



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea magistrale in  
Ingegneria Informatica e dell'Automazione

**MANUTENZIONE PREDITTIVA NEI COMPRESSORI INDUSTRIALI**

**PREDICTIVE MAINTENANCE IN INDUSTRIAL COMPRESSORS**

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. **SILVIA MARIA ZANOLI**

Tesi di Laurea di:

**FEDERICA MASSACCI**

**A.A. 2020/ 2021**



## **Indice**

### **Capitolo 1**

1 Introduzione.....	1
---------------------	---

### **Capitolo 2**

2 La manutenzione predittiva.....	5
2.1 Diverse strategie di manutenzione.....	7
2.1.1 Manutenzione preventiva .....	8
2.1.2. Manutenzione migliorativa.....	10
2.1.3 Manutenzione predittiva.....	11

### **Capitolo 3**

3 I compressori.....	15
3.1 Classificazione dei compressori.....	16
3.2 Compressori dinamici.....	17
3.2.1 Compressori Centrifughi.....	17
3.2.2 Compressori assiali.....	18
3.2.3 Compressori a flusso.....	19
3.3 Compressori volumetrici.....	19
3.3.1 Compressore alternativo.....	19
3.3.2 Compressore rotativo.....	20
3.4 Compressori a singolo rotore.....	22
3.4.1 Compressori a singola vite.....	22
3.4.2. Compressore a palette.....	23

3.4.3. Compressore ad anello liquido.....	24
3.4.4 Compressore scroll.....	25
3.5 Compressore a doppio rotore.....	26
3.5.1 compressore a lobi.....	26
3.5.2 Compressore a doppia vite.....	27
3.6 Compressore a doppia vite in dettaglio.....	30
3.6.1 Compressore a doppia vite a secco.....	30
3.6.2 Compressore a doppia vite ad iniezione ad olio.....	31
3.6.3 Ciclo di funzionamento.....	35
3.6.4 Olio di iniezione .....	37
3.6.5 Funzionamento dell'impianto di compressione.....	39
<b>Capitolo 4</b>	
4 Set up sperimentale.....	43
4.1 Descrizione del compressore in esame.....	43
4.1.1 Principio di funzionamento.....	44
4.1.2 Sensoristica.....	47
<b>Capitolo 5</b>	
5 Tecniche di processamento dei dati.....	49
5.1 Clusterizzazione.....	50
5.2 K-Means.....	52
5.3 Pre-processing dei dati.....	55
5.3.1 Selezione delle variabili.....	56

5.3.2 Standardizzazione delle variabili..... 58

5.4 Elaborazione dei dati..... 58

## **Capitolo 6**

6 Risultati sperimentali..... 61

6.1 Fase di training..... 61

6.1.1 Dati di training relativi ad olio nuovo..... 62

6.1.2 Dati di training relativi ad olio degradato..... 66

6.1.3 Dati di training relativi ad olio degradato e ridotto rispetto alle  
quantità standard..... 72

6.1.4 Matrice di confusione per i dati di training e calcolo dell'accuratezza  
79

6.2 Fase di testing..... 80

6.2.1 Dati de testing relativi ad olio nuovo..... 82

6.2.2Dati di testing relativi ad olio degradato.....83

6.2.3 Dati di testing relativi ad olio degradato e ridotto..... 89

6.2.4 Matrice di confusione per i dati di testing e calcolo dell'accuratezza  
94

## **Capitolo 7**

7 Conclusione..... 94



# Capitolo 1

## Introduzione

Oggigiorno i sistemi produttivi sono sempre più automatizzati, grazie alla presenza di macchine moderne e sofisticate, che non solo hanno il compito di garantire l'ottimizzazione della produzione, ma anche la salvaguardia della qualità del prodotto e la sicurezza dell'ambiente di lavoro. L'uso continuativo degli impianti causa, nel tempo, una perdita delle performance iniziali delle macchine rispetto alle loro condizioni iniziali. Per garantire dunque un funzionamento dell'impianto corretto ed efficiente è necessario effettuare manutenzione. Inizialmente l'attività manutentiva consisteva solamente nell'intervenire dopo che il guasto si era presentato, con riparazioni, sostituzioni di pezzi o cambiamenti nella modalità di utilizzo di un certo macchinario. Con il passare del tempo e con il progredire dello sviluppo tecnico e delle conoscenze, le tecniche di manutenzione sono diventate molto più complesse e permettono, attraverso il monitoraggio del sistema, di predire il guasto ed intervenire prima che questo si verifichi.

Oggetto di studio di questa tesi è l'applicazione di tecniche di analisi dati, in particolare tecniche di apprendimento non supervisionato, al fine di progettare un sistema di manutenzione predittiva in ambito industriale. In particolare, in questa tesi sono stati presi in considerazione i compressori a doppia vite, sempre più centrali nel mondo dell'industria. Il dataset cui si è appoggiato il seguente lavoro è stato ricavato da un set up sperimentale che ha permesso di acquisire dati di funzionamento del compressore in diverse condizioni. Lo scopo è quello di sostituire le classiche politiche di manutenzione periodica o correttiva, con una politica predittiva che risulta più efficace ed economica.

I dettagli del lavoro svolto saranno discussi ampiamente nei capitoli successivi, così organizzati:

- Capitolo 2: si fornisce una panoramica generale sulle differenti strategie manutentive, mettendone in risalto per ognuna vantaggi e svantaggi
- Capitolo 3: si presentano i diversi tipi di compressori presenti in ambito industriale, descrivendone il principio di funzionamento e le diverse caratteristiche che li contraddistinguono gli uni dagli altri. In particolare ci si focalizza sui compressori a doppia vite ad iniezione ad olio, che oltre ad essere i più usati in ambito industriale, sono l'oggetto di studio di questo lavoro
- Capitolo 4: si descrive il compressore preso in esame e il sistema di acquisizione e immagazzinamento dati che vi è stato sviluppato attorno.
- Capitolo 5: si descrivono le tecniche utilizzate per analizzare i dati
- Capitolo 6: si riportano i risultati ottenuti quantificando numericamente l'accuratezza del sistema di manutenzione sviluppato
- Capitolo 7: si propone un breve riassunto del lavoro svolto e possibili miglioramenti e aggiunte da fare per ampliare il progetto sviluppato



# Capitolo 2

## La manutenzione predittiva

Secondo la norma europea UNI EN 13306 con il termine manutenzione si intende: “La combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, durante il ciclo di vita di un’entità, volta a mantenerla o riportarla in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta”. [1]

Si parla oggi di una vera e propria ingegneria della manutenzione che consente di:

- minimizzare le fermate per guasti;
- assicurare un funzionamento ottimale delle macchine;
- ridurre i costi totali della produzione;
- garantire la sicurezza dell’ambiente di lavoro;
- aumentare l’efficienza della produzione

Le imprese hanno come obiettivo cardine la riduzione delle spese per poter massimizzare il guadagno, lasciando però inalterata la qualità del prodotto. Entra così in gioco la manutenzione, che si pone come obiettivo quello di far lavorare le macchine in modo efficiente e sicuro. Le moderne strategie manutentive non consistono più nell’intervenire solo dopo che il guasto si è verificato, ma analizzando i dati del sistema cercano di prevedere il verificarsi del guasto ed intervenire con anticipo. Il guasto, se preso in tempo, spesso apporta meno danni, e quindi meno tempo di riparazione e di conseguenza un fermo macchina e un fermo produzione minori, che corrispondono a meno perdite e quindi a maggiori profitti. Come accennato sopra, gli obiettivi e di conseguenza le tecniche della manutenzione sono evolute nel corso del tempo. Nel paragrafo seguente si descrivono più in

dettaglio i vari tipi di manutenzione, soffermandosi in particolare sulla manutenzione predittiva, oggetti di studio di questa tesi.

## 2.1 Diverse strategie manutentive

Una prima distinzione da fare è quella tra politica e strategia manutentiva. La politica manutentiva rappresenta l'attitudine generale dell'impresa rispetto alla risoluzione dei problemi legati alla manutenzione. La strategia di manutenzione invece, si pone a valle rispetto alla politica e rappresenta la traduzione in interventi operativi, in accordo con i principi della politica manutentiva adottata dall'impresa. Si riporta di seguito uno schema con la suddivisione delle varie strategie manutentive.

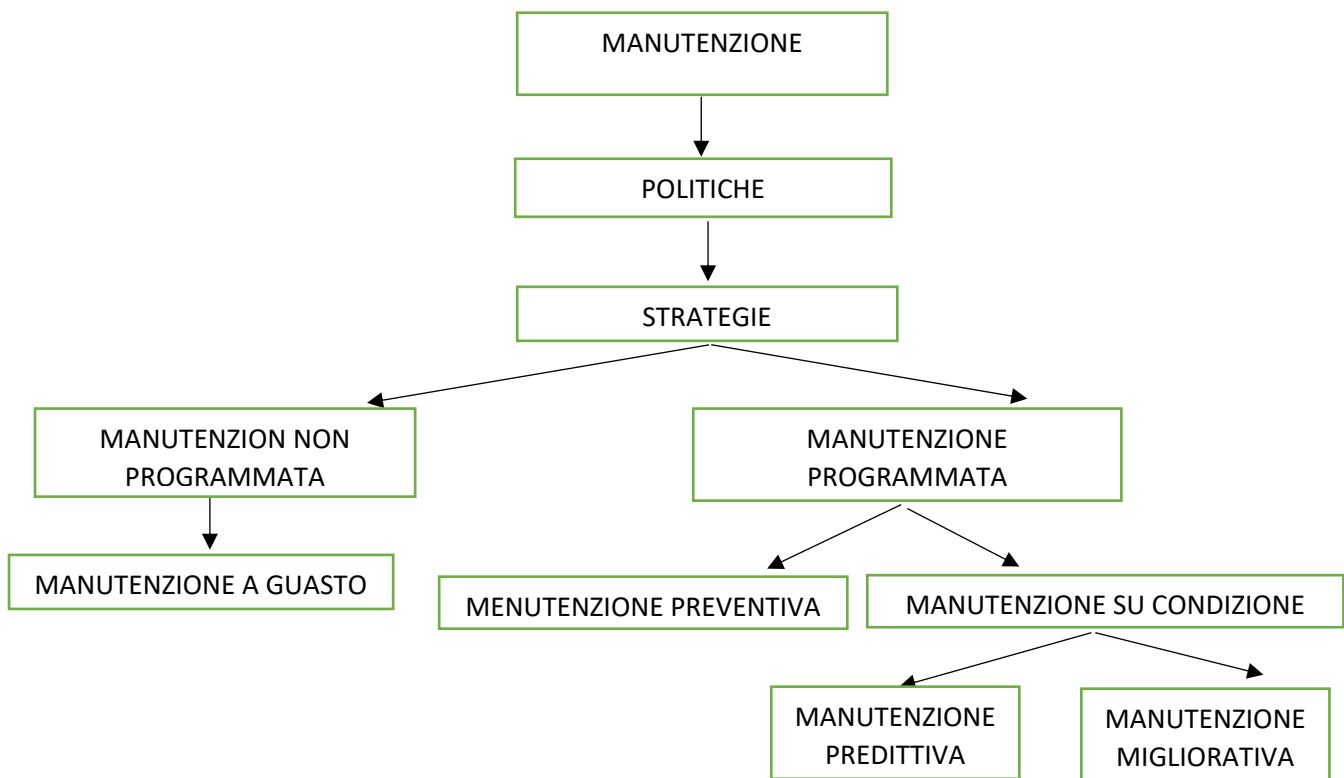


Figura 2.1 Suddivisione delle strategie di manutenzione

La prima divisione effettuata è tra la manutenzione programmata e quella non programmata. Fa parte della manutenzione programmata la manutenzione a guasto, detta anche correttiva. La manutenzione programmata a sua volta si suddivide in manutenzione preventiva e manutenzione su condizione, nella quale si distinguono la manutenzione predittiva e la manutenzione migliorativa. Esaminiamo adesso nel dettaglio le varie strategie.

### 2.1.1 Manutenzione su guasto

La manutenzione su guasto, detta anche correttiva (“run-to-failure”), è una strategia di manutenzione non programmata; come dice il nome stesso, quando intervenire non è stabilito con anticipo, ma viene fatta manutenzione solo quando il guasto ormai si è verificato. Riportiamo per maggiore precisione la definizione che ne viene data dalla normativa europea UNI EN 13306: “manutenzione eseguita a seguito della rilevazione di un’avarìa e volta a riportare l’entità nello stato in cui essa possa eseguire la funzione richiesta” [1]. Di seguito un’immagine che mette in relazione lo stato di salute della macchina in funzione del tempo:

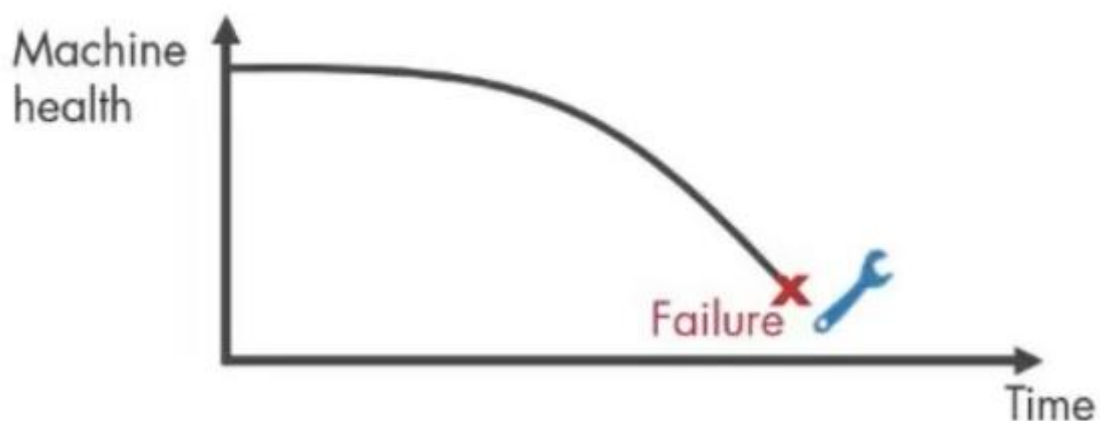


Figura 2.2 Grafico dello stato di salute della macchina in funzione del tempo

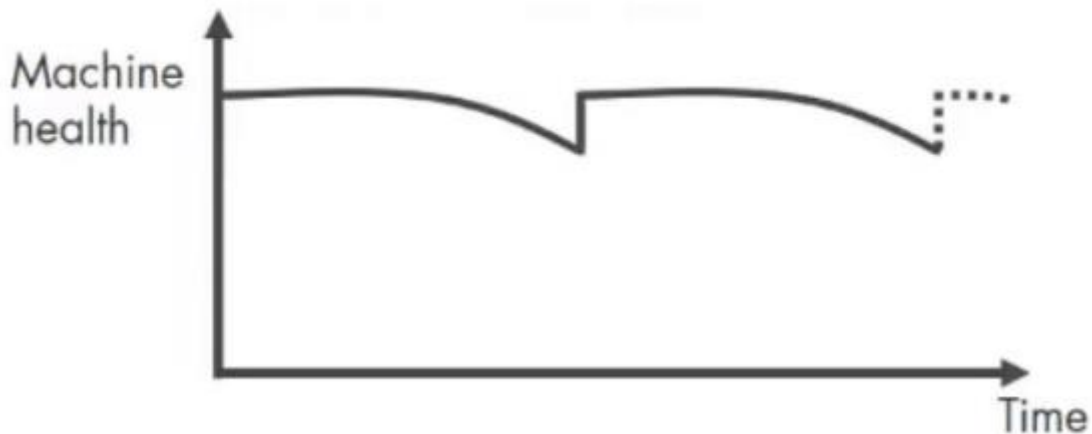
Inizialmente lo stato di salute della macchina è ottimale, dopodiché, con il tempo c'è un calo delle prestazioni, fino a quando non si verifica il guasto, solo in questo momento, e non prima, si interviene con la manutenzione.

Tra le strategie di manutenzione questa è la più antica ma anche la più rudimentale, in quanto non viene eseguita nessun tipo di analisi sul sistema, ma, solo quando il guasto si verifica si attuano riparazioni, sostituzioni di un pezzo o modifiche nella politica di funzionamento di una macchina o dell'intero sistema. Per quanto possa sembrare una scelta rudimentale, la manutenzione su correzione può rivelarsi una buona strategia quando si è in presenza di macchinari non critici o a basso costo. In queste casistiche il vantaggio sta nel fatto che i macchinari non critici sono a basso rischio di guasto e non avendo un costo elevato risulta conveniente lasciar verificare il guasto, piuttosto che anticiparlo con tecniche di manutenzione più efficaci, ma anche più costose da un punto di vista tecnico e organizzativo. Tuttavia, attuando questa politica, risulta impossibile evitare il fermo macchina e quindi si è obbligati a rinunciare all'idea di una produzione continua.

### **2.1.2 Manutenzione preventiva**

“Manutenzione eseguita ad intervalli predeterminati o in base a criteri prescritti e volta a ridurre la probabilità del guasto o il degrado del funzionamento di un'entità” [1], è questa la definizione fornita dalla norma europea UNI EN 13306. La manutenzione preventiva fa parte delle strategie manutentive programmate in quanto, a differenza della manutenzione correttiva, non viene eseguita dopo il verificarsi del guasto, ma si prefigge l'obiettivo di eseguire un intervento di “revisione”, “riparazione” o “sostituzione” prima del manifestarsi del guasto. L'idea su cui si basa questa politica è che si è in grado di stimare la vita media utile di un componente, a partire da questa informazione gli interventi manutentivi vengono

programmati in modo tale da intervenire prima che il componente possa andare in avaria o raggiungere un livello di usura non accettabile.



*Figura 2.3 Stato di salute della macchina in funzione del tempo con interventi di manutenzione preventiva*

Come mostra il grafico, gli interventi si ripetono periodicamente nel tempo ogni qual volta le condizioni di usura della macchina aumentano e quindi ne diminuisce lo stato di salute, come mostrato nel grafico. La manutenzione preventiva ha come punti di forza tutti i punti deboli della strategia correttiva: implementando la manutenzione preventiva si riesce a diminuire il numero di guasti e ad ottimizzare l'impiego del personale addetto alla manutenzione. Tuttavia ha come punto debole il fatto che programmare interventi ad intervalli di tempo prefissati non sempre si rivela una scelta vincente, in quanto è un'evidenza sperimentale che la maggior parte dei guasti si verificano in modo casuale.

Uno dei fattori fondamentali al fine di valutare la convenienza dell'applicazione di un programma di manutenzioni preventive è quello dei costi. Il costo aggiuntivo delle manutenzioni preventive deve essere giustificato da una riduzione del costo degli interventi di riparazione e da un aumento delle performance del sistema. Mettiamo adesso a confronto i costi di manutenzione preventiva e su guasto in funzione della frequenza degli interventi di manutenzione preventiva.



Figura 2.4 Costi della manutenzione preventiva e correttiva

Il grafico sopra riportato mostra che il costo della manutenzione su guasto diminuisce all'aumentare della frequenza degli interventi di manutenzione predittiva: più si interviene con anticipo sui malfunzionamenti e meno sono gli interventi mirati che si devono fare in caso di rotture o gravi danni. Il costo della manutenzione predittiva aumenta invece con la frequenza degli interventi effettuati. Per ottimizzare la curva dei costi bisogna trovare il giusto compromesso tra gli interventi manutentivi e quelli correttivi. Si possono poi fare scelte, sempre volte a minimizzare i costi, tenendo anche in considerazione il tipo di macchina o strumento: in presenza di attrezzature cruciali sicuramente la manutenzione preventiva si rivela essere la scelta vincente, quando invece ci sono elementi piccoli e non cruciali allora conviene adottare una politica di manutenzione correttiva in quanto i costi della manutenzione preventiva in questo caso sarebbero ben maggiori.

### 2.1.3 Manutenzione migliorativa

La manutenzione migliorativa, detta anche manutenzione proattiva, è una politica di manutenzione che prevede un intervento di revisione finalizzato a migliorare il valore o la prestazione del sistema o di una sua parte. La manutenzione migliorativa dà la possibilità di risolvere alcuni problemi con

interventi a basso costo, attraverso questa strategia è possibile riuscire ad eliminare in modo permanente problemi ricorrenti. Per contro, a volte questo approccio si rivela inefficiente laddove sia difficile o impossibile individuare la radice del guasto. L'implementazione della strategia migliorativa può richiedere importanti azioni di riprogettazione dell'impianto, conducendo dunque ad elevati costi e lunghi periodi di fermo macchina.

#### **2.1.4 Manutenzione predittiva**

La manutenzione predittiva è così definita dalla norma europea UNI EN 13306: “manutenzione su condizione eseguita in seguito ad una previsione derivata dall'analisi e dalla successiva valutazione dei parametri significativi afferenti il degrado dell'entità” [1]. L'idea su cui si basa la manutenzione predittiva è che un guasto non si verifica istantaneamente, ma il deterioramento che porta al guasto si verifica in un certo lasso di tempo. Individuare e monitorare in tempo reale i parametri che forniscono informazioni utili circa lo stato di salute del sistema, consente di poter predire quando il guasto si verificherà e programmare gli interventi prima del suo manifestarsi, evitando così lunghi fermi macchina non previsti e generando dei risparmi notevoli. La manutenzione predittiva, attraverso le diverse tecniche di condition monitoring, consente di rilevare e misurare alcuni parametri in grado di dare informazioni sullo stato della machine. Si sviluppano in seguito le attività di pianificazione delle azioni adatte ad aumentare la vita utile del componente.

Una strategia di manutenzione predittiva non è da considerare alternativa alle altre strategie di manutenzione, ma come un valore aggiunto all'interno di un programma manutentivo complessivo. Mentre i tradizionali piani manutentivi si occupano di fornire una risposta laddove si verificano guasti, la manutenzione predittiva agisce solo quando lo richiedono le condizioni dell'attrezzatura. Di conseguenza, l'implementazione di questa strategia non

può fornire un'alternativa alla manutenzione correttiva e preventiva, bensì un valido supporto all'interno di un piano manutentivo globale.

La manutenzione predittiva è basata sul principio secondo il quale il monitoraggio sistematico delle condizioni reali dei macchinari e dell'efficienza operativa del processo, porta ad avere il massimo tempo tra due interventi manutentivi consecutivi, il minimo numero e costo dei guasti non programmati e migliorare l'uptime complessivo dell'impianto. L'applicazione di un piano predittivo integrale, ovvero un piano che comprende anche il monitoraggio dei parametri di sistema, porta ad un miglioramento dell'efficienza operativa e quindi della produttività dell'impianto. Nonostante gli innumerevoli vantaggi appena elencati, vi sono anche degli svantaggi nella scelta di adottare questa politica: per poter monitorare tutti i parametri è necessario dover acquistare diversi sensori da montare sull'impianto, inoltre per poter fare le previsioni su quando potrà avvenire il guasto è necessario conoscere in modo accurato il comportamento delle macchine, e ciò è possibile solo disponendo di un lungo storico dei dati.

Come accennato in precedenza, la manutenzione predittiva si basa sul monitoraggio dei parametri della macchina. Le tecniche di monitoraggio più utilizzate sono:

- monitoraggio visivo: alla ricerca di difetti e disallineamenti
- monitoraggio della rispondenza alle specifiche: verifica che i parametri di esercizio di un macchinario corrispondano ai valori delineati in fase di progetto
- monitoraggio delle vibrazioni e del rumore

I parametri che vengono generalmente monitorati sono:

- Vibrazioni
- Velocità



- Stato dei cuscinetti
- Temperatura
- Tensione e corrente del motore
- Livello dell'olio
- Numero di giri
- Acustica
- Pressione

Questa strategia adotta il monitoraggio dell'andamento dei parametri per conoscere lo stato del sistema, predire il guasto e di conseguenza pianificare gli interventi manutentivi.

Per monitorare i parametri sopra menzionati è necessario equipaggiare i macchinari di un apparato sensoristico adeguato. I sensori vengono montati e collegati alla rete in modo da disporre dei dati anche in real time. La manutenzione predittiva è un esempio concreto di applicazione dell' IoT (Internet of Things) ovvero della connessione in rete degli oggetti, nel nostro caso delle macchine che costituiscono l'impianto. L'IoT insieme all'analisi dati e al machine learning costituiscono i presupposti tecnologici indispensabili per la manutenzione predittiva [9]. Ciò a cui si vuole essere in grado di arrivare è:

- Prevedere le condizioni del guasto, calcolando sia il tempo che intercorre tra un guasto e l'altro, sia le azioni da intraprendere a livello di manutenzione ordinaria
- Reclutare grandi quantità di dati dai sensori e utilizzare gli storici per applicare gli algoritmi di machine learning che consentono di fare previsioni sui guasti
- Stimare la vita residua del macchinario, in modo da poter valutare il bisogno di sostituzione o manutenzione e soprattutto evitare che eventi

straordinari possano incidere negativamente sulla produzione aziendale

Nel prossimo capitolo si descrivono le diverse tipologie di compressori, facendo particolare riferimento al compressore preso in esame in questo lavoro e il sistema di acquisizione dati che vi è stato installato.

# Capitolo 3

## I compressori

I compressori sono definiti come macchine pneumofore, ossia operatrici a fluido adibite alla produzione di aria compressa o alla surcompressione di altri fluidi gassosi (gas illuminante, gas d'acqua, ammoniaca, anidride carbonica, anidride solforosa, idrogeno, gas ammoniacali, cloruro di metile, cloro-etile, ecc.) o di miscele gassose.

Tra i compressori rientrano anche i termocompressori o pompe di calore destinati nell'industria a elevare la pressione del vapore d'acqua, prodotto negli apparecchi di concentrazione di soluzioni acquose, allo scopo di farne evaporare di nuova. Il fluido acquista all'interno del compressore energia potenziale o di pressione a spese del lavoro meccanico fornito dalla macchina azionatrice. Questo lavoro di compressione viene effettuato nelle diverse categorie di compressori mediante: a) il moto rettilineo alterno di uno o più stantuffi; b) il moto rotatorio di uno o più organi nei compressori a stantuffo ordinari, attraverso il moto rotatorio di uno o più organi (talvolta stantuffi) nei compressori rotativi; c) la rotazione di più ruote palettate, calettate in serie sull'albero della macchina e alternate con appositi organi fissi di diffusione nei turbocompressori [1].

La scelta del tipo di compressore all'interno di un impianto è centrale, in quanto i compressori oltre ad essere una delle apparecchiature più costose influenzano in maniera sensibile le performance del processo. I compressori più utilizzati in ambito industriale sono: i compressori alternativi a singola vite, a doppia vite, centrifughi, scroll e a vano rotante.

## 3.1 Classificazione dei compressori

Esistono diverse tipologie di compressori, la figura di sotto rappresenta come vengono classificati.

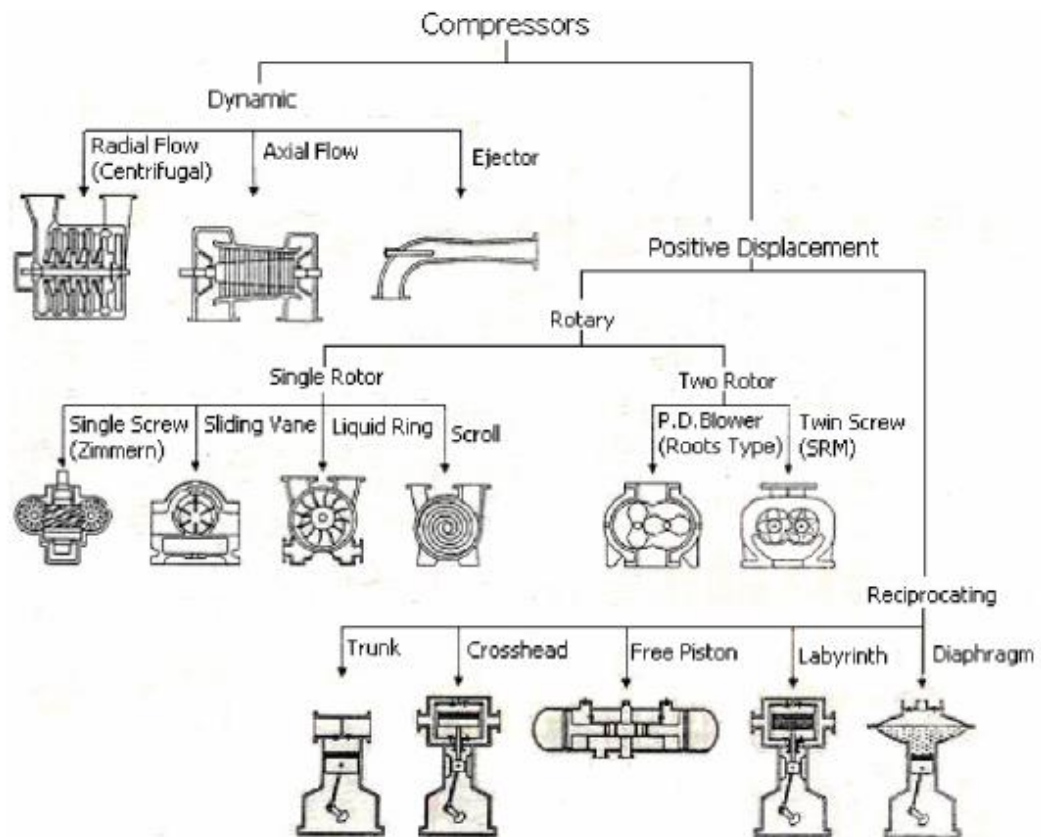


Figura 3.1 classificazione dei compressori

Le due grandi macrocategorie sono quelle dei compressori volumetrici e quella dei compressori dinamici.

Nei compressori volumetrici la compressione è prodotta come risultato della riduzione del volume racchiuso da elementi rotanti, che possono essere:

- Compressori rotativi
- Compressori alternativi

Nei compressori dinamici si sfrutta invece il principio della dinamica e si suddividono in:

- Compressori a flusso radiale (centrifughi)
- Compressori a flusso assiale
- Compressori a flusso misto

I parametri principali che permettono di differenziare ogni singolo compressore sono:

- Capacità di portata massica;
- Pressione all'aspirazione;
- Pressione operativa allo scarico;
- Temperatura all'aspirazione;
- Velocità.

## **3.2 Compressori dinamici**

I compressori dinamici si dividono in compressori a flusso radiale, più noti come compressori centrifughi e compressori a flusso assiale.

### **3.2.1 Compressori centrifughi**

I compressori centrifughi sono macchine di semplice costruzione, la presenza del campo centrifugo facilita la compressione. Questo tipo di compressori può trattare fluidi che hanno in sospenso parti solide senza provocare il logorio delle parti meccaniche, perché i giochi tra le parti sono relativamente grandi [3]. Nella figura che segue se ne riporta un esempio.

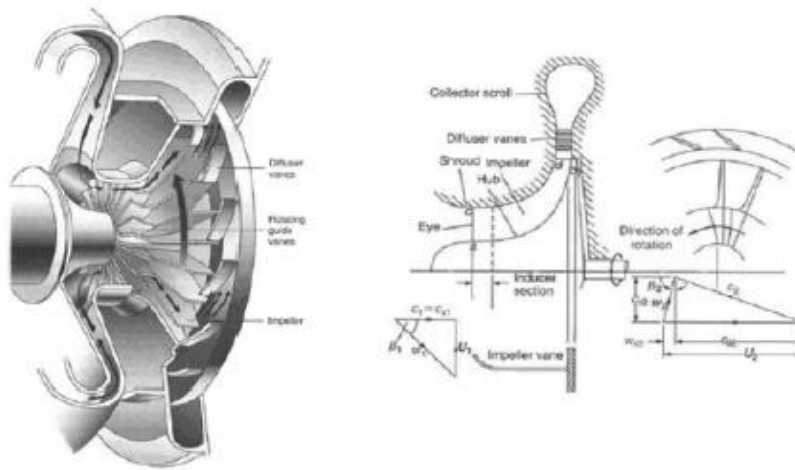


Figura 3.2 compressore centrifugo

### 3.2.2 Compressore assiale

I compressori assiali sono costituiti da una o più serie di pale montate su di un rotore, alternate a serie di pale fisse montate sull'involucro (statore).

Nella parte frontale del compressore si ha una serie di pale direttrici con lo scopo di fornire al fluido, prima dell'ingresso del compressore, una determinata velocità tangenziale. Nel rotore una parte dell'energia cinetica del fluido viene trasformata in pressione mediante un processo di diffusione, variando la sezione dei condotti compresi tra le pale rotanti, si riesce a dar luogo ad un primo aumento della pressione statica [3].

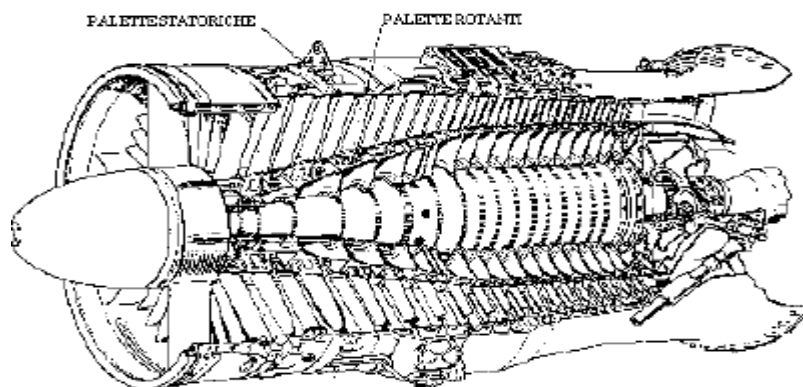


Figura 3.3 compressore assiale

### ***3.2.3 Compressore a flusso***

I compressori a flusso misto sono simili ai compressori centrifughi. Si differenziano sul fatto che le componenti assiale e radiale sono disponibili all'esterno del rotore e che questo tipo di compressori prevede un diffusore per girare il flusso dalla direzione diagonale a quella assiale [3].

## **3.3 Compressori volumetrici**

I compressori volumetrici sono ben noti per la loro capacità di spostare la medesima quantità di aria ad ogni ciclo motore. Questa macchina volumetrica è infatti caratterizzata da una portata di aria che aumenta in modo direttamente proporzionale rispetto alla velocità di rotazione del motore e da un rapporto di compressione indipendente in relazione alla velocità di rotazione. Quindi permette una pressione di sovralimentazione costante nel tempo.

Si hanno i compressori volumetrici alternativi e i compressori volumetrici rotativi.

### **3.3.1 Compressore alternativo**

Un compressore alternativo mostrato in *Figura 3.4* può essere schematizzato mediante un sistema stantuffo-cilindro munito di due valvole, una di aspirazione e l'altra di mandata. Solitamente le valvole sono di tipo automatico. Essi possono essere comandati tramite un manovellismo che permette la trasformazione del moto da circolare continuo, quale è quello generalmente fornito da motori elettrici e termici, in alternativo, così come richiesto.

Vantaggi

1. Alta efficienza, particolarmente se nuovi o dopo revisione;
2. Possibilità di ottenere elevate pressioni di scarico.

## Svantaggi

1. Richiede elevata manutenzione;
2. Alti costi;
3. Molte parti in movimento;
4. Velocità fissa;
5. Elevato rumore di esercizio;
6. Richiede un dispositivo di smorzamento delle vibrazioni;
7. L'efficienza crolla tra due revisioni [3]

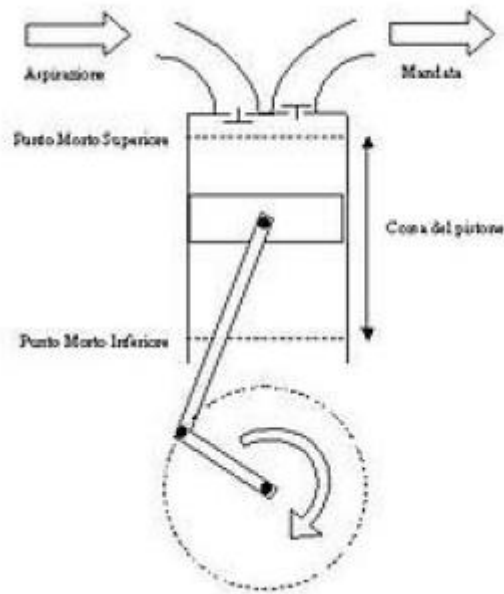


Figura 3.4 compressore alternativo

### 3.3.2 Compressore rotativo

Un compressore volumetrico rotativo come in *Figura 3.5* è costituito da uno o più rotori e da un involucro fisso o statore. La grande sicurezza di funzionamento, unitamente alle ridotte esigenze di manutenzione ottenute



mediante la semplicità costruttiva di tale tipo di macchina, ha permesso di ampliare significativamente e rapidamente il suo campo di impiego.

I vantaggi sono:

1. Accoppiamento diretto data l'elevata velocità di rotazione;
2. Ridotte esigenze di spazio;
3. Ridotto peso;
4. Funzionamento esente da vibrazioni.
5. Ridotto rumore di esercizio;
6. Ridotta manutenzione;
7. Spazio morto trascurabile;
8. Assenza di volano;
9. Assenza delle valvole.

Gli svantaggi sono:

1. Pressione di mandata imposta dalla geometria dei vani rotorici;
2. Utilizzo preferibile di fluidi chimicamente non aggressivi

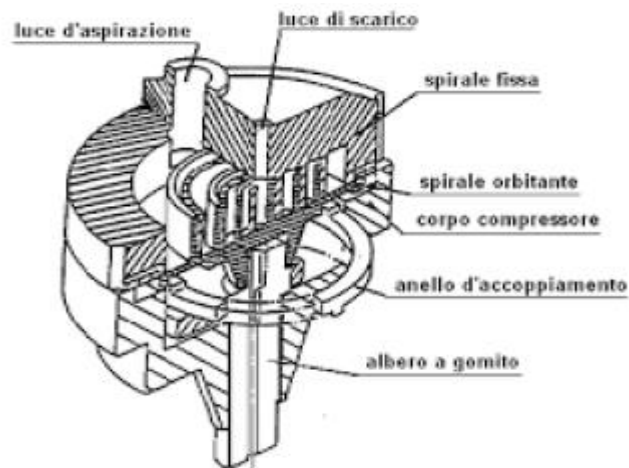


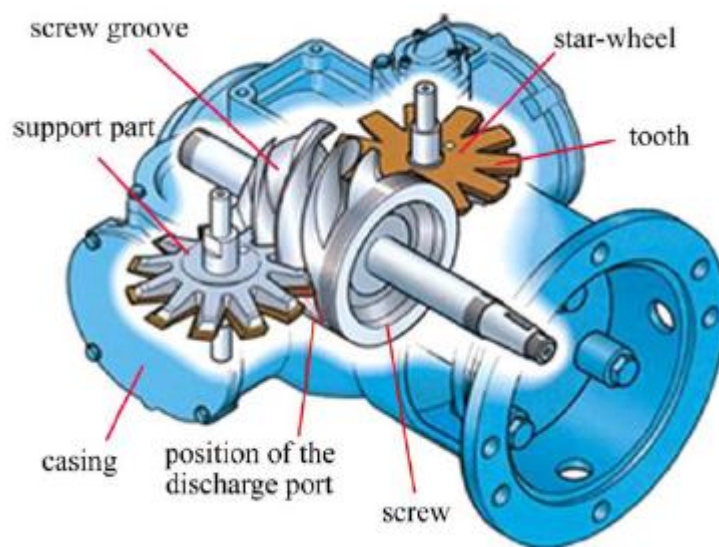
Figura 3.5 compressore rotativo

Esistono differenti tipi di compressori rotativi, ma in particolar modo, il compressore più usato nelle industrie è il compressore a doppia vite [3]

## 3.4 Compressori a singolo rotore

### 3.4.1 Compressore a vite singola (single screw compressors)

Questa tipologia di compressore si serve di un singolo rotore principale che ingrana con due otturatori, dotati di denti come in *Figura 3.6*. In genere la vite principale è guidata da un motore elettrico. I rotori condotti possono essere prodotti in metallo o in leghe di metalli.



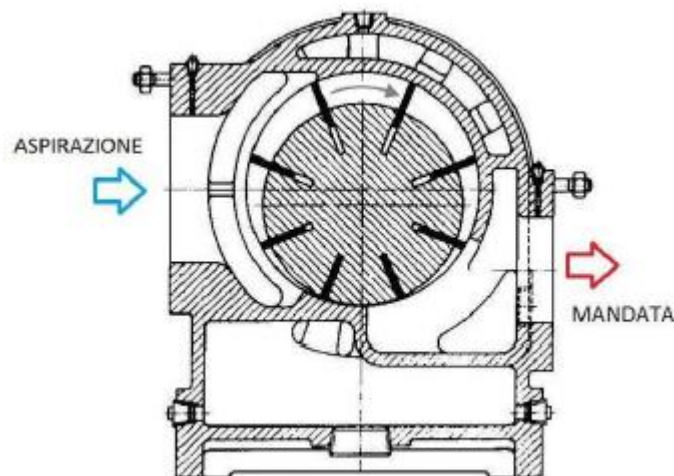
*Figura 3.6 compressore a vite singola*

Le incanalature formatesi tra questi rotori ed il rotore principale raccolgono il gas dalla luce di aspirazione racchiudendolo tra di esse e l'housing del compressore, costringendolo ad avanzare attraverso il percorso di ingranamento, verso la luce di scarico. Così facendo il volume del gas intrappolato diminuisce fino a raggiungere la pressione di scarico.

Al fine di ottenere maggior efficienza, diminuire i trafilamenti e agevolare la manutenzione, questa tipologia di compressori utilizza solitamente conformazioni ermetiche o semi-ermetiche [3].

### 3.4.2 Compressore a palette

I compressori a palette si compongono di tre organi principali: rotore, statore e palette. Rotore e statore sono cilindri eccentrici in modo da essere tangenti in un punto delle loro circonferenze; sul rotore sono ricavate delle cave radiali estese su tutta la lunghezza del pezzo. Nelle cave sono alloggiare le palette che sono lasciate libere di traslare nella direzione radiale del rotore. Durante la rotazione, per effetto della forza centrifuga, le palette fuoriescono dalle proprie scanalature di alloggiamento fino a strisciare sulla superficie interna dello statore. In questo modo e per effetto dell'eccentricità, ogni coppia di palette consecutive genera un vano a volume ciclicamente variabile; questa caratteristica viene opportunamente sfruttata per la compressione dei gas come mostrato in *Figura 3.7*.



*Figura 3.7 schema generale di funzionamento di un compressore a palette*

Disponendo in opportune posizioni radiali sullo statore le luci di aspirazione e mandata del fluido, si ottiene l'effetto di riempire il vano con il fluido alla pressione minima quando il volume del vano è massimo, e di svuotarlo quando il volume del vano è minimo ed il fluido si trova alla massima pressione. La macchina è quindi rotativa in considerazione del tipo di moto prevalente compiuto dagli organi che la compongono ed è volumetrica

perché l'innalzamento della pressione del gas elaborato viene ottenuto mediante una diminuzione del volume nel quale il gas viene racchiuso [3].

### ***3.4.3 Compressore ad anello liquido***

Il compressore ad anello liquido è per certi versi molto simile al compressore a palette precedentemente descritto, con la differenza che tra il rotore palettato e la cassa statorica è iniettato del liquido, solitamente acqua, che funge da tramite tra i vani ed impedisce il contatto tra il fluido evolvente e le pareti metalliche della cassa. Durante la rotazione del rotore, il liquido, a causa dell'azione delle palette, è spinto alla periferia del cilindro, formando un anello continuo. Dato che il gas compresso è in contatto con l'acqua, la sua temperatura finale alla mandata può essere molto prossima alla temperatura di ingresso dell'acqua, ragion per cui questi compressori trovano larga applicazione in quei settori della tecnica in cui è richiesta una temperatura di uscita del fluido evolvente molto bassa. Sono altresì utilizzati quando è necessario comprimere gas altamente corrosivi in quanto la presenza di liquido all'interno del compressore, escludendo il contatto del fluido evolvente con le pareti della cassa, protegge la macchina dall'azione corrosiva del gas elaborato. È evidente che, a causa dell'attrito provocato dal liquido sulle pareti della cassa e delle turbolenze connesse al moto delle palette immerse nel liquido, si verificano perdite piuttosto ingenti con conseguenti valori modesti del rendimento. Le pressioni di mandata possono raggiungere i 10-11 bar con compressioni a più stadi [3].

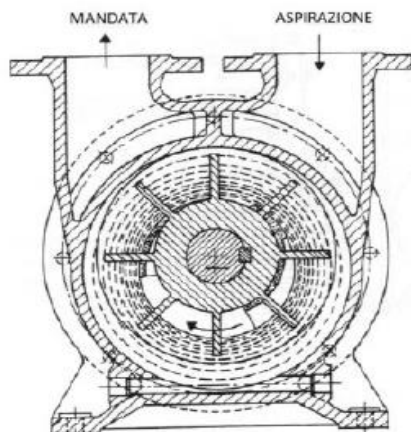


Figura 3.8 compressore rotativo ad anello liquido

### 3.4.4 Compressore scroll

Il principio di funzionamento del compressore scroll è piuttosto semplice. La macchina è costituita essenzialmente da una spirale ad evolvente fissa, come in *Figura 3.9* e da una corrispondente spirale mobile, detta spirale orbitante, che può appunto orbitare, ma non ruotare, intorno a quella fissa. Le due spirali, che non si toccano, creano tra loro una serie di sacche a forma di falce nelle quali resta imprigionato il gas da comprimere. Grazie al moto della spirale orbitante le sacche tra le due spirali vengono sospinte verso il centro delle spirali stesse con conseguente e graduale riduzione del loro volume ed aumento della pressione del gas. Quando ciascuna sacca raggiunge il centro della spirale, il gas compresso in essa contenuto viene scaricato all'esterno attraverso una luce centrale e poiché vengono compresse simultaneamente numerose sacche, la mandata risulta pressoché uniforme. Con riferimento alla *Figura 3.9.1*, si osserva che il gas entra dall'esterno attraverso le aperture che si generano quando la spirale orbitante è in movimento e che successivamente si chiudono, sempre per effetto del movimento della spirale (*Figura 3.9.2*). Il gas viene successivamente compresso per effetto della riduzione del volume della tasca (*Figura 3.9.3*) per essere poi scaricato dalla luce centrale (*Figura 3.9.4*). Si osservi che durante il movimento non vi è contatto, metallo su metallo, tra l'elemento fisso e quello mobile per cui non è necessario lubrificare la camera di compressione con il vantaggio che gli

interventi di manutenzione sono ridotti al minimo e soprattutto di disporre di aria *oil free*, assolutamente pura, quale quella richiesta, ad esempio, nelle industrie alimentari, farmaceutiche e tessili. Le portate variano da 3 l/s a 7 l/s mentre la pressione massima alla mandata è intorno ai 10 bar [3].

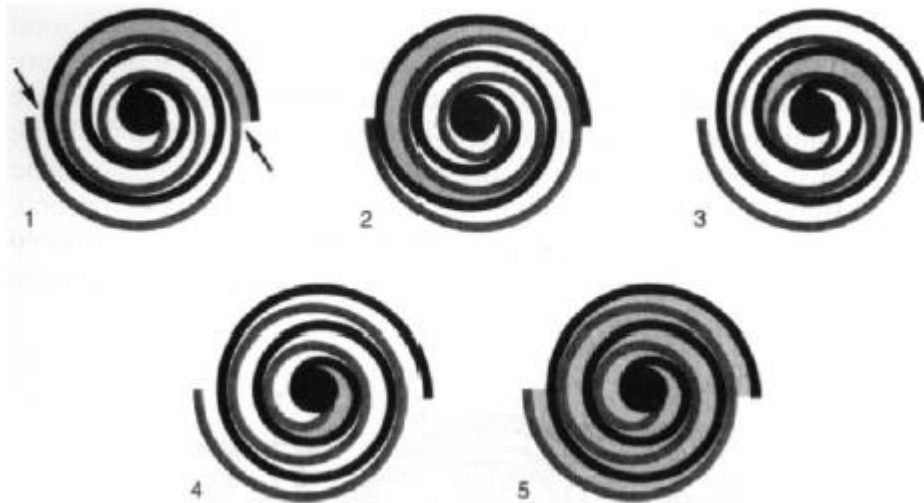


Figura 3.9 principio di funzionamento di un compressore rotativo scroll

## 3.5 Compressori a doppio rotore

### 3.5.1 Compressore a lobi

Nei compressori a lobi le camere rotanti sono delimitate dalla superficie dello statore e da quella dei due rotori controrotanti aventi profili tra di loro coniugati. Un esempio è il compressore Roots in cui i due rotori, in genere con due lobi ciascuno, hanno generatrici rettilinee e nel quale la camera a volume variabile è delimitata dalla carcassa e dai lobi. I compressori volumetrici tipo Roots, costruiti fin dal 184, sono largamente impiegati in campo industriale, particolarmente come trasferitori di grandi volumi di gas, nel trasporto pneumatico, ed in qualche caso nella trazione terrestre come sovralimentatori di motori alternativi a combustione interna. I loro pregi essenziali sono la semplicità costruttiva, il basso costo e l'assenza di lubrificante a contatto con il gas compresso. Quest'ultimo aspetto comporta però la presenza di giochi tra i lobi rotanti e le pareti fisse della cassa statorica

attraverso i quali si ha un sensibile riflusso di gas compresso dalla mandata all'aspirazione. Tale fenomeno ne abbassa il rendimento rispetto ai compressori a compressione graduale e limita il rapporto di compressione a valori non elevati, di norma inferiori a 2. Molto spesso il rapporto di compressione è unitario tanto che la macchina viene considerata, in tal caso, come un dispositivo meccanico in grado di trasportare fluido dall'aspirazione alla mandata, piuttosto che un vero e proprio compressore. Le portate elaborate possono invece essere notevoli, fino a  $50000 \text{ m}^3/\text{h}$  grazie alle elevate velocità di rotazione che tale macchina può raggiungere.

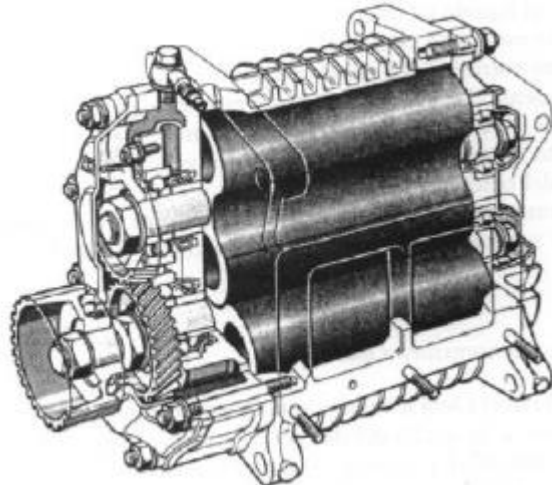
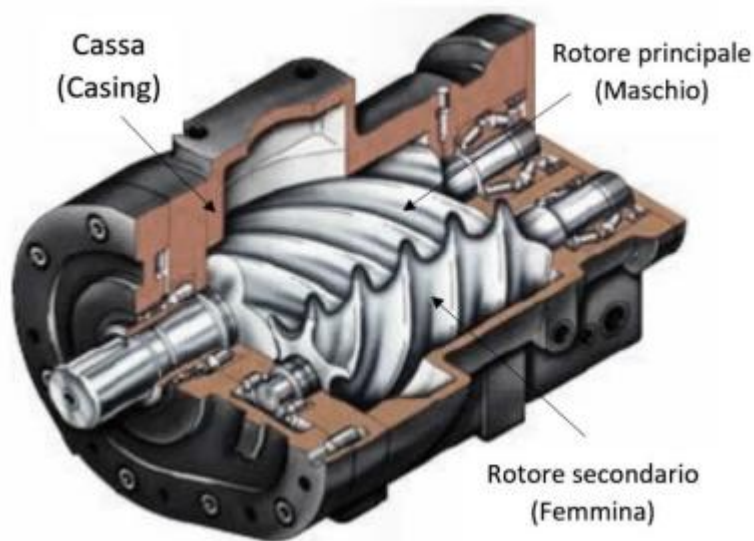


Figura 3.10 compressore rotativo a lobi

### **3.5.2 Compressore a doppia vite**

I compressori a doppia vite sono formati da due componenti principali che lavorano insieme per dar luogo alla compressione. Una parte è costituita da due rotori elicoidali con sezioni trasversali differenti ed assi di rotazione paralleli tra loro, anche se ne esistono particolari modelli a passo non costante. Il secondo componente principale è il *casing*, ovvero l'involucro che racchiude all'interno i rotori. Le pareti di quest'ultimo, insieme alle superfici dei rotori, determinano il volume della camera di compressione.

In base alle differenti geometrie, che verranno discusse in seguito, i rotori possono essere distinti in uno principale (rotore maschio) formato da sezioni lobate, ed un rotore secondario (rotore femmina) formato da cave di sezione trasversale di numero generalmente superiore rispetto la sezione lobata del rotore maschio. Le intercapedini tra la parte mobile e la parte fissa del compressore permettono una rotazione dei rotori all'interno del *casing* impedendo il contatto tra le due parti (*Figura 3.11*).

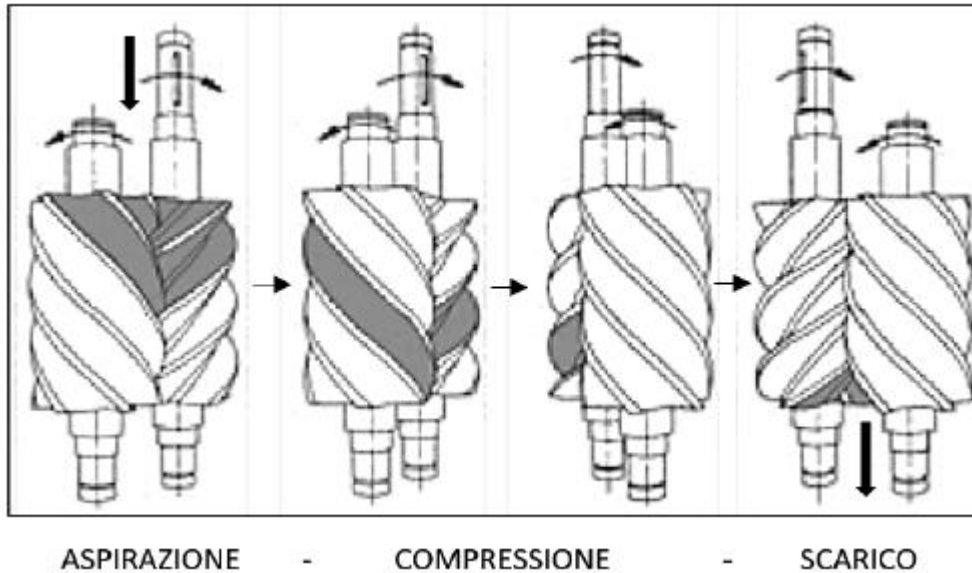


*Figura 3.11 compressore a doppia vite*

La continua riduzione del volume all'interno delle camere elicoidali tra i due rotori e il volume compreso tra i rotori e le superfici interne del *casing* produce la compressione del gas all'interno della macchina in un processo suddiviso in tre fasi. La rotazione delle viti permette al gas di entrare attraverso la luce di aspirazione riempiendo gli spazi situati tra i lobi e i canali del rotore principale e secondario. Questi volumi, a rotazione continua, aumentano in lunghezza durante il percorso che porta alla luce di scarico, riempiendo completamente lo spazio interlobare durante tutta la lunghezza del rotore. Aspirato il gas di una quantità ben definita durante la prima fase di immissione, la luce di aspirazione si chiude e si procede alla fase di compressione, in quanto la continua rotazione dei rotori porta ad una



diminuzione progressiva dei volumi interlobari. Il gas adesso compresso raggiunge lo scarico ad una posizione ben delineata dei rotori dando inizio alla fase finale di mandata fino alla “chiusura” completa delle intercapedini interlobari e la fuoriuscita di tutto il gas come mostra la *Figura 3.12*.



*Figura 3.12 funzionamento compressore a doppia vite*

Onde evitare una riduzione del rendimento del compressore dovuto a trafiletti modesti del gas dalla zona di alta pressione a zone di pressione inferiore con conseguente sviluppo di calore trasformatosi dalla energia di pressione, gli spazi interlobari esistenti tra rotore principale e secondario e gli stessi rotori e *casing* della macchina devono essere di dimensioni modeste. Ciò nonostante, tali spazi, sia pur ristretti, devono comunque evitare che la parte fissa e mobile del compressore si urtino in seguito alla dilatazione termica data dal contatto con il gas che si è riscaldato per effetto della compressione.

I compressori a doppia vite sono descritti attraverso due classi differenti:

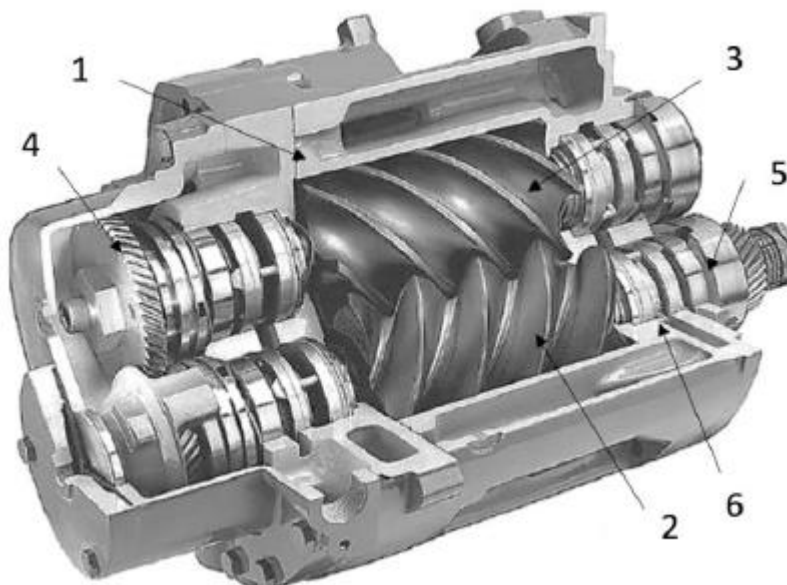
- • Compressori a secco (dry compressors /oil free compressors);
- • Compressori ad iniezione (oil flooded compressors /oil injected compressors) [3]

## 3.6 Compressore a doppia vite in dettaglio

### 3.6.1 Compressore a doppia vite a secco

La nascita di questi compressori è dovuta al fatto di voler comprimere il gas senza alcuna fonte di contaminazione data da oli lubrificanti. Infatti, il gas trattato non viene in contatto con altre sostanze, impedendo anche la lubrificazione del sistema rotante. Il rotore principale non più in contatto con il rotore secondario, non è in grado di trasmettere il moto di rotazione dato dal contatto tra lobi e cave. La spinta di rotazione viene fornita ai rotori attraverso una coppia di ingranaggi (*timing gears*) esterna al compressore che si muovono in sincrono grazie a denti elicoidali, portando alla costruzione di una macchina più costosa ed ingombrante rispetto il normale compressore ad iniezione d'olio (*Figura 3.13*).

La mancanza di un sistema refrigerante porta ad una maggiore accumulo di calore formatosi dall' energia di pressione, "costringendo" i compressori a secco a mantenere un rapporto di compressione inferiore rispetto ai tradizionali compressori ad iniezione d'olio.



*Figura 3.13 compressore a doppia vite del tipo oil free.*

*1-casing 2-rotore maschio 3-rotore femmina 4-ingranaggi sincronizzatori (timing gears) 5-cuscinetti 6-tenute*

Sistemi più innovativi evitano un maggiore incremento della temperatura del gas attraverso un interstizio all'interno della cassa del compressore o direttamente all'interno dei rotori per il passaggio di un sistema refrigerante costituito d'acqua o di olio diatermico. Non potendo aumentare discretamente il rapporto di compressione dei compressori a secco, esistono diversi modelli a seconda della portata da elaborare, con diverse dimensioni di diametro esterno dei rotori e differenti velocità periferiche. Il loro maggior impiego si trova nelle industrie alimentari e sanitarie che richiedono elevati standard di purezza e in industrie di processo di sostanze chimiche e idrocarburi differenti.

### ***3.6.2 Compressore a doppia vite ad iniezione d'olio***

In questi compressori a doppia vite la presenza di olio iniettato all'interno della camera di compressione consente il contatto tra i rotori e la conseguente eliminazione del sistema di ingranaggi esterni a differenza del compressore a secco. Tale accorgimento è dovuto al fatto che il rotore principale viene utilizzato come spinta di tutta la rotazione trascinando il rotore secondario, ovviando anche al problema delle tenute necessarie alla separazione dell'ambiente di lavoro e l'esterno. L'iniezione di olio aumenta il rendimento del compressore in quanto depositandosi sulle superfici dei rotori, compie un'ottima azione di tenuta riducendo gli spazi all'interno della camera di compressione e le possibili perdite per trafilamento lungo i rotori.

L'olio iniettato, oltre al fattore già descritto, svolge altri importanti ruoli tra cui la funzione di refrigerare il gas. Ciò permette un controllo del rapporto di compressione indipendente dalla temperatura a differenza del compressore a secco, inoltre, il sistema lubrificato riduce il livello di rumorosità ovviando all'acquisto di materiale fonoassorbente. Per mantenere un sistema in compressione continua, questi compressori sono dotati di un

serbatoio dell'olio, di un sistema di raffreddamento dell'olio e di un separatore olio/gas che verranno argomentati in seguito (Figura 3.14).

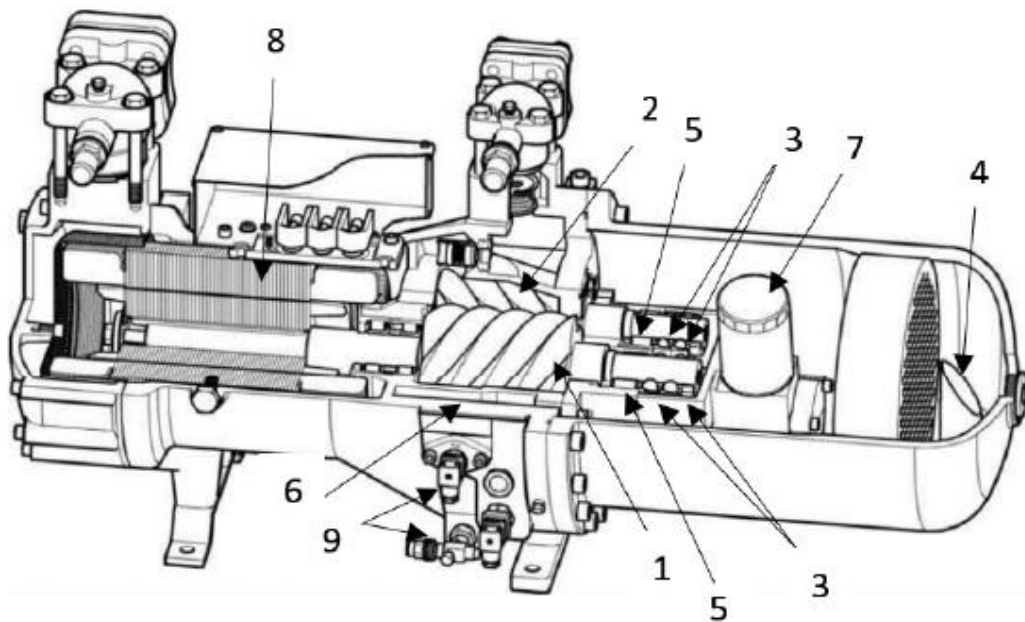


Figura 3.14 compressore a doppia vite del tipo oil flooded.

1 rotore principale 2 rotori secondari 3 cuscinetti 4 valvola di non ritorno 5 dispositivo di avviamento a vuoto 6 controllo di sovrappressione 7 separatore olio 8 motore elettrico 9 iniezione olio

L'attitudine del compressore ad iniezione di olio di poter comprimere gas differenti lo portano ad essere uno dei maggiori compressori utilizzati all'interno di industrie petrolchimiche e metallurgiche, anche nel settore di impianti frigoriferi (anche navale) e nelle pompe di calore viene preferito rispetto ai compressori alternativi visto il suo minor costo, peso e maggiore sicurezza. L'efficienza di compressione di questa macchina è tra le più alte, è in grado di sviluppare pressioni 7.3 volte superiori in relazione ai compressori centrifughi che operano alle medesime condizioni di velocità con un rendimento volumetrico che supera il 90%. Possono superare i 0.12 Mach di velocità del fluido in corrispondenza delle punte dei rotori, il che li rende unici.

Il loro campo di impiego può spaziare dal potenziamento dei gas combustibili al funzionamento di utensili pneumatici, trovano largo impiego anche nel settore automobilistico, elettronico, tessile, raffinazione

petrolchimica e produzione del tabacco. Grazie alle loro dimensioni ridotte possono essere tranquillamente allacciati a sistemi già esistenti (es. compressori alternativi) per effettuare miglioramenti. I vantaggi dei compressori a iniezione di olio sono:

1. Alte efficienze ad elevate velocità di rotazione per grandi intervalli di pressione e portate volumetriche;
2. Bassi costi di manutenzione;
3. Compattezza;
4. Adattabilità ad una grande varietà di gas;
5. Peso ridotto;
6. Alti rapporti di compressione anche per singolo stadio;
7. Facilità di controllo e di esercizio;
8. Prezzo medio con bassi costi operativi;
9. Lunga vita del compressore;
10. Funzionamento a bassa pressione di aspirazione.

Svantaggi:

1. Possibili riduzioni di efficienza dovuti ad alti volumi di olio iniettato;
2. Robustezza del casing;
3. Problemi di flessione dell'asse dei rotori;
4. Maggiore consumo di potenza a carico parzializzato rispetto ai compressori alternativi;
5. Presenza di trafilamenti dovuta ai limiti della tecnologia di produzione odierna;
6. Problemi meccanici quali disallineamento dell'albero, difetti dei cuscinetti ed eccentricità dei rotori.

La presenza dei compressori a doppia vite in punti critici di un impianto può causare tempi di fermo del sistema completi dovuti a guasti dei motori. Questi blocchi possono portare a significative perdite economiche senza un'adeguata manutenzione degli impianti. Sono necessari adeguati metodi per la manutenzione delle attrezzature rotanti e per qualsiasi rilevamento di guasti onde evitare interruzioni della produzione.

È importante la scelta del materiale con cui è costruito un compressore a doppia vite. Il *casing* solitamente è fabbricato con ghisa grigia per compressori di aria o gas inerti, mentre la ghisa duttile viene preferita nell'utilizzo di idrocarburi e gas pericolosi. La cassa viene fabbricata in acciaio al carbonio solo quando è necessaria per l'impiego di idrocarburi puliti o contenenti gas nocivi aventi determinate condizioni di umidità e acidità. Per quanto riguarda i rotori l'uso più comune è quello di materiali ferrosi, plastiche e alluminio vengono utilizzati solo in certe applicazioni. La maggior parte dei rotori sono costituiti di acciaio forgiato per l'impiego di aria, mentre le sue leghe per uso di gas corrosivi aventi determinate condizioni di acidità e umidità. I compressori a doppia vite nonostante risultino semplici per quanto riguarda l'aspetto meccanico, poiché costituiti da un organo mobile e uno fisso, sono tuttavia molto complessi dal lato costruttivo. La particolare geometria dei rotori ed una elevata finitura superficiale rendono possibile la costruzione solo grazie a macchine ed utensili che riescono a raggiungere elevati standard di precisione e qualità. Due fori cilindrici all'interno del *casing* permettono i rotori di ingranare tra loro, formando camere di lavoro separate di sezione trasversale costante tra ogni due lobi successivi del rotore e l'ambiente esterno del *casing*. L'avanzamento della linea di contatto dei rotori verso lo scarico fa variare la lunghezza della camera di lavoro, definendo un volume massimo quando non è ostruita dai lobi e valore minimo pari a zero a pieno ingranamento in corrispondenza della luce di scarico. Il *casing*, oltre a permettere il passaggio

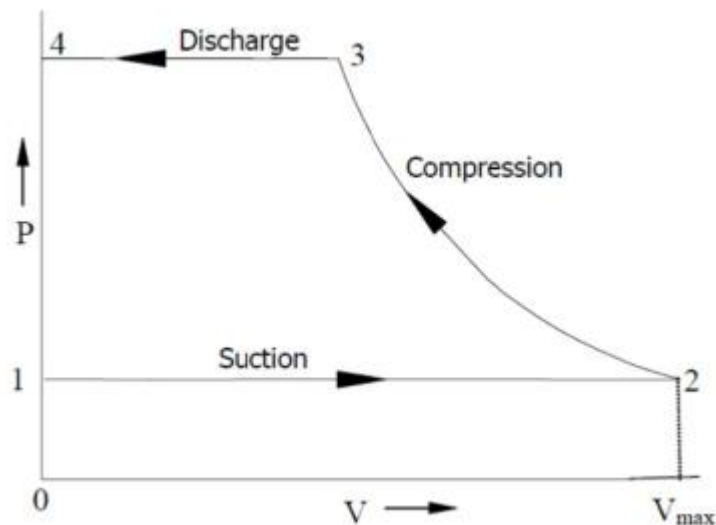
del gas, presenta punti di iniezione dell'olio o del fluido refrigerante. Per mantenere il sistema a regime, alle estremità delle due viti, sono praticati degli alloggiamenti per l'inserimento dei cuscinetti, che oltre alla funzione strutturale di sostegno dei rotori si fanno carico di eventuali sforzi durante il funzionamento del compressore.

Esistono diversi tipi di compressori a vite, il più comune e più fabbricato è predisposto di quattro lobi per il rotore principale e sei per il rotore secondario (4/6), sia per il compressore a secco che ad iniezione. Le altre configurazioni possibili come 5/6 e 5/7, o le più recenti 4/5 e 3/5, stanno prendendo più piede nel settore industriale. Tuttavia, il fattore più determinante dipende principalmente da come vengono progettati i profili dei rotori. Un requisito fondamentale è la capacità di predire in maniera accurata gli effetti sulle prestazioni al variare dei parametri di progetto, nonché l'efficienza finale della macchina. Per mantenere le più alte prestazioni e realizzare macchine più compatte per il mercato odierno, si opera su una più alta possibile velocità alle punte dei rotori, in base ai limiti imposti dal materiale e all'efficienza che si vuole ottenere. Per minimizzare lo spazio delle intercapedini interlobari vengono utilizzati cuscinetti volventi, mentre per maggiore aspirazione e scarico le luci devono essere più larghe possibili, minimizzando la velocità del gas nel loro attraversamento. Ciò permette di limitare le perdite di carico con maggiore controllo sulle cadute di pressione, specialmente sulla luce di aspirazione. I cuscinetti volventi solitamente sono a coppia situati sul lato scarico del compressore, per permettere di assorbire separatamente carichi assiali e radiali.

### ***3.6.3 Ciclo di funzionamento***

Come già descritto, l'efficienza di un compressore a doppia vite dipende da tanti parametri di funzionamento e progetto. Questi compressori, non avendo spazio morto alla fine della compressione, non sono soggetti alla ri-

espansione del gas, ciò permette una costruzione del diagramma p-V molto semplice come rappresentato in *Figura 3.16*.



*Figura 3.15* diagramma p-V per compressori a doppia vite

Il processo di aspirazione 1-2 copre all'incirca una rivoluzione del rotore maschio. Il processo di aspirazione nei compressori a vite avviene simultaneamente ai processi di compressione e scarico, in quanto coesistono più camere nello stesso tempo. Queste camere sono sfasate tra di loro di un certo angolo rotore, permettendo a parte della scanalatura di essere in fase di compressione, mentre il resto della scanalatura è nella fase di scarico. Nella *Figura 3.17* sul grafico p -  $\theta_m$  viene descritto tale fenomeno, dove  $\theta_m$  è l'angolo di rotazione del rotore maschio. I processi di compressione e scarico avvengono simultaneamente, l'aspirazione inizia dal punto "1" e termina al punto "2", mentre il processo di compressione si verifica tra i punti "2" e "3". L'inizio del processo di scarico al punto "3" presenta scanalature che sono sotto la fase di compressione e che iniziano a scoprire la luce di scarico. È possibile leggere sul grafico p-V il rapporto del volume interno del compressore (*built-in volume ratio*) al punto "3", sull'asse V del volume. Mentre il rapporto delle pressioni (*built-in pressure ratio*) raggiunte dalla macchina, sulle ordinate.



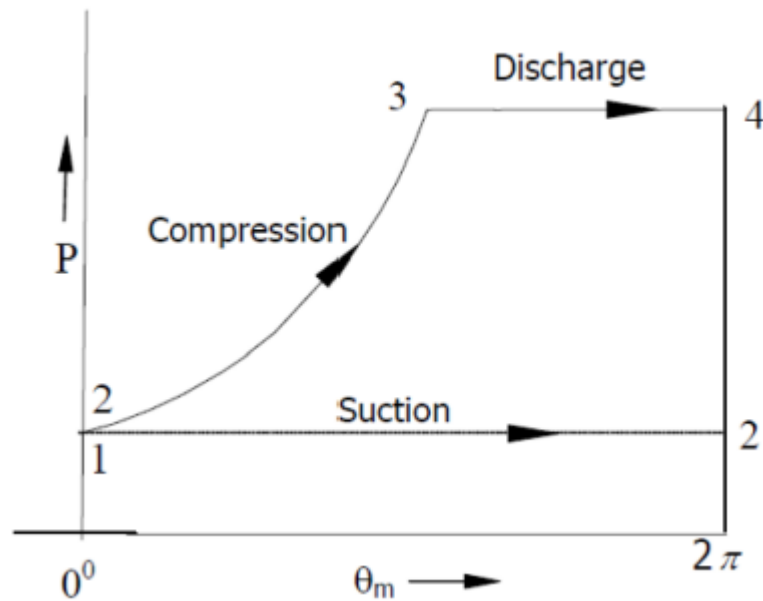


Figura 3.16 diagramma p-theta per compressori a doppia vite

In un compressore a vite il rapporto interno delle pressioni ( $\pi_i$ ) può essere alto a causa della disponibilità di elevati rapporti dei volumi. La stima della pressione massima di aspirazione ammessa  $P_s(max)$  in relazione alla pressione di scarico  $P_d(max)$  in sede di progetto, può essere stimata dalla relazione data da Stocker [17]:

$$P_s(\text{massima}) = \frac{P_d(\text{massima})}{(V_i)^k}$$

dove  $K$  = rapporto tra i calori specifici del gas.

### 3.6.4 Olio di iniezione

L'olio iniettato o la particolare miscela utilizzata, che funge da refrigerante e da sigillante, può essere scelto in base al rapporto tra lo spazio (interstizio) radiale ed il diametro del rotore. La presenza di più olio nella camera di compressione, a contatto con tutte le superfici del metallo, crea una barriera contro la corrosione dal gas da comprimere, permettendo l'utilizzo del compressore anche con gas quali solfuri e cloruri. Come già elencato nei vantaggi del compressore a vite, l'iniezione di olio riduce il rumore del

macchinario durante il funzionamento e permette al rotore principale di ruotare a più alte velocità di rotazione.

Un film di olio può portare alla perdita di efficienza a causa degli sforzi viscosi di taglio alle pareti, causando schiuma e moti di agitazione. Di conseguenza questi compressori vengono progettati a velocità minori rispetto ai compressori *oil-free*. La velocità periferica (*tip speed*) del rotore di un compressore ad iniezione di olio viene mantenuta in un range di 30-35 m/s per i più grandi compressori e 20-30 m/s per quelli più piccoli, ai fini di un buon rendimento. Una buona manutenzione dell'olio consigliata in riferimento al datasheet del compressore materia di studio, suggerisce un cambio dell'olio e conseguente sostituzione del filtro e degli elementi filtranti del separatore d'olio ogni 3000 ore di lavoro o una volta all'anno. Nelle *Tabelle 3.1* e *3.2* sottostanti è possibile osservare le specifiche dell'olio e le indicazioni generali degli intervalli di cambio a dettaglio.

Dimensione confezione	AEON 3000 (tipo F 2105)* Numero ordine	AEON 6000 FG Numero ordine	AEON 9000 SP** Numero ordine
10 litri	033 891 41		
20 litri	250531	897 951 09	897 560 89
209 litri	033 891 43	897 952 39	897 676 89

\* Primo rifornimento

\*\* Per impieghi a basse temperature

*Tabella 3.1 specifiche dell'olio*

Temperatura compressore	AEON 3000 (tipo F 2105) Intervallo di cambio	AEON 6000 FG Intervallo di cambio	AEON 9000 SP Intervallo di cambio
70 – 88°C	3.000 h	3.000 h	4.000 h
88 – 92°C	1.000 h	2.000 h	4.000 h
≥ 93°C	500 h	1.000 h	2.000 h

*Tabella 3.1 intervalli di cambio dell'olio*

La tabella sopra riportata è indicativa, i tempi forniti per il cambio olio sono solo indicativi e non tengono conto di diversi parametri. Il carico di lavoro a cui è sottoposto il compressore, non è sempre costante, varia da situazione a

situazione e anche a parità di contesto dipende dal caso specifico. Queste tabelle forniscono semplicemente delle stime, che possono essere sensibilmente migliorate, applicando tecniche di manutenzione predittiva, che anche per il cambio del lubrificante consentono di agire in modo intelligente e intervenire solo quando necessario.

### ***3.6.5 Funzionamento dell'impianto di compressione***

Dopo aver descritto il funzionamento dei vari tipi di compressori e più a dettaglio il compressore a doppia vite, vengono ora analizzati in tutte le loro parti i sistemi all'interno di un impianto di compressione. Il compressore all'interno dell'impianto per poter operare a regime necessita di componenti essenziali, come motore, filtri, serbatoio, ecc. che lavorano in simultanea per mantenere l'efficienza desiderata. In fase di avviamento del motore trifase, per sopperire alla elevata richiesta di corrente di spunto, è necessario ricorrere a un sistema di avviamento a tensione ridotta, l'avviamento *stella-triangolo*. In questo modo viene proporzionalmente ridotta la corrente ma, per contro, anche ridotta la coppia motrice. Attraverso dei contattori opportunamente collegati, il motore viene inizialmente inserito con le fasi collegate a stella. Durante la fase di spunto la corrente risulta essere pari ad  $1/3$  di quella che si stabilirebbe se il motore fosse avviato a piena tensione. L'aria viene aspirata e attraverso un filtro passa da una valvola che ne regola la portata in quanto l'aria presente in atmosfera contiene contaminanti solidi e liquidi, che sono costituiti principalmente di polveri, umidità e oli. La formazione di emulsioni dovuta a olio e acqua può provocare depositi o condense all'interno delle tubazioni, favorendo l'agglomerazione delle polveri che possono aderire alle superfici. Non tutte le particelle solide possono essere trattenute dal filtro, quelle aventi dimensioni minori di dieci micron lo attraversano e vengono immesse nel circuito di aria compressa. Queste particelle possono essere anche di natura metallica (ruggine) che

provocano un effetto catalitico e generano corrosione. Le componenti dell'impianto di compressione oggetto di studio, costituito da un sistema di compressione a doppia vite con rotori di geometria 5/6 e un *casing* in ghisa. A questo punto l'aria viene compressa mediante la rotazione dei rotori principale e secondario miscelandosi con l'olio, permettendo una maggiore tenuta dei rotori e un raffreddamento del lavoro di compressione. Tale miscela raggiunge un primo serbatoio di separazione, dove per effetto della gravità l'olio si deposita sul fondo essendo più pesante. Nel corso della compressione aumenta anche la temperatura dell'aria e con essa la capacità di assorbire vapore acqueo, ciò può provocare la formazione di condensa lungo il sistema a causa del raffreddamento che abbassa la pressione di saturazione. Mediante uno scaricatore di condensa posizionato a monte del serbatoio, si riduce il più possibile il contenuto di umidità prima dell'immissione nella rete. L'olio separato nella prima fase, mediante il controllo di una valvola termostatica, può essere raffreddato passando attraverso uno scambiatore di calore (radiatore di raffreddamento), filtrato e iniettato nuovamente nel gruppo vite a basse temperature. In particolare, l'olio viene raffreddato solo se raggiunge una temperatura massima programmata attraverso la centralina e gestita dalla valvola termostatica, anche per il raffreddamento e la lubrificazione dei cuscinetti volventi.

L'aria compressa procede in direzione del serbatoio passando attraverso un filtro disoleatore, dove viene ulteriormente purificata da residui di particelle d'olio mediante un filtro ad alta efficienza che depura l'aria fino a 2-3ppm. Prima di entrare in rete, grazie ad un radiatore di raffreddamento, l'aria viene raffreddata, uscendo a bassa temperatura e con impurezze di acque ed olio accettabili. Il sistema di regolazione e comando controlla i punti vitali della macchina segnalandone eventuali anomalie, permettendo di adattarsi ad ogni condizione di impiego grazie alla gestione automatica fornita della centralina. Inoltre, grazie al collegamento con una sonda termostatica, la

temperatura della miscela aria/olio all'uscita dei rotori viene controllata, permettendo l'arresto del compressore qualora il suo valore sia elevato.

Il motore elettrico è predisposto di una protezione termica che arresta immediatamente il compressore in caso di sovra-assorbimento di corrente che può essere causato da guasti di natura meccanica o elettrica. La presenza della ventola di raffreddamento, calettata sull'albero secondario del motore elettrico, funge da sistema di raffreddamento forzato, dove l'aria esterna viene aspirata mediante una ventola elicoidale che investe il motore stesso raffreddandolo efficacemente. L'ambiente interno del compressore è poi pressurizzato e l'aria di ventilazione fuoriesce forzatamente dalla griglia attraverso il radiatore aria/olio, asportandone il calore. La valvola di minima pressione e ritegno che si trova in concomitanza del manometro e pressostato, permette di mantenere al minimo la pressione di lavoro, lasciando in moto i rotori senza alcun accumulo o messa in rete di aria compressa.

L'insonorizzazione del compressore si ottiene grazie alla presenza di un silenziatore all'interno del sistema, inoltre un rivestimento di materiale fonoassorbente ed ignifugo di tutti i pannelli interni permettono di operare a bassi rumori.

Il serbatoio, oltre alla funzione di accumulo di aria compressa, funge da raccolta di condensa nella parte inferiore, da cui viene espulsa. Essendo munito di una valvola di sicurezza svolge una funzione di accumulo per poter compensare gli sbalzi nella richiesta di fluido, assicurando alla rete una portata d'aria e una pressione quasi costanti, limitando gli interventi di regolazione. Inoltre, permettere interruzioni di funzionamento del motore elettrico del compressore, realizzando risparmi di energia.

Nel seguente capitolo descriveremo il compressore preso in esame per questo lavoro e il sistema di acquisizione e immagazzinamento dei dati.



# Capitolo 4

## Set up sperimentale

In questo capitolo si descrive il compressore preso in esame, il sistema di acquisizione e immagazzinamento dati e i sensori posti sul compressore per misurare le grandezze fisiche di maggiore interesse.

### 4.1 Descrizione del compressore in esame

Il compressore “*KS 11 – ESE 7*” è un compressore a doppia vite ad iniezione d’olio della *Gardner Denver* che trova applicazione nella produzione d’aria compressa in ambito industriale per azionamenti pneumatici. In particolare, il compressore in esame (*Figura 4.1*) è stato prodotto nel 2008 e nel 2018 è stato revisionato e sostituito in tutte le sue componenti usurate: cuscinetti, filtri, tubazioni, radiatore, serbatoio aria compressa, cinghia di trasmissioni e rotor elicoidali. Il vano di compressione è alimentato da un motore trifase da 7.5 Kw a 50 Hz con assorbimento nominale in corrente pari a 16 A a 4400 giri al minuto (RPM).



Figura 4.1 compressore a doppia vite ad iniezione ad olio GD ESE 7

Il sistema di compressione è in grado di produrre aria compressa fino alla pressione di 10 bar e il funzionamento dell'intero sistema di compressione viene controllato e regolato tramite una centralina della AIRBASIC. Il compressore è provvisto di un serbatoio d'aria compressa da 270 litri nel quale viene immagazzinata l'aria prodotta prima di essere resa disponibile al carico ed eventualmente trattata tramite ulteriori filtri e separatori aria-olio.

#### ***4.1.1 Principio di funzionamento***

Ipotizzando che il serbatoio d'aria compressa sia completamente vuoto, in fase di avviamento le fasi del motore trifase vengono alimentate con una configurazione a stella in modo che non vi siano correnti troppo elevate all'avviamento. La configurazione a stella fornisce correnti pari circa ad 1/3 di quelle che si avrebbero se il compressore venisse avviato con le fasi in configurazione a triangolo. Dopo 10 secondi, la configurazione di alimentazione delle fasi viene trasformata nella configurazione a triangolo e viene eccitata una elettrovalvola avviando la fase di funzionamento a carico nonché la aspirazione dell'aria dall'ambiente. Durante la fase di produzione, l'aria compressa viene separata dall'olio presente nel vano di compressione attraverso un separatore e delle camere presenti all'interno del serbatoio dell'olio, raffreddata tramite il radiatore e successivamente immagazzinata all'interno del serbatoio dell'aria. In particolare, l'aria viene aspirata all'interno della cassa di compressione (dove è presente il motore trifase, il vano di compressione e il serbatoio dell'olio) per far sì che l'aria che viene immessa nel vano di compressione sia il più possibile secca e ad una temperatura vicina alla temperatura dell'olio in maniera tale da minimizzare la formazione di condensa. Il compressore è dotato di una termoresistenza (PT1000) per il controllo della temperatura presente all'interno del vano di compressione (nel caso il valore della temperatura superi i 100 °C, la centralina arresta il motore onde evita danni) e di un pressostato differenziale



per la regolazione del funzionamento a carico o a vuoto. Durante il funzionamento a carico, quando la pressione sale al valore  $P_{max}$  (impostato a 8.8 bar) di intervento del pressostato il contatto di quest'ultimo si apre e la centralina diseccita l'elettrovalvola mandando il compressore a vuoto per 1 minuto. Se durante il tempo di vuoto la pressione scende al valore  $P_{min}$  (impostato a 6.8 bar) di taratura del pressostato, la centralina comanda il ritorno a carico del compressore.

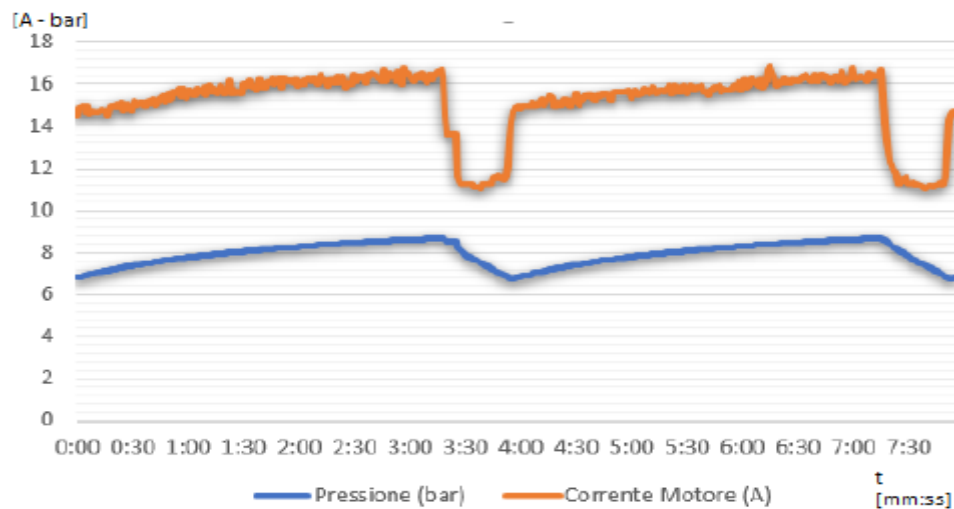


Figura 4.2 ciclo di funzionamento senza arresto motore

Se la pressione rimane invece a valori maggiori di  $P_{min}$ , allo scadere del tempo di vuoto il motore viene spento, non appena la pressione scende al valore  $P_{min}$  il motore viene riavviato secondo la sequenza stella-triangolo. Se invece la richiesta d'aria compressa da parte del carico, in termini di portata d'aria è sempre maggiore di quella prodotta dal compressore, quest'ultimo mantiene la configurazione di funzionamento a carico.

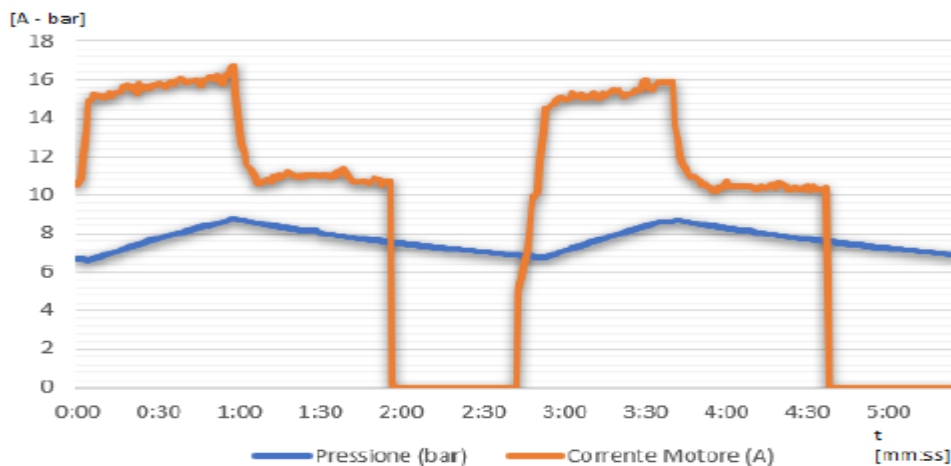


Figura 5.3 ciclo di funzionamento con arresto motore

Nel caso in cui la centralina rilevi eccessivi assorbimenti di corrente oppure elevata temperatura all'interno del vano di compressione dell'aria, l'impianto viene arrestato per evitare danni e viene visualizzato nel display della centralina un codice di errore [4].

Il compressore è stato dotato di un sistema di acquisizione e immagazzinamento dati, sono stati aggiunti sensori per monitorare i parametri più significativi del sistema. Le grandezze misurate dai sensori introdotti sono le seguenti:

- temperatura dell'olio all'interno della camera di compressione;
- corrente assorbita dal motore;
- pressione dell'aria all'interno dell'impianto;
- portata dell'aria all'interno del tubo di mandata dal vano di compressione al serbatoio.

Vista la mancanza di un sistema di acquisizione, immagazzinamento e trattamento dei dati del compressore si è dovuto integrare allo stesso un sistema in grado di sopperire a questa mancanza senza alterare il normale funzionamento del compressore in esame. Tenendo in considerazione sia le necessità richieste dal seguente studio che gli sviluppi futuri, dopo aver analizzato diverse soluzioni offerte dal mercato, si è scelto di utilizzare il

controllore *Z-PASS2-S* della *Seneca*. Lo *Z-PASS2-S* è un'unità di controllo avanzata basata su PLC che supporta nativamente una piattaforma di teleassistenza e telecontrollo per l'industria 4.0. La scelta di questo prodotto è data dal fatto che implementa servizi orientati all'acquisizione e all'immagazzinamento dei dati (*datalogger*) oltre a funzionalità quali PLC.

#### **4.1.2 Sensoristica**

Partendo dalle considerazioni precedentemente fatte in merito ai parametri dell'impianto da monitorare e valutando il principio di funzionamento dello stesso dipendete dallo stato operativo del compressore (modalità a carico e modalità a vuoto) e dalla richiesta di aria compressa del carico (azionamento pneumatico), sono stati identificati i seguenti sensori:

- *Misuratore di energia "S604" della Seneca*: installato a monte della rete trifase, all'interno del quadro elettrico, ha permesso di misurare il consumo di energia del compressore espresso in Kilowattora [4].
- *Trasduttore di corrente alternata Loop-Powered "T201" della Seneca*: installato in una fase di alimentazione del motore trifase ne ha permesso la misura istantanea della corrente assorbita [4].
- *Primo multisensore di misura dell'aria compressa "SD6500 della IFM* installato nel canale di mandata dell'aria compressa che in uscita dal radiatore permette di immagazzinare nel serbatoio da 270 litri l'aria compressa prodotta [4].
- *Secondo multisensore di misura dell'aria compressa "SD6500" della IFM* installato nel canale di mandata dell'aria compressa a valle del serbatoio per misurare la portata d'aria richiesta dal carico e il volume d'aria compressa che viene richiesta nel tempo dal carico [4].

- *Sensore di pressione dell'aria "MBS 1700" della Danfoss* installato nel canale di mandata dell'aria compressa a valle del serbatoio per monitorare la pressione dell'aria all'interno dell'impianto di compressione [4].

La seguente tabella presenta i range e le unità di misura per parametri rilevati.

Parametro	Range di Misura	Unità' di Misura
Corrente motore	[0, 20]	A
Energia consumata	-	KWh
Vibrazioni compressore	[0, 20]	mm/s
Pressione aria	[0, 16]	bar
Portata aria	[0, 1250]	l/min
Volume aria prodotta	-	m <sup>3</sup>
Temperatura olio	[-100, +200]	°C
Temperatura aria asp.	[0, 50]	°C
Umidità Relativa a. asp.	[0, 100]	%

*Tabella 4.1 range e unità di misura delle grandezze rilevate dai sensori*

# Capitolo 5

## Tecniche di processamento dati

Il compressore è stato monitorato per diversi mesi, durante i quali è stato volutamente cambiato più volte l'olio. Nella fase iniziale il compressore è stato fatto funzionare con olio nuovo, nella seconda fase è stato fatto circolare un olio che inizia a presentare i primi segni di degrado, nella terza e ultima fase invece l'olio oltre a essere degradato è stato anche ridotto di 2.5lt rispetto alle quantità standard. Tutto ciò è stato fatto per simulare tre diverse condizioni in cui si può trovare il compressore per quanto riguarda lo stato dell'olio: la prima fase con l'olio nuovo rappresenta una condizione ottimale di lavoro in cui non si necessita di nessuna manutenzione; nella seconda fase si potrebbe iniziare a pensare di sostituire l'olio a breve, nella terza fase invece la necessità di cambiare l'olio è impellente. I dati registrati e immagazzinati dal datalogger sono stati riportati su dei fogli Excel, In questo modo si è creato un dataset da poter analizzare e utilizzare per la messa a punto di tecniche di manutenzione predittiva al fine di monitorare lo stato di funzionamento del compressore e fornire informazioni sullo stato dell'olio e dare indicazioni sulla urgenza o meno di interventi manutentivi.

In questo lavoro di tesi si sono applicate delle tecniche di clusterizzazione sui dati raccolti in modo da riuscire a riconoscere a partire dai dati le condizioni dell'olio del compressore ed essere quindi in grado, per quanto riguarda il lubrificante, di dare indicazioni sulla urgenza o meno di interventi manutentivi ovvero specificate se sia necessario sostituire subito l'olio oppure, sebbene questo risulti parzialmente degradato si possa attendere e continuare ad usare ancora lo stesso olio. Sebbene per i dati raccolti sia noto lo stato di usura dell'olio, fattore che avrebbe potuto far propendere per la scelta di metodi supervisionati, in questo lavoro di tesi si è scelto di adottare

una metodologia non supervisionata. Il motivo principale di questa scelta è che spesso non si hanno a disposizione dati etichettati, si è voluto provare ad ottenere risultati analoghi a quelli che si hanno con le tecniche supervisionate, usando tecniche non supervisionate. L'obiettivo è vedere se gli algoritmi di clustering sono in grado di riconoscere lo stato di usura dell'olio, in modo da poter sfruttare questa informazione per eseguire manutenzione predittiva sul cambio del lubrificante. Dopo questa breve introduzione si illustreranno più nel dettaglio il concetto di clusterizzazione e l'algoritmo utilizzato, nella parte finale del capitolo si descrive il lavoro svolto vero e proprio.

## **5.1 Clusterizzazione**

Le tecniche di apprendimento possono essere divise in tre grandi filoni: apprendimento supervisionato, non supervisionato e semi supervisionato. L'apprendimento supervisionato è una tecnica di apprendimento automatico che mira ad addestrare dei modelli che sono in grado di riconoscere una certa caratteristica di nostro interesse. Nella fase iniziale, detta di "training" i dati in input sono dati etichettati, ovvero dati in cui la feature di interesse è nota. Finita la fase di training si passa a quella di testing, una volta che il modello è stato addestrato, gli vengono passati dei dati non etichettati, ovvero dati in cui la feature di interesse non è nota ma dovrà essere restituita come output dal modello addestrato. In questa fase si testa la capacità del modello di riconoscere la caratteristica di interesse. Nelle tecniche di apprendimento non supervisionato invece la caratteristica di interesse non è nota, ovvero i dati non sono etichettati e l'algoritmo deve apprendere dai dati stessi, senza poter sfruttare l'informazione dell'etichetta. Questa classe di algoritmi risulta di più difficile applicazione, ma quando non si hanno a disposizione

le label si possono usare solo tecniche di apprendimento non supervisionato [5].

Parliamo adesso un po' più in dettaglio della clusterizzazione.

L'obiettivo primario del clustering è quello di raggruppare i dati in dei sottoinsiemi, detti cluster, in modo tale che i dati di uno stesso cluster siano il più possibile omogenei tra loro e diversi dai dati appartenenti a cluster diversi. Per utilizzare una terminologia più tecnica, la distanza intra cluster deve essere minimizzata e deve essere massimizzata la distanza intra cluster, la figura riportata di sotto esemplifica il concetto.

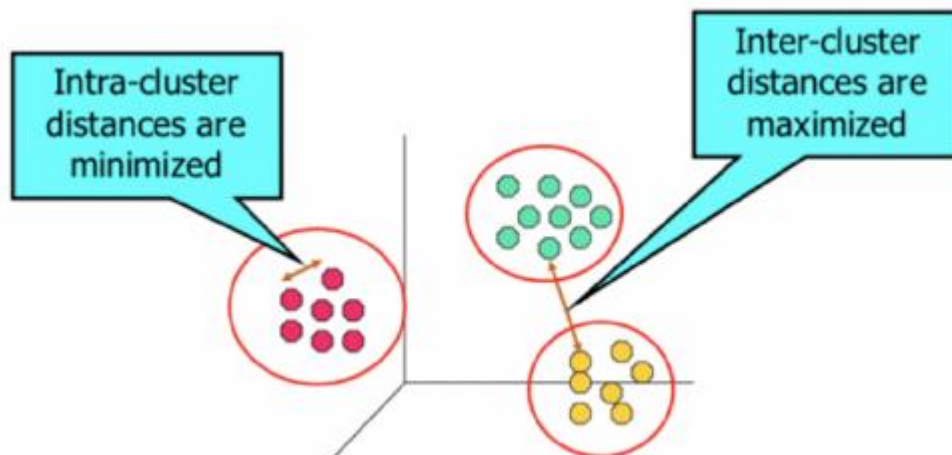


Figura 5.1 distanza intra cluster e distanza inter cluster

Spesso nell'ambito del clustering si parla di dati simili o omogenei, ma cosa si intende esattamente? Nel caso di dati numerici, il concetto di similitudine e omogeneità si traducono entrambi con la distanza tra i dati. Esistono diverse metriche per la distanza tra cui quella euclidea, la distanza di Manhattan e la distanza di Minkowski [5], quella più utilizzata è la classica distanza euclidea nota anche come norma due, che si basa sul calcolo della distanza geometrica tra due punti. Quando i dati non sono di tipo numerico il calcolo della distanza viene invece sostituito da una funzione di similarità. Gli algoritmi di clustering sono divisi in due grandi sottogruppi:

- Clustering partizionale: i cluster costituiscono una partizione rispetto allo spazio campione, sono insieme a due a due disgiunti, ovvero l'intersezione di qualsiasi coppia di cluster è l'insieme vuoto, e ogni punto viene affidato ad un cluster.
- Clustering gerarchico: i vari cluster sono annidati tra di loro, come se ci fosse una gerarchia, da qui il nome di questa categoria di algoritmi [6].

Un'altra classificazione per il clustering è la seguente:

- Partizionamento esclusivo: ogni elemento può appartenere ad uno e un solo cluster, i cluster tra di loro sono insiemi disgiunti, ovvero non hanno elementi in comune
- Partizionamento non esclusivo: un elemento può essere assegnato a più di un cluster
- Partizionamento parziale: ci sono elementi che non appartengono a nessun cluster
- Partizionamento completo: ogni elemento è assegnato ad almeno un cluster
- Partizionamento fuzzy: ogni punto appartiene a tutti i cluster con una probabilità che va da 0 a 1, la somma delle probabilità per un punto di appartenere ai vari cluster deve essere pari a 1
- Partizionamento non fuzzy: ogni punto appartiene ad un solo cluster con probabilità 1 [7].

## 5.2 K-Means

Tra gli algoritmi di clustering il K-Means è sicuramente uno dei più usati, consiste nel dividere i dati in gruppi, detti cluster, in modo tale da minimizzare la variabilità dei dati di uno stesso cluster e massimizzarle tra dati appartenenti a cluster diversi [8]. In base alle classificazioni fatte nel paragrafo precedente per quanto riguarda i partizionamenti, possiamo dire



che il K-Means è un algoritmo partizionale e che il partizionamento che effettua è esclusivo, completo e di tipo non fuzzy. La tecnica del K-Means è semplice e intuitiva. L'utente sceglie arbitrariamente la quantità di cluster desiderati  $K$ , parametro che coincide con il numero di centroidi iniziali selezionati in modo casuale. Successivamente, ciascun punto nella collezione dei dati è assegnato al centroide più vicino e, alla fine del processo di allocazione, si sono formati  $K$  partizionamenti. Tuttavia, i centroidi iniziali di ciascun cluster non sono più rappresentativi: per questo motivo, si ricalcolano i centroidi sulla base dei cluster ottenuti al passaggio precedente e si ripete nuovamente il processo. Si esegue iterativamente la procedura di assegnazione e aggiornamento dei centroidi fin quando questi ultimi rimangono immutati. Come condizioni di stop dell'algoritmo a volte vengono aggiunte in alternativa un numero massimo di iterazioni oltre il quale non si vuole andare oppure che la somma delle distanze dai punti dal centroide del cluster al quale sono assegnati rientri in un certo range.

Riportiamo di seguito il flowchart dell'algoritmo:

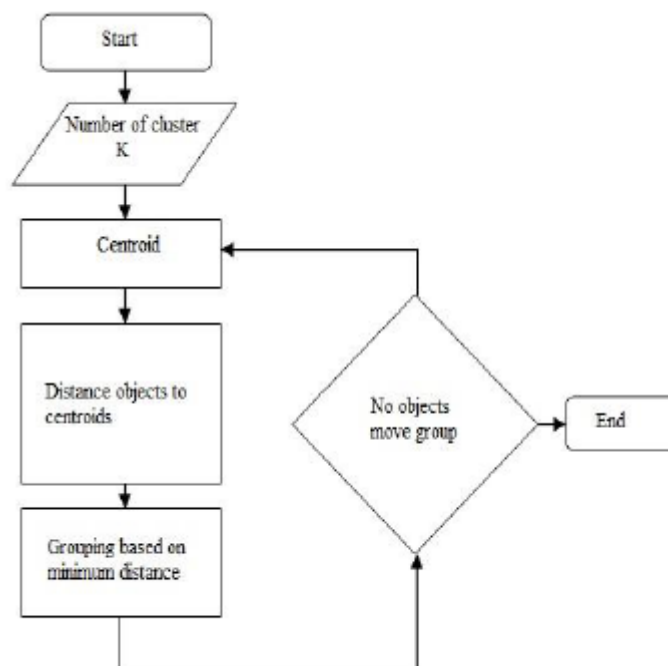


Figura 5.2 flowchart del k-means

Vediamo adesso passo per passo gli step in cui si articola l'algoritmo:

- 1) Si sceglie il numero k dei cluster in cui si vogliono raggruppare i dati
- 2) L'algoritmo inizializza in modo randomico i k centroidi dei cluster
- 3) Per ogni dato si calcola la distanza dai k centroidi e si assegna il dato al cluster il cui centroide dista meno dal dato
- 4) Sulla base dei cluster così formati si ricalcolano i centroidi utilizzando la seguente formula:

$$C_k = \frac{1}{n_k} \sum_{i=1}^n d_{ik}$$

Dove  $n_k$  è il numero di dati appartenenti al centroide k-esimo e  $d_i$  è la distanza del punto i-esimo dal centroide k-esimo.

- 5) Si aggiorna adesso il valore dei nuovi centroidi
- 6) Si ripetono gli step 3, 4 e 5 fino a quando ogni dato resta attribuito al cluster calcolato nell'iterazione precedente. L'algoritmo termina quando tra un'iterazione e la successiva nessun dato cambia cluster di appartenenza o quando si supera il limite massimo di iterazioni scelte dell'utente.

Come si può notare il risultato del k-means può cambiare se si esegue più volte l'algoritmo in quanto nella prima iterazione i centroidi sono assegnati casualmente. Spesso bisogna mettere a punto delle metriche per valutare la bontà dei diversi risultati ottenuti e scegliere il migliore. Dato che l'obiettivo di un algoritmo di clusterizzazione è garantire la coesione dei cluster e massimizzarne la distanza, quando si ottengono risultati diversi si può scegliere quello che garantisce la minor distanza intra cluster e la massima distanza inter cluster.

## 5.3 Pre-processing dei dati

Per il seguente lavoro di tesi è stato utilizzato Matlab. I dati campionati ogni 10 secondi, fanno riferimento alle seguenti grandezze:

- Portata a valle del compressore
- Portata aria a valle del serbatoio ad aria
- Pressione a monte dell'essiccatore
- Pressione a valle dell'essiccatore
- Corrente istantanea assorbita dal motore
- Temperatura dell'olio nel vano di compressione dell'aria
- Volume di aria prodotto dal compressore
- Volume di aria a valle del serbatoio
- Energia assorbita dal motore.

Prima di essere sottoposti a qualsiasi tipo di analisi sono stati debitamente filtrati con un filtro a media mobile. La funzione utilizzata in Matlab è la funzione `filter`, che dà la possibilità di scegliere la larghezza della finestra di campioni con cui calcolare la media. In questo caso si è scelto di calcolare la media su 5 campioni, ogni dato è stato quindi sostituito con il valore che si ottiene facendo la media aritmetica tra quel campione e i 4 precedenti. La funzione implementata dal filtro è la seguente:

$$y(n) = \frac{x(n) + x(n-1) + x(n-2) + x(n-3) + x(n-4)}{5}$$

Una volta filtrati, ed eliminata la componente più significativa del rumore, i dati sono stati plottati per vedere che tipo di andamento avessero le varie grandezze nel tempo.

### 5.3.1 Selezione delle variabili

Dopo aver analizzato i trend delle variabili, si è dovuto scegliere quali variabili tenere in considerazione per la clusterizzazione e quali no, ovvero si è effettuata una riduzione dei dati ( data reduction). Per la scelta dei parametri da utilizzare si è tenuto conto sia della fisica del processo in esame che della correlazione tra le variabili stesse. Per il calcolo della matrice di correlazione si sono scelti solo i dati che fanno riferimento a quando nel compressore circola olio degradato e ridotto rispetto alle quantità standard previste, abbiamo scelto di utilizzare le variabili non sono correlate tra di loro, scartando invece quelle correlate in quanto considerate ridondanti.

Si riporta di seguito la matrice di correlazione ottenuta:

	Portata a Valle del Compressore	Portata a Valle del Serbatoio	Pressione a monte dell'essicatore	Pressione a valle dell'essicatore	Corrente	Temperatura olio	Volume aria compressore	Volume serbatoio	Energia
Portata a Valle del Compressore	1	0.39	0.17	0.17	0.82	0.07	-0.23	-0.23	0.03
Portata a Valle del Serbatoio	0.39	1	0.48	0.48	0.48	0.54	-0.46	-0.46	0.05
Pressione a monte dell'essicatore	0.17	0.48	1	0.99	0.53	0.70	0.19	0.19	-0.04
Pressione a valle dell'essicatore	0.17	0.48	0.99	1	0.53	0.70	0.19	0.19	-0.04
Corrente	0.82	0.48	0.53	0.53	1	0.39	-0.08	-0.08	0.02

Temperatura olio	0.07	0.54	0.70	0.70	0.39	1	0.22	0.21	-0.003
Volume aria compressore	-0.23	-0.46	0.19	0.19	-0.08	0.22	1	0.99	-0.24
Volume aria serbatoio	-0.23	-0.46	0.19	0.19	-0.08	0.21	0.99	1	-0.24
Energia	0.03	0.05	-0.04	-0.04	0.02	-0.003	-0.24	-0.24	1

Tabella 5.1 matrice di correlazione dei dati in presenza di solio degradato e ridotto rispetto alle quantità standard

Si ricorda che date due variabili  $x$  e  $y$  la loro correlazione è definita come il rapporto tra la covarianza delle due variabili e il prodotto delle loro deviazioni standard:

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)^2}}$$

Le variabili che risultano correlate sono: la 1 e la 5 che corrispondono rispettivamente alla portata a valle del compressore e alla corrente assorbita dal motore, la 3 e la 4 che sono la pressione a monte e a valle dell'essiccatore; la 7 e la 8 che sono i volumi di aria prodotta dal compressore e il volume di aria accumulato nel serbatoio. Tra le variabili che sono tra loro correlate ne è stata scelta solo una, in particolare tra la portata e la corrente (variabili 1 e 5) è stata scelta la corrente, tra la pressione a monte e a valle dell'essiccatore è stata scelta la pressione a monte (variabile 3), le variabili 7 e 8 sono state invece entrambe escluse quanto rappresentano semplicemente i volumi di aria prodotti e ai fini delle analisi da svolgere sono sembrate entrambe poco significative. Delle variabili restanti, che non sono tra loro correlate, sono state utilizzate la temperatura dell'olio nel vano di compressione e l'energia

assorbita dal motore, in quanto le variabili di maggiore interesse fisico e più strettamente legate al funzionamento intrinseco del compressore. Si è provato anche a eseguire la clusterizzazione inserendo oltre le variabili scelte anche la portata, ma i risultati ottenuti non erano soddisfacenti, mentre togliendo questa ulteriore grandezza si ottengono prestazioni migliori. Sono state eseguite ulteriori prove inserendo la portata e togliendo a turno le altre grandezze e i risultati ottenuti erano buoni, si è notato dunque che aggiungendo troppe variabili l'algoritmo fatica a riconoscere correttamente i dati.

### **5.3.2 Standardizzazione delle variabili**

Onde evitare risultati anomali causati da grandezze che hanno scale diverse, come è buona prassi per l'applicazione di algoritmi di cluster, si è scelto di standardizzare le variabili. Tra le varie tecniche si è scelta la normalizzazione minimo-massimo che consente di scalare le variabili e riportarle nell'intervallo [0;1] semplicemente sottraendo il minimo e dividendo per il massimo, come riportato nella formula di sotto:

$$x(i) = \frac{x(i) - \min(x)}{\max(x)}$$

Dove  $x(i)$  rappresenta il campione  $i$ -esimo per una certa grandezza, mentre  $x$  rappresenta il vettore dove sono salvati tutti i campioni raccolti per quella grandezza .

## **5.4 Elaborazione dei dati**

Dopo aver filtrato e standardizzato i dati a disposizione, è stata calcolata la matrice di correlazione che ci ha consentito di scartare le variabili tra loro correlate. Tra le variabili non correlate sono state poi ulteriormente scartate quelle che non tenevano conto a livello intrinseco della fisica del processo

ma erano più che altro variabili di contorno del sistema. Così facendo le variabili da nove di partenza sono state ridotte a sole quattro che sono:

la pressione a monte dell'essiccatore, la corrente assorbita dal motore, la temperatura dell'olio nel vano di compressione e l'energia assorbita dal motore, il che ha consentito non solo di risparmiare in quanto ad occupazione di memoria, ma ha anche snellito i tempi di esecuzione dell'algoritmo.

Il 70% dei dati a disposizione è stato utilizzato nella fase di training, il restante 30% in quella di testing. Nella fase di training, tramite l'ambiente di sviluppo Matlab, è stato applicato il K-means al quale è stato richiesto di identificare tre cluster. Sono stati scelti esattamente tre cluster in quanto i dati a disposizione fanno parte di tre categorie:

- Dati relativi a quando nel compressore circola olio nuovo
- Dati relativi a quando nel compressore circola olio degradato
- Dati relativi a quando nel compressore circola dell'olio degradato e ridotto di 2.5 litri rispetto alle quantità standard

E quello che ci si aspetta dall'algoritmo è che riesca a discriminare in modo corretto le tre classi di dati.

In questo particolare caso, conoscendo l'etichetta dei dati, che in questo caso può essere: olio nuovo, olio vecchio oppure olio vecchio e degradato, siamo stati in grado di verificare a posteriori se effettivamente la clusterizzazione della fase di training fosse avvenuta correttamente o meno.

Dopo che sono stati passati all'algoritmo diversi dati, questo ha calcolato tre cluster come richiesto e quindi ha individuato anche i tre corrispondenti centroidi. Nella fase di testing si sfruttano i centroidi calcolati nella fase di training per etichettare i dati. Per ogni campione si calcola la distanza da tutti e tre i centroidi e si associa il dato al cluster il cui centroide dista meno dal dato preso in considerazione. Anche in questo caso la metrica usata per calcolare la distanza è la distanza euclidea.

Questo capitolo, eccetto nella parte iniziale in cui vengono spiegati i concetti di cluster analysis e in cui viene descritto l'algoritmo utilizzato, fornisce una breve panoramica del lavoro svolto in questa tesi. Nel capitolo seguente, sono riportati, sia attraverso grafici che danno un'idea qualitativa dei risultati, sia attraverso dei parametri numerici, i risultati ottenuti, che verranno illustrati riprendendo il lavoro che c'è stato dietro per potervi arrivare.



# Capitolo 6

## Risultati sperimentali

In questo capitolo si riportano i risultati del lavoro svolto a partire dalla fase di training per poi concludere con quella di testing.

### 6.1 Fase di training

Il 70% dei dati a disposizione è stato utilizzato nella fase di training, durante la quale i dati sono stati passati in input al k-means, che oltre a riconoscerli in tre cluster ha anche calcolato i centroidi che saranno poi utilizzati nella fase di training per classificare i dati. L'algoritmo classifica in cluster 1 i dati relativi a quando nel compressore circola dell'olio degradato e ridotto rispetto alle quantità standard previste, in cluster due colloca i dati relativi a olio degradato e in cluster tre i dati relativi a olio nuovo, con un livello di precisione abbastanza soddisfacente. Si riportano di seguito alcuni grafici che rappresentano le grandezze prese in esame, il cluster individuato dall'algoritmo e viene riportata anche la distanza che i dati hanno dai tre centroidi. La distanza è un'informazione in più che abbiamo deciso di rappresentare e utilizzare in fase di testing, in quanto si è visto che spesso l'algoritmo colloca erroneamente dei dati in un cluster piuttosto che in un altro. Questo avviene perché spesso ci sono dei dati che risultano essere molto vicini a più di un e quindi a volte vengono clusterizzati in modo non corretto. Valutare quindi per i dati non solo il mero risultato dell'algoritmo, ma tenere in conto anche la distanza dai vari cluster ci sembra un modo più completo e corretto per poter interpretare i risultati ottenuti.

### 6.1.1 Dati di training relativi ad olio nuovo

Si riportano di seguito i grafici ottenuti con i dati relativi alla fase di training quando nel compressore circola olio nuovo.

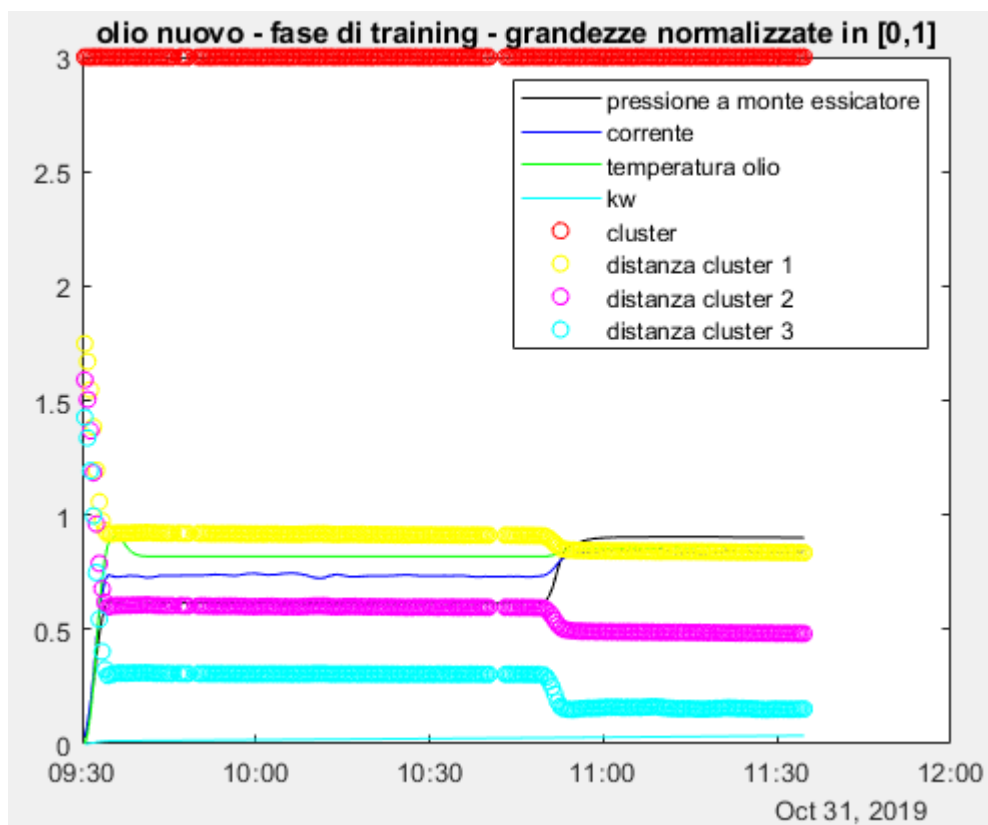


Figura 6.1 dati fase di training con olio nuovo

Il grafico sopra riportato raffigura le grandezze coinvolte nell'algoritmo di clustering, che ricordiamo essere la pressione a monte dell'essicatore, la corrente assorbita dal motore, l'energia assorbita dal motore e la temperatura dell'olio nel vano di compressione. Rappresentato con una serie di cerchi rossi c'è il cluster di appartenenza che in questo caso, trattandosi di dati relativi ad olio nuovo, è il cluster 3, come vedremo che sarà sempre in fase di training il cluster 3 quando i dati fanno riferimento a olio non degradato. Con i pallini gialli, magenta e celeste sono invece rappresentate le distanze dei punti rispettivamente dai centroidi 1, 2 e 3; si nota come in questo caso le distanze sono ben diverse e l'algoritmo riesce ad individuare correttamente

il cluster di appartenenza. Il terzo cluster è quello che ha distanza minima dai dati, infatti nel grafico la distanza da questo cluster, rappresentata in celeste ha valori nettamente più bassi rispetto alle distanze dagli altri due centroidi e pertanto il k-means seleziona questo cluster. Si riportano per completezza i grafici restanti relativi sempre a dati di training per olio nuovo. Essendo i grafici molto simili al primo appena illustrato, verranno riportati per completezza ma senza ulteriori commenti, in quanto le cose da dire sarebbero le stesse appena dette.

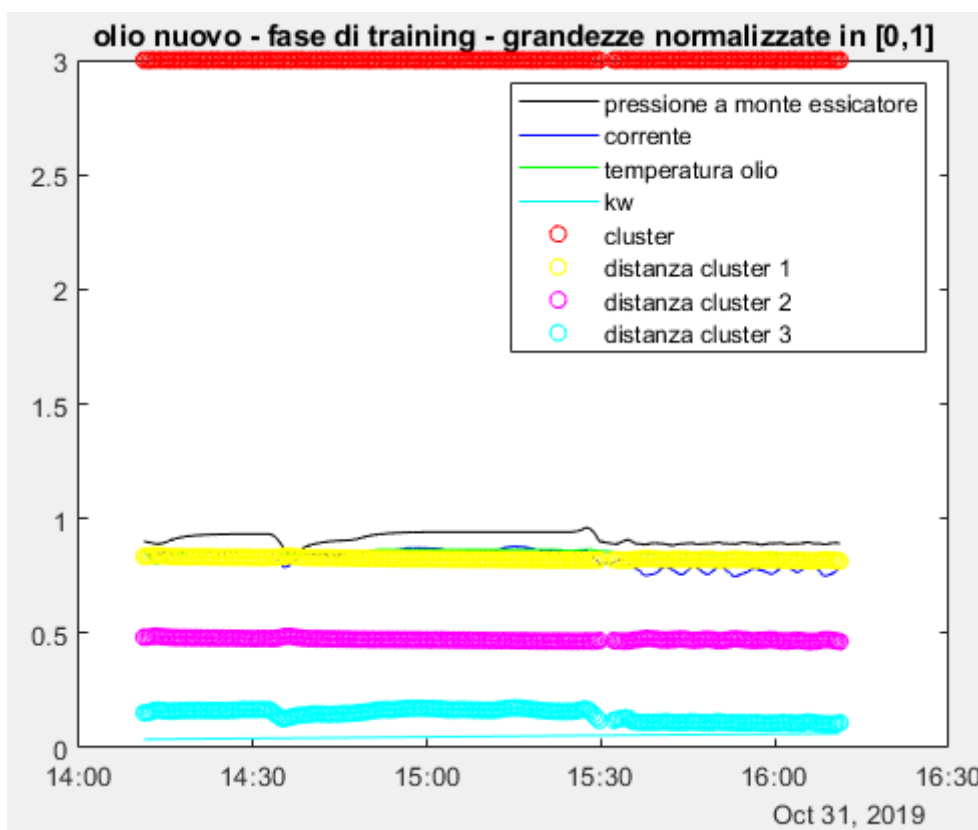


Figura 6.2 dati fase di training con olio nuovo

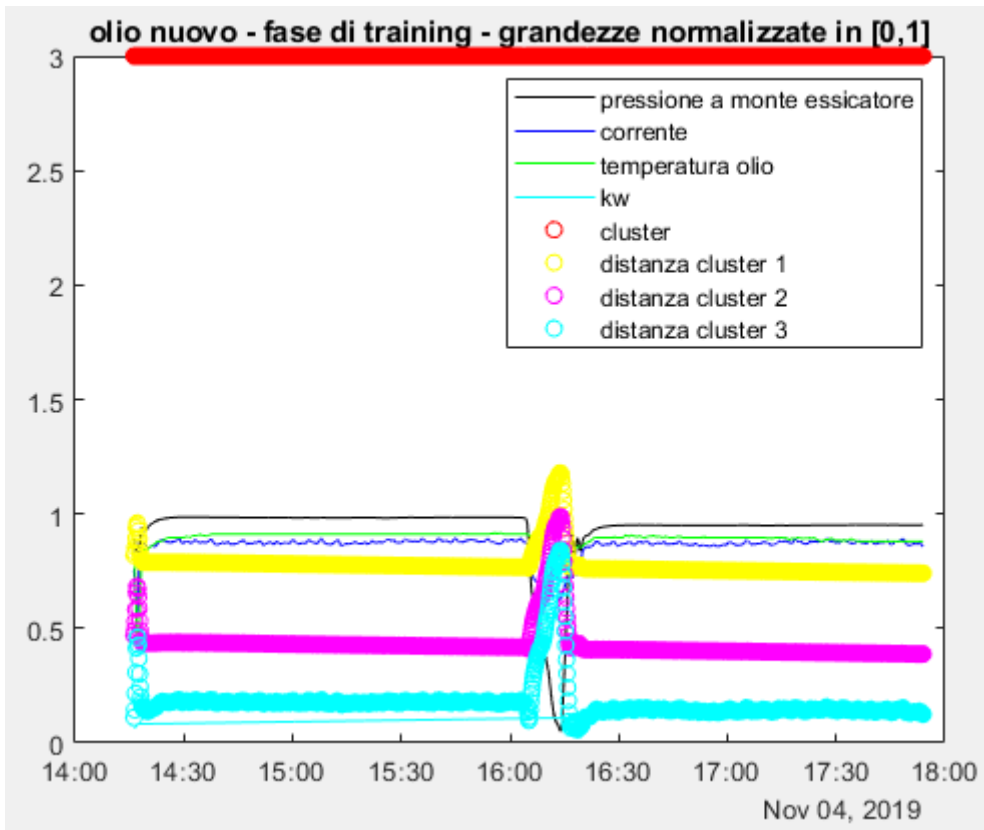


Figura 6.3 dati fase di training con olio nuovo

A partire da questo grafico e anche nei seguenti si nota come le grandezze abbiano un andamento oscillatorio più accentuato, nonostante ciò l'algoritmo riesce a riconoscere correttamente il cluster di appartenenza.

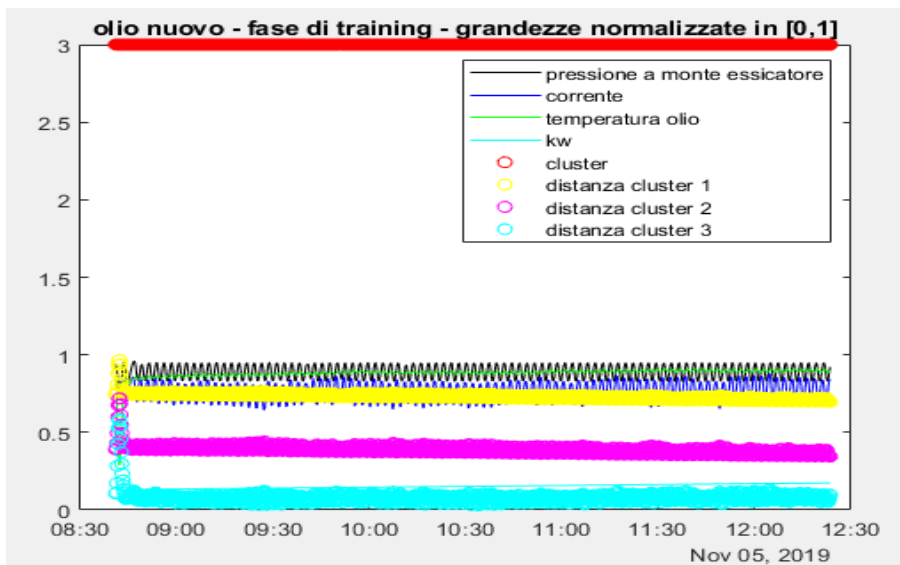


Figura 6.4 dati fase di training con olio nuovo

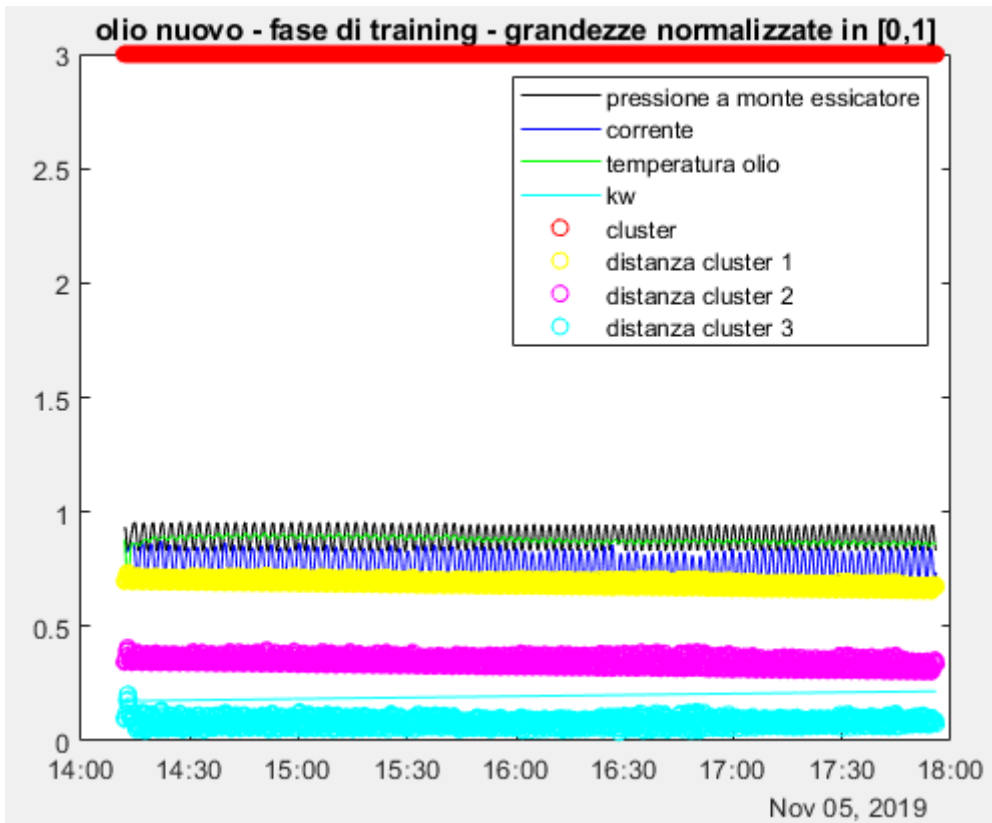


Figura 6.5 dati fase di training con olio nuovo

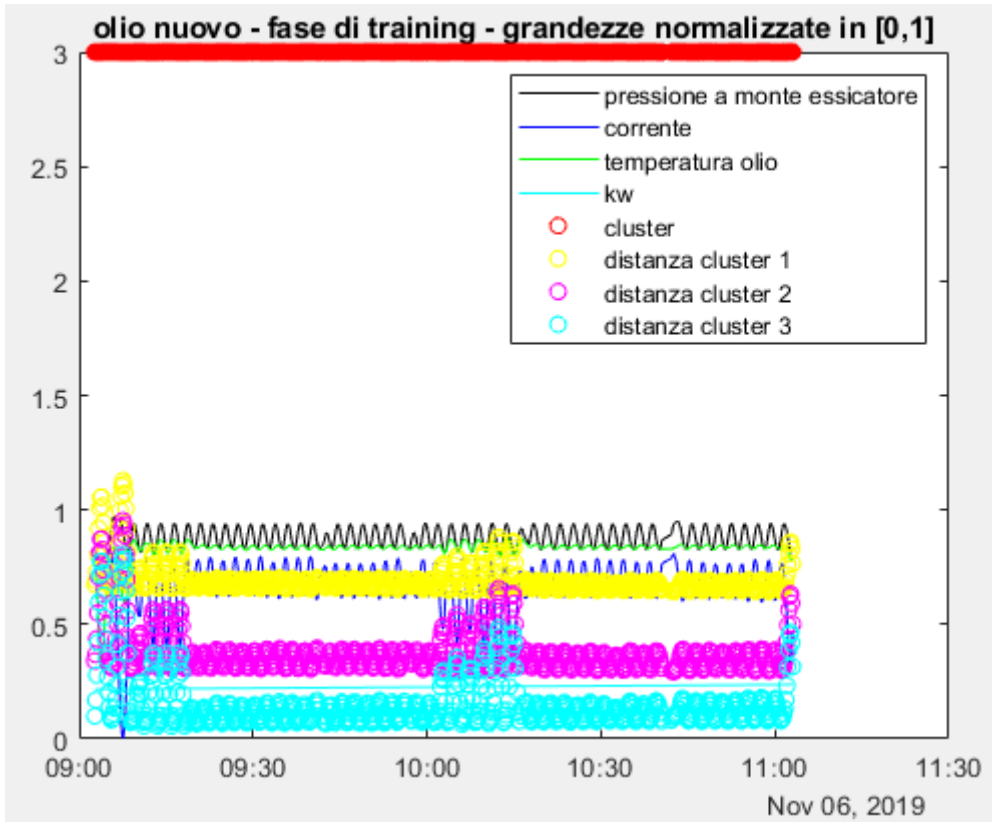


Figura 6.6 dati fase di training con olio nuovo

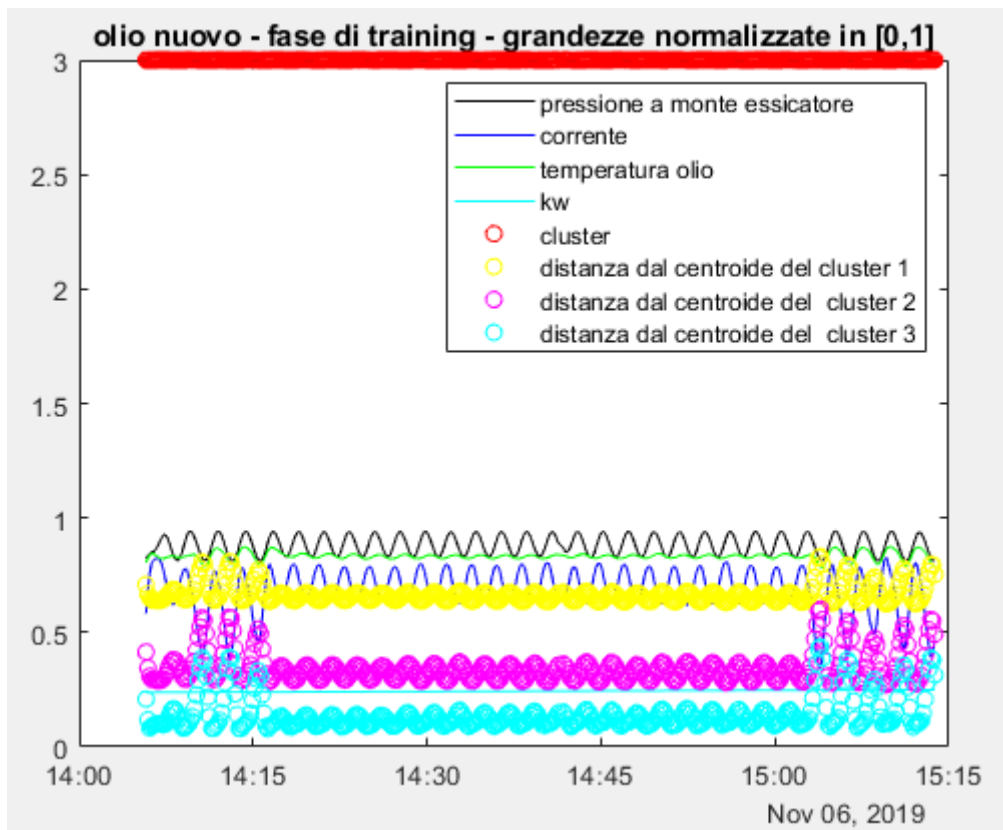


Figura 6.7 dati fase di training con olio nuovo

### 6.1.2 Dati di training relativi ad olio degradato

Si riportano di seguiti i grafici, del tutto analoghi ai precedenti, relativi però ai dati raccolto nel compressore mentre vi circola del lubrificante usurato.

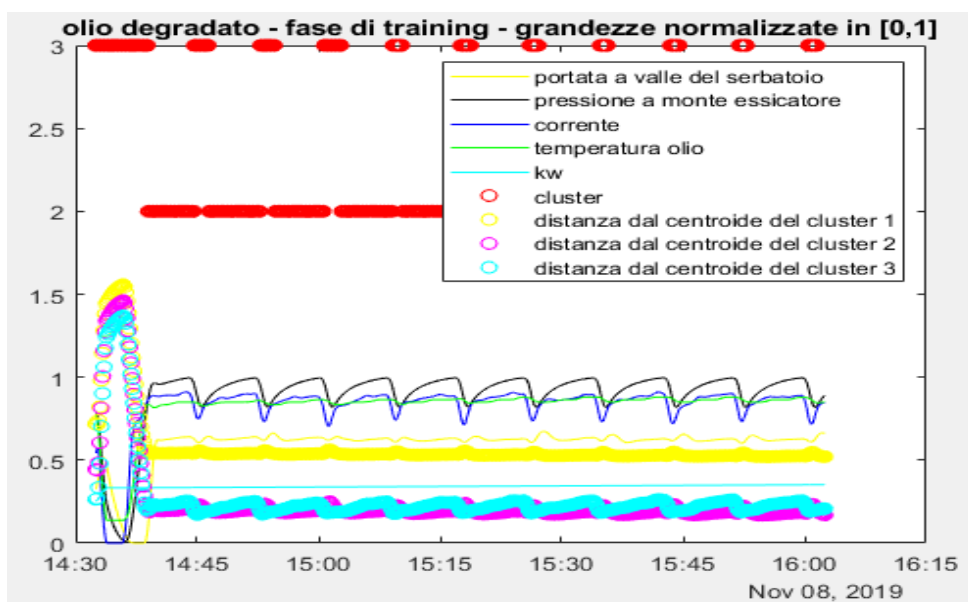


Figura 6.8 dati fase di training con olio degradato

Nel grafico sopra riportato i dati sono clusterizzati correttamente solo in parte, le grandezze hanno un andamento oscillatorio discretamente accentuato, in particolare notiamo che proprio in vicinanza delle zone di minimo locale, i dati vengono clusterizzati erroneamente come se fossero relativi ad olio nuovo invece che usurato. Una prima ipotesi per spiegare questo fenomeno è stata che probabilmente le richieste da parte del carico erano discontinue e che quando fossero minori, allora il compressore pur avendo dell'olio usurato, ne risentisse di meno e comunque riuscisse a soddisfare le richieste del carico senza andare in sovraccarico. Di conseguenza i dati in questo caso sono simili ai dati che si avrebbero quando nel compressore circola olio nuovo e per tanto vengono clusterizzati erroneamente. Questa ovviamente è solo un'ipotesi che può essere confermata o smentita solo conoscendo in che situazione stesse lavorando il compressore in quel momento. Purtroppo non avendo informazioni relative al contesto operativo, l'interpretazione dei risultati ottenuti si basa meramente sui dati, mentre per delle analisi più complete e precise non si può prescindere purtroppo della conoscenza delle condizioni del sistema.



Figura 6.9 dati fase di training con olio degradato

Anche in questo caso i dati vengono clusterizzati correttamente eccetto nella parte finale quando si assiste ad un calo brusco e improvviso delle grandezze monitorate. Anche in questo caso come nel precedente conoscere cosa fosse accaduto al compressore in quel momento ci avrebbe sicuramente aiutato a capire come mai i parametri scendono in quel modo e perché di conseguenza i dati vengono etichettati in modo errato.



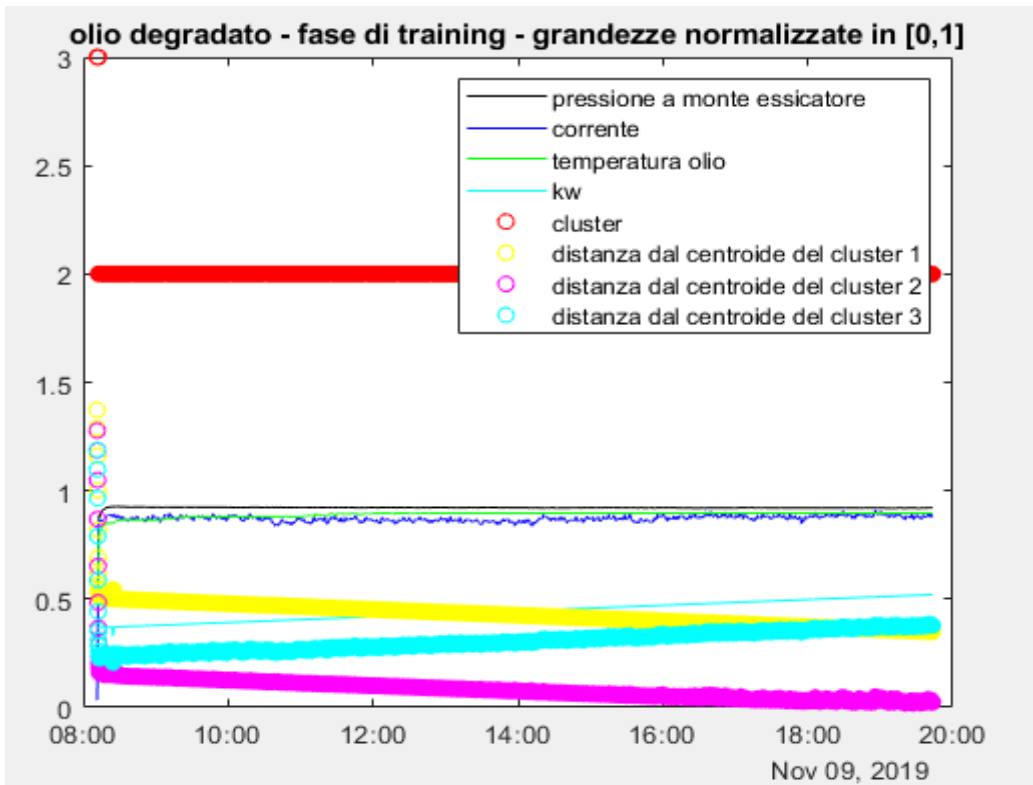


Figura 6.10 dati fase di training con olio degradato

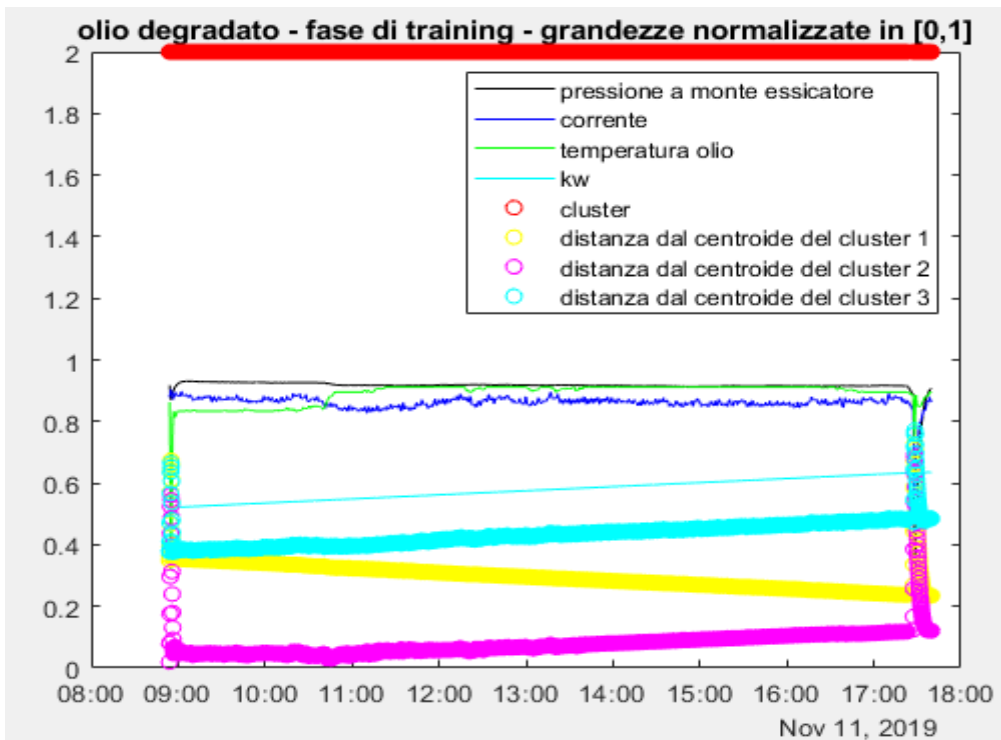


Figura 6.11 dati fase di training con olio degradato

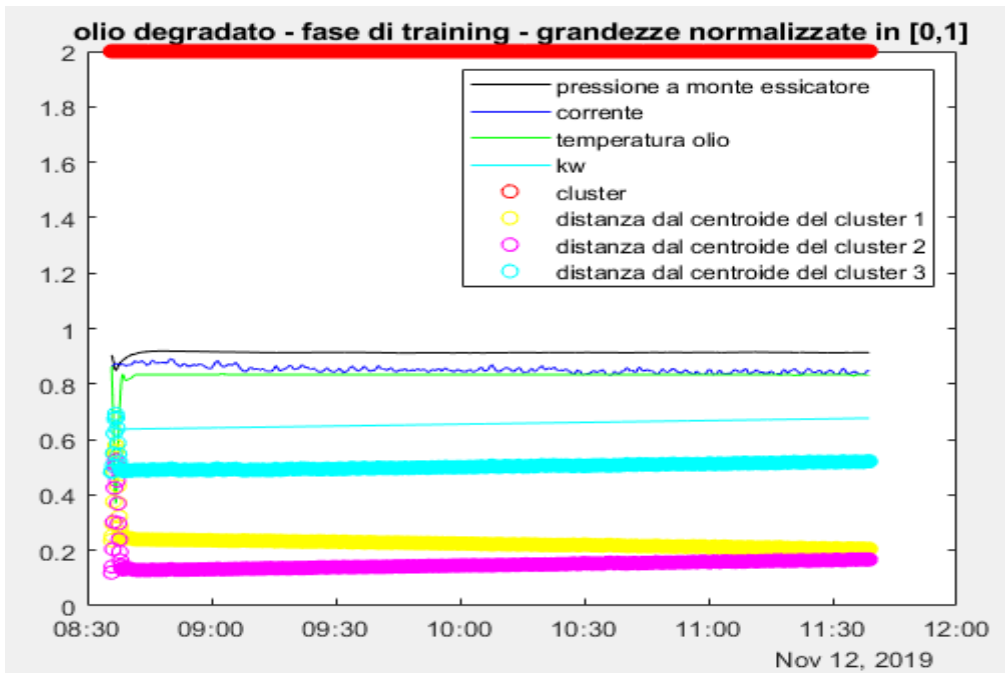


Figura 6.12 dati fase di training con olio degradato

Nei tre grafici sopra riportati la clusterizzazione avviene correttamente, non vi sono infatti né oscillazioni né bruschi cali delle variabili, che negli esempi precedenti abbiamo visto spesso mandano in confusione l'algoritmo.

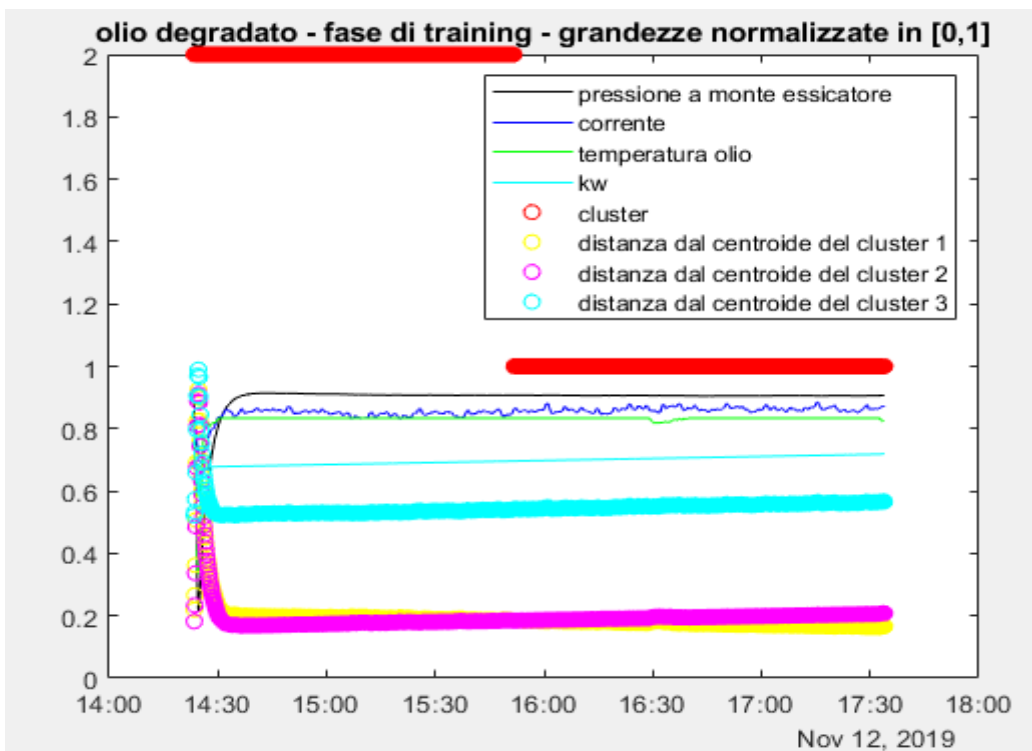


Figura 6.13 dati fase di training con olio degradato

In questo file la clusterizzazione avviene correttamente solo per la prima metà dei campioni. Nella parte finale viene scelto il cluster 1 in quanto le distanze dei dati dai centroidi del cluster 1 e del cluster 2 sono veramente molto ravvicinate. Basta quindi anche un piccolo cambiamento nelle condizioni operative e quindi poi nelle grandezze, per cui queste abbiano andamenti più simili ai dati classificati nel primo cluster. Ovviamente come sempre vale il discorso che l'analisi di solo questi dati è riduttiva per valutare in modo più completo la bontà dei risultati ottenuti, in quanto è un'analisi che purtroppo trascura le condizioni operative del compressore della quali non si hanno informazioni al riguardo purtroppo. Si riportano adesso gli ultimi due grafici relativi a dati in presenza di olio usurato.

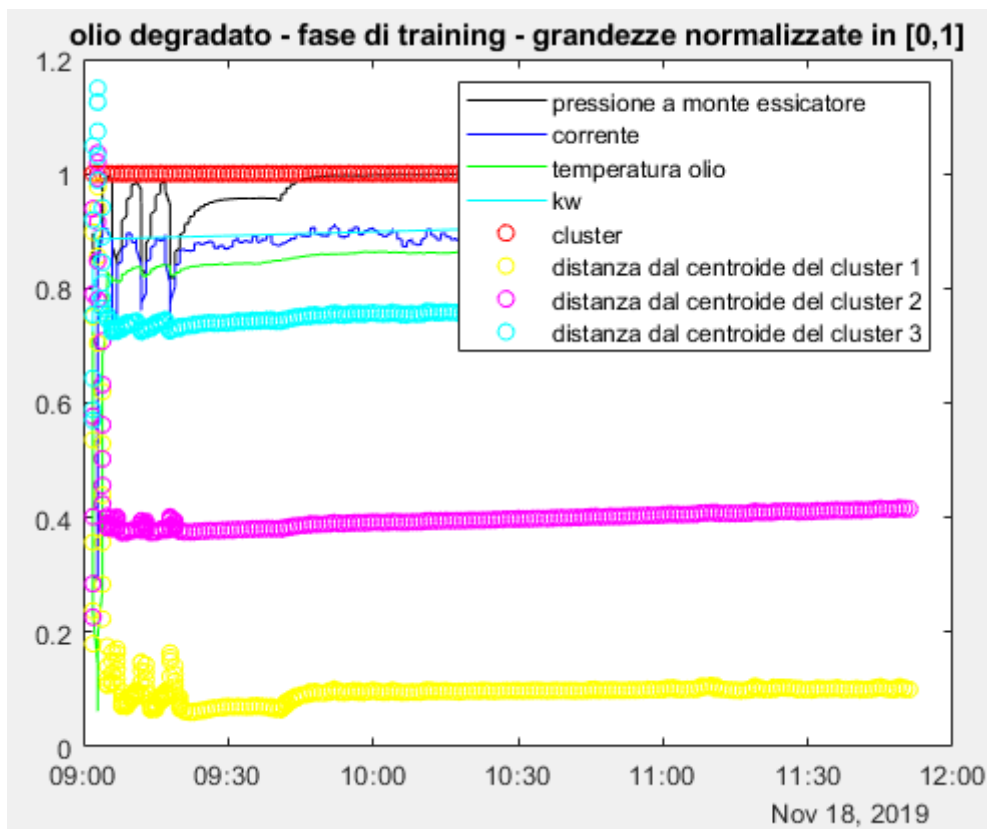


Figura 6.14 dati fase di training con olio degradato

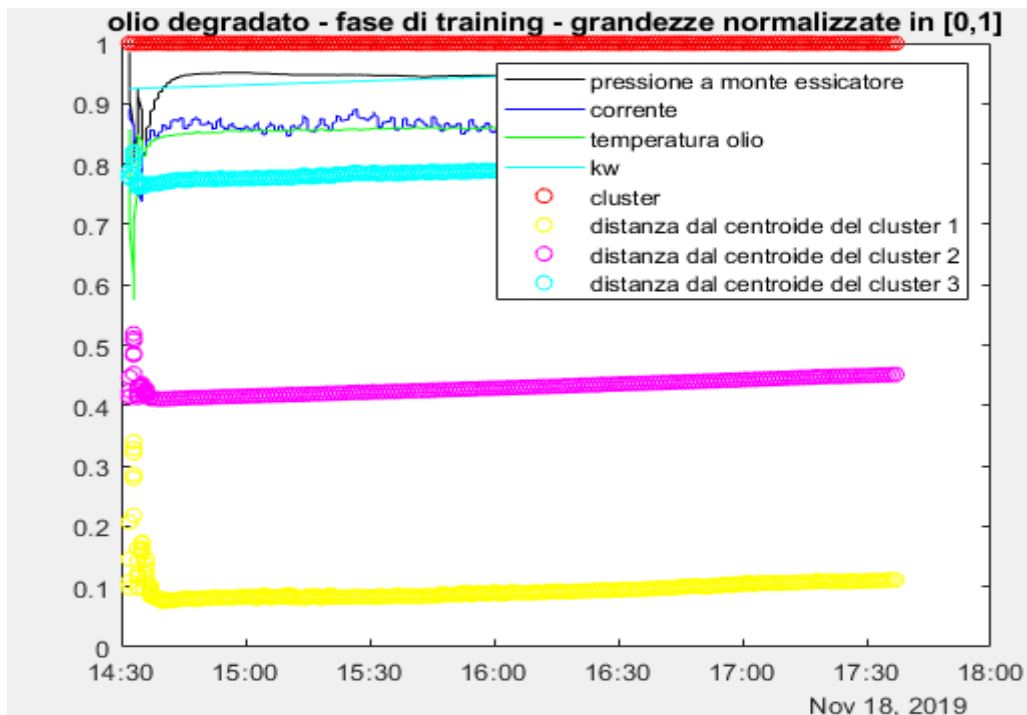


Figura 6.15 dati fase di training con olio degradato

Questi ultimi due grafici sono stati riportati insieme perché piuttosto simili. I dati vengono riconosciuti tutti come se l'olio fosse non solo degradato ma anche in quantità minori rispetto a quelle necessarie. Potrebbe essere successo che magari il compressore si è ritrovato a dover soddisfare grandi richieste da parte del carico, per cui magari il sistema è andato in affanno e ha risentito particolarmente della presenza di olio degradato, tanto che i dati registrati sembrano molto più vicini ai dati relativi al primo cluster (quello con olio degradato e ridotto). Si tiene a precisare che questa resta solo un'ipotesi atta a spiegare il perché di questi risultati.

### 6.1.3 Dati di training relativi ad olio degradato e ridotto rispetto alle quantità standard.

Si riportano di seguito i grafici relativi ai dati monitorati mentre nel compressore circola un lubrificante usurato e ridotto di 2.5L rispetto alle quantità previste.

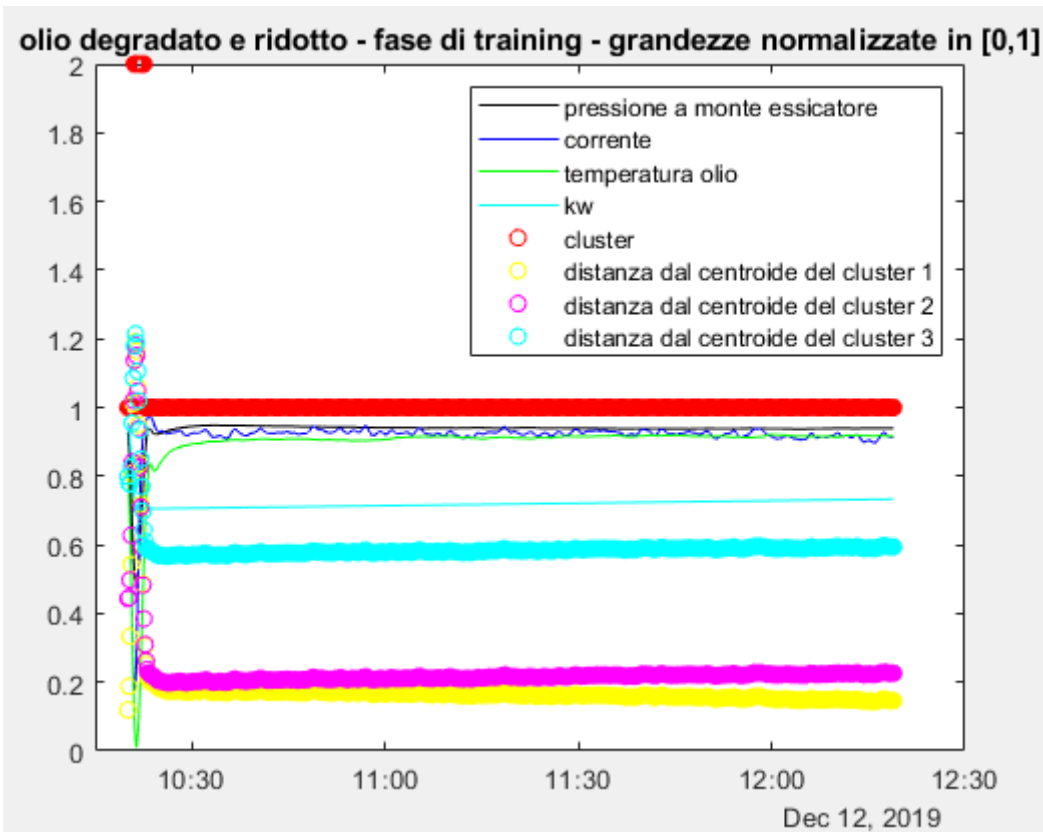


Figura 6.16 dati fase di training con olio degradato e ridotto

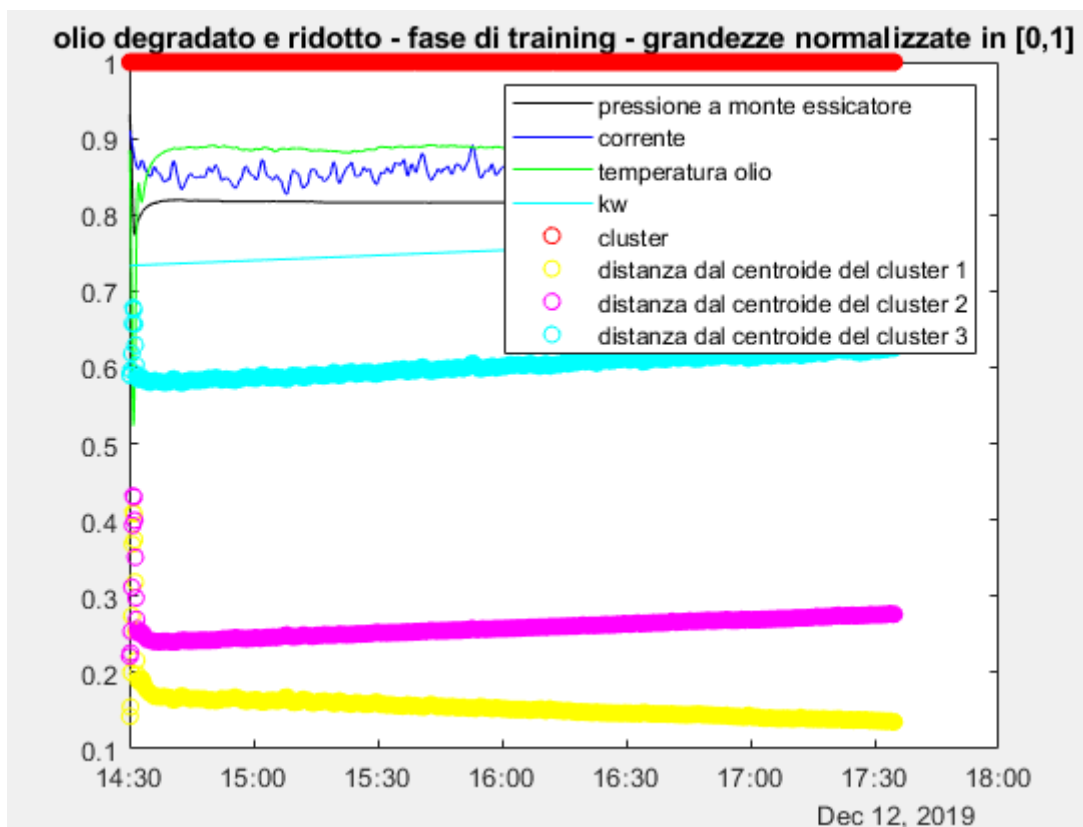


Figura 6.17 dati fase di training con olio degradato e ridotto

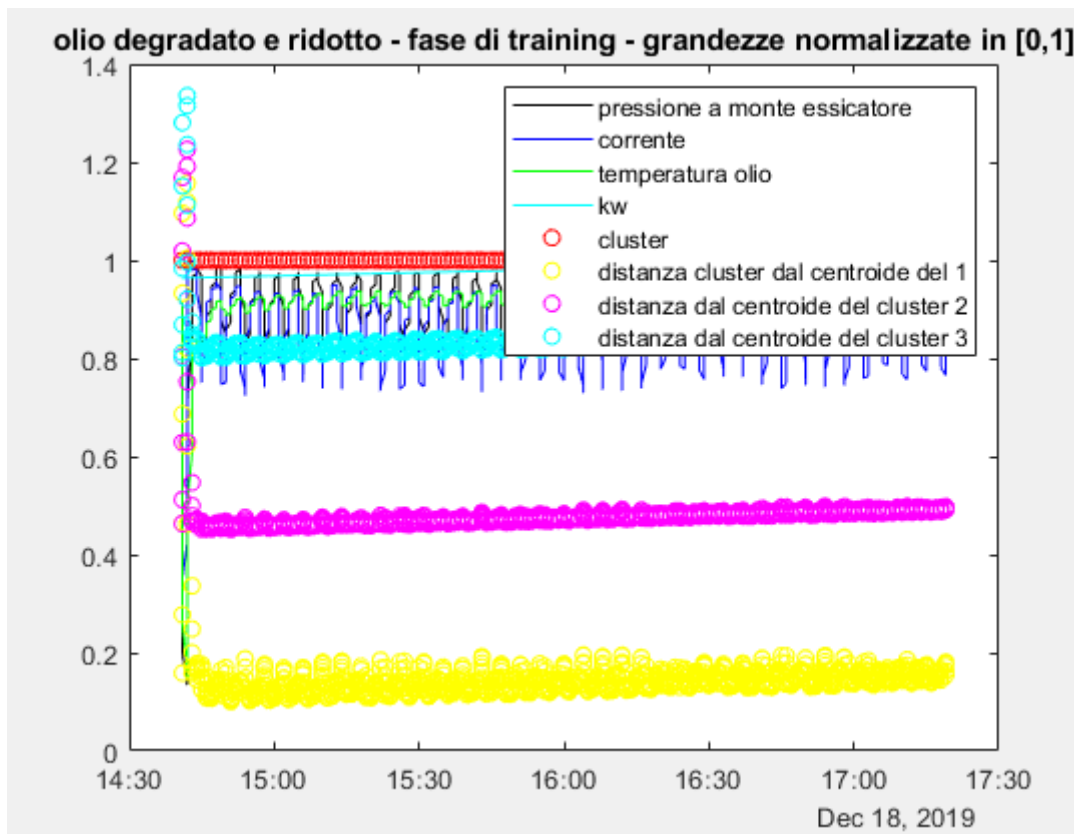


Figura 6.18 dati fase di training con olio degradato e ridotto

Nei seguenti grafici i dati vengono clusterizzati correttamente, fatta eccezione per il primo in cui negli istanti iniziali alcuni campioni sono messi nel cluster 2, ma essendo il sistema in fase transitoria l'errore è più che accettabile, inoltre si tratta di pochi campioni rispetto alla totalità. Si riportano inoltre due grafici in cui vengono rappresentati tutti i dati utilizzati nella fase di testing divisi nei tre cluster.

Nel primo grafico i dati sono riportati divisi in cluster in base a come vengono clusterizzati dal k-means, nel secondo grafico invece sono suddivisi in base a quello che è il loro vero cluster di appartenenza. seppur in modo qualitativo, questi grafici ci forniscono una visione di insieme su quanto il clustering sia stato eseguito correttamente.

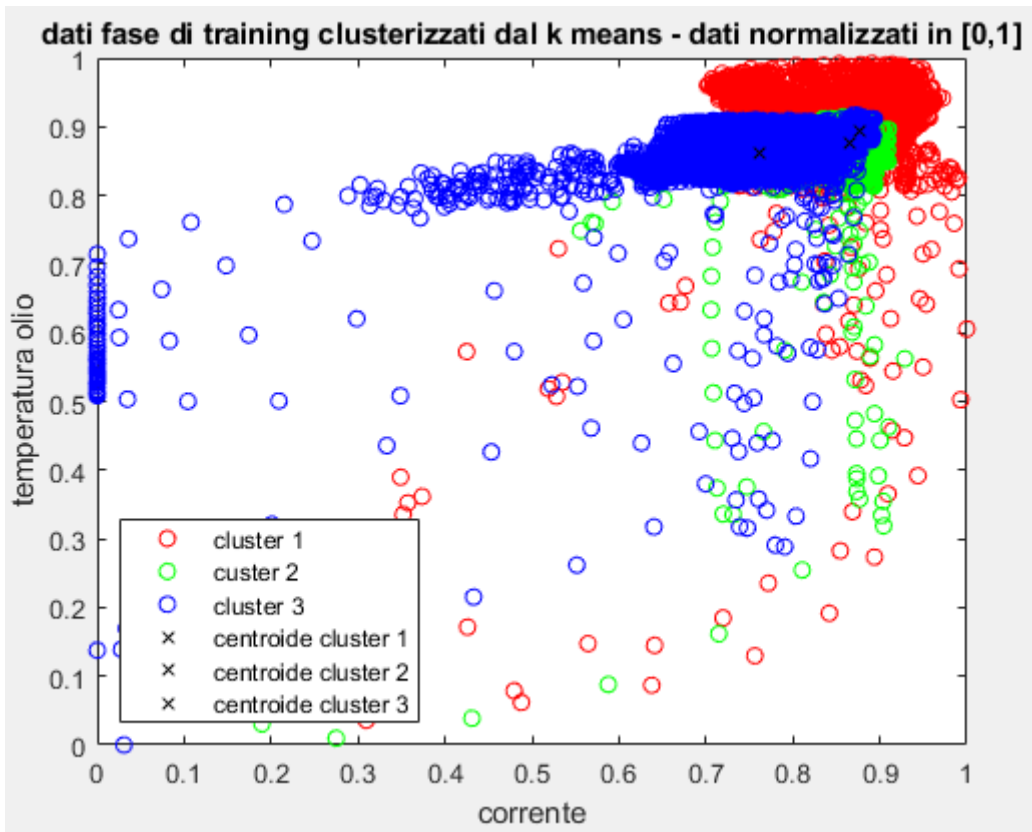


Figura 6.19 dati fase di training divisi nei tre cluster dall'algorithm

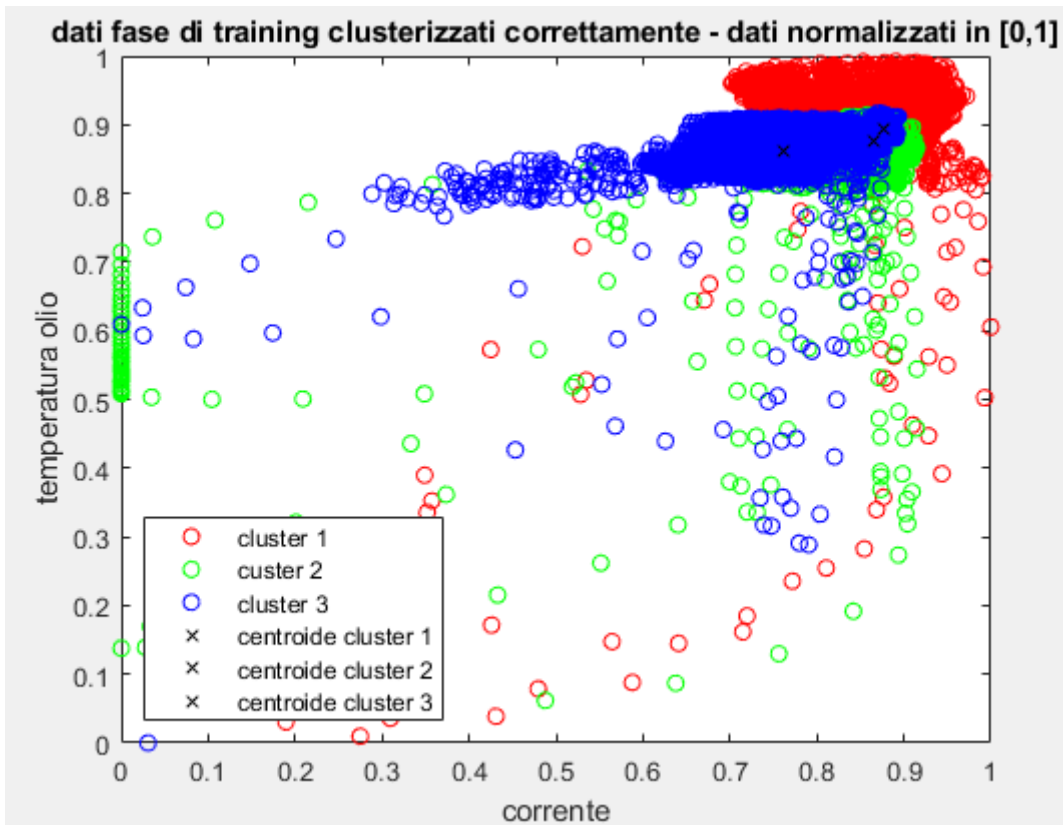


Figura 6.20 dati fase di training divisi nei cluster a cui realmente appartengono

Ad un primo sguardo appare chiaro come la maggior parte dei dati sia stata clusterizzata correttamente, fatta eccezione in particolare per i dati corrispondenti a valori bassi della corrente, che dovrebbero appartenere al secondo cluster, invece sono erroneamente collocati nel terzo. Salvo alcuni errori, che sono gli stessi evidenziati e commentati nei grafici precedenti, il risultato complessivo si può considerare soddisfacente.

#### 6.1.4 Matrice di confusione per i dati in fase di training e calcolo dell'accuratezza

I grafici sopra riportati forniscono un'idea qualitativa dei risultati ottenuti, per volergli quantificare si è calcolata la matrice di confusione accompagnata poi dal calcolo dell'accuratezza. Ogni colonna della matrice rappresenta i valori predetti, mentre ogni riga rappresenta i valori reali. L'elemento sulla riga  $i$  e sulla colonna  $j$  è il numero di casi in cui il l'algoritmo ha classificato la cluster "vero"  $i$  come classe  $j$ . Attraverso questa matrice è osservabile se vi è "confusione" nella classificazione di diversi cluster. La matrice di confusione è una matrice che ha dimensioni pari al numero dei cluster. Nelle righe il numero di campioni viene diviso in base alla classe di appartenenza, nelle colonne in base alla classe predetta dall'algoritmo. Ad esempio in posizione (1;1) della matrice di confusione troveremo quanti campioni appartengono al cluster 1 e sono stati etichettati nel cluster 1, in posizione (1,2) quanti campioni appartengono al cluster 1 ma sono stati etichettati come cluster 2 e in posizione (1,3) quanti campioni appartengono al cluster 1 ma sono stati etichettati come cluster 3.

5559	0	0
186	9701	2735
0	10	4664

Tabella 6.1 matrice di confusione



Da notare come i valori sulla diagonale principale che indentificano il numero di campioni classificati correttamente sia nettamente superiore rispetto ai restanti valori. Si calcola l'accuratezza della previsione per fornire un'idea più precisa della bontà dei risultati ottenuti. L'accuratezza della stima di un cluster è definita come il rapporto tra il numero di campioni classificati correttamente e il numero totale di campioni che effettivamente appartengono a quella classe. L'accuratezza si calcola agevolmente a partire dai dati della matrice di confusione.

Accuratezza cluster 1:  $5559/(5559+0+0) = 1 \rightarrow 100\%$  di accuratezza

Accuratezza cluster 2:  $9701/(186+9701 +2735) = 0.77 \rightarrow 77\%$  di accuratezza

Accuratezza cluster 3:  $4664/(0+10+4664) = 0.99 \rightarrow 99\%$  di accuratezza

Come evidenziato anche dall'analisi dei grafici è evidente che l'algoritmo se a cava molto bene nel riconoscere i dati del primo e del terzo cluster mentre va un po' più in difficoltà con i dati del secondo cluster. Ma in linea generale i risultati si possono considerare buoni.

## 6.2 Fase di testing

Nella fase di testing a partire dai centroidi individuati nella fase di training si clusterizzano i dati assegnandoli al cluster il cui centroide dista meno dal dato preso in considerazione. In questi grafici, a differenza dei precedenti sono pretesi anche dei segnali di warning. I warning si attivano dal momento in cui un dato viene assegnato ad un cluster, ma risulta molto vicino anche a centroidi di altri cluster. I warning sono stati introdotti perché si è notato che spesso la fase di test fallisce in quanto spesso i dati sono molto vicini a più di un centroide. Così facendo nei casi in cui i dati vengono etichettati male, piuttosto che attenersi solo a quel risultato c'è anche il warning che

suggerisce in quel caso di prestare maggiore attenzione ai risultati ottenuti, che appunto possono non essere sempre corretti.

In particolare:

il segnale warning12 si attiva quando la differenza delle distanze dai centroidi dei cluster 1 e 2 è minore di 0.1;

il segnale warning13 si attiva quando la differenza delle distanze dai centroidi dei cluster 1 e 3 è minore di 0.1;

il segnale warning23 si attiva quando la differenza delle distanze dai centroidi dei cluster 2 e 3 è minore di 0.1;

Come fatto nei paragrafi precedenti prima riportiamo i grafici per avere un'idea visiva di quanto l'algoritmo sia stato performante, infine riportiamo dati di tipo numerico per un'analisi quantitativa delle prestazioni.

### 6.2.1 Dati di testing relativi ad olio nuovo

vengono riportati di seguito i risultati ottenuti nella fase di test analizzando i dati relativi alla presenza di olio nuovo nel compressore.

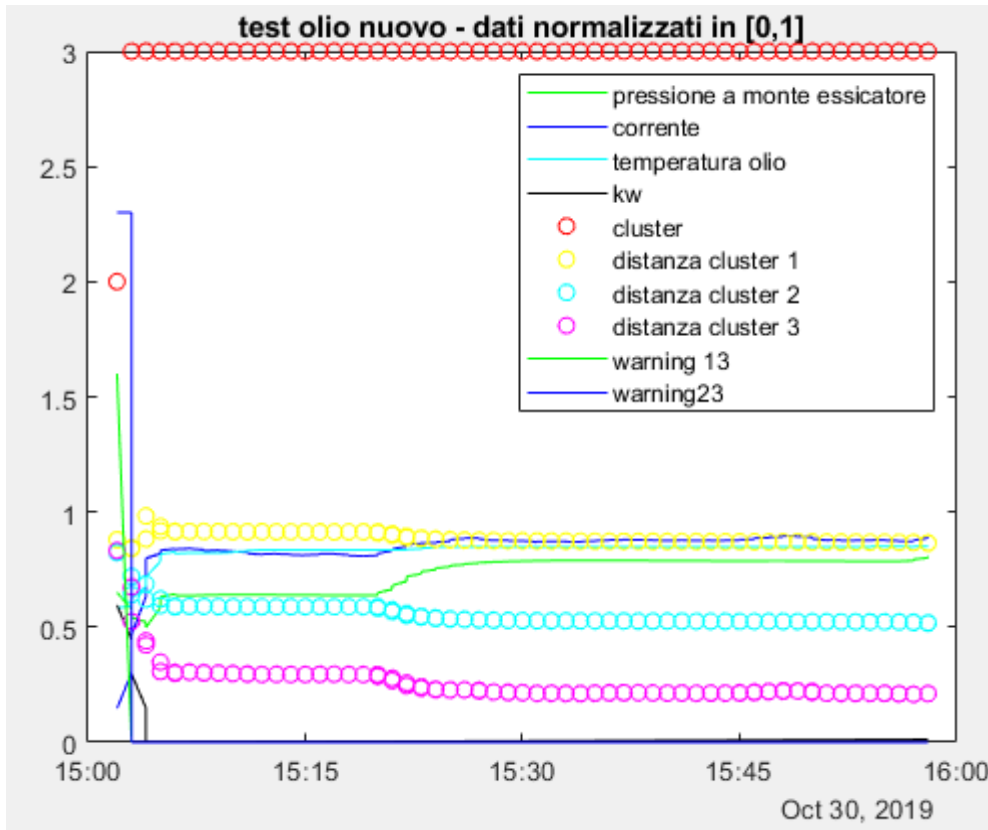


Figura 6.21 dati fase di testing con olio nuovo

La classificazione avviene correttamente, nella fase iniziale si attivano i warning che segnalano che i primi campioni sono vicini sia al cluster tre che al due. Tuttavia l'algoritmo, eccetto all'inizio quando alcune le grandezze sono ancora nella fase transitoria non si confonde e riconosce i dati senza sbagliare

## 6.2.2 Dati di testing relativi ad olio degradato

Si riportano adesso i grafici relativi alla clusterizzazione dei dati con olio degradato.

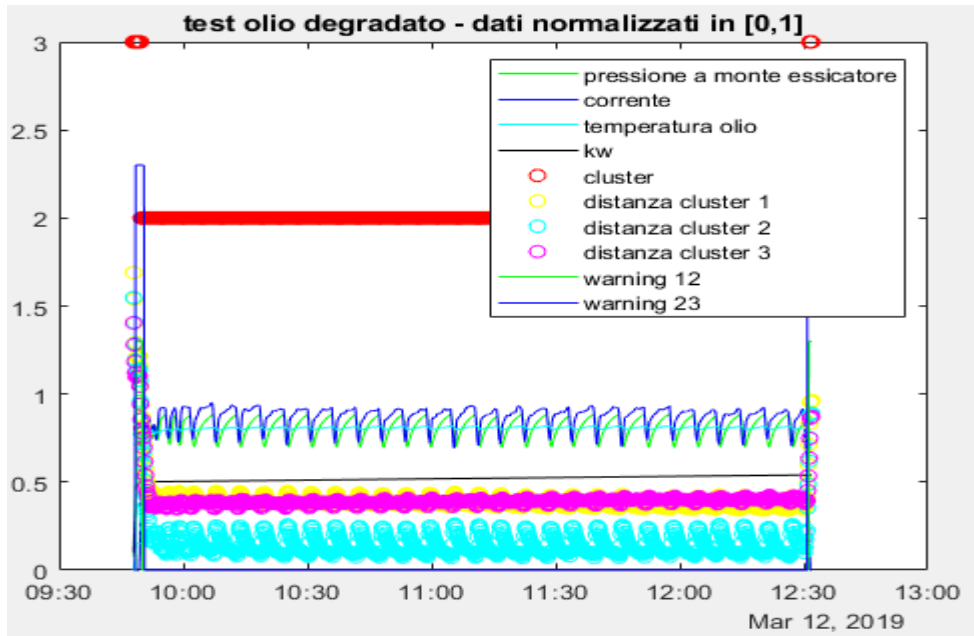


Figura 6.22 dati fase di testing con olio degradato

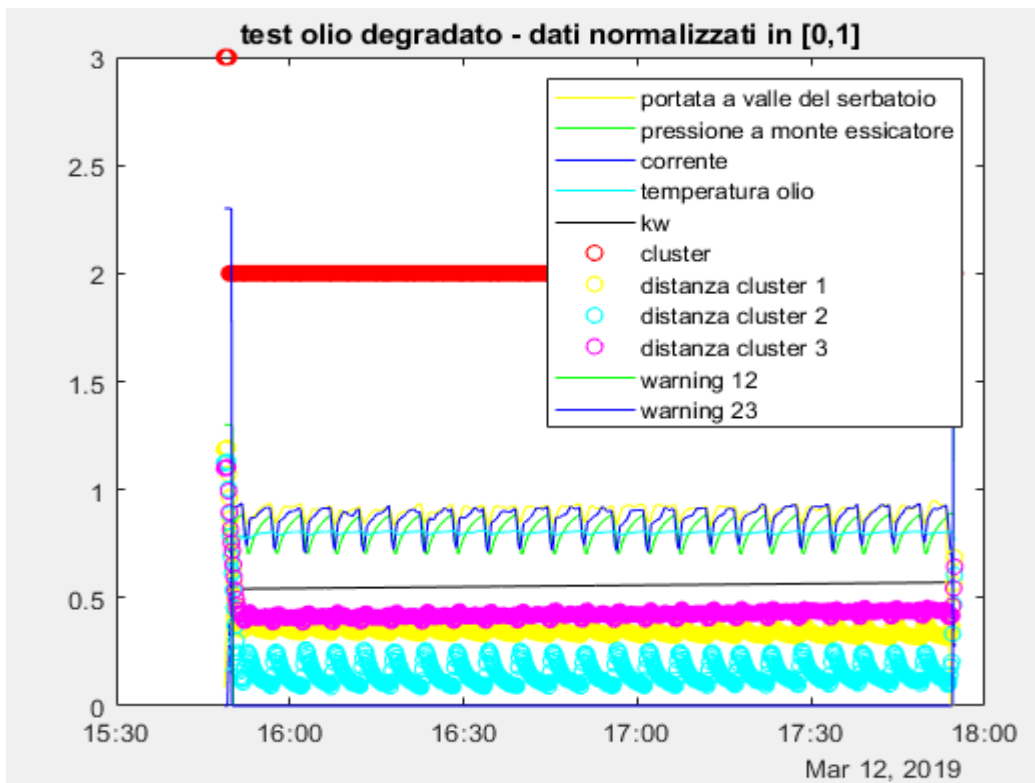


Figura 6.23 dati fase di testing con olio degradato

In questi due grafici la classificazione avviene correttamente, fatte eccezione per alcuni campioni iniziali, ma come visto già in altre situazioni nella fase transitoria è ammissibile che l'algoritmo si confonda. Tuttavia si nota già l'utilità della presenza dei warning, anche se i dati sono etichettati come cluster 3 all'inizio, c'è attivo il warning 23 che segnala la vicinanza dei dati al cluster 2 e che fa quindi intuire all'utente che quella classificazione iniziale potrebbe essere errata.

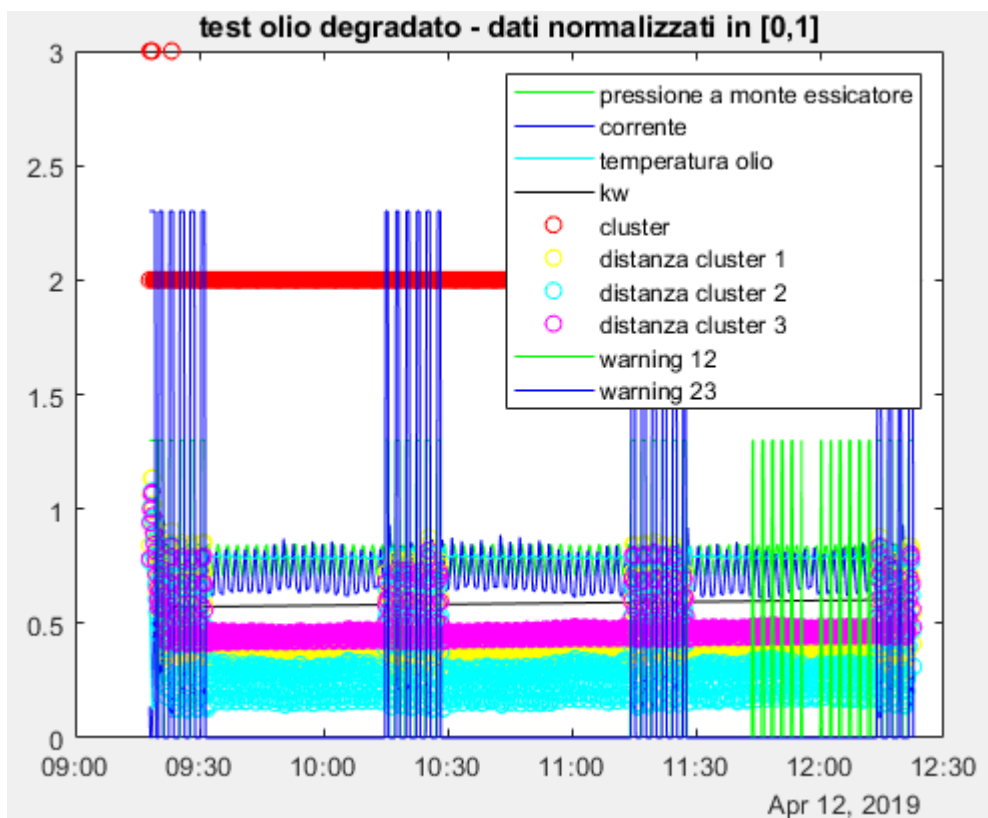


Figura 6.24 dati fase di testing con olio degradato

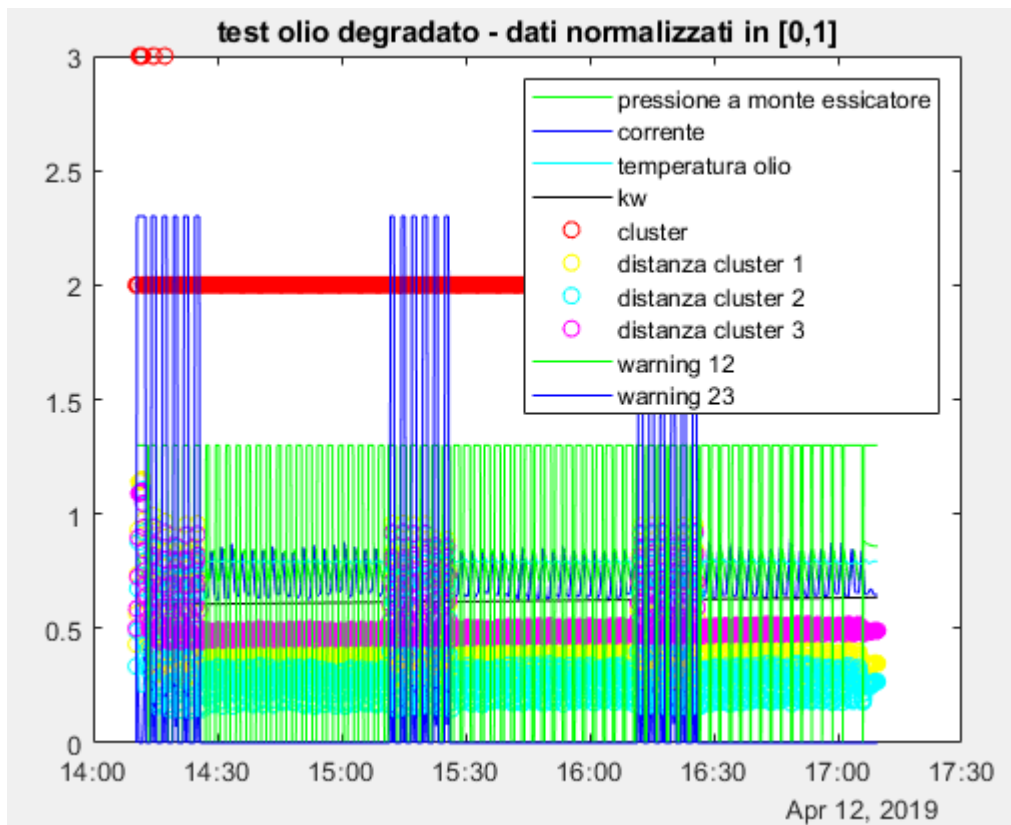


Figura 6.25 dati fase di testing con olio degradato

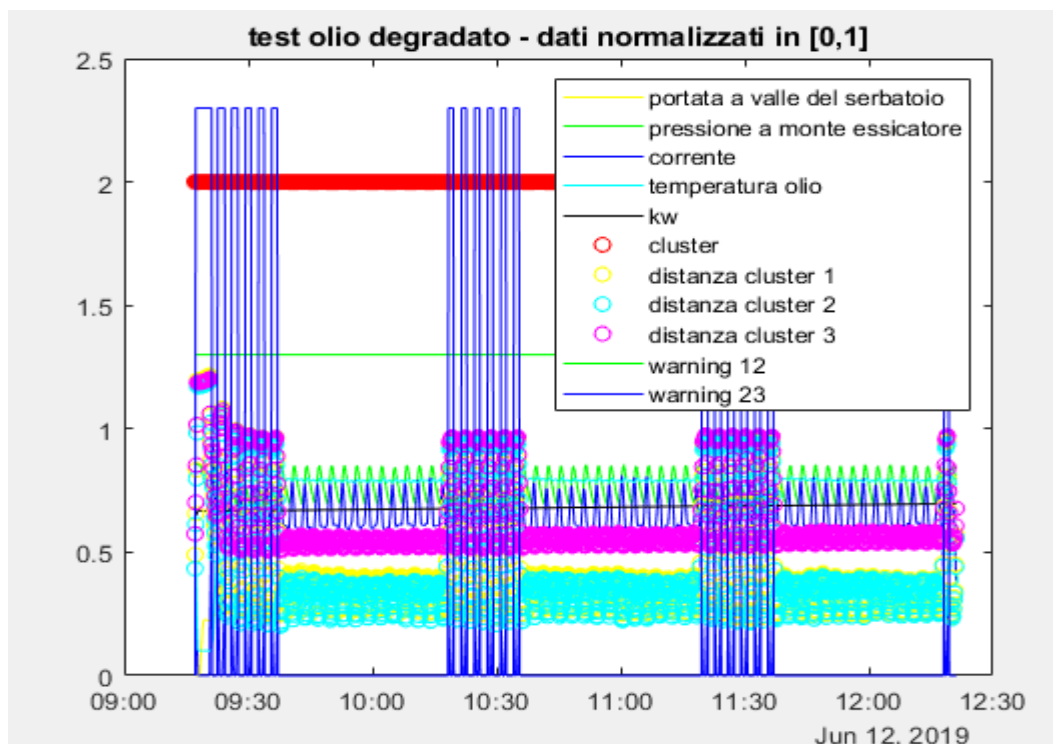


Figura 6.26 dati fase di testing con olio degradato

In questi tre grafici la clusterizzazione avviene in modo corretto, fatta sempre eccezione per alcuni campioni nella fase transitoria, ma come già detto questo è un errore che possiamo considerare accettabile, anche perché si tratta di un numero esiguo di dati rispetto alla totalità. La differenza con i primi due grafici è che qui c'è una presenza molto più massiccia dei warning, che in questo caso anche se la classificazione è avvenuta correttamente stanno a significare che i valori trovati comunque sono molto vicini ai cluster 1 e 3.

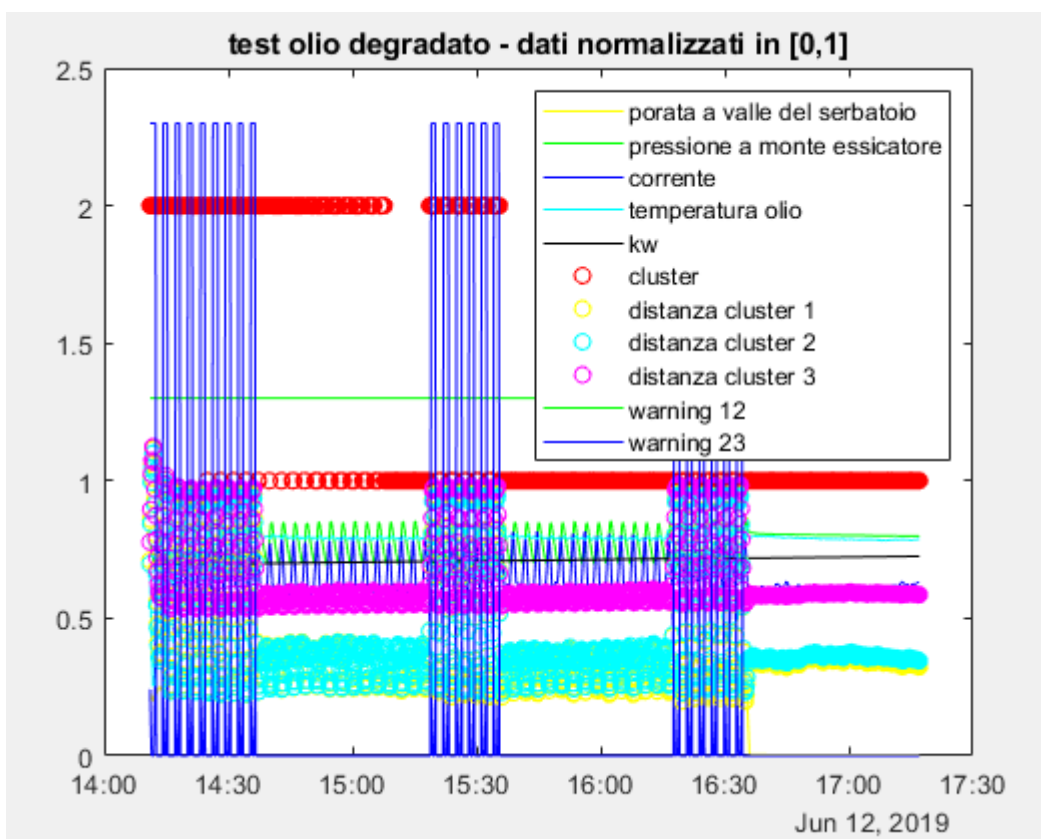


Figura 6.27 dati fase di testing con olio degradato

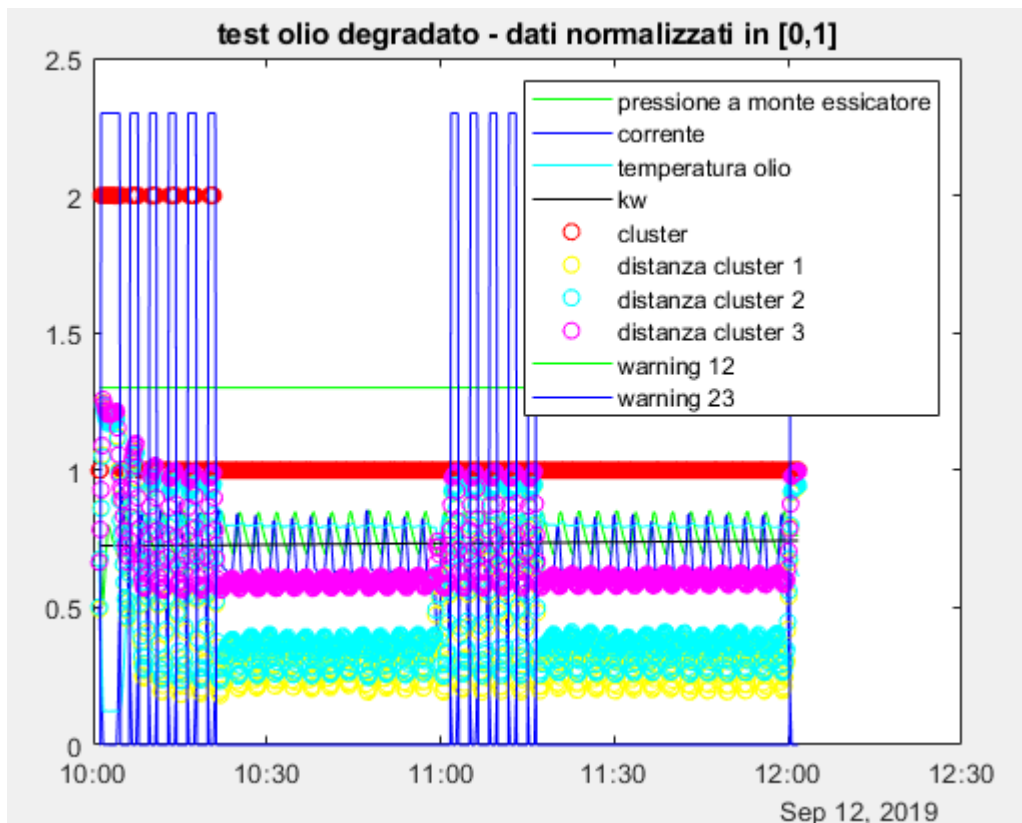


Figura 6.28 dati fase di testing con olio degradato

La clusterizzazione avviene per lo più in modo errato in questi due ultimi esempi. Quando i dati sono riconosciuti come cluster 2 (il cluster corretto di appartenenza), c'è il warning che segnala che questi dati sono vicini anche al cluster 3, inoltre è fissa la presenza del warning verde che sta a segnalare la vicinanza dei dati ai cluster 1 e 2, evidentemente, come si nota anche dalle distanze dai centroidi riportate nei grafici, in questi esempi i dati risultano essere abbastanza vicini a tutti e tre i centroidi e la clusterizzazione non sempre è corretta. Anche qui conoscere il contesto in cui i dati sono stati raccolti sicuramente ci avrebbe aiutato molto a capire il perché di questi risultati. Forse potrebbero dipendere da richieste del carico piuttosto elevate, che mandano in sovraccarico il compressore, al punto tale che i dati somigliano a quando nel compressore c'è dell'olio usurato e ridotto, infatti in questi due grafici il cluster predominante è proprio l'uno.



### 6.2.3 Dati di testing relativi ad olio degradato e ridotto

Analizziamo adesso i risultati con i dati relativi a olio degradato e ridotto

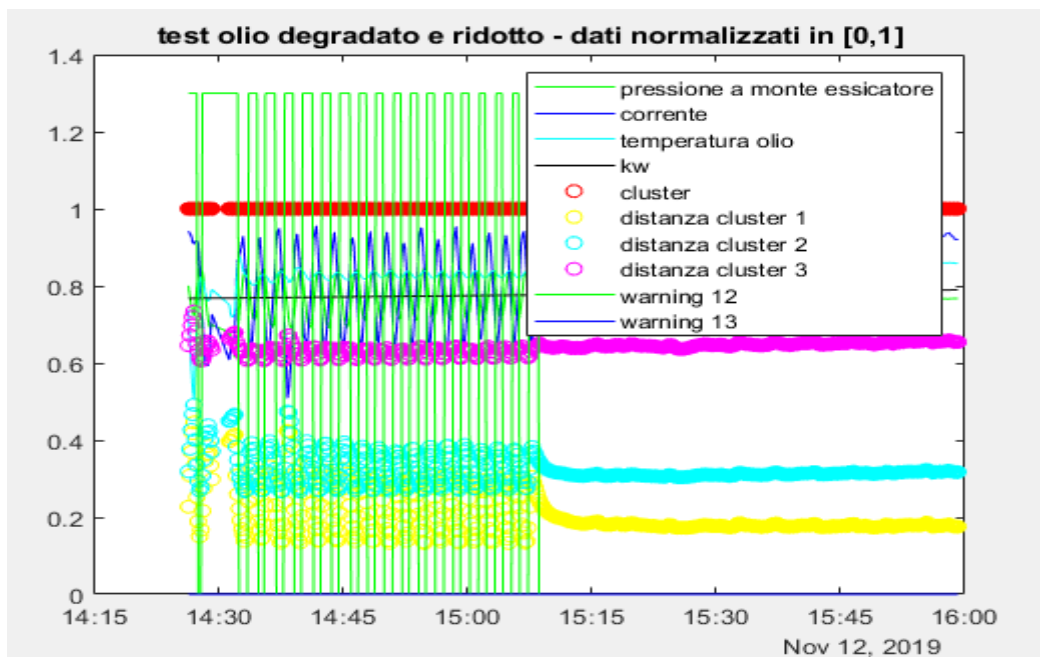


Figura 6.29 dati fase di testing con olio degradato e ridotto

La clusterizzazione avviene correttamente, nella fase iniziale è presente il warning 12 che segnala la vicinanza dei dati anche al centroide del cluster 2, tuttavia l'algoritmo riconosce i dati correttamente.

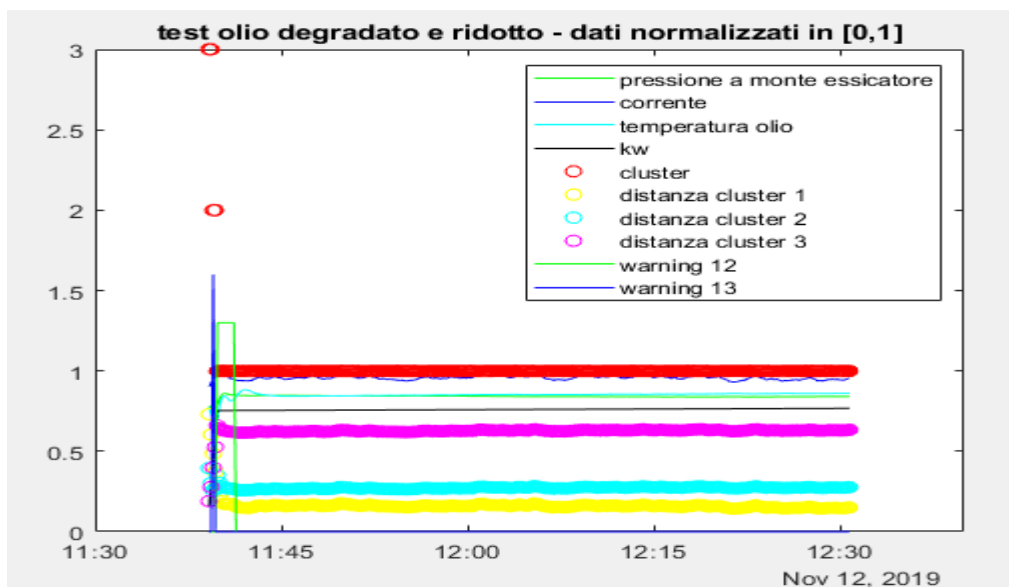


Figura 6.30 dati fase di testing con olio degradato e ridotto

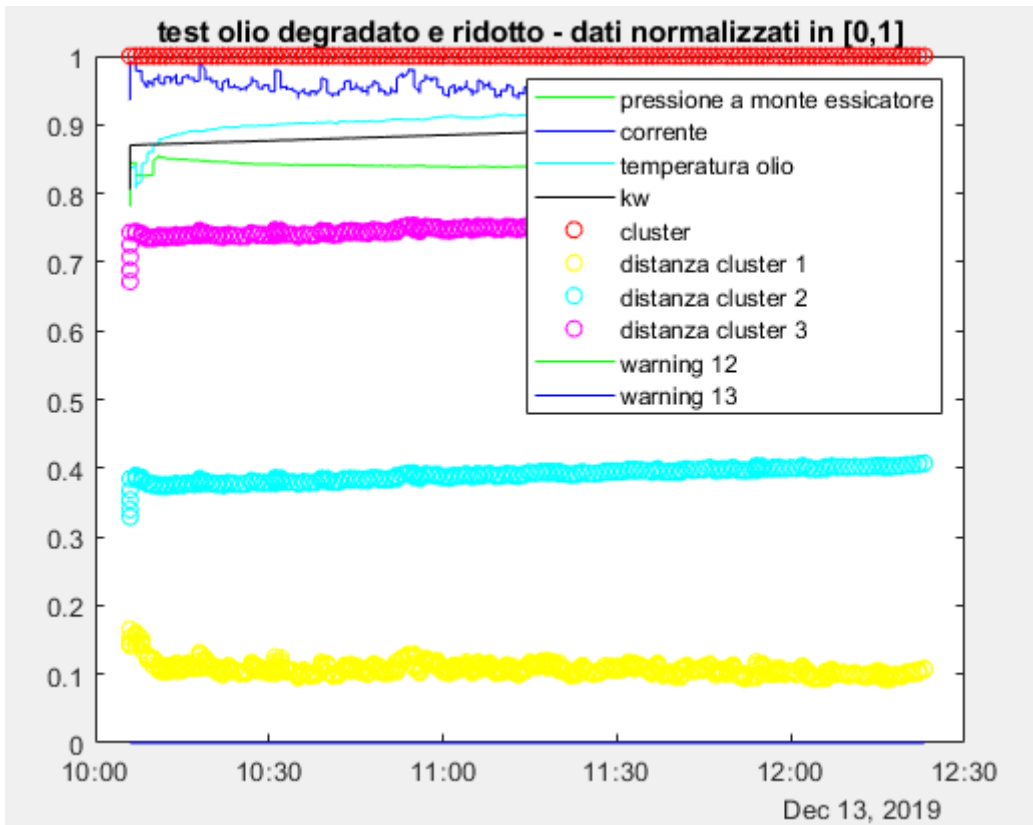


Figura 6.31 dati fase di testing con olio degradato e ridotto

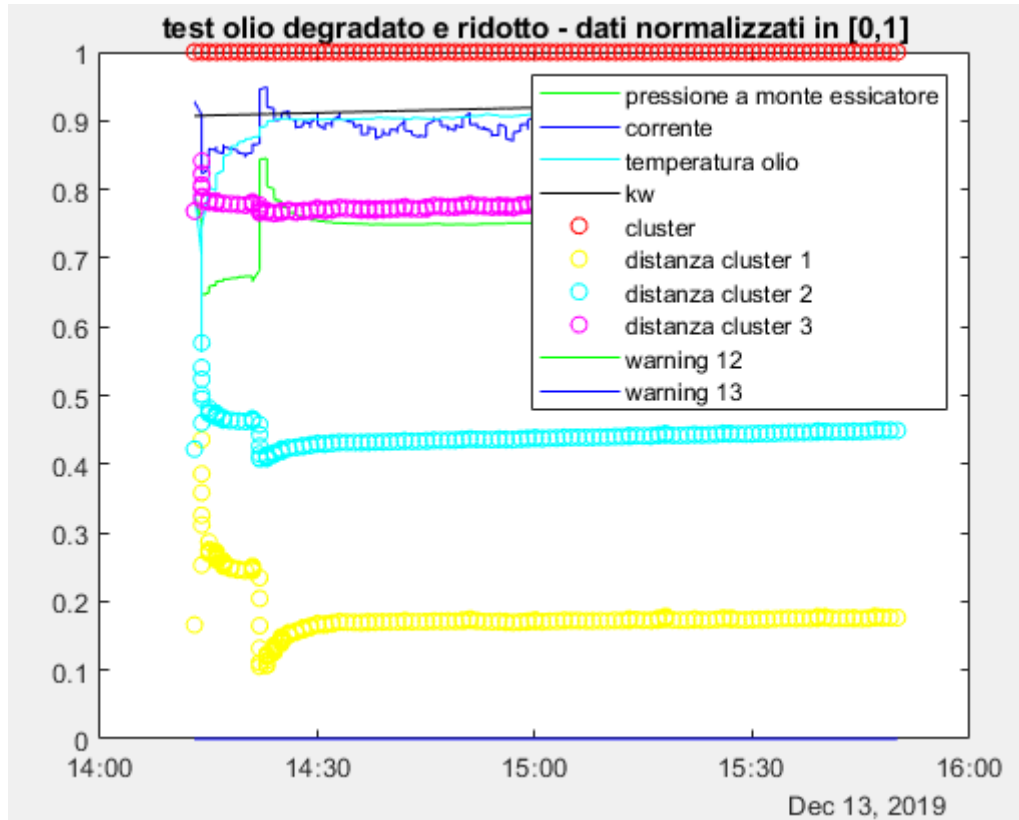


Figura 6.32 dati fase di testing con olio degradato e ridotto

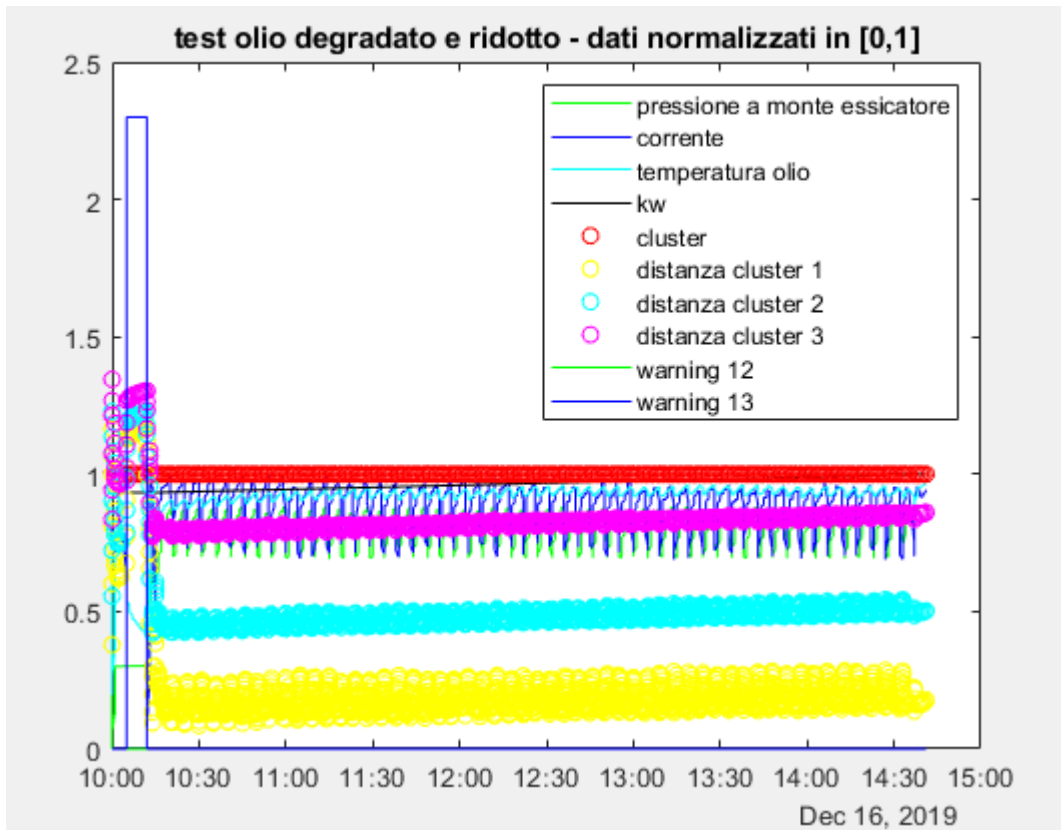


Figura 6.33 dati fase di testing con olio degradato e ridotto

I dati vengono clusterizzati correttamente, la presenza dei warning è limitata a brevi intervalli di tempo, i risultati sono comunque soddisfacenti.

Proponiamo adesso due grafici in cui vengono messi a confronto tutti i dati della fase di testing nel seguente modo: nel primo grafico sono riportati i dati divisi per cluster in base a come vengono classificati dall'algoritmo; nel secondo grafico vengono riportati tutti i dati divisi in tre cluster, questa volta però i cluster non sono quelli attribuiti dall'algoritmo ma quelli a cui i dati effettivamente appartengono. Poiché i dati hanno 4 dimensioni, non è possibile rappresentarli nella totalità delle loro componenti, sono stati quindi rappresentate solo due componenti: la corrente e la temperatura dell'olio.

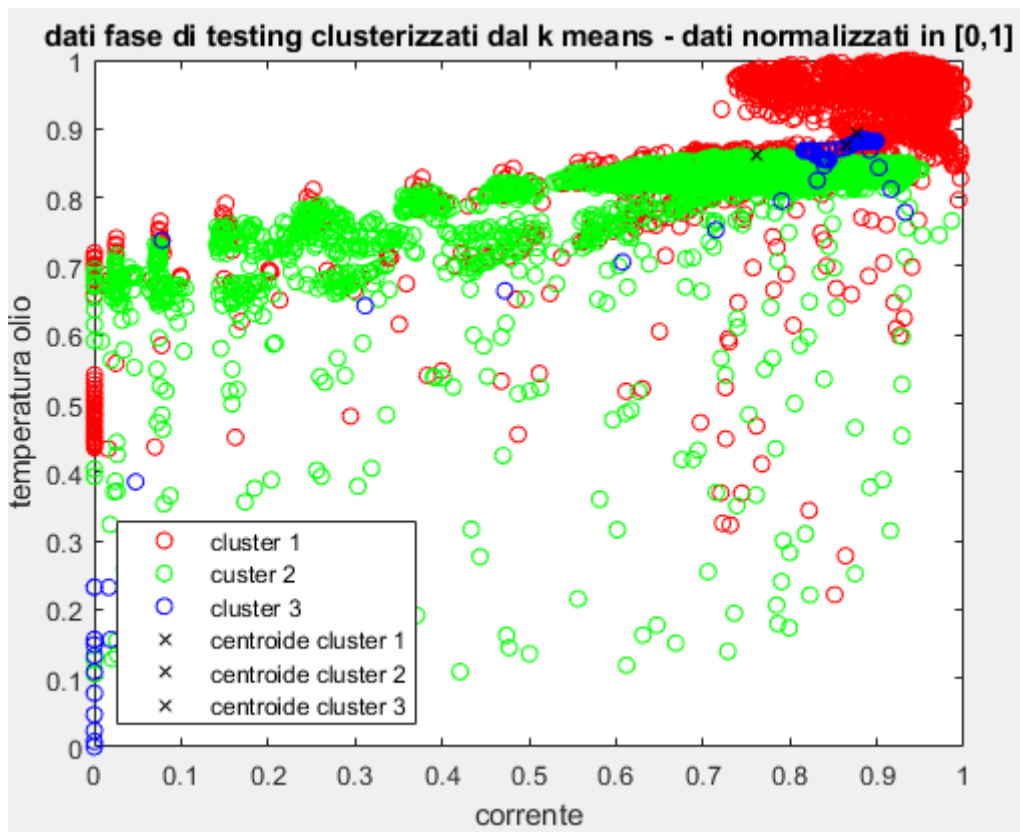


Figura 6.34 dati fase di testing divisi secondo i cluster assegnati dall'algoritmo

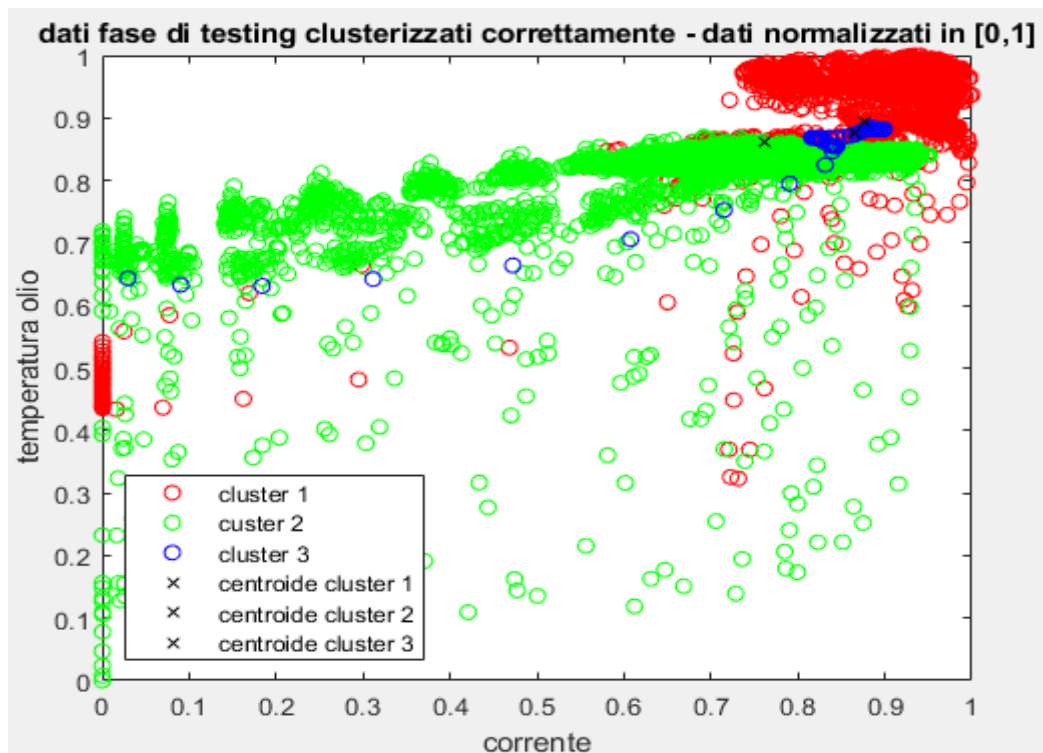


Figura 6.35 dati fase di testing divisi secondo i reali cluster di appartenenza

Come visto anche dai grafici precedenti, ci sono alcuni dati che dovrebbero essere collocati nel secondo cluster e invece vengono collocati nel primo. Inoltre in corrispondenza di valori minimi della corrente e della temperatura dell'olio (valori visibili in basso a sinistra del grafico) ci sono dati che dovrebbero essere messi nel secondo cluster, invece sono collocati nel terzo dall'algorithm. Tuttavia i casi in cui l'algorithm sbaglia sono accettabili rispetto al totale dei dati analizzati e possiamo considerare le performance soddisfacenti.

Proponiamo di seguito tre grafici in cui sono stati analizzati dei dati che fanno inizialmente riferimento a dell'olio nuovo che si degrada mano a mano sempre di più, fino ad arrivare al punto in cui deve necessariamente essere sostituito. La clusterizzazione avviene anche per questi file nello stesso modo in cui è avvenuta con i dati della fase di testing: per ogni campione si calcola la distanza dai tre centroidi e poi si classifica il dato attribuendolo al cluster da cui dista meno.

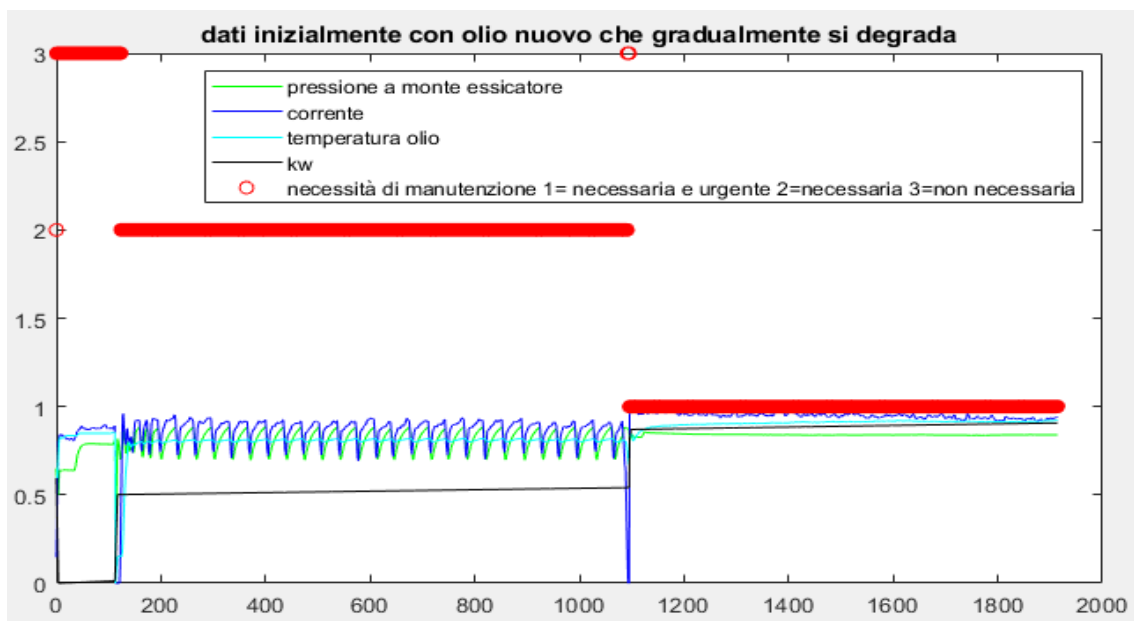


Figura 6.36 dati inizialmente relativi ad olio nuovo che gradualmente si degrada

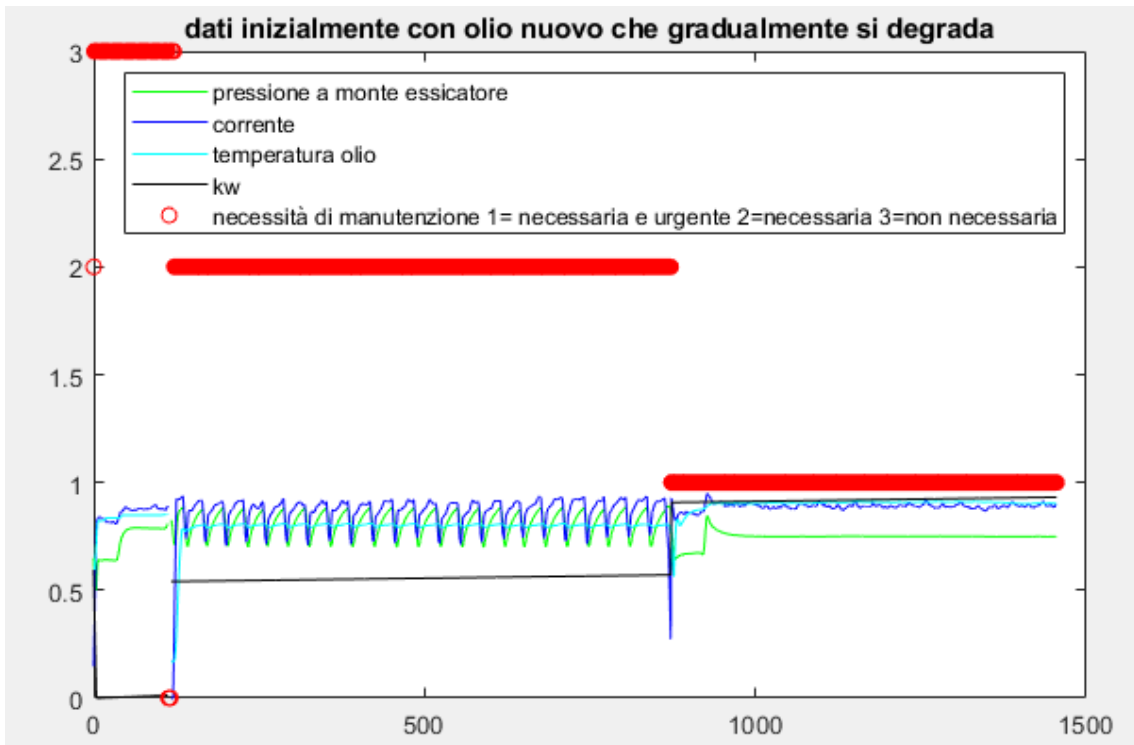


Figura 6.37 dati inizialmente relativi ad olio nuovo che gradualmente si degrada

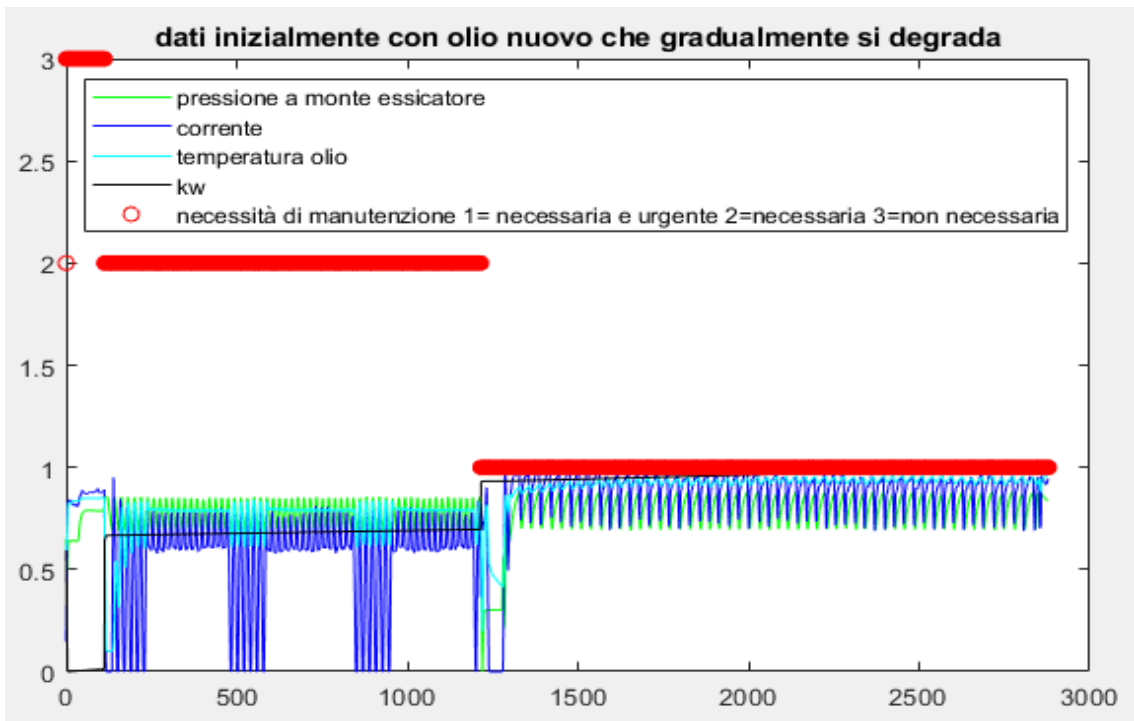


Figura 6.38 dati inizialmente relativi ad olio nuovo che gradualmente si degrada

L'algoritmo riconosce i primi dati come relativi ad olio nuovo e quindi li colloca correttamente nella classe per cui non è necessaria la manutenzione. con il passare del tempo e quindi del degradarsi dell'olio la classe cambia e riconosce i dati come campioni relativi ad un olio che inizia ad essere usurato, la manutenzione in questa seconda fase centrale è necessaria ma non impellente come lo è nella parte finale dove i dati sono relativi ad un olio che deve necessariamente e urgentemente essere sostituito.

I grafici precedenti, forniscono solo delle stime qualitative dei risultati ottenuti, per quantificare l'efficacia della clusterizzazione, si riportano di seguito la matrice di confusione e l'indice di accuratezza.

#### 6.2.4 Matrice di confusione per i dati in fase di testing e calcolo dell'accuratezza

Come fatto per i dati della fase di training, riportiamo anche in questo caso la matrice di confusione e l'indice di accuratezza per avere un'idea chiara e immediata.

112	1	0
33	5442	1387
2	2	3919

Tabella 6.2 matrice di confusione dei dati della fase di testing

I numeri sulla diagonale, che identificano per ogni cluster quanti sono i campioni classificati correttamente, sono molto maggiori rispetto ai numeri fuori diagonale, che invece rappresentano i campioni classificati erroneamente. Si riportano di seguito i valori dell'accuratezza, che ricordiamo è il rapporto tra il numero di dati etichettati correttamente e il numero di dati appartenente ad una certa classe.

Accuratezza dei dati appartenenti al cluster 1 (olio nuovo):

$$112/(112 + 1 + 0) = 0.99 \rightarrow 99\% \text{ di accuratezza}$$

Accuratezza dei dati appartenenti al cluster 2 (olio vecchio):

$$5442/(33+5442+1387) = 0.79 \rightarrow 79\% \text{ di accuratezza}$$

Accuratezza dei dati appartenenti al cluster 3 (olio degradato e ridotto):

$$3919/(2+2+3919) = 0.99 \rightarrow 99\% \text{ di accuratezza}$$

Come nella fase di testing, si hanno risultati ottimi per i dati relativi all'olio nuovo e all'olio degradato e ridotto, mentre per i dati appartenenti al cluster 2 l'algoritmo fatica un po' di più nel riconoscerli, ma in linea di massima i risultati sono accettabili e abbastanza soddisfacenti.



# Capitolo 7

## Conclusioni

In questo capitolo si riassumono i risultati ottenuti, facendo delle considerazioni generali sul lavoro eseguito. Saranno inoltre proposti degli spunti per migliorare e ampliare quanto iniziato in questa tesi. L'obiettivo è quello di progettare un sistema di manutenzione predittiva applicabile ai compressori a vite, a partire dall'analisi dei dati raccolti dal sistema attraverso tecniche di apprendimento non supervisionato. Pur avendo a disposizione i dati etichettati, dato che nella realtà spesso non si dispone di questa informazione, si sviluppa una metodologia che utilizza tecniche non supervisionate. Lo scopo è di attuare politiche di manutenzione predittiva, però avendo a disposizione solo dati sperimentali relativi alla qualità dell'olio circolante nel compressore, ci si è focalizzati sul riconoscimento dello stato del lubrificante. Partendo con un filtraggio preliminare dei dati, questi sono stati normalizzati e poi dati in input al k-means. Il 70% dei dati è stato utilizzato nella fase di training, in cui l'algoritmo è stato addestrato per riconoscere i tre diversi cluster. Il restante 3% dei dati è stato utilizzato nella fase di testing. A partire dai centroidi calcolati nel training, l'algoritmo ha associato ogni dato al cluster il cui centroide avesse distanza minima dal dato considerato. In questo modo, a partire da dati non etichettati si è in grado di riconoscere lo stato di usura dell'olio e di poter pianificare una politica di manutenzione predittiva. Dall'analisi dell'accuratezza delle classificazioni ottenute, possiamo considerare il seguente lavoro una buona base di partenza da cui iniziare per migliorare i risultati ottenuti. In questo lavoro è stato utilizzato un solo algoritmo di apprendimento non supervisionato, il k-means. In ogni caso i risultati ottenuti fanno ben sperare nel fatto che

attraverso algoritmi di clusterizzazione sia comunque possibile applicare strategie di manutenzione predittiva che di solito richiedono l'impiego di algoritmi di apprendimento supervisionato, che per poter dare risultati ugualmente buoni richiedono una mole di dati molto più vasta oltre ad essere molto più complessi.

## Bibliografia

- [1] Normativa europea UNI EN 13306, “Manutenzione – Terminologia di manutenzione”, 2010
- [2] Enciclopedia online Treccani, [www.treccani.it](http://www.treccani.it)
- [3] F.Rossi, “Modellazione Numerica e simulazione di un compressore a doppia vite a secco”, 2016
- [4] M.S. Hancha, “Manutenzione predittiva nei compressori a doppia vite: un caso di studio”, 2019

- [5] A. Mirzal, “Statistical Analysis of Microarray Data Clustering using NMF, Spectral Clustering, Kmeans, and GMM”, 2015
- [6] N. Allegra, “Clustering dei profili di consumo di energia elettrica”, 2018
- [7] Y. Ferlazzo, “Progettazione e sviluppo di una metodologia semi-supervisionata per caratterizzare i cicli di produzione nel contesto dell’industria 4.0”, 2020
- [8] T.S. Kania, “Big data technology for comparative study of K-Means and Fuzzy K-Means algorithms performance”, 2018
- [9] A. Kanawaday, “Machine Learning for Predictive Maintenance of Industrial Machines using IoT Sensor Data”, 2017