7,623	Carico del compressore C2
Portata C3 [Nm ³ /h]	0	Portata di aria compressa prodotta dal compressore C3
Potenza El. C3 [kW]	0	Assorbimento di potenza del compressore C3
Pressione C3 [bar]	7,013	Pressione di esercizio del compressore C3
Temperatura C3 [°C]	25,6	Temperatura alla mandata del compressore C3
Carico C3 [%]	0	Carico del compressore C3

Tabella 2: Elenco delle righe mancanti nel database fornito dall'azienda (data e ora)

DATA	ORA	DATA	ORA	DATA	ORA
28/05/2018	0.35.59	31/05/2018	23.37.59	01/06/2018	18.01.28
28/05/2018	5.23.59	01/06/2018	2.24.59	01/06/2018	18.01.28
28/05/2018	8.57.59	01/06/2018	4.59.59	01/06/2018	18.01.28
28/05/2018	11.55.59	01/06/2018	7.16.59	01/06/2018	18.01.28
28/05/2018	21.09.59	01/06/2018	9.21.59	01/06/2018	18.01.28
29/05/2018	1.41.59	01/06/2018	11.25.59	01/06/2018	18.01.28
29/05/2018	5.41.59	01/06/2018	13.16.59	01/06/2018	18.01.28
29/05/2018	8.55.59	01/06/2018	16.25.59	01/06/2018	18.01.28
29/05/2018	11.44.59	01/06/2018	18.01.28	01/06/2018	18.01.28
29/05/2018	14.12.59	01/06/2018	18.01.28	01/06/2018	18.01.28
29/05/2018	20.10.59	01/06/2018	18.01.28	01/06/2018	18.01.28
30/05/2018	0.28.59	01/06/2018	18.01.28	01/06/2018	18.01.28
30/05/2018	4.43.59	01/06/2018	18.01.28	01/06/2018	20.42.59
30/05/2018	8.09.59	01/06/2018	18.01.28	02/06/2018	6.04.59
30/05/2018	10.59.59	01/06/2018	18.01.28	02/06/2018	10.32.59
30/05/2018	13.32.59	01/06/2018	18.01.28	02/06/2018	13.57.59
30/05/2018	17.40.59	01/06/2018	18.01.28	02/06/2018	16.50.59
30/05/2018	21.56.59	01/06/2018	18.01.28	02/06/2018	23.10.59
31/05/2018	1.47.59	01/06/2018	18.01.28	03/06/2018	5.26.59
31/05/2018	5.14.59	01/06/2018	18.01.28	03/06/2018	9.37.59
31/05/2018	8.11.59	01/06/2018	18.01.28	03/06/2018	12.48.59
31/05/2018	10.50.59	01/06/2018	18.01.28	03/06/2018	15.38.59
31/05/2018	13.09.59	01/06/2018	18.01.28	03/06/2018	19.42.59
31/05/2018	17.26.59	01/06/2018	18.01.28	03/06/2018	23.59.43
31/05/2018	20.44.59	01/06/2018	18.01.28		

Una volta integrato il set di dati con le entrate mancanti del database, si è proceduto all'aggregazione oraria dei valori registrati. La frequenza oraria è stata infatti ritenuta la migliore per l'analisi dei dati settimanali, in quanto frequenze più alte comportano complicazioni nell'analisi in quanto evidenziano i transitori del funzionamento dei compressori, mentre frequenze più basse su un periodo di tempo breve come quello di una settimana riducono la possibilità di trarre informazioni utili dai dati. Tale aggregazione è avvenuta calcolando la media ogni sessanta righe del database per ciascun dato fornito (ovvero per

ciascuna colonna del database). Vista la consistenza del database, l'aggregazione è stata automatizzata attraverso la scrittura ed esecuzione di una macro in Visual Basic, il cui codice è riportato nella figura seguente.

```

SUB Macro1()
    ' Macro Macro
    ' mette i valori di ciascuna colonna (60 per volta) e mette il risultato in una diversa colonna dello stesso foglio.

    X = 60      'numero di righe da mediare
    Y = 2      'riga dove mettere il risultato
    Z = 148    'numero righe da scorrere alla fine
    N = 17     'numero colonne da scorrere alla fine
    M = 20     'colonna dove mettere il risultato

    riga1 = 2   'riga inizio somma
    colonna = 3 'colonna del risultato da sommare
    riga2 = 41  'riga fine somma

    'Dati di elaborazione
    For N = 1 To 6
        For A = 1 To Z
            Select ("Data aggregati").Select
            Cells(Y, A).Select           'Dalle righe mettere il risultato
            ActiveCell.FormulaR1C1 = "=SUM(" & "Data aggregati" & "!" & riga1 & ":" & riga2 & "!" & colonna & ")*" & riga1 & ":" & riga2 & ")/" & X & " " & Media
            Y = Y + 1                    'cambia postamento alla cella di risultato
            riga1 = riga1 + 2            'cambia la riga di inizio somma
            riga2 = riga2 + 2            'cambia la riga di fine somma
        Next
        Y = Y + 2
        riga1 = 2
        riga2 = 41
        N = N + 1
        colonna = colonna + 1
    Next
End Sub
    
```

Figura 7: Macro Visual Basic per l'aggregazione dei dati

Il database ottenuto a seguito di queste prime elaborazioni è quindi quello finale utilizzato per l'analisi statistica dei dati, composto di 18 colonne (le stesse presenti in tabella 1, avendo però aggregato data e ora in un'unica colonna) e 168 righe esclusa la riga delle etichette, con dati orari per la settimana compresa tra il 28/05/2018 e il 03/06/2018.

3.2 Descrizione del sistema di produzione dell'aria compressa in esame e del suo stato energetico

Una volta terminata la prima elaborazione dei dati illustrata nel paragrafo precedente, è stato possibile iniziare a studiare il sistema aria compressa in esame attraverso i dati forniti dall'azienda.

Il sistema di produzione dell'aria compressa considerato è composto da tre diversi compressori (C1, C2 e C3), che sono utilizzati per soddisfare una richiesta di aria compressa da parte dell'impianto produttivo sensibilmente inferiore alla somma delle loro capacità. Ad esempio, nella settimana in esame, i compressori non hanno mai funzionato simultaneamente. Il compressore C2 ha coperto la maggior parte della richiesta dell'impianto, mentre il compressore C3 ha lavorato per un numero di ore inferiore e il compressore C1 non è mai risultato in funzione (e verrà pertanto trascurato nelle analisi seguenti).

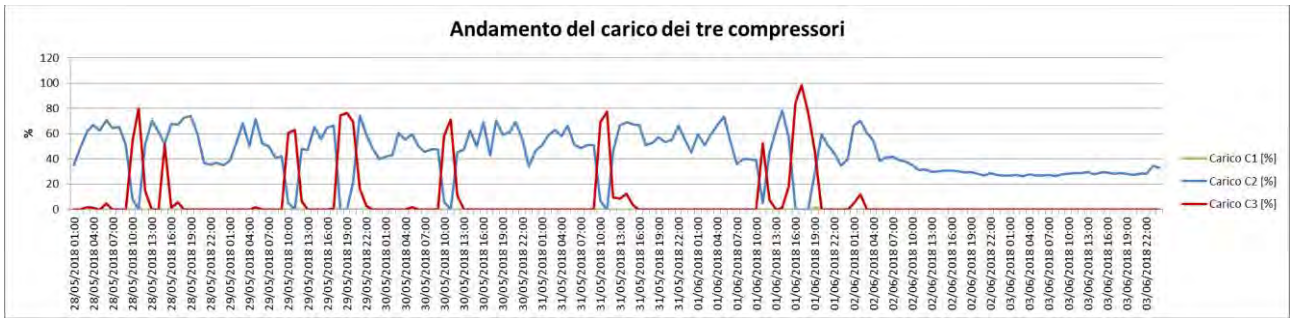


Figura 8: Andamento del carico dei tre compressori nella settimana in esame

Nella figura seguente è possibile visualizzare l'andamento dell'assorbimento di potenza orario da parte dei due compressori in uso nella settimana di raccolta dei dati, C2 e C3. L'osservazione dei grafici in figura 7 e figura 8 consente anche di trarre qualche conclusione relativamente alla taglia dei compressori, che risultano essere di potenza massima (ausiliari inclusi) pari a circa 120 kW (C2) e a circa 160 kW (C3). Inoltre, si nota come nel fine settimana la richiesta di aria compressa da parte dell'impianto si riduca di circa la metà (probabilmente a seguito del fermo di parte della produzione).

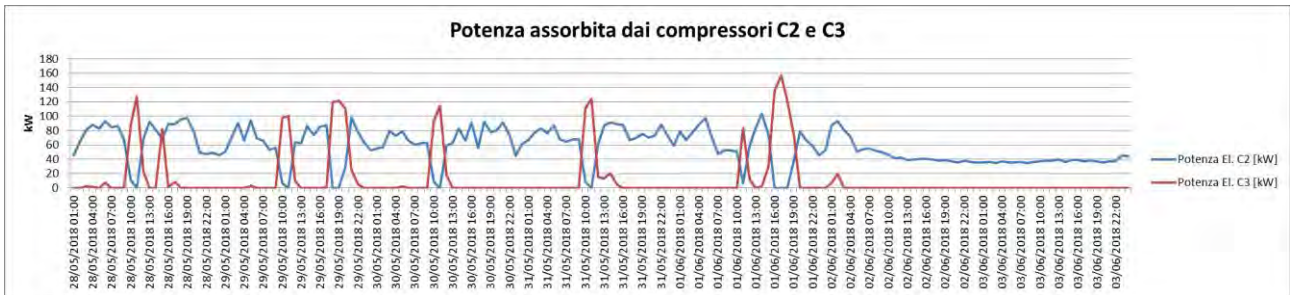


Figura 9: Potenza oraria assorbita dai compressori C2 e C3 nella settimana in esame

Per approfondire ulteriormente il funzionamento dei due compressori C2 e C3 è stato necessario osservare nuovamente i dati con frequenza al minuto. Nella figura seguente si riportano i dati di potenza assorbita dei due compressori per circa tre ore (tra le 8:00 e le 11:00) del 28/05/2018. Dall'andamento riportato in figura si evince chiaramente che il compressore C2 ha un tipo di funzionamento vuoto/carico, mentre il compressore C3 è dotato di inverter. Vista la richiesta d'aria della settimana in questione, il compressore C3 è comunque meno utilizzato per evitare che si trovi a lavorare in condizioni di carico poco efficienti.

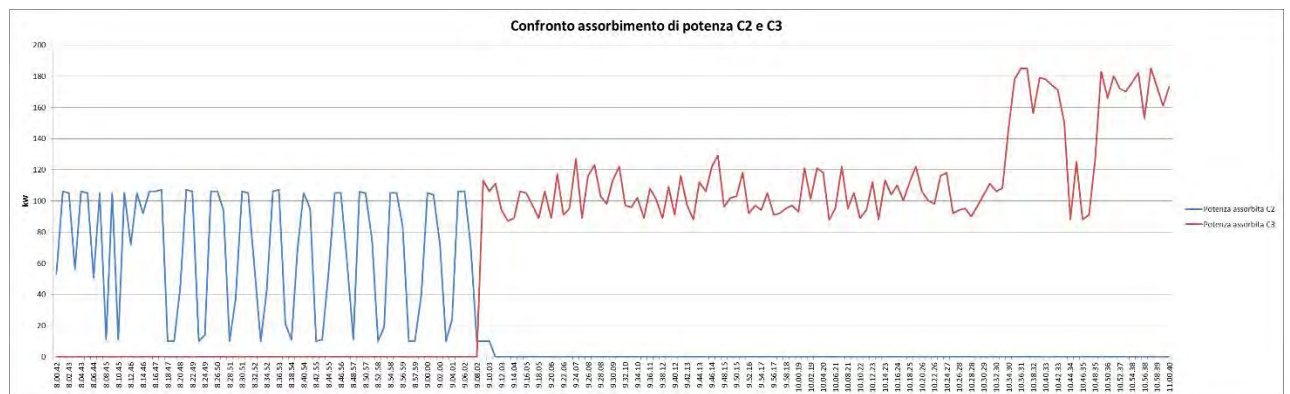


Figura 10: Confronto assorbimento di potenza al secondo compressori C2 e C3

La figura seguente mostra invece l'andamento della pressione di esercizio dei tre compressori durante la settimana. Tale set point risulta simile per i tre compressori e variabile tra un minimo di 7 e un massimo di 7,6 bar nei giorni feriali e tra 6,7 e 7 bar la domenica (mentre il sabato, nonostante assorbimento e portata

di aria prodotta risultino simili rispetto a quelli della domenica, la pressione rimane settata ai valori dei giorni feriali).

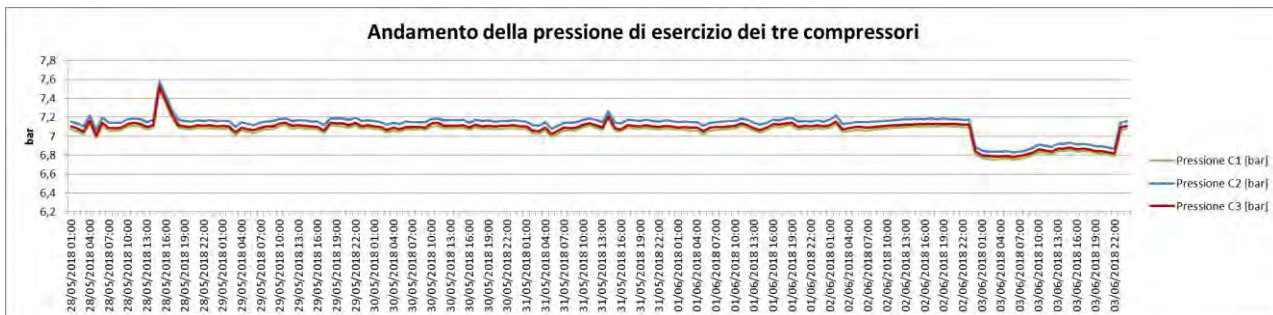


Figura 11: Andamento della pressione di esercizio dei tre compressori nella settimana in esame

Di seguito si riportano, per completezza, anche i grafici degli andamenti nel tempo delle altre variabili osservate.

In particolare, dall’osservazione dei grafici in figura 7 e figura 11 si nota come il compressore C2, nonostante di taglia inferiore al compressore C3, sembri essere più efficiente (maggiore portata di aria compressa prodotta a parità di assorbimento di potenza elettrica). Le cause di questa differenza di prestazioni non sono probabilmente da ricercare nell’età delle macchine e nel loro stato manutentivo, ma non sono in questo caso state ulteriormente indagate.

Di seguito si riportano, per completezza, anche i grafici degli andamenti nel tempo delle altre variabili osservate.



Figura 12: Andamento della portata di aria compressa prodotta dai compressori C2 e C3 nella settimana in esame

Come osservabile dal grafico seguente, la temperatura alla mandata dei compressori risente dell’andamento della temperatura ambiente e del carico del compressore stesso.

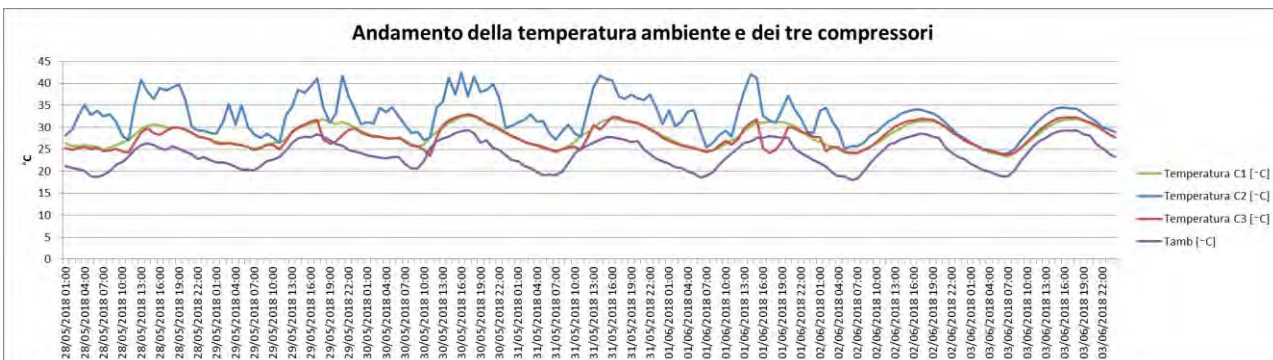


Figura 13: Andamento della temperatura ambiente e alla mandata dei tre compressori nella settimana in esame



Figura 14: Andamento dell'umidità relativa nella settimana in esame

4 Applicazione della metodologia di controllo dei consumi al caso in esame

La metodologia precedentemente presentata è stata applicata al caso dell'impianto aria compressa descritto precedentemente. Dal momento che i dati sono stati messi a disposizione dall'azienda sulla base della propria disponibilità, in questo caso l'elaborazione del piano di raccolta dati è stata sostituita dall'analisi dei dati a disposizione dell'azienda e da una loro prima verifica ed elaborazione, come già descritto in precedenza.

Visti i dati messi a disposizione dall'azienda, è stato possibile procedere all'applicazione della metodologia precedentemente presentata per i due compressori C2 e C3, funzionanti nella settimana di raccolta dati. L'analisi dei dati e la costruzione del sistema di controllo dei consumi energetici sono quindi di seguito presentate separatamente per ciascuno dei compressori.

Data la quantità limitata dei dati messi a disposizione dall'azienda, non è stato possibile realizzare un effettivo sistema di controllo dei consumi nel tempo, ma solo testare l'applicabilità e validità della metodologia e degli strumenti proposti per la realizzazione del modello di baseline energetica e per la costruzione delle carte di controllo. Tuttavia, per ottenere ulteriore conferma della validità del metodo proposto, nel caso del compressore C2 è stato possibile effettuare una simulazione di una condizione di controllo del consumo energetico nel tempo attraverso le carte di controllo proposte, attraverso la suddivisione del periodo di raccolta dati in due sotto periodi, come più diffusamente illustrato nel seguito. Inoltre, per completezza, la carta degli scostamenti è sempre stata realizzata anche in fase di validazione del modello.

4.1 Analisi del compressore C2

Per ciascun compressore sono stati inizialmente considerati potenziali energy drivers tutte le variabili a disposizione, ovvero:

- Aria compressa prodotta dal compressore;
- Pressione di esercizio del compressore;
- Temperatura alla mandata del compressore;
- Temperatura ambiente e umidità relativa.

È stata quindi inizialmente realizzata una regressione multivariabile considerando tutte le variabili precedentemente elencate e la loro influenza sul consumo energetico del compressore, i cui risultati sono riportati nel seguente paragrafo.

4.1.1 Scelta delle variabili rilevanti

L'immagine seguente riporta i risultati della regressione multivariabile effettuata con i dati relativi al compressore C2 utilizzando l'apposita funzione del componente aggiuntivo di analisi dei dati di Excel.

OUTPUT RIEPILOGO								
Statistica della regressione								
R multiplo	0,998133163							
R al quadrato	0,996269812							
R al quadrato corretto	0,996154683							
Errore standard	1,558575666							
Osservazioni	168							
ANALISI VARIANZA								
	gdl	SQ	MQ	F	Significatività F			
Regressione	5	105103,4684	21020,69369	8653,489296	1,1398E-194			
Residuo	162	393,5236135	2,429158108					
Totale	167	105496,992						
	Coefficienti	Errore standard	Stat t	Valore di significatività	Inferiore 95%	Superiore 95%	Inferiore 95,0%	Superiore 95,0%
Intercetta	18,67271541	8,522035856	2,191109698	0,029871837	1,844116677	35,50131414	1,844116677	35,50131414
Aria compressa C2 [Nm ³]	0,116419238	0,001586256	73,39248521	3,1306E-126	0,113286834	0,119551642	0,113286834	0,119551642
Pressione C2 [bar]	-1,13844563	1,298401392	-0,876805614	0,381890589	-3,702419356	1,425528096	-3,702419356	1,425528096
Temperatura C2 [°C]	-1,0625436	0,119207208	-8,913417412	9,87402E-16	-1,297943955	-0,827143245	-1,297943955	-0,827143245
Tamb [°C]	1,000942716	0,158948368	6,297282115	2,73336E-09	0,687064865	1,314820568	0,687064865	1,314820568
RH [%]	-0,046857957	0,019731991	-2,374720189	0,01873237	-0,085823031	-0,007892883	-0,085823031	-0,007892883

Figura 15: Risultato della regressione multivariabile per il compressore C2

In questo caso, l’equazione riportata in equazione 8 rappresenta il modello matematico del consumo energetico del compressore C2 in base alla regressione multivariabile:

$$\text{Consumo C2 [kWh]} = 18,67 + \text{Aria compressa C2 [Nm}^3] * 0,1164 - \text{Pressione C2 [bar]} * 1,138 - \text{Temperatura C2 [°C]} * 1,062 + \text{Tamb[°C]} * 1,001 - \text{RH[%]} * 0,0468 \quad (8)$$

Nella figura 15 sono state evidenziate in giallo le variabili prese a riferimento per la valutazione quantitativa della regressione effettuata. I valori di R² e di p_value (“significatività F”) della regressione risultano ampiamente entro le soglie di accettabilità; i valori di p_value relativi ai singoli fattori dell’equazione del modello risultano invece tutti entro le soglie di accettabilità tranne quello relativo alla pressione, evidenziato in rosso in figura 14.

Come ulteriore verifica di significatività e per individuare eventuali fenomeni di multicollinearità tra le variabili, è stata effettuata anche un’analisi di correlazione utilizzando lo stesso set di dati. Nella figura seguente sono riportati i risultati.

	Consumo C2 [kWh]	Aria compressa C2 [Nm ³]	Pressione C2 [bar]	Temperatura C2 [°C]	Tamb [°C]	RH [%]
Consumo C2 [kWh]	1					
Aria compressa C2 [Nm ³]	0,996696407	1				
Pressione C2 [bar]	0,251771739	0,274544898	1			
Temperatura C2 [°C]	0,623062749	0,63273599	0,337201389	1		
Tamb [°C]	-0,125894238	-0,133111012	0,087313813	0,64334735	1	
RH [%]	0,22177402	0,242770345	0,16059071	-0,412909537	-0,848450302	1

Figura 16: Analisi di multicollinearità compressore C2

Come evidenziato anche dalla scala cromatica impostata, l’unico variabile che presenta al contempo forte correlazione con il consumo del compressore e scarsa multicollinearità con le altre variabili è l’aria compressa prodotta dal compressore.

Pertanto, considerati i risultati riportati in figura 14 e figura 15, l’aria compressa prodotta dal compressore è stata considerata l’unico energy driver significativo.

4.1.2 Costruzione del modello matematico del consumo energetico (baseline)

A questo punto, una volta selezionate le variabili da considerare per la definizione del modello del consumo energetico del compressore C2, si è proceduto ad una seconda analisi di regressione, considerando solo tali variabili.

Si riporta in figura 17 il grafico di correlazione, completo di valore di R^2 ed equazione del modello, ottenuto utilizzando i dati relativi all'aria compressa prodotta dal compressore C2 e al consumo energetico del medesimo compressore. Si riportano inoltre i risultati dell'analisi di regressione nel medesimo formato di figura 14.

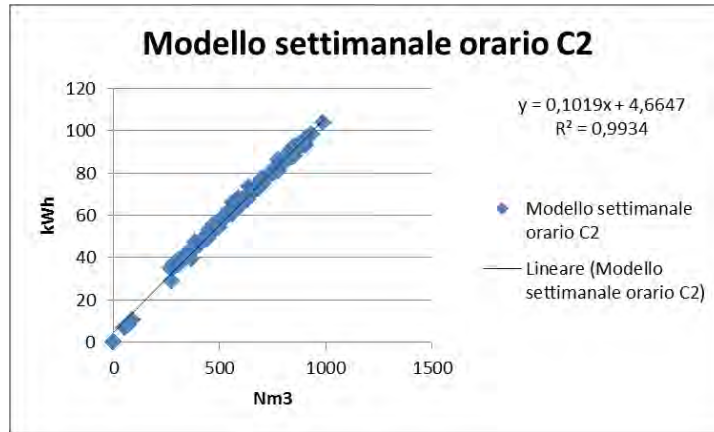


Figura 17: Modello settimanale orario compressore C2

OUTPUT RIEPILOGO								
<i>Statistica della regressione</i>								
R multiplo	0,996696407							
R al quadrato	0,993403728							
R al quadrato corretto	0,993363991							
Errore standard	2,047459301							
Osservazioni	168							
<i>ANALISI VARIANZA</i>								
	<i>gdl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Significatività F</i>			
Regressione	1	104801,1052	104801,1052	24999,72936	6,2292E-183			
Residuo	166	695,8868716	4,192089588					
Totale	167	105496,992						
	<i>Coefficienti</i>	<i>Errore standard</i>	<i>Stat t</i>	<i>Valore di significatività</i>	<i>Inferiore 95%</i>	<i>Superiore 95%</i>	<i>Inferiore 95,0%</i>	<i>Superiore 95,0%</i>
Intercetta	4,664651328	0,370729565	12,58235588	6,35208E-26	3,932698532	5,396604123	3,932698532	5,396604123
Aria compressa C2 [Nm ³]	0,101921046	0,000644609	158,1130272	6,2292E-183	0,100648357	0,103193734	0,100648357	0,103193734

Figura 18: Risultato della regressione monovariabile per il compressore C2

L'equazione riportata in equazione 9 rappresenta il modello matematico del consumo energetico del compressore C2 ottenuto tramite regressione monovariabile:

$$\text{Consumo C2 [kWh]} = 4,665 + \text{Aria compressa C2 [Nm}^3\text{]} * 0,1019 \quad (9)$$

In questo caso, tutti i valori di R^2 e di p_value (evidenziati in giallo) risultano ampiamente entro le soglie di accettabilità.

Il modello matematico riportato in equazione 9 è quindi preso a riferimento per la costruzione delle carte di controllo.

4.1.3 Costruzione delle carte di controllo per la validazione del modello e il controllo nel tempo

Si riportano di seguito le carte di controllo (carta degli scostamenti e carta CuSum) realizzate a partire dal modello riportato in equazione 9.

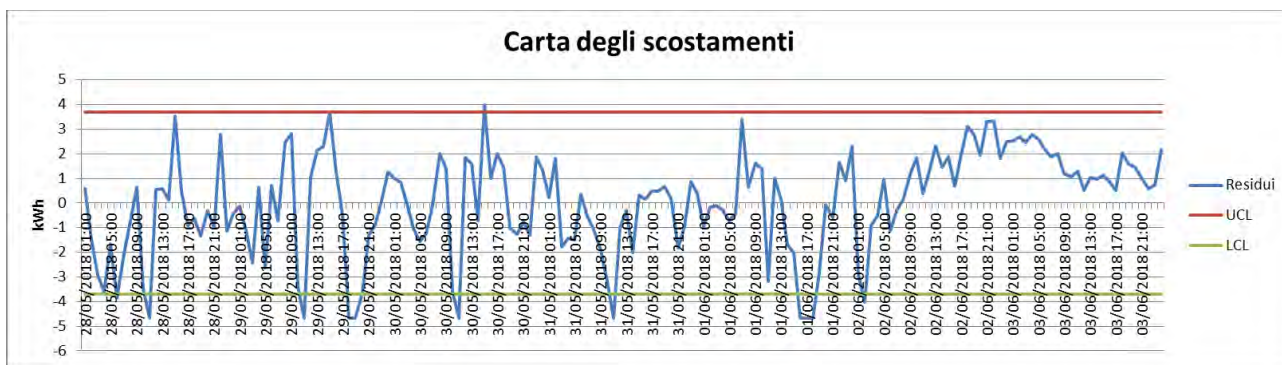


Figura 19: Carta degli scostamenti per il compressore C2

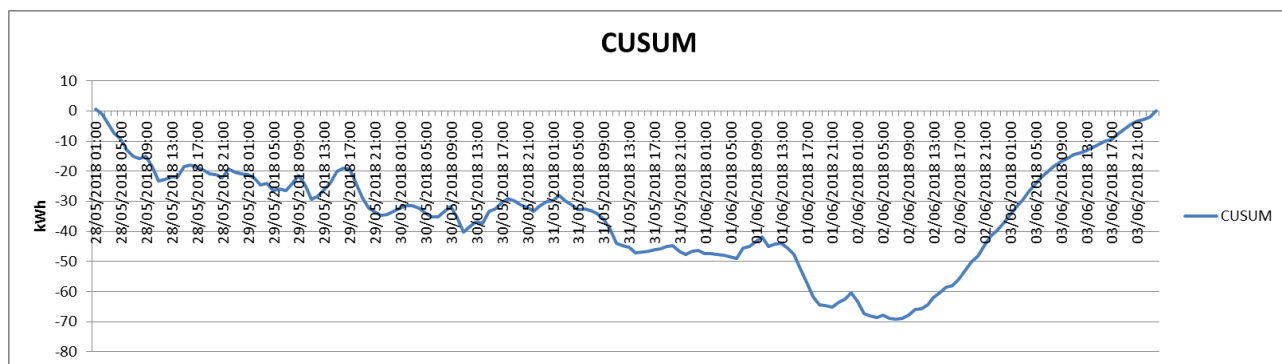


Figura 20: Carta CuSum per il compressore C2

Dall’analisi delle carte precedentemente introdotte, è possibile notare come il modello sembra descrivere bene il comportamento energetico del compressore nell’intero arco temporale (pochi, isolati punti al di fuori dei limiti di controllo nel caso della carta degli scostamenti, variazione massima inferiore all’1% del consumo totale del compressore nella settimana per quanto riguarda la carta CuSum).

Si evidenzia un comportamento leggermente differente nel fine settimana, dovuto alle differenti condizioni operative evidenziate nei capitoli precedenti. Tuttavia, la differenza con il comportamento infrasettimanale non è però tale da indurre a realizzare due modelli e quindi sistemi di controllo separati (per il fine settimana e per i giorni settimanali).

A titolo di esempio, si riporta un’ulteriore coppia di carte di controllo realizzata simulando una situazione di controllo nel tempo dei consumi energetici. In questo caso, il modello di consumo del compressore C2 è stato realizzato con i soli dati orari relativi ai giorni feriali (sempre considerando l’aria compressa prodotta dal compressore come unico energy driver), e le carte di controllo dimostrano di cogliere perfettamente la seppur piccola variazione nella prestazione della macchina (variazione netta della media nella carta degli scostamenti e variazione netta di pendenza nella CuSum), confermando la sensibilità e validità del metodo e degli strumenti applicati.

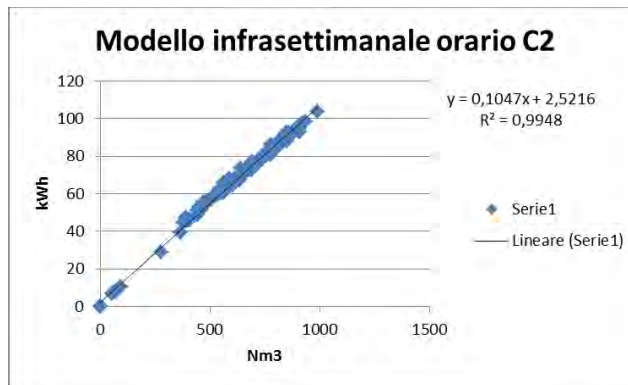


Figura 21: Modello infrasettimanale orario compressore C2

OUTPUT RIEPILOGO								
<i>Statistica della regressione</i>								
R multiplo	0,997401989							
R al quadrato	0,994810728							
R al quadrato corretto	0,994766751							
Errore standard	1,913910669							
Osservazioni	120							
ANALISI VARIANZA								
	<i>gdl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Significatività F</i>			
Regressione	1	82862,74514	82862,74514	22621,21827	1,1415E-136			
Residuo	118	432,2403777	3,663054048					
Totale	119	83294,98552						
	<i>Coefficienti</i>	<i>Errore standard</i>	<i>Stat t</i>	<i>Valore di significatività</i>	<i>Inferiore 95%</i>	<i>Superiore 95%</i>	<i>Inferiore 95,0%</i>	<i>Superiore 95,0%</i>
Intercetta	2,521584843	0,441079924	5,71684338	8,31958E-08	1,64812651	3,395043176	1,64812651	3,395043176
Aria compressa C2 [Nm^3]	0,104741714	0,000696405	150,4035181	1,1415E-136	0,103362643	0,106120785	0,103362643	0,106120785

Figura 22: Risultato della regressione monovariabile infrasettimanale per il compressore C2



Figura 23: Carta degli scostamenti che simula la situazione di controllo dei consumi nel tempo per il compressore C2



Figura 24: Carta CuSum che simula la situazione di controllo dei consumi nel tempo per il compressore C2

4.2 Analisi del compressore C3

Per il compressore C3 sono state prese inizialmente in considerazione le stesse variabili considerate per il compressore C2, ovvero:

- Aria compressa prodotta dal compressore;

- Pressione di esercizio del compressore;
- Temperatura alla mandata del compressore;
- Temperatura ambiente e umidità relativa.

È stata quindi inizialmente realizzata anche in questo caso una regressione multivariabile considerando tutte le variabili precedentemente elencate e la loro influenza sul consumo energetico del compressore. I risultati sono riportati nel seguente paragrafo.

4.2.1 Scelta delle variabili rilevanti

L'immagine seguente riporta i risultati della regressione multivariabile effettuata con i dati relativi al compressore C3 nello stesso formato utilizzato per il compressore C2.

OUTPUT RIEPILOGO								
Statistica della regressione								
R multiplo	0,998930703							
R al quadrato	0,99786255							
R al quadrato corretto	0,997796579							
Errore standard	1,580565179							
Osservazioni	168							
ANALISI VARIANZA								
	gdl	SQ	MQ	F	Significatività F			
Regressione	5	188935,9405	37787,1881	15125,84882	2,9462E-214			
Residuo	162	404,7061784	2,498186287					
Totale	167	189340,6467						
	Coefficienti	Errore standard	Stat t	Valore di significatività	Inferiore 95%	Superiore 95%	Inferiore 95,0%	Superiore 95,0%
Intercetta	-14,3365202	8,385727518	-1,709633441	0,089248378	-30,8959487	2,222908311	-30,8959487	2,222908311
Aria compressa C3 [Nm ³]	0,194590893	0,001347893	144,3667252	4,6009E-173	0,191929188	0,197252599	0,191929188	0,197252599
Pressione C3 [bar]	1,751686984	1,327809719	1,319230428	0,188953663	-0,870359828	4,373733796	-0,870359828	4,373733796
Temperatura C3 [°C]	0,130751774	0,155253115	0,842184544	0,400926252	-0,175829003	0,437332551	-0,175829003	0,437332551
Tamb [°C]	-0,088861254	0,142269305	-0,624598916	0,533113019	-0,369802696	0,192080189	-0,369802696	0,192080189
RH [%]	0,009377387	0,019555773	0,479520157	0,632215351	-0,029239706	0,04799448	-0,029239706	0,04799448

Figura 25: Risultato della regressione multivariabile per il compressore C3

In questo caso, l'equazione riportata in equazione 10 rappresenta il modello matematico del consumo energetico del compressore C3 in base alla regressione multivariabile:

$$\text{Consumo C3 [kWh]} = -14,34 + \text{Aria compressa C3 [Nm}^3\text{]} * 0,1946 - \text{Pressione C3 [bar]} * 1,752 + \text{Temperatura C3 [}^\circ\text{C]} * 0,1307 - \text{Tamb [}^\circ\text{C]} * 0,8886 + \text{RH [%]} * 0,0094 \quad (10)$$

Nella figura sono state evidenziate in giallo le variabili prese a riferimento per la valutazione quantitativa della regressione effettuata. I valori di R² e di p_value ("significatività F") della regressione risultano ampiamente entro le soglie di accettabilità; i valori di p_value relativi ai singoli fattori dell'equazione del modello risultano invece tutti oltre le soglie di accettabilità (valori evidenziati in rosso in figura 24) tranne quello relativo all'aria compressa prodotta dal compressore.

Come ulteriore verifica di significatività e per individuare eventuali fenomeni di multicollinearità tra le variabili, è stata effettuata anche un'analisi di correlazione utilizzando lo stesso set di dati. Nella figura seguente sono riportati i risultati.

	Consumo C3 [kWh]	Aria compressa C3 [Nm ³]	Pressione C3 [bar]	Temperatura C3 [°C]	Tamb [°C]	RH [%]
Consumo C3 [kWh]	1					
Aria compressa C3 [Nm ³]	0,998898186	1				
Pressione C3 [bar]	0,265478562	0,259146145	1			
Temperatura C3 [°C]	-0,299861061	-0,299788517	0,035570855	1		
Tamb [°C]	0,182003818	0,184247763	0,090795341	0,829442183	1	
RH [%]	-0,038060246	-0,04217313	0,157427216	-0,74210464	-0,848450302	1

Figura 26: Analisi di multicollinearità compressore C3

Come evidenziato anche dalla scala cromatica impostata, l'unica variabile che presenta al contempo forte correlazione con il consumo del compressore e scarsa multicollinearità con le altre variabili è ancora una volta l'aria compressa prodotta dal compressore.

Pertanto, considerati i risultati riportati in figura 24 e figura 25, l'aria compressa prodotta dal compressore è stata nuovamente considerata l'unico energy driver significativo.

4.2.2 Costruzione del modello matematico del consumo energetico (baseline)

A questo punto, una volta selezionate le variabili da considerare per la definizione del modello del consumo energetico del compressore C3, si è proceduto ad una seconda analisi di regressione, considerando solo tali variabili.

Si riporta di seguito il grafico di correlazione, completo di valore di R^2 ed equazione del modello, ottenuto utilizzando i dati relativi all'aria compressa prodotta dal compressore C3 e al consumo energetico del medesimo compressore. Si riportano inoltre i risultati dell'analisi di regressione nel medesimo formato di figura 14.

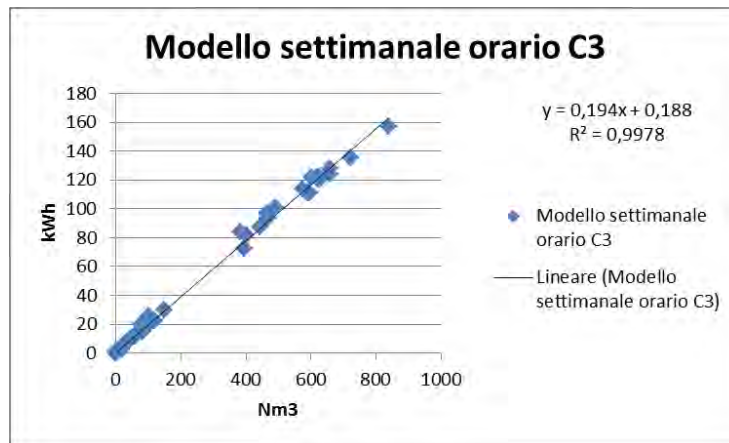


Figura 27: Modello settimanale orario compressore C3

OUTPUT RIEPILOGO								
<i>Statistica della regressione</i>								
R multiplo	0,998898186							
R al quadrato	0,997797585							
R al quadrato corretto	0,997784318							
Errore standard	1,584956804							
Osservazioni	168							
<i>ANALISI VARIANZA</i>								
	<i>gdl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>Significatività F</i>			
Regressione	1	188923,6401	188923,6401	75205,81873	1,7878E-222			
Residuo	166	417,0066197	2,51208807					
Totale	167	189340,6467						
	<i>Coefficienti</i>	<i>Errore standard</i>	<i>Stat t</i>	<i>Valore di significatività</i>	<i>Inferiore 95%</i>	<i>Superiore 95%</i>	<i>Inferiore 95,0%</i>	<i>Superiore 95,0%</i>
Intercetta	0,188033482	0,130205877	1,444124385	0,150588728	-0,069039502	0,445106466	-0,069039502	0,445106466
Aria compressa C3 [Nm³]	0,193965785	0,000707293	274,2367932	1,7878E-222	0,192569335	0,195362235	0,192569335	0,195362235

Figura 28: Risultato della regressione monovariabile per il compressore C3

L'equazione riportata in equazione 11 rappresenta il modello matematico del consumo energetico del compressore C3 ottenuto tramite regressione monovariabile:

$$\text{Consumo C3 [kWh]} = 0,188 + \text{Aria compressa C3 [Nm}^3\text{]} * 0,1940 \quad (11)$$

In questo caso, tutti i valori di R² e di p_value (evidenziati in giallo) risultano ampiamente entro le soglie di accettabilità.

Il modello matematico riportato in equazione 11 è quindi preso a riferimento per la costruzione delle carte di controllo.

4.2.3 Costruzione delle carte di controllo per la validazione del modello e il controllo nel tempo

Si riportano di seguito le carte di controllo (carta degli scostamenti e carta CuSum) realizzate a partire dal modello riportato in equazione 11.

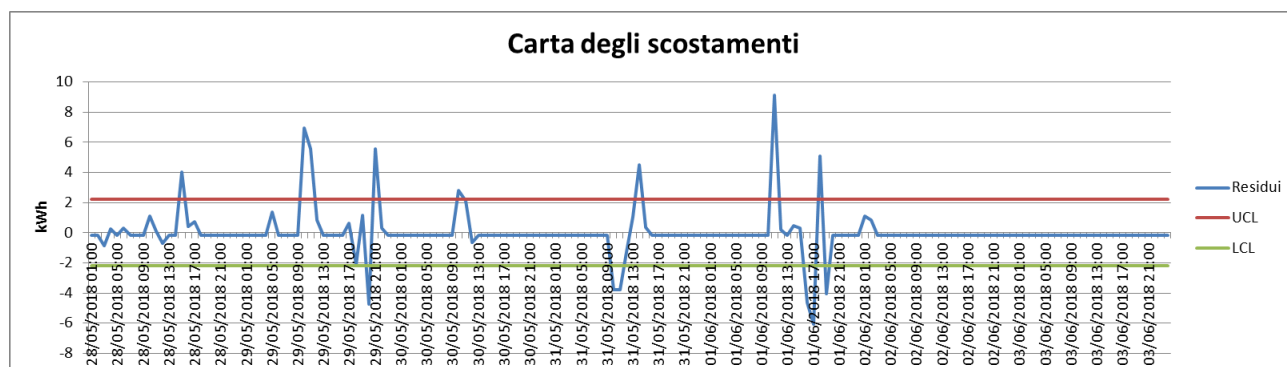


Figura 29: Carta degli scostamenti per il compressore C3

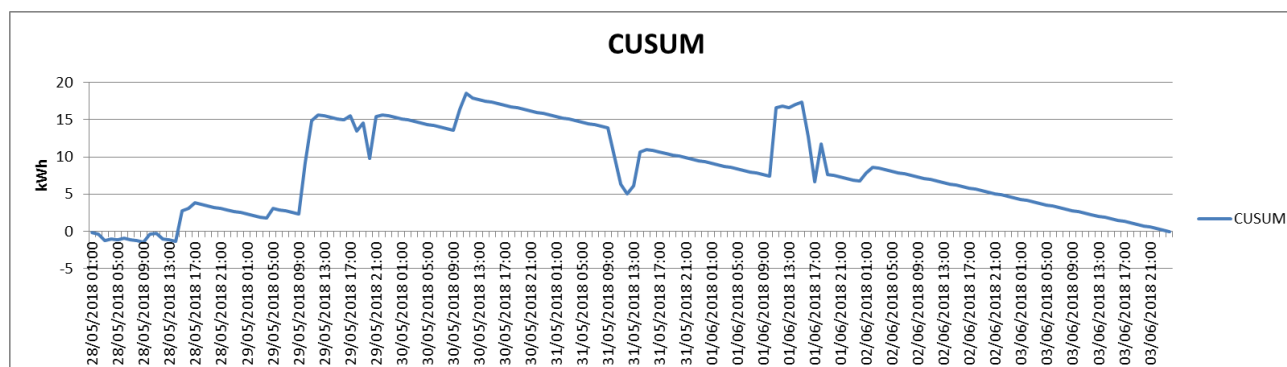


Figura 30: Carta CuSum per il compressore C3

Sulla base dell'osservazione di queste carte, è possibile notare come il modello sembra descrivere bene il comportamento energetico del compressore nell'intero arco temporale (pochi, isolati punti al di fuori dei limiti di controllo nel caso della carta degli scostamenti, variazione massima inferiore all'1% del consumo totale del compressore nella settimana per quanto riguarda la carta CuSum). Tuttavia, rispetto al caso precedente, le carte mostrano un'efficacia ridotta dal fatto che il compressore C3 risulta acceso per un totale di ore decisamente inferiore rispetto al compressore C2.

5 Conclusioni

Nel presente rapporto è stata presentata la metodologia messa a punto dal gruppo di lavoro per il controllo dei consumi dell'impianto aria compressa nel tempo.

Tale metodologia è stata applicata a un caso reale di un'azienda del settore alimentare, che ha messo a disposizione i dati relativi a consumi, produzione di aria compressa e altri energy drivers del proprio impianto di produzione dell'aria compressa, composto da tre compressori. Sono quindi stati analizzati in

particolare i dati dei due compressori in funzione nella settimana di raccolta dati, per i quali si è analizzato tramite analisi di correlazione l'influenza degli energy drivers sui consumi energetici e si è quindi creato un modello matematico del consumo energetico attraverso l'analisi di regressione. La significatività e validità dei modelli sono state verificate prima tramite il calcolo di indici statistici e poi tramite la costruzione di carte di controllo per la validazione. Tali modelli sono risultati efficaci per descrivere il comportamento energetico del sistema in esame. Nel caso di uno dei due compressori è stato anche possibile simulare una condizione di effettivo controllo dei consumi nel tempo, evidenziando l'efficacia e sensibilità delle carte di controllo.

Alla luce dei risultati ottenuti dalle attività eseguite quindi, la metodologia messa a punto e applicata ad un caso reale risulta efficace per la costruzione di un sistema di controllo dei consumi di impianti aria compressa in ambito industriale. Anche da queste prime analisi dei dati è emerso come sia possibile non solo fotografare il comportamento energetico del sistema, ma anche ottenere utili informazioni per l'individuazione di proposte di miglioramento. L'uso degli strumenti in ambito aziendale ha permesso di verificare come siano effettivamente facilmente adattabili e di semplice utilizzo, e come consentano di ottenere una conoscenza più approfondita dei sistemi tecnici in uso.

Da sottolineare anche l'importante lezione appresa durante l'elaborazione dei dati forniti dalle aziende contattate. È fondamentale evidenziare che non è sufficiente avere installato un sistema di monitoraggio dei consumi per avere l'efficienza energetica degli impianti sotto controllo. Tali sistemi, infatti, una volta installati non vengono sempre utilizzati al massimo delle loro potenzialità, sia in termini di qualità dei dati raccolti, sia in termini di qualità e quantità delle informazioni estrapolate. L'applicazione della metodologia qui riportata consente anche di prendere chiaramente coscienza delle potenzialità di risparmio introdotte da un efficace controllo dei consumi nel tempo.

6 Riferimenti bibliografici

1. Carbon Trust, " Monitoring and targeting. Techniques to help organisations control and manage their energy use ", (2012).
2. EVO, Efficiency Valuation Organization, " Core Concepts - International Performance Measurement and Verification Protocol ", (2016).
3. K. Bunse, M. Vodicka, P. Schonsleben, M. Brulhart, F.O. Ernst, " Integrating energy efficiency performance in production management - gap analysis between industrial needs and scientific literature ", *Journal of Cleaner Production*, 16 (2011), pp. 709-715.
4. V. Introna, V. Cesarotti, M. Benedetti, S. Biagiotti, R. Rotunno, " Energy Management Maturity Model: an organizational tool to foster the continuous reduction of energy consumption in companies ", *Journal of Cleaner Production*, 83 (2014), pp. 108-117.
5. Z.K. Morvay, D.D. Gvozdenac, " Applied Industrial Energy and Environmental Management " , (2008), Jhon Wiley and Sons.
6. M. Benedetti, V. Cesarotti, V. Introna, " From energy targets setting to energy-aware operations control and back: an advanced methodology for energy efficient manufacturing ", *Journal of Cleaner Production*, 167 (2017), pp. 1518-1533.
7. M. Benedetti, V. Cesarotti, V. Introna, J. Serranti, " Energy consumption control automation using Artificial Neural Networks and adaptive algorithms: proposal of a new methodology and case study ", *Applied Energy*, 165 (2016), pp. 60-71.
8. F. Bonfà, S. Salvatori, M. Benedetti, V. Introna, S. Ubertini, " Monitoring compressed air systems energy performance in industrial production: lesson learned from an explorative study in large and energy-intensive industrial firms ", *Energy Procedia*, 143 (2017).
9. P. Gabriele, E. Giaccone, S. Mancò, " Dispense del corso di Gestione dei Sistemi Energetici ", (2009), Politeko.
10. EVO, Energy Efficiency Organisation, " Uncertainty assessment for IPMVP - International Performance Measurement and verification protocol ", (2018).

11. F.Beretta, F.De Carlo, V.Introna, D.Saccardi , " Progettare e gestire l'efficienza energetica ", (2012), McGraw-Hill, Milano.