



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Gestionale

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche  
(DIISM)

**Sviluppo di un modello di manutenzione predittiva in Matlab  
(Development of a predictive maintenance model in Matlab)**

Relatore:

**Prof. Maurizio Bevilacqua**

Correlatore:

**Prof. Giovanni Mazzuto**

Tesi di laurea di:

**Alessandro Morichetti**

**Anno accademico 2018-2019**



## Sommario

La nascita dell'industria 4.0 avvenne nel 2011 con la presentazione del piano politico tedesco Industrie 4.0 per rinnovare l'industria manifatturiera. Solo poche nazioni, come USA e Giappone, già praticavano politiche simili senza riscuotere grande interesse nella ricerca scientifica ma, con il tempo, sempre più paesi hanno iniziato ad adottare piani per innovare il proprio settore industriale. Al giorno d'oggi, tutti gli stati del primo mondo hanno delle politiche economiche a riguardo. Questa trasformazione è stata definita dalla comunità scientifica come una rivoluzione industriale vera e propria, la quarta per esattezza, per via del profondo cambiamento sulla concezione dell'impianto industriale rispetto al passato.

I principi della trasformazione sono dovuti sostanzialmente alla digitalizzazione e connessione dei dispositivi in modo da ottenere molti benefici: monitoraggio, autonomia, realtà aumentata, analisi, predizioni, simulazioni, gestione degli eventi in tempo reale, collaborazione tra macchine e uomo-macchina ottenendo, in maniera più generica, una ottimizzazione del prodotto finale. Ciò comporta migliori prestazioni dal punto di vista della velocità, qualità, sicurezza e lato economico.

Anche il lavoratore ottiene vari benefici legati all'ausilio di diversi strumenti per la gestione e monitoraggio dell'impianto semplificando il proprio operato e, allo stesso tempo, ottimizzando il risultato finale.

In particolare, si vuole mostrare l'implementazione del lato analisi nell'industria 4.0 tramite l'applicazione della prognostica e della manutenzione predittiva. L'apprendimento automatico applicato alle macchine può ricavare una serie di predizioni che sia aiutano i lavoratori nel prendere decisioni per la gestione dell'impianto sia rendono intelligenti gli apparecchi stessi in maniera tale da ottimizzare il proprio lavoro e diventare il più autonomi possibili. Lo scenario ideale per l'industria 4.0 è la totale autonomia delle macchine; quest'ultime riescono a capire il proprio andamento e, in base a ciò, prendono decisioni per migliorare la produzione, il tutto senza nessun intervento umano.

La seguente tesi ha quindi lo scopo di mostrare il perché questi argomenti stanno diventando sempre più importanti, ricercati e nominati. Nella prima fase si presentano le definizioni, benefici e struttura dei temi accennati sopra. Infine si sperimenta un'applicazione riguardo l'industria 4.0 e la manutenzione predittiva per mostrare una proiezione pratica dei concetti trattati in teoria.

# INDICE

<b>1. Stato dell'arte.....</b>	<b>7</b>
1.1 Obiettivo della tesi.....	7
1.2 Organizzazione della tesi.....	7
1.3 Industria 4.0.....	8
1.4 Prognostics and Helath Management (PHM).....	10
1.5 Rivoluzioni industriali: cause e conseguenze .....	11
1.6 Piano industriale 4.0.....	13
1.7 Internet delle cose (IoT).....	15
1.8 Big data.....	16
1.9 Benefici.....	17
<b>2. Il ruolo della manutenzione.....</b>	<b>19</b>
2.1 Definizione di manutenzione.....	19
2.2 Mission della manutenzione.....	19
2.3 Evoluzione storica dei modelli manutentivi.....	21
2.3.1 La manutenzione a guasto o correttiva.....	22
2.3.2 La manutenzione preventiva.....	23
2.3.3 La manutenzione predittiva.....	24
2.3.4 La manutenzione migliorativa.....	25
2.4 Il ruolo dell'Ingegneria di Manutenzione.....	26
2.4.1 Criteri di progetto della manutenzione.....	28

2.4.2	Indicatori di performance: parametri RAM.....	29
2.4.3	Costi di manutenzione.....	30
2.4.4	Gestione dei ricambi a magazzino.....	31
2.4.5	Miglioramento continuo.....	32
2.4.6	Sistemi informativi di manutenzione.....	32
2.5	Manutenzione predittiva, IoT, KPI e statistica utilizzata.....	33
2.5.1	Cos'è la manutenzione predittiva.....	33
2.5.2	I vantaggi della manutenzione predittiva.....	34
2.5.3	La manutenzione predittiva nell'industria 4.0.....	35
2.5.3.1	Tecnologia IoT.....	35
2.5.3.2	Sensoristica.....	35
2.5.3.3	Software manutenzione predittiva.....	36
2.5.3.4	Misurazione dei KPI manutenzione.....	36
2.5.4	Stima RUL utilizzando modelli di stimatori RUL.....	37
2.5.4.1	Scegliere uno stimatore RUL.....	38
<b>3.</b>	<b>Caso di studio (sviluppo del modello di manutenzione predittiva).....</b>	<b>43</b>
3.1	Descrizione generale dell'impianto bifase aria-acqua.....	43
3.1.1	Misuratori di portata.....	45
3.1.2	Trasduttori di pressione.....	49
3.1.3	Componenti impianto.....	57
3.2	Carta di controllo $T^2$ di Hotelling.....	64
3.3	Sviluppo del modello.....	67

<b>4. Conclusioni.....</b>	<b>74</b>
<b>5. Bibliografia e sitografia.....</b>	<b>77</b>
<b>6. Ringraziamenti.....</b>	<b>78</b>

# 1 Stato dell'arte

## 1.1 Obiettivo della tesi

La tesi si impone di informare il lettore riguardo i temi industria 4.0 e PHM, in particolare:

- Definizione, evoluzione e stato odierno. In questo modo si vuole offrire una panoramica generale sugli argomenti trattati, mostrare il perché questi elementi sono importanti e le loro grandi potenzialità giustificando così il lavoro di tesi.
- Architettura e classico modo di operare. Questa fase dimostra l'unione tra la teoria e la pratica. Vuole mostrare la struttura generale delle applicazioni basate sull'industria 4.0 e manutenzione predittiva. Da ciò si possono apprendere i punti chiave e gli elementi in gioco di un qualsiasi programma in tale ambito ottenendo una proiezione pratica degli argomenti prima trattati solo ad alto livello.
- Applicazione software. Ha l'obiettivo di presentare i risultati pratici dei due temi trattati tramite sviluppo software. Ciò comporta la presentazione del lavoro svolto, la sua organizzazione e il modus operandi usato per arrivare al prodotto finale. Il lettore può così avere un esempio concreto di tutti i benefici e potenzialità esibiti nel corso della tesi.

## 1.2 Organizzazione della tesi

Questo capitolo funge da introduzione. Presenta in modo molto sintetico la struttura e le motivazioni della seguente tesi. Vengono presentate le specifiche iniziali, gli strumenti utilizzati e perché questi sono stati scelti rispetto ad altri. Questa prima parte vuole descrivere gli argomenti che poi verranno trattati nella pratica, la loro evoluzione fino ad arrivare al loro stato odierno e gli elementi di cui sono composti in modo da avere una visione globale su essi. Verranno presentati i concetti di Industria 4.0, Prognostics and Health Management, Internet delle Cose, Big Data e una breve presentazione storica delle rivoluzioni industriali che si sono succedute negli ultimi secoli fino ad arrivare ai nostri giorni.

Si continua nel secondo capitolo parlando del ruolo della manutenzione nell'Industria 4.0. Viene descritta l'evoluzione storica dei modelli manutentivi e illustrati i criteri di progetto della manutenzione. Vengono presentati gli indicatori di performance dei modelli manutentivi, i costi di manutenzione e la gestione dei ricambi a magazzino. Infine, si introducono alcuni concetti relativi al miglioramento continuo e ai sistemi informativi di manutenzione.

Il terzo capitolo descrive il lavoro svolto riguardante la manutenzione predittiva. Vengono descritti i procedimenti percorsi per arrivare alla soluzione finale descrivendo l'acquisizione dei dati, la loro analisi e i modelli predittivi utilizzati. Si presenta il

modus operandi definitivo per il lavoro svolto. Viene presentata la sua architettura e tutti i settori da cui è composta partendo dall'impianto fino ad arrivare all'interfaccia grafica. In seguito si propone una soluzione per integrare la parte di manutenzione predittiva descritta nel capitolo precedente con la struttura appena presentata.

L'ultimo capitolo riassume i risultati ottenuti durante tutto il lavoro di tesi. Si avanzano commenti su come il prodotto ottenuto potrebbe venir ampliato e migliorato in futuro e si traggono le conclusioni.

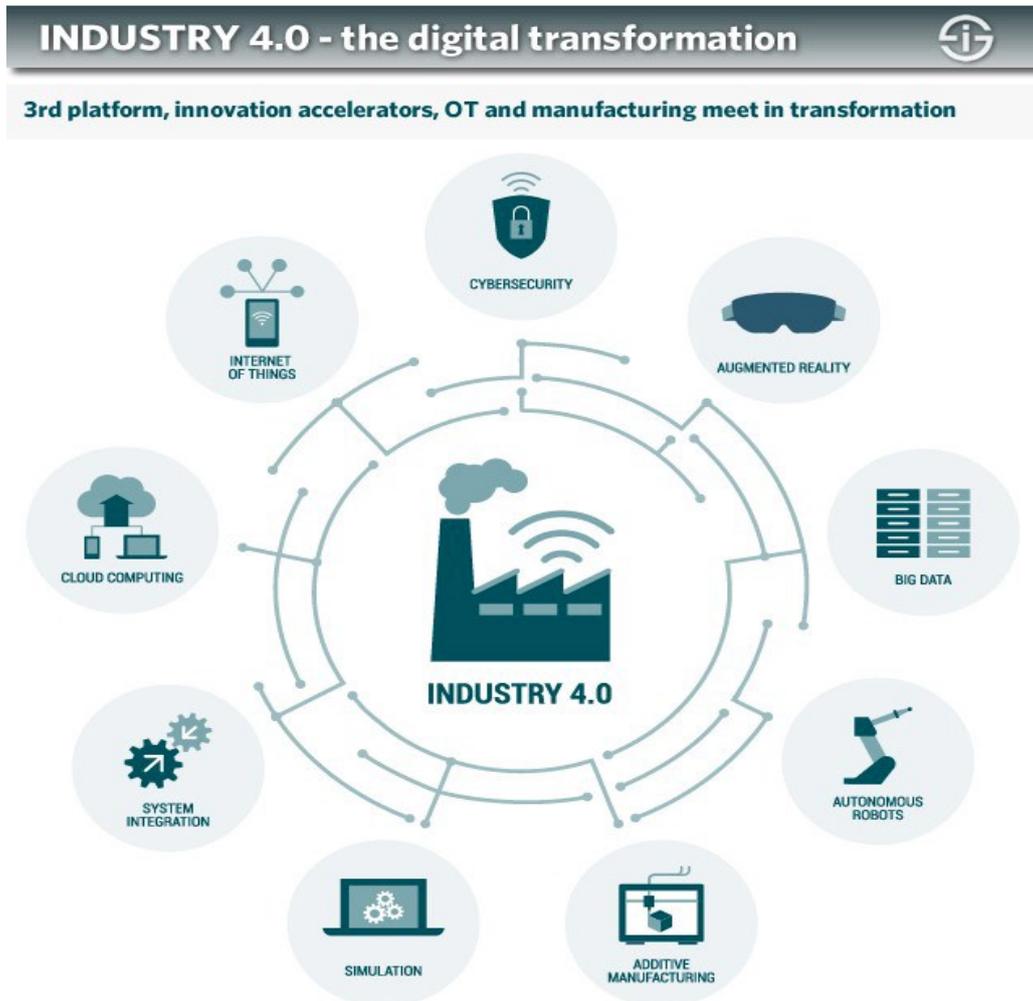
## **1.2 Industria 4.0**

L'industria 4.0 deriva da un'iniziativa politica tedesca iniziata nel 2011 chiamata Industrie 4.0. Questa ha l'intento di cambiare il metodo di lavoro negli impianti industriali, in particolare manifatturieri, grazie all'applicazione di nuove tecnologie, alcune già diffuse in altri settori, in modo da ottenere migliori prestazioni. Il cambiamento non solo dei mezzi utilizzati ma del modus operandi ha portato ad identificare in esso la nascita della quarta rivoluzione industriale.

Le trasformazioni che vengono apportate sono legate principalmente alla digitalizzazione e connessione degli attori in gioco. Dal primo fattore deriva principalmente il beneficio di monitorare l'intera catena di montaggio, è così possibile ottimizzare ogni passaggio dall'inizio al risultato finale consci del comportamento di qualsiasi dispositivo. La connessione fornisce a tutti gli strumenti una conoscenza globale del lavoro e una collaborazione che prima non erano possibili perciò, nel passato, questo elemento doveva essere gestito da un ente terzo ovvero un operaio. L'unione tra digitalizzazione e connessione permette di ottenere un sistema autogestito e ottimizzato, aperto verso big data, analisi ed apprendimento automatico, dove l'umano è rilegato a competenze meno pratiche ma più tecniche con il compito di prendere decisioni che per la macchina sono troppo difficili. Allo stesso tempo i lavoratori possono sfruttare diversi strumenti che lo aiutino a gestire il proprio lavoro al meglio, per esempio applicazioni software per la visualizzazione del comportamento dei macchinari. Naturalmente l'industria 4.0 è un sistema molto più complesso di quanto appena descritto e offre benefici e potenzialità in continua espansione.

L'industria 4.0 è la trasformazione digitale delle industrie, in particolare nell'ambito manifatturiero, che si basa sulla raccolta e utilizzo delle informazioni legate a persone, processi, servizi, sistemi e macchinari in modo da realizzare un ecosistema intelligente (smart) generando innovazione e collaborazione. In chiave più generica definisce l'evoluzione in ambito industriale avuta dal 2011 a oggi verso una maggiore informatizzazione e utilizzo di dispositivi collegati tra loro. In realtà non esiste una definizione canonica. Questa è basata sull'uso di tecnologie dette sistemi ciberfisici, o cyber-physical systems (CPS). Dei protagonisti principali della sua attuazione sono i

dispositivi Internet delle cose (IoT) che permettono la collaborazione all'interno di un'unica grande struttura da parte di mezzi come macchine industriali, database, smartphone, tablet, sensori e attuatori sfruttando concetti come big data, rete Internet, intelligenza artificiale e analisi dati.



*Figura 1. Sguardo generico all'Industria 4.0*

In senso pratico, l'industria 4.0 è il completo controllo del ciclo produttivo industriale, l'evento che tutti i dispositivi siano collegati e i loro comportamenti siano costantemente immagazzinati e monitorati porta ad una gestione che sarebbe impossibile per un lavoratore umano. Il fatto che le macchine siano costantemente connesse e il salvataggio minuzioso delle informazioni riguardo i loro comportamenti apre ad innumerevoli benefici quali controllo remoto, tracciabilità, manutenzione predittiva, analisi del funzionamento, applicazioni in tempo reale, aggiornamenti facili e veloci, monitoraggio. I punti cardini sono quindi la raccolta informazioni e la connessione tra i dispositivi le quali rendono il lavoro utile finale molto maggiore rispetto alla somma del risultato di tutti i singoli dispositivi. Altro aspetto importante è la personalizzazione, in questo modo si può uscire dal formato standard dell'industria e creare un'architettura e metodo di lavoro ottimizzato per i propri obiettivi. Ciò ha

portato all'applicazione dello stesso principio anche in molti diversi ambiti come settore sanitario, farmaceutica, urbanistica, statistica, automobilismo e altri. Possiamo quindi dedurre che l'industria 4.0 è un concetto molto vasto che ancora non ha fissato i suoi limiti ma, anzi, ha un grande potenziale e punta ad espandersi ulteriormente nel futuro. Per avere un'idea generale degli aspetti trattati, guardare la Figura 1.

### **1.3 Prognostics and Health Management (PHM)**

Il lato analisi nell'ambito industria 4.0 si basa sulla disciplina della Gestione della prognostica e salute, meglio conosciuta come Prognostic and health management (PHM). Il suo obiettivo principale è effettuare previsioni su un certo evento futuro. In particolare si cerca di presagire anomalie, fallimenti, qualità del lavoro e comportamenti non ordinari di un generico dispositivo. Nel caso in cui si cerchi di prevedere i prossimi fallimenti in modo da schedare al meglio le manutenzioni, si entra nel campo della manutenzione predittiva. Sempre più settori come industriale, aerospaziale, automobilistico stanno adottando questo approccio per diversi motivi, per esempio si può indovinare il guasto di un prodotto, prevedere la durata di vita di una batteria oppure riconfigurare una sonda spaziale in base alle previsioni sulla sua salute. La conoscenza anticipata di un particolare evento porta molti benefici quali sicurezza del sistema applicato, affidabilità, corretto funzionamento, qualità del prodotto finale, ottimizzazione del tempo e delle risorse, risparmio economico. Un elemento su cui si pone spesso grande interesse è il Tempo di vita rimanente utile, solitamente riconosciuto come Remaining useful time (RUL), che identifica quante unità di tempo o cicli macchina rimangono ad un dispositivo prima che questo subisca un fallimento; di conseguenza le manutenzioni vengono schedate al meglio grazie alla conoscenza del futuro. Le previsioni sono dedotte attraverso lo studio degli errori passati (diagnostica) in modo da trovare un'impronta ridondante nel tempo per trarre deduzioni su ciò che accadrà (prognostica). Conseguenza diretta della conoscenza sugli eventi futuri di un certo strumento, l'uomo prende provvedimenti per migliorare la sua efficienza ottimizzando le prestazioni, ciò può essere applicato ad ogni macchinario all'interno di un impianto industriale. La PHM sta venendo sempre più utilizzata grazie alla continua digitalizzazione dei prodotti, quest'ultimi sono sempre più elettronici e ricchi di sensori in modo da poter essere analizzati secondo determinati parametri rendendo così possibile un loro monitoraggio. Questa disciplina può essere applicata in tempo reale o offline, il primo caso avviene solitamente per sistemi dove si vuole garantire sicurezza e quindi in caso di fallimento previsto si deve subito avvisare un umano incaricato, il secondo scenario si implementa se si vogliono ottenere predizioni più accurate ma esse non vengono subito riportate poiché si aspetta di raccogliere una maggiore quantità di dati per ottenere di conseguenza un'affidabilità migliore del proprio output.

La Prognostics and Health Management è la disciplina che si occupa del comportamento e stato di un qualsiasi dispositivo. Analizzando l'andamento di un apparecchio, è possibile migliorare, monitorare e gestire la sua affidabilità, disponibilità, sicurezza e manutenzione. Tutto ciò, applicato a livello industriale, comporta un miglioramento delle prestazioni totali dell'impianto ottenendo, di conseguenza, un maggior sfruttamento economico delle risorse disponibili. Grazie all'utilizzo di diagnosi e prognosi, è possibile studiare la storia passata di un determinato oggetto e, in base ad essa, effettuare delle predizioni nel futuro grazie alle quali possono esser prese decisioni molto migliori proprio per il fatto di avere una visione su ciò che accadrà. Un esempio è la manutenzione predittiva, attraverso la sua applicazione si può predire il prossimo fallimento di una macchina in modo da ottimizzare le manutenzioni e ottenere i benefici elencati che verranno elencati nel seguito. Infatti, per il momento, è solitamente l'uomo a dover interpretare e sfruttare l'analisi ottenuta dalla PHM ma si sta cercando di fare in modo che le macchine prendano autonomamente decisioni sempre più complesse in modo da non necessitare aiuti esterni.

#### **1.4 Rivoluzioni industriali: cause e conseguenze**

Per capire le motivazioni e le cause che hanno portato all'industria 4.0 bisogna ricapitolare le ragioni storiche delle precedenti rivoluzioni industriali:

- Prima rivoluzione industriale. Avvenne nella seconda metà del 1700 in Inghilterra e interessò principalmente il settore tessile e metallurgico. Ciò trasformò un sistema economico che era storicamente composto da agricoltura, artigianato e commercio a uno basato sull'industria caratterizzato dall'uso di macchine prima azionate tramite forza meccanica (telaio) e poi grazie all'invenzione del motore a vapore (macchina a vapore). Non esistono delle cause specifiche per questo avvenimento ma si deve guardare alla somma di diversi fattori. Alcuni tra i motivi sono: una classe agricola non molto forte come in altri paesi, una società borghese ormai consolidata arricchitasi tramite il commercio, la ricchezza e forza del paese dovute al fatto di essere una potenza commerciale e militare, l'aumento della popolazione e quindi della richiesta. Le conseguenze furono la creazione del capitalismo e della classe operaia.
- Seconda rivoluzione industriale. Ebbe luogo nell'Europa occidentale durante la seconda metà del 1800. Le sue cause sono dovute principalmente al progresso scientifico avvenuto in quel periodo storico che portò a varie invenzioni applicabili all'industria e, nella vita comune, generò condizioni di vita migliori. In particolare, le scoperte che più influenzarono questa rivoluzione furono il petrolio e l'elettricità dalle quali si diramarono una serie di altre invenzioni.

Tantissime discipline ebbero il loro splendore: la medicina intraprese moltissime scoperte e cure ad antiche malattie quali tubercolosi, peste, lebbra, malaria, furono migliorate le situazioni igienico-sanitarie, la scoperta dell'acciaio comportò un grande sviluppo ferroviario e navale, le telecomunicazioni ebbero la nascita del telegrafo e poi del telefono. L'approccio dei lavoratori all'industria e al lavoro fu radicalmente cambiato ed ottimizzato da Taylor e Ford, principi che valgono tutt'oggi. Si ha la creazione di vere e proprie grandi industrie.

- Terza rivoluzione industriale. Si realizzò nella seconda metà del 1900 (secondo dopoguerra) nei paesi del primo mondo. Il suo sviluppo fu causato da: crescita delle conoscenze scientifiche e tecnologiche nate durante le guerre mondiali per scopi bellici e poi nel dopoguerra (per esempio, la rete ARPANET, divenuta poi Internet, da parte del dipartimento della difesa degli Stati Uniti), crescita economica grazie alla ricostruzione post-bellica, scoperta e sfruttamento dell'energia atomica. Per Stati Uniti e Unione Sovietica parte la corsa allo spazio aprendo nuove conoscenze su un campo ancora poco conosciuto. Le invenzioni che più hanno determinato la rivoluzione sono state quelle in campo informatico, elettronico e telematico: transistor, microprocessori, radio, Internet e poi Web hanno portato un considerevole impatto con un'evoluzione esponenziale nel tempo. Si ha la creazione di multinazionali e il fenomeno della globalizzazione.
- Quarta rivoluzione industriale o industria 4.0. Questa si sta sviluppando da circa il 2011 ed è ancora in corso, nata in Germania ma subito diffusa nei paesi del primo mondo. È strettamente legata alla rivoluzione precedente ma, al contrario degli altri casi, non è sostanzialmente basata su nuove invenzioni e scoperte del periodo ma il fulcro è un'evoluzione e perfezionamento di prodotti già esistenti. Per esempio, il lato big data costituisce un elemento importante dell'architettura 4.0 ma questa è solo una particolare applicazione di una base di dati, stesso discorso per Internet applicato a diversi dispositivi anziché unicamente a terminali appositi. Quindi più che invenzioni si ha un corretto sfruttamento, collegamento e miglioramento di mezzi già applicati nella terza rivoluzione industriale e la generazione di nuove idee e metodi di lavoro applicate ai lavoratori e al modo di gestire lo stabilimento. Le cause non sono quindi da ricercare in qualcosa di fisico ma, in modo generico, nel fenomeno di digitalizzazione. Conseguenze di quest'ultima, applicate ora all'industria, sono la continua connessione di tutti i dispositivi, l'acquisizione e salvataggio costante di dati e informazioni. La creazione di programmi per l'utilizzo e il monitoraggio delle macchine porta ad una più facile gestione dell'impianto, in questo modo può essere aumentata la sua complessità, cosa che prima non era possibile a causa della limitatezza umana. I lavoratori non devono più svolgere grandi impieghi manuali ma sono richieste conoscenze più tecniche riguardo le macchine e il funzionamento dei vari dispositivi forniti dall'azienda.

Possiamo quindi sintetizzare che l'industria 4.0 non è la conseguenza diretta di invenzioni e scoperte come avvenuto nel passato ma è dovuta al fenomeno digitale. La seguente tabella mette a confronto le varie rivoluzioni industriali.

Rivoluzione industriale	Industria	Caratteristiche	Conseguenze
<b>Prima rivoluzione industriale</b> - Inghilterra (1750 - 1850)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trasporti</li> <li>• Macchina a vapore di James Watt(1765)</li> <li>• Metallurgia</li> <li>• Industria tessile</li> <li>• Ingegneria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abolizione schiavitù</li> <li>• Persone migrano nelle grandi città</li> <li>• Specializzazione</li> <li>• Nuove tecnologie</li> <li>• Capitalizzazione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Urbanizzazione</li> <li>• Aumento della popolazione</li> <li>• Miglioramento della vita</li> <li>• Rivoluzione sociale</li> </ul>
<b>Seconda rivoluzione industriale</b> - Gran Bretagna, Germania, USA (1870 - 1914)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingegneria</li> <li>• Telecomunicazioni</li> <li>• Industria chimica</li> <li>• Industria navale</li> <li>• Gestione aziendale</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carbone (basso costo)</li> <li>• Elettricità</li> <li>• Produzione di massa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ferrovie</li> <li>• Produzione di ferro e acciaio</li> <li>• Produzione di massa</li> <li>• Ampio uso dei macchinari</li> <li>• Produzione di carta e gomma</li> <li>• Fertilizzanti</li> </ul>
<b>Terza rivoluzione industriale</b> - Paesi del primo mondo (circa 1960 - 2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trasporti</li> <li>• Informatica</li> <li>• Elettronica</li> <li>• Ambito medico</li> <li>• Ingegneria genetica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manifattura digitale</li> <li>• Nuovi processi</li> <li>• Software</li> <li>• Nuovi materiali</li> <li>• Robot con movimenti agili</li> <li>• Trasporti con minori emissioni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produzione di massa</li> <li>• Produzione in paesi a basso costo di manodopera</li> <li>• Richiesta di lavoratori con specifiche competenze</li> <li>• Energia rinnovabile</li> </ul>
<b>Quarta rivoluzione industriale</b> - Germania (dal 2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tutti i tipi di industria</li> <li>• Tutti i tipi di economia</li> <li>• Molte discipline</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Digitalizzazione</li> <li>• Internet</li> <li>• Nuove tecnologie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aziende digitali</li> <li>• Intelligenza artificiale</li> <li>• Problema della disoccupazione causata dalla sostituzione uomo-macchina</li> </ul>

Tabella 1. Rivoluzioni industriali

## 1.5 Piano Industria 4.0

Il termine Industria 4.0 è la traduzione dal tedesco di Industrie 4.0. Questo è il nome di un'iniziativa strategica nazionale nata in Germania grazie al Ministero dell'educazione e ricerca (BMBF) e il Ministero degli affari economici ed energia (BMWi), il vocabolo è poi diventato famoso poiché utilizzato durante l'evento Hannover Messe del 2011. Il piano ha una durata prevista di 10-15 anni ed ha avuto inizio nell'anno 2011 con l'obiettivo di non adagiare l'industria tedesca all'immobilità ma renderla dinamica nonostante essa fosse già leader nel settore.

Per esso è stato stanziato un fondo di 200 milioni di euro. Industrie 4.0 era stato inizialmente pensato unicamente per l'ambito manifatturiero infatti il suo focus era, a grande livello, assicurare il futuro dell'industria manifatturiera tedesca ma lo stesso concetto è stato trasposto a vari altri settori.

La Germania fu influenzata dalla concorrenza statunitense che iniziava, anche se timidamente, a proporre incentivi riguardo l'Advanced manufacturing, la quale aveva concetti simili all'industria 4.0, e portò quindi il paese tedesco a doversi innovare per non essere sorpassato in un campo in cui era sempre stato leader mondiale. Perciò bisognava attuare una doppia strategia: da una mano doveva mantenere l'egemonia già consolidata, dall'altra era necessario adottare nuovi sistemi ciberfisici in modo da prepararsi al cambiamento e creare un nuovo tipo di mercato diverso da quello, ormai classico e ben definito, dell'industria 3.0. Puntando sulla ricerca, la Germania riuscì a sintetizzare in otto punti chiave i principi di questa nuova gestione industriale:

- 1- Standardizzazione e architettura di riferimento. Realizzazione di ambienti standard per determinati scenari, in questo modo è possibile partire da una solida base per la generazione di un impianto industriale di un qualsiasi tipo senza dover studiare ogni volta la soluzione base.
- 2- Gestione di sistemi complessi. Le macchine utilizzate migliorano con il tempo la loro efficienza ma anche la loro complessità, per questo è necessario istruire ed aiutare i lavoratori in modo da gestire un aumento della difficoltà. Oltretutto è bene associare a queste macchine altri strumenti o programmi per semplificare la loro fruizione.
- 3- Connessione a banda larga. Fornisce un efficiente accesso a qualsiasi informazione grazie a Internet e migliora enormemente le comunicazioni.
- 4- Sicurezza. Con ciò si intende sia sicurezza fisica per i lavoratori e l'ambiente in cui si lavora sia sicurezza informatica dei dati usati e generati dalle varie macchine. I sistemi devono quindi essere progettati già con i requisiti di protezione necessari (security by design). È importante informare i dipendenti riguardo le pratiche per la tutela della loro stessa persona e dei dati trattati.
- 5- Organizzazione del lavoro e progettazione. Essendo che le macchine aumentano la loro autonomia, i lavoratori sono portati a compiere meno sforzi fisici però svolgono un ruolo orientato al controllo dello stato dell'impianto e quindi si

fanno carico di responsabilità. Ciò comporta anche una maggiore possibilità di crescita.

- 6- Istruzione e sviluppo professionale. Questo punto chiave è strettamente associato a quello precedente, i compiti svolti dal lavoratore mutano profondamente passando da un approccio nettamente manuale a uno prevalentemente mentale e conoscitivo. È necessario che il dipendente sia istruito e aggiornato costantemente sul suo campo di professione.
- Piano legislativo. L'azienda deve essere in ordine con le leggi e l'attuale legislazione. Ciò comporta un trattamento adeguato dei dati, del personale, degli accessi, delle condizioni di lavoro, eccetera. Tutto ciò deve essere applicato e monitorato sia nel lato pratico che burocratico.
- Efficienza delle risorse. Questo comporta da un lato la salvaguardia dell'ambiente dato dal minore inquinamento, dall'altro versante un risparmio economico dovuto alla riduzione delle materie prime necessarie per svolgere un determinato lavoro.

## **1.6 Internet delle cose (IoT)**

L'Internet delle Cose è un paradigma secondo il quale ogni dispositivo come sensori, attuatori, smartphone, eccetera sono connessi tra loro e interagiscono per un obiettivo comune. Il punto cardine è che, grazie alla collaborazione tra gli elementi nella rete, si ottiene un risultato migliore della somma dei risultati ottenuti singolarmente. Pian piano lo stesso concetto si sta diffondendo anche nell'ambiente domestico con oggetti come frigoriferi, televisioni, condizionatori, lampade, telecamere per la sicurezza, i quali ora possono essere regolati tramite un qualsiasi smartphone.

Lo stesso concetto si applica attraverso l'industria 4.0, tutte le macchine sono connesse all'intero sistema, scambiano informazioni tra loro ottimizzando la collaborazione, possono essere monitorate e gestite facilmente dai lavoratori tramite cellulari o tablet e, grazie a tutti i benefici precedenti, ricavano una produzione migliore sotto vari aspetti. La vera rivoluzione non è dovuta alla potenza di calcolo e alla connessione Internet in sé ma al fatto che ciò sia possibile in qualsiasi oggetto anche di ridotte dimensioni. Ciò apre i benefici di big data, analisi, diagnostica, collaborazione, monitoraggio, comunicazione che prima non erano possibili a questo livello. La connessione Internet di questi dispositivi comporta però un rilevante problema: la sicurezza.

Nella Figura 2 è raffigurata l'architettura IoT. A livello inferiore si trova il dispositivo vero e proprio composto da software e hardware, entrambi servono per fornire i servizi principali dell'oggetto e la scheda di rete per la connessione. Nel mezzo invece troviamo la connettività attraverso la rete, essa unisce il mezzo IoT con il cloud rendendo possibili i benefici del lato superiore. Al vertice troviamo il cloud che fornisce vari vantaggi: gestione del dispositivo, comunicazione macchina-macchina e uomo-macchina, analisi e apprendimento automatico. I campi di sicurezza,

integrazione con i sistemi aziendali e sorgenti esterne percorrono completamente l'altezza dell'architettura, infatti tutti e tre i settori orizzontali descritti precedentemente devono implementarli.

## 1.7 Big data

I big data non sono caratterizzati unicamente, come suggerirebbe il nome, da una mole di dati ma anche da una struttura non prefissata ed eterogenea. Per questo motivo sono difficili da trattare con i classici database relazionali ma hanno bisogno di tecniche più flessibili, solitamente NoSQL. Oltretutto sono frequentemente associati ad analisi in tempo reale quindi la velocità di elaborazione è rilevante, a maggior ragione è bene adottare nuove metodologie che garantiscano un'attesa minima; il compito non è di semplice soluzione vista la loro quantità e disomogeneità. I big data vengono spesso definiti tramite le tre "V" che, con il passare del tempo e a seconda del testo in analisi, sono diventate quattro o cinque. Il primo che diede questa designazione fu l'azienda Gartner enunciando le dimensioni volume, velocità e varietà. La quarta, veracità, fu aggiunta da IBM. La quinta, valore, può cambiare a seconda del testo in esame (a volte questa è definita come la somma di tutti i punti chiave precedenti).

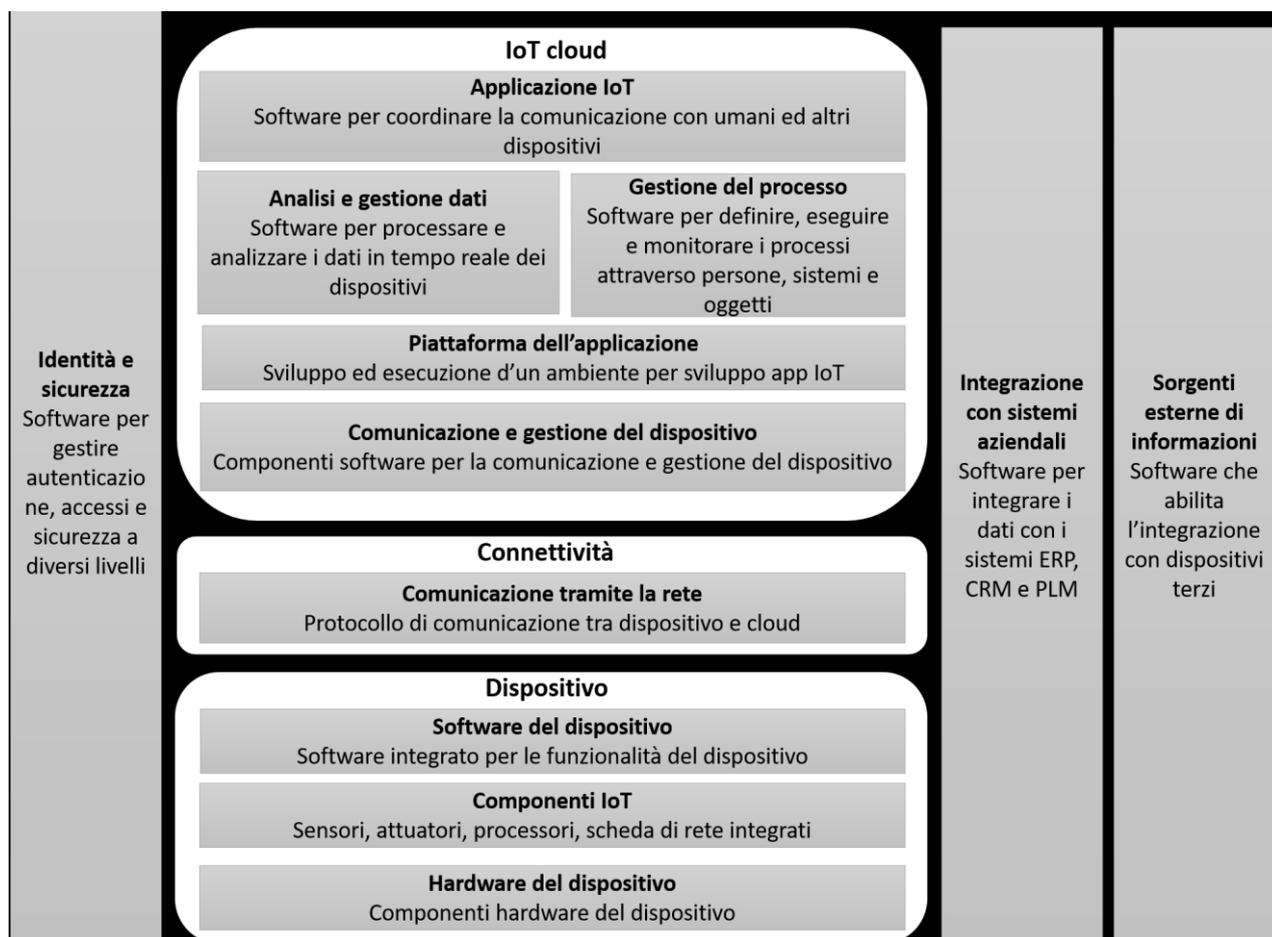


Figura 2. Architettura Internet delle cose

Ecco le cinque "V" a cui si è arrivati oggi:

- **Volume.** La quantità di dati prodotti ed immagazzinati cresce con un rateo sempre maggiore. Alcuni indicano i dati come "big" se oltrepassano in dimensione totale un terabyte o petabyte ma non si ha una soglia convenzionale per passare a dati "normali" a "grandi". Ciò comporta problemi sia a livello hardware (costo della memoria) sia software (algoritmi lenti per input di certe dimensioni).
- **Varietà.** I dati sono di diverso tipo e provengono da sorgenti differenti. Questi possono essere strutturati, semi-strutturati o senza struttura quindi bisogna riuscire ad integrare tutte e tre le classificazioni per trarne informazioni. Per esempio i sensori possono produrre: testo, dati web, audio, video, file di log, tweet, eccetera.
- **Velocità.** La frequenza con cui i dati devono essere creati, processati ed analizzati aumenta sempre di più. In alcuni casi è richiesta un'analisi in tempo reale, è quindi logico diminuire la latenza al minimo.
- **Veracità.** Si intende l'affidabilità dei dati. Questa è importante perché da essa deriva la qualità delle previsioni ricavate dalla fase di analisi. È quindi importante pulire i dati, usare sensori adatti ed eliminare il rumore.
- **Valore.** Una volta ottenuti tutti i dati secondo i principi appena enunciati, è necessario estrarre informazioni utili. Il concetto è rispondere alla domanda "Quali valori e risultati posso ricavare?". La risposta va ricercata tramite un lavoro di analisi. Un esempio è l'autoapprendimento e autonomia delle macchine che imparano dal proprio passato e dalla comunicazione con altri dispositivi.

## 1.8 Benefici

Siccome l'industria 4.0 è principalmente dovuta alla digitalizzazione, i suoi benefici sono una conseguenza diretta del mondo digitale. Ecco un elenco dei principali vantaggi:

- **Aumento della produttività** dovuto all'ottimizzazione e automazione. È il beneficio che più spunta all'occhio. Ciò è la conseguenza di diversi aspetti: risparmio di tempo e materiale, aumento del prodotto, riduzione degli sprechi, prevenzione di errori e ritardi, ottimizzazione del macchinario in base alle condizioni del momento eccetera.
- **Eventi in tempo reale.** Le macchine, in base al contesto in cui si trovano al momento, modificano il loro modo di operare ottimizzando varie caratteristiche quali velocità di produzione, risparmio energetico, qualità del risultato. Ogni singolo evento migliorato non comporta una grande utilità ma quest'ultima è guadagnata dalla somma di tutti i vantaggi ottenuti.
- **Continuità della macchina** grazie alla manutenzione predittiva e monitoraggio. Parte del tempo perso (e quindi guadagno economico perso) nella produzione è

- causato dai fallimenti delle macchine che devono così rimanere ferme fino all'attività di manutenzione. Predire la rovina di un dispositivo comporta una miglioria sul tempo di lavoro dell'impianto grazie a manutenzioni mirate.
- Migliore qualità del prodotto finale. Il monitoraggio del comportamento di un macchinario garantisce controllo e predizione della qualità. Questo beneficio è uno dei più ricercati, in particolare secondo la mentalità della terza rivoluzione industriale.
  - Migliori condizioni di lavoro e sostenibilità. I lavoratori sono aiutati da diversi strumenti durante i loro compiti e hanno in carico meno attività fisiche. Il monitoraggio delle macchine aumenta la sicurezza dell'impianto e, di conseguenza, dei suoi frequentatori. L'utilizzo di materiali naturali o meno pericolosi diminuisce il rischio di malattie nel lungo periodo.
  - Aumento della flessibilità. La stessa capacità dei servizi informatici riguardo scalabilità e flessibilità viene trasposta nell'ambito industriale. In questo modo è possibile avere più livelli indipendenti tra loro ma interconnessi allo stesso tempo e lavorare in fasce più o meno basse. Allo stesso tempo ci si può adattare alle diverse situazioni senza particolari problemi.
  - Personalizzazione. Ciò va a coprire una richiesta che tende ad aumentare nell'ultimo periodo: sia persone che aziende preferiscono un oggetto il più adatto possibile ai propri gusti ed esigenze. Però l'industria, nella terza rivoluzione industriale, era molto standardizzata poiché si puntava a migliorare la produzione, per questo motivo elaborare uno stesso prodotto con leggere modifiche comportava costi notevoli. L'industria 4.0 è invece molto più flessibile rispetto al passato rendendo le modifiche nella catena di montaggio molto più facili da applicare.
  - Sviluppo di modelli di ricavo innovativi. L'industria 4.0 apre a nuovi tipi di economia e quindi di guadagno. In questo modo si riesce ad essere competitivi con le altre aziende e proporre il proprio prodotto in maniera più accattivante per investitori e clienti.

## **2 Il ruolo della manutenzione**

### **2.1 Definizione di manutenzione**

Nel contesto industriale al concetto di utilizzo di un impianto si associa immediatamente quello della sua manutenzione.

L'azione del tempo e l'utilizzo logorano gli impianti causando una caduta dell'efficienza tecnica, rispetto a condizioni ottimali, e creando obsolescenza tecnologica.

Per garantire il corretto funzionamento dell'impianto durante il suo intero ciclo di vita, occorre effettuare interventi manutentivi rivolti ad assicurare che l'evoluzione del sistema in esame sia coerente con quanto definito durante la sua progettazione.

La disciplina manutentiva-conservativa è un'area di studi, ricerche e prassi operative e gestionali di primaria importanza, in un contesto come quello industriale, nel quale è necessario pianificare le attività per garantire la sicurezza delle persone e la disponibilità degli impianti.

La Commissione Manutenzione dell'UNI, nella norma EN 10336, definisce la manutenzione come "la combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, incluse le azioni di supervisione, previste durante il ciclo di vita di un'entità e destinante a mantenerla o riportarla in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta".

In termini aziendali significa assicurare la disponibilità degli impianti al minimo costo, realizzando le attività necessarie di natura tecnica ed organizzativa, che si esprimono nell'esecuzione pratica degli interventi, e gestionale, attraverso la consuntivazione degli stessi interventi.

La manutenzione, se concepita ed attuata in modo corretto, costituisce una funzione indispensabile per ogni tipo di sistema produttivo, permettendo di:

- minimizzare le fermate per guasti;
- garantire il funzionamento delle macchine nelle condizioni ottimali;
- contribuire ad aumentare l'efficienza del sistema produttivo;
- effettuare le attività con la massima economicità;
- conservare il patrimonio impiantistico industriale per la sua intera vita utile;
- contribuire a garantire la sicurezza delle persone e la tutela ambientale.

### **2.2 Mission della manutenzione**

Di norma alla funzione manutentiva si associa un ruolo esclusivamente tecnico, di mantenimento, servizio e riparazione dei sistemi produttivi.

Come riporta Albert H.C. Tsang, con questa concezione aziendale la manutenzione è concepita come un centro di costo, che non porta alcun valore aggiunto alla produzione e deve pertanto essere ridotto. È una visione non coerente con la realtà, poiché la manutenzione ha un ruolo strategico nella progettazione e nella conservazione degli impianti nel corso della loro vita utile.

Negli ultimi decenni la concezione della manutenzione si è profondamente evoluta e rinnovata, orientandola ad un ruolo sempre più complesso e centrale nel processo produttivo. Si è cioè trasformata, in termini di mission, da attività prevalentemente operativa di riparazione e fonte di costi, senza valore aggiunto al prodotto finito, ad un complesso sistema gestionale orientato a prevenire i guasti ed al miglioramento continuo. Si tratta di un passaggio che implica un considerevole mutamento culturale del management e del servizio di manutenzione in particolare.

Analizzando attentamente l'insieme delle attività manutentive che vengono effettuate, possiamo constatare che ciascuna di esse può essere classificata come appartenente ad una delle aree che vengono identificate da due variabili:

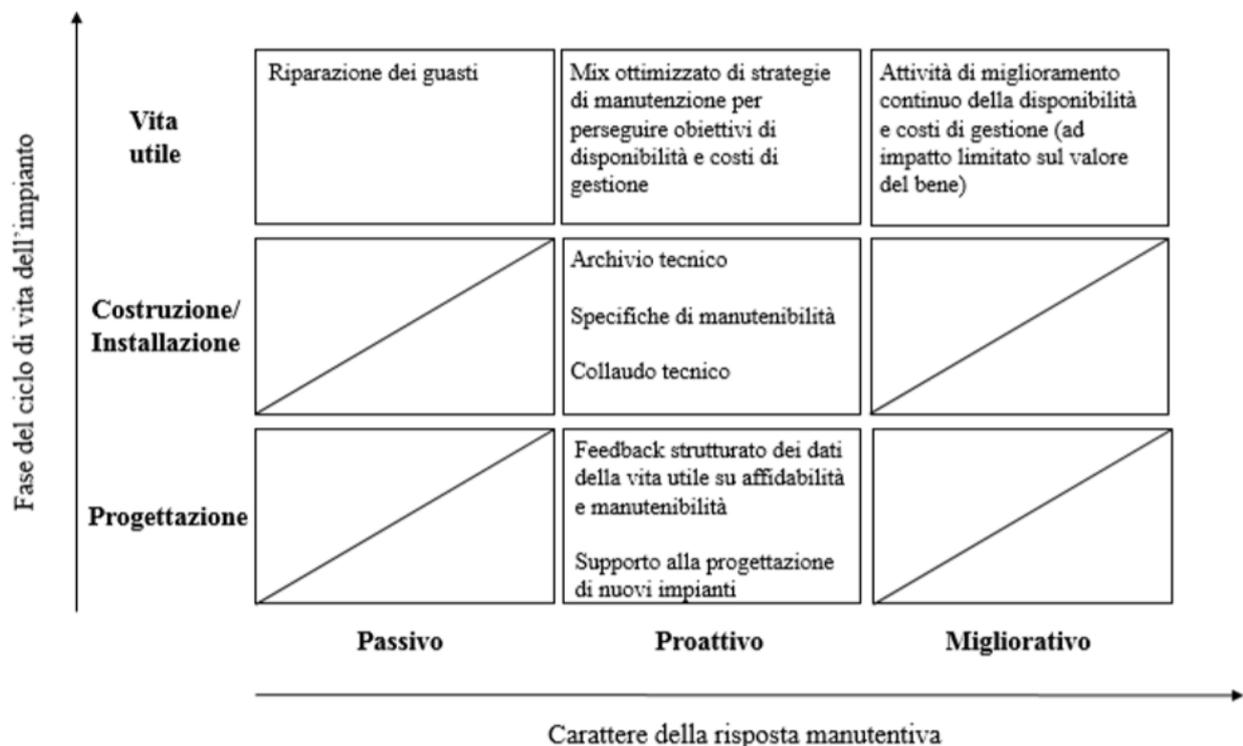


Figura 3. Ruolo della Manutenzione in funzione della fase del ciclo di vita dell'asset

- La fase del ciclo di vita dell'entità o bene oggetto di manutenzione;
- Il grado di proattività della risposta manutentiva.

Questa schematizzazione permette di formulare una definizione precisa della mission della manutenzione, il cui compito è di “cooperare lungo tutto il ciclo di vita di un'entità, dalla sua progettazione alla dismissione, con l'obiettivo di garantire la

disponibilità operativa dell'entità stessa ed il contenimento dei costi associati alla manutenzione”.

## 2.3 Evoluzione storica dei modelli manutentivi

Come l'approccio che il management aziendale ha avuto riguardo alla manutenzione, anche le tecniche manutentive sono profondamente cambiate, passando da attività prevalentemente operative e di riparazione del guasto ad un complesso sistema gestionale, orientato, più che altro, alla prevenzione del guasto.

Un aspetto da definire in maniera rigorosa, prima di presentare i diversi modelli manutentivi (anche detti “strategie manutentive”), è la distinzione tra politica e strategia di manutenzione: gerarchicamente, quest'ultime si presentano in un secondo momento, caratterizzando l'approccio operativo ai problemi della manutenzione, da sviluppare secondo i criteri forniti dalla politica manutentiva adottata. La politica manutentiva sta invece ad indicare l'atteggiamento complessivo che l'organizzazione assume nei confronti delle problematiche manutentive, che può poi esplicitarsi nell'utilizzo di diverse strategie.

Lo schema della Figura 4 fornisce un'idea delle relazioni gerarchiche che intercorrono tra i vari orientamenti. Dalla sua analisi si intuisce come l'attività manutentiva si sviluppa, già da tempo, in tre diverse direzioni, contemperando altrettante categorie di interventi:

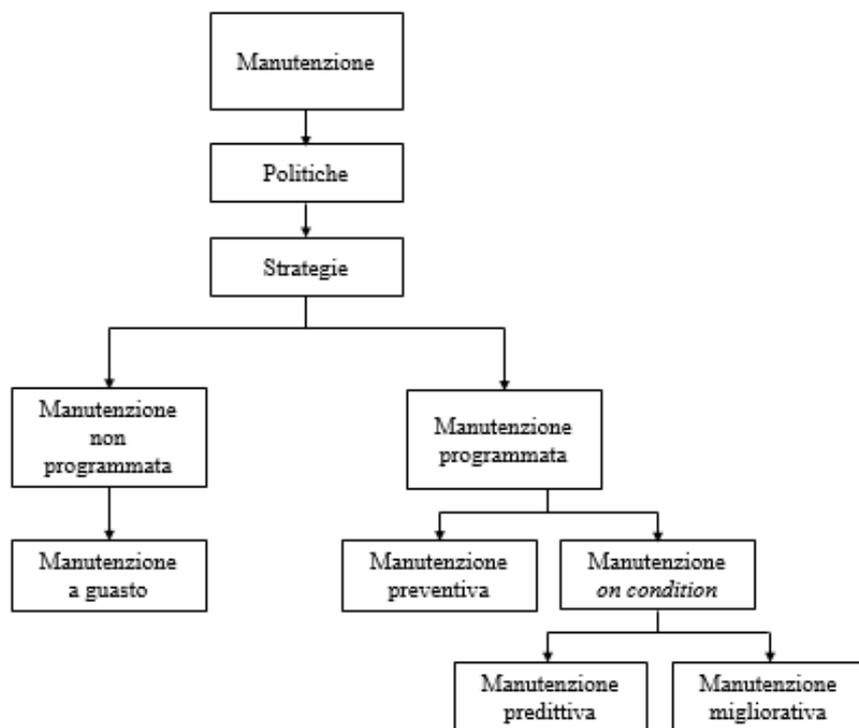


Figura 4. Relazione gerarchica tra Politiche e Strategie di Manutenzione

- interventi che sono realizzati solo dopo che il guasto si è presentato (manutenzione non programmata);
- interventi che scaturiscono da un logico e predeterminato piano programmato (manutenzione programmata);
- interventi incentrati sul tentativo di dare luogo ad un processo di miglioramento continuo nella gestione di queste problematiche (manutenzione migliorativa), a partire dalle procedure operative fino alla ridefinizione progressiva delle situazioni critiche, basandosi sull'esperienza acquisita.

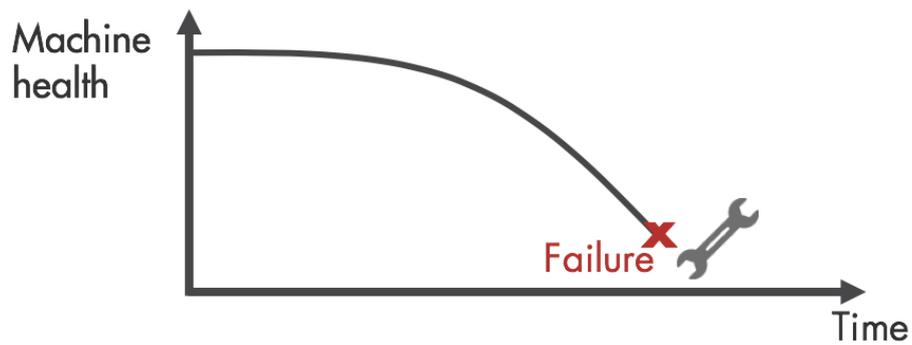
### **2.3.1 La manutenzione a guasto o correttiva**

La manutenzione correttiva o “*run-to-failure*” è la modalità più semplice e antiquata: si interviene solo dopo il manifestarsi del guasto. Questa strategia è efficace per sistemi non critici e facili da riparare a basso costo, quando cioè è conveniente aspettare l'insorgere del guasto prima di intervenire, poiché la riduzione dei tempi di fermata e l'aumento della disponibilità, ottenibili con altre modalità di manutenzione, non sono tali da giustificare il maggior onere derivante dall'adozione di una strategia più sofisticata.

Si tratta dunque di individuare il componente guasto e di prendere le misure atte a ristabilire la corretta funzionalità del sistema.

Gli aspetti discutibili associati a questa strategia sono numerosi:

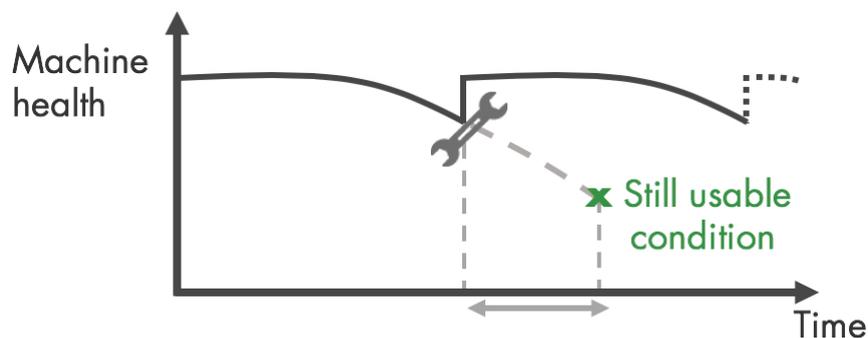
- i fermi macchina si presentano in maniera casuale e a volte nel momento meno opportuno;
- un guasto grave ed inaspettato su un componente può avere conseguenze deleterie su altri elementi del sistema, compromettendone la funzionalità con un aggravio consistente dei costi;
- riparazioni non programmate comportano spesso tempi lunghi di ripristino, ostacolando la produzione e tenendo occupato poco proficuamente il personale tecnico.



*Figura 5. Manutenzione a guasto*

### 2.3.2 La manutenzione preventiva

Rientrano in questa categoria gli interventi eseguiti in base alla convinzione che sia determinabile a priori la vita media di un componente e che si possa anticipare il guasto di un sistema complesso (macchina o linea di produzione), pianificando il momento dell'intervento, in genere di sostituzione, in funzione del tempo di vita attesa del componente stesso.



*Figura 6 Manutenzione preventiva*

Questo approccio ha favorito la crescita culturale e organizzativa della funzione manutenzione, ma, se applicato in maniera generalizzata, non incide in modo sostanziale sull'affidabilità e sulla disponibilità di un impianto, parametri non strettamente legati alla sua vita utile, con un aumento significativo dell'impiego di risorse umane e di materiali.

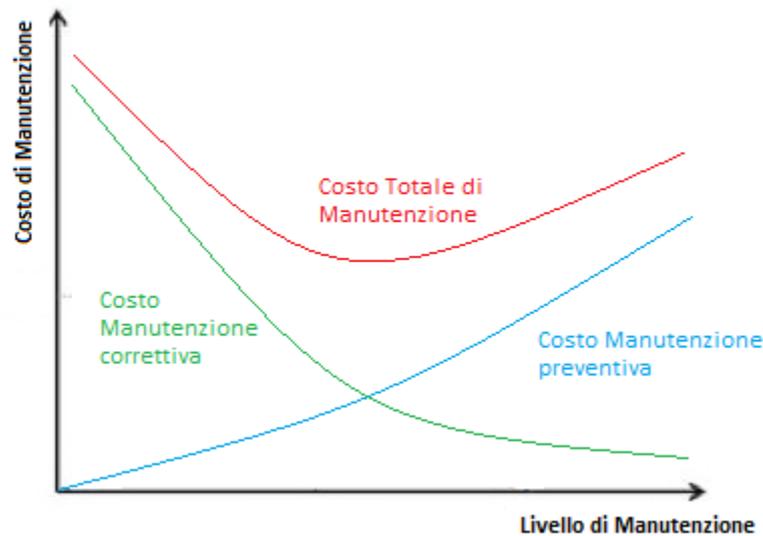


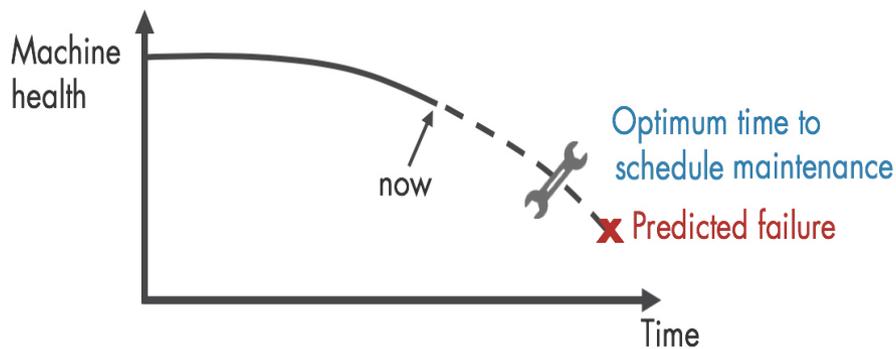
Figura 7. Costo Totale di Manutenzione in funzione del Livello di Manutenzione

La Figura 7 mostra l'andamento dei costi di manutenzione a guasto e preventiva in funzione del livello di manutenzione aziendale. È evidente che per ottenere un costo totale accettabile è opportuno un bilanciamento tra le attività correttiva e programmata.

Sempre nell'ambito della manutenzione programmata e naturale evoluzione delle attività pianificate ad intervalli costanti (manutenzione preventiva ciclica), rientra la manutenzione *su condizione*, che promuove l'esecuzione delle attività solo quando necessarie ed evita di bloccare capitali ingenti per garantirsi le parti di ricambio.

### 2.3.3 La manutenzione predittiva

Dalle attività preventive programmate, ci si è indirizzati verso una visione più moderna delle problematiche manutentive, che ha condotto all'utilizzo di tecniche non distruttive per testare i sistemi ed identificare con anticipo la presenza di guasti, così da poter programmare una revisione solo quando le condizioni della macchina ne determinano la necessità. Quest'approccio, che è definito manutenzione predittiva, è un ulteriore sviluppo ed affinamento della manutenzione preventiva, e prevede la programmazione in tempo reale degli interventi in funzione delle condizioni della macchina e dei requisiti da rispettare, permettendo di evitare lunghi fermi macchina non previsti e contribuendo a migliorare l'affidabilità globale del sistema, per giunta ad un costo contenuto.



*Figura 8. Manutenzione predittiva*

La considerazione che sta alla base dell'adozione di questo approccio è che, generalmente, un guasto non si manifesta all'improvviso, ma nella maggioranza dei casi (soprattutto per i sistemi meccanici, idraulici e pneumatici), costituisce solo il punto di arrivo di un deterioramento progressivo.

La manutenzione su condizione viene definita sulla base di parametri decisionali che consentono di capire quali siano le reali condizioni della macchina, attraverso l'esecuzione di misure, ispezioni e controllo che, in genere, non prevedono lo smontaggio dei componenti della macchina. Queste azioni, effettuate ad intervalli regolari definiti per ogni funzione, consentono di rilevare quando le prestazioni di un componente iniziano a degradare e, sulla base di queste informazioni, si può decidere se effettuare l'intervento prima che il guasto si verifichi.

Le tecniche di più largo utilizzo sono:

- *monitoraggio visivo*: alla ricerca di eventuali segnali come cricche, difetti e disallineamenti;
- *monitoraggio della rispondenza alle specifiche*: verifica che i parametri di esercizio di un macchinario (temperatura, pressione, velocità, ...) corrispondano ai valori previsti da progetto;
- *monitoraggio delle vibrazioni e del rumore*.

Questa strategia, che adopera l'andamento dei parametri monitorati per predire i guasti potenziali, è un processo diagnostico, che, fornendo indicazioni sullo stato di salute della macchina, consente di pianificare interventi di revisione, basandosi sulle effettive condizioni dei componenti piuttosto che sul tempo di funzionamento.

### **2.3.4 La manutenzione migliorativa**

Il limite della manutenzione predittiva è che pretenderebbe di fornire all'operatore un segnale di allerta con un anticipo sufficiente a permettere di programmare le riparazioni

necessarie. Se il servizio di manutenzione non rispondesse in maniera rapida al segnale, le condizioni di guasto incipiente potrebbero presto trasformarsi in quelle di guasto imminente.

Reali benefici, per far fronte a questo problema, si possono conseguire con un altro tipo di manutenzione su condizione: la manutenzione migliorativa, detta anche *Proactive Maintenance*, che si realizza in anticipo rispetto a qualsiasi danno relativo ad un componente o alla prestazione del sistema, con interventi volti ad evitare l'insorgere di quelle condizioni che possono condurre al deterioramento del sistema stesso.

In sostanza, anziché monitorare i parametri che segnalano un guasto potenziale ed aspettare il raggiungimento di una certa soglia d'allarme per pianificare l'intervento, la manutenzione migliorativa si propone di individuare e correggere valori anomali delle cause prime di guasto, dette *radici del guasto*, che potrebbero portare a condizioni di instabilità operativa.

## 2.4 Il ruolo dell'Ingegneria di Manutenzione

Con il termine *Ingegneria di Manutenzione* si intende la funzione che, utilizzando un insieme di tecniche e strumenti *software* che le sono propri, ha il compito di dedurre, dalle analisi quantitative svolte, adeguate proposte di miglioramento della manutenzione, sia dal punto di vista tecnico, che gestionale [5]. Il ruolo assunto dall'Ingegneria di Manutenzione è il risultato di un'evoluzione della manutenzione dalle forme puramente reattive verso forme sempre più sofisticate, in cui convergono concetti e metodi tipici dell'ingegneria per ottenere risultati sempre migliori in termini di sicurezza, efficienza, efficacia e costi.

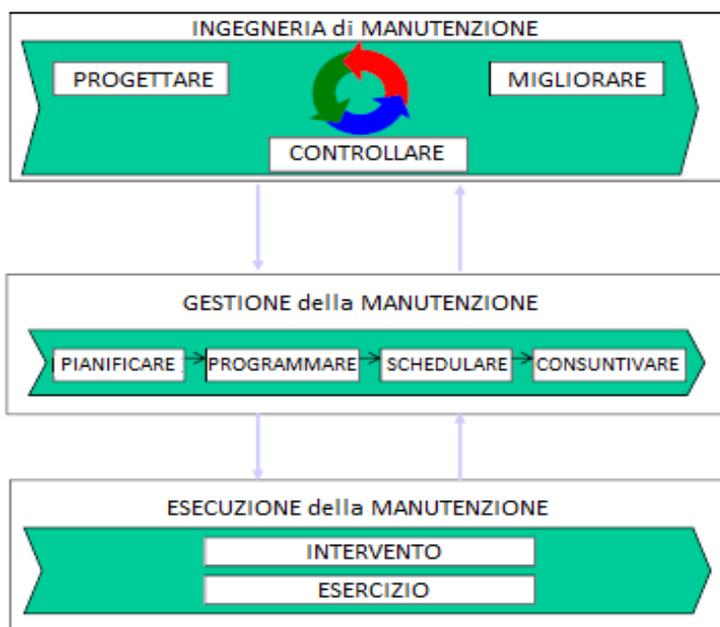


Figura 9. Ruolo dell'ingegneria di Manutenzione

La Figura 9 permette di schematizzare la posizione organizzativa ed il ruolo dell'Ingegneria di Manutenzione. In essa si identificano, partendo dal basso, i tre principali macroprocessi organizzativi della manutenzione:

- Il processo di *Esecuzione della Manutenzione* riceve gli ordini operativi dal processo di *Gestione della Manutenzione* e riporta ad esso lo stato di avanzamento degli stessi, oltre a tutte le informazioni sugli interventi preventivi o a guasto;
- Il processo di *Gestione della Manutenzione* genera un report delle sue attività che riguardano l'organizzazione degli interventi, dalla fase di pianificazione alla loro consuntivazione, e lo invia alla funzione di *Ingegneria di Manutenzione*;
- Infine, il processo di *Ingegneria di Manutenzione*, utilizzando un insieme di tecniche e strumenti di supporto, ha il compito di dedurre dall'analisi dei dati ricevuti, adeguate proposte di miglioramento delle attività manutentive, dal punto di vista tecnico e gestionale. Le deduzioni ed i piani realizzati dall'*Ingegneria di Manutenzione* vengono quindi trasferiti come input alla *Gestione della Manutenzione*, che ha il compito di prepararne la messa in pratica.

Tra le varie attività svolte dall'Ingegneria di Manutenzione, le principali sono:

- progettare e promuovere le politiche e le strategie manutentive più adeguate al contesto specifico, analizzando l'applicazione dei diversi modelli ed individuando il loro mix ottimale, cioè al minimo costo totale;
- pianificare interventi per il miglioramento dei parametri di affidabilità del sistema, inteso come insieme di elementi che si comportano come un'entità che si propone la realizzazione di alcune funzioni o servizi;
- promuovere il miglioramento continuo delle prestazioni tecniche dei sistemi e dei costi di manutenzione;
- gestire le parti di ricambio;
- sviluppare e diffondere i Sistemi Informativi di Manutenzione;
- costituire il riferimento culturale di tutta l'organizzazione manutentiva.

#### **2.4.1 Criteri di progetto della manutenzione**

Il progetto delle strategie manutentive per un sistema produttivo richiede che si possieda una conoscenza adeguata dei beni da mantenere e del loro funzionamento.

Definire un piano di manutenzione vuol dire non solo determinare le attività e la frequenza con la quale devono essere eseguite, ma, cosa ancora più importante, individuare le esigenze manutentive per ogni *asset* produttivo, per stabilire il mix

ottimale di strategie che garantisca il corretto funzionamento del sistema ed elevata affidabilità.

Per progettare correttamente la politica di manutenzione occorre valutare diversi aspetti, sia quelli che incidono sulle prestazioni affidabilistiche, sia su quelli economici.

I criteri principali da considerare sono:

- valutazioni di affidabilità: analizzare la scelta delle attività manutentive in base all'affidabilità, significa valutare quali strategie siano potenzialmente applicabili in funzione della fase del ciclo di vita operativa in cui si trova l'entità oggetto di manutenzione; ciò vuol dire, ad esempio, procedere con controlli periodici al mantenimento di un bene che non ha esaurito la propria età operativa, mentre potrebbe essere conveniente provvedere alla sua sostituzione se è vicino al termine della sua vita utile;
- valutazione economica: se da un punto di vista affidabilistico sono definibili i modelli di manutenzione in funzione dell'età operativa del bene, la loro valutazione economica permette di individuare la politica migliore, per ottenere il minor costo totale di manutenzione;
- valutazione tecnica: a volte, la prestazione obiettivo che si persegue è di tipo tecnico, anziché economico. Ad esempio, se si desidera ottenere la massima capacità produttiva o continuità di servizio, l'obiettivo è la massima disponibilità operativa, anche se questa condizione può non generare il minimo costo totale di manutenzione.

#### **2.4.2 Indicatori di performance: parametri RAM**

Tra gli indicatori di performance più comuni per l'Ingegneria di Manutenzione, vi sono i parametri RAM, dall'inglese *Reliability, Availability e Maintainability*, che misurano lo stato di affidabilità, disponibilità e manutenibilità di un sistema produttivo.

L'affidabilità è la *attitudine di un'entità a svolgere una funzione richiesta in date condizioni, durante un intervallo di tempo definito.*

Il parametro di manutenibilità misura invece la *attitudine di un'entità, in certe condizioni d'uso, ad essere mantenuta o ripristinata in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta, quando la manutenzione è effettuata in date condizioni e vengono adottate le procedure e le risorse prescritte.*

Con il termine disponibilità, si intende la *attitudine di un'entità ad essere in grado di svolgere una funzione richiesta, in determinate condizioni, in un particolare istante o durante un intervallo di tempo, partendo dal presupposto che siano fornite le risorse esterne necessarie.*

Una buona pianificazione delle attività da parte dell'Ingegneria di Manutenzione deve garantire un elevato tasso di disponibilità dei macchinari, che si realizza incrementando affidabilità e manutenibilità degli stessi, sostenendo al temp stesso il minimo costo totale di manutenzione.

	<b>Definizione</b>	<b>Finalità</b>
<b><i>Reliability</i> (Affidabilità)</b>	Probabilità che un componente o sistema svolga correttamente la sua funzione per un certo periodo ed in condizioni operative ben definite	Garantire una continuità nel servizio del sistema che si progetta, produce o gestisce
<b><i>Availability</i> (Disponibilità)</b>	Probabilità che un componente o sistema svolga correttamente la sua funzione in un istante prefissato ed in condizioni operative ben definite	Ridurre al minimo il fermo macchina, ottimizzare la produzione e al contempo garantire l'efficienza dei sistemi di sicurezza in stand-by
<b><i>Maintenability</i> (Manutenibilità)</b>	Probabilità che il componente sia riparato entro un tempo prefissato comprendente la rilevazione del guasto e la riparazione. In altri termini, l'attitudine del sistema ad essere mantenuto rapidamente e facilmente	Garantire il rapido ripristino dei componenti guasti

*Tabella 2. Indicatori di performance: parametri RAM*

### 2.4.3 Costi di manutenzione

Il contenimento dei costi è uno degli obiettivi principali della funzione manutenzione; occorre tuttavia evitare l'errore di voler risparmiare limitando la profondità

dell'intervento manutentivo: si risparmia quando si attua l'intervento, ma è poi molto elevato il rischio di aumentare i costi totali di gestione.

Per contenere i costi totali occorre considerare non solo il potenziale risparmio dei costi propri della manutenzione, ma anche il rischio di aumentare i costi indotti da una non adeguata manutenzione.

Tra le voci di costo, le principali sono:

1. Costi diretti:

- Materiali;
- Manodopera interna;
- Prestazioni di terzi.

2. Costi indiretti:

- Costi di struttura;
- Gestione dei materiali tecnici;
- Servizi ausiliari;
- Costi amministrativi e informatici;
- Quota parte delle spese generali.

3. Costi indotti:

- Costi di mancato servizio o produzione;
- Costi di non qualità;
- Costi di non sicurezza.

Il contenimento dei costi totali si ottiene applicando sempre più estesamente la manutenzione su condizione, la manutenzione predittiva e il miglioramento continuo: questi approcci permettono di presidiare e contenere le conseguenze del guasto e rendono possibile programmare e preparare i lavori di manutenzione, con il supporto di un adeguato assetto organizzativo del servizio.

#### **2.4.4 Gestione dei ricambi a magazzino**

Quest'attività è di primaria importanza per garantire la disponibilità di materiale tecnico di sostituzione in caso di interventi manutentivi di guasto o preventivi sulle macchine.

Una corretta gestione delle scorte consente di minimizzare i tempi di fermata e i costi di immobilizzazione dei materiali, oltre ad evitare l'obsolescenza tecnica dei materiali a magazzino.

Generalmente la scelta della modalità di gestione dei ricambi va ad integrare la progettazione delle attività manutentive, secondo il seguente criterio:

- gestione a scorta, per quegli *asset* o componenti che si è deciso di mantenere a guasto, cioè intervenire al ripristino solo quando non sono più in grado di compiere la funzionalità per cui sono stati progettati;
- gestione a fabbisogno, per quei componenti che sono soggetti a manutenzione preventiva, dei quali si è deciso di rifornirsi soltanto in prossimità dell'esecuzione dell'intervento tecnico di sostituzione.

La gestione a scorta risulta solitamente la più impegnativa e onerosa, ma è irrinunciabile per fronteggiare il guasto imprevisto che richiede una immediata riparazione. Deve essere oggetto di una revisione continua, per assicurare un'elevata reperibilità di materiale ma al costo minimo di immobilizzazione.

#### **2.4.5 Miglioramento continuo**

Una volta fissati in maniera chiara gli obiettivi e raggiunti i valori attesi, in termini di affidabilità degli impianti ed economici, l'Ingegneria di Manutenzione deve provvedere al controllo e al continuo incremento delle *performance* conseguite.

Attraverso l'integrazione tra la funzione esecutiva e quella gestionale di manutenzione, si deve infatti perseguire nel tempo un miglioramento progressivo dell'affidabilità e manutenibilità dell'impianto, e, di conseguenza, della sua disponibilità operativa e dell'efficienza globale del processo produttivo.

Questa strada è percorribile attraverso una razionale pianificazione delle attività, la loro corretta implementazione e il controllo delle prestazioni raggiunte, per analizzare con criticità eventuali carenze e prendere le necessarie contromisure, nonché le iniziative di miglioramento.

## **2.4.6 Sistemi Informativi di manutenzione**

La normativa UNI 10584 definisce il SIM (Sistema Informativo di Manutenzione) come *un complesso di norme, procedure e strumenti atti a raccogliere ed elaborare le informazioni necessarie alla gestione delle attività di manutenzione e per il monitoraggio dell'attività degli impianti* [7].

Sono sistemi per la modellazione, l'analisi e la simulazione che supportano l'Ingegneria di Manutenzione nella progettazione o revisione della gestione della manutenzione, con l'obiettivo di migliorare le prestazioni raggiunte dal sistema oggetto delle attività manutentive. Mettono a disposizione diversi tipi di analisi e di supporti nella scelta delle più efficaci strategie di manutenzione e gestione dei materiali di ricambio.

Dal punto di vista dei contenuti, è possibile dire che i sistemi software per l'ingegneria di manutenzione costituiscono il supporto operativo delle diverse metodologie di analisi ingegneristica dell'affidabilità dei sistemi e della manutenzione in generale.

## **2.5 Manutenzione predittiva, IoT, KPI e statistica utilizzata**

### **2.5.1 Cos'è la manutenzione predittiva**

“Manutenzione predittiva”, “IoT” e “KPI Manutenzione” rappresentano concetti fondamentali per la manutenzione ai tempi d'oggi. I software per la gestione della manutenzione offrono soluzioni a tutto ciò, ma comprendiamo bene di cosa si tratta nello specifico cercando di analizzare il quadro attuale.

In qualsiasi tipo di attività basata sull'impiego di macchinari si rende indispensabile l'implementazione di piani manutentivi regolari al fine di mantenere le risorse tecniche in perfetto stato di funzionamento. Guasti e rotture dovute a trascuratezza generano fermo impianti con riparazioni costose fino alla sostituzione di interi macchinari incidendo seriamente sui costi generali.

Già a partire dagli anni '80 e fino ai primi anni 2000, si è assistito alla nascita di innovative metodologie manutentive che, non senza destare stupore e incredulità tra gli utilizzatori, andarono a sostituirsi alle tradizionali tecniche di manutenzione reattiva che per molti anni avevano costituito lo standard della manutenzione industriale.

Ai nostri giorni sono proprio alcune di quelle procedure ad essere state rimesse in gioco conquistandosi un ruolo chiave tra le tendenze emergenti nell'ambito manutentivo. Tra queste, la manutenzione predittiva, sviluppata con innovazioni tecnologiche come IoT e CMMS, si impone come valido modello nella realizzazione di piani di manutenzione efficaci. Possiamo condensare in tre punti gli obiettivi che un moderno ed efficiente servizio basato su manutenzione predittiva dovrebbe garantire, essi sono:

- Previsione dei guasti
- Gestione efficace della manodopera specializzata
- Gestione ottimizzata delle parti di ricambio

Uno dei modi per raggiungere questi traguardi consiste nel mantenere impianti e macchinari in condizioni tali da evitare guasti e/o rotture. A differenza della manutenzione preventiva, che ricordiamo incentrarsi su programmi di messa a punto, la manutenzione predittiva si focalizza sulla verifica dello stato di salute dei macchinari al fine di predire quando si verificherà un guasto. Per massimizzare la probabilità di successo delle previsioni si ricorre all'utilizzo congiunto di diverse tecniche che si basano su tecnologie informatiche. Utilizzate nell'industria fin dagli anni '80, nel corso dei decenni queste tecniche sono state aggiornate costantemente fino ai nostri giorni. I sistemi basati su software manutenzione predittiva con IoT e CMMS rappresentano lo stato dell'arte di quell'evoluzione tecnologica che ha permesso, tra l'altro, il passaggio dell'industria dalla manutenzione reattiva a quella proattiva. Per rilevare le anomalie, potenziali cause di imminenti guasti ad impianti e macchine, si utilizzano processi di analisi cognitiva, apprendimento automatico e data mining attraverso sensori installati sui macchinari.

## **2.5.2 I vantaggi della manutenzione predittiva**

- Incremento dei ricavi: riducendo il numero di interventi di manutenzione e ottimizzandone l'esecuzione, le riparazioni possono essere gestite in modo più efficiente ottenendo un sensibile calo dei tempi operativi.
- Riduzione dei costi di manodopera: quando gli interventi di manutenzione vengono programmati, i tempi di riparazione si riducono grazie al numero inferiore di componenti da sostituire. Inoltre i guasti critici delle apparecchiature si verificheranno con minore frequenza. Per i responsabili sarà possibile concentrare efficacemente le risorse sui macchinari più critici.
- Riduzione dei tempi di produzione persi: oltre ad impattare direttamente sull'OEE (indice di efficienza complessiva economica) il fermo degli impianti provoca, a cascata, una serie di inefficienze su tutta la catena produttiva includendo sia i clienti interni (servizi spedizione, magazzini, ecc...) che quelli esterni (trasportatori, depositi esterni, clienti finali, ecc...). Al fine di ridurre al minimo i tempi di inattività critici, gli interventi di manutenzione predittiva vengono concordati e pianificati con i responsabili di produzione in periodi di inattività prestabiliti.
- Riduzione dei costi dei macchinari: la manutenzione di un componente prima che causi un guasto critico consente di contenere il costo alla sola parte guasta ed alla manodopera necessaria per la riparazione anziché all'intero macchinario. Inoltre la riduzione del numero dei guasti allunga la vita media delle apparecchiature.

- Aumento della sicurezza: risolvere potenziali problemi prima che si verifichino ha come conseguenza diretta anche condizioni lavorative più sicure.
- Aumento dell'efficienza del personale manutentore: pianificando precisamente le attività è possibile ottenere un miglioramento dell'efficienza del personale manutentore. Compito del responsabile di servizio sarà quello di fornire: descrizione accurata del compito assegnato, informazioni sulla reperibilità delle parti di ricambio, strumenti e supporto necessario per correggere l'anomalia.
- Creazione di un database: un altro vantaggio della manutenzione predittiva è la capacità di generare un database storico relativo alle prestazioni ed al comportamento dei macchinari che è possibile sfruttare per aumentare il grado di precisione delle previsioni future.

### **2.5.3 La manutenzione predittiva nell'industria 4.0**

Un sistema basato sulla manutenzione predittiva gestita con software manutenzione predittiva (CMMS) è in grado di avvisare i tecnici quando una criticità si manifesta su un macchinario di produzione. L'avviso fornirà informazioni sufficienti per determinare le cause dell'anomalia, predisporre le parti di ricambio occorrenti e pianificare la manodopera necessaria per effettuare l'intervento. Tenendo presente fattori quali urgenza di produzione, eventuali interruzioni di produzione programmate, ecc... il software manutenzione predittiva proporrà le date migliori per intervenire. Per avere un quadro completo del sistema approfondiamo ora la conoscenza dei principali elementi in gioco.

#### **2.5.3.1 Tecnologia IoT**

Alla base della struttura di manutenzione predittiva c'è la raccolta di informazioni in tempo reale sulle condizioni di funzionamento delle macchine e l'invio dei dati ad una unità centrale. L'accoppiata IoT e CMMS costituisce un elemento strategico per le aziende orientate all'implementazione di Smart Maintenance. L'IoT (Internet delle cose) ha permesso la realizzazione di questi sistemi attraverso l'impiego di piattaforme di connettività di tipo LAN, WLAN o basate su tecnologia Cloud.

#### **2.5.3.2 Sensoristica**

Nella manutenzione predittiva le condizioni dei macchinari vengono monitorate in tempo reale attraverso l'utilizzo di sensori installati sulle parti critiche e le deviazioni rilevate vengono trasmesse in modalità wireless al software manutenzione predittiva che provvederà ad identificarle, misurarle e quantificarle.

Le varie tipologie di sensori impiegati permettono la raccolta di una variegata mole di informazioni che possono dirci molto sullo stato di un componente. Ad esempio è possibile acquisire dati relativi a temperature, vibrazioni, livelli di lubrificazione e tante altre grandezze utili per indentificare variazioni rispetto allo standard.

La tecnologia 4.0 permette di realizzare sensori dalle dimensioni sempre più ridotte facilitandone l'installazione anche su parti critiche dei macchinari e senza interferire sulle loro prestazioni. Inoltre, essendo wireless e connessi in Bluetooth, sono caratterizzati da un basso consumo energetico. Comunque per eliminare il problema della sostituzione della batteria, una nuova tecnologia in fase di sviluppo permetterà presto di alimentare i sensori con l'energia prodotta dalle vibrazioni degli stessi macchinari su chi sono installati.

### **2.5.3.3 Software manutenzione predittiva**

Il software manutenzione predittiva ricopre un ruolo fondamentale nel processo di cambiamento industriale della manutenzione reattiva alla manutenzione proattiva ed a quella predittiva. L'analisi delle informazioni raccolte dai sensori viene eseguita utilizzando IoT e CMMS che, sfruttando potenti algoritmi, elaborano previsioni efficaci su quando un componente dovrà essere manutenzionato o sostituito.

Un efficiente piano di manutenzione predittiva gestita con IoT e CMMS è in grado di assicurare:

- Modelli specifici e set di dati globali: per aumentare in modo significativo il grado di precisione delle previsioni. Per impedire che le anomalie si trasformino in guasti, il sistema analizza tutti i dati ricevuti dai sensori tenendo conto di fattori ambientali, operativi e produttivi.
- Ottima profondità del livello di analisi: per garantire la massima efficacia delle risorse il software manutenzione predittiva analizza sia i guasti ripetitivi (che sono i più noti) che quelli casuali (che rappresentano la percentuale maggiore).
- Esecuzione di carichi di lavoro complessi: per generare un'ampia mole di informazioni sullo stato di funzionamento dei macchinari, prevedere guasti, sviluppare e rendere operativi modelli di intervento complessi ed altamente efficaci.
- Capacità di creare, aggiornare e gestire database: il software manutenzione predittiva genera e gestisce il database di tutti gli eventi che si verificano sui macchinari e sugli impianti, compresa quindi l'attività di manutenzione predittiva, gli interventi correttivi e di riparazione, le ispezioni e le tarature, tutte informazioni indispensabili per elaborare previsioni.

#### 2.5.3.4 Misurazione dei KPI manutenzione

Nelle moderne aziende l'esecuzione efficace degli interventi non è un elemento sufficiente a stabilire la qualità e l'efficienza del servizio di manutenzione. Oltre a riparare rapidamente e correttamente guasti e malfunzionamenti c'è anche un altro obiettivo da raggiungere: garantire l'eliminazione, o quantomeno la riduzione, dell'indice di rischio di guasti futuri.

I KPI (Key Performance Indicators) sono indicatori che vengono utilizzati per misurare l'andamento di una determinata attività o processo. Poiché i KPI manutenzione costituiscono dati fondamentali per la presa di decisioni, il processo di misurazione ed analisi deve avvenire nel modo più veloce ed accurato possibile. La migliore soluzione prevede l'utilizzo di un software manutenzione predittiva tipicamente sviluppato con IoT e CMMS. Una buona selezione di KPI manutenzione in grado di fornire una panoramica completa sull'andamento dei processi di manutenzione deve comprendere due tipologie di indicatori: KPI manutenzione di risultato e KPI manutenzione di performance. Seguono alcuni esempi di KPI manutenzione relativi a ciascuna categoria.

##### KPI manutenzione di risultato

- Costi di manutenzione sul valore di sostituzione impianti
- Costi di manutenzione sul costo totale di produzione
- Costi di manutenzione sul fatturato
- Costi interventi di manutenzione per macchinario
- Costi di indisponibilità per manutenzione su guasto
- Tempo medio tra i guasti per le macchine "critiche" o in generale (MTBF)
- Tempo medio di ripristino (MTTR)
- Tempo medio di riparazione (MRT)
- Numero di interventi/anno di manutenzione straordinaria per macchinario
- Numero di interventi/anno di manutenzione ordinaria/straordinaria
- Tempo di risposta ad una richiesta di intervento
- Ore/settimana riservate alla manutenzione
- Ore di indisponibilità per manutenzione predittiva/preventiva.

##### KPI manutenzione performance

- Ore di manodopera per manutenzione predittiva e preventiva (%)
- Ore di manodopera realizzate su programma (sul totale ore di manodopera) (%)
- O.d.L. con ore di manodopera preventivate entro  $\pm 10\%$  del consuntivo (%)
- O.d.L. completati entro la data prevista (%)
- R.D.L. convertite in ordini entro "x" giorni (%)

- Numero di interventi/anno volti al miglioramento dell'affidabilità dei macchinari

## **2.5.4 Stima RUL utilizzando modelli di stimatori RUL**

La cassetta degli attrezzi per la manutenzione predittiva include alcuni modelli specializzati per calcolare il RUL da diversi tipi di dati di sistema misurati. Questi modelli sono utili quando si hanno dati storici e informazioni come:

- cronologie di errori di macchine simili a quella che si desidera diagnosticare;
- un valore soglia noto di qualche indicatore di condizione al superamento del quale indica errore;
- dati relativi al tempo impiegato o quanto utilizzo di macchine simili per raggiungere il fallimento (durata);

I modelli di stima RUL forniscono metodi per addestrare il modello utilizzando dati storici e in maniera tale da poter eseguire la previsione della vita utile rimanente. Il termine tempo di vita qui si riferisce alla vita della macchina definita in termini di quantità utilizzata per misurare la vita del sistema. Allo stesso modo l'evoluzione nel tempo può significare l'evoluzione di un valore come utilizzo, distanza percorsa, numero di cicli o altra quantità che descrive la durata.

Il flusso di lavoro generale per l'utilizzo dei modelli di stima RUL è:

1. Scegliere il miglior tipo di modello di stima RUL in base ai dati e la conoscenza del sistema che si ha. Creare e configurare il corrispondente oggetto del modello.
2. Addestrare il modello di stima usando i dati storici che in possesso.
3. Utilizzando i dati di test dello stesso tipo dei dati storici, stimare il RUL del componente di test. È inoltre possibile utilizzare i dati del test in modo ricorsivo per aggiornare alcuni tipi di modello, come i modelli di degrado, per mantenere accurate le previsioni.

### **2.5.4.1 Scegliere uno stimatore RUL**

Esistono tre famiglie di modelli di stima RUL. È opportuno scegliere quale famiglia e quale modello utilizzare in base ai dati e alle informazioni di sistema che si ha a disposizione, come mostrato nella figura seguente.

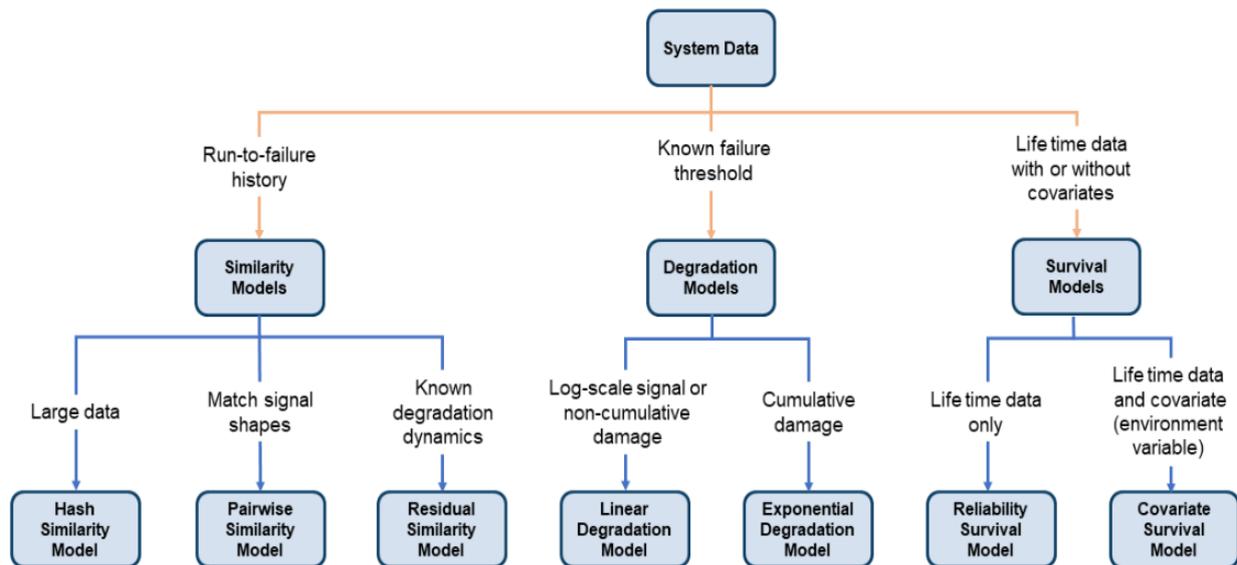


Figura 20. Famiglie di modelli di stima RUL

### **Similarity Models (modelli di somiglianza)**

I modelli di somiglianza basano la previsione RUL di un dispositivo di prova su comportamenti noti di macchine simili da un database storico. Tali modelli confrontano una tendenza nei dati di test o nei valori dell'indicatore di condizione con le stesse informazioni estratte da altri sistemi simili. I modelli di somiglianza sono utili quando:

- sono stati eseguiti run-to-failure data da sistemi simili (componenti). I run-to-failure data sono dati che iniziano quando il macchinario è in uno stato di salute e terminano quando la macchina si trova in uno stato vicino a guasti e dunque di manutenzione.
- i run-to-failure data mostrano comportamenti di degrado simili. Cioè, i dati cambiano in qualche modo caratteristico mentre il sistema si degrada.

Quindi puoi usare modelli di somiglianza quando puoi ottenere profili di degrado dal tuo insieme di dati. I profili di degradazione rappresentano l'evoluzione di uno o più indicatori di condizione per ogni macchina nell'insieme (ogni componente), mentre la macchina passa da uno stato sano a uno stato difettoso.

### Similarity based RUL Estimate ~ 65 cycles

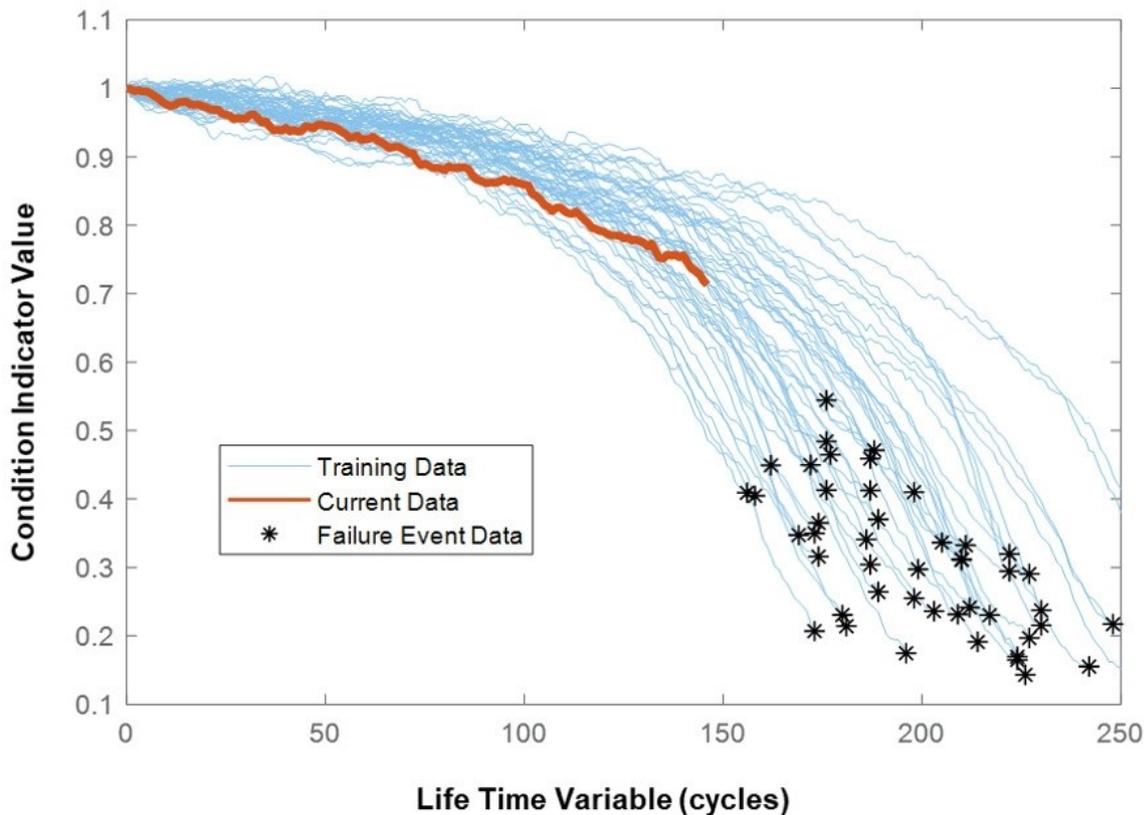


Figura 11. Profili di degradazione (blu) basati su dati di run-to-failure. La distribuzione delle stelle (o dei punti finali) delle curve blu più vicine dà un RUL di 65 cicli.

Dunque abbiamo detto che se si dispone di un database di dati di esecuzione per errore da componenti simili o componenti diversi che mostrano un comportamento simile, è possibile stimare RUL utilizzando metodi di somiglianza. Questi metodi acquisiscono i profili di degradazione e li confrontano con i nuovi dati provenienti dalla macchina per determinare quale profilo corrispondono maggiormente ai dati.

Nella Figura 11 ad esempio, i profili di degradazione dei set di dati di run-to-failure cronologici da un motore vengono visualizzati in blu e i dati correnti del motore vengono visualizzati in rosso. Sulla base del profilo che il motore corrisponde più strettamente, il RUL è stimato essere di circa 65 cicli.

### Degradation Models (modelli di degrado)

I modelli di degradazione estrapolano il comportamento passato per prevedere la condizione futura. Questo tipo di calcolo RUL si adatta a un modello lineare o esponenziale al profilo di degradazione di un indicatore di condizione, dati i profili di degradazione nell'insieme. Quindi utilizza il profilo di degradazione del componente

di test per calcolare statisticamente il tempo rimanente fino a quando l'indicatore raggiunge una soglia prescritta. Questi modelli sono molto utili quando esiste un valore noto dell'indicatore di condizione che indica un errore. I due tipi di modelli di degrado disponibili sono:

- Modello di degrado lineare (linearDegradationModel) - Descrive il comportamento di degrado come un processo stocastico lineare con un termine di offset. I modelli di degradazione lineare sono utili quando il sistema non presenta degradazione cumulativa.
- Modello di degrado esponenziale (exponentialDegradationModel - Descrive il comportamento di degrado come processo stocastico esponenziale con un termine di offset. I modelli di degrado esponenziale sono utili quando il componente del test subisce un degrado cumulativo.

Dopo aver creato un modello di degrado, è opportuno inizializzare il modello utilizzando i dati storici relativi allo stato di un insieme di componenti simili, ad esempio più macchine prodotte con le stesse specifiche.

I modelli di degradazione funzionano solo con un indicatore di condizione singolo. Tuttavia, è possibile utilizzare l'analisi dei componenti principali o altre tecniche di fusione per generare un indicatore di condizione fuso che incorpora informazioni da più di un indicatore di condizione. Sia che utilizzi un singolo indicatore o un indicatore fuso, cerca un indicatore che mostri una chiara tendenza in aumento o in diminuzione, in modo che la modellazione e l'estrapolazione siano affidabili.

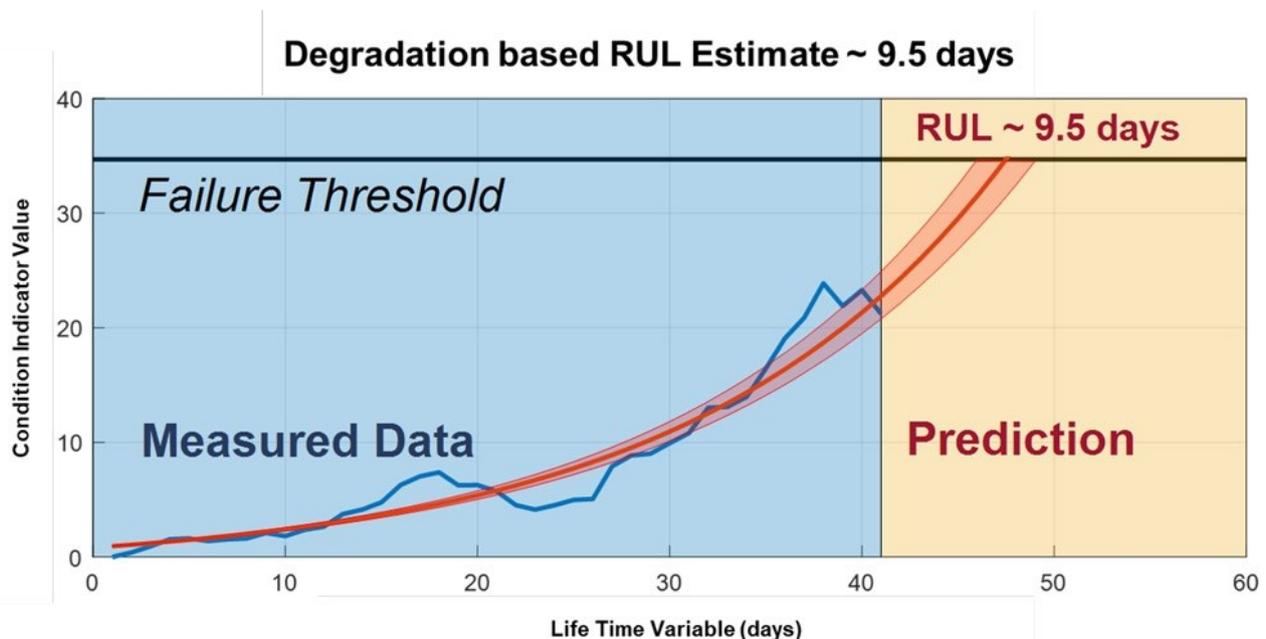


Figura 12. Modello di degradazione per un cuscinetto ad alta velocità. Il cuscinetto ha un RUL di 9,5 giorni in base ai dati delle condizioni attuali (blu) e al modello di degradazione esponenziale (rosso) adottato.

## Dati soglia

In molti casi, i dati di run-to-failure o la durata non sono stati registrati, ma si dispone di informazioni sui valori di soglia prescritti, ad esempio, la temperatura di un liquido in una pompa non può superare 160°F (71°C) e la pressione deve essere inferiore a 2200 psi (155 bar). Con questo tipo di informazioni, è possibile adattare i modelli di serie temporali agli indicatori di condizione estratti dai dati del sensore, come la temperatura e la pressione, che aumentano o diminuiscono nel tempo.

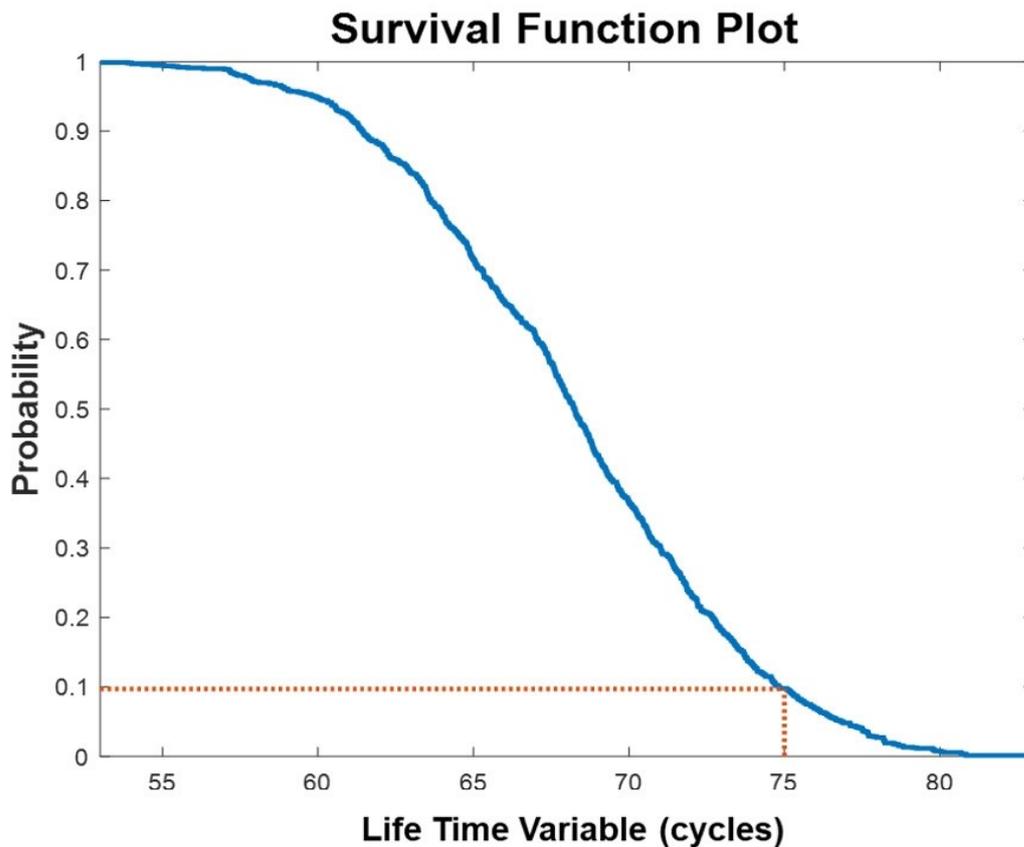
Questi modelli di degradazione stimano RUL stimando quando l'indicatore di condizione supererà la soglia. Possono anche essere utilizzati con un indicatore di condizione fusa che incorpora informazioni da più di un indicatore di condizione utilizzando tecniche come l'analisi dei componenti principali.

La figura 12 mostra un modello di degradazione esponenziale che traccia il guasto in un cuscinetto ad alta velocità utilizzato in una turbina eolica. L'indicatore di condizione è visualizzato in blu. Il modello di degradazione prevede che il cuscinetto supererà il valore soglia in circa 9,5 giorni. L'area ombreggiata in rosso rappresenta i limiti di attendibilità per questa stima.

## **Survival Models (modelli di sopravvivenza)**

L'analisi di sopravvivenza è un metodo statistico utilizzato per modellare i dati tempo-evento. È utile quando non si hanno cronologie complete da run-to-failure, ma invece si hanno:

- Solo dati sulla durata di vita di componenti simili. Ad esempio, si potrebbe conoscere quante miglia ha funzionato ogni motore del gruppo prima di aver bisogno di manutenzione, o quante ore ha funzionato ogni macchina del gruppo prima di un guasto. Date le informazioni storiche sui tempi di guasto di una flotta di componenti simili, questo modello stima la distribuzione delle probabilità dei tempi di guasto. La distribuzione viene utilizzata per stimare il RUL del componente di test.
- Sia la durata della vita che alcuni altri dati variabili (covariate) correlati al RUL. Le covariate, dette anche variabili ambientali o variabili esplicative, comprendono informazioni come il fornitore del componente, i regimi in cui il componente è stato utilizzato o il lotto di produzione. Questo modello è un modello di sopravvivenza a rischio proporzionale che utilizza le durate di vita e le covariate per calcolare la probabilità di sopravvivenza di un componente del test.



*Figura 13. Grafico della funzione di sopravvivenza. Alla fine di 75 cicli, la probabilità che una batteria continui a funzionare è dello 0,1 ovvero del 10%.*

#### Dati sulla durata

I modelli di rischio proporzionali e le distribuzioni di probabilità dei tempi di guasto dei componenti vengono utilizzati per stimare RUL dai dati sulla durata. Un semplice esempio è la stima del tempo di scarico di una batteria in base ai tempi di scarico passati e covariati, variabili come l'ambiente in cui la batteria operava (come la temperatura) e il carico posto su di essa.

Il grafico della funzione di sopravvivenza in Figura 13 mostra la probabilità che una batteria non riesca in base a quanto tempo è stato in funzione. La trama mostra, ad esempio, che se la batteria è in funzione per 75 cicli, ha una probabilità del 90% di essere alla fine del suo ciclo di vita.

### 3 Caso di studio (sviluppo del modello di manutenzione predittiva)

#### 3.1 Descrizione generale dell'impianto bifase aria-acqua

L'impianto qui presentato ha lo scopo di portare una miscela bifase (aria-acqua) in monofase, e quindi ottenere aria ed acqua separati.

Per la simulazione del processo si parte dalla vasca contenente acqua che viene pescata dalla pompa e portata fino all'eiettore dove, quest'ultimo, attraverso la creazione del vuoto, incorporerà aria nell'acqua proveniente da una tubazione secondaria e creando così la miscela bifase.

Successivamente si arriverà al serbatoio dove l'acqua, essendo più densa, si troverà nella parte inferiore del serbatoio mentre l'aria nella parte superiore.

L'acqua verrà riportata nella vasca e l'aria verrà espulsa dalla parte superiore del serbatoio attraverso una tubazione.

Il percorso seguito dall'impianto di acqua-aria è monitorato da alcune strumentazioni che misurano l'andamento di un particolare indicatore e che di seguito andremo a descrivere in modo dettagliato.

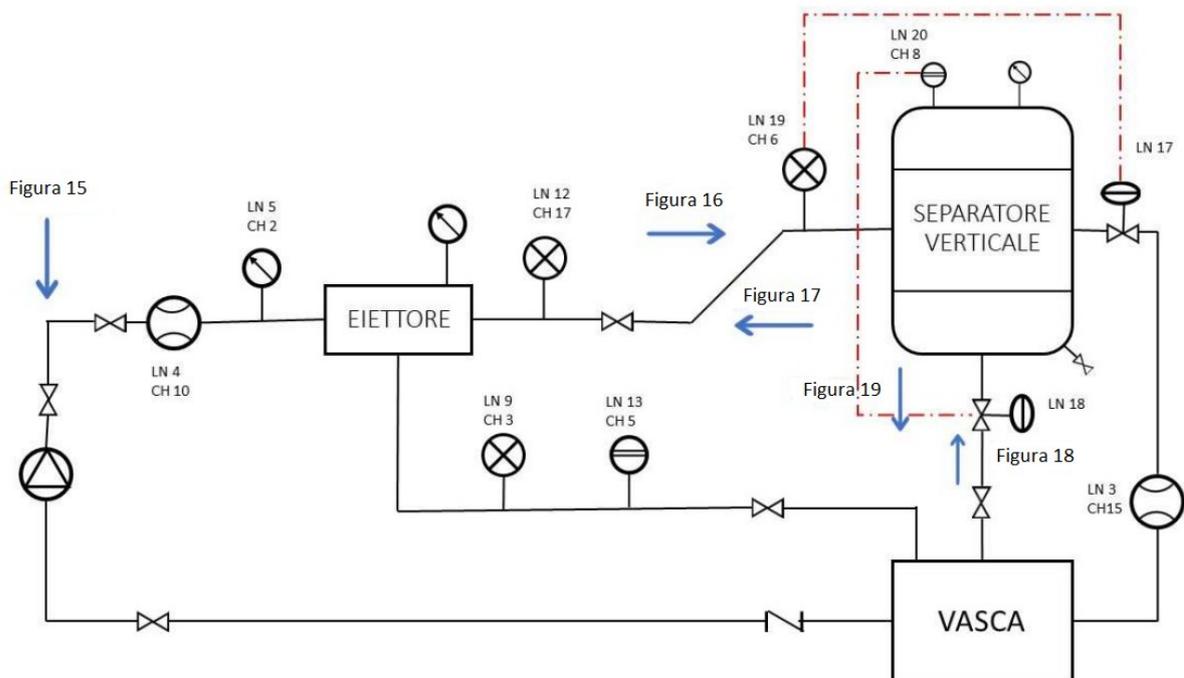


Figura 14. Schema semplificato



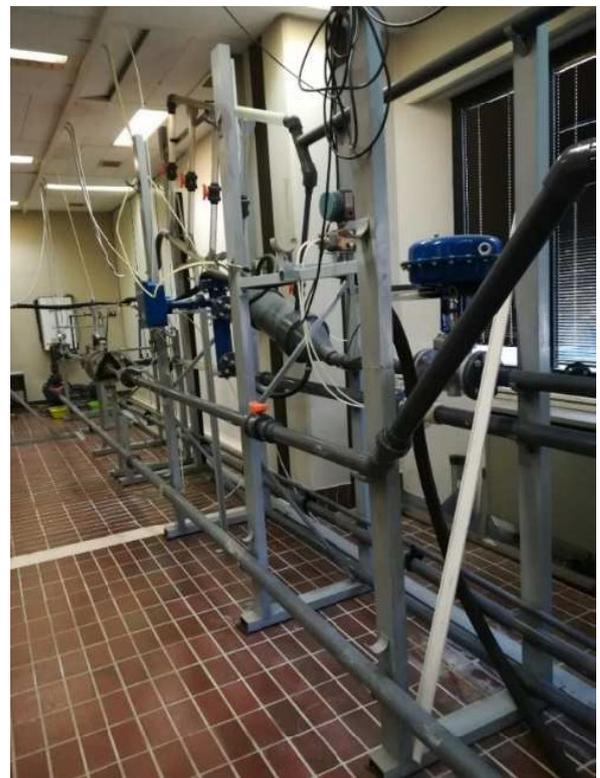
*Figura 15*



*Figura 16*



*Figura 17*



*Figura 18*



*Figura 19*

### **3.1.1 Misuratori di portata**

*a) Fischer Porter Mini Mag X serie: 10D1475*



*Figura 20*



*Figura 21*

Rilevatore elettromagnetico di portata di liquido. Il misuratore utilizza le caratteristiche di un liquido conduttivo per generare una tensione indotta direttamente proporzionale alla portata. Può essere usato per liquidi per non omogenei. Viscosità e densità del liquido misurato non hanno effetto sull'accuratezza della misura.

**Caratteristiche generali:**

- Portata massima: 70 m<sup>3</sup>/h
- Diametro: 50 mm
- Segnale in uscita: 4 - 20 mA
- Fattore k: 1367 litri/minuto
- Velocità massima (in 70 m<sup>3</sup>/h): 8.67 m/s
- Sezione: 1.96x10<sup>(-3)</sup> m<sup>2</sup>
- Tensione: 1 - 5 volts

%	m/s	Volt teorici	Volt reali
100	8.67	5.00	5.00
69.2	6	3.76	3.76
57.6	5	3.30	3.30
34.6	3	2.38	2.38
23	2	1.92	1.98
11.5	1	1.46	1.45
5.7	0.5	1.23	1.22
3.4	0.3	1.13	1.13
1.1	0.1	1.04	1.00
0	0	1.00	1.00

*Figura 22. Curva di taratura*

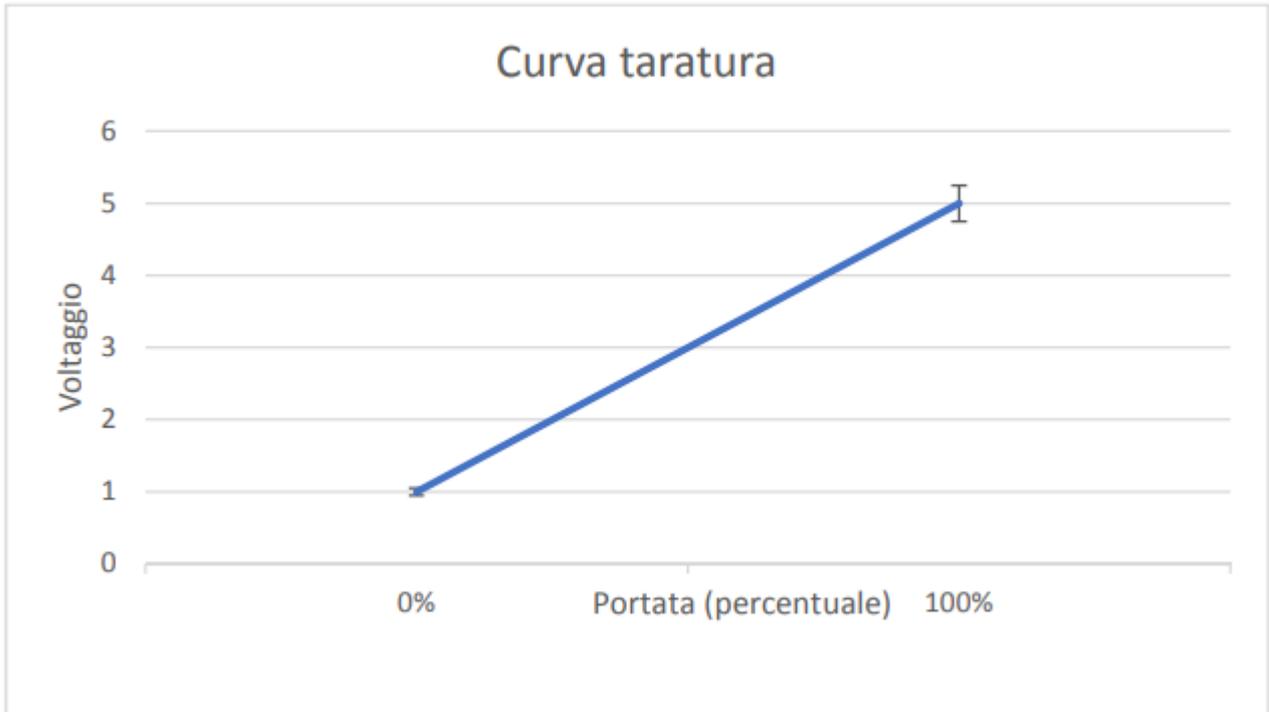


Figura 23

b) Foxboro Vortex DN 40 E83 W-02SSIT



Figura 24

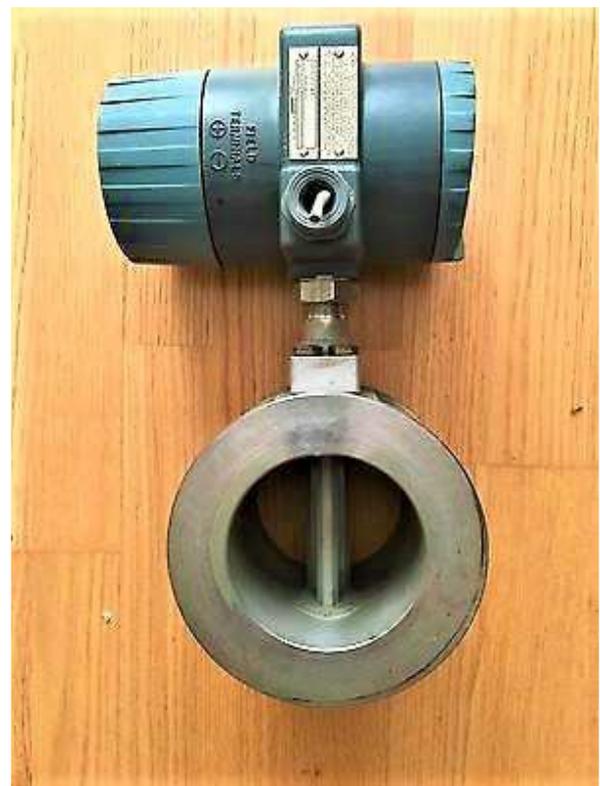
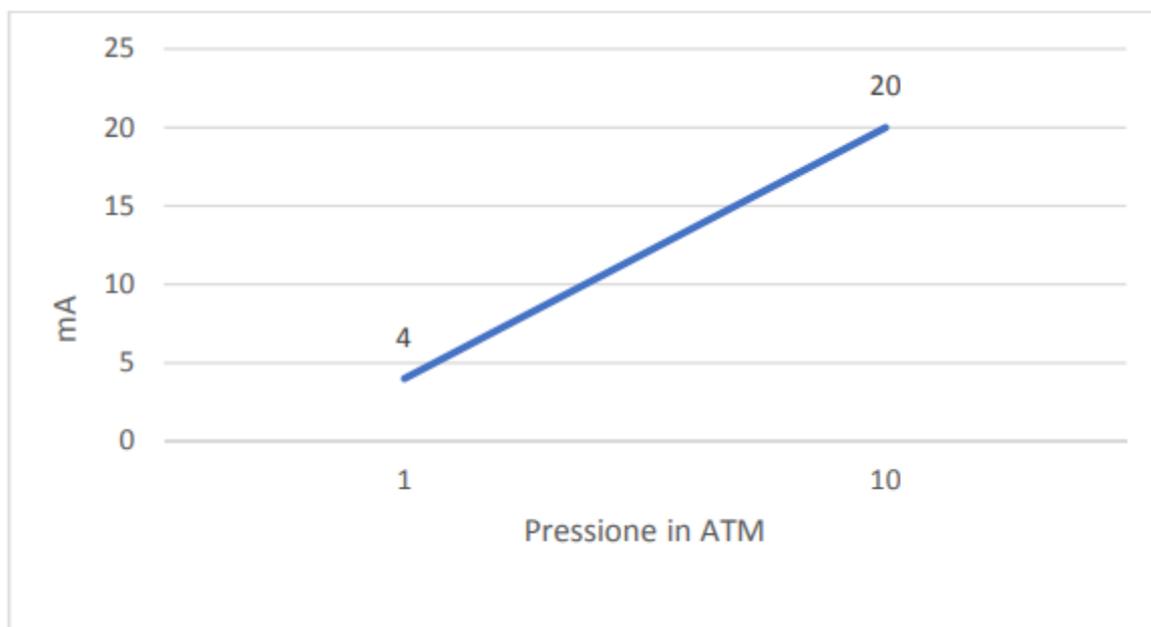


Figura 25

Misura la portata del fluido usando il principio del distacco a vortice. Il suo funzionamento si basa sulla scia di Karman. Su entrambi i lati di un corpo deflettore lambito dal fluido, si formano vortici alternati; questi vortici si distaccano a causa del trascinamento operato dal fluido in moto e si forma la cosiddetta scia di Karman. La frequenza con cui si distaccano i vortici è direttamente proporzionale alla velocità del flusso e inversamente proporzionale alla larghezza del corpo deflettore. Le variazioni di pressione locali derivanti dal distacco dei vortici vengono rilevate da un sensore piezoelettrico e convertite in impulsi elettrici in base alla frequenza di distacco dei vortici. Produce un segnale analogico da 4 a 20 mA proporzionale alla portata volumetrica.

### **Caratteristiche generali:**

- Voltaggio: 24 Volt AC
- Segnale in uscita: 4 - 20 mA
- Pressione operativa massima: 1500 psi
- Massima temperatura: 200° C (400° F)
- Diametro: 40mm
- Portata: 0 - 200 m<sup>3</sup>/h



*Figura 26. Curva di taratura*

### 3.1.2 Trasduttori di pressione

a) Foxboro 841-GM seriale: C44944G1



Figura 27

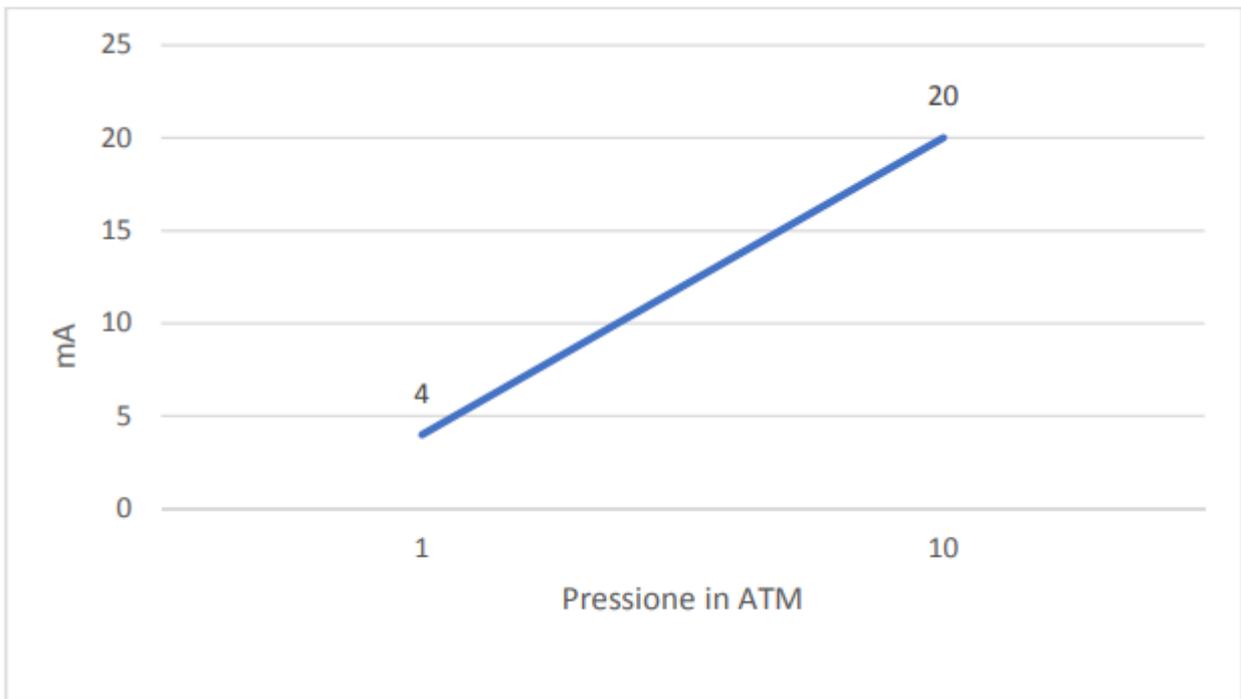


Figura 28

Un trasduttore di pressione converte la pressione in un segnale elettrico analogico. La conversione di pressione in un segnale elettrico viene ottenuta dalla deformazione fisica degli estensimetri connessi alla membrana del trasduttore di pressione e cablati in una configurazione a ponte di Wheatstone. La pressione applicata al trasduttore di pressione produce una flessione del diaframma che a sua volta porta alla deformazione degli estensimetri. La deformazione produrrà un cambiamento della resistenza elettrica proporzionale alla pressione dando un segnale in uscita da 4 a 20 mA in DC.

#### Caratteristiche generali:

- Range Pressione: 0 - 10 Bar
- Uscita segnale: 4 - 20 mA
- Pressione operativa massima: 300 psi
- Alimentazione: 12.5 - 36 Volts in DC
- Temperatura massima: 120°C
- Diametro: 50mm



*Figura 28. Curva di taratura*

*b) Foxboro IDP-10*



*Figura 29*

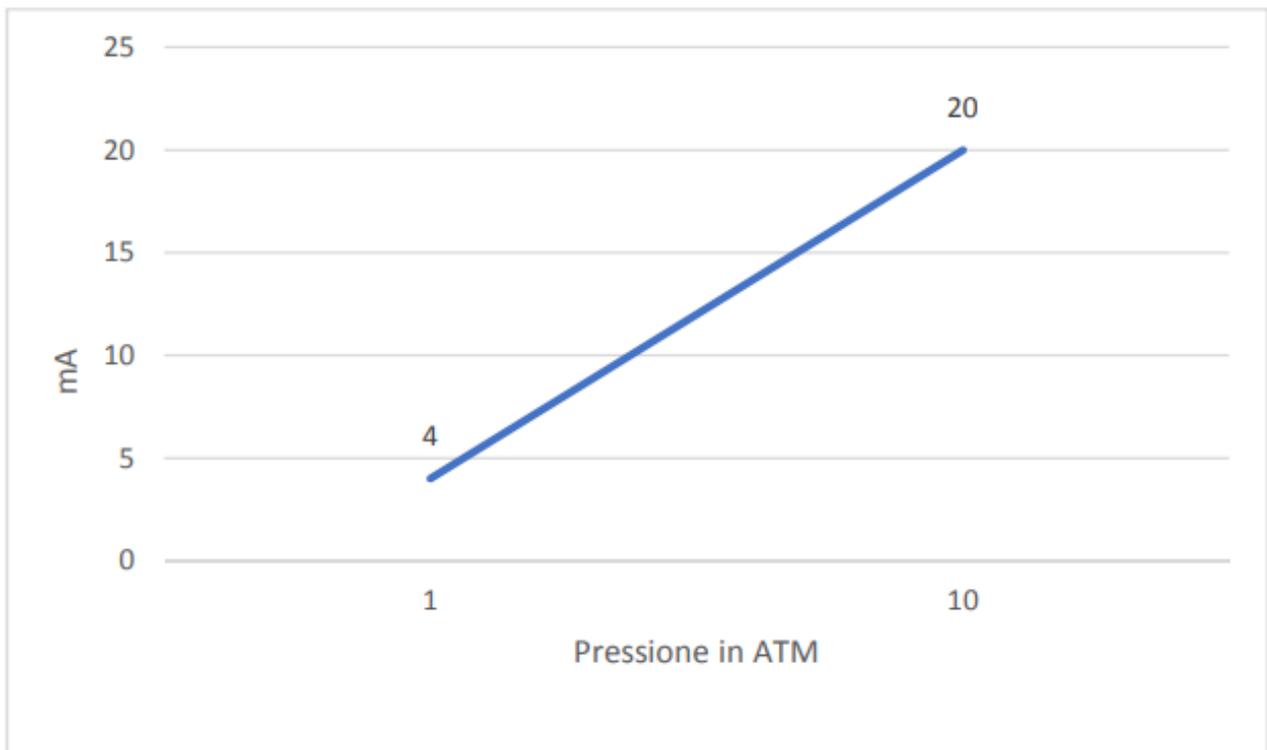


*Figura 30*

Trasmittitore di pressione differenziale intelligente. Misura la differenza tra 2 pressioni applicate ai lati opposti di un microsensore di estensimetri al silicio all'interno del sensore. Questo microsensore converte la pressione differenziale in un cambiamento di resistenza, che viene quindi convertito in un segnale da 4 a 20 mA proporzionale alla pressione differenziale.

**Caratteristiche generali:**

- Range pressione: 0 - 10 Bar
- Segnale in uscita: 4 - 20 mA
- Alimentazione: 12.5 - 42 Volts in DC
- Pressione operativa massima: 250 Bar



*Figura 31. Curva di taratura*

c) Foxboro 823-DP seriale: C4456761



Figura 32

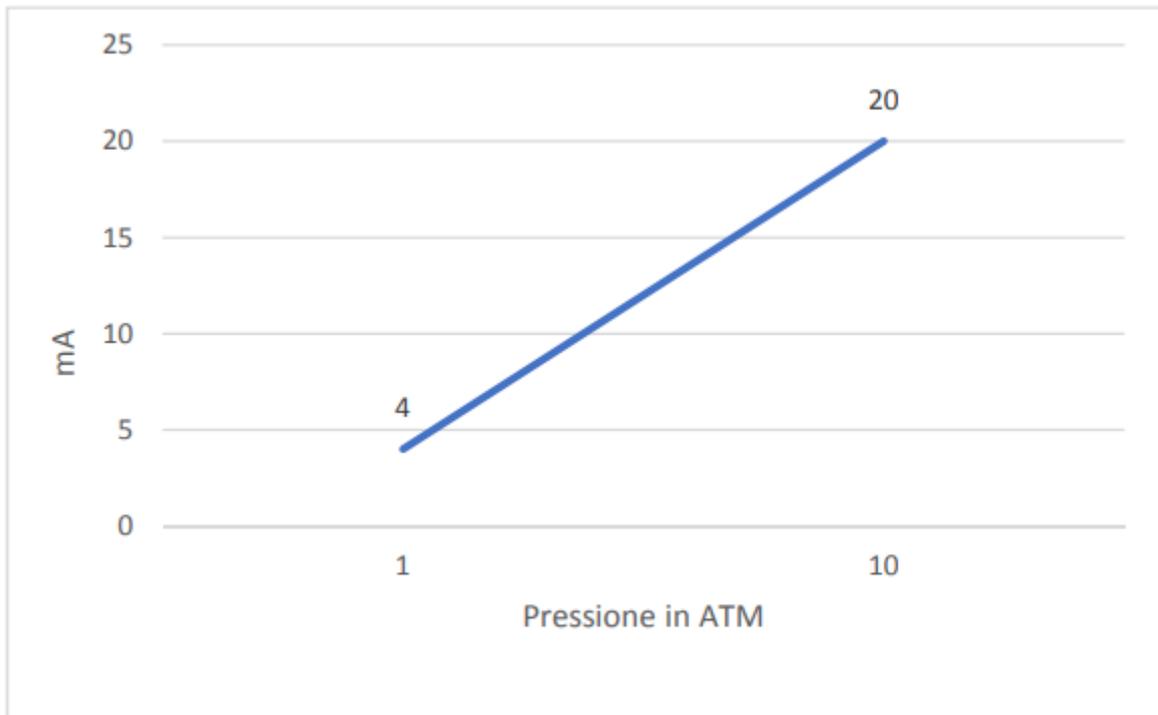


Figura 33

Un trasduttore di pressione converte la pressione in un segnale elettrico analogico. La conversione di pressione in un segnale elettrico viene ottenuta dalla deformazione fisica degli estensimetri connessi alla membrana del trasduttore di pressione e cablati in una configurazione a ponte di Wheatstone. La pressione applicata al trasduttore di pressione produce una flessione del diaframma che a sua volta porta alla deformazione degli estensimetri. La deformazione produrrà un cambiamento della resistenza elettrica proporzionale alla pressione dando un segnale in uscita da 4 a 20 mA in DC.

**Caratteristiche generali:**

- Segnale in uscita: 4 – 20 mA
- Massima pressione esercizio: 3000 psi
- Alimentazione: 12.5 – 65 Volts in DC



*Figura 34. Curva di taratura*

*d) Setra E280 250 psi (2 sensori) seriale: (172531) e (292249)*



*Figura 35*



*Figura 36*

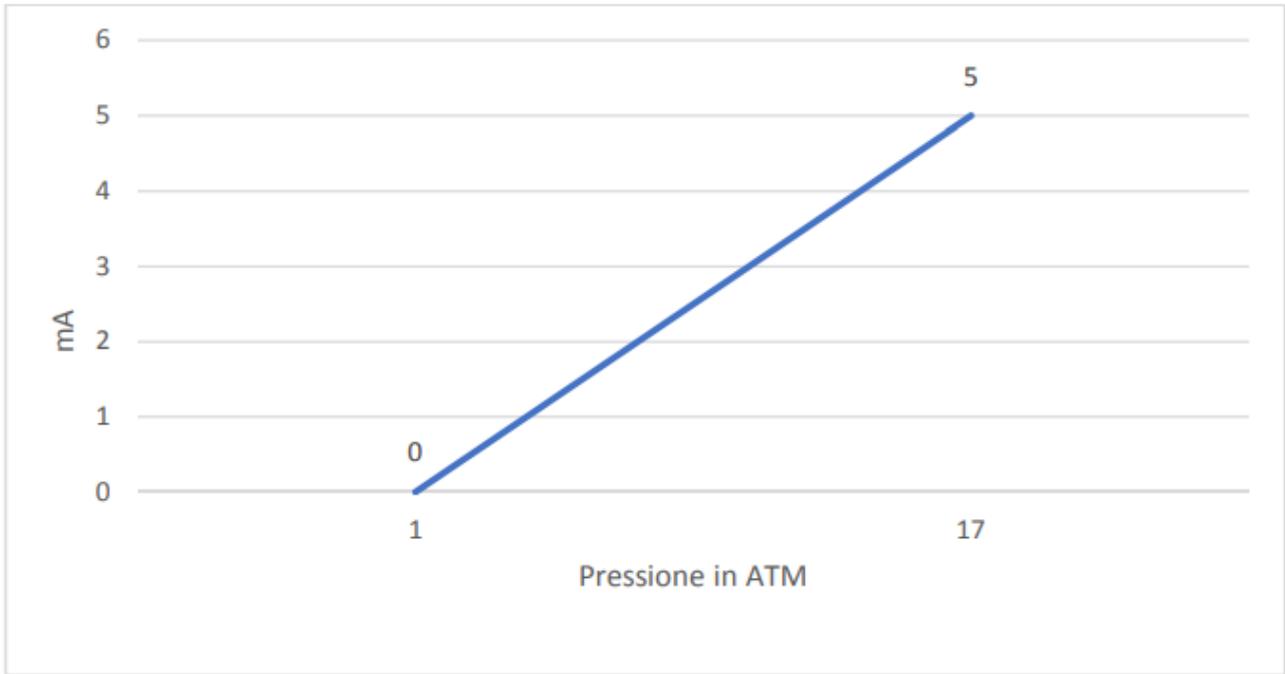


*Figura 37*

Sensore di pressione in acciaio inox 17-4 PH con un elettrodo isolato che forma un condensatore variabile. All'aumentare della pressione la capacità diminuisce. La variazione di capacità viene rilevata e convertita in un segnale in uscita DC lineare. Il segnale in uscita è da 0 a 5 Volts.

**Caratteristiche generali:**

- Segnale in uscita: 0 - 5 Volts in DC
- Alimentazione: 15 - 32 Volts in DC
- Range Pressione: 0 - 250 psi



*Figura 38. Curva di taratura*

e) *Setre 280E 100 psi seriale: 122860*

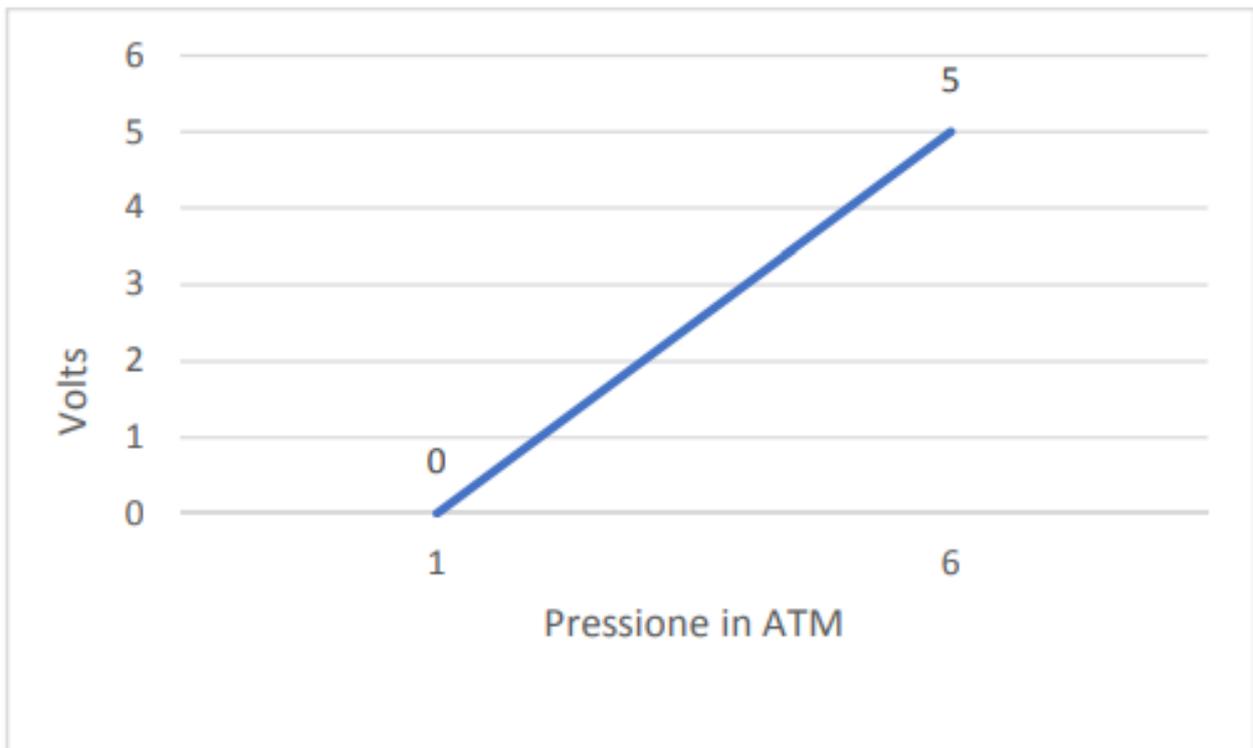


*Figura 39*

Sensore di pressione in acciaio inox 17-4 PH con un elettrodo isolato che forma un condensatore variabile. All'aumentare della pressione la capacità diminuisce. La variazione di capacità viene rilevata e convertita in un segnale in uscita DC lineare. Il segnale in uscita è da 0 a 5 Volts.

**Caratteristiche generali:**

- Segnale in uscita: 0 - 5 Volts in DC
- Alimentazione: 15 - 32 Volts in DC
- Range Pressione: 0 - 100 psi



*Figura 40. Curva di taratura*

### 3.1.3 Componenti impianto

#### a) *Pompa centrifuga monoblocco Vergani 32-201*



*Figura 41*

*Figura 42*

Pompa centrifuga monoblocco flangiata direttamente al motore. Il corpo è diviso verticalmente, con la bocca aspirante assiale e quella premente radiale rivolta verso l'alto; l'albero motore prolungato è supportato da cuscinetti a sfere lubrificati a grasso e che non necessitano di lubrificazione periodica. La girante è calettata direttamente sull'albero motore.

#### **Caratteristiche generali:**

- Giri al minuto: 2900 rpm
- Capacità: 233 litri/minuto
- Portata: 14 m<sup>3</sup>/h
- Potenza: 7.5 Kw
- Prevalenza: 54.25 m

POMPA RO 32-200

2900 giri/min  
RPM

GIRANTE: max/min  $\varnothing$  209/165 mm - previsto  $\varnothing$  mm    Peso spec. - Visc.

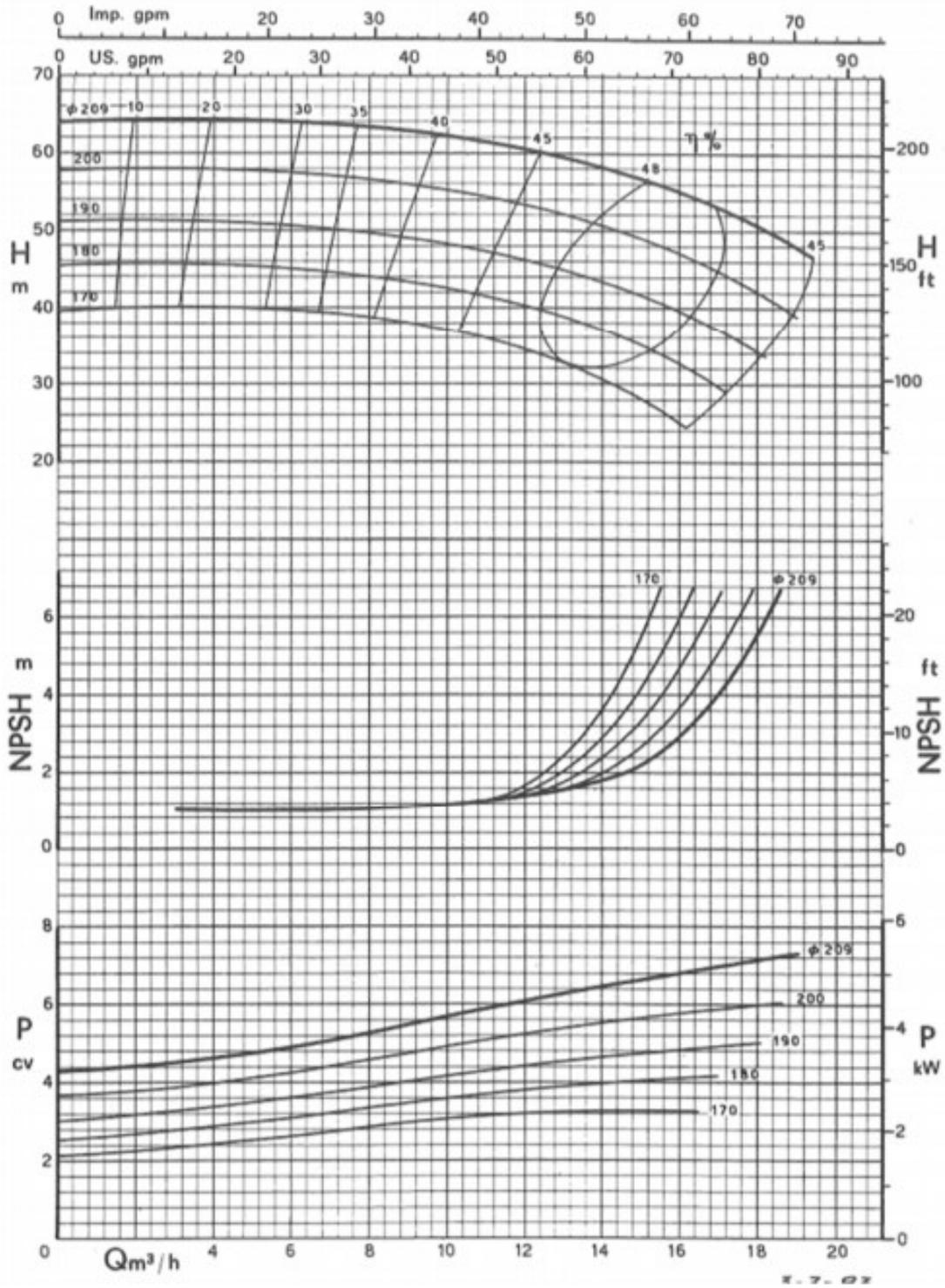


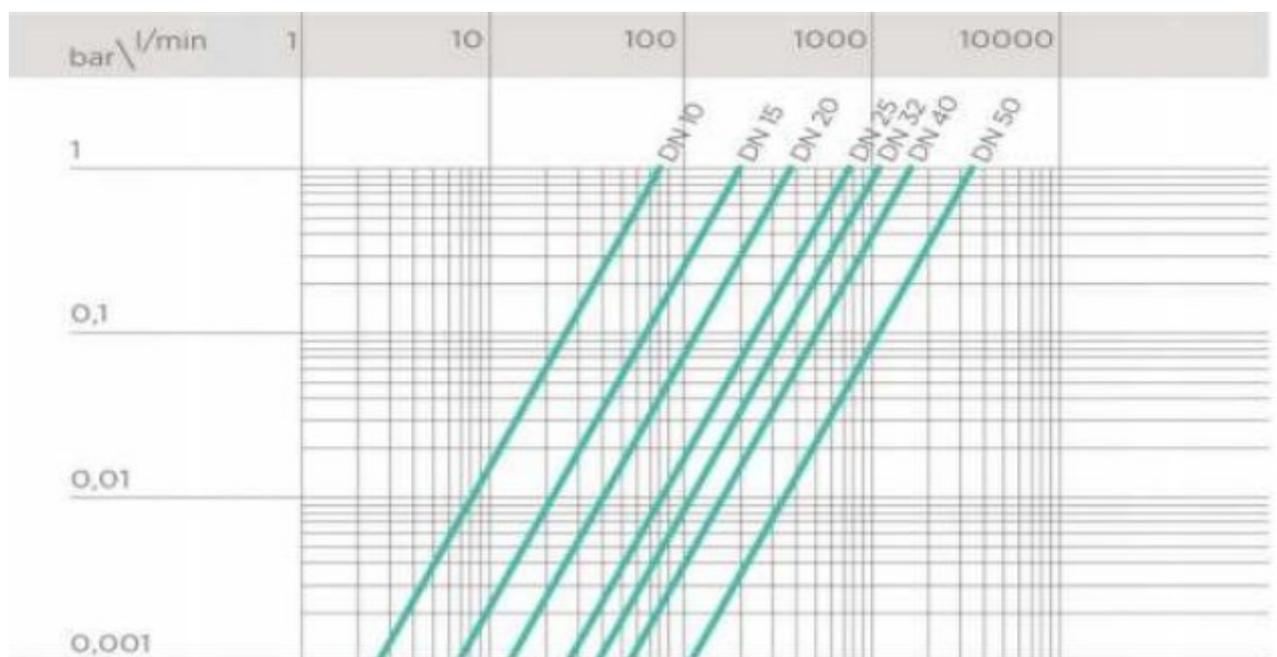
Figura 43. Curva caratteristica della pompa

b) Valvola intercettazione 2 vie FIP DN 50 PN 16 (x7 pezzi)



Figura 44

Figura 45



DN	10	15	20	25	32	40	50
$K_v$ 100 l/min	80	200	385	770	1110	1750	3400

Figura 45. Diagramma delle perdite di carico

### **Coefficiente di flusso Kv100:**

Per coefficiente di flusso Kv100 si intende la portata Q in litri al minuto di acqua a 20°C che genera una perdita di carico  $\Delta p = 1$  bar per una determinata posizione della valvola. I valori Kv100 indicati in tabella si intendono per valvola completamente aperta. L'otturatore è costituito da una sfera forata che ruotando attorno all'asse principale intercetta il fluido facendo tenuta su anelli di opportuno materiale (elastomero).

### **Caratteristiche generali:**

- Materiale: PVC-U
- Campo di temperatura: 0 - 60°C
- Diametro esterno: 63 mm
- Pressione nominale: PN 16 con acqua a 20°C

#### *c) Tubi in PVC-U PN 16*

Il PVC-U rappresenta una fra le soluzioni economicamente più valide nel campo dei materiali termoplastici e metallici per risolvere i problemi che si incontrano nel trasporto dei fluidi corrosivi industriali, e nella distribuzione-trattamento delle acque in genere. I motivi fondamentali di questa preferenza sono da attribuirsi alle peculiari caratteristiche della resina, di cui si possono citare:

- Il PVC-U è generalmente inerte alla maggior parte delle soluzioni di acidi, alcoli e sali, ed idrocarburi paraffinici / alifatici.
- Virtuale eliminazione dei problemi di condensazione e contenuta perdita di calore nel trasporto di fluidi caldi grazie ad un ridotto coefficiente di conducibilità termica ( $\lambda = 0,15 \text{ W/m}^\circ \text{ C}$  secondo ASTM C177).
- Bassa permeabilità all'ossigeno e ridotto assorbimento d'acqua (0,1% a 23°C secondo ASTM D 570).

### **Caratteristiche generali:**

- Diametro esterno: 63 mm
- Spessore: 4.7 mm
- Diametro interno: 53.6 mm
- Materiale: PVC-U (polivinilcloruro-non plastificato)

d) *Serbatoio Elbi 780-I*



*Figura 46*

Serbatoio adatto all'accumulo di acqua in pressione. Vi sono collegati un manometro meccanico a tubo di Bourdon per monitorare la pressione e una valvola di sicurezza a molla, tarata, secondo la normativa, ad una pressione del 10% minore del valore  $P_{max}$  di prova.

**Caratteristiche generali:**

- Capacità: 780 litri
- Pressione massima: 10 atm (9.8 bar)
- Temperatura esercizio: -10, +50°C
- Materiale: acciaio zincato

e) *Valvola di regolazione dell'acqua e dell'aria (x2) ECKARDT MB 6 713 con attuatore pneumatico MB 6986*



*Figura 47*

Il posizionario elettropneumatico è usato come attuatore diretto della valvola dando in uscita un segnale analogico da 0/4 - 20 mA. È costituito da un piatto con membrana di gomma che riceve nella parte superiore la pressione di comando. La forza generata da tale pressione viene contrastata da una molla sottostante che dà il rapporto di proporzionalità tra la stessa pressione e la corsa della membrana. Lo stelo è vincolato meccanicamente alla membrana. Si realizza quindi in modo sicuro e semplice il posizionamento relativo otturatore-sede tramite il segnale di comando.

f) Eiettore



*Figura 48*

L'eiettore (o pompa Venturi) è una macchina statica che permette l'innalzamento della pressione di un fluido. Si può dunque dire che funzioni come una pompa o come un compressore. All'interno dell'eiettore ci sono due fluidi, che possono essere di natura uguale o diversa: il fluido motore (fluido primario), che apporta l'energia necessaria per l'aspirazione del fluido di alimentazione, e il fluido d'alimentazione stesso (fluido secondario).

Il fluido motore, solitamente acqua, entra dal relativo bocchello e dopo averlo attraversato incontra l'ugello convergente. All'uscita dall'ugello, il fluido motore si trova nel mezzo della camera vapore. L'ugello convergente è un condotto che ha una sezione che si restringe e al diminuire della pressione si ha un aumento della velocità, per la conservazione della portata, e di conseguenza anche una diminuzione di pressione. E quindi, secondo il teorema di Bernoulli, l'energia statica di pressione viene convertita in energia cinetica. In altre parole a scapito di un abbassamento di pressione si ha una discreta accelerazione cioè un forte aumento di velocità.

Il fluido fuoriuscito dall'ugello è caratterizzato da un'alta velocità tale per cui secondo l'effetto Venturi, si crea una depressione nella camera di miscelazione. Questa depressione promuove l'ingresso del fluido di aspirazione. Una volta miscelati, l'elevata quantità di moto del fluido motore si trasmette al fluido di alimentazione che

ha bassa quantità di moto. Attraverso il cono divergente del diffusore, la miscela viene rallentata e l'energia cinetica è riconvertita in energia statica di pressione. Il fluido miscelato attraversa il diffusore e in uscita il fluido ha una pressione maggiore. La Figura 49 semplifica la compressione del percorso acqua-aria.

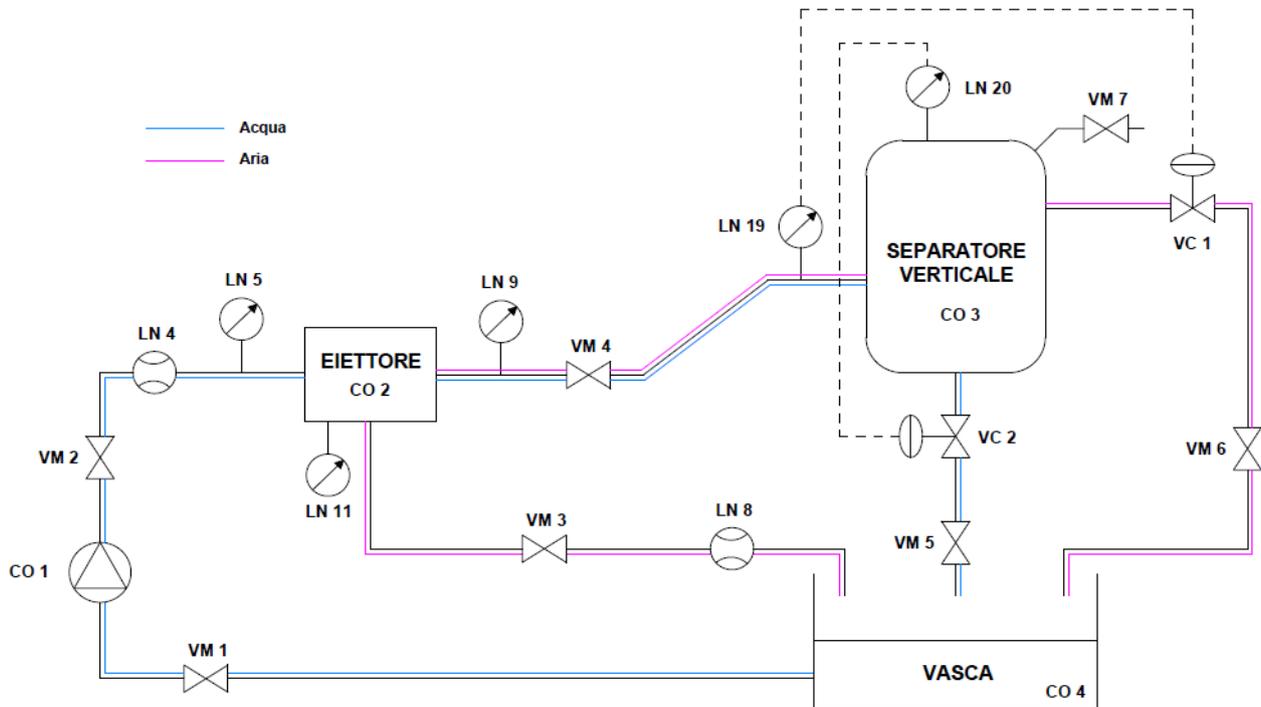


Figura 49. Schema semplificato percorso acqua-aria

### 3.2 Carta di controllo T2 di Hotelling

La statistica T2 di Hotelling è un approccio molto comune nelle carte di controllo multivariate. Una carta di controllo basata sulla statistica T2 tiene conto della struttura di correlazione presente nella popolazione ottenendo un miglioramento rispetto al contributo dato dalle carte univariate al monitoraggio di un processo (Mason, Tracy, Young, 1992).

La statistica sulla quale si basa la carta di controllo è la distanza di Mahalanobis, definita come:

$$T^2(X_i) = (X_i - \hat{\mu})^T \hat{\Sigma}^{-1} (X_i - \hat{\mu})$$

dove  $X_i$  è un vettore casuale contenente le osservazioni sulle  $p$  variabili fatte nell'istante  $i$ -esimo,  $\mu$  e  $\Sigma$  sono le stime dei parametri di luogo e scala rispettivamente. Se  $X_i$  si distribuisce come una normale  $p$ -variata con vettore delle medie  $\mu$  e matrice di varianza e covarianza  $\Sigma_{p \times p}$ , allora  $T^2(X_i)$  si distribuisce come un  $\chi^2$  con  $p$  gradi di libertà (Johnson e Wichern, 2002).

La forma generale di una statistica  $T^2$  si ottiene sostituendo  $\hat{\mu}$  e  $\hat{\Sigma}$  con il vettore medio campionario e la matrice di varianza e covarianza campionaria ( $S$ ) rispettivamente. La classica  $T^2$  di Hotelling è dunque definita allora come:

$$T^2(X_i) = (X_i - \bar{X})^T S^{-1} (X_i - \bar{X})$$

dove

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad , \quad S = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(X_i - \bar{X})^T$$

Ci sono due fasi distinte nel disegno della carta. La prima fase, definita come Fase I, consiste in un'analisi retrospettiva del processo per verificare che questo sia in controllo. Questa fase di avvio della sorveglianza del processo consiste nell'estrarre campioni di osservazioni in determinati istanti di tempo da un processo produttivo ritenuto in controllo e nello stimare i limiti della carta di controllo da applicare nella Fase II. La seconda fase consiste dunque nell'utilizzare la carta di controllo per individuare ogni deviazione dal processo man mano che le osservazioni future vengono rilevate.

La statistica multivariata  $T^2$  è utilizzata spesso come carta statistica per entrambe le fasi di controllo, come verrà riportato nel seguito del modello.

La distribuzione di  $T^2(X_i)$  viene approssimata (vedi Jackson(1985) o Ryan (1989)) ad una distribuzione Chi-quadro o ad una distribuzione F per ottenere i limiti di controllo. In particolare se si assume che le stime  $\bar{X}$  e  $S$  coincidono con i veri parametri della popolazione  $\mu$  e  $\Sigma$  rispettivamente, allora si può dimostrare (Seber (1984)) che la statistica  $T^2(X_i)$  è distribuita come un Chi-quadro con  $p$  gradi di libertà. In questo caso il limite di controllo inferiore e superiore saranno rispettivamente:

$$LCL = \chi^2(1 - \alpha/2; p)$$

$$UCL = \chi^2(\alpha/2; p)$$

dove  $\chi^2(\alpha/2; p)$  è il percentile di livello  $1 - \alpha$  della distribuzione Chi-quadro con  $p$  gradi di libertà.

Se si assume che la  $i$ -esima osservazione  $X_i$  è indipendente da  $\bar{X}$  e  $S$ , allora la statistica  $T^2(X_i)$  si distribuisce come una  $F$  con  $p$  e  $n-p$  gradi di libertà. In questo caso i limite di controllo inferiore e superiore sono pari rispettivamente a:

$$LCL = \frac{p(n-1)(n+1)}{n(n-p)} F(1-\alpha/2; p, n-p)$$

$$UCL = \frac{p(n-1)(n+1)}{n(n-p)} F(\alpha/2; p, n-p)$$

dove  $F(\alpha; p, n-p)$  è il percentile di livello  $1 - \alpha$  di una distribuzione  $F$  con  $p$  e  $n-p$  gradi di libertà.

Una volta disegnata la carta, i valori che superano le soglie  $LCL$  e  $UCL$  sono esclusi dalla popolazione di riferimento e i limiti vengono ricalcolati sulla base dei campioni rimanenti. In molte situazioni il limite di controllo inferiore ( $LCL$ ) è posto uguale a zero.

$$UCL = \frac{p \cdot (n+1) \cdot (n-1)}{n \cdot (n-p)} \cdot F_{(1-\alpha, p, n-p)}$$

$$LCL = 0$$

La ragione di questo è che qualsiasi shift in media porterà ad un incremento della statistica  $T^2(X_i)$ , e quindi l' $LCL$  può essere ignorato. Comunque,  $T^2(X_i)$  è sensibile non solo ai cambiamenti nel vettore medio ma anche ai cambiamenti nella matrice delle covarianze dei dati. Se la matrice delle covarianze cambia, si dovrebbero ottenere valori molto piccoli di  $T^2(X_i)$ . Da qui la decisione di scegliere un  $LCL$  diverso da zero per individuare questi tipi di cambiamenti. Va notato che grandi cambiamenti di  $T^2(X_i)$  possono anche essere causati da cambiamenti nella matrice delle covarianze e non solo da cambiamenti nel vettore delle medie (Hawkins (1991)).

Un valore della statistica  $T^2(X_i)$  significativamente elevato potrebbe essere dovuto alla presenza di una variabilità casuale estremamente alta oppure alla possibilità che le componenti principali considerate nel modello non siano riuscite a individuare e a spiegare tutte o nuove fonti di instabilità. Una strada da intraprendere, in questo caso,

per indagare sulla natura dei fuori controllo potrebbe essere quella che prevede di analizzare i residui di ciascuna delle variabili presenti nel modello.

Le carte di controllo possono talvolta funzionare in maniera poco efficiente: una prima giustificazione è data dal fatto che la statistiche  $T^2$ , quando risulta entro i limiti di controllo, non è in grado di individuare cambiamenti nelle correlazioni tra le variabili di processo. Il secondo ostacolo può essere rappresentato dalla presenza di autocorrelazione all'interno delle variabili.

### 3.3 Sviluppo del modello

L'obiettivo di questo lavoro consiste nell'implementare un modello di manutenzione predittiva che riduca i guasti, massimizzi il tempo di vita del cuscinetto e dunque della macchina in generale.

Dunque, prima di tutto abbiamo bisogno di un algoritmo che predica quando il nostro impianto si romperà e necessiterà di manutenzione. Di seguito viene illustrato il flusso di lavoro per fare manutenzione predittiva.



*Figura 48. Flusso di lavoro per fare manutenzione predittiva*

Lo sviluppo dell'algoritmo inizia con i dati che descrivono il nostro sistema in un intervallo di condizioni di salute ed errore. I dati non elaborati sono preelaborati per portarli in una forma in cui si potrà estrarre indicatori di condizione. Queste sono caratteristiche che aiutano a distinguere condizioni di salute del macchinario da guasti. Si potrà poi utilizzare le caratteristiche estratte per costruire un modello di apprendimento automatico che può:

- Individuare anomalie
- Classificare le diverse tipologie di errori
- Stimare la vita utile rimanente (RUL) dell'impianto precedentemente illustrato

Infine, si procederà con lo sviluppo dell'algoritmo e l'integrazione all'interno del sistema per il monitoraggio e la manutenzione dell'impianto.

Nel nostro caso Matlab sarà il software utilizzato per l'implementazione del modello di degrado e la  $T^2$  di Hotelling sarà la statistica utilizzata per lo sviluppo dello stesso data la sua applicazione ai casi multivariati.

Il modello utilizzato per stimare la vita utile rimanente dell'impianto (RUL) comprende due fasi, in particolare:

## 1) Training

- a. Prendiamo in considerazione il dataset di regime stabile che monitora l'andamento di 9 indicatori illustrati nel capitolo 3.1 e lo andiamo a caricare in Matlab.

Il campione utilizzato per la definizione del limite  $T^2$  di Hotelling è stato realizzato prendendo 100 secondi (200 campioni) in ogni situazione di regime, per un totale di 300 secondi (600 campioni). In totale sono stati analizzati 20 dataset con guasto per la stima del RUL, simili a quelli riportati in Figura 49.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Time	LN4	LN19	LN20	LN8	LN5	LN11	LN9	VC1	VC2
2	70	11.0906	0.31317	269.475	34.8215	5.01538	-0.04637	0.10303	131	97
3	70.5	11.0906	0.31317	268.596	34.8822	4.99846	-0.04637	0.13717	131	95
4	71	11.0906	0.30034	268.596	35.0644	5.01538	-0.03944	0.1201	129	98
5	71.5	11.0167	0.30034	268.596	34.3356	5.01538	-0.04637	0.13717	133	96
6	72	11.0906	0.30034	269.475	34.1534	4.99846	-0.03944	0.1201	131	93
7	72.5	11.0906	0.28752	270.354	34.4571	4.99846	-0.03944	0.1201	131	93
8	73	11.0906	0.30034	270.354	34.6393	5.01538	-0.03944	0.10303	131	91
9	73.5	11.0906	0.31317	270.354	34.9429	5.01538	-0.03944	0.13717	128	94
10	74	11.0906	0.28752	270.354	35.1858	5.01538	-0.03944	0.1201	131	93
11	74.5	11.1646	0.28752	271.234	35.1251	5.01538	-0.04637	0.1201	131	92
12	75	11.0906	0.31317	270.354	34.8822	5.01538	-0.04637	0.1201	131	91
13	75.5	11.0906	0.30034	269.475	34.9429	4.99846	-0.04637	0.1201	131	92
14	76	11.0906	0.31317	267.716	35.0037	5.01538	-0.03944	0.08596	129	91
15	76.5	11.0906	0.28752	267.716	35.4895	5.04922	-0.04637	0.1201	130	96
16	77	11.0906	0.28752	268.596	35.7324	5.0323	-0.04637	0.1201	132	91
17	77.5	11.1646	0.28752	267.716	35.7324	5.01538	-0.0533	0.13717	132	94
18	78	11.0906	0.31317	267.716	35.7324	5.01538	-0.04637	0.10303	129	99
19	78.5	11.0906	0.30034	267.716	35.8539	5.01538	-0.0533	0.1201	133	93
20	79	11.0906	0.30034	266.837	35.7324	5.0323	-0.04637	0.13717	131	95
21	79.5	11.0906	0.28752	265.958	35.7324	5.01538	-0.04637	0.1201	131	99
22	80	11.0906	0.30034	267.716	35.6717	4.98154	-0.03944	0.1201	131	101
23	80.5	11.0906	0.28752	266.837	35.4895	5.01538	-0.04637	0.1201	132	97
24	81	11.0906	0.30034	268.596	35.0644	5.01538	-0.04637	0.13717	131	92
25	81.5	11.0906	0.31317	268.596	35.0037	5.0323	-0.04637	0.10303	131	96
26	82	11.1646	0.28752	269.475	35.1858	5.01538	-0.03944	0.1201	131	94

Figura 49. Dataset di regime stabile

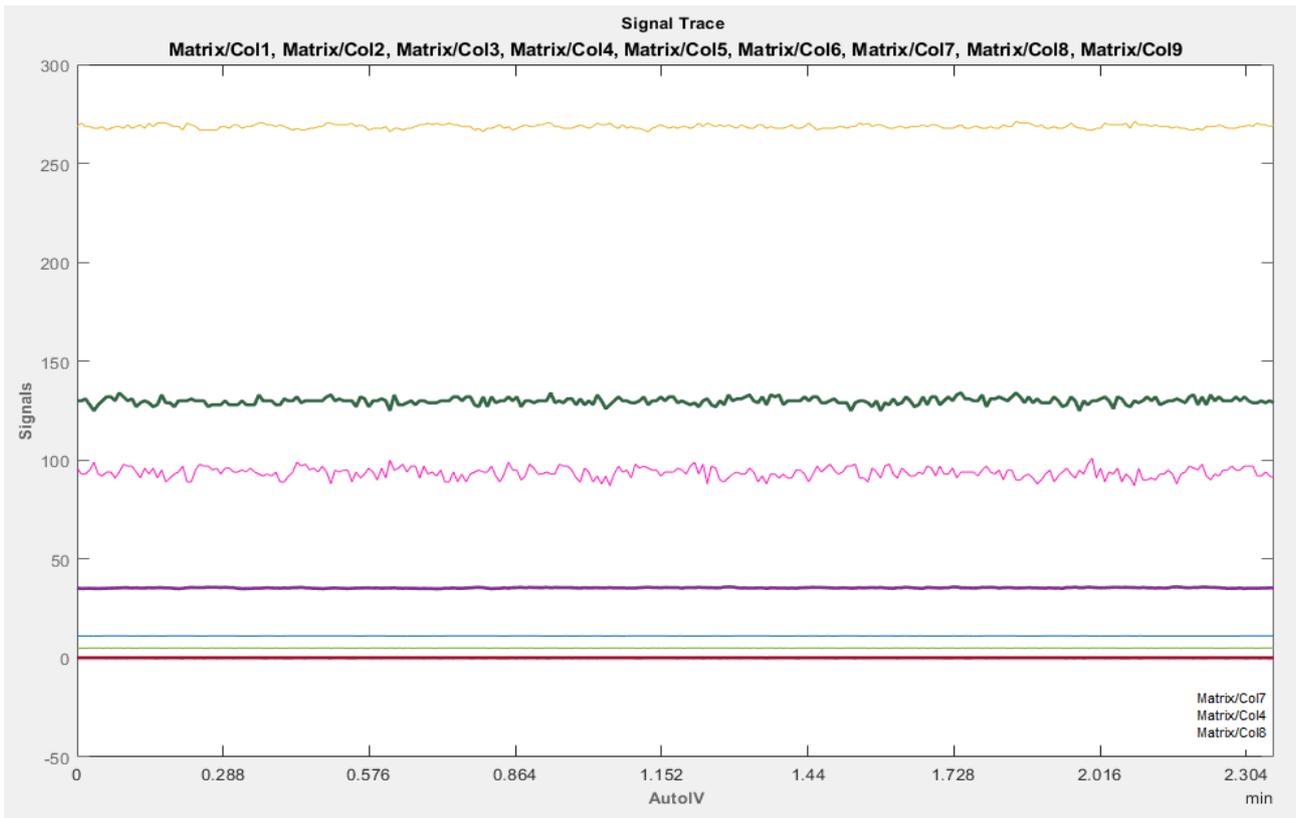


Figura 50. Dataset di regime stabile

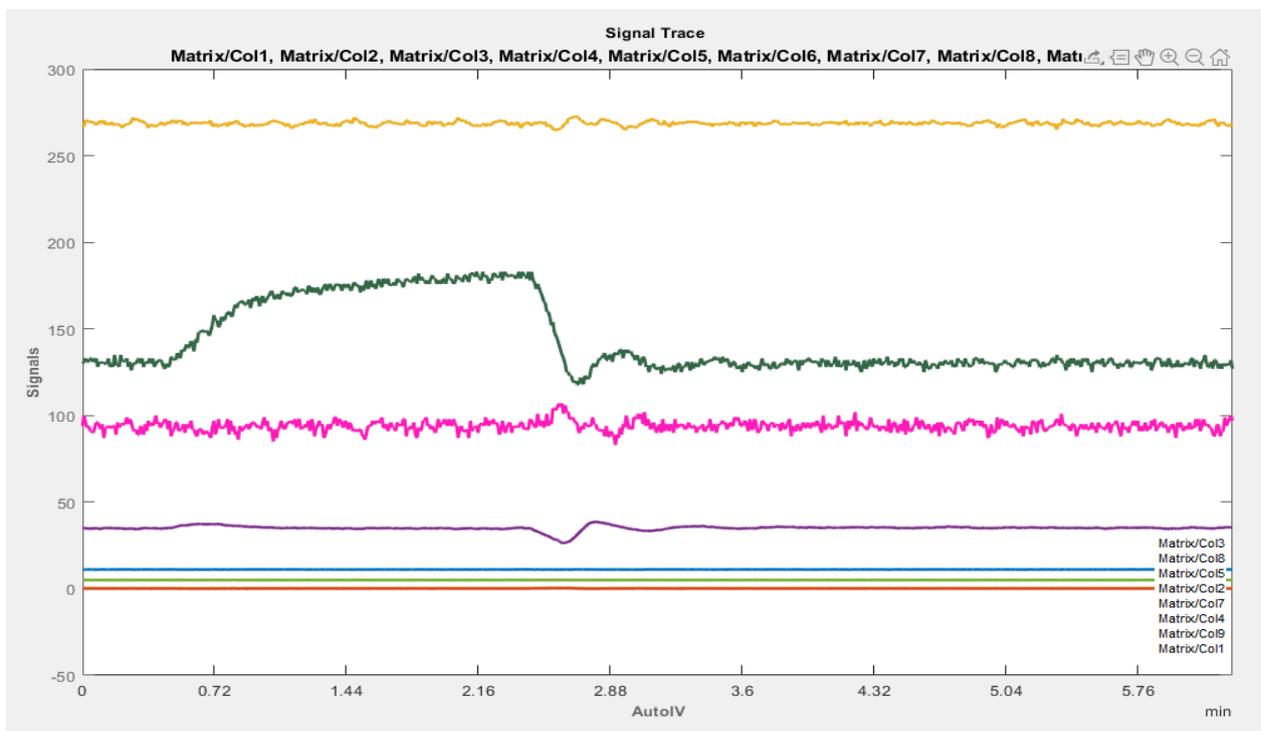


Figura 51. Dataset con guasto

Successivamente procediamo con la standardizzazione dei dati e dunque il calcolo del valore medio e deviazione standard per permettere di semplificare il confronto con i 20 datasets che giungono a rottura.

```

1
2     % datasetTraining : dataset di regime stabile
3     % datasetTest: dataset con anomalie
4
5     % fase di training
6
7 -   [datasetTrainingSt,MU,SIGMA] = zscore(datasetTraining);
8     % datasetTrainingSt: dataset di regime stabile standardizzato
9
10 -   CorM=corr(datasetTrainingSt); %matrice di correlazione
11
12 -   T2S=[]; %t2 di regime
13 -   for i=1:size(datasetTrainingSt,1)
14 -       T2S(i,1)=datasetTrainingSt(i,:)*CorM*datasetTrainingSt(i,:);
15 -   end
16
17     %calcolo limite
18 -   alpha=0.05; %costante di confidenza
19
20 -   p = size(datasetTrainingSt,2);
21 -   m = size(datasetTrainingSt,1);
22 -   f= finv(1-alpha,p,m-p);
23 -   f_lim = ((p*(m-1))/(m-p))*f; %limite T2 hotelling
24

```

*Figura 52. Training*

- b. Calcolo della  $T^2$  di Hotelling che necessita la conoscenza della matrice di correlazione  $S$ , come mostrato dalla seguente formula, dove la  $X_i$  rappresenta il nostro dataset che andiamo a confrontare con il valore medio  $\bar{X}$ .

$$T^2(X_i) = (X_i - \bar{X})^T S^{-1} (X_i - \bar{X})$$

- c. Successivamente procediamo con il calcolo dei limiti, in particolare quello superiore, impostando il valore della costante di confidenza  $\alpha$  a 0,05.

$$UCL = \frac{p \cdot (n + 1) \cdot (n - 1)}{n \cdot (n - p)} \cdot F_{(1-\alpha, p, n-p)}$$

$$LCL = 0$$

## 2) Test

- a. Si procede al caricamento in Matlab del dataset compreso di guasti. Vengono standardizzati i dati e calcolate le  $T^2$  di Hotelling utilizzando la matrice di correlazione  $S$  ottenuta nella precedente fase di Training.

```

27 %standardizzo i test
28 datasetTestSt=(datasetTest-repmat(MU,size(datasetTest,1),1))./repmat(SIGMA,size(datasetTest,1),1);
29
30 % datasetTestSt: dataset di test standardizzato
31
32 T2testS=[]; %t2 di test
33 for i=1:size(datasetTestSt,1)
34     T2testS(i,1)=datasetTestSt(i,:)*CorM*datasetTestSt(i,:);
35 end

```

*Figura 53. Test*

- b. Costruzione della carta di controllo  $T^2$  Hotelling e verifica della fuoriuscita dal limite delle varie  $T^2$  calcolate nella fase di Test.
- c. Creazione dei vari dati per l'analisi con le  $T^2$  calcolate fino al limite.

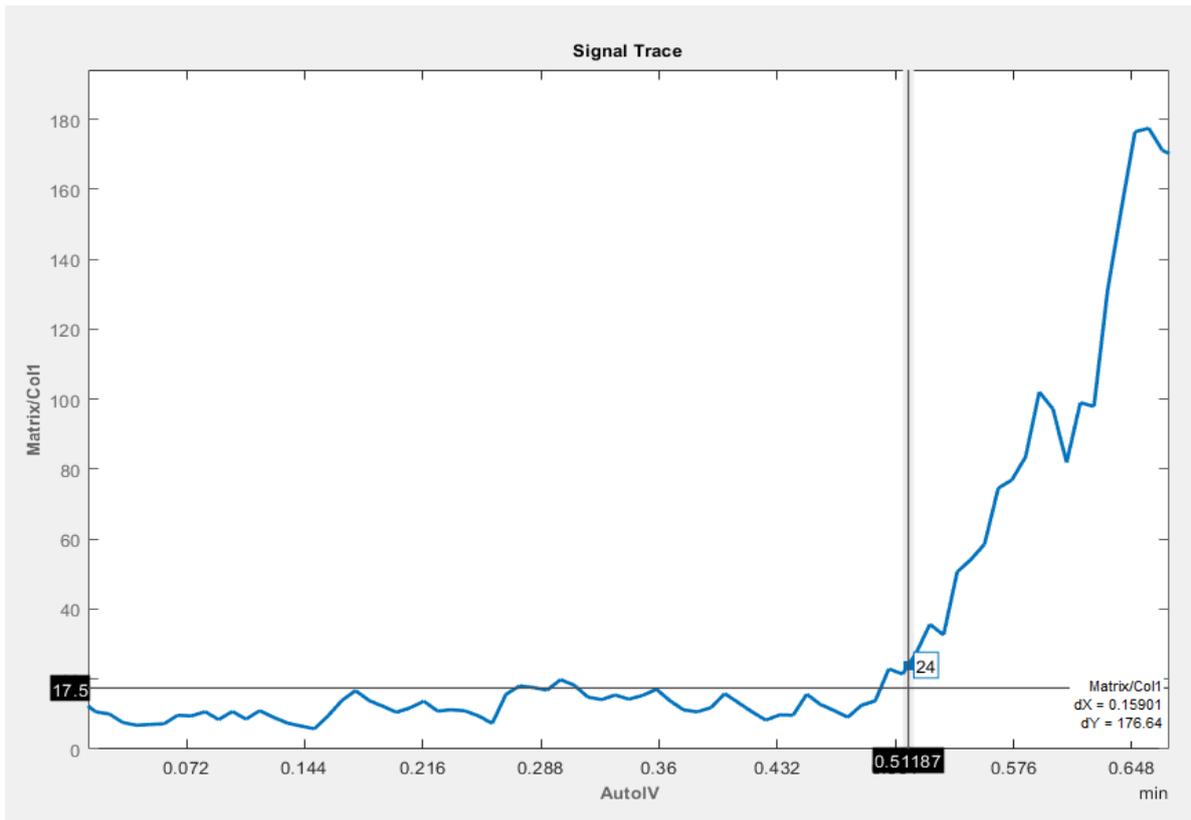


Figura 54. Plot  $T^2$  Hotelling Dataset guasto. Al valore limite di 17,5 (arrotondato per eccesso), abbiamo un valore corrispondente per la  $T^2$  di circa 51 secondi.

```

39
40 % filtraggio dei dati
41 type = 'linear';
42 windowSize = 5;
43 ma = movavg(T2testS,type,windowSize)
44 |
45 % creazione di un modello di degrado lineare
46 % addestrare il modello di degrado utilizzando i dati di addestramento
47 mdl = linearDegradationModel('LifeTimeUnit','seconds');
48 fit(mdl,linTrainTables,"Time","Condition")
49
50
51 %In base alla conoscenza dei limiti della funzione di degrado, definire un valore dell'indicatore
52 %della condizione di soglia che indica la fine del ciclo di vita di un componente.
53 threshold = 17.3;
54
55 estRUL = predictRUL(mdl,linTestData(3,:),threshold)

```

Figura 55. Funzione utile per il filtraggio dei dati (movavg) e creazione di un modello di degrado lineare.

- d. La statistica utilizzata, per il dataset considerato, riporta un RUL di circa 50 secondi. A supporto di questo risultato è possibile fare un confronto tra

questo valore e il valore ottenuto mediante la funzione “linearDegradationModel” presente in Matlab. In effetti, il RUL ottenuto dalla funzione in Matlab è di circa 60 secondi, valore che si avvicina molto alla stima di 50 secondi. Considerazioni analoghe è possibile fare anche per gli altri dataset. La prova in Matlab mostra che tutte le stime considerate si avvicinano all'incirca a quelle calcolate mediante la funzione “linearDegradationModel” similmente al caso precedentemente descritto. Dunque è possibile affermare che con un errore di circa -15 secondi, il modello di degrado ottenuto mediante la statistica  $T^2$  di Hotelling fornisce un discreto risultato nella stima del RUL.

## 4 Conclusioni

La digitalizzazione sta mettendo a disposizione una grande mole di dati, relativi a quasi tutte le situazioni, facendo in modo che queste informazioni possano essere riprodotte e utilizzate all'infinito (poiché caratterizzate da non rivalità e da un costo di produzione prossimo allo zero) per rendere le attività aziendali molto più efficaci ed efficienti.

La mole di informazioni che sono state raccolte e che si stanno accumulando, grazie alle piattaforme social, alle tecnologie indossabili, a tutti i sensori di ambiente e ai vari oggetti connessi ad Internet, costituirà quella enorme massa di *Big Data*, che darà la possibilità di migliorare i processi decisionali ed estendere nuove forme di esigenze. Prodotti e servizi saranno costruiti basandosi sull'analisi del comportamento delle persone, sulle modalità in cui le abitudini e i consumi cambiano e soprattutto, grazie alla partecipazione degli utenti ai processi di sviluppo e miglioramento, si potranno fornire prestazioni sempre più personalizzate alle esigenze specifiche (customizzazione di prodotti e servizi).

La personalizzazione risulta essere la chiave per la competitività, Internet lo strumento essenziale per garantirla, i *Big Data*, invece, le tecnologie in grado di modificare i principali aspetti della vita, dandole una dimensione quantitativa mai avuta prima.

Bisogna intendere questa ondata tecnologica, come una rivoluzione culturale, prima che tecnologica: l'innovazione può essere la chiave per amplificare le grandi capacità di impresa ed ingegno, che appartengono al nostro Paese, valorizzando la cultura italiana che ci contraddistingue e permettendo il rimpatrio di imprese, che oggi si trovano delocalizzate, grazie ad un'incidenza minore che il fattore lavoro avrà sui costi totali.

È inevitabile che l'adesione al cambiamento non permetterà di risolvere tutti i problemi strutturali, essendo questa una condizione necessaria, ma non sufficiente allo sviluppo economico, del resto non prendere al volo tale opportunità comporterebbe la perdita di competitività.

Il comparto manifatturiero risulta essere il secondo settore con maggiore potenziale di automazione, poiché al primo posto troviamo l'insieme dei servizi di accoglienza ed alimentazione. Nei settori come salute, educazione e istruzione in cui, è ancora fondamentale l'interazione tra le persone, i valori registrano percentuali piuttosto moderate.

L'automazione può eliminare alcune o forse molte vecchie mansioni, ma non rappresenterà un reale problema. Siamo troppo interessati a trovare un lavoro, che ci gratifichi personalmente e socialmente, per cui l'ipotesi di rimanere senza impiego risulta poco credibile; inoltre, nel passato, le rivoluzioni hanno reso obsoleti certi mestieri, ma hanno creato, nel complesso, un numero superiore di posti di lavoro (il miracolo economico, che è stato un periodo di straordinaria crescita, ha ridotto il numero di occupati nell'agricoltura dal 60% al 10%).

Sicuramente questa rivoluzione vedrà la nascita di nuove figure molto specializzate e con elevate competenze tecniche, ma dall'altro si assisterà alla scomparsa di alcuni

mestieri e all'impoverimento di altri. Ciò che è prevedibile è che i lavori più stabili saranno quelli legati a più elevate capacità progettuali e che ad uscire dal mercato più velocemente saranno i professionisti, che non faranno proprie queste tecnologie.

Non innovare il sistema economico significa perdere competitività, opportunità e di conseguenza aumentare la disoccupazione. Il futuro non si prefigura come un destino, piuttosto come un progetto ben strutturato. Le opportunità offerte dalle tecnologie vanno colte tramite un'interpretazione strategica, che sia in grado di trasformare le occasioni in nuova occupazione.

Ogni sviluppo deve essere considerato come mattoncino su cui edificare le innovazioni future, perché il progresso non si esaurisce, ma si accumula nel tempo.

Le fabbriche si comportano sempre più come insiemi tecnologici unitari in grado di rispondere in modo flessibile, personalizzato e veloce alle esigenze della domanda (il cliente risulta la chiave del successo di ogni azienda). La loro organizzazione è costantemente monitorata per raccogliere *feedback*, ridurre i fermi e aumentare l'efficienza.

Oltre all'automazione, si assiste alla digitalizzazione, cioè alla connessione degli impianti automatizzati e all'introduzione di sistemi e algoritmi, per la gestione dei processi. Gli aspetti con maggiori benefici, riguardano l'ottimizzazione della catena produttiva (risparmio di tempo e migliore gestione delle risorse) e manutenzione predittiva (conoscenza e prevenzione dei guasti, per impiegare il risparmio su ulteriori investimenti maggiormente redditizi).

Il punto di partenza è proprio la grande mole di dati che vengono generati dalle varie attività e legate ad oggetti e macchinari. Questi dati caratterizzati per complessità, variabilità, volume, vanno organizzati, strutturati e raggruppati per dare origine alla categoria dei *Big Data*.

Le tecniche di *Machine Learning* aiutano a predire il valore del prossimo dato rispetto alle informazioni già salvate, con un buon livello di affidabilità, soprattutto in ambito di manutenzione predittiva e aiutano la ricerca di fenomeni nascosti tramite l'enorme mole di segnali e dati, che tipicamente vengono prodotti, ma non vengono interpretati (quando qualcosa si danneggia o si rompe, ciò non accade quasi mai improvvisamente, ma il danno è un aspetto progressivo, che matura dopo un numero consistente di segnali che siamo soliti non misurare).

La disponibilità di nuove tecnologie e l'ingente volume di dati disponibili sono i fattori chiave in grado di rivoluzionare la manutenzione nel ventunesimo secolo. Grazie ad una profonda conoscenza ingegneristica delle tecnologie per *Big Data Analytics*, infatti, è possibile analizzare i dati disponibili per predire guasti e riduzioni di performance, identificando, al tempo stesso, le cause scatenanti per perseguire una strategia, che migliori processi e metodi manutentivi.

La manutenzione predittiva, grazie agli straordinari vantaggi resi possibile, costituisce la più concreta ed efficace applicazione dell'*Internet of Things*. È evidente che possa essere applicata non solo al mondo meccanico, ma anche ad altri settori (energia, automobilistico, telecomunicazioni, medico) semplicemente adattando la tecnologia al caso specifico. I benefici analizzati sono trasversali e non collegati solamente ai singoli

settori aziendali; impattano sull'intero sistema Paese, grazie alla loro strabiliante portata strutturale.

Se da un lato la digitalizzazione di macchinari ed impianti permette di sfruttarne le loro potenzialità al meglio, aumentandone la produttività, dall'altro, la crescente interconnessione tra le macchine e lo scambio continuo di dati, richiede grandi investimenti non solo per continuare ad innovare, ma anche per garantire la sicurezza e la protezione dei dati sensibili.

L'ultimo decennio è stato contraddistinto da una lenta crescita dell'occupazione, da lenti miglioramenti dei salari e standard di vita dei cittadini, ma la percezione di minori opportunità economiche ha messo in dubbio il capitalismo come teoria e pratica predominante. L'era dei prodotti intelligenti e connessi può cambiare questa traiettoria, a patto che le aziende adottino un approccio aggressivo, che sappia cogliere le opportunità che inevitabilmente si presenteranno. Non sarà sufficiente l'investimento di una singola impresa in innovazione: sarà necessario un substrato fertile in cui tutti gli attori contribuiscano insieme al progresso, verso modelli di business e tecnologie più evolute.

Le imprese dovranno quindi dotare i lavoratori delle competenze necessarie, promuovere iniziative di sensibilizzazione, abilitare l'innovazione, proteggere i dati e superare le difficoltà attuali, ma in particolare creare attorno al proprio business reti inter-organizzative che possano consentire alle stesse di ottenere prestazioni e risultati superiori a quelli conseguibili individualmente.

L'innovazione scaturisce sicuramente da fonti molteplici e differenti, ma il più potente motore del progresso tecnologico sarà rappresentato dai network di imprese innovatrici che, attingendo conoscenze e risorse da diversi attori, potranno beneficiare di uno straordinario vantaggio competitivo, grazie, appunto, a significative relazioni e collegamenti costruiti pazientemente, nel tempo, con i diversi *stakeholders*.

“Prevedere per provvedere e prevenire”

[Report, Rai 3, Puntata del 2 aprile 2018, Piero Angela]

## 5 Bibliografia e sitografia

- <https://it.mathworks.com/company/newsletters/articles/three-ways-to-estimate-remaining-useful-life-for-predictive-maintenance.html>
- <https://cmmsitalia.it/manutenzione-predittiva-iot-e-kpi-manutenzione/>
- <https://it.mathworks.com/help/predmaint/ug/rul-estimation-using-rul-estimator-models.html>
- <https://www.sap.com/documents/2016/10/8ec7f23f-917c-0010-82c7-eda71af511fa.html#>
  
- Di Luciano Furlanetto, Marco Garetti, Marco Macchi, Principi generali di gestione della manutenzione, Franco Angeli, 2015.
  
- Hawkins D. M. (1991), Multivariate quality control based on regression-adjusted variables, Technometrics, Vol. 33, 61-75
  
- Jackson, Mudholkar (1979), Control Procedures for residuals associated with principal components analysis, Technometrics, Vol. 21, No. 3, 341-349

## **6 Ringraziamenti**

Vorrei dedicare questo spazio a chi, con dedizione e pazienza, ha contribuito alla realizzazione di questo elaborato.

Ringrazio infinitamente mia madre e mio padre, senza i loro insegnamenti e senza il loro supporto, questo lavoro di tesi non esisterebbe nemmeno.

Grazie al mio relatore Prof. Maurizio Bevilacqua che mi ha seguito nella scelta dell'argomento.

Un ringraziamento particolare va al mio correlatore Prof. Giovanni Mazzuto per i suoi preziosi consigli e per avermi suggerito puntualmente le giuste modifiche da apportare in ogni step della realizzazione dell'elaborato.