



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in INGEGNERIA GESTIONALE

**TECNICHE E STRUMENTI PER LA
MANUTENZIONE IN AMBIENTE INDUSTRY 4.0**

**TECHNIQUES AND TOOLS FOR MAINTENANCE
IN THE INDUSTRY 4.0 ENVIRONMENT**

Relatore: Chiar.mo
Prof. **Maurizio Bevilacqua**

Tesi di Laurea di:
Andrea Niccolò

A.A. 2019/2020

“Non sempre cambiare equivale a migliorare, ma per migliorare bisogna cambiare.”

-Winston Churchill

INDICE

INTRODUZIONE	2
CAPITOLO 1 Ruolo della manutenzione	4
1.1 Manutenzione reattiva	5
1.2 Manutenzione preventiva	6
1.2 Manutenzione predittiva.....	8
1.4 Manutenzione integrata.....	11
CAPITOLO 2 Architettura Predictive Maintenance	14
2.1 Acquisizione dei dati.....	15
2.2 Pre-elaborazione dei dati.....	17
2.3 Analisi dei dati	17
2.4 Supporto alle decisioni.....	30
CAPITOLO 3 Tecniche di supporto	33
3.1 Realtà aumentata	33
3.2 Realtà virtuale	36
Capitolo 4 Strategia di manutenzione	40
4.1 Analisi centrata sull'affidabilità.....	40
4.2 Criticità e analisi dei costi	41
4.3 Analisi su esperienza	41
CONCLUSIONI	42
BIBLIOGRAFIA	43

INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi le aziende stanno diventando sempre più interessate all'applicazione di nuove tecnologie per garantire la competitività a lungo termine e consentire loro di adattarsi a condizioni ambientali che cambiano dinamicamente come la riduzione dei cicli di vita dei prodotti, l'aumento della diversità e il cambiamento delle aspettative dei consumatori.

Tutto ciò ha contribuito negli ultimi decenni a promuovere una nuova rivoluzione industriale, l'Industry 4.0, caratterizzata da cinque elementi chiave:

- digitalizzazione, ottimizzazione e personalizzazione della produzione;
- automazione e adattamento;
- interazione uomo-macchina;
- servizi e archivi a valore aggiunto;
- scambio e comunicazione automatica di dati.

Uno dei fattori più delicati di questo nuovo contesto industriale è la capacità di riuscire a integrare alcuni ruoli operativi nel processo produttivo per concorrere all'efficientamento aziendale desiderato e per garantire una maggiore flessibilità all'impianto.

L'integrazione e lo sviluppo della manutenzione nella realtà interconnessa dell'Industry 4.0 sono due degli obiettivi tanto richiesti per evitare specialmente downtime del processo produttivo, allungare il ciclo di vita del prodotto, ridurre i costi di gestione e di manutenzione, migliorare l'efficienza dell'impianto.

Gli ostacoli più evidenti a cui dovranno far fronte le varie aziende interessate sono molteplici: l'ingente costo iniziale, dovuto sia all'ammodernamento e all'acquisto di nuove tecnologie, sia per quello immateriale legato alle nuove competenze richieste e alla gestione strutturale e organizzativa necessaria per usufruire dei benefici. Il cambiamento organizzativo che non richiede solamente denaro ma anche tempo; la difficoltà nel trovare figure professionali in grado di attuare tali cambiamenti in base alle varie necessità; l'idea che gli algoritmi possano minacciare il ruolo degli esseri umani nella loro organizzazione impedisce che le attuali pratiche decisionali vengano interrotte.

L'obiettivo di questo elaborato è di approfondire il nuovo ruolo della manutenzione nell'Industry 4.0, delineandone la struttura necessaria alla comprensione e alle tecniche che la caratterizzano, per fornire gli strumenti adatti in fase di valutazione e adozione delle attività manutentive a seconda delle specifiche esigenze.

CAPITOLO 1 Ruolo della manutenzione

La prima rivoluzione industriale iniziata nella seconda metà del XVII secolo ha gettato le basi dell'inurbamento, introducendo gli impianti di produzione meccanica basati su acqua e vapore; la seconda è arrivata a fine 800 diffondendo la produzione di manodopera di massa basata sull'utilizzo dell'energia elettrica; la terza si è affermata negli anni 70' caratterizzata dalla produzione automatica basata su elettronica e IT (Information Technology).

Al giorno d'oggi è in corso la quarta rivoluzione industriale, denominata Industria 4.0, la quale pone nuove sfide per le aziende dal punto di vista tecnologico, organizzativo e gestionale. La trasformazione dei processi e l'applicazione di nuove tecnologie stanno cambiando in modo significativo le dinamiche lavorative, richiedendo nei sistemi di produzione nuove competenze ai dipendenti. Questa rivoluzione avrà tra i suoi scopi quello di rendere più flessibile l'organizzazione del lavoro nel tempo e nello spazio, con i flussi di lavoro che diverranno più trasparenti, decentralizzati e meno gerarchici.

L'Industry 4.0 è un'espressione usata per la prima volta in una fiera ad Hannover nel 2011, che sta portando una nuova realtà produttiva automatizzata ed interconnessa.

Il termine Industria 4.0 sta diventando ampiamente utilizzato per descrivere il concetto di fabbrica digitale: processi di produzione completamente automatizzati, eventualmente integrati in una catena di fornitura, dove l'intervento umano è ridotto al minimo indispensabile; un concetto che rappresenta l'adozione da parte delle aziende industriali di tecniche e processi consentiti dalla digitalizzazione, dal cloud computing, dall'IoT e dai big data per ottenere vantaggi competitivi nei mercati nazionali e globali. Questi concetti (produzione autosufficiente, operazioni integrate, decisioni decentralizzate, intervento umano minimo) possono essere interpretati in modi diversi, e una vasta discussione è in corso sia in ambito accademico che aziendale su come si materializzano.

Manutenzione:

(vedere UNI EN 13306, UNI 9910 e UNI 10147)

“Combinazione di tutte le azioni tecniche ed amministrative, incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o a riportare un'entità in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta.”¹

La manutenzione in questo panorama ha subito dei mutamenti continui per poter fronteggiare le esigenze produttive in termini di rapidità, efficienza, affidabilità e organizzazione, andando a delineare, in relazione anche alle diverse necessità, differenti approcci: correttivo o reattivo, preventivo, predittivo.

In questo capitolo vogliamo sottolineare i vantaggi e gli svantaggi di questo nuovo approccio alla manutenzione per permettere un'attenta valutazione preliminare del tema proposto.

1.1 Manutenzione reattiva

Definizione di manutenzione a guasto o correttiva:

(vedere UNI EN 13306 e UNI 9910)

“La manutenzione eseguita a seguito della rilevazione di un'avaria e volta a riportare un'entità nello stato in cui essa possa eseguire una funzione richiesta.”²

La manutenzione reattiva o correttiva può essere suddivisa a sua volta in programmata e non programmata; quella non programmata è la tipica riparazione dovuta ad un guasto inaspettato ed è la più onerosa dal punto di vista economico in quanto comporta in genere lunghi tempi di ripristino per mancanza di ricambi e/o personale qualificato. La manutenzione a guasto programmata invece attende il guasto per riparare la macchina con l'obiettivo di sfruttare completamente la vita utile dei componenti; il fatto che tale manutenzione sia programmata permette un breve tempo di ripristino in quanto la programmazione permette di avere rapidamente a disposizione sia il ricambio che il personale necessario alla riparazione.

¹ Manutenzione, per ulteriori conferme si consiglia di consultare [14].

² Manutenzione reattiva, per ulteriori conferme si consiglia di consultare [14].

1.2 Manutenzione preventiva

Definizione di manutenzione preventiva:

(vedere UNI EN 13306 e UNI 9910)

“La manutenzione eseguita a intervalli predeterminati o in accordo a criteri prescritti e volta a ridurre la probabilità di guasto o la degradazione del funzionamento di un'entità.”³

La manutenzione preventiva viene generalmente programmata nella fase di progettazione, dove i vari interventi manutentivi sono indicati nella documentazione tecnica fornita dal progettista.

Il progettista deve verificare "l'attitudine" dell'impianto/ sistema/ componente ad essere mantenuto. In tale contesto la manutenibilità è una caratteristica intrinseca di progetto che definisce quali debbano essere le caratteristiche costruttive e funzionali di una apparecchiatura.

Manutenibilità:

(vedere UNI EN 13306 e UNI 9910)

“L'attitudine di un entità in assegnate condizioni di utilizzazione a essere mantenuta o riportata in uno stato nel quale essa può svolgere la funzione richiesta, quando la manutenzione è eseguita nelle condizioni date, con procedure e mezzi prescritti.”⁴

Il progettista, oltre alla manutenibilità, deve tener conto anche di sicurezza, affidabilità, disponibilità ed operabilità.

La manutenzione preventiva può essere suddivisa in:

- manutenzione ciclica;
- manutenzione migliorativa;
- manutenzione su condizione;
- manutenzione predittiva;

La definizione di manutenzione ciclica, o Based Time Maintenance, è:

³ Manutenzione preventiva, per ulteriori conferme si consiglia di consultare [14].

⁴ Manutenibilità, per ulteriori conferme si consiglia di consultare [14].

(vedere UNI 10147)

“Manutenzione preventiva periodica in base a cicli di utilizzo predeterminati.”⁵

Essa comprende essenzialmente attività di manutenzione ordinaria programmate su base temporale come la manutenzione autonoma o ispezione, tra le quali sono presenti quelle relative alla pulizia, la lubrificazione, le piccole regolazioni, in cui si monitora il tempo di utilizzo del macchinario.

La manutenzione migliorativa viene definita come:

(vedere UNI 10147)

“Insieme delle azioni di miglioramento o piccola modifica che non incrementano il valore patrimoniale del bene.”⁶

La manutenzione su condizione o Condition Based Maintenance (CBM), viene definita come:

(vedere UNI EN 13306)

“Manutenzione preventiva subordinata al raggiungimento di un valore limite predeterminato.”⁷

Questi approcci a priori implicano una conoscenza del macchinario e al tempo stesso una buona stima della vita utile dei componenti.

Sebbene queste attività possano ridurre al minimo i costi operativi, esse tipicamente comportano i costi di manutenzione più elevati. Al contrario, la manutenzione reattiva elimina la manutenzione non necessaria, prevedendo però costi operativi ingenti a causa del guasto.

⁵ Manutenzione ciclica, per ulteriori conferme si consiglia di consultare [14].

⁶ Manutenzione migliorativa, per ulteriori conferme si consiglia di consultare [14].

⁷ Manutenzione su condizione, per ulteriori conferme si consiglia di consultare [14].

1.2 Manutenzione predittiva

1.3

Definizione di Manutenzione predittiva:

(vedere UNI EN 13306)

“Manutenzione preventiva effettuata a seguito dell'individuazione e della misurazione di uno o più parametri e dell'extrapolazione secondo i modelli appropriati del tempo residuo prima del guasto.”⁸

La manutenzione predittiva è un tipo di manutenzione preventiva non pianificata, nata in questi ultimi decenni, in cui si monitora istante per istante l'health assesstment del macchinario, attraverso sensori appositi, calcolando con opportuni algoritmi il conseguente rischio di default, per poter gestire al meglio il ciclo di vita a seconda della situazione del sistema.

Definizione di vita utile:

(vedere UNI EN 13306)

“In certe condizioni, intervallo di tempo che inizia in un dato istante e che termina quando il tasso di guasto è inaccettabile, oppure quando si ritiene che l'entità non sia riparabile a seguito di un'avaria o di altri fattori pertinenti.”⁹

La manutenzione predittiva non è un sinonimo di Condition Based Maintenance (CBM) o di Prognostics and Health Management (PHM), infatti molti studi hanno mostrato CBM e PHM come estensioni o sottodivisioni della manutenzione predittiva. In questo elaborato si considera la CBM una versione estesa della manutenzione predittiva, in quanto implementa allarmi per avvisare quando il sistema ha superato le soglie predeterminate. Allo stesso modo PHM è considerata come estensione del CBM come risposta alla necessità di migliorare la prevedibilità e la gestione del ciclo di vita degli asset.

⁸ Manutenzione predittiva, per ulteriori conferme si consiglia di consultare [14].

⁹ Vita utile, per ulteriori conferme si consiglia di consultare [14].

Questi termini spesso sostituiscono la manutenzione predittiva in letteratura e non c'è coerenza su come questi termini vengono utilizzati o su come si adattano insieme nel campo della manutenzione.

La manutenzione all'interno di questa nuova rivoluzione industriale assumerà un nuovo ruolo operativo, in cui si cercherà di prevedere in autonomia il grado di fallimento produttivo, adottando le migliori misure di prevenzione e introducendo azioni di auto-riparazione.

La manutenzione predittiva, oltre ad evitare il guasto, valuta il degrado del prodotto; il degrado dipende anche dall'utilizzo del sistema, infatti può essere necessario rimodulare gli interventi di manutenzione preventiva a seconda della situazione rilevata negli interventi di ispezione eseguiti tra un intervento di manutenzione programmato ed il successivo.

Il ragionamento a priori ha due limiti evidenti: è anch'esso caratterizzato da un rischio di fallimento dovuto dalla mancata considerazione dei dati di contesto, i quali generalmente mutano nel tempo, e non ottimizza le tempistiche sugli interventi, anticipandoli in alcune circostanze superflue.

Quello a posteriori, come già detto, oltre a non badare al progressivo degrado del prodotto, presuppone i costi di ripristino e un downtime che in alcune circostanze genera un break della catena del valore.

Quest'ultimo approccio manutentivo, intermedio tra i due, permette di ottimizzare l'efficienza produttiva riducendo il rischio dovuto all'incertezza legata alla stima della vita utile del macchinario, evitando la rottura e quindi i costi di ripristino, quindi trovando il giusto compromesso tra l'approccio a priori della manutenzione programmata e quello a posteriori di quella reattiva.

Questo compromesso ha quindi come obiettivo la minimizzazione dei costi di manutenzione e dei costi operativi, incrementando l'affidabilità e la disponibilità dei beni, garantendo al tempo stesso una maggiore sicurezza agli operatori.

I limiti della manutenzione predittiva sono gli onerosi costi di implementazione iniziali e la necessità di avere personale qualificato in grado sia di gestire la complessità degli algoritmi utilizzati, sia di saper integrare questo approccio all'interno del sistema produttivo per sfruttare al massimo tutti i suoi benefici.

La manutenzione in questo nuovo panorama, per andare incontro alle esigenze competitive, non va associata solamente alla rottura del macchinario ma anche alla qualità dello stesso nel perdurare del tempo; infatti, la manutenzione predittiva a differenza degli altri due approcci, tiene conto anche delle performance del sistema apparato per evitare il suo degrado.

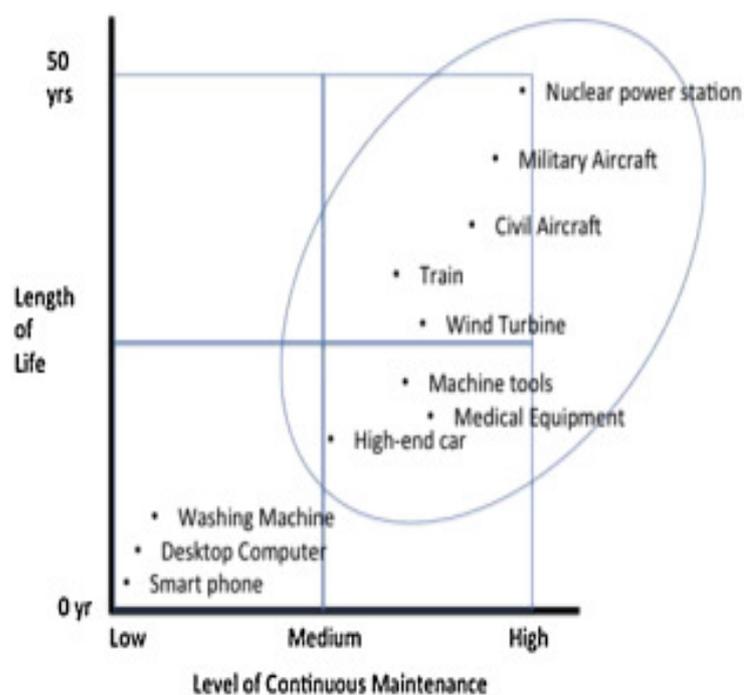


Figura 1 Settori di applicazione della manutenzione predittiva¹⁰

In relazione ai settori di applicazione le tecniche di manutenzione predittiva non risultano sempre le più convenienti dal punto di vista dei costi-benefici, quindi è consigliabile svolgere sia un'analisi preliminare che permetta di stimare costi e vantaggi, sia vari studi di fattibilità per capire l'applicazione ottimale, in relazione alla fattispecie concreta. Analizzeremo meglio questo aspetto nel capitolo 4, dove specificheremo quali sono le tecniche più convenienti per valutare il miglior approccio manutentivo da realizzare.

¹⁰ [1] Figura 1 Settori di applicazione della manutenzione predittiva.

1.4 Manutenzione integrata

Il nuovo ruolo della manutenzione in questo nuovo contesto industriale ha generato dei cambiamenti sia dal punto di vista logistico che gestionale, incentivando l'interazione tra la pianificazione della produzione, la manutenzione e il controllo di qualità, per produrre secondo le caratteristiche tecniche richieste, per la consegna tempestiva del prodotto e per raggiungere la massima soddisfazione del cliente.

La maggior parte dei modelli di pianificazione della produzione presuppone che le macchine siano sempre disponibili; tuttavia, negli ambienti di produzione reali, la macchina si guasta e potrebbe non essere disponibile in un determinato momento. Non è ottimale eseguire la pianificazione della produzione sulle macchine, indipendentemente dal loro deterioramento e guasto. La manutenzione comprende tutte le attività tecniche e gestionali durante la vita dell'apparecchiatura, il cui scopo è mantenere o ripristinare l'apparecchiatura in modo che possa fornire l'attività prevista con un livello di qualità accettabile.

La logistica facilita tutto questo con l'analisi del flusso di parti e componenti, suggerendo il layout ideale.

I processi di trasporto vengono quindi modellati e simulati per trovare l'ottimo, tenendo conto dell'ubicazione del magazzino e della politica dei pezzi di ricambio.

La simulazione logistica interconnette il flusso dei materiali (FOM), il layout dell'impianto e i mezzi di trasporto con tutte le loro proprietà individuali, fornendo quindi come output informazioni sulla durata prevista della fase di manutenzione, compresi i dettagli che considerano i tempi di trasporto, i percorsi critici, ovvero i colli di bottiglia, e in generale la mancanza di risorse.

Dal punto di vista organizzativo, l'ubicazione del magazzino è un altro tema delicato per favorire un ricambio dei pezzi più rapido, soprattutto in contesti in cui il processo di sostituzione delle componenti è all'ordine del giorno.

Pertanto, è preferibile immagazzinare i pezzi di ricambio il più vicino possibile al luogo in cui saranno richiesti durante la manutenzione al fine di velocizzarla. L'utilizzo di un magazzino centralizzato rappresenta invece una soluzione più economica e di facile gestione.

Perciò la valutazione di costi-benefici per quanto riguarda l'ubicazione dei pezzi di ricambio deve essere analizzata tenendo conto della frequenza di sostituzione, della probabilità di guasto, delle dimensioni e pesi di parti e componenti.

Dopo aver definito i luoghi di stoccaggio dei pezzi di ricambio adeguati secondo i diversi criteri sopra elencati, è necessario definire la strategia di approvvigionamento, al fine di ridurre al minimo i costi operativi complessivi per la gestione dell'impianto stesso. In generale, i costi operativi complessivi per i pezzi di ricambio possono essere suddivisi in 3 voci di costo principali:

- Costi di holding, ovvero i costi per mantenere un certo livello di inventario (costi di capitale, costi di spazio di stoccaggio, costi di servizi di inventario, costi di rischio di inventario).
- Costo di ordinazione, ovvero i costi sostenuti ogni volta che viene riordinato un nuovo lotto di pezzi di ricambio (costi del processo di ordinazione stesso e costi di logistica in entrata).
- Costi di scarsità, ovvero i costi da sostenere quando alcuni pezzi di ricambio sono necessari ma non disponibili nell'area di stoccaggio (cosiddetto "stockout") (la manutenzione è bloccata, inutili fermi macchina comportano costi estremamente elevati).

Sia la domanda di manutenzione che i tempi di consegna non sono deterministici e, per questo motivo, alcune scorte di sicurezza devono essere pianificate in aggiunta per evitare il rischio di esaurimento delle scorte.

Uno degli obiettivi della manutenzione predittiva è proprio quello di facilitare il processo decisionale legato alla scelta del livello di scorte dei pezzi di ricambio da adottare, evitando dei riordini superflui o anticipati.

Pertanto, vi è una forte necessità di una logistica evoluta in cui si identificano innanzitutto le prime parti e componenti (cruciali), comprese le loro proprietà (dimensioni, pesi) e i mezzi di trasporto adeguati, integrati per ogni componente.

Il possibile impatto sul layout dell'edificio porta a notevoli miglioramenti.

Dopo aver creato un modello logistico, il FOM viene simulato e, di conseguenza, verranno ottimizzati i tempi di trasporto, i percorsi critici e minimizzati i colli di bottiglia.

1.4.1 Obsolescenza

Un elemento chiave per gestire l'obsolescenza e ridurre il costo del ciclo di vita è la capacità di prevedere la durata dell'approvvigionamento dei componenti e costo della risoluzione dell'obsolescenza. Di conseguenza, è interessante proporre modelli di evoluzione che prevedano non solo la data di inizio del processo di obsolescenza ma, soprattutto, la sua evoluzione nel tempo.

L'obsolescenza può essere di diversi tipi:

- L'obsolescenza tecnologica si verifica quando una nuova tecnologia può sostituire una più vecchia.
- L'obsolescenza funzionale riguarda la riduzione dell'utilità, dell'affidabilità o delle prestazioni di un sistema a causa di una modifica dei suoi requisiti specifici.
- L'obsolescenza logistica significa che il sistema non è più acquistabile a causa della diminuzione delle fonti di produzione e della carenza di materiali.
- Obsolescenza ecologica correlata allo scarto di un prodotto per motivi ambientali.
- L'obsolescenza economica riguarda lo smaltimento di un prodotto a causa dei suoi elevati costi di utilizzo, manutenzione e / o riparazione.

Per le apparecchiature di lunga durata il rischio di obsolescenza può derivare da componenti elettronici, materiali, software, componenti meccanici, apparecchiature di prova, processi, competenze e documenti.

Con la crescente popolarità dei contratti basati sulle prestazioni (o dei sistemi di prodotto-servizio industriali), i rischi di obsolescenza aumentano con i produttori piuttosto che con i clienti. I produttori sono ora più interessati a progettare apparecchiature per ridurre l'impatto dell'obsolescenza.

L'implementazione di una manutenzione integrata faciliterebbe la gestione dell'obsolescenza.

CAPITOLO 2 Architettura Predictive Maintenance

Le pratiche di manutenzione predittiva richiedono il monitoraggio continuo delle apparecchiature industriali, generando di conseguenza grandi quantità di dati.

Le funzioni necessarie per sviluppare la manutenzione predittiva sono:

- acquisizione dati;
- pre-elaborazione dati;
- analisi dei dati;
- supporto delle decisioni.

Una delle grandi sfide della manutenzione predittiva è proprio la necessità di far fronte alle grandi quantità di dati eterogenei ora disponibili, i cosiddetti Big Data.

I Big Data sono definiti come risorse di informazioni ad alto volume e ad alta velocità, che comprendono file di testo, audio e video non strutturati (circa il 95%).

A causa della sua eterogeneità e della struttura dati mancante, l'analisi dei big data richiede lo sviluppo di nuovi algoritmi complessi.

I metodi attuali nell'analisi dei big data sono il data mining e l'integrazione dei dati operativi. I fattori critici da affrontare a causa dell'elevato volume di dati sono: la diversità nei tipi di dati (varietà), l'incertezza nei dati (veridicità) e in alcuni casi la velocità della raccolta dei dati e del processo decisionale (velocità) per scopi di manutenzione.

Le tecnologie Big Data possono aiutare a migliorare la produttività dei dipendenti, ridurre i costi operativi, perfezionare i processi interni delle aziende e migliorare la gestione dei dati.

Con l'uso di algoritmi di apprendimento automatico tali informazioni possono essere elaborate in conoscenza utile.

Tuttavia, i dati devono prima passare attraverso una fase esplorativa, in cui si valuta la loro ridondanza e il significato delle loro caratteristiche, al fine di creare un sistema di filtraggio ed estrapolazione, attraverso delle metriche prestabilite, in modo tale da estrarre solamente dei set significativi di dati. Così facendo, oltre ad evitare che

l'infrastruttura di rete si intensifica a causa dell'enorme mole di informazioni, si semplifica l'interpretazione e l'aspetto decisionale.

Altri due prerequisiti fondamentali, oltre a questo lavoro di scrematura, sono:

- capacità computazionale;
- una connessione molto stabile e veloce.

2.1 Acquisizione dei dati

La premessa per poter attuare un corretto approccio manutentivo predittivo è la disponibilità di una documentazione storico informativa che permetta una adeguata analisi dei dati e la presenza di un sistema di calcolo, solitamente un controllore logico programmabile (PLC), che riesca a processare le informazioni acquisite.

Un'altra condizione necessaria per questo processo è l'installazione dei sensori di raccolta di dati che permettono il continuo monitoraggio.

La disposizione dei sensori deve essere tale da poter rilevare i fattori critici interni ed esterni; alcuni esempi di grandezze che possono essere rilevate: corrente, temperatura e vibrazioni.

In questo ambito, per favorire i processi di auto-guarigione, vengono talvolta utilizzati i sensori a tolleranza di errore insieme agli attuatori nei circuiti di feedback aiutando così il sistema ad auto-adattarsi.

Questa fase all'interno della manutenzione predittiva, e non solo, viene continuamente perfezionata con il progresso tecnologico attraverso l'Internet of Things (IoT), ossia un sistema di dispositivi fisici in grado di raccogliere e comunicare autonomamente dati su sé stessi, o che riguardano l'ambiente in cui si trovano, inviandoli ad una rete in tempo reale. Ad ogni dispositivo è associato un differente UID, perciò è possibile riconoscerlo sia come oggetto fisico sia come entità digitale connessa alla rete.

I dati dal livello di acquisizione vengono archiviati in un server privato dell'azienda, oppure all'interno di un cloud gestito da un fornitore terzo, e resi disponibili agli altri moduli tramite un flusso di dati, l'efficienza dipenderà dai sensori e dispositivi di raccolta utilizzati.

Le piattaforme di raccolta da utilizzare dipenderanno dalla quantità di dati richiesti dall'algoritmo predittivo.

I modelli predittivi, basati sui big data, necessitano sia di dati storici, come già detto precedentemente, per prevedere i guasti nelle macchine prima che si verifichino, sia di dati in tempo reale per essere utilizzati.

L'interconnessione di questi moduli e dei dispositivi di raccolta al sistema di elaborazione comporta numerosi vantaggi:

- comunicazione da remoto;
- interagire da remoto, in tempo reale, con gli ambienti e oggetti, modificando ad esempio i parametri di funzionamento;
- disporre di una diagnostica avanzata;
- aggiornamento continuo dello stato di salute delle macchine e eventualmente dell'impianto;
- valutare quando occorre sostituire una componente o attuare l'intervento manutentivo in relazione alle soglie di tolleranza prefissate;
- identificare l'identità e la posizione degli oggetti integrati nel sistema IoT;
- garantire una maggiore sicurezza e salute negli spazi lavorativi.

L'IoT ha contribuito all'efficientamento aziendale nel nuovo panorama dell'Industry 4.0, abbattendo i limiti fisici che possono limitare il potenziale di gestione e amministrazione.

Il primo step consiste nella scelta a priori di grandezze che mutano in relazione a parametri interni o esterni dalle quali sia possibile ricavare lo stato di efficienza, di salute, di affidabilità.

Le grandezze prese in esame, oltre a poter essere misurabili, devono essere in grado di fornire una visione il più possibile accurata e completa dello stato di salute del sistema. Talvolta, a causa della complessità, si ipotizza un modello concettuale, partendo da una conoscenza fisica del sistema in esame, per ridurre il rischio di tralasciare alcuni parametri significativi e per valutare se la sensoristica sia adeguata.

A causa della moltitudine di dati presenti nel sistema di raccolta occorrono delle metriche per capire quali dati vanno selezionati e quali rimossi.

In relazione a questo compito, la fase di analisi, prima di poter essere eseguita, necessita di una fase di pre-elaborazione, o di pre-processing, in cui si preparano e organizzano i dati, prima di avviare l'algoritmo.

2.2 Pre-elaborazione dei dati

Durante il pre-processing l'obiettivo è quello di ridurre la dimensione dei dati del dataset e la complessità computazionale dell'algoritmo, sia spaziale che temporale, andando a valutare quali sono le informazioni ridondanti, ossia quelle caratterizzate da un'elevata correlazione, indicandole quindi come unica variabile.

Ridurre la dimensione dei dati serve, non solo per eliminare alcune dimensioni, come il rumore, ma soprattutto per combinare le informazioni ridondanti e correlate.

Bisognerebbe anche prestare attenzione al fatto che la compressione del volume di dati potrebbe degradare le informazioni e quindi le prestazioni predittive dell'algoritmo.

In questa fase preliminare prima di identificare gli indicatori predittivi che riassumono le informazioni ottenute si eliminano anche le incoerenze nei dati e gli errori di acquisizione.

2.3 Analisi dei dati

In questa fase si interpretano i dati acquisiti e selezionati mediante l'utilizzo di un algoritmo predittivo, accuratamente scelto, segnalando così eventuali situazioni anomale del componente o del sistema.

L'analisi dei dati può essere suddivisa in tre categorie: rilevare e identificare i guasti, valutare il degrado, calcolare la Remaining Useful Life (RUL), oppure Estimate Time To Failure (ETTF), e queste funzioni possono essere presenti o meno in un sistema di manutenzione predittiva, in relazione alla complessità tecnica del sistema, ai requisiti del sistema di manutenzione predittiva e alle conoscenze, dati e / o informazioni disponibili.

Un'altra fase molto dedicata, a cui va dedicato molto tempo, è la corretta scelta delle soglie di allarme che permettono di identificare le differenti situazioni di guasto.

Questo compito viene affidato alla prognostica, termine che rappresenta la strategia innovativa che indica l'uso integrato di diagnosi e prognosi.

2.3.1 Prognostica e Diagnostica a confronto

La diagnostica mira a rilevare i guasti, determinandone la causa principale e si riferisce alla condizione passata e corrente del sistema, mentre la prognostica implementa una valutazione del suo stato futuro.

Attraverso questo dualismo si può prevedere con anticipo il degrado progressivo, rotture, programmando così l'intervento manutentivo con maggior accuratezza.

Per eseguire i pronostici è normale avere un passaggio diagnostico precedente per determinare lo stato di salute attuale del sistema tecnico per stimare i comportamenti futuri.

La prognostica comprende tre compiti:

- Stima dello stato: stimare lo stato di salute o degrado corrente del sistema in base ai dati storici (Diagnosi).
- Previsione dello stato: prevedere lo stato di salute o degrado per periodi futuri sulla base di dati storici.
- Previsione End Of Life (EOL) o RUL: determina la RUL prima del guasto o prima di superare la soglia di guasto per un comportamento di degrado identificato. Si noti che RUL può fare riferimento a un guasto effettivo o al tempo rimanente fino a quando non è possibile soddisfare determinati requisiti di qualità del prodotto.

La diagnostica e la prognostica possono essere eseguite online o offline. Le applicazioni offline si concentrano sulla raccolta di tutte le informazioni operative che verranno analizzate successivamente (offline). Nelle applicazioni online, i dati vengono raccolti, elaborati e analizzati in tempo reale per generare allarmi o attivare azioni di manutenzione o regolazione mentre il sistema è in funzione.

2.3.2 Modello singolo

Gli approcci a modello singolo difficilmente soddisfano tutte le funzioni e gli obiettivi dei sistemi di manutenzione predittiva, perciò solitamente si utilizzano diversi moduli per monitorare le prestazioni, rilevare le modifiche, identificare la causa principale e quindi prevedere la vita utile rimanente (RUL) o probabilità di guasto (POF).

Gli algoritmi prognostici o diagnostici che simulano il processo di degradazione possono essere classificati in tre classi¹¹ basate sul tipo di informazioni utilizzate per effettuare stime RUL:

- modelli basati sulla conoscenza;
- modelli basati sui dati;
- modelli basati sulla fisica.

2.3.3 Modelli basati sulla conoscenza

Questi modelli utilizzano regole, fatti o casi raccolti negli anni di funzionamento e manutenzione del sistema tecnico. L'esperienza estrapolata da queste informazioni può servire per descrivere il degrado o per identificare i guasti.

I modelli basati sulla conoscenza trovano limitazioni per i prognostici poiché è molto difficile ottenere una conoscenza accurata per scopi di prevedibilità dall'esperienza, infatti sono più correlati a compiti diagnostici.

I modelli principali basati sulla conoscenza sono: modelli basati su regole, modelli basati su casi e modelli basati sulla conoscenza fuzzy.

¹¹ Per ulteriori approfondimenti vedere [13].

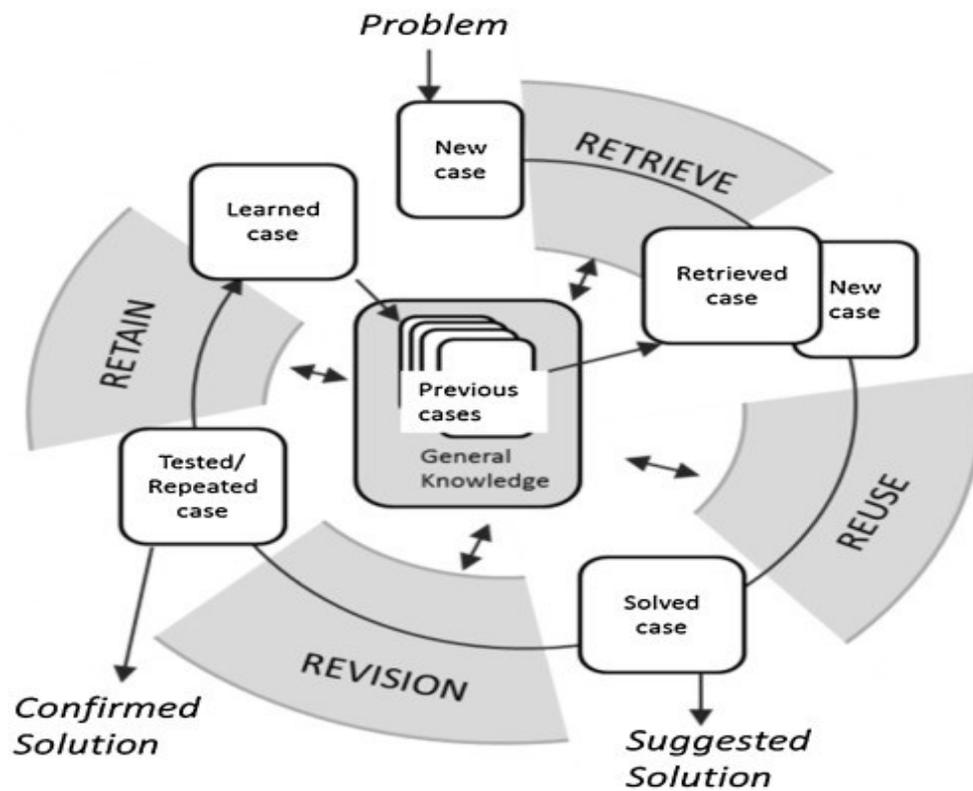


Figura 2 modello basato sui casi (Problema, soluzione)¹².

2.3.4 Modelli basati sui dati

Hanno acquisito molta importanza negli ultimi anni grazie alla maggiore disponibilità di potenza di calcolo e alla produzione di grandi quantità di dati provenienti ogni giorno dai sistemi tecnici.

I modelli basati sui dati sono classificati in tre gruppi: modelli statistici, modelli stocastici e modelli di apprendimento automatico.

La problematica legata a questo tipo di modello è l'incertezza legata ai dati, infatti il modo migliore per gestirla è quello di associarla alla teoria della probabilità.

¹² modello basato sui casi, vedere [2].

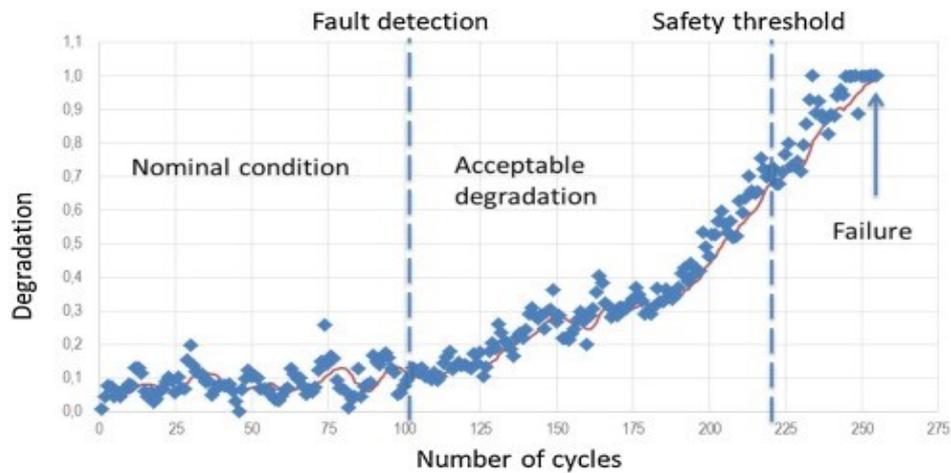


Figura 3 Esempio modello statistico¹³.

-I modelli statistici vengono utilizzati anche per i pronostici. L'analisi di regressione aiuterà a determinare la relazione tra le variabili casuali e il ciclo di vita dei sistemi tecnici in modo che sia possibile un calcolo dei comportamenti futuri.

Oltre all'analisi di regressione ci sono altri due approcci statistici che si distinguono: modelli della media mobile auto-regressiva e modelli Bayesiani.

I principali svantaggi dei modelli statistici riguardano la necessità di disporre di dati precedenti sufficienti per costruire un modello affidabile e la gestione dell'incertezza.

-I modelli stocastici sono modelli di probabilità che mirano allo studio dell'evoluzione di variabili casuali nel tempo. I tre principali processi stocastici per la diagnostica e la prognosi sono: processi Gaussiani, processi di Markov e processi di Levy. Questi modelli necessitano di un'elevata potenza di calcolo, conoscenze matematiche avanzate da implementare e gestione dell'incertezza.

-I modelli di Machine Learning o di apprendimento automatico, branca dell'intelligenza artificiale, utilizzano algoritmi di apprendimento specializzati per costruire modelli a partire dai dati. Questi modelli sono in grado di trattare e catturare relazioni complesse tra i dati, difficili da ottenere utilizzando modelli basati sulla fisica, statistici o stocastici.

Un punto chiave dei modelli di machine learning è il loro processo di apprendimento e dipende dall'applicazione, dall'obiettivo e dai dati disponibili per il sistema.

¹³ Esempio modello statistico, vedere [2].

Possiamo suddividere questi modelli in relazione alla modalità di apprendimento: supervisionato, senza supervisione e per rinforzo. Contrariamente ad altri modelli di manutenzione predittiva, gli approcci di machine learning potrebbero non includere tutte le fasi precedentemente elencate.

Un esempio di modello statistico basato sull'affidabilità è il modello Bayesiano, di seguito si cercherà di descriverne il funzionamento.

2.3.5 Ragionamento Bayesiano

Da un punto di vista logico-statistico potremmo far riferimento al ragionamento Bayesiano per interpretare il funzionamento e le dinamiche della manutenzione predittiva.

L'approccio Bayesiano offre una distribuzione di probabilità per modellare l'incertezza nelle inferenze dei parametri e nei risultati finali previsti, fornendo un metodo per modificare il livello di fiducia in una data ipotesi, alla luce di nuova informazione.

La quantificazione dell'incertezza dei parametri utilizzando approcci Bayesiani può esprimere il livello di credibilità di diversi risultati predittivi, quindi è possibile prendere una decisione basata sull'incertezza ottenuta dai risultati previsti.

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) P(A)}{P(B)}$$

Figura 4 Formula di Bayes¹⁴

¹⁴ Formula di Bayes, vedere [3]

$P(A)$ è la probabilità a priori di A, che corrisponderebbe nel nostro caso all' ipotesi iniziale stimata e indicata nella documentazione tecnica fornita dal produttore.

“A” sono tutti i parametri non osservati che definiscono il modello probabilistico.

Questa ipotesi iniziale non deve essere associata ad una costante ma sarebbe l'andamento ideale dalla macchina prefissato in fase di progettazione.

La lettera B si riferisce ai diversi eventi(variabili) osservati, associati alla moltitudine di dati di contesto forniti dal sistema istante per istante e quindi alle variabili prese in esame per valutare lo stato di salute, che potrebbero alterare la veridicità di A, quindi $P(B)$ è la probabilità che B sia vera indipendentemente da A e per definizione deve essere diversa da 0.

Il modello Bayesiano viene utilizzato per raggiungere l'obiettivo del monitoraggio della salute che è un problema di regressione.

La probabilità condizionata è definita come $P(A|B)$ e si riferisce alla probabilità che qualcosa (un evento A) si verifichi, sapendo che si verifica anche un altro evento (B).

La probabilità di A data B fatta istante per istante esprime l'aggiornamento dell'Health assesstment del macchinario combinando le ipotesi iniziali con i vari dati di contesto osservati durante il fenomeno.

Questo ragionamento di tipo induttivo interpreta e teorizza logicamente il funzionamento della manutenzione predittiva, in quanto analizza i vari dati di contesto (B), associandoli all'ipotesi iniziale(A), valutando così periodicamente il rischio di rottura, e volendo anche di degrado.

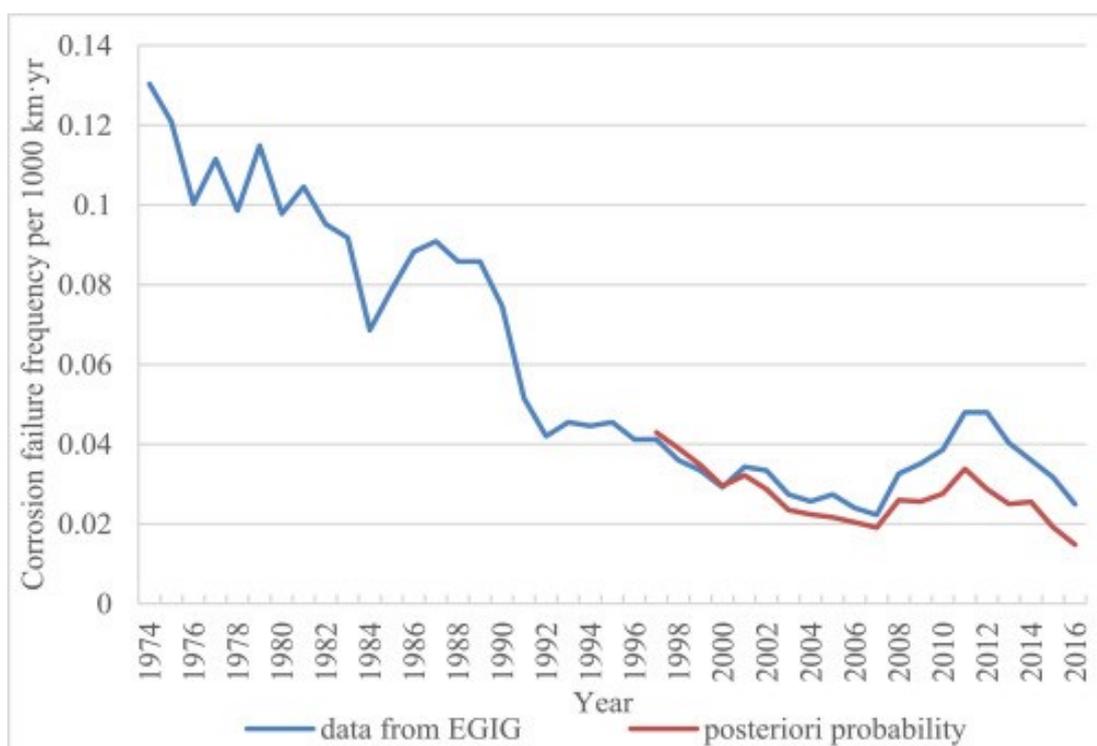


Figura 5 Esempio di un'applicazione pratica dell'inferenza Bayesiana.¹⁵

Ipoteticamente, ragionando in quest'ottica potremmo presupporre che senza interventi autonomi di manutenzione come l'ispezione, lubrificazione o piccole regolazioni, tale probabilità condizionata possa diminuire a causa del continuo e progressivo degrado del sistema, anticipando quindi la rottura del prodotto rispetto a quella prefissata a priori.

Intuitivamente potremmo anche concludere che se il prodotto o sistema nel progredire del suo ciclo di vita non sia soggetto a radicali eventi che lo possano condizionare negativamente, si avvicini alla rottura proprio come preannunciato dalla stima iniziale fornita in fase di progettazione.

A differenza dell'approccio classico, nel quale attraverso i soli dati campionari si ottiene una conoscenza oggettiva della realtà, in cui non si presuppone una conoscenza pregressa, quello Bayesiano attraverso l'utilizzo dei dati campionari aggiorna continuamente la conoscenza presa a priori.

¹⁵ Esempio di un'applicazione pratica dell'inferenza Bayesiana, per ulteriori approfondimenti consultare [4].

Questo ragionamento teorizza come la manutenzione predittiva non monitora solamente l'health assesstment ma stima anche il tempo prima del guasto/fallimento.

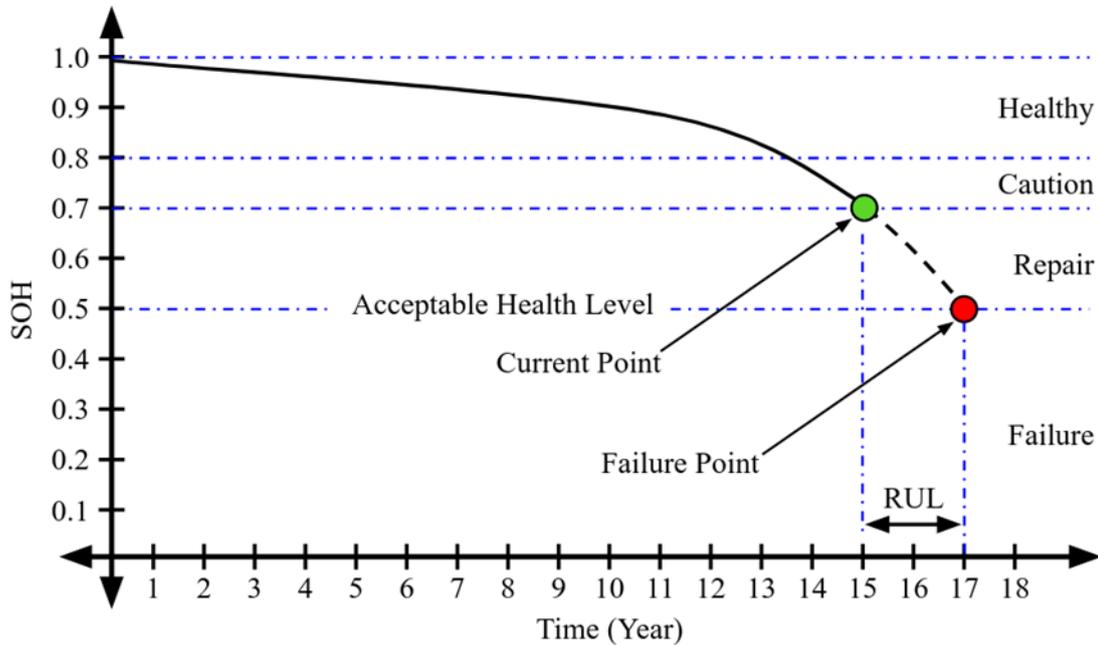


Figura 6 Esempio della predizione della RUL di una batteria.¹⁶

Va sottolineato che, questi metodi non escludono l'incertezza sulla stima della vita utile del sistema, ma rispetto alla manutenzione preventiva hanno una maggiore accuratezza, sia per quanto riguarda la previsione di errori casuali che di quelli sistematici.

Proprio per questo motivo viene anche considerato e simulato anche un intervallo di confidenza per ovviare all'incertezza dei valori di soglia corrispondenti al fallimento della macchina e all'incertezza sulla previsione.

2.3.6 Modelli basati sulla fisica

I modelli basati sulla fisica utilizzano le leggi della fisica per valutare il degrado su uno specifico componente o sistema. Richiedono elevate competenze in matematica e fisica dei fenomeni per l'applicazione e, di fatto, per questo sono i meno utilizzati.

¹⁶ Esempio della predizione della RUL di una batteria, vedere [5]

Questo tipo di modello matematico rimane un importante argomento di ricerca con interesse per molte discipline. All'interno degli studi identificati di modelli basati sulla fisica ci sono modelli di propagazione della fatica e delle cricche per componenti meccanici e strutturali.

L'influenza esterna come la pressione, la temperatura o qualsiasi altra condizione ambientale potrebbe alterare drasticamente i parametri operativi previsti e il comportamento effettivo.

2.3.7 Approcci multi-modello

Gli approcci multi-modello sono in forte crescita negli ultimi anni a causa della complessità crescente. Essa include il numero di potenziali guasti e le modalità di guasto del sistema tecnico, il tipo e il numero di informazioni e / o fonti di dati da esso ottenute e il numero di compiti diagnostici e prognostici che sono mirati, tutti questi a parte la complessità di progettazione del modello selezionato.

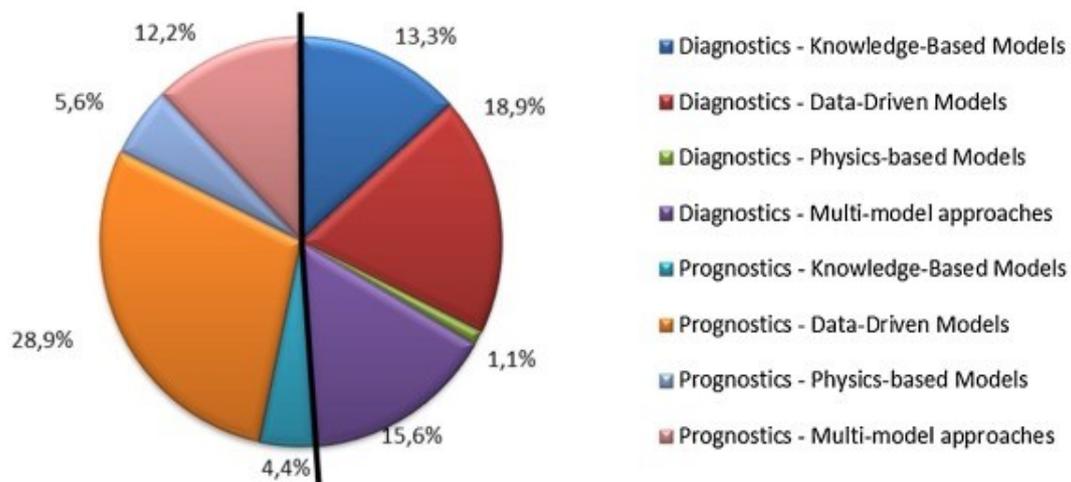
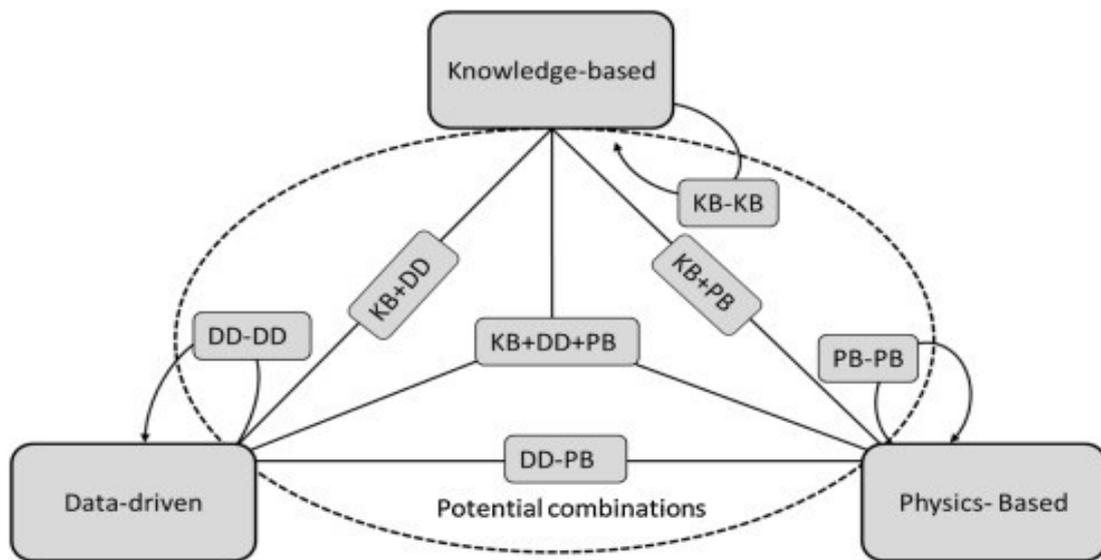


Figura 7 Approcci multi-modello e approcci modello singolo a confronto¹⁷

Un esempio di approccio multi-modello è il modello ibrido, in cui due o più modelli sono combinati per soddisfare un singolo blocco funzionale del sistema predittivo di manutenzione e vi è cooperazione reciproca tra i modelli combinati per ottenere i loro risultati.

¹⁷ Approcci multi-modello e approcci modello singolo a confronto, vedere [2].



KB: Knowledge-based model. DD: Data-driven model. PB: Physics-based model.

Figura 8 Possibili combinazioni per approcci multi-modello.¹⁸

Da un punto di vista pratico l'utilizzo congiunto di due modelli può essere fatto attraverso diverse modalità:

- Serie
- Parallelo
- Incorporato

Queste configurazioni spiegano il flusso di informazioni, dati o conoscenze attraverso il sistema di manutenzione predittiva. Quando si progettano nuovi sistemi di manutenzione predittiva, è importante considerare le potenziali configurazioni al fine di trovare le soluzioni "migliori" per soddisfare i requisiti del sistema.

Due modelli sono in serie quando l'uscita di un primo modello è l'ingresso per un secondo. Gli approcci multi-modello che utilizzano una configurazione in serie non sono generalmente indicati come ibridi, anche quando i modelli combinati vengono utilizzati per soddisfare un singolo blocco funzionale; non c'è cooperazione reciproca tra i modelli per ottenere i risultati.

Due modelli sono in parallelo quando elaborano i loro input simultaneamente e i loro output sono combinati in uno solo. È importante sottolineare che l'input potrebbe essere lo stesso per entrambi i modelli che lavorano in parallelo o potrebbero avere

¹⁸ Possibili combinazioni per approcci multi-modello, vedere [2].

input diversi ma correlati. Due modelli paralleli che soddisfano un unico blocco funzionale sono generalmente indicati come un modello ibrido in quanto vi è cooperazione reciproca tra i modelli per ottenere il risultato finale.

Per la configurazione incorporata un modello è incorporato come una sotto-parte di un altro.

Avere un'idea chiara delle configurazioni di base e delle loro potenziali combinazioni consente di dedicare il processo di creatività all'architettura di nuovi sistemi di manutenzione predittiva.

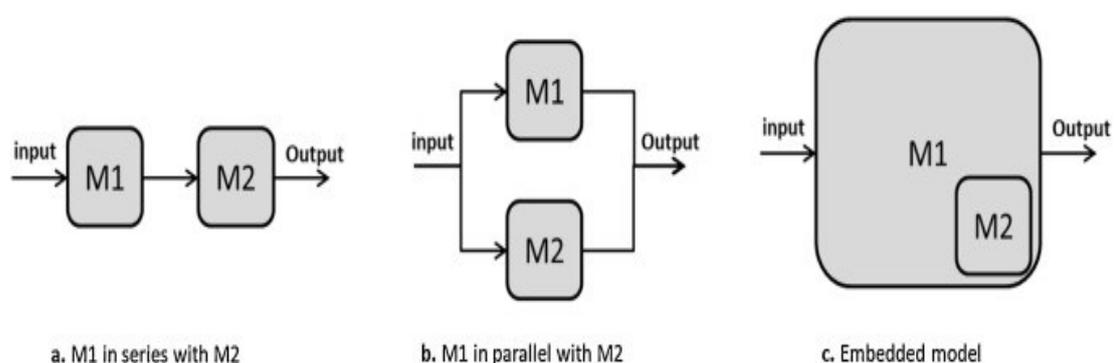


Figura 9 Modelli in serie, in parallelo e incorporati¹⁹

Oltre alla difficoltà di sviluppare i singoli modelli che compongono l'approccio multi-modello, la loro combinazione pone ulteriori sfide. La mancanza di un approccio sistematico per la progettazione di sistemi di manutenzione predittiva è una sfida importante. Tuttavia, gli approcci multi-modello presentano un vasto campo di opportunità nella ricerca per i prossimi anni. Il numero di combinazioni alternative inesplorate rimane enorme. Questi approcci multi-modello possono aiutare a incorporare i dati di influenza esterna, la conoscenza semantica degli esperti e le leggi della fisica che governano il degrado di componenti o sistemi per gestire l'incertezza e migliorare l'accuratezza nella diagnostica e nella prognosi. Inoltre, la combinazione di diversi modelli può dare l'opportunità di estrapolare approcci diagnostici e prognostici (oggi focalizzati su applicazioni in modalità di guasto singolo) a sistemi complessi che includono molti componenti con molte modalità di guasto.

¹⁹ Modelli in serie, in parallelo e incorporati, vedere [2]

Le sfide da affrontare con l'approccio multi-modello per beneficiare di un efficiente sistema predittivo sono:

- L'estrapolazione di soluzioni esistenti per applicazioni di sistema complesse, inclusi più componenti, e gli errori associati.

Le applicazioni della vita reale sono spesso sistemi complessi composti da molti componenti e molti guasti associati a ciascun componente e al sistema stesso.

- La mancanza di un approccio sistematico per progettare e sviluppare sistemi di manutenzione predittiva su applicazioni industriali su scala reale.

Per gli ingegneri il semplice fatto di scegliere il modello giusto o una serie ridotta di modelli rimane un compito impegnativo. Risulta essere molto difficile eseguire una selezione oggettiva dei modelli in quanto non ci sono studi comparativi sufficienti sull'uso di modelli diversi sugli stessi compiti per i sistemi di manutenzione predittiva.

- La fusione di grandi e diverse fonti di dati di monitoraggio delle condizioni. I sistemi tecnici possono avere diversi tipi di fonti di dati, ad esempio misurazioni di sensori, registri di manutenzione, registri operativi, documenti di progettazione, ecc. È possibile raccogliere conoscenze importanti da tutte queste fonti per implementare nuovi sistemi di manutenzione predittiva. Tuttavia, l'eterogeneità di queste fonti di dati rende la modellazione e la fusione della conoscenza un compito difficile per scopi di manutenzione predittiva.

- L'incorporazione di dati sull'influenza esterna. Il funzionamento dei sistemi può variare a seconda del contesto operativo. Cambiamenti nel contesto operativo possono influenzare direttamente le prestazioni del sistema tecnico e di conseguenza le letture sul monitoraggio sanitario. Può attivare falsi allarmi che suggeriscono l'esistenza di un guasto o può impedire l'identificazione del guasto esistente. Ciò potrebbe essere affrontato con modelli complementari in grado di incorporare l'influenza esterna per scopi di manutenzione predittiva.

- Gestione dell'incertezza. L'incertezza influenza direttamente l'accuratezza della diagnostica e dei prognostici. Può essere dovuto ai dati raccolti o ad imperfezioni del modello utilizzato per l'analisi. Può influire sull'attendibilità

dei risultati. La gestione dell'incertezza è vitale per i sistemi critici soggetti alle normative delle autorità. La teoria della probabilità e la logica fuzzy sono state le tecniche più comuni utilizzate per gestire l'incertezza osservata nella revisione sistematica della letteratura. Gli approcci multi-modello possono essere una soluzione per affrontare l'incertezza nei sistemi complessi.

2.4 Supporto alle decisioni

Affinché la manutenzione predittiva possa essere eseguita, è fondamentale che la conoscenza acquisita dall'analisi dei dati raggiunga le persone giuste al momento giusto. Occorrono segnalazioni, come allarmi e notifiche a breve termine, per gli operatori delle macchine, e indicatori chiave di prestazione per i dipendenti del vertice aziendale.

I principali strumenti di controllo che devono essere utilizzati sono:

- gli audit di manutenzione;
- gli indici di manutenzione;
- il budget di manutenzione;
- i bollettini ed i rapporti di manutenzione.

L'audit di manutenzione è un esame volto a verificare la conformità delle attività tecniche ed amministrative di manutenzione a leggi, norme, standard e disposizioni e a quanto pianificati in funzione degli obiettivi aziendali.

È necessario in questa sede definire quali tipologie di audit si intendano utilizzare (sulle attività, sui processi, sui progetti, sulla funzione di manutenzione, sulle risorse) ed indicarne la frequenza.

Gli indici di manutenzione, chiamati anche Indicatori Chiave di Prestazione (Key Performance Indicators) hanno lo scopo di misurare il livello del servizio fornito.

Gli indici di manutenzione formalizzano in modo quantitativo i fattori di interesse analizzati in modo che i valori ottenuti possano essere utilizzati sia per una analisi obiettiva della situazione, sia per analisi di tendenza, sia per analisi comparative (benchmarking).

Essi si distinguono in indici di efficienza (della manutenzione e della organizzazione) e di efficacia. È necessario definire quali indici si intendano utilizzare per monitorare sia l'efficienza che l'efficacia della manutenzione.

Analogamente a quanto fatto per il mix di politiche di manutenzione, è opportuno che il raggiungimento degli obiettivi definiti sia ottenuto mediante un piano pluriennale in cui siano fissati, annualmente, i valori specifici degli indici utilizzati.

Il budget di manutenzione può riguardare i costi od i volumi. Il primo riguarda i costi, sostenuti e distribuiti, delle attività di manutenzione, e considera le risorse umane, aziendali e di terzi, i mezzi, i materiali ed altro (UNI 10992:2002; 3.5).

Il secondo riguarda i fabbisogni di manutenzione, espressi in quantità di ore di lavoro, in quantità di materiali od altro (UNI 10992:2002; 3.6).

Il budget di manutenzione più utilizzato è quello dei costi, ossia l'insieme dei costi di manutenzione strutturati secondo criteri (classi di costo) che permettano una analisi degli stessi per:

- dislocazioni geografiche (nazione, regione, città, via, fabbricato, scala, piano, etc.);
- tipologia di beni (turbine, compressori, pompe, condizionatori);
- discipline (civile, meccanica, elettrica, strumentale);
- attività di manutenzione (correttiva, preventiva, migliorativa);
- tipologia di costi (diretti, indiretti, etc.);

Il budget dei costi può essere calcolato analiticamente in base a criteri tecnici (analisi specifiche condotte su tutte le apparecchiature in base alla filosofia, strategia e politiche aziendali), oppure può essere prefissato in base a criteri di tipo economico (legato al fatturato, alla produttività degli impianti, al prezzo unitario del prodotto).

Anche per il budget è necessario definire una strategia per il suo contenimento o riduzione nel tempo.

I bollettini ed i rapporti periodici di manutenzione, infine, unitamente ai comunicati da affiggere sulle bacheche (esempio: andamento mensile degli indici di manutenzione utilizzati come KPI), svolgono anch'essi una importante funzione quali utili strumenti di controllo.

I bollettini ed i rapporti devono essere in questa sede previsti sia come tipologia che frequenza.

Audit, indici e budget di manutenzione sono strumenti interconnessi.

Il budget, infatti, risulta correlabile con l'andamento degli indici di manutenzione.

Può essere utile, pertanto, scegliere di monitorare e prevedere il budget stesso mediante l'utilizzo di un modello di previsione basato sul valore assunto dagli indici di manutenzione (in modo analogo ai modelli econometrici).

I parametri che determinano gli indici, a loro volta, dipendono da fenomeni la cui natura tecnico-economica è facilmente rilevabile mediante gli audit di manutenzione.

CAPITOLO 3 Tecniche di supporto

La visione dell'Industria 4.0 è quella di costruire sistemi di produzione cyber-fisici (CPPS) che colleghino il mondo fisico e il mondo digitale per rendere la produzione sempre più intelligente, quindi, per aumentare l'adattabilità, l'autonomia e la flessibilità.

3.1 Realtà aumentata

La realtà aumentata (AR) è una tecnologia emergente che consente l'aumento delle informazioni digitali interattive nel mondo reale; l'integrazione di tali informazioni con i vari utenti permettono il monitoraggio continuo da remoto delle apparecchiature. È uno dei modi in cui gli ambienti virtuali e reali possono essere combinati.

A differenza della realtà virtuale si utilizzano dispositivi tecnologici di uso quotidiano come ad esempio laptop, tablet, occhiali di realtà aumentata e smartphone.

L'AR fornisce una guida visiva e informazioni rilevanti per l'attività dove e quando necessario, potendo ridurre così il carico di lavoro cognitivo. Gli utenti sarebbero soggetti a richieste cognitive inferiori e quindi migliorerebbero le prestazioni del compito. In effetti, alcuni studi hanno riportato effetti positivi dell'uso di AR sia sul carico di lavoro mentale che sulle prestazioni del compito.

Un lavoratore sottoposto a forti pressioni mentali e fisiche può avere un impatto negativo sulle prestazioni lavorative, il che può comportare perdite costose per l'azienda o l'attività.

A differenza della realtà virtuale (VR), che immerge l'utente in un ambiente virtuale completamente nuovo, AR mira a integrare la realtà attuale dell'utente aumentando il contenuto virtuale sull'ambiente fisico.

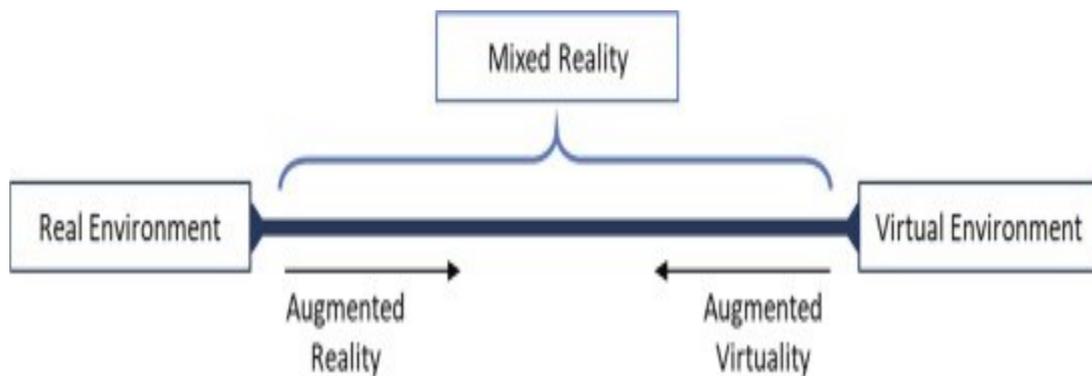


Figura 10 Rappresentazione Mixed Reality²⁰

Le tre caratteristiche principali per definire una tecnologia AR sono:

- Registrato in 3D
- Interattivo
- Visualizzazione in tempo reale

Le tecnologie AR sono state applicate principalmente per supportare la percezione visiva, presentando le informazioni sotto forma di annotazioni testuali registrate spazialmente, di suoni, oggetti e animazioni 3D.



Figura 11 Esempio realtà aumentata²¹

²⁰ Rappresentazione Mixed Reality, vedere [6].

²¹ Esempio realtà aumentata, vedere [7].

La riduzione del carico di lavoro mentale è vista come uno sforzo importante nello spazio di lavoro moderno poiché l'aumento della quantità di informazioni, l'elevata complessità dei compiti e la crescente necessità di fornire servizi in modo rapido e accurato grava sugli operatori umani con un carico mentale eccessivo.

Altri benefici che comporta l'implementazione della realtà aumentata sono:

- ottimizzazione tempo di completamento delle attività;
- riduzione del tasso di errore;
- maggior precisione.

Tuttavia, alcuni studi hanno riportato che l'uso di AR può introdurre nuovi ostacoli per l'utente che potrebbero altrimenti comprometterne i benefici riportati. È stato segnalato che i problemi di ergonomia e di usabilità, come il disagio durante l'utilizzo a lungo termine, il campo visivo ridotto (FOV), i problemi di tracciamento e ritardo, contribuiscono agli effetti negativi sul carico di lavoro mentale e sulle prestazioni delle attività.

In conclusione, si può affermare, in molte circostanze, che il prototipo “virtualmente aumentato” della realtà aumentata, integrato da dati e contenuti digitali, risulta più funzionale e meno costoso di quello fisico.

Nella manutenzione, si migliorano assistenza da remoto e attività di manutenzione preventiva e predittiva. Nella formazione del personale, infine, è possibile trasferire competenze agli operatori in una realtà simile a quella effettiva. Il risultato si misura nell'efficienza operativa, nella sicurezza e nel livello di servizio al cliente.

3.1.1 Strumenti

I componenti di base di un sistema AR sono la tecnologia di visualizzazione, un sistema di sensori, un sistema di tracciamento, un'unità di elaborazione e l'interfaccia utente.

Quattro principali tecnologie di visualizzazione sono disponibili per i sistemi AR, vale a dire display montati sulla testa (HMD), dispositivi portatili (HHD), schermi statici e proiettori. Il sistema di visualizzazione può essere fisso o mobile.

Il tipo di dispositivo di visualizzazione AR utilizzato influenza, in una certa misura, l'usabilità dei sistemi AR.

Il sistema di sensori ottiene informazioni dall'ambiente. Per la maggior parte del sistema AR, l'ingresso centrale è una o più telecamere. Le telecamere stereo forniscono la percezione della profondità. Altri metodi per ottenere informazioni sulla profondità sono i sensori a ultrasuoni.

Il sistema di tracciamento AR consente di posizionare accuratamente gli oggetti digitali nel mondo fisico. La tecnologia AR più importante è basata su marker. I marker fisici sono attaccati a determinati luoghi. Questi marker AR vengono utilizzati per triangolare la posizione corretta per un oggetto digitale.

L'interfaccia utente AR consente la comunicazione bidirezionale dal sistema verso e dall'utente. Vengono utilizzate tecnologie come il force feedback o segnali acustici. I principali metodi di input dell'utente sono il riconoscimento dei gesti, la direzione dello sguardo, il riconoscimento vocale o soluzioni hardware.

L'unità di elaborazione è responsabile dell'esecuzione del software per eseguire il sistema AR. Inoltre, è la connessione ad altre fonti di dati che possono essere ottenute o fornite in tempo reale.

Uno dei problemi più comunemente segnalati sono le difficoltà tecniche derivanti dall'hardware utilizzato. I dispositivi AR sono soggetti a lag e problemi di tracciamento, la maggior parte dei quali sono fuori dal controllo dell'esperimento.

Riassumendo, in situazioni di bassa complessità del compito, l'uso dell'AR può aumentare il carico di lavoro mentale piuttosto che ridurlo, rendendo anche più difficili l'ottenimento di risultati statisticamente significativi. La progettazione degli esperimenti deve essere progettata in modo tale che il livello di complessità sia in grado di produrre un numero di errori statisticamente quantificabili e misurabili.

3.2 Realtà virtuale

I dispositivi VR nei primi anni erano molto ingombranti, costosi e inefficienti. Con decenni di evoluzione, l'hardware è diminuito di dimensioni ed è diventato conveniente, il software è diventato più efficiente e interi sistemi VR possono fornire agli utenti una maggiore immersione spaziale. Oggi, le applicazioni VR possono fornire agli utenti non solo una vista immersiva oltre la realtà, ma anche l'udito, il tatto

e persino la capacità di interagire con oggetti virtuali. Con questi considerevoli progressi, negli ultimi anni la realtà virtuale ha subito notevoli sviluppi in molti campi.



Figura 12 Esempio realtà virtuale²²

La realtà virtuale (VR) mira a creare un'immersione dell'utente in un determinato ambiente, controllato o meno, privando la percezione dell'ambiente locale con un video computerizzato o acquisito in precedenza e sperimentando un ambiente come se esistesse.

La realtà virtuale è una tecnologia che consente agli utenti di esplorare e manipolare ambienti interattivi 3D in tempo reale. Questa tecnologia offre vantaggi come:

- Fedeltà rappresentativa (grado di realismo degli oggetti resi);
- La sensazione di presenza o immersione;
- Immediatezza di controllo e alto livello di partecipazione (capacità di guardare gli oggetti da diversi punti di vista e capacità di raccogliere, esaminare e modificare oggetti all'interno del mondo virtuale).

La realtà virtuale è vista oggi come una tecnologia di integrazione, con un grande potenziale di comunicazione tra i partecipanti al progetto e, più recentemente, come uno strumento per il supporto del processo decisionale.

²² Esempio realtà virtuale, vedere [8].

Tuttavia, la VR non è ancora un elemento indispensabile per la gestione del ciclo di vita dei prodotti per quanto riguarda le questioni relative alla manutenzione.

Allo stesso tempo bisogna considerare che è sempre più importante per le aziende migliorare la manutenibilità dei loro prodotti per rimanere competitivi sui mercati internazionali. Attualmente, il lavoro di progettazione della manutenibilità viene solitamente svolto tramite strumenti CAD (computer-aided design), con i quali i progettisti possono produrre animazioni dei processi di manutenzione e condurre analisi e valutazione di progettazione basate su simulazioni.

Dal punto di vista del design, la realtà virtuale può essere considerata come una naturale estensione degli strumenti CAD tradizionali. Con tecnologie digitali 3D avanzate, i modelli digitali di prodotti, strumenti di manutenzione e apparecchiature possono essere visualizzati in un ambiente virtuale (VE). Se un designer può percepire intuitivamente il prototipo virtuale di un prodotto nella fase iniziale di progettazione e persino interagire con esso, piuttosto che impiegare la sua immaginazione o un'animazione, l'efficienza del lavoro di progettazione della manutenibilità migliorerà notevolmente.

L'approccio alla progettazione della manutenibilità che utilizza la realtà virtuale non richiede prototipi fisici e può aiutare i progettisti a comprendere meglio un prodotto, che può superare le carenze dei metodi di progettazione tradizionali.

Dal punto di vista software bisogna essere in grado di simulare ogni singolo dettaglio della realtà simulata. Anche quello apparentemente invisibile. Riguardo all'hardware, il visore utilizzato dovrebbe garantire un campo visuale di 180°. Anche i sensori hanno un ruolo fondamentale perché devono tenere conto dei movimenti del corpo e della testa per rendere l'esperienza ancora più veritiera, ossia del tracking.

Il tracking, ossia il puntamento, garantisce una totale immersione della realtà virtuale.

Esistono diversi modi per realizzare il tracking:

1. Sistema di puntamento elettromagnetico
2. Sistema di puntamento acustico
3. Sistema di puntamento ottico
4. Sistema di puntamento meccanico.

In conclusione, la realtà aumentata non è immersiva quanto la realtà virtuale: ecco perché quest'ultima è considerata una tecnologia più evoluta. Riuscire a realizzare un ecosistema per la realtà virtuale è tutt'altro che semplice.

Capitolo 4 Strategia di manutenzione

In questo capitolo si discuteranno tre tipologie di analisi preliminari²³ per poter valutare il miglior approccio manutentivo da attuare in relazione al rapporto costi-benefici.

Nel seguito sono presentati una serie di aspetti per i quali risulta fondamentale definire delle strategie chiare e consistenti ai fini di una coerente ed efficace manutenzione e, in relazione a queste, dovrà essere strutturata l'organizzazione, modellati i processi, individuate le attività, definite le metodologie e le tecniche specifiche da implementare.

4.1 Analisi centrata sull'affidabilità

Per poter differenziare gli interventi manutentivi in relazione alle varie componenti a disposizione, uno dei metodi più utilizzati è la Reliability Centered Maintenance (RCM), ovvero la manutenzione centrata sull'affidabilità.

L'affidabilità può essere espressa in termini di percentuale di guasti, ovvero guasti per unità di tempo. Il tasso di guasto non rivela quando si verificherà un guasto e l'affidabilità è quindi intrinsecamente accoppiata con l'incertezza.

Questo metodo fa affidamento alla Failure Mode Effects and Criticality Analysis (FMECA), in cui si analizzano contestualmente tutte le apparecchiature interconnesse, i loro possibili modi di avaria, i relativi effetti e in qual modo essi possano danneggiare l'affidabilità dell'impianto, differenziando le componenti, ed infine, identificando le più critiche.

Solitamente l'analisi FMECA viene svolta basandosi su un numero di priorità di rischio (RPN). Lo scopo di questa procedura è quello di analizzare come una macchina si deteriora identificando le cause e i modi di guasto critici, e di identificare e implementare azioni migliorative.

La RCM, grazie alle analisi fatte del degrado e dei guasti, consente di raggiungere molteplici obiettivi:

²³ Per ulteriori approfondimenti vedere [15].

- migliorare continuamente le procedure operative per incrementare la disponibilità;
- definire i requisiti di disponibilità e manutenibilità per i fornitori di macchine e sistemi, ottimizzandone gli aspetti contrattuali;
- ottimizzare la progettazione della manutenzione logistica;
- fornire il giusto mix di approcci manutentivi in relazione alla riduzione dei costi e all'incremento delle disponibilità;
- fornire un riscontro al progetto delle nuove macchine.

4.2 Criticità e analisi dei costi

Uno dei metodi più applicati in questo nuovo panorama industriale è quello dell'analisi di criticità combinato con l'analisi "Costi di manutenzione/Costi di sostituzione".

La prima analisi consiste nel valutare l'entità delle conseguenze provocate dalla rottura di una componente sulla salute, sulla sicurezza, sull'ambiente, sulla produzione e sui costi di riparazione associati.

La seconda consiste nella valutazione della convenienza economica tra riparazione e sostituzione della componente soggetta a manutenzione (ESM).

4.3 Analisi su esperienza

La selezione della politica di manutenzione per le componenti di un sistema può anche essere effettuata in base alla consuetudine o all'esperienza dei tecnici dell'azienda (stato dell'arte). In tal caso si procede alla classificazione delle entità soggette a manutenzione e poi si stabilisce, per una intera classe o tipologia di esse, la politica di riferimento standard da utilizzare.

CONCLUSIONI

Un'azienda deve investire in questo tipo di analisi per essere certa di rispettare tutti gli aspetti normativi in materia di sicurezza, ambiente, energia, di progettazione, al fine di determinare la politica di manutenzione più idonea da applicare ad ogni singola apparecchiatura o componente in funzione dello specifico servizio e contesto operativo.

Risulta particolarmente conveniente applicare la manutenzione predittiva per componenti ad alto valore, ad elevato impatto su elementi connessi e difficilmente ispezionabili. Studi accademici e testimonianze aziendali evidenziano un decremento dei costi totali di manutenzione del 25% -35%, l'eliminazione di guasti del 70% -75%, la riduzione dei tempi di interruzione del 35%-45% e un aumento della produzione dal 25% al 35%. Queste percentuali non considerano aspetti importanti come la sicurezza del sistema e l'immagine aziendale.

Per ciò che concerne la scelta delle tipologie di manutenzione (correttiva, preventiva, migliorativa) è prassi stabilire, in base alla specificità di ciascuna azienda, il "mix" di riferimento tra le varie tipologie di manutenzione in precedenza definite.

La definizione del "mix" è basata sul concetto di ottimizzazione di più fattori: l'individuazione della struttura organizzativa più snella e flessibile, la scelta della tipologia più efficace e meno costosa di attività di manutenzione, la definizione del numero di lavori minimo indispensabile, la ricerca del minor costo globale di manutenzione.

È importante verificare quanto il ciclo di vita di un'apparecchiatura sia congruente con quello del sistema tecnologico a cui appartiene sia dal punto di vista della manutenibilità sia dell'affidabilità, sia dei requisiti di sicurezza e dei costi di manutenzione dell'apparecchiatura.

Le verifiche, basate sull'analisi costi-benefici e su studi di obsolescenza, e il controllo tecnico-economico dei risultati della manutenzione, sono due degli argomenti chiave in questo nuovo contesto industriale.

BIBLIOGRAFIA

Figure:

- [1] Figura 1 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850616301986>.
- [2] Figura 2, 3, 7, 8, 9
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612520301187>.
- [3] Figura 4 https://www.okpedia.it/teorema_di_bayes.
- [4] Figura 5 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832020305901>.
- [5] Figura 6 <https://medium.com/it-paragon/remaining-useful-life-predictive-maintenance-5b78a17f7d10>.
- [6] Figura 10 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835219306643>.
- [7] Figura 11 <https://www.filodiritto.com/la-realta-40>.
- [8] Figura 12 <https://www.augmenta.it/tracking-ovvero-puntamento-realta-virtuale/>.

Documenti consultati:

- [9] Radhya Sahal, John G. Breslin, Muhammad Intizar Ali.
Big data e piattaforme di elaborazione dei flussi per la mappatura dei requisiti dell'Industria 4.0 per un caso d'uso di manutenzione predittiva
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612519300937>.
- [10] Jon Bokrantz, Anders Skoogh, Cecilia Berlin, Thorsten Wuest, Johan Stahre.
Smart Maintenance: un'agenda di ricerca per la gestione della manutenzione industriale.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527319303731>.
- [11] C. Okoh, R. Roy, J. Mehnen, L. Redding. Panoramica delle tecniche di previsione della vita utile rimanente nei servizi di ingegneria nel corso della vita.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114001140>
- [12] Rui Zheng, Yifan Zhou. Comparison of three preventive maintenance warranty policies for products deteriorating with age and a time-varying covariate.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832021002143>.
- [13] Juan José Montero Jimenez, Sébastien Schwartz, Rob Vingerhoeds, Bernard Grabot, Michel Salaün. Verso approcci multi-modello alla manutenzione predittiva: un'indagine sistematica della letteratura sulla diagnostica e sulla prognosi.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612520301187>

[14] Norme: <https://www.certifico.com/normazione/173-documenti-riservati-normazione/documenti-estratti-norme/3135-manutenzione-tutte-le-definizioni-delle-norme-di-riferimento>.