



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA INFORMATICA E DELL'AUTOMAZIONE

Analisi dati di un impianto di refrigerazione

Data analysis of a refrigeration plant

Relatrice:

Chiar.ma Prof.ssa
Silvia Maria Zanolì

Tesi di Laurea di:

Andrea Iannotti

Correlatore:

Dott. Ing. Crescenzo Pepe

Dott. Ing. Marco Luciani

Anno Accademico 2022/23

Sommario

Elenco figure	3
Elenco tabelle	4
1. Introduzione e scopo della tesi	5
2. La refrigerazione artificiale nel settore dell'industria alimentare.....	9
2.1. La refrigerazione artificiale	9
2.2. Componenti fondamentali di un impianto di refrigerazione industriale.....	9
2.2.1. Evaporatore.....	10
2.2.2. Condensatore	12
2.2.3. Compressore	13
2.2.4. Organi di laminazione e valvole di espansione	19
2.2.5. Dispositivi ausiliari.....	21
2.3. Ciclo frigorifero.....	22
3. Descrizione del caso di studio	25
3.1. Architettura generale dell'impianto.....	25
3.2. Logica attuale dell'impianto	26
4. Analisi della gestione dell'impianto	32
4.1. Trattamento dati.....	32
4.2. MATLAB	33
4.2.1. Importazione dati.....	33
4.2.2. Trattamento valori NaN.....	34
4.2.3. Valori inaspettati.....	36
4.2.4. Coefficiente di correlazione.....	42
4.2.5. Analisi delle Celle frigorifere	44
5. Conclusioni.....	48
Bibliografia e sitografia	50

Elenco figure

Figura 2-1: schema di principio di un sistema di refrigerazione a compressione.....	10
Figura 2-2: evaporatore con superficie a piastra [14].	11
Figura 2-3: evaporatore a fascio tubiero [14].....	12
Figura 2-4: condensatore raffreddato ad aria [14].	12
Figura 2-5: condensatore raffreddato ad acqua [14]	13
Figura 2-6: compressore alternativo [14].....	14
Figura 2-7: principio di compressione di un compressore scroll [14].	15
Figura 2-8: struttura dei compressori a vite.	16
Figura 2-9: porta di aspirazione e scarico dei compressori a vite.	16
Figura 2-10: fase di aspirazione del gas e meccanismo a V_i variabile.	17
Figura 2-11: valvole di espansione termostatiche elettroniche.	20
Figura 2-12: valvola a galleggiante ad alta pressione.	20
Figura 2-13: valvola di espansione manuale.	21
Figura 2-14: diagramma pressione-entalpia [23]	23
Figura 3-1: rappresentazione grafica dell'impianto	25
Figura 3-2: gerarchia dell'automazione per l'impianto considerato.	26
Figura 3-3: diagnostica di rete Profinet dell'impianto.	28
Figura 3-4: impostazioni fasce orarie di funzionamento.	29
Figura 3-5: esempio di rappresentazione dello stato di una cella.	29
Figura 4-1: creazione tabella errori vuota	34
Figura 4-2: conversione dei valori vuoti a valori nulli.....	34
Figura 4-3: algoritmo di sostituzione	35
Figura 4-4: algoritmo applicato alla temperatura interna della cella 2.	36
Figura 4-5: algoritmo valori non coerenti.	38
Figura 4-6: esempio ipotetico errore range.	38
Figura 4-7: sensori cella 5 (check sui limiti di validità).	39
Figura 4-8: differenza di temperatura della cella 5	40
Figura 4-9: spike cella 5	41
Figura 4-10: esempio spike e freezing temperature cella 5.	41
Figura 4-11: codice di correlazione	42
Figura 4-12: consumi del compressore 3	43
Figura 4-13: modello cella 2	44
Figura 4-14: temperatura infrasettimanale e durante il weekend.....	45
Figura 4-15: stato refrigerante EA4 e chiamata ai compressori della cella 2.	46

Elenco tabelle

Tabella 4-1: esempio file.xlsx.....	33
Tabella 4-2: matrice di correlazione dei sensori della cella 5.....	42

1. Introduzione e scopo della tesi

La refrigerazione è un campo diversificato in cui scienza e ingegneria si incontrano coprendo una vasta gamma di processi, dalla conservazione degli alimenti al controllo della qualità dell'aria interna e ai processi industriali, alla produzione di alimenti e bevande e al raffreddamento di sale di calcolo dove vi è la presenza di numerosi computer. La refrigerazione appare complessa a causa della sua natura multidisciplinare che combina termodinamica, meccanica dei fluidi e trasferimento di calore in ciascuno dei suoi processi e applicazioni [1]. Un rapporto del 2019 del IIR (International Institute of Refrigeration) afferma che circa 5 miliardi di sistemi di condizionamento, pompe di calore e refrigerazione operano in tutto il mondo. La vendita annuale in tutto il mondo di questi sistemi è di circa 500 miliardi di dollari. Nel mondo, l'industria della refrigerazione impiega un numero di persone superiore a 15 milioni [2]. Il settore della refrigerazione è tra i settori ad alta intensità energetica a livello globale, consumando circa il 20% dell'elettricità mondiale. L'uso inefficiente dell'energia in queste applicazioni rappresenta uno spreco di risorse preziose e contribuisce al riscaldamento globale [3]. La maggior parte dell'effetto del riscaldamento globale causato dai sistemi di refrigerazione deriva dalla produzione dell'energia necessaria per alimentarli, mentre solo una piccola parte proviene dal rilascio di alcuni refrigeranti nell'ambiente. È soprattutto negli ultimi anni che la ricerca è diventata più intensa e questi sistemi hanno subito un vero e proprio cambio di paradigma a livello tecnologico e una costante evoluzione volta al risparmio energetico e alla tutela dell'ambiente [4], [5]. In questo contesto, un driver è rappresentato dall'Industria 4.0.

Il termine Industria 4.0 è la propensione dell'odierna automazione industriale a inserire alcune nuove tecnologie produttive per migliorare le condizioni di lavoro, creare nuovi modelli di business, aumentare la produttività degli impianti e migliorare la qualità dei prodotti. L'Industria 4.0 sta giocando un ruolo fondamentale per quanto riguarda gli aspetti di comunicazione e scambio di dati [6]. In questo contesto, gli strumenti per l'archiviazione, l'acquisizione, la selezione e l'analisi dei dati possono assumere una funzione cruciale per le valutazioni online e offline di diversi KPIs (Key Performance Indicators) e per la progettazione di sistemi e procedure di controllo e ottimizzazione [7]. Nel seguito vengono riportate e discusse alcune tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0:

1. Integrazione verticale e orizzontale;

Con il termine integrazione ci si riferisce all'adozione di specifici sistemi informativi in grado di interagire con fornitori e clienti per scambiarsi informazioni (integrazione verticale),

oppure in grado di interagire con aziende operanti nella stessa filiera (integrazione orizzontale).

Il fine è quello di avviare un processo in cui sistemi di produzione statici evolvano in sistemi di produzione cyber-fisici, in cui tutti gli step della catena del valore, dal produttore al consumatore, comunicano tra di loro, delineando una nuova concezione di fabbrica connessa. Si passa così dal vecchio concetto di fabbrica tradizionale alla fabbrica intelligente, detta appunto Smart Factory, in cui i processi informatici e di controllo vengono digitalizzati ed eseguiti in modo integrato.

In questo modo, tutti i reparti aziendali possano avere accesso a dati di produzione e logistici, rendendo l'intero sistema produttivo molto flessibile e capace di adeguarsi rapidamente alle esigenze del mercato. Per implementare l'integrazione verticale e orizzontale si utilizzano:

- Software di PLM (Product Life Management), per la gestione del ciclo di vita del prodotto e per ottimizzare lo sviluppo, il lancio, la modifica e il ritiro di prodotti o servizi dal mercato. Si basa sull'accesso condiviso a una fonte comune da cui attingere dati, informazioni e processi relativi al prodotto.
- Piattaforme di gestione come i sistemi WMS (Warehouse Management System), il cui obiettivo principale è di controllare e ottimizzare i movimenti ed il deposito di materiali nel magazzino. L'implementazione di queste tecnologie permette inoltre di conoscere l'esatta posizione e condizione di ogni singola risorsa aziendale e vedere le correlazioni tra i processi dell'azienda. In questo modo, le decisioni di business possono essere prese con più consapevolezza e rapidità; ne consegue una maggiore efficienza ed una migliore capacità di soddisfare le esigenze della clientela

2. Comunicazione multidirezionale tra processi produttivi e prodotti

La comunicazione diretta tra macchine è qualcosa che ha implicazioni molto interessanti. Sensori, dati, applicazioni e processi sono tra i principali elementi da analizzare.

I sensori sono ormai diffusissimi su macchinari di ogni dimensione: i costi di produzione e il loro fabbisogno energetico sono bassissimi. Dotare un macchinario di sensori, è un primo necessario passo che permette di raccogliere dati. I sensori, appunto, permettono la raccolta di dati di vario tipo, che possono essere poi trattati tramite algoritmi, e utilizzati proficuamente attraverso applicazioni specifiche; consentendo agli operatori, agli analisti e alle macchine stesse di prendere decisioni in maniera più consapevole. La comunicazione multidirezionale all'interno del processo viene applicata svolgendo le seguenti azioni:

- Si connettono tramite sensori i macchinari di diverse linee, raccogliendo i dati in tempo reale per poterli analizzare e quindi prevedere problemi imminenti programmando un intervento prima che si blocchi l'impianto.
- Si collegano i dati della macchina di produzione a un'applicazione che, dalla consolle del macchinario, fornisce dati e metriche di produzione pensate per essere comprese e gestite direttamente dall'operatore.
- I macchinari vengono dotati delle funzionalità aggiuntive quali operazioni da remoto, come la regolazione dei parametri di produzione, la programmazione dei bracci robotici, o la manutenzione ordinaria.

3. Cloud

Quando si parla di Cloud ci si riferisce all'insieme di tecnologie rivolte all'archiviazione, all'elaborazione e alla trasmissione di dati e l'insieme di applicativi e di software che consentono all'utilizzatore di poter disporre delle risorse di cui necessita (storage, applicativi, programmi, servizi). Il Cloud assume un ruolo strategico all'interno delle aziende, in quanto la digitalizzazione dei processi ha reso disponibile una grande quantità di dati (Big Data), la cui gestione ottimale da parte delle imprese rappresenta un fattore critico di successo per il futuro. Di seguito vengono esposti i vantaggi dell'utilizzo del Cloud:

- La dotazione, gestione, manutenzione di sistemi hardware e software viene affidata a fornitori di soluzioni Cloud, minimizzando così gli aspetti tecnologici a carico degli utilizzatori della tecnologia stessa.
- La diretta conseguenza del fenomeno Cloud è quella di evitare alle imprese investimenti in infrastrutture informatiche e nelle relative politiche di rinnovamento dell'hardware, della manutenzione e degli upgrade di sistema, a favore di un più semplice accesso a tali sistemi secondo una logica a consumo.

Per quanto riguarda i sistemi di refrigerazione, in letteratura sono presenti diversi risultati per la valutazione delle prestazioni energetiche, per il controllo, per l'ottimizzazione e per l'analisi dei dati.

Un ruolo cruciale nelle applicazioni di refrigerazione è svolto dagli aspetti hardware e software. I dispositivi hardware devono essere conformi alle specifiche richieste degli impianti, mentre i software coprono diversi aspetti, ad esempio i sistemi di ottimizzazione e controllo. I sistemi di ottimizzazione e controllo devono garantire che, ad esempio, quantità come temperatura, pressione e umidità soddisfino le specifiche assegnate, limitando al contempo il consumo di energia e di conseguenza i

costi [8]. Questi sistemi interessano tutti i livelli della gerarchia di automazione [9] e possono implementare controllori locali e olistici insieme alle architetture e alle infrastrutture necessarie per la comunicazione e lo scambio di dati. Esempi di controllori sono i sistemi APC (Advanced Process Control) ([10], [11], [12]).

Il presente lavoro di tesi nasce dall'esigenza di analizzare l'effettivo comportamento del sistema di controllo e supervisione di un impianto di refrigerazione industriale multi-compressore, al fine di verificarne il corretto funzionamento, evidenziando eventuali anomalie di comportamento o incoerenze nella gestione e valutarne efficienza ed efficacia. Come accennato in precedenza, gli impianti di refrigerazione industriali sono impianti ad alto consumo energetico, ciò implica che con i costi attuali dell'energia e con lo spettro di una crisi energetica nel breve futuro, la corsa al risparmio energetico inciderà in maniera significativa anche sulla frigoconservazione industriale, rendendo competitivi gli impianti a maggior efficienza.

Il presente elaborato è strutturato nel seguente modo:

- Nel secondo capitolo viene introdotta la refrigerazione artificiale nel settore dell'industria alimentare e i principali componenti meccanici del circuito frigorifero, necessari per la comprensione dei principi di funzionamento degli impianti di refrigerazione.
- Nel terzo capitolo si fornisce una descrizione dell'impianto di refrigerazione reale oggetto di studio, concentrandosi sulla sua architettura, sui componenti meccanici presenti e sulla logica di controllo e supervisione implementata.
- Nel quarto capitolo viene mostrata l'analisi effettuata dell'impianto di refrigerazione, descrivendo il preprocessamento dati effettuato in Microsoft Excel e le procedure di importazione, visualizzazione e analisi dati implementati in MATLAB. Vengono discussi i punti critici incontrati durante il trattamento dei dati ed esposte le soluzioni trovate. Inoltre, si illustrano gli algoritmi usati per la creazione di grafici significativi e per l'esecuzione di analisi specifiche, necessari per lo studio dell'impianto. Infine, si evidenziano le problematiche emerse durante l'attività di analisi riportando anche le soluzioni proposte per fronteggiarle.
- Nel quinto ed ultimo capitolo vengono esposte le conclusioni. Affrontando le problematiche incontrate e le soluzioni proposte.

2. La refrigerazione artificiale nel settore dell'industria alimentare

2.1. La refrigerazione artificiale

Storicamente, uno dei problemi in cui si è imbattuto l'uomo è stato quello della conservazione dei cibi, in particolare di quelli facilmente deperibili come pesce e carne. Le soluzioni inizialmente trovate, e valide tuttora per alcuni tipi di alimenti, prevedevano comunque la perdita parziale o totale delle caratteristiche organolettiche e nutrizionali iniziali. Tra queste soluzioni si annoverano: la conservazione sotto sale, l'affumicatura, l'essiccazione. Ci si accorse inoltre che le basse temperature non solo consentivano una buona conservazione degli alimenti per tempi più lunghi ma soprattutto non alteravano eccessivamente le caratteristiche organolettiche del prodotto di partenza.

La refrigerazione artificiale, sia quella destinata ad uso domestico che quella indirizzata ad uso industriale, si basa sul raffreddamento di un fluido, generalmente acqua o aria, tramite l'evaporazione di un altro fluido detto refrigerante. Un refrigeratore o gruppo frigorifero è una macchina termica che, sfruttando le funzionalità di un circuito frigorifero, consente di sottrarre calore ad un fluido termovettore (aria o acqua) attraverso la compressione e espansione di un fluido aeriforme refrigerante. Ciò che differenzia i vari tipi di refrigeratori è, fondamentalmente, il tipo di fluido refrigerante. Per la refrigerazione domestica si impiega normalmente freon, mentre per le applicazioni industriali si possono impiegare ammoniaca, idrofluorocarburi, idrocarburi. L'ammoniaca è, attualmente, il fluido refrigerante che garantisce un rendimento frigorifero nettamente superiore agli altri fluidi. Pur essendo un gas tossico, la fuoriuscita di ammoniaca dagli impianti frigoriferi che la contengono è un evento estremamente raro (sono più probabili minime emissioni da guarnizioni in fibra che non vengono usate spesso); pertanto, con l'odierna tecnologia e legislazione, la frigoconservazione ad ammoniaca è un processo industriale ampiamente sicuro ed abbondantemente utilizzato. [13]

2.2. Componenti fondamentali di un impianto di refrigerazione industriale

Il ciclo meccanico di refrigerazione, o ciclo a compressione di vapore, richiede un numero di componenti chiave per costruire un sistema completo (vedere Figura 2-1). La presente sezione tratta in modo dettagliato ognuno di tali componenti, descrivendone la loro costruzione e funzione.

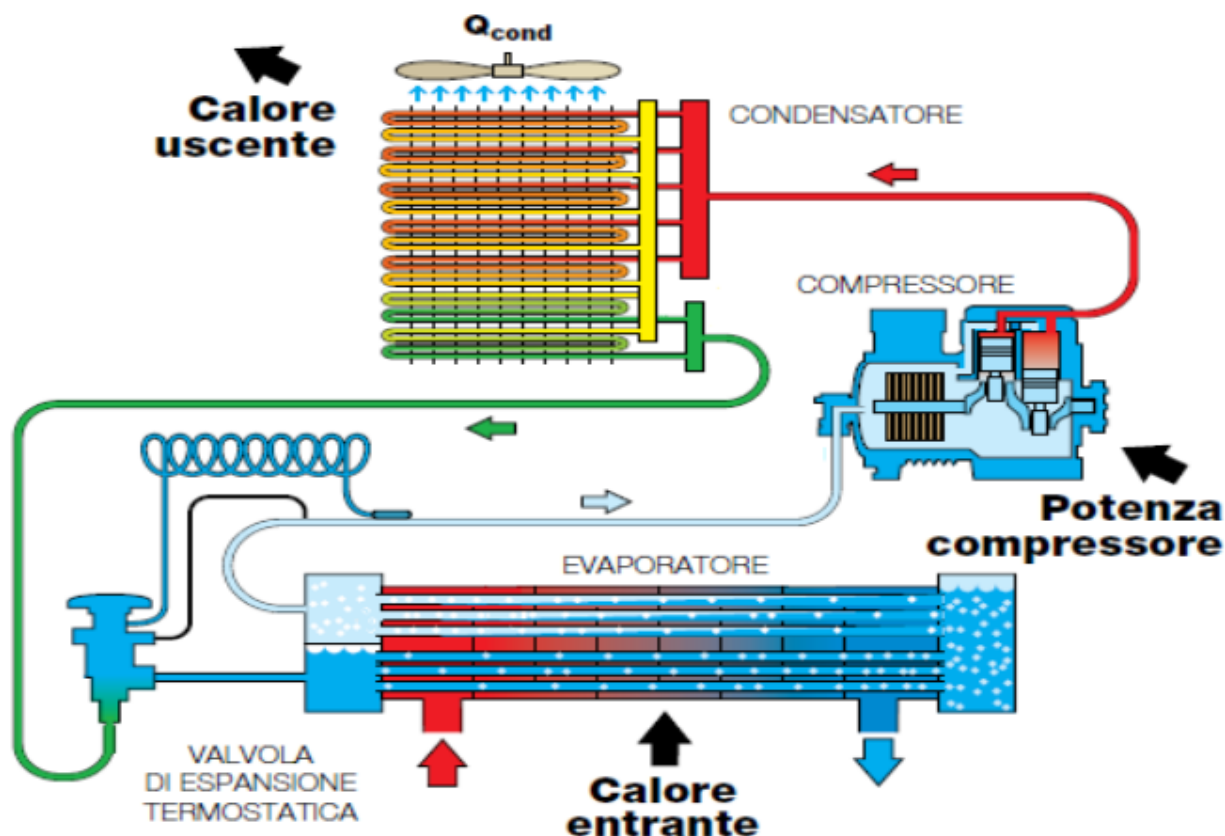


Figura 2-1: schema di principio di un sistema di refrigerazione a compressione.

2.2.1. Evaporatore

L'evaporatore è uno scambiatore di calore in cui il calore assorbito dal refrigerante durante il processo di evaporazione è ceduto al fluido intermedio (es. aria o acqua) per essere raffreddato. Una parte di calore inoltre è assorbita dal refrigerante nello stato di vapore saturo e diventa quindi surriscaldato. Un evaporatore può essere utilizzato per raffreddare l'aria, l'acqua e qualunque tipo di gas o di liquido. Si presenta in molte forme e dimensioni, design e forme di costruzione. I tre tipi base sono:

1. Tubo alettato

I tubi alettati sono composti da alette di alluminio espanso o saldato sui tubi in rame, questo accorgimento viene adottato per ottenere una maggiore efficacia, poiché le alette devono essere collegate a un tubo per garantire una buona conduttività termica per tutta la vita dell'evaporatore. L'obiettivo è farli entrare in contatto con l'aria che normalmente passerebbe fra i tubi senza rilasciare calore così da rendere questo metodo più efficiente [14].

2. Superficie a piastra

Le superfici a piastra sono formate da due piastre opposte in acciaio o in rame saldate in acciaio o rame pressato (vedere [Figura 2-2](#)). Un canale per il refrigerante è creato da canali pressati disposti nelle piastre e il prodotto finito può essere costruito in una grande varietà di forme. Questi evaporatori sono economici da produrre e facili da pulire e mantenere [14].

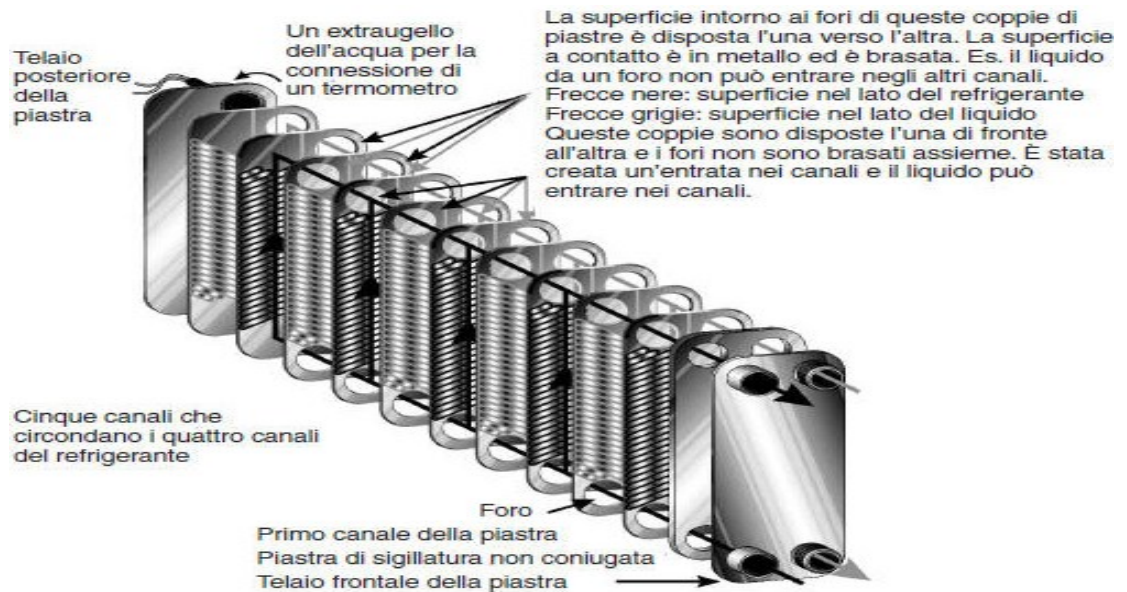


Figura 2-2: evaporatore con superficie a piastra [14].

3. Fascio tubiero

Il fascio tubiero è utilizzato per le applicazioni di raffreddamento del liquido o il raffreddamento ad aria sotto zero dove si verifica la formazione di ghiaccio, il cui effetto sui tubi a fascio tubiero (costruiti in rame e sono a contatto con il fluido che deve essere raffreddato) è meno acuto rispetto ai tubi alettati. Questi sono facilmente pulibili e possono manualmente essere disgelati mentre l'impianto è ancora in funzione (vedere [Figura 2-3](#)). Le forme sono solitamente a zigzag o a bobina elicoidale [14].

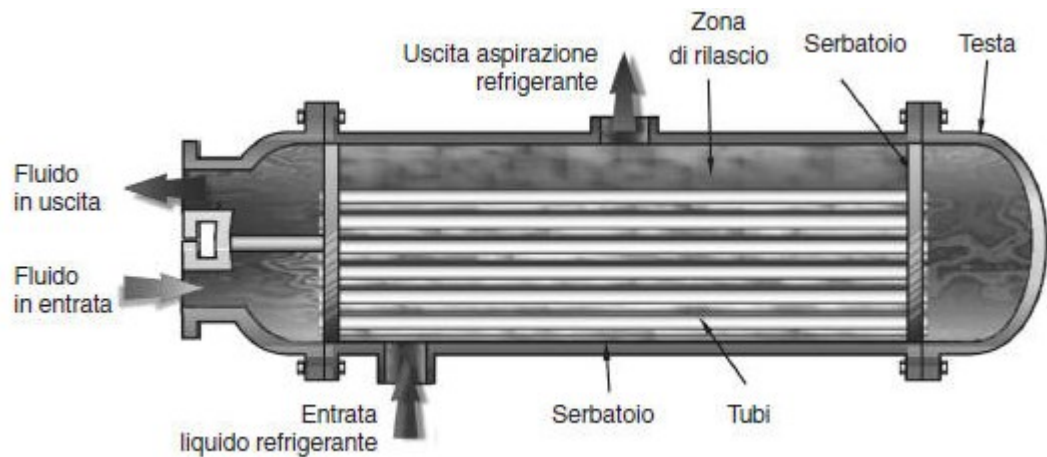


Figura 2-3: evaporatore a fascio tubiero [14].

2.2.2. Condensatore

Il condensatore ha il compito di smaltire il calore immagazzinato dal liquido refrigerante durante il ciclo frigorifero. I fluidi ai quali il calore sottratto durante il ciclo può essere ceduto sono l'aria oppure l'acqua.

1. Raffreddamento ad aria

I condensatori con raffreddamento ad aria sono normalmente montati esternamente e sono disponibili in tutte le forme e taglie fino a centinaia di kilowatt di potenza termica dissipata (vedere [Figura 2-4](#)). Le batterie sono costruite utilizzando alette in alluminio montate su tubi in rame [14].



Figura 2-4: condensatore raffreddato ad aria [14].

2. Raffreddamento ad acqua

I condensatori con raffreddamento ad acqua sono fabbricati con tubi di rame stampati su gruppi di alette di alluminio (vedere [Figura 2-5](#)). I tubi dell'acqua sono di rame trafilato a

freddo, montati in fogli di tubi d'acciaio e l'intero assemblaggio è montato all'interno di un involucro d'acciaio. I cappucci protettivi in metallo delle parti estreme sono a volte rimovibili per consentire la pulizia periodica dei tubi del condensatore. La disposizione più comune per i tubi è la forma ad 'U' e soltanto un'estremità ha il cappuccio rimovibile per la pulizia. Questi condensatori sono progettati secondo una vasta gamma di capacità che vanno dai 10kW ai 500 kW [14].

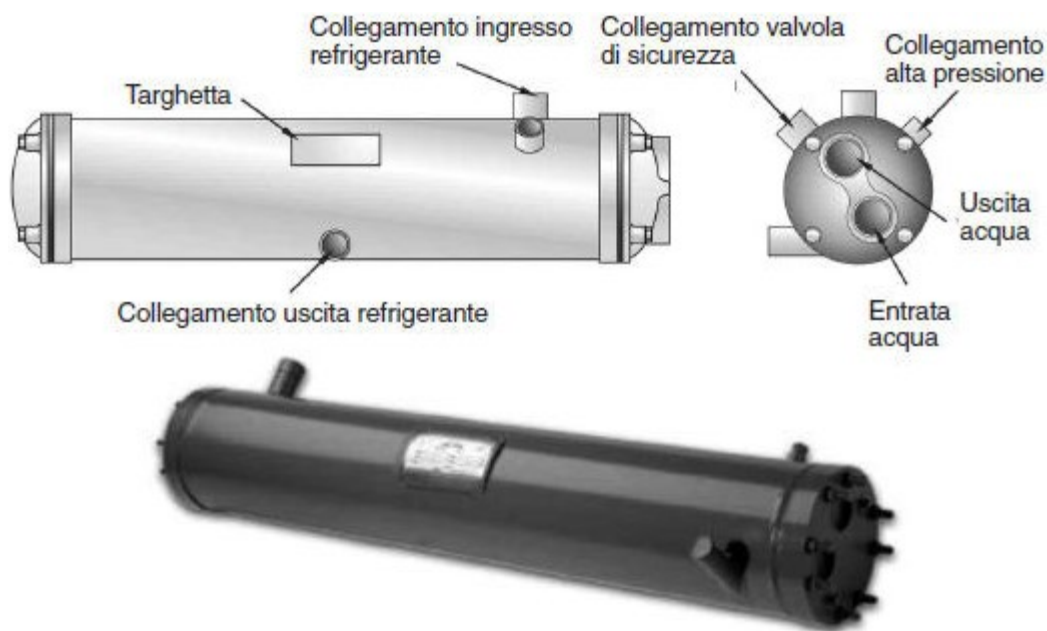


Figura 2-5: condensatore raffreddato ad acqua [14]

2.2.3. Compressore

Il compressore rappresenta il cuore del sistema di refrigerazione a compressione di vapore. Il compito di questo dispositivo pneumoforo è essenzialmente quello di innalzare la pressione del fluido refrigerante attraverso una riduzione meccanica del suo volume, aumentandone di conseguenza la temperatura. Attraverso questo cambiamento di pressione il refrigerante surriscaldato fluisce nel sistema.

Ogni compressore è caratterizzato dal rapporto di compressione, definito come la pressione assoluta di mandata (uscita del compressore) diviso la pressione assoluta di ingresso (ritorno), in unità coerenti; è un numero puro, solitamente espresso in forma frazionaria. I vari tipi di compressori possono essere classificati in base al principio meccanico di funzionamento in due categorie principali:

1. compressori volumetrici

2. compressori dinamici

I compressori volumetrici, anche detti compressori a camere chiuse, sono macchine operatrici che trasferiscono energia meccanica ad un fluido comprimibile mediante pareti mobili; la pressione del gas viene fatta aumentare costringendolo in un volume progressivamente decrescente; a seconda che il movimento delle pareti interne alla macchina avvenga per moto alternativo di uno stantuffo o per la rotazione di un organo meccanico i compressori volumetrici si dividono in alternativi o rotativi. Nei compressori dinamici la compressione è ottenuta sfruttando l'energia cinetica impressa al gas da opportuni meccanismi (si sfrutta il principio della variazione del momento della quantità di moto). Sul mercato sono disponibili molti modelli differenti di compressori, in termini di tipo di contenitore e sistema di compressione. Di seguito si elencano diverse opzioni tra le più diffuse: [14]

1. Compressori alternativi

Sono caratterizzati dalla presenza di una camera a volume variabile realizzata tramite il moto alerno di uno stantuffo all'interno di un cilindro (vedere [Figura 2-6](#)). Il moto alternato è ottenuto mediante un meccanismo biella-manovella che trascina l'albero tra due posizioni estreme corrispondenti al volume massimo e minimo. Ogni cilindro è dotato di una valvola di aspirazione e di una valvola di scarico per convogliare il refrigerante verso il condensatore dopo la compressione [15]. Con questo tipo di compressori si possono ottenere alti rapporti di compressione per cui sono utilizzati principalmente in applicazioni che richiedono una capacità di raffreddamento molto elevata. In genere sono parecchio rumorosi e generano molte vibrazioni percepite e propagate lungo parte del circuito frigorifero; inoltre sono più suscettibili al ritorno del liquido [16].

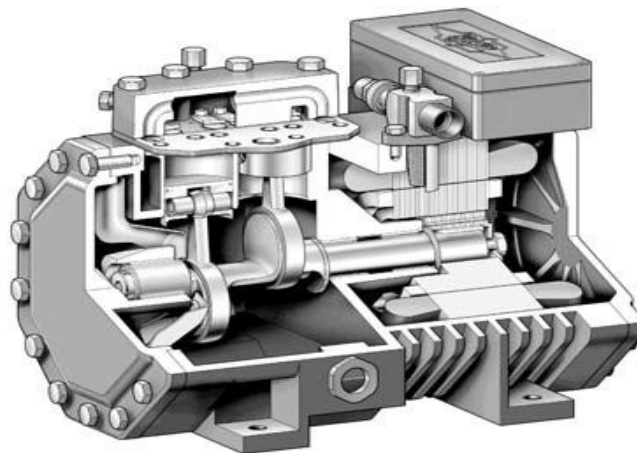


Figura 2-6: compressore alternativo [14].

2. Compressori scroll

Utilizzano due spirali, una fissa e l'altra mobile e accoppiata al motore, assemblate in modo da rimanere in contatto l'una con l'altra nelle varie posizioni e formare una serie di sacche sempre più sottili verso il centro (vedere [Figura 2-7](#)). Il refrigerante viene compresso dalla periferia verso il centro grazie alla rotazione della spirale mobile che ruota all'interno di quella fissa. Questi compressori hanno peso e dimensioni ridotte rispetto ai compressori alternativi di pari capacità e hanno il vantaggio di essere estremamente efficienti e silenziosi [17].

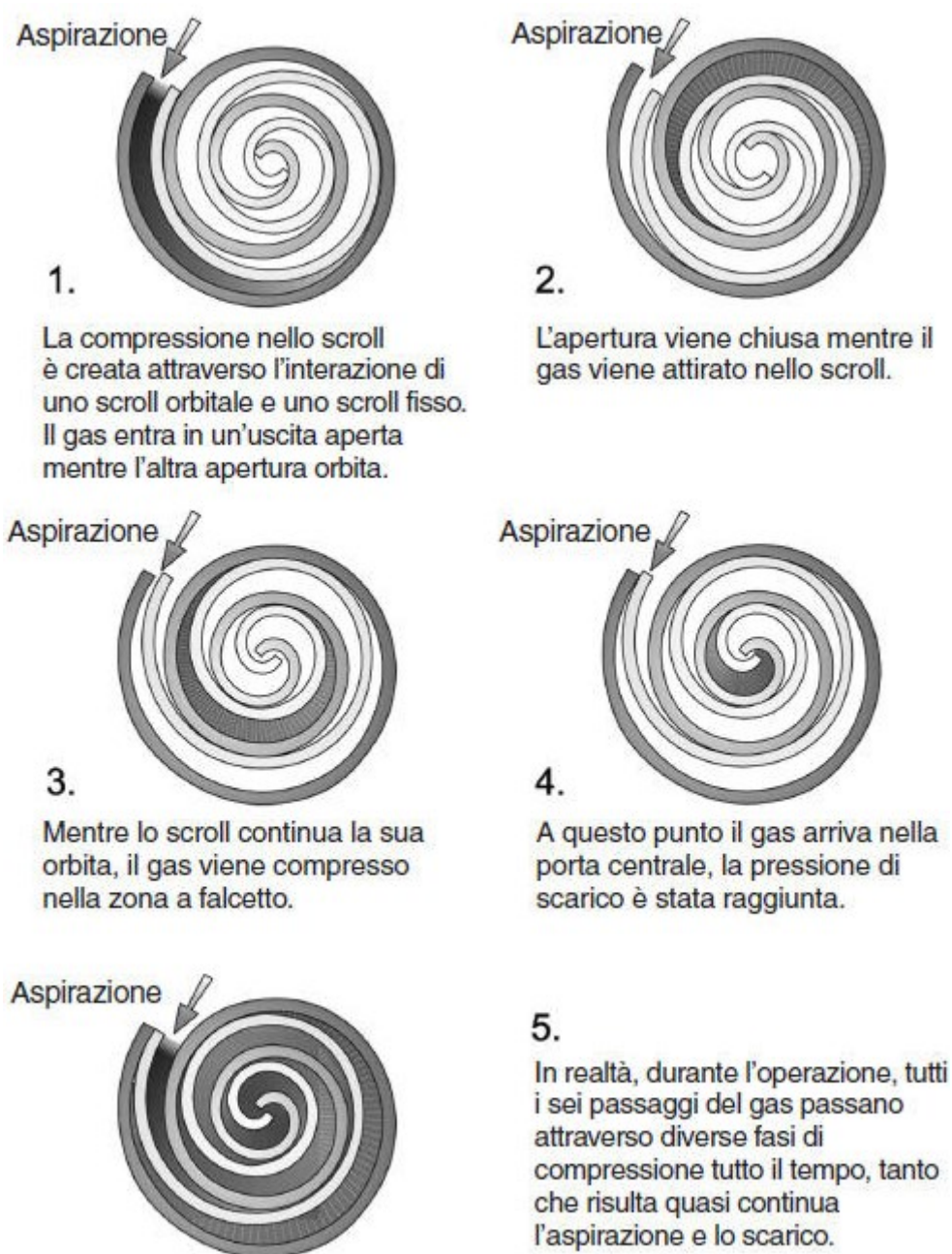


Figura 2-7: principio di compressione di un compressore scroll [14].

3. Compressori a vite

Sono compressori rotativi a vite nei quali il gas refrigerante viene aspirato in una cavità dove il suo volume viene gradualmente ridotto ed infine viene scaricato sotto forma di gas ad alta pressione (vedere [Figura 2-8](#)). Più specificamente, la cavità sigillata è composta da una carcassa e da una coppia di rotori a maglie incrociate al suo interno, chiamati rotore maschio (M) e rotore femmina (F), che si intersecano l'uno nell'altro e ruotano in direzioni opposte. I rotori sono diversi per cavo e numero di lobi delle viti: il numero di lobi delle viti è 4 per il rotore M e 6 per il rotore F. Il volume della cavità sigillata viene ridotto in corrispondenza della rotazione dei rotori. Il gas intrappolato nella cavità viene quindi compresso ed infine scaricato. Insieme alla carcassa del rotore, questi due rotori costituiscono gli elementi essenziali del compressore per aspirare e comprimere il gas refrigerante.

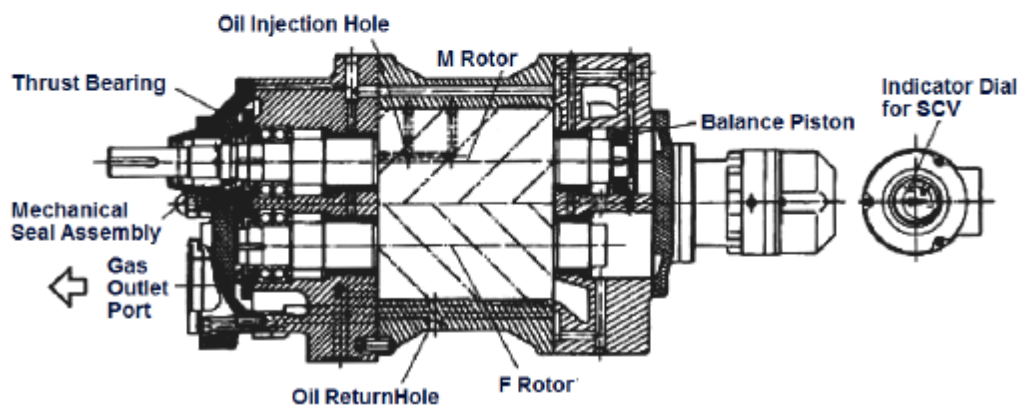


Figura 2-8: struttura dei compressori a vite.

Uno dei due terminali di ciascun rotore costituisce l'estremità di aspirazione del gas, mentre l'altro corrisponde all'estremità di scarico del gas compresso. Mentre i rotori ruotano all'interno di un certo intervallo angolare, le loro estremità di aspirazione aprono la porta di aspirazione; quando i rotori ruotano su di un altro intervallo angolare le estremità di aspirazione chiudono la porta. Tale meccanismo è analogo anche per le estremità di scarico e la porta di scarico ([Figura 2-9](#)) e la porta di scarico ([Figura 2-9](#)).

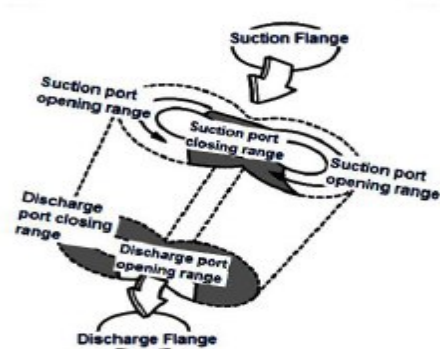
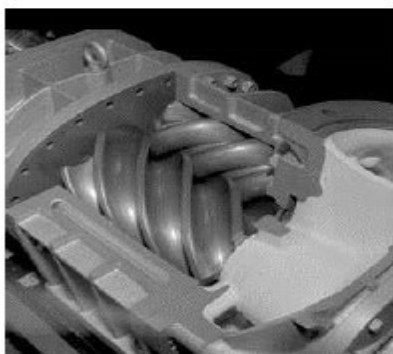


Figura 2-9: porta di aspirazione e scarico dei compressori a vite.

Come mostrato nella prima parte della [Figura 2-10](#), all'inizio della fase di aspirazione i rotori con diversi profili dei denti sono innestati. Quando i rotori girano in direzioni opposte, il volume tra i profili dei denti del rotore M e F e la carcassa del compressore aumenta gradualmente a partire dal lato di aspirazione. Quando il volume raggiunge il suo massimo, i rotori isolano dalla porta di aspirazione il gas racchiuso dai rotori e dalla carcassa del compressore, quindi continua la rotazione.

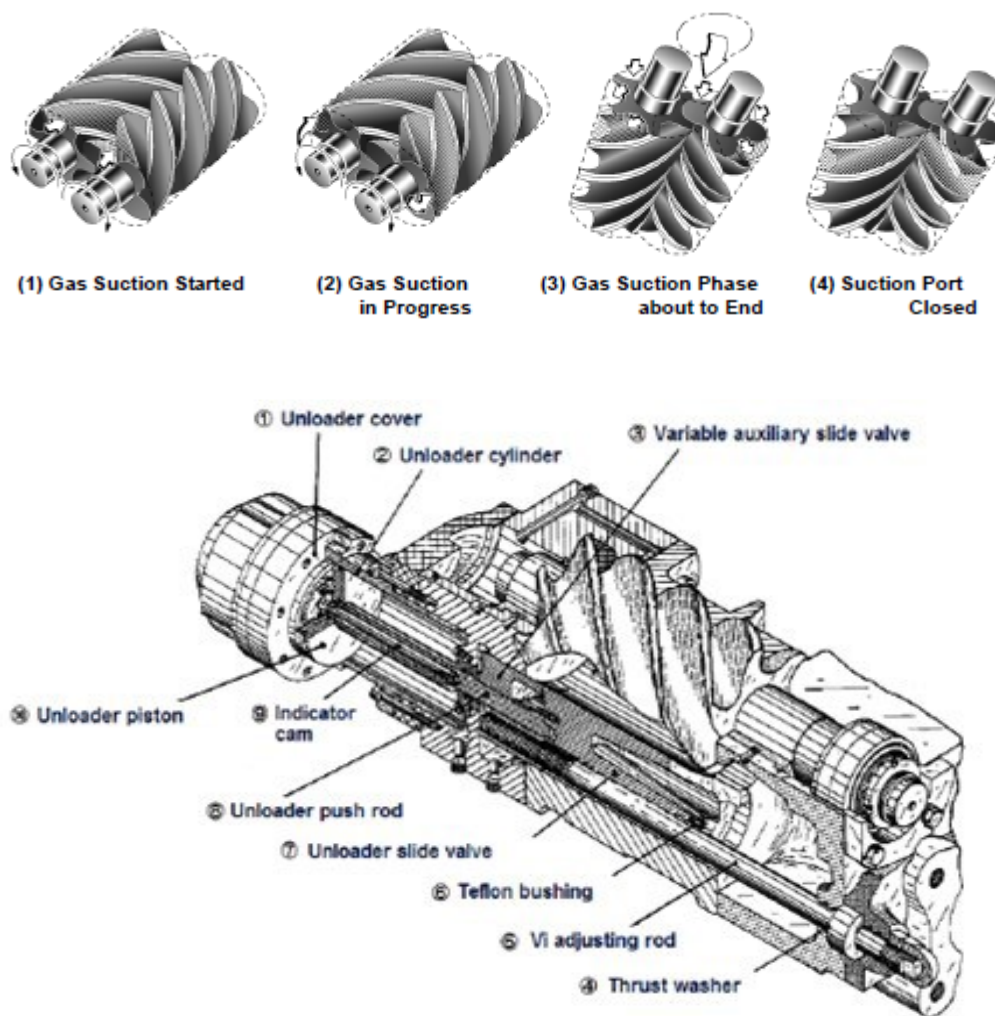


Figura 2-10: fase di aspirazione del gas e meccanismo a Vi variabile.

Man mano che i rotori ruotano, il volume tra i lobi diminuisce così come le scanalature del rotore. La linea di tenuta si sposta verso il lato di scarico, comprimendo in tal modo il gas refrigerante intrappolato. Nei pressi della porta di scarico il volume tra i lobi del rotore e le scanalature diminuisce a un livello predeterminato. Per effetto delle rotazioni dei rotori, il gas refrigerante compresso viene spinto/espulso verso l'apertura di scarico.

La particolarità del modello dei compressori a vite consiste nel meccanismo per modificare rapidamente il rapporto volumetrico intrinseco V_i , che è definito dalla seguente formula:

$$V_i = \frac{\text{volume del gas refrigerante aspirato prima dell'inizio della compressione}}{\text{volume del gas refrigerante prima dell'apertura della porta di scarico}}$$

Mentre nei compressori alternativi la capacità di compressione del refrigerante viene controllata impostando la pressione raggiunta dallo spostamento del pistone a un livello ottimale per l'applicazione prevista, nei compressori a vite viene controllata impostando il volume in cui il gas refrigerante aspirato deve essere ridotto. In altre parole, il controllo della capacità di compressione nel caso di un compressore a vite è un controllo del rapporto volumetrico, che è appunto il rapporto volumetrico intrinseco V_i .

Nel caso del compressore a vite senza il meccanismo di V_i variabile (vedere la seconda parte della Figura 2-10), i valori di tale rapporto sono fissati ad un valore specifico.

Nel caso di V_i variabile, il suo valore è determinato dalla combinazione dei seguenti due fattori:

- La dimensione della porta assiale nella testa del cuscinetto (porta che si estende nella direzione dell'asse del rotore);
- La dimensione della porta radiale nella valvola di scarico a cassetto (porta che si estende nella direzione perpendicolare alla direzione dell'asse del rotore).

La valvola di scarico a cassetto, che viene mossa idraulicamente in direzione assiale tramite il cilindro e il pistone di scarico, esegue automaticamente il controllo della capacità (controllo della quantità di gas di aspirazione) di ciascun compressore. Il moto della valvola a cassetto viene comandato attraverso l'equilibrio delle forze in ragione delle pressioni agenti su di essa. Da un lato della valvola a cassetto si ha la pressione di aspirazione, dall'altro l'alta pressione. La pressione presente all'interno del cilindro stabilisce il verso di scorrimento del pistone.

L'impianto dell'indicatore di scarico è collegato al cilindro di scarico tramite la camma indicatrice, consentendo all'indicatore di individuare le posizioni sia della valvola a cassetto ausiliaria a V_i variabile che della valvola a cassetto di scarico. La camma dell'indicatore ha una scanalatura a spirale, in cui è inserito in modo mobile il perno di guida impiantato nell'asta di spinta della valvola a cassetto di scarico. Poiché questa combinazione di perno e camma converte uno spostamento lineare della valvola a cassetto di scarico in uno spostamento angolare, il puntatore dell'indicatore individua la posizione della valvola a cassetto.

Il rotore M è direttamente accoppiato a un motore elettrico bifase e azionato a una velocità che è quella di partenza. Mediante l'impiego di un inverter si possono variare i giri di rotazione e di conseguenza la velocità del motore, rendendo possibile la modulazione della capacità del compressore [18].

2.2.4. Organi di laminazione e valvole di espansione

I dispositivi di limitazione regolano l'iniezione del liquido refrigerante nell'evaporatore. La strozzatura creata dall'organo di laminazione consente di abbassare la pressione del refrigerante liquido proveniente dal condensatore, causando una relativa diminuzione di temperatura, in modo da corrispondere all'attrezzatura e alle caratteristiche di carico. Questi dispositivi sono progettati per adattare in modo proporzionale la velocità con cui il refrigerante entra nella serpentina di raffreddamento con la velocità di evaporazione; tale velocità dipende, ovviamente, dalla quantità di calore che viene rimossa dallo spazio refrigerato.

L'organo di laminazione è anche preposto a controllare il flusso di refrigerante che attraversa il circuito. Una quantità eccessiva rischia di danneggiare il compressore perché non riesce ad evaporare del tutto nell'evaporatore e rimane in parte liquida. Una quantità insufficiente riduce di molto l'efficienza della macchina in quanto l'evaporatore non viene sfruttato al meglio [14].

I dispositivi di limitazione più comuni sono:

1. Valvole di espansione termostatica

Le valvole di espansione termostatica sono i dispositivi di laminazione più utilizzati (vedere [Figura 2-11](#)). Rappresentano dei dispositivi studiati per regolare il flusso di liquido all'evaporatore ad un ritmo pari a quello di evaporazione. Vengono installate a monte dell'evaporatore e separano l'impianto in un lato ad alta pressione e un lato a bassa pressione. Nel caso di utilizzo in circuiti di raffreddamento, la valvola avrà un grado di apertura minore in corrispondenza di valori di temperatura più bassi e maggiore in corrispondenza di temperature più elevate. Sotto una temperatura minima (soglia d'intervento) sarà completamente chiusa mentre sarà completamente aperta per temperature ritenute ottimali per il sistema considerato [19].

Le valvole di espansione termostatiche possono essere di due tipi: meccaniche e elettroniche.



Figura 2-11: valvole di espansione termostatiche elettroniche.

2. Valvola a galleggiante ad alta pressione

Questa valvola è situata a valle del condensatore e mantiene il livello del liquido in una camera laterale ad alta pressione affinché l'evaporatore riceva refrigerante da una pressione intermedia attraverso la valvola di riduzione (vedere [Figura 2-12](#)). Le valvole galleggianti a bassa ed alta pressione sono limitate all'uso sui grandi impianti [14].

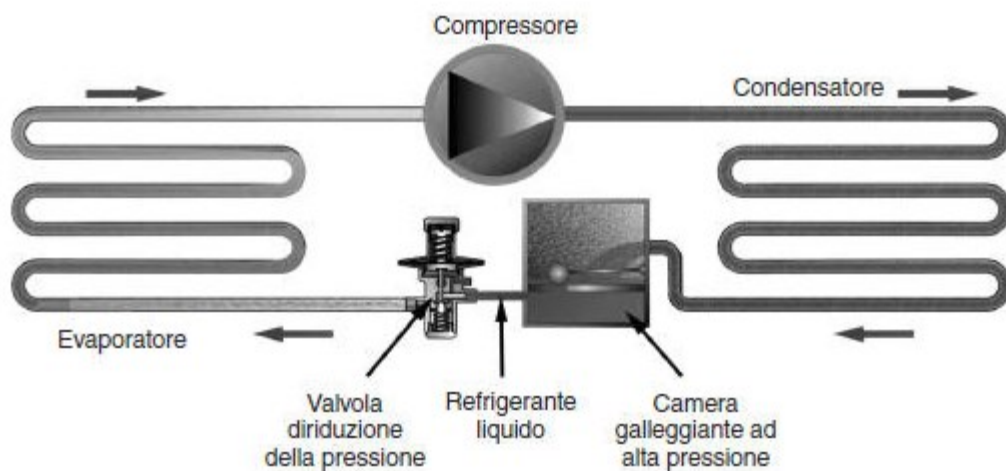


Figura 2-12: valvola a galleggiante ad alta pressione.

3. Tubi capillari

Si tratta semplicemente di un tratto di tubo di piccolo diametro utilizzato come condotto del liquido prima dell'evaporatore. Il piccolo diametro provoca un'alta resistenza di flusso, in modo particolare con la formazione di flash gas generato mentre il refrigerante si muove dalla

regione di alta pressione a quella di bassa pressione. La portata è proporzionale alla differenza di pressione tra quella di evaporazione e quella di condensazione [14].

4. Valvola di espansione manuale

Si tratta di una valvola a spillo regolabile manualmente (vedere [Figura 2-13](#)). Una volta collocata, il flusso attraverso la valvola dipenderà puramente dalla pressione differenziale. Essa è adatta soltanto ai grandi impianti con carico costante e che sono costruiti per regolare la valvola durante il funzionamento e, se necessario, permettono di arrestare la valvola quando il compressore si ferma [14].

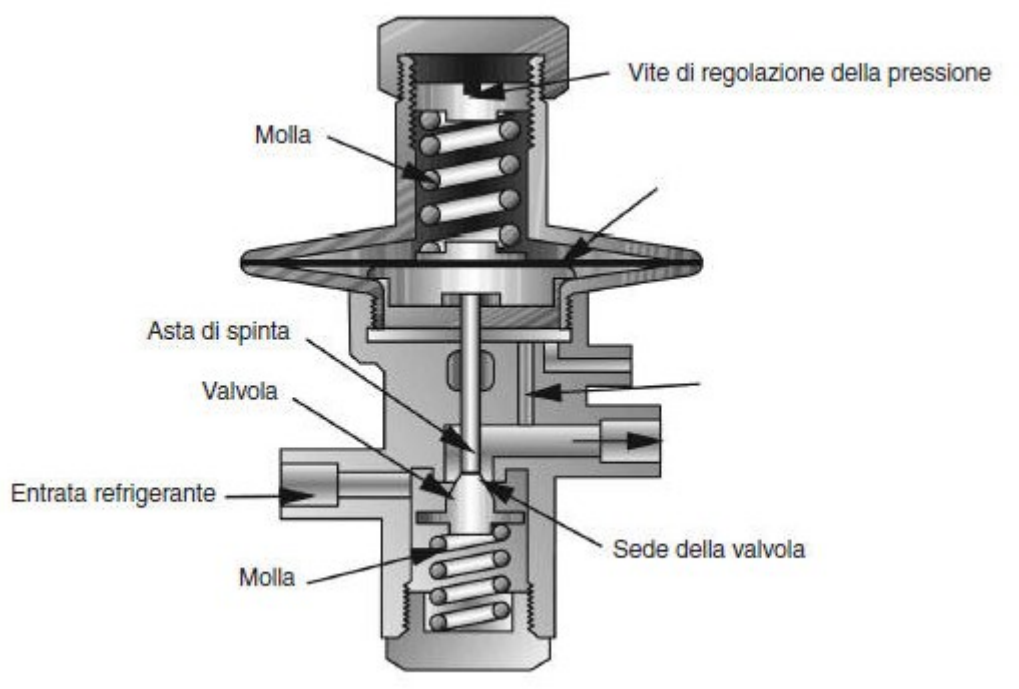


Figura 2-13: valvola di espansione manuale.

2.2.5. Dispositivi ausiliari

- Scrubber

Si tratta di un dispositivo che consente di abbattere la concentrazione di sostanze inquinanti presenti in una corrente gassosa, solitamente ossidi di zolfo o di sodio [20]. Consiste in un serbatoio verticale (torre) in cui la soluzione liquida (liquido di lavaggio) e il gas in questione interagiscono in controcorrente in modo da permettere il trasferimento delle specie chimiche.

- Ricevitore

Alcune unità di refrigerazione hanno abbastanza spazio all'interno del condensatore per accogliere l'intero carico di refrigerante del sistema. Se il condensatore non ha spazio sufficiente è necessario inserire a valle un serbatoio ricevente. La quantità di refrigerante richiesta per il corretto funzionamento del sistema determina se è necessario o meno un ricevitore. I ricevitori sono necessari nei sistemi di refrigerazione che utilizzano una valvola di espansione per il controllo del refrigerante: il ricevitore fornisce un posto per immagazzinare il refrigerante in eccesso nel sistema quando la valvola di espansione limita il flusso all'evaporatore. Oltre ad accogliere le fluttuazioni della carica di refrigerante, il ricevitore mira a mantenere il condensatore drenato dal liquido, evitando così che il livello del liquido si accumuli nel condensatore e riduca la sua quantità di superficie effettiva [21].

- Separatore

L'olio ha la funzione di lubrificare le parti in movimento del compressore e di ridurre il calore dovuto all'attrito di tali parti in moto. L'olio non rimane tutto nel carter del compressore ma una parte viene trascinata nel circuito frigorifero e può essere responsabile di danni meccanici e riduzione delle prestazioni. Per recuperare l'olio espulso dal compressore e reintegrarlo il più velocemente possibile nel carter si utilizza un separatore d'olio, un dispositivo che garantisce la separazione dell'olio dal fluido refrigerante.

2.3. Ciclo frigorifero

I processi termodinamici nel ciclo di refrigerazione sono complessi. Il calcolo mediante formule e tabelle richiede uno sforzo notevole a causa dei tre diversi stati del refrigerante: liquido, bollente e gassoso. Pertanto, per ragioni di semplificazione, è stato introdotto il diagramma pressione-entalpia. Esso mostra lo stato aggregato di una sostanza, a seconda della pressione e del calore. Per la refrigerazione, il diagramma è ridotto alle relative regioni di liquido e gassoso. La caratteristica distintiva del ciclo frigorifero è che gira in senso antiorario, cioè opposto al ciclo joule o vapore. Un cambiamento di stato si verifica quando il refrigerante scorre attraverso uno dei quattro componenti principali dell'impianto di refrigerazione. Il ciclo frigorifero vero e proprio è costituito dai seguenti passaggi di stato, ed è basato sull'assunzione che il fluido refrigerante considerato sia ideale e trascurando gli effetti dovuti all'attrito tra il fluido e le tubature, alle perdite di calore nei punti indesiderati ecc. [22].

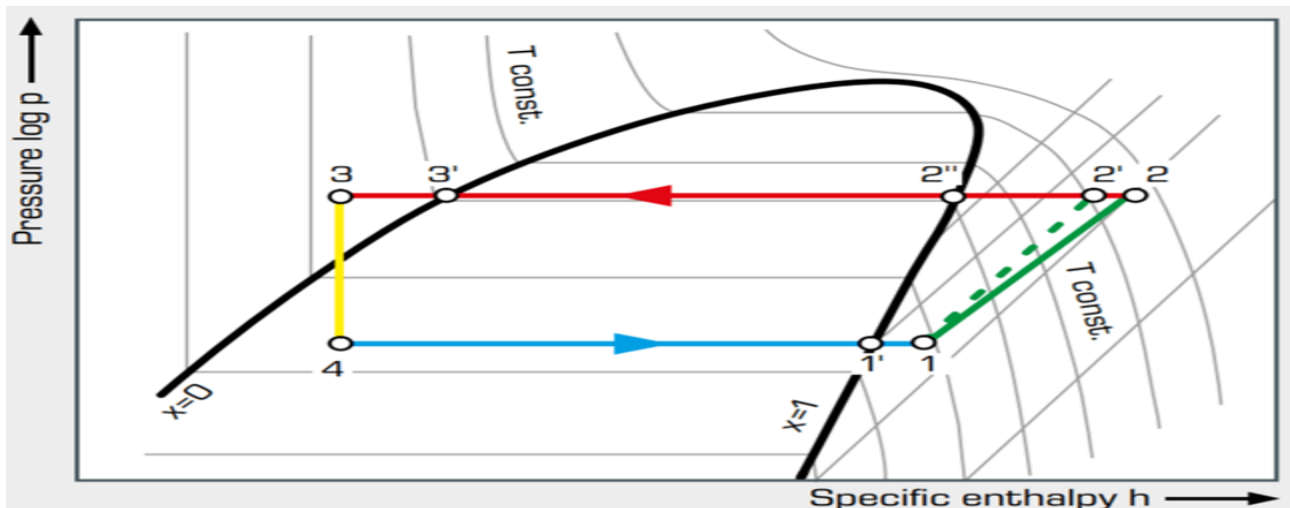


Figura 2-14: diagramma pressione-entalpia [23]

Nella fase di compressione (verde) il refrigerante sottoforma di vapore saturo che lascia l'evaporatore viene aspirato dal compressore nel quale è sottoposto ad un aumento di temperatura e di pressione. Il compressore è azionato da energia meccanica fornita dall'esterno il cui equivalente termico si somma al calore assorbito precedentemente dal refrigerante nell'evaporatore. L'equivalente termico del lavoro meccanico viene comunemente chiamato *calore di compressione*. Quindi il refrigerante lascia il compressore ad una pressione e una temperatura più elevate di quelle che aveva all'ingresso, raggiungendo lo stato di vapore surriscaldato. Il calore di compressione differisce di poco al variare dei diversi fluidi refrigeranti; varia invece notevolmente in funzione dei differenti livelli di pressione e temperatura tra i quali il ciclo può svolgersi. Nel diagramma pressione-entalpia la fase di compressione si fa coincidere abitualmente con una isoentropica, coincidente con il tratto 1-2 di [Figura 2-14](#). Nella fase di condensazione (rosso) il gas surriscaldato passa dal compressore entro il condensatore, dove viene a contatto con un fluido o con la materia a temperatura inferiore. Per effetto del raffreddamento il gas refrigerante riduce la propria temperatura fino a raggiungere quella di saturazione, rimuovendo il calore sensibile (tratto 2-2'' del diagramma di [Figura 2-14](#)). Una volta raggiunta la temperatura di saturazione, essa si mantiene costante durante tutta la fase di cambiamento di stato del vapore in liquido, fino a raggiungere la condizione di liquido saturo (punto 3' del diagramma di [Figura 2-14](#)). Il refrigerante dal condensatore allo stato di liquido sottoraffreddato ad alta pressione (punto 3'' del diagramma di [Figura 2-14](#)) tende a portarsi verso l'evaporatore che si trova ad una pressione inferiore. Allo scopo di dosare la quantità di refrigerante si utilizza comunemente un tubo capillare o una valvola di espansione termostatica. Nell'attraversare l'organo di laminazione verso l'evaporatore, che si trova a pressione più bassa, il refrigerante tende a

raffreddarsi portandosi alla temperatura di saturazione corrispondente al valore di pressione nell'evaporatore. Per rendere possibile tale raffreddamento, il liquido refrigerante deve cedere calore e questo calore viene ceduto alle proprie molecole più prossime. L'assunzione di calore, a pressione ridotta, provoca la vaporizzazione o espansione di una parte del refrigerante, fino al raggiungimento di una condizione di equilibrio tra vapore freddo e liquido freddo, alla temperatura di saturazione corrispondente alla pressione in atto. Il vapore che ne risulta è detto *flash gas* e non compie lavoro utile ai fini dell'effetto frigorifero riducendo quindi la potenzialità del sistema. Il passaggio attraverso l'organo di laminazione viene descritto del tratto 3-4 della [Figura 2-14](#). Infine nella fase di evaporazione il refrigerante, in condizione di miscuglio liquido-vapore, percorre l'evaporatore attraverso il quale viene in contatto indiretto con il fluido o la materia da raffreddare. Il refrigerante ne assorbe il calore contenuto e passa gradualmente allo stato di vapore saturo, percorrendo l'evaporatore stesso (tratto 4-1' di [Figura 2-14](#)). La cessione di calore dal fluido che occorre raffreddare al refrigerante può avvenire se la sua temperatura è inferiore a quella del fluido stesso. Il tratto 1-1' della [Figura 2-14](#) corrisponde al surriscaldamento del vapore, dopodiché il refrigerante procede verso il compressore ed il ciclo ricomincia [23].

3. Descrizione del caso di studio

3.1. Architettura generale dell'impianto

L'impianto di refrigerazione industriale preso in considerazione costituisce la sede centrale di una delle principali aziende italiane della catena del freddo. Di seguito viene riportata una rappresentazione grafica dell'impianto che rappresenta il caso di studio del presente lavoro di tesi.

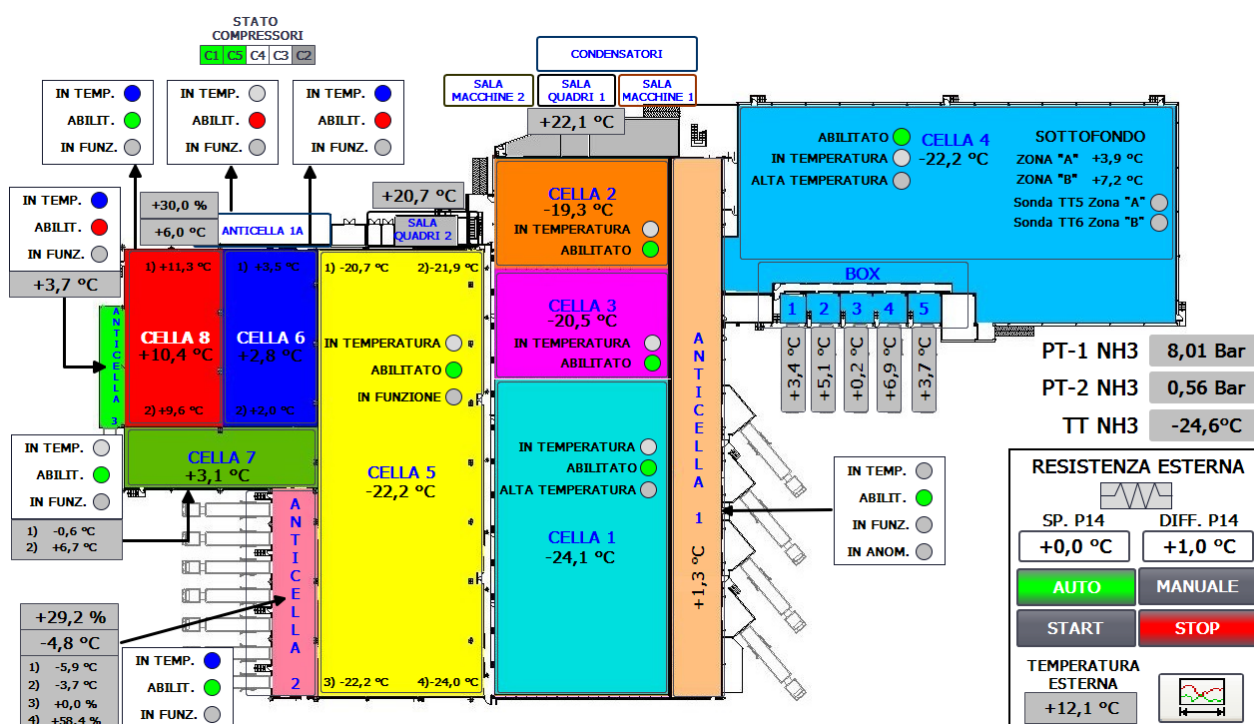


Figura 3-1: rappresentazione grafica dell'impianto

L'impianto è complessivamente costituito da otto celle di diverse dimensioni, quattro anticelle per permettere il carico e lo scarico dei prodotti e cinque box. Ognuno di questi ambienti è dotato di evaporatori (o aerorefrigeranti) e di uno o più sensori di temperatura per permetterne la supervisione e il controllo.

Nell'impianto sono presenti cinque compressori: C1, C2, C3, C4, C5.

I compressori C1 e C2 sono a giri fissi con funzionamento ON/OFF, mentre C3, C4 e C5 sono compressori a vite dotati di inverter tramite i quali si è in grado di modulare il numero di giri e quindi la loro velocità.

La struttura è inoltre provvista di due separatori e un ricevitore (TK1). Il separatore SP1/A è collegato alle celle 1, 2, 3 e 4 e alle anticelle A.C. 1 e A.C. 1A. Il separatore SP6 è collegato alle celle 5,6,7 e 8 e alle anticelle A.C. 2 e A.C. 3.

Nell'impianto sono presenti tre condensatori T1, T2 e T3 ed uno scrubber.

Il liquido refrigerante utilizzato è l'ammoniaca (NH₃) ed il ciclo frigorifero sfruttato dall'impianto è quello a compressione di vapore.

La descrizione delle categorie dei componenti presenti nell'impianto è stata affrontata nel capitolo 2.2. Di seguito si vuole approfondire il funzionamento e la logica locale degli specifici compressori utilizzati nella struttura e la logica di supervisione e controllo dell'impianto attualmente adottata.

3.2. Logica attuale dell'impianto

Con riferimento alla gerarchia dell'automazione, nell'impianto analizzato è presente il controllo di livello 0, 1 e 2. La seguente figura riporta i livelli gerarchici di automazione coinvolti.

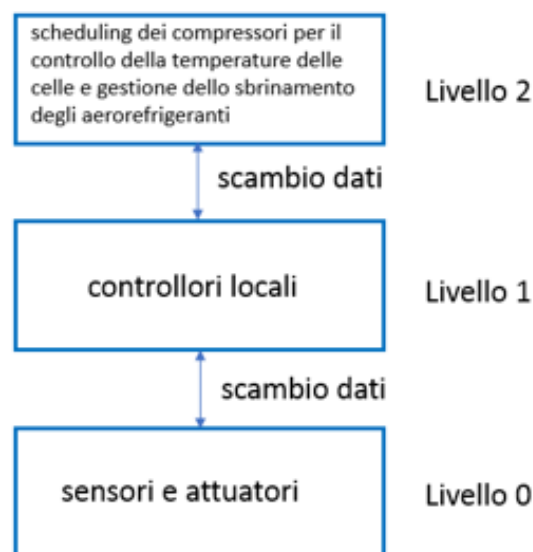


Figura 3-2: gerarchia dell'automazione per l'impianto considerato.

Sensori e attuatori caratterizzano il livello 0, mentre il livello 1 è rappresentato dai controllori locali, ad esempio i controllori che regolano l'apertura delle valvole. Al livello 2, viene implementata la pianificazione dei compressori per il controllo della temperatura delle celle e la gestione dello sbrinamento degli aerorefrigeranti. Il paradigma dell'Industria 4.0 è stato preso in considerazione nella progettazione e realizzazione del sistema di controllo e supervisione.

Il sistema di controllo e supervisione è costituito da varie componenti quali (PLC, microcontrollore, PC industriale, scheda di calcolo dedicata). Affinché il sistema centrale possa accedere ai parametri dell'intero impianto sono necessari dei sistemi di comunicazione e trasmissione tra i sensori e gli altri sistemi di controllo locali.

Nell'impianto sono presenti un controllore Siemens della serie S7 300 precedentemente installato, un controllore Siemens della serie S7 1500 di nuova installazione, un pannello Siemens della serie TP1500 Comfort di nuova installazione e un computer anch'esso di nuova installazione. L'impianto viene gestito dai due controllori, le impostazioni e la visualizzazione degli stati avviene tramite il pannello touchscreen TP1500 alloggiato sulla porta del quadro elettrico per l'interfacciamento uomo-macchina e per la gestione dell'impianto stesso, mentre l'archiviazione dei dati su database e le segnalazioni tramite e-mail sono gestite dal PC.

Il sistema è dotato di un bus di comunicazione tramite il quale il controllore acquisisce i segnali dal campo e pilota le utenze. La perdita di comunicazione da parte di uno dei nodi non permette più il controllo di tutti i segnali facenti capo a quel nodo. Per diagnosticare il corretto funzionamento della rete il sistema offre una pagina di diagnostica della rete, inoltre la mancanza di comunicazione di uno dei nodi è segnalata nelle pagine allarmi.

Il pannello touchscreen comunica con il controllore S7 300 tramite il protocollo di comunicazione Profibus, con il controllore S7 1500 con il protocollo di comunicazione Profinet ([Figura 3-3](#)). Il controllore S7 1500 comunica con tutti i dispositivi di campo (compressori C4, C5, inverter) tramite il protocollo di comunicazione Profinet, mentre comunica con il computer tramite il protocollo TCP. La comunicazione tra il controllore S7 1500 e i compressori C1, C2 e C3 avviene su comunicazione RS485.

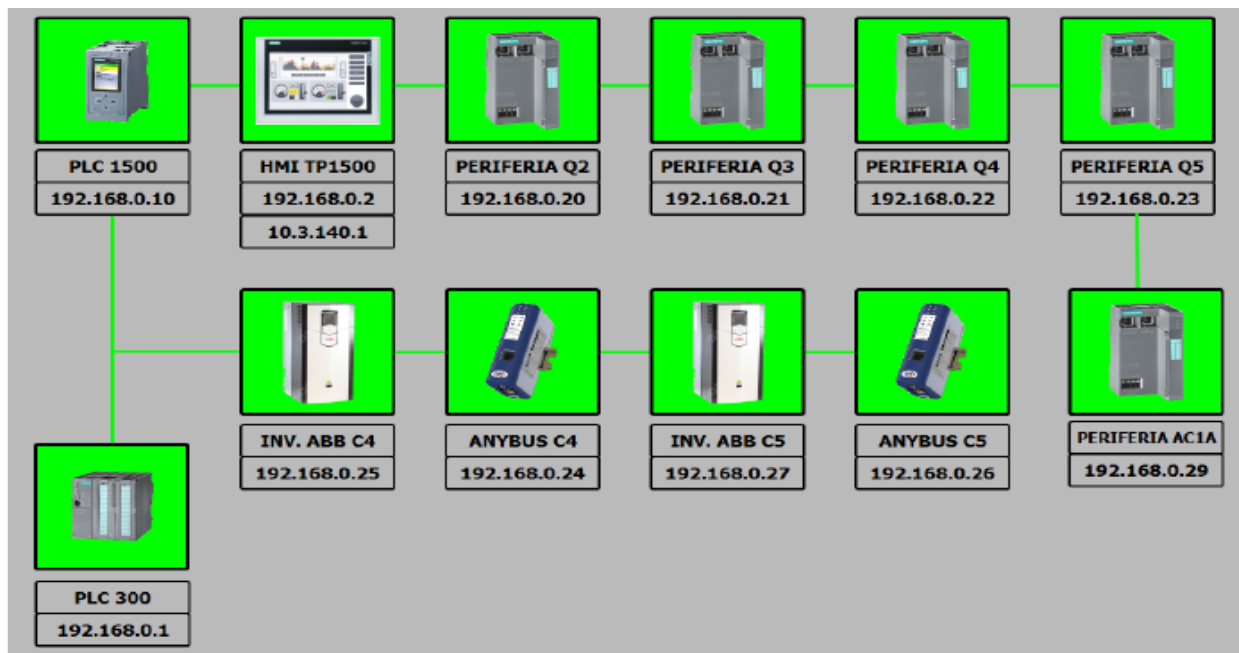


Figura 3-3: diagnostica di rete Profinet dell'impianto.

La gestione attuale dell'impianto prevede per ogni cella la definizione delle fasce orarie di funzionamento, che possono essere fino a quattro al giorno, e l'impostazione di due *set-point* di temperatura (vedere [Figura 3-4](#)):

- SP1 è il *set-point* di temperatura di normale funzionamento a cui la cella si porta quando la corrispondente fascia oraria risulta abilitata;
- SP2 è il *set-point* di temperatura che fa accendere la cella anche fuori dalle fasce orarie di normale funzionamento (*bypass* fascia oraria).

È stata inoltre definita la temperatura SP3 che attiva la segnalazione del raggiungimento di alta temperatura all'interno della cella e la conseguente attivazione di un avviso di allarme.

La scelta di un determinato *set-point* determina l'inseguimento di quella temperatura da parte della cella.



Figura 3-4: impostazioni fasce orarie di funzionamento.

Sulla base delle misure fornite dai sensori si è in grado di conoscere in ogni istante lo stato in cui si trova ciascuna cella ([Figura 3-5](#)), ovvero la sua temperatura. Se tale valore non soddisfa il rispettivo set-point impostato viene generata una chiamata e azionati gli aerorefrigeranti.

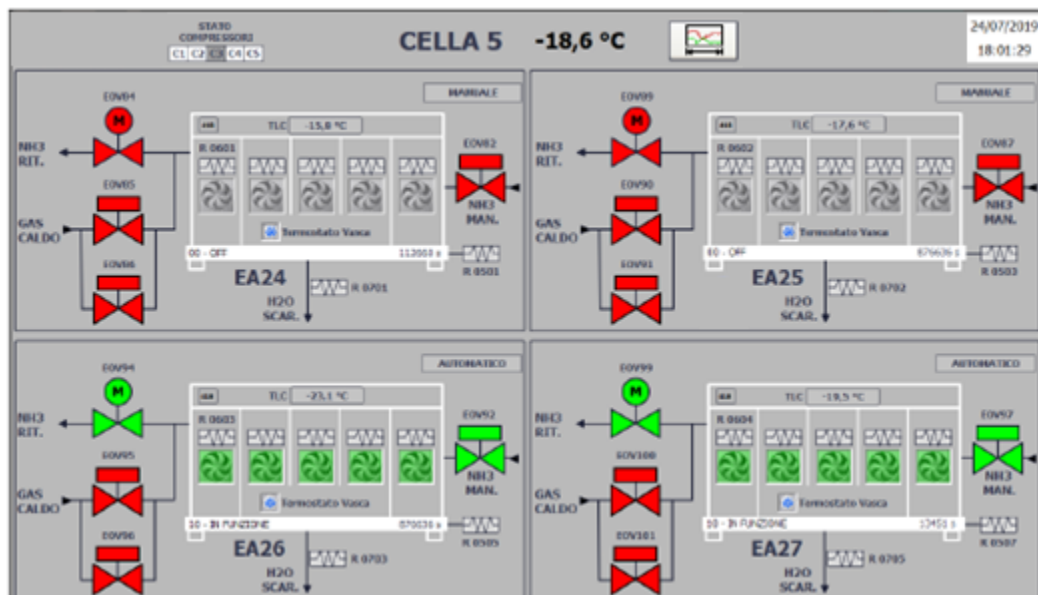


Figura 3-5: esempio di rappresentazione dello stato di una cella.

La sequenza con la quale i compressori sono chiamati ad avviarsi può essere stabilita dall'operatore e attualmente viene decisa empiricamente.

Le chiamate delle utenze si distinguono in:

- Chiamata a funzionare di una delle celle;
- Chiamata a funzionare di una delle anticelle o di uno dei box.

Nel primo caso viene chiamato a funzionare il primo compressore abilitato e disponibile in sequenza; possono partire tutti i compressori abilitati fino ad averli tutti in moto.

Nel caso sia presente una chiamata anticelle senza la contemporanea chiamata celle, se la temperatura dell'ammoniaca (TT NH₃) risulta maggiore della soglia per la chiamata delle anticelle viene chiamato a funzionare un solo compressore, il primo abilitato, disponibile e dotato di inverter.

I compressori dotati di inverter possono lavorare a frequenza fissa o variabile. Nel secondo caso è possibile modulare la frequenza dell'inverter in automatico o mediante gradini di incremento o decremento. La condizione necessaria per modulare la frequenza di un inverter è che la capacità del compressore sia bloccata al valore massimo.

Per illustrare in modo più approfondito la logica di funzionamento dei compressori si parte dalla situazione iniziale in cui tutti i compressori sono spenti. A seguito dell'accensione di una qualsiasi delle pompe di ammoniaca P4, P5, P15 o P16 si accende il primo compressore in ordine di sequenza pronto a partire. Si distinguono due casi:

- se il compressore è privo di inverter ci si limita ad attivare il comando *start_compressore*
- se il compressore è dotato di inverter si attivano i comandi *start_compressore* e *start_inverter*; dopodiché l'inverter viene mandato a *frequenza_di_partenza* sia nel caso in cui sia impostato a *frequenza_fissa* che nel caso in cui sia impostato a *frequenza_variabile*.

A questo punto il compressore è libero di modulare la capacità del cassetto dal valore minimo al valore massimo (100%). Se per un certo intervallo di tempo il compressore è alla capacità massima ed è presente una chiamata PT allora si blocca la capacità del compressore al 100% e si agisce sulla frequenza dell'inverter (se presente) tramite gradini di incremento o decremento. Se la chiamata PT continua ad essere presente e non è più possibile incrementare la frequenza dell'eventuale inverter, a causa del raggiungimento del limite massimo di frequenza o di corrente, viene attivato il successivo compressore in sequenza cercando di incrementare la frequenza del compressore in funzione del solo limite di corrente. La modalità di inserimento e di funzionamento dei compressori è riconducibile alla strategia a saturazione di macchina (MS): i compressori sono organizzati in un determinato ordine prestabilito; se in corrispondenza del generico istante *t* le macchine in funzione non soddisfano il carico richiesto dall'impianto viene attivato il gradino successivo dell'ultimo compressore attivo. In

questo modo solo l'ultima macchina accesa opera in parzializzazione o modulazione di carico, mentre le altre lavorano a pieno carico.

Se per un determinato intervallo di tempo non si registra una chiamata PT (la chiamata PT rappresenta il superamento della soglia di pressione letto nel circuito a monte dei compressori (pressione di aspirazione). Tale valore viene letto da una sonda presente nel collettore che accomuna tutti i compressori.) e non è possibile decrementare ulteriormente la frequenza dell'eventuale inverter poiché è stato raggiunto il valore minimo, si disattiva il blocco della capacità al 100%, che quindi è libera di diminuire. Se per un determinato periodo di tempo il compressore staziona alla minima capacità viene automaticamente spento e si modula la frequenza del compressore che lo precede nella sequenza.

Nella gestione attuale dell'impianto è inoltre previsto un sistema di sbrinamento a gas caldo in cui l'ammoniaca sottoforma di gas surriscaldato viene iniettata all'interno dell'aerorefrigerante subito a valle della valvola termostatica per evitare la formazione di ghiaccio all'interno dell'evaporatore e sulle ventole. Tale problematica potrebbe causare un malfunzionamento dei compressori, una cattiva conservazione dei prodotti contenuti nelle celle, *set-point* di pressione e temperatura delle celle non ottimali, consumi energetici maggiori rispetto al normale funzionamento; tutto ciò condurrebbe ad un impianto di refrigerazione poco efficiente.

Attraverso il sistema è possibile:

- impostare le fasce orarie in cui effettuare le operazioni di sbrinamento, che sono definite dall'orario di inizio e possono essere fino a quattro al giorno; impostare la temperatura di fine sbrinamento;
- impostare la durata di ogni singola fase dello sbrinamento;
- abilitare la funzione *ferma gocce* che apre la valvola di gas freddo prima di accendere le ventole per brinare le gocce d'acqua eventualmente presenti sulla batteria.

Una problematica emersa riguarda la domanda frigorifera. La quale, poiché non nota, ha influenzato il progetto e l'implementazione del sistema di controllo e supervisione.

4. Analisi della gestione dell'impianto

4.1. Trattamento dati

I dati dell'impianto di refrigerazione a disposizione per il presente lavoro di tesi riguardano un periodo di due anni (2020/2021). I segnali e le variabili di processo vengono acquisiti con un tempo di campionamento di circa un minuto per poi essere riportati in diversi file CSV (Comma Separated Values, «valori separati da virgole»). Un CSV è un file caratterizzato dalla presenza di dati tabulari sotto forma di testo, in cui valori di ciascuna cella vengono differenziati da un separatore (virgola o punto e virgola). I file CSV sono estratti dal database connesso al sistema di supervisione e controllo descritto nel precedente capitolo. Essi sono differenziati per ogni anno e riguardano:

- Compressori: sono disponibili le misurazioni di temperatura e pressione delle caratteristiche principali (olio, aspirazione, scarico) e le misurazioni del consumo di energia elettrica.
- Aerorefrigeranti: sono disponibili lo stato degli aerorefrigeranti nelle varie celle, anticelle o box, e il valore del set-point impostato.
- Celle frigorifere: sono disponibili le misurazioni di temperatura proprie, delle anticelle e dei box ad esse collegati, le misurazioni del livello di ammoniaca e dell'umidità presente, lo stato logico di valvole, i valori di set-point impostati nelle celle e lo stato logico di chiamata, i totalizzatori del consumo di energia elettrica.

Da un'analisi iniziale dei file CSV a disposizione, è stata notata la presenza di diversi valori NaN (Not a Number). Intervistando gli ingegneri che hanno realizzato il sistema di supervisione e controllo, si è appreso che una possibile causa di ciò potrebbe essere la mancanza di comunicazione in uno o più istanti di campionamento. Ciò comporta un errore di acquisizione del dato, che si riversa nel file CSV come un NaN. La sostituzione dei valori interessati con valori convenevoli comporterebbe una analisi non veritiera e rischierebbe di portare a conclusioni errate. Per tale motivo si è reso necessario considerare determinati periodi in cui i dati acquisiti, seppur non completamente, riscontravano una corretta acquisizione per svolgere un'analisi di processo accurata. In particolare:

- La correlazione tra i dati riguardanti le celle frigorifere e quelli riguardanti lo stato degli aerorefrigeranti è stata effettuata considerando il periodo di tempo compreso tra il 07/07/2021 e il 07/11/2021.
- La correlazione tra i dati riguardanti le celle frigorifere e quelli riguardanti i cinque compressori è stata effettuata considerando il periodo di tempo compreso tra il 01/01/2020 e il 29/02/2020.

4.2. MATLAB

MATLAB è una piattaforma di programmazione e calcolo numerico tramite la quale si sono svolte lo sviluppo di algoritmi per l'analisi di dati e la creazione di grafici significativi. Nello specifico la piattaforma MATLAB è stata usata per:

- 4.2.1. Importazione dati.
- 4.2.2. Sviluppo di algoritmi per la correzione dei valori NaN.
- 4.2.3. Sviluppo di algoritmi per il rilevamento di valori non coerenti.
- 4.2.4. Correlazione tra sensori.
- 4.2.5. Analisi delle celle frigorifere.

4.2.1. Importazione dati

Prima dell'importazione dei file in MATLAB si è reso necessario convertire i file dal formato CSV al formato 'xlsx'. Mediante opportuni settaggi delle opzioni di Microsoft Excel, si è impostato il separatore dei decimali con il punto e si è tolto il separatore delle migliaia. Infine, si è aggiunta una riga iniziale etichettando con un nome i vari campi (colonne) di ogni file.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	ID	TIME	DATA	PA	PS	PO	PDO	PDOC	PI	TA	TS	TO	TI	CM
2	1225440	01/01/2020 00:00	01/01/2020	0,08	9	11,1	-11,02	-50,62	0,8	-29,9	70,9	50,7	-13,1	30,3
3	1225441	01/01/2020 00:00	01/01/2020	0,07	8,9	11,1	-11,03	-50,53	0,8	-29,9	70,9	50,6	-13,1	30,2
4	1225442	01/01/2020 00:00	01/01/2020	0,07	8,9	11,1	-11,03	-50,53	0,8	-29,9	70,9	50,6	-13,1	30,2
5	1225443	01/01/2020 00:00	01/01/2020	0,08	9	11,1	-11,02	-50,52	0,8	-29,9	70,9	50,6	-13,1	30,3
6	1225444	01/01/2020 00:00	01/01/2020	0,09	9	11,1	-11,01	-50,51	0,9	-29,9	70,9	50,6	-13,1	30,5
7	1225445	01/01/2020 00:00	01/01/2020	0,09	8,9	11,1	-11,01	-50,51	0,9	-29,9	70,9	50,6	-13,1	30,3
8	1225446	01/01/2020 00:01	01/01/2020	0,09	8,9	11,1	-11,01	-50,51	0,9	-29,8	70,9	50,6	-13,1	30,4
9	1225447	01/01/2020 00:01	01/01/2020	0,09	8,9	11,1	-11,01	-50,51	0,9	-29,8	70,9	50,6	-13,2	30,3
10	1225448	01/01/2020 00:01	01/01/2020	0,09	8,9	11,1	-11,01	-50,51	0,9	-29,8	70,9	50,6	-13,2	30,4
11	1225449	01/01/2020 00:01	01/01/2020	0,09	8,9	11,1	-11,01	-50,51	0,9	-29,8	70,8	50,6	-13,2	30,3
12	1225450	01/01/2020 00:01	01/01/2020	0,09	8,9	11,1	-11,01	-50,41	0,9	-29,8	70,8	50,5	-13,1	30,4
13	1225451	01/01/2020 00:02	01/01/2020	0,09	8,9	11,1	-11,01	-50,41	0,8	-29,8	70,8	50,5	-13,1	30,4
14	1225452	01/01/2020 00:02	01/01/2020	0,09	8,9	11,1	-11,01	-50,41	0,9	-29,8	70,8	50,5	-13,1	30,4

Tabella 4-1: esempio file.xlsx.

Queste operazioni sono volte all'ottenimento di un'importazione corretta dei dati e all'agevolazione d'uso dei dati importati in Matlab.

Infatti mediante il comando 'Tabella1 = readtable ('Nome file.xlsx')' è possibile importare il file sotto forma di tabella (Tabella1), differenziando i campi con le etichette già scelte in precedenza.

4.2.2. Trattamento valori NaN

Come menzionato in precedenza, la scelta di considerare solo determinati slot temporali risiede nella presenza di dati mancanti (valori NaN) in alcuni periodi. Dopo un'attenta valutazione, si è scelto di sviluppare un algoritmo per il trattamento di questi valori. L'algoritmo sviluppato analizza tutti i dati all'interno del file considerato e, ogni volta che incontra un dato mancante, lo sostituisce con l'ultimo valore precedente dello stesso campo diverso da NaN. Inoltre, è stato necessario raccogliere il dato sostituito in una nuova tabella degli errori (ERRORI_NAN) al fine di riportare il dato 'copiato'.

Al fine di illustrare l'algoritmo realizzato, sono state riportate di seguito alcune righe di codice.

```
1
2   varNames= ["ID", "TIME", "Temperatura", "Pressione"];
3   size=[918 4];
4   varTyp=["double", "datetime", "double", "double"];
5   ERRORI_NAN=table('Size', size, 'VariableTypes', varTyp, 'VariableNames', varNames);
6
```

Figura 4-1: creazione tabella errori vuota

Viene creata inizialmente la tabella riferita agli errori (ERRORI_NAN) dichiarando le proprie componenti: vengono impostati i nomi delle etichette, viene attribuita a ciascuna etichetta una tipologia di dato, e infine viene attribuita la dimensione della tabella che deve coincidere con la dimensione della tabella associata al file (Tabella1). La scelta delle etichette e della tipologia di dati dipende dal file a cui viene applicato l'algoritmo. Infatti esso risulterà diverso se applicato ai file relativi ai compressori, agli aerorefrigeranti o alle celle frigorifere.

```
6
7   for i=1:height(ERRORI_NAN)
8       for j=1:4
9           if j~=2
10              ERRORI_NAN(i,j)=table(NaN);
11              end
12           end
13       end
```

Figura 4-2: conversione dei valori vuoti a valori nulli

Come spiegato in precedenza la tabella è impostata inizialmente con valori vuoti, attraverso il codice della [Figura 4-2](#) si convertono tutti i dati della tabella come valori NaN. Questa operazione è necessaria per favorire la sostituzione del dato esposta nella seguente figura.

```
16 p=1;
17 for i=1:height(Tabella1)
18     ku=1;
19     po=1;
20     for j=3:79
21         if isequal(class(Tabella1{i,j}), 'double') && isnan(Tabella1{i,j})
22             po=5;
23             if ku==1
24                 ERRORI_NAN(p,2)={Tabella1{i,2}};
25                 Tabella1(i,j)={Tabella1{i-1,j}};
26                 ERRORI_NAN(p,j)={Tabella1{i,j}};
27             else
28                 Tabella1(i,j)={Tabella1{i-1,j}};
29                 ERRORI_NAN(p,j)={Tabella1{i,j}};
30             end
31         end
32     end
33     if po==5 && j==79
34         p=p+1;
35     end
36 end
37 end
```

Figura 4-3: algoritmo di sostituzione

L'algoritmo permette di visualizzare tutti i dati del file preso in considerazione (compressori, aerorefrigeranti o celle frigorifere) e sostituire ogni valore NaN, con l'ultimo valore precedente dello stesso campo diverso da NaN. Inoltre il dato sostituito viene aggiunto alla tabella degli errori (ERRORI_NAN) sostituendo il medesimo valore NaN precedentemente impostato.

Al termine dell'algoritmo la tabella riguardante il file (Tabella1) non conterrà più valori NaN, mentre la tabella degli errori (ERRORI_NAN) conterrà la data di acquisizione del dato solo per gli istanti di campionamento in cui è stato riscontrato un valore NaN, il quale una volta sostituito verrà aggiunto alla tabella sostituendo il valore NaN impostato in precedenza.

L'algoritmo sviluppato può essere applicato ad ogni tipologia di tabella riferita ai file importati. L'output finale dell'algoritmo è un grafico significativo grazie al quale risulta molto più veloce e pratico visualizzare i dati sostituiti.

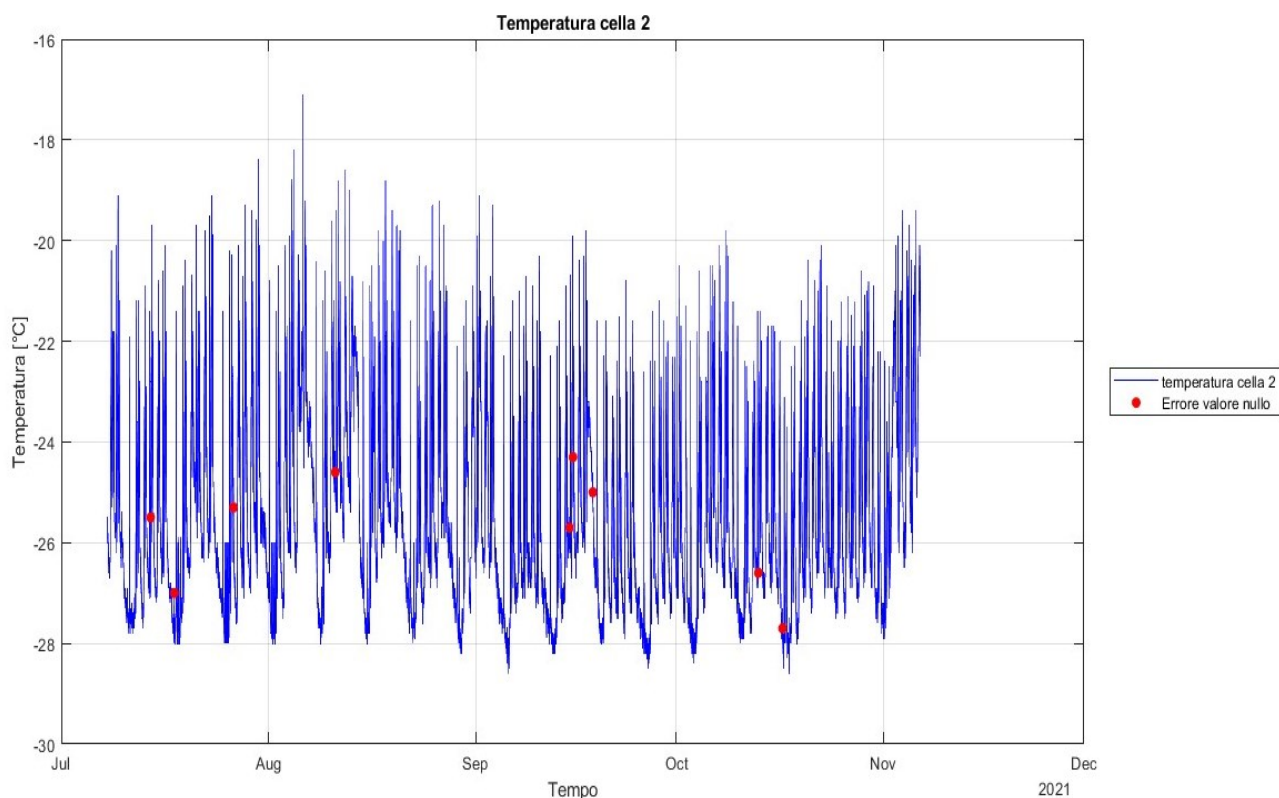


Figura 4-4: algoritmo applicato alla temperatura interna della cella 2.

4.2.3. Valori inaspettati

Oltre alla presenza di valori NaN, si è riscontrata un'altra tipologia di errore sulle misure acquisite mediante sensori. In particolare, grazie a check delle temperature acquisite mediante i sensori all'interno delle celle frigorifere e alla creazione di grafici significativi si sono riscontrati valori, diversi da NaN, non coerenti rispetto a quanto atteso.

Il check di valori non coerenti assume un ruolo cruciale per l'analisi del comportamento del nostro impianto. Infatti i valori non coerenti possono derivare da fattori significativi che influenzano il comportamento della temperatura all'interno della cella (fasi di sbrinamento in atto o posizionamento non ottimale dei sensori). L'analisi di questa casistica può consentire valutazioni volte all'ottimizzazione dell'impianto. In alternativa, i valori non coerenti possono indicare un errore di comunicazione o un malfunzionamento del sensore, poiché essi possono essere sintomo della rottura di un dispositivo di misura. Tali andamenti possono influenzare il raggiungimento del set-point e di conseguenza possono generare una chiamata non corretta dei compressori.

Al fine di rilevare tali condizioni di valori non coerenti, L'algoritmo esegue tre tipi di check:

- Check sui limiti di validità: per ogni sensore è stato impostato un range di validità al quale ci si aspetta che appartenga la misura fornita. Misure che violano questo check possono essere definite come misure fuori range.
- Check sul valore massimo della derivata (rate of change): per ogni sensore è stato impostato un valore massimo di derivata positiva e negativa che non deve essere superato per valutare la misura corrente come affidabile. La derivata discreta è calcolata facendo la differenza tra il valore corrente e il valore precedente fornito dal sensore. Misure che violano questo check possono essere definite affette da spike.
- Check sul valore minimo della derivata (condizione di freezing): per ogni sensore è stato impostato un valore minimo di variazione che ci si aspetta (il minimo assoluto è 0) tra due istanti consecutivi al fine di poter ritenere che il sensore in analisi non sia in una condizione di freezing

Tale algoritmo riporta in output un grafico dell'andamento della temperatura all'interno delle celle frigorifere ed evidenzia eventuali condizioni di violazione dei check appena descritti. Poiché gli andamenti di temperatura e il numero di sensori presenti differiscono per ogni cella frigorifera, si è implementato un algoritmo ad hoc per ognuna di esse.

A titolo di esemplificativo, vengono proposti degli esempi riguardanti due celle frigorifere di diversa dimensione caratterizzate da un diverso numero di sensori di temperatura.

4.2.3.1. Cella 2

La cella 2 presenta un solo sensore a cui si fa riferimento per visualizzare l'andamento della temperatura all'interno della cella, per la quale ci si aspetta un valore compreso tra -17°C e -29°C . Tali valori sono stati impostati nell'algoritmo sviluppato come limiti di validità per il check sui limiti di validità. L'algoritmo visualizza tutti i dati acquisiti riferiti alla temperatura della cella 2 (Tabella1.TemperaturaCella2) e qualora incontrasse un valore fuori dal range considerato, lo sostituisce con l'ultimo valore corretto precedente e lo aggiunge, insieme alla data di acquisizione del dato, in una nuova tabella a dimensione variabile (errori_valori).

```

9      D=Tabella1;
10     d=1;
11     for i = 1:height(D)
12         if D{i,7}>-17.0 || D{i,7}<-29
13             errori_valori(d,1)=D(i,2);
14             D{i,7}=D{i-1,7};
15             errori_valori(d,2)=D(i,7); % 7 è la posizione del campo 'TemperaturaCella2'
16             d=d+1;
17         end
18     end

```

Figura 4-5: algoritmo valori non coerenti.

Poiché l'algoritmo prevede una sostituzione del dato incontrato fuori dal range, è necessario che durante la creazione di grafici significativi, vengano riportati sia l'andamento di temperatura reale sia quello con valori sostituiti.

Poiché la cella 2 non presenta errori riguardanti check sui limiti di validità della temperatura, di seguito viene riportata una simulazione di valore fuori range. Il marker nero visualizza la presenza di valore non coerente (indicato in blu) e tale valore viene opportunamente sostituito secondo la logica riportata in precedenza.

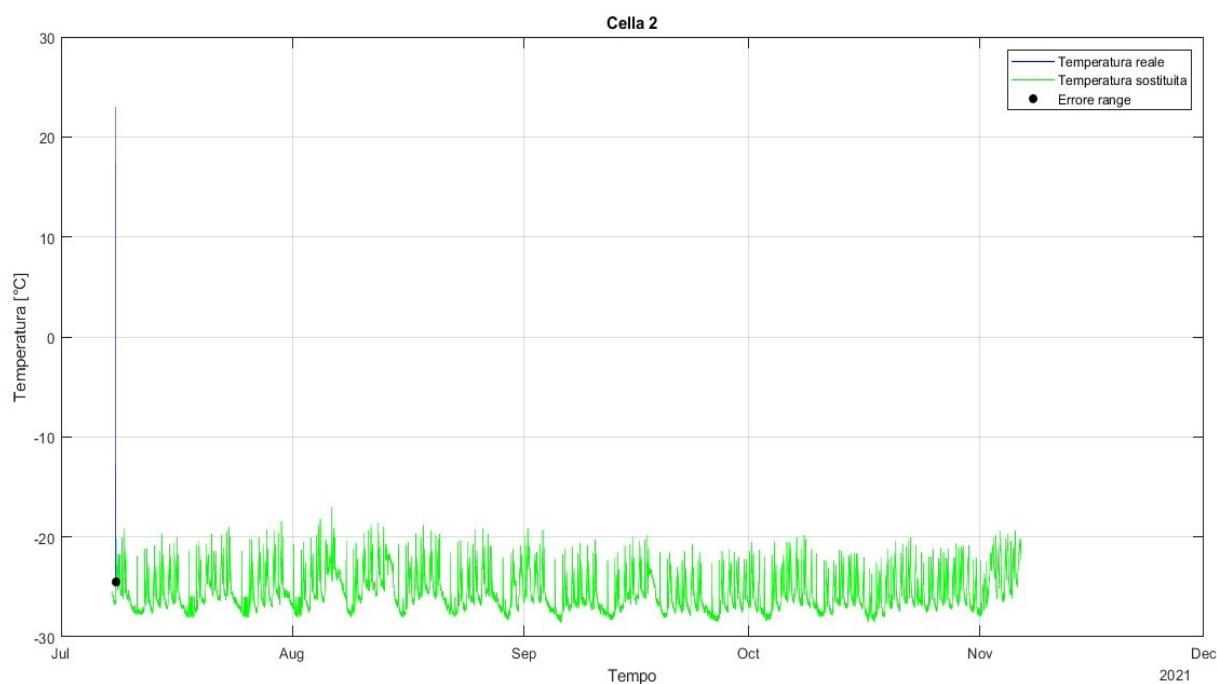


Figura 4-6: esempio ipotetico errore range.

4.2.3.2. Cella 5

La cella 5 invece presenta quattro sensori, a cui si fa riferimento per calcolare l'andamento della temperatura all'interno della cella. Infatti, la temperatura della cella 5 viene calcolata sempre facendo la media delle misurazioni dei quattro sensori.

Ad ogni cella frigorifera viene impostato un set-point di temperatura da raggiungere (vedere capitolo 3 per ulteriori dettagli). Per tale scopo, viene effettuata la chiamata ai compressori e l'azionamento degli aerorefrigeranti; tali operazioni comportano consumo di energia elettrica. Il malfunzionamento di uno dei sensori comporterebbe un andamento non veritiero della temperatura, che potrebbe provocare, ad esempio, chiamate non necessarie ai compressori.

Mediante l'algoritmo sviluppato è possibile visualizzare gli errori dovuti ai guasti dei sensori. In particolare, i tre check descritti in precedenza sono stati applicati a tutti i sensori della cella 5.

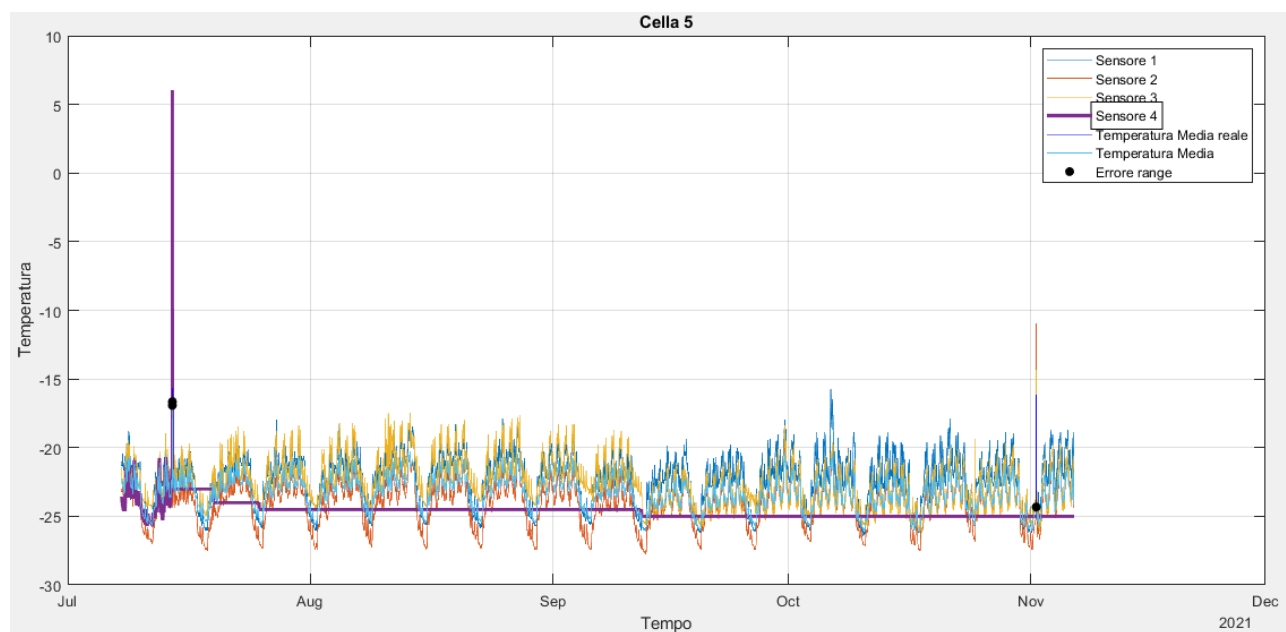


Figura 4-7: sensori cella 5 (check sui limiti di validità).

Come si può notare nella figura precedente, l'implementazione del controllo sui limiti di validità sulle misure della temperatura interna alla cella 5 segnala un errore del sensore 4 il 12/07/2021 e un errore dei sensori 1, 2 e 3 il 01/11/2021. Lo studio grafico dell'andamento di temperatura misurata dai sensori permette di valutare l'entità dell'errore:

- Osservando l'andamento del sensore 4 si nota come quest'ultimo, una volta avuto un picco di misurazione che ha portato la misura fuori dai suoi limiti di validità, rimane costante ad un valore inferiore influenzando la temperatura media della cella frigorifera 5. Inoltre, il picco rilevato oltre ad essere un valore fuori range, corrisponde anche a uno spike e l'andamento costante a tratti successivo può essere classificato come condizione di freezing. Per tali motivi, la temperatura calcolata non risulta quella effettiva.

Nella figura seguente, escludendo dal calcolo della temperatura media la misurazione effettuata dal sensore 4 (vedi figura a 4-7 di colore viola), la temperatura interna della cella è maggiore di quella calcolata con tutti e quattro i sensori.

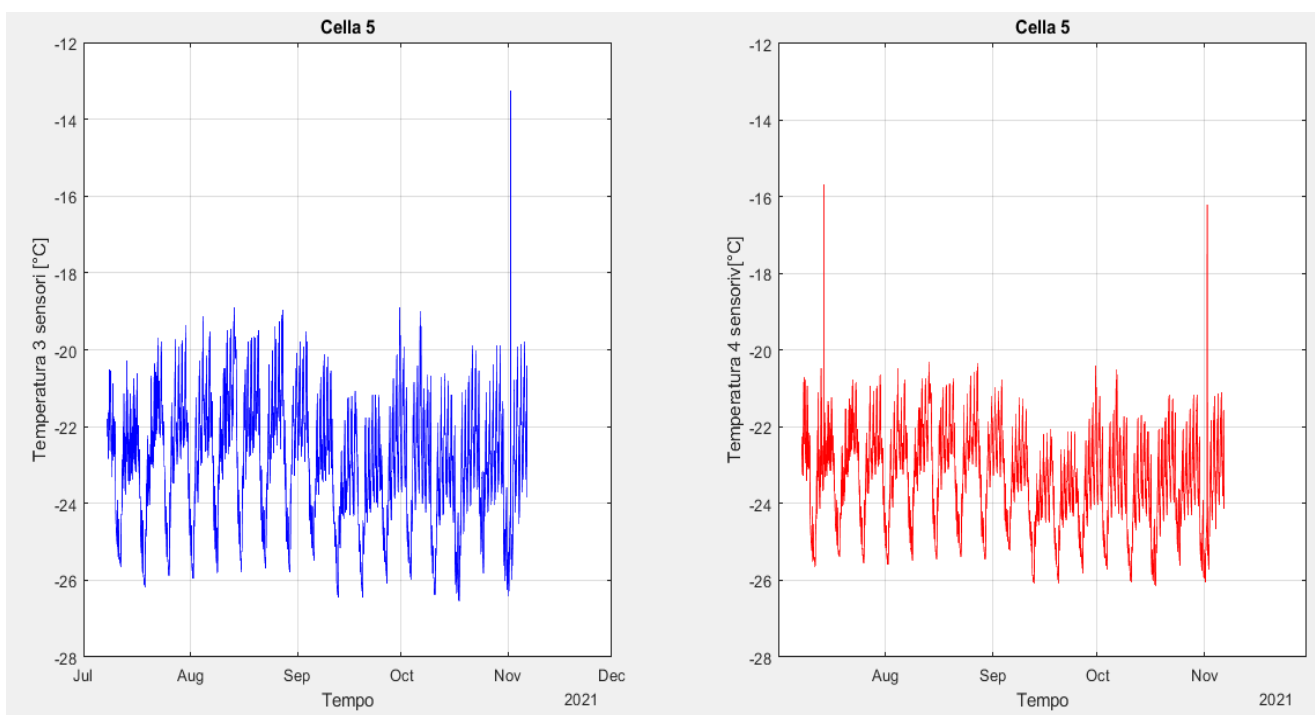


Figura 4-8: differenza di temperatura della cella 5

- L'errore segnalato il 01/11/2021 riguarda i sensori 1, 2 e 3 (il sensore 4 era già guasto per le considerazioni riportate al punto precedente), i quali riportano un aumento di temperatura di circa 12°C in un minuto di tempo. Tale comportamento è uno spike che andrebbe opportunamente filtrato mantenendo ad esempio il valore precedente.

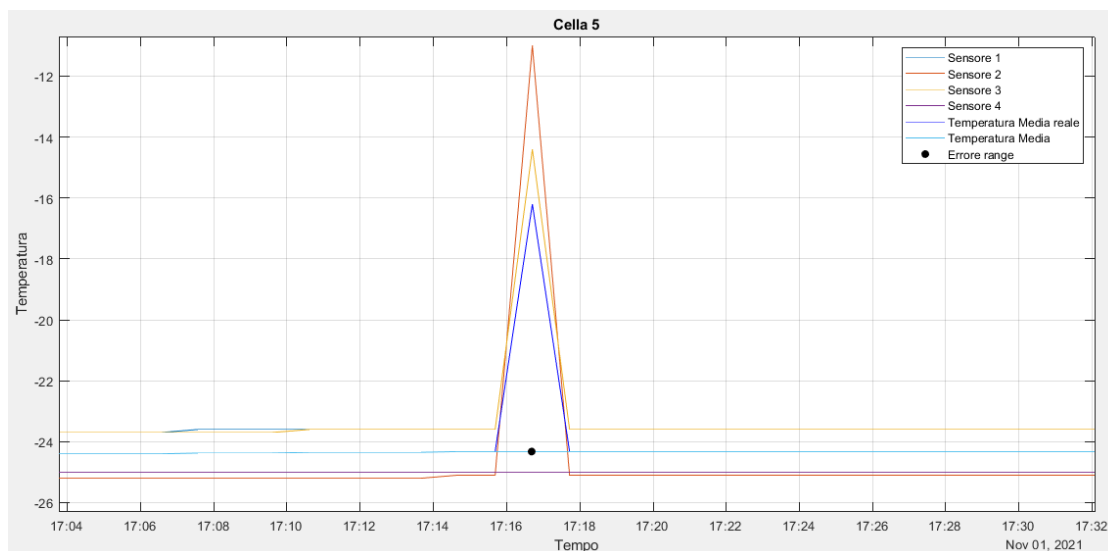


Figura 4-9: spike cella 5

Nella figura seguente si riporta un ulteriore esempio riguardo alla cella 5. In tale esempio, tutti i sensori di temperatura della cella 5 sono soggetti contemporaneamente a malfunzionamenti. In particolare, prima si rileva uno spike su tutti i sensori e, in seguito, viene identificata una condizione di freezing. Tale situazione risulta molto critica per il processo analizzato e, al momento, in base alle informazioni a disposizione, non esistono misure cautelative per far fronte a una condizione di processo in cui tutti i sensori di una cella sono soggetti contemporaneamente a malfunzionamenti.

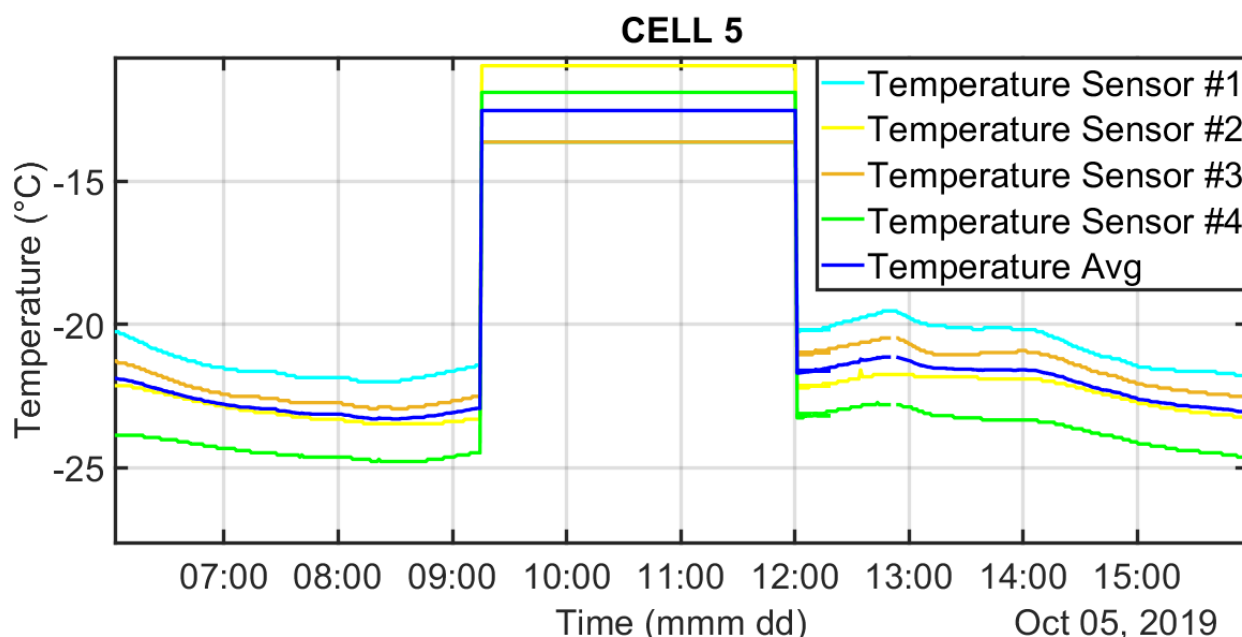


Figura 4-10: esempio spike e freezing temperature cella 5.

4.2.4. Coefficiente di correlazione

Una ulteriore analisi svolta sull'impianto oggetto di studio ha riguardato la correlazione tra variabili. Per implementare questa tecnica in MATLAB si è utilizzata una funzione ([Figura 4-11](#)) che calcola il coefficiente di correlazione; esso è un valore privo di unità di misura e compreso tra -1 e 1. Esso quantifica l'entità della relazione lineare tra due variabili. In particolare:

- Più il valore si avvicina a zero, più la correlazione lineare è debole.
- Un valore positivo è indice di una correlazione positiva, ovvero se una variabile aumenta, aumenta anche l'altro.
- Un valore negativo è indice di una correlazione negativa, ovvero il valore di una variabile tende ad aumentare quando l'altra diminuisce.

Prendendo in considerazione come variabili i sensori della cella 5 (colonna 17, 18, 19 e 20 della tabella importata in MATLAB) è possibile, mediante il seguente codice, creare una matrice di correlazione tra i sensori.

```
16 %% CORRELAZIONE SENSORI
17 TabellaRidotta2=Tabella1(:, [17 18 19 20]);
18 MatriceDiCorrelazione=corrcoef(TabellaRidotta2.Variables);
```

Figura 4-11: codice di correlazione

	sensore 1	sensore 2	sensore 3	sensore 4
sensore 1	1	0.9623	0.7174	0.0525
sensore 2	0.9623	1	0.7711	0.0592
sensore 3	0.7174	0.7711	1	0.2571
sensore 4	0.0525	0.0592	0.2571	1

Tabella 4-2: matrice di correlazione dei sensori della cella 5

Dalla matrice di correlazione riportata nella [Tabella 4-2](#) si può notare come i sensori 1, 2 e 3 abbiano un coefficiente di correlazione elevato tra loro, mentre il valore del coefficiente di correlazione del sensore 4, con ognuno degli altri sensori, risulta essere prossimo allo zero. Tale risultato è coerente con quello che si può notare dall'andamento delle temperature dei sensori interni alla cella 5 come mostrato in [Figura 4-7](#). Questo risultato dimostra come l'analisi di correlazione tra variabili possa essere utilizzata anche al fine di identificare eventuali malfunzionamenti in dispositivi di misura.

Per mettere in correlazione variabili con diverso tipo di dominio (variabili discrete e variabili continue) è stato adottato un metodo basato sulla creazione di grafici significativi. È stata effettuata un'analisi qualitativa riguardo alle seguenti variabili del compressore 3: consumo del compressore (totalizzatore), chiamata al compressore, corrente del motore. Dalla figura 4-12 si nota come, ogni volta che il compressore C3 viene chiamato ad essere operativo, il totalizzatore del suo consumo si incrementa e il motore del compressore assorbe corrente

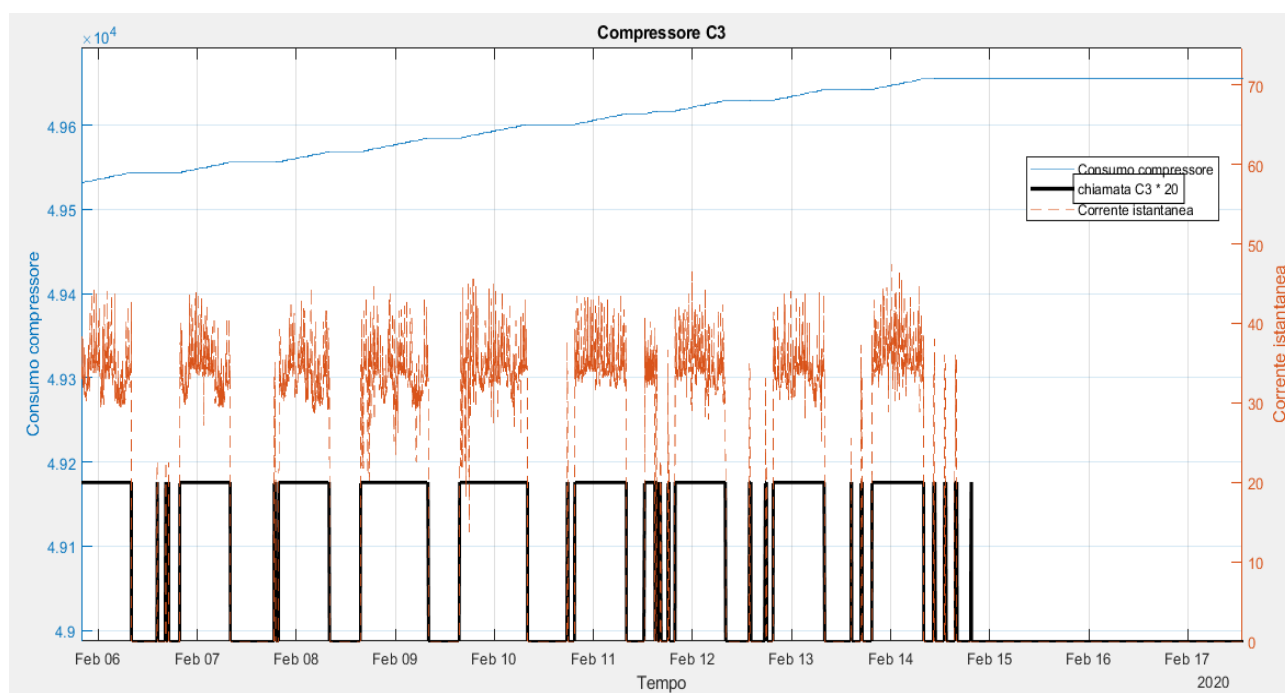


Figura 4-12: consumi del compressore 3

4.2.5. Analisi delle Celle frigorifere

Disponendo della logica attuale dell'impianto esposta nel capitolo 3 e delle osservazioni e soluzioni adottate nel capitolo 4, è stato possibile svolgere un'analisi del funzionamento attuale dell'impianto e delle corrispondenti prestazioni.

Per ogni cella frigorifera sono stati creati grafici significativi basandosi sui seguenti dati:

- Output degli algoritmi precedentemente descritti per la correzione di valori NaN e per la segnalazione di valori non coerenti;
- La temperatura interna della cella;
- La chiamata ai compressori da parte della cella;
- Il Set-point impostato;
- Lo stato dell'aerorefrigerante o degli aerorefrigeranti associati alla cella (EA);

Di seguito viene riportato a titolo esemplificativo il grafico della cella 2 completo.

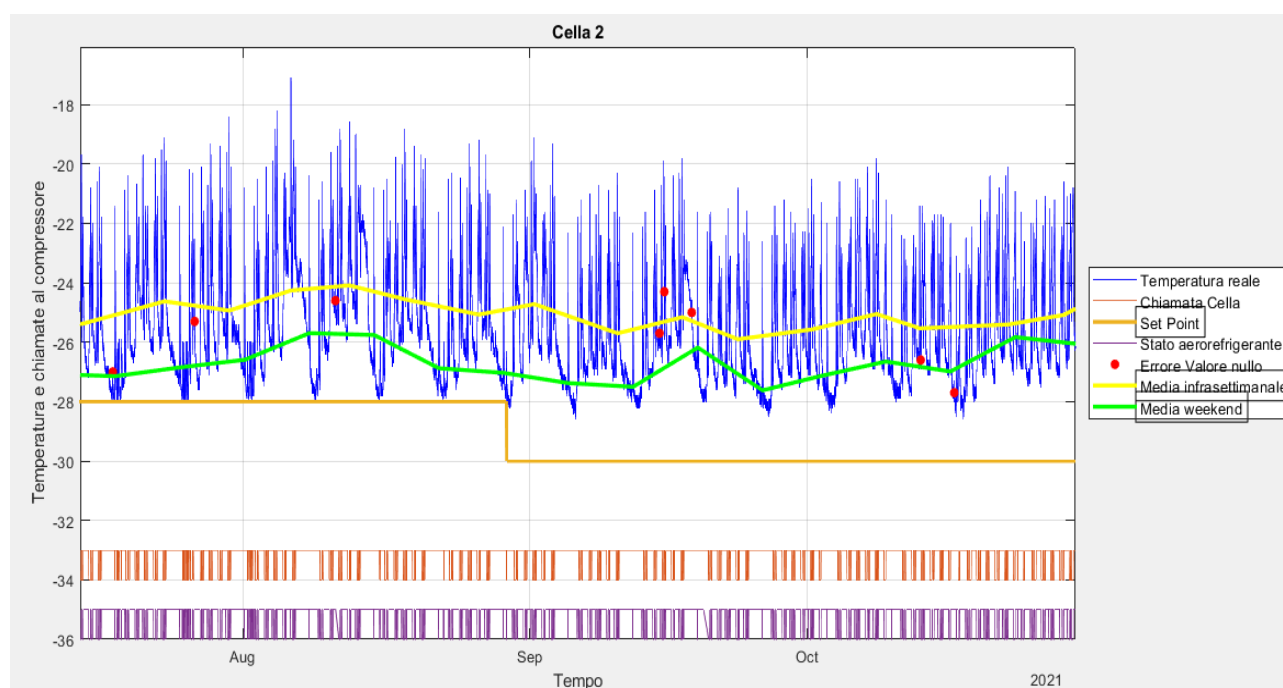


Figura 4-13: modello cella 2

Nel seguito vengono analizzati i comportamenti delle singole componenti del grafico e la loro interazione

4.2.5.1. Andamento della temperatura

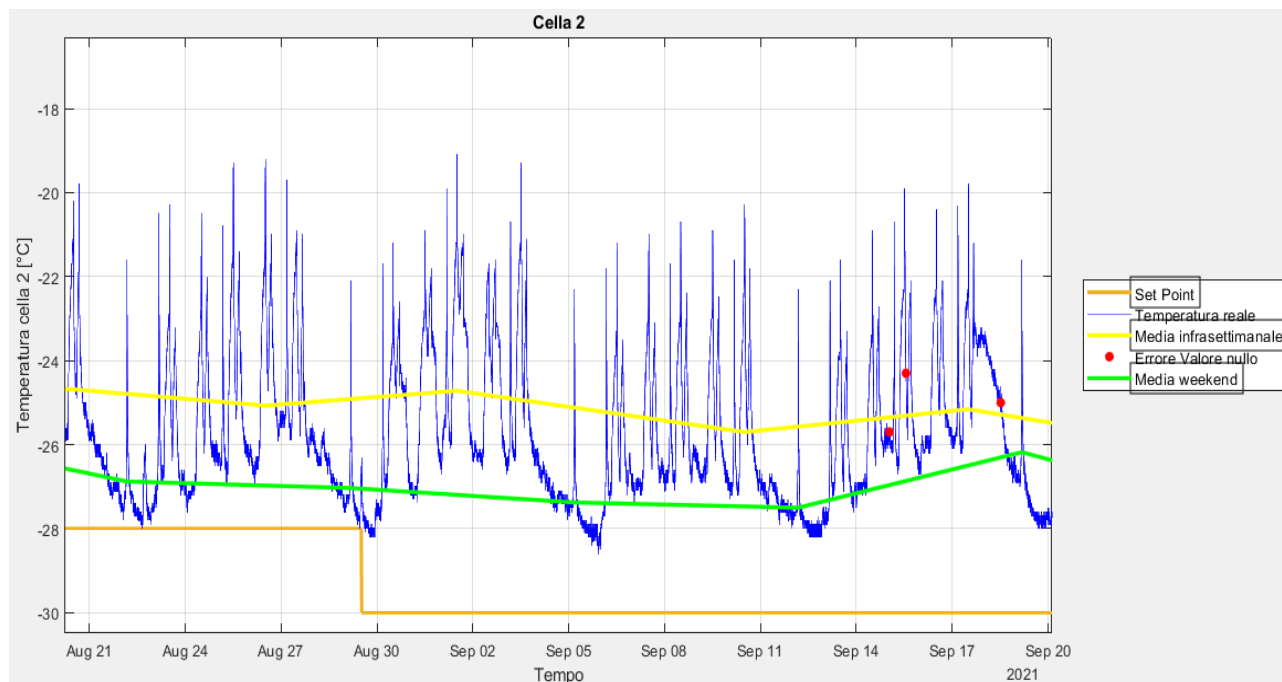


Figura 4-14: temperatura infrasettimanale e durante il weekend

Prendendo in considerazione dalla [Figura 4-13](#) il solo andamento della temperatura media infrasettimanale e la temperatura media durante il weekend, si può notare che l'andamento settimanale della temperatura di ogni cella sembra essere periodico, con un abbassamento drastico durante il weekend. La temperatura media durante il weekend risulta essere inferiore rispetto alla temperatura media calcolata durante la settimana. Nei fine settimana, visto l'assenza di operazioni di carico merci e la correlata mancata apertura della cella, il sistema risulta in grado di portare la temperatura della cella al valore di set-point richiesto (tipicamente -27°C). Nei giorni infrasettimanali il sistema invece non è in grado di assestare la temperatura interna della cella al valore di *set-point* previsto ma la temperatura è mediamente di 3-4 gradi superiore; tale comportamento in termini di temperatura è comunque considerato come funzionamento corretto della cella. Non risulta chiaro se ci sia una effettiva necessità di avere un set-point di temperatura così basso nei fine settimana visto che condizione operative caratterizzate da temperature della cella superiori sono considerate idonee. Tale gestione appare quindi non giustificata, portando inoltre ad un aumento dei consumi, delle emissioni e dei costi.

4.2.5.2. Aerorefrigeranti: funzionamento e sbrinamento

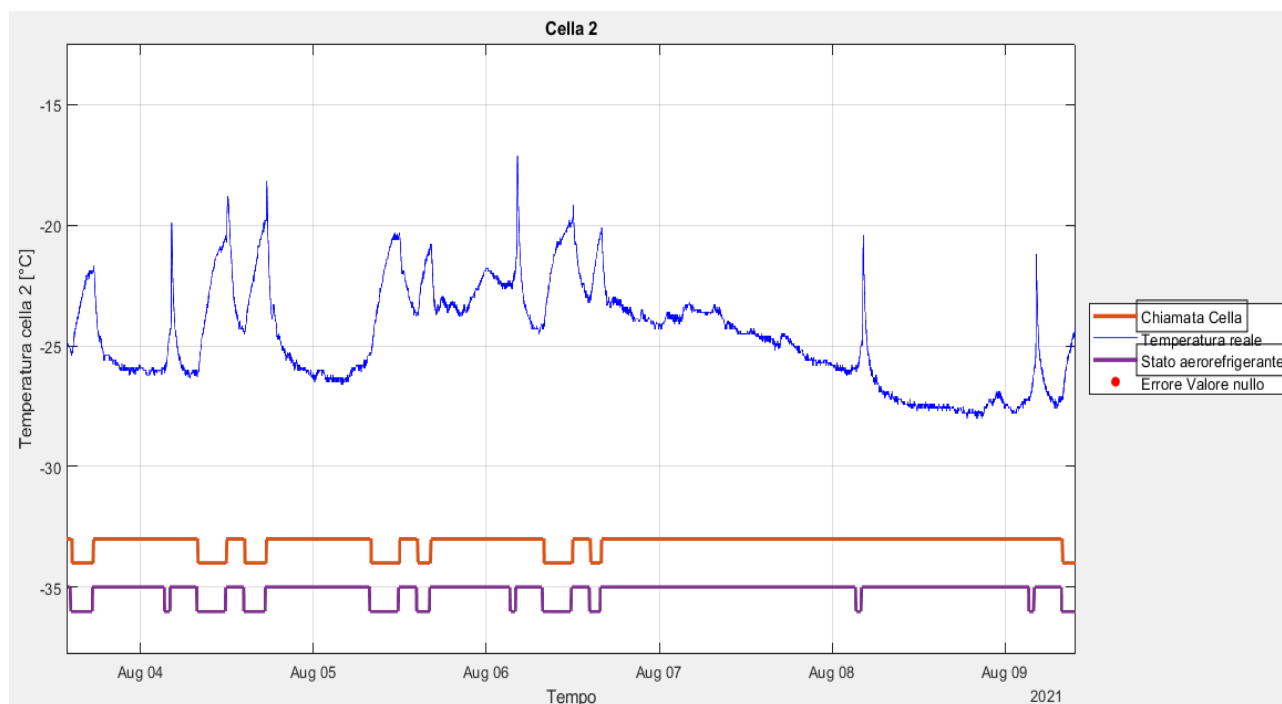


Figura 4-15: stato refrigerante EA4 e chiamata ai compressori della cella 2.

Lo stato dell'aerorefrigerante (EA) indica i momenti in cui si sta raffreddando la cella tramite l'immissione di gas NH₃ freddo; la corrispondente valvola di mandata sarà aperta e le ventole in funzione. Analizzando in particolare lo stato dell'aerorefrigerante EA4 (associato alla cella 2), la chiamata della cella 2 ai compressori e l'andamento della temperatura (vedi [Figura 4-15](#)) si nota come il superamento di una certa soglia di temperatura all'interno della cella generi una chiamata, in corrispondenza della quale l'aerorefrigerante si mette in funzione (stato da falso a vero). In seguito all'attivazione dell'aerorefrigerante, la temperatura all'interno della cella si abbassa. Come si può notare nella [Figura 4-15](#), a seguito del cambio di stato della chiamata di una cella, l'attivazione e lo spegnimento dell'aerorefrigerante avvengono in maniera sincrona.

In alcuni casi, come ad esempio dalle ore 3:20 alle ore 4:20 dell'8 e del 9 agosto, si nota uno spegnimento dell'aerorefrigerante EA4, sebbene la chiamata della cella rimanga alta e quindi ci sia necessità di continuare a raffreddare l'ambiente. Da queste condizioni è possibile dedurre che in tali istanti l'aerorefrigerante EA4 è sottoposto all'operazione di sbrinamento e che quest'ultima ha la priorità rispetto al raffreddamento della cella. Infatti la presenza di un'eccessiva quantità di brina sarebbe responsabile del peggioramento delle prestazioni dell'aerorefrigerante, della diminuzione della rispettiva capacità frigorifera e della potenza termica scambiata, mentre i consumi energetici aumenterebbero, conducendo ad un impianto poco efficiente e più costoso. Lo sbrinamento termina

quando viene raggiunta una temperatura prefissata o quando viene esaurito il tempo massimo prestabilito per suddetta operazione, dopodiché l'aerorefrigerante può riprendere a funzionare. Nel caso in cui una cella abbia un numero più elevato di aerorefrigeranti, l'operazione di sbrinamento non viene eseguita contemporaneamente su tutti ma in maniera alternata, in modo da non ridurre troppo le funzionalità della cella.

Nella gestione attuale dell'impianto si adotta una logica precauzionale nella quale lo sbrinamento viene effettuato in determinate fasce orarie che sono prefissate e numerose, non tenendo conto della reale presenza di brina sull'aerorefrigerante.

Sfruttando la presenza di sensori di temperatura disposti negli aerorefrigeranti sarebbe possibile implementare una logica di controllo che indichi quando lo sbrinamento è ritenuto necessario, fissando una temperatura minima dell'aerorefrigerante in corrispondenza della quale si registra la formazione di brina eccessiva sull'evaporatore. Effettuando l'operazione di sbrinamento solo quando risulta essenziale si eliminerebbero anche alcuni degli aumenti di temperatura evidenziati precedentemente durante la fase di raffreddamento della cella; questo porterebbe ad una diminuzione della temperatura media della cella, che abbasserebbe la propria temperatura interna più velocemente. Così facendo si eviterebbero sprechi di energia e si ridurrebbero di conseguenza i costi in maniera sensibile, nonché le emissioni.

Una seconda soluzione alternativa per effettuare lo sbrinamento in maniera intelligente consiste nell'adottare una logica di auto-calibrazione basata sul tempo necessario per completare la procedura di sbrinamento [18]: si misura la perdita di carico Δp a cavallo della batteria in assenza di brina e si opera fino a quando detto Δp non aumenta di un valore prefissato; dopodiché si avvia la procedura di sbrinamento e si misura il tempo necessario per sbrinare l'apparecchio: se detto tempo è superiore a un valore prestabilito in input la soglia di Δp viene abbassata, se l'operazione è stata completata in minor tempo tale soglia viene alzata.

5. Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha riguardato lo studio e l'analisi di un sistema multi-compressore reale per il raffreddamento di celle frigorifere.

Nel corso dell'analisi sono state evidenziate alcune criticità che hanno portato alla formulazione di soluzioni alternative al fine di migliorare il funzionamento, le politiche di gestione e l'efficienza energetica dell'impianto, abbassando anche i costi.

Le politiche gestionali e le tecniche di controllo adottate devono tenere conto e bilanciare due aspetti fondamentali spesso in conflitto tra loro: la corretta conservazione dei prodotti stoccati e i consumi, quindi i costi, del sistema.

L'analisi di tale impianto ha evidenziato le seguenti problematiche:

- Il sistema nei giorni infrasettimanali non è in grado di assestare la temperatura interna della cella al valore di *set-point* previsto (tipicamente -27°C) ma la temperatura è mediamente di 3-4 gradi superiore; tale comportamento in termini di temperatura è comunque considerato come funzionamento corretto della cella. Nei fine settimana viene mantenuto lo stesso set-point e in questo caso, visto l'assenza di operazioni di carico merci e la correlata mancata apertura della cella, il sistema risulta in grado di portare la temperatura della cella al valore di set-point richiesto. Ci si interroga quindi sulla effettiva necessità di avere un set-point di temperatura così basso nei fine settimana visto che condizione operative caratterizzate da temperature della cella superiori sono considerate idonee. Dall'analisi dei dati, l'ipotesi di "conservare il freddo" accumulato durante il weekend tramite tale abbassamento per risparmiare durante la settimana successiva non trova un reale riscontro. Senza disporre di ulteriori informazioni sulla reale esigenza in termini di profilo termico dei prodotti stoccati all'interno delle celle frigorifere, tale gestione appare quindi inutile, causando solamente un aumento dei consumi, delle emissioni e dei costi.
- Per quanto riguarda lo sbrinamento la gestione attuale effettua una manutenzione programmata, ovvero si segue una logica preventiva nella quale tale operazione viene effettuata in determinate fasce orarie che sono prefissate e numerose nell'arco di una giornata, senza tenere conto della effettiva presenza di brina sull'aerorefrigerante.
- Per soddisfare le richieste di carico dell'impianto i compressori vengono accesi sequenzialmente. Tale sequenza è fissata manualmente dagli operatori mediante il pannello di controllo. L'inserimento dei compressori in sequenza segue una strategia *a saturazione di macchina*. Questa strategia insieme con l'applicazione di logiche di sequenziamento statico

dei singoli compressori non consentono un bilanciamento automatico e ottimizzato del carico di lavoro.

- Durante l'analisi della cella 5 nel capitolo 4.2.3.2. si è discusso di un problema al sensore 4. In particolare è stato individuato un guasto che ha influenzato l'intero sistema per mesi, senza che in attesa di una sua riparazione o sostituzione, fossero intraprese delle azioni correttive al sistema di controllo.
- Durante l'analisi della cella 5 nel capitolo 4.2.3.2. si è discusso della mancanza di misure cautelative per far fronte a una condizione di processo in cui tutti i sensori di una cella sono soggetti contemporaneamente a malfunzionamenti.

Al fine di migliorare il funzionamento dell'impianto, riducendo di conseguenza i consumi, le emissioni ed i costi, sono state proposte le seguenti soluzioni:

- Adottare nel fine settimana una politica di gestione conforme con la temperatura effettiva degli altri giorni della settimana.
- Adottare una logica automatica che tiene conto della reale presenza di brina sull'aerorefrigerante per effettuare lo sbrinamento solo quando necessario. Tale proposta può essere realizzata sfruttando i sensori di temperatura attualmente presenti negli aerorefrigeranti o implementando una logica di auto-calibrazione che aggiorna dinamicamente dei parametri che indicano quando lo sbrinamento risulta necessario (vedi capitolo 4.2.5.2.).
- Tenere conto dell'ammontare totale delle ore di funzionamento dei compressori e implementare logiche automatiche di variazione della sequenza di avvio dei compressori al fine di garantire un bilanciamento del carico di lavoro dei compressori su archi temporali prestabiliti (ora, giorno, settimana).
- Adottare delle tecniche per la rilevazione di guasti in modo da poter sostituire i componenti alterati tempestivamente. Tali tecniche possono essere basate ad esempio su mediante la realizzazione di opportuni algoritmi o procedure in grado di canalizzare le misurazioni fornite dai singoli sensori e sul calcolo di coefficienti di correlazione tra le differenti variabili di processo.
- Utilizzare le informazioni calcolate da algoritmi intelligenti su eventuali malfunzionamenti dei sensori al fine di definire in maniera dinamica i sensori di temperatura sui quali basare il calcolo della temperatura media di ogni cella frigorifera.
- Correggere eventuali malfunzionamenti che possono pregiudicare la qualità dei dati a disposizione, cercando di evitare o di ridurre il più possibile la presenza di valori NaN nei CSV oggetto di analisi.

Bibliografia e sitografia

- [1] Commissione europea Centro comune di ricerca, Energy Use in the EU Food Sector: State of Play and Opportunities for Improvement, Lussemburgo: Ufficio delle pubblicazioni, 2015.
- [2] International Institute of refrigeration, Il ruolo della refrigerazione nell'economia globale, 2019, p. 38th Note on Refrigeration Technologies.
- [3] International Institute of Refrigeration (IIR), L'impronta di carbonio della catena del freddo, 2021.
- [4] S. Zanoni e B. Marchi, Chapter 11 - Environmental impacts of foods refrigeration, C. M. Galanakis, A cura di, Cambridge: Academic Press, 2021, pp. 239-259.
- [5] B. Marchi, L. Bettoni e S. Zanoni, Valutazione delle misure di efficienza energetica nelle catene di approvvigionamento del freddo alimentare: un caso di studio sull'industria lattiero-casearia, vol. 15, 2022.
- [6] [Online]. Available: <https://www.plattform-i40.de/>.
- [7] S. M. Zanoli, C. Pepe, E. Moscoloni e G. Astolfi, "Data Analysis and Modelling of Billets Features in Steel Industry", Sensors, vol. 22, 2022.
- [8] S. G. Gwanpua e e. al., Lo strumento FRISBEE, un software per ottimizzare il trade-off tra qualità del cibo, uso di energia e impatto del riscaldamento globale delle catene del freddo, vol. 148, 2015.
- [9] S. M. Zanoli, L. Barboni, F. Cocchioni e C. Pepe, "Advanced process control aimed to energy efficiency improvement in process industries", In Proc. 2018 IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT), 2018, pp. 57-62.
- [10] S. M. Zanoli, C. Pepe, G. Astolfi e C. a. C. (. in Proc. 2022 26th Int. Conference on System Theory, "Advanced Process Control of a cement plant grille cooler", in Proc. 2022 26th Int. Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2022, pp. 497-502.
- [11] S. M. Zanoli, G. Astolfi, L. Orlietti, M. Frisinghelli e C. Pepe, "Water Distribution Networks Optimization: a real case study", IFAC-PapersOnLine, vol. 53, 2020.
- [12] S. M. Zanoli, F. Cocchioni e C. Pepe, "Model Predictive Control with horizons online adaptation: a steel industry case study", in Proc. 2018 European Control Conference (ECC), 2018, pp. 2332-2337.
- [13] S. Marcello, «Edizioni Pubblicità Italia S.r.l.» 2007. [Online]. Available: <https://www.pubblicitaitalia.com/pesce/prodotti/il-pesce/2007/1/7245>.
- [14] «CENTRO STUDI GALILEO,» [Online]. Available: https://www.centrogalileo.it/nuovaPA/Articoli%20tecnici/business_edge/componenti_refrigerazione.htm.
- [15] Politecnico di Torino, Laurea a Distanza in Ingegneria Meccanica, Corso di Macchine, «Compressori di gas volumetrici».
- [16] Carel Industries Spa, Reciprocating compressors.
- [17] Carel Industries Spa, Scroll compressors.

- [18] MAYEKAWA ITALY, Technical Unit Manual (SO 87682).
- [19] D. Ibrahim e K. Mehmet, Refrigeration Systems and Applications, II a cura di, WILEY, 2010, pp. Capitolo 3, paragrafo 8.
- [20] IUPAC, «Compendium of Chemical Terminology (the “Goldb Book”),» II a cura di, IUPAC, 2019.
- [21] D. Ibrahim e K. Mehmet, Refrigeration Systems and Applications, II a cura di, WILEY, 2010, pp. Capitolo 3, Paragrafo 2, Sottoparagrafo 2.
- [22] HVAC-ITA, 2023. [Online]. Available: <https://hvac-eng.com/it/spiegazione-del-diagramma-del-ciclo-di-refrigerazione/>.
- [23] Climaveneta Spa, «Il ciclo frigorifero,» p. Capitolo 9.
- [24] Carel Industries Spa, Screw compressors.