



**UNIVERSITÀ POLITECNICA delle MARCHE**

**Facoltà di Ingegneria**

**Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale**

**LA SICUREZZA E LA MANUTENZIONE DELLE  
MACCHINE UTENSILI CON TECNICHE DI  
INDUSTRIA 4.0**

**SAFETY AND MAINTENANCE OF MACHINE  
TOOLS WITH INDUSTRY 4.0 TECHNIQUES**

Relatore:

**Prof. Maurizio Bevilacqua**

Tesi di Laurea di:

**Giacomo Cuoco**

Correlatore:

**Ing. Giovanni Mazzuto**

ANNO ACCADEMICO 2019 / 2020



*Alla mia famiglia,  
a Roberta,  
e a chi mi ha accompagnato in questo percorso,  
da vicino.*

## Indice

|   |    |
|---|----|
| Introduzione.....   | 6  |
| 1. Il fenomeno dell'Industry 4.0 .....                                | 7  |
| 1.1. La definizione di Industry 4.0 e l'evoluzione fino ad essa ..... | 7  |
| 1.2. Il concetto di Smart Factory .....                               | 9  |
| 1.3. Le tecnologie abilitanti .....                                   | 10 |
| 1.3.1. Advance Human Machine Interface .....                          | 10 |
| 1.3.2. Additive Manufacturing .....                                   | 11 |
| 1.3.3. Cyber Physical System .....                                    | 14 |
| 1.3.4. Cloud .....  | 15 |
| 1.3.5. Wearable .....   | 16 |
| 1.3.6. Robotica.....  | 17 |
| 1.3.7. Realtà virtuale & Realtà aumentata .....                       | 18 |
| 1.3.8. BigData.....   | 21 |
| 1.3.9. Internet of Things (IoT).....                                  | 22 |
| 1.3.10. Machine Learning.....   | 23 |
| 2. La manutenzione nei sistemi produttivi.....                        | 25 |
| 2.1. L'ingegneria di manutenzione .....                               | 25 |
| 2.2. Le attività della manutenzione.....                              | 26 |
| 2.3. I principi chiave della manutenzione.....                        | 27 |
| 2.3.1. Il costo globale .....   | 28 |
| 2.3.2. Affidabilità e costo globale.....                              | 28 |
| 2.3.3. Mean Time Between Failures (MTBF) .....                        | 31 |
| 3. Le politiche manutentive .....                                     | 33 |
| 3.1. Le strategie manutentive.....                                    | 34 |
| 3.1.1. La manutenzione correttiva (o a guasto) .....                  | 34 |
| 3.1.2. La manutenzione preventiva.....                                | 35 |
| 3.1.3. La manutenzione migliorativa .....                             | 38 |
| 3.1.4. La manutenzione predittiva .....                               | 38 |
| 3.1.4.1 Le tecniche di manutenzione predittiva.....                   | 43 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 3.1.4.2   | Analisi dei lubrificanti .....                       | 43 |
| 3.1.4.3   | Analisi termografiche .....                          | 44 |
| 3.1.4.4.  | Analisi delle vibrazioni .....                       | 46 |
| 3.1.4.5.  | Analisi acustica .....                               | 48 |
| 3.1.4.6.  | Analisi delle correnti indotte.....                  | 49 |
| 3.1.4.7.  | Analisi magnetoscopica .....                         | 51 |
| 3.1.4.8.  | Analisi radiografiche.....                           | 53 |
| 3.1.4.9.  | Analisi degli ultrasuoni .....                       | 54 |
| 3.1.4.10. | Esempi di applicazione .....                         | 56 |
| 3.2.      | Scelta della strategia manutentiva.....              | 57 |
| 4.        | L'utilizzo dell'IoT in manutenzione .....            | 61 |
| 4.1.      | Analisi delle modalità di guasto.....                | 62 |
| 4.2.      | La Total Productive Maintenance (TPM).....           | 64 |
| 4.3.      | La pianificazione degli interventi manutentivi ..... | 65 |
| 4.4.      | La programmazione degli interventi manutentivi.....  | 66 |
| 4.5.      | Linee guida della programmazione.....                | 66 |
| 5.        | Conclusioni .....                                    | 69 |
| 6.        | Bibliografia .....                                   | 71 |
|           | Elenco delle figure .....                            | 73 |

# Introduzione

La moderna concezione di realtà produttiva riconosce alla manutenzione un ruolo sempre più cruciale.

Nell'era della quarta Rivoluzione Industriale, attraverso le tecniche di Industria 4.0 la politica manutentiva principale è quella predittiva. Le società che scelgono di attuare questa politica di manutenzione hanno potuto migliorare disponibilità, affidabilità e safety delle proprie operation, combinando dati in tempo reale sugli asset e strumenti di analisi predittiva. Ciò ha permesso loro di ridurre del 12% i downtime non programmati e di elevare del 15% i margini operativi. Oltre a ridurre i downtime e a migliorare la produttività, con la manutenzione predittiva è possibile estendere il ciclo di vita degli asset, ridurre costi e complessità delle riparazioni, gestire meglio le scorte di materiali e pezzi di ricambio, rispettare le normative e gli standard di conformità vigenti in materia.

Importante è osservare il contesto in cui la manutenzione predittiva, dunque capire cosa significhi il termine "Industry 4.0", com'è legato al concetto di Smart Factory e studiare le tecnologie abilitanti.

Essenziale è inoltre comprendere il concetto di manutenzione in ogni suo aspetto, vedere la sua evoluzione, analizzare le varie politiche di manutenzione.

L'obiettivo centrale della tesi è quello di mettere in luce e illustrare le tecniche di Industry 4.0 per la manutenzione e la sicurezza di macchine utensili.

# 1. Il fenomeno dell'Industry 4.0

## *1.1. La definizione di Industry 4.0 e l'evoluzione fino ad essa*

L'espressione **Industry 4.0** è nata nel 2011 in Germania. È stata, infatti, pronunciata per la prima volta all'annuale Fiera di Hannover nel 2011 da un gruppo di lavoro dedicato all'industria 4.0, presieduto da Siegfried Dais, della multinazionale di ingegneria ed elettronica Robert Bosch GmbH, e da Henning Kagermann della Acatech (Accademia tedesca delle Scienze e dell'Ingegneria).

Industria 4.0 può essere definita la quarta rivoluzione industriale, ovvero quella che caratterizza i giorni nostri. Essa si basa su fondamenta gettate dalle prime tre rivoluzioni industriali.

Com'è noto, la prima rivoluzione interessò prevalentemente il settore metallurgico, con l'introduzione fra l'altro della macchina a vapore nella seconda metà del '700. La seconda rivoluzione industriale viene invece fatta convenzionalmente partire dal 1870 con l'introduzione dell'elettricità, dei prodotti chimici e del petrolio. Ci si riferisce normalmente agli effetti dell'introduzione massiccia dell'elettronica, delle telecomunicazioni e dell'informatica nell'industria come alla terza rivoluzione industriale, che viene fatta partire intorno al 1950.

Quest'ultima, conosciuta anche come la rivoluzione digitale, coincide con il passaggio dalla meccanica, dalle tecnologie elettriche e da quelle analogiche alla tecnologia digitale, che si è sviluppata nei Paesi più avanzati con l'adozione e la proliferazione dei computer digitali e dei sistemi di conservazione dei documenti. Con l'espressione terza rivoluzione industriale si indica anche tutta quella serie di processi di trasformazione della struttura produttiva, e più in generale del tessuto socio-economico, avvenuti a partire dalla metà del Novecento nei Paesi sviluppati e caratterizzati da una forte spinta all'innovazione tecnologica e al conseguente sviluppo economico della società. L'innovazione quindi legata alla nascita dei computer, dei robot, della prima navicella spaziale e dei satelliti.

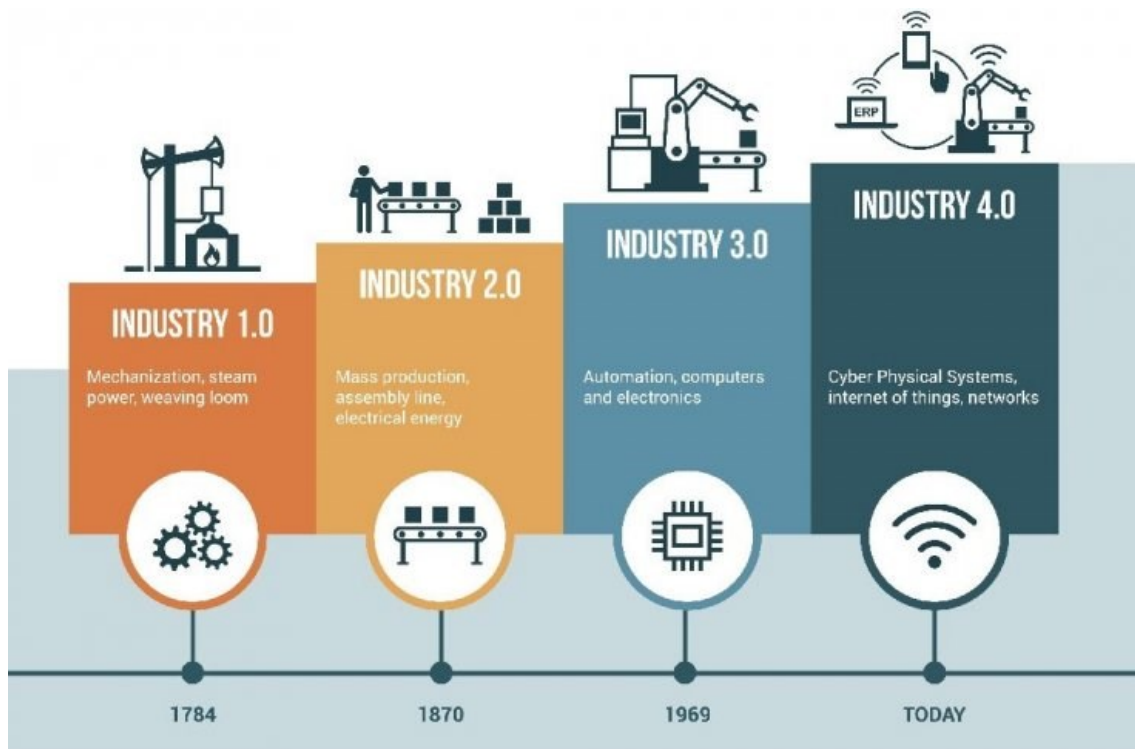


Figura 1. Le rivoluzioni industriali

L'idea di fondo del concetto di Industry 4.0 è quella dell'interconnessione, cioè quella di immaginare uno scenario di sistema produttivo in cui le principali risorse di esso, ovvero le persone, le macchine, gli impianti, le materie prime, i prodotti finiti fino ad arrivare al consumatore finale siano tra di loro interconnessi, quindi la parola chiave non è automazione, ma interconnessione.

Un'interconnessione che va a toccare non solo la fabbrica, poiché un altro errore è confondere industria 4.0 con l'automazione nella fabbrica. Qui si parla di una situazione in cui la fabbrica è un componente di un sistema decisamente più ampio che esce dalla fabbrica, abbraccia il sistema logistico-distributivo e la supply-chain, cioè tutto quell'insieme di "attori" che creano valore all'interno del sistema e tocca molti processi, che non sono solo processi di fabbricazione del prodotto ma sono il processo di sviluppo di nuovi prodotti, di fabbricazione, di distribuzione, di assistenza post-vendita, di marketing e relazione con il consumatore.

Con la quarta rivoluzione industriale quindi stiamo assistendo e assisteremo, ancor di più con il passare degli anni, a cambiamenti, anche radicali, che interessano il settore industriale, con la produzione di beni e servizi, e la società in ogni suo aspetto.



L'Industry 4.0 si basa, senza dubbio, sui seguenti quattro cardini, ovvero:

- Il **dato**, che gioca un ruolo primario. Infatti è passato dall'essere un'informazione nata e morta in un piccolo sistema locale, a diventare uno strumento che crea valore.
- **Analytics**, che consistono in tutte le operazioni di analisi svolte dopo la raccolta dati.
- **Interazione uomo-macchina**, ossia la modalità con cui l'essere umano può interfacciarsi con una macchina.
- **La manifattura**, che congiunge il digitale e il reale. Una volta raccolti i dati, processati e resi strumento "utilizzabile", l'ultimo passo da fare è quello di trovare gli strumenti per produrre i beni.

## ***1.2. Il concetto di Smart Factory***

La Smart Factory nasce dalla convergenza tra i mondi virtuali e reali (fisici) come integrazione tra i processi di produzione e l'intelligenza artificiale, l'apprendimento automatico, l'automazione delle attività tipiche della conoscenza e la comunicazione tra macchina e macchina.

La Smart Factory di fatto cambia le modalità di progettazione, produzione e consegna dei prodotti; nel contempo aumenta la sicurezza nel lavoro e l'impatto ambientale. Tutto ciò insieme al fatto che molte fasi decisionali passano dall'uomo ai sistemi tecnologici fanno sì che la produzione diventi intelligente (smart).

L'industria 4.0, dunque, passa per il concetto di Smart Factory che si compone di 3 parti:

- *Smart production*: nuove tecnologie produttive che creano collaborazione tra tutti gli elementi presenti nella produzione ovvero collaborazione tra operatore, macchine e strumenti.
- *Smart service*: tutte le "infrastrutture informatiche" e tecniche che permettono di integrare i sistemi; ma anche tutte le strutture che permettono, in modo

collaborativo, di integrare le aziende (fornitore – cliente) tra loro e con le strutture esterne (strade, hub, gestione dei rifiuti, ecc.).

- *Smart energy*: tutto questo sempre con un occhio attento ai consumi energetici, creando sistemi più performanti e riducendo gli sprechi di energia secondo i paradigmi tipici dell'Energia sostenibile.

Quindi, la chiave di volta dell'industria 4.0 sono i sistemi cyberfisici (CPS) ovvero sistemi fisici che sono strettamente connessi con i sistemi informatici e che possono interagire e collaborare con altri sistemi CPS. Questo sta alla base della decentralizzazione e della collaborazione tra i sistemi, che è strettamente connessa con il concetto di industria 4.0.

### ***1.3. Le tecnologie abilitanti***

L'industria 4.0, anche se globale, non è stata accettata in modo uniforme tra i vari paesi sia nella tempistica e sia nella scelta degli investimenti da effettuare. In ogni caso è possibile riconoscere un elemento comune che ha avviato la rivoluzione. Questo elemento è caratterizzato dall'insieme di tecnologie definite abilitanti; alcune di queste sono “vecchie” conoscenze, concetti già presenti ma che non hanno mai sfondato il muro della divisione tra ricerca applicata e sistemi di produzione veri e propri; oggi, invece, grazie all'interconnessione e alla collaborazione tra sistemi, il panorama del mercato globale sta cambiando portando alla personalizzazione di massa, diventando di interesse per l'intero settore manifatturiero.

Qui di seguito, vi è una visione applicativa delle tecnologie abilitanti e una descrizione anche del legame che c'è tra la tecnologia stessa e l'Industria 4.0 e illustrando anche la sua concreta utilità.

#### **1.3.1. Advance Human Machine Interface**

L'interfaccia uomo-macchina (HMI) è quel dispositivo o software che permette all'uomo di interfacciarsi con uno o più macchinari (2). È possibile quindi supervisionare e gestire, mediante un display single o multi-touch, il corretto funzionamento di un qualsiasi sistema semplice o complesso che sia. Il software

utilizzato svolge l'importante ruolo di 'traduttore' che mostra, nel modo più user-friendly possibile, tutte le informazioni che riceve, rendendo più facile, per l'utilizzatore, la gestione dei macchinari.



Figura 2. Esempio di Human Machine Interface

In origine questa tecnologia era prevalentemente stand-alone poiché era integrata al macchinario controllato. Le nuove soluzioni, invece, prevedono postazioni remote che danno la possibilità di gestire anche un complesso sistema, a distanza. Se prima, le interfacce uomo-macchina venivano utilizzate per lo più per gestire processi di tipo industriale, oggi vengono utilizzate praticamente in qualsiasi ambito sociale. Con l'Internet of Things (che vedremo più avanti) tutti gli oggetti possono essere interfacciati con la rete, e di conseguenza gestibili da remoto. Se prima l'interfaccia era un complesso software su un terminale composto da 4 schermi, oggi è sufficiente un'applicazione ed uno smartphone per controllare un qualsiasi impianto.

### **1.3.2. Additive Manufacturing**

L'AD (Stampante 3D) è una nuova tecnologia utilizzata per la produzione di oggetti 3D. Per far questo sfrutta una tecnologia meno recente chiamata CNC (Computer a Controllo Numerico) che converte un file di disegno CAD1 in un file ISO contenente determinati numeri e lettere. Le combinazioni di questi due elementi comunicano al macchinario, collegato al controllo numerico, le coordinate in cui lavorare e lo strumento da utilizzare. Partendo da un progetto CAD è dunque possibile creare un manufatto depositando, strato dopo strato, del materiale su una superficie fino alla sua completa realizzazione (3).

Perché l'Additive Manufacturing ha avuto così tanto successo?

Un' alternativa alla produzione additiva è quella per 'rimozione'. Si parte da un blocco di materiale per poi rimuoverlo fino ad ottenere l'oggetto desiderato per mezzo di una fresa, trapano o tornio. Nonostante oggi esistano frese ad alta precisione con 4 o 5 assi di rotazione, in alcuni campi, è stata sostituita dalla stampa additiva. Le frese infatti :

- portano materiale di scarto;
- sono più pericolose per le alte temperature e per le schegge che si possono creare durante la lavorazione;
- richiedono più spazio e mezzi più grandi in grado di posizionarla e trasportarla;
- necessitano di un software di controllo più complesso in quanto viene richiesto un toolpath con CAM2 che determina le dimensioni del blocco da lavorare, le dimensioni della fresa e la sua velocità;

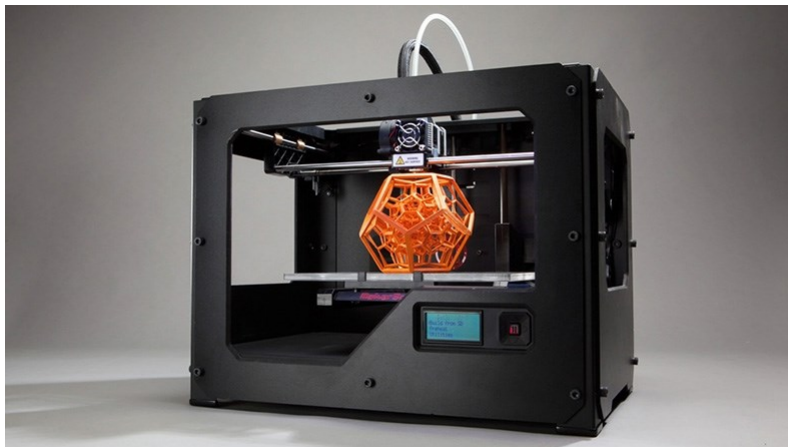


Figura 3. Stampante 3D

Un altro motivo è la precisione. In determinati settori, quali la prototipazione (anche in campo medico) o l'hobbistica, viene richiesto un livello tale di precisione irraggiungibile, almeno per ora, dalle fresatrici.

Le caratteristiche della stampa additiva che hanno decretato il suo successo sono le innumerevoli varietà dei materiali e le tecniche utilizzabili.

- *StereoLithography Apparatus* (SLA) - la stereolitografia è stata una delle prime tecniche utilizzate nell'AM. Consiste in un laser che solidifica porzioni di resina liquida contenuta in una vasca. I materiali utilizzati sono per lo più resine epossidiche fotosensibili, per la creazione di prototipi trasparenti, e materiali

ceramici resistenti ad alte temperature (300°C).

- *Multi Jet Modelling* (MJM) - come nella deposizione fusa, viene riscaldato un filamento di cera e depositato sulla piattaforma di costruzione. Prima di depositare lo strato successivo, la struttura viene solidificata con l'utilizzo di raggi UV.

- *Fused Deposition Modelling* (FDM) - sviluppata alla fine degli anni '80 da Scott Crump, co-fondatore e direttore della Stratasys, e commercializzata negli anni '90. È la tecnica più conosciuta ed utilizzata e consiste nel deposito di materiale mediante un ugello. L'ugello di estrusione viene riscaldato al punto da rendere malleabile il materiale ma consentendogli comunque di raffreddarsi in tempi brevi consentendo così uno sviluppo orizzontale e verticale del manufatto.

- *Selective Laser Sintering* (SLS) - tecnica molto popolare con il quale è possibile creare oggetti 3D di plastica, vetro, ceramica, nylon e metalli. Utilizza un laser che salda tra di loro le particelle del materiale scelto.

- *Color Jet Printing* (CJP) - tecnica professionale per la stampa 3D a metallo nella quale gli oggetti sono formati incollando le particelle metalliche e poi sinterizzandole (o fondendole). Gli aspetti negativi sono : la necessità di una fase separata di cottura in una fornace apposita e i costi alti; è quindi indicata per manufatti di dimensioni consistenti.

- *Directed Energy Deposition* (DED) - o Laser Cladding, utilizza un laser per sciogliere la polvere che è lentamente rilasciata e depositata da un braccio robotico per formare gli strati di un oggetto.

Le potenzialità della stampa additiva sono infinite. In breve tempo siamo passati dalla progettazione e costruzione di modellini alla costruzione di protesi. È in questo campo, quello medico, che la tecnologia additiva ha suscitato maggior scalpore non limitandosi alle protesi, ma riproducendo anche strutture rigide del corpo come ossa e denti. Da allora ci siamo posti obiettivi sempre più ambiziosi ma realizzabili.

Rimanendo in tema medico, la ricerca ha l'obiettivo di realizzare artificialmente i tessuti molli dell'organismo rendendoli funzionali. In ambito ingegneristico, il reparto aviazione della General Electric<sup>4</sup>, ha già avviato progetti per la creazione di particolari di motori (ugelli, pale dei motori, turbine) per aerei utilizzando materiali quali titanio, alluminio e nichel-cromo. È stato pianificato, inoltre, un progetto che prevede la costruzione di un ponte, su un canale di Amsterdam, mediante la stampa 3D. Verrà utilizzata la tecnologia MX3D, un robot a 6 assi dotato di strumenti e software in grado di monitorare lo sviluppo del progetto.

### 1.3.3. Cyber Physical System

Il Cyber Physical System è forse il sistema informatico che ha determinato, più di tutti gli altri, l'inizio dell'Industria 4.0 anche perché è stato uno dei primi sistemi in grado di scambiare informazioni, in modo continuo, tra il mondo fisico e il mondo virtuale. I CPS sono composti da diverse parti, provenienti anche da produttori differenti, che collaborano assieme per svolgere determinate operazioni. Questi sistemi devono rispettare lo schema delle tre 'C' : controllo, comunicazione e capacità computazionale (4). Essi sono il software, la tecnologia per la comunicazione, sensori ed attuatori per la rilevazione e la misurazione dei fenomeni nel mondo reale.

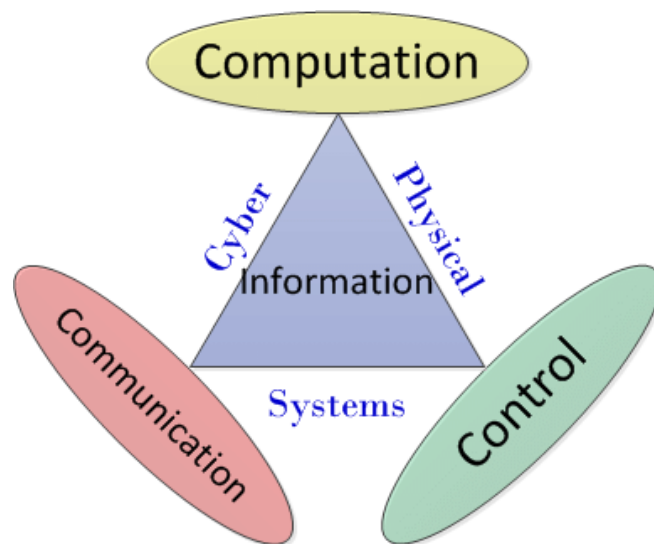


Figura 4. Schema delle 3 "C"

I CPS già di per sé non hanno confini. Molti sono già utilizzati nei più svariati ambiti: in dispositivi medicali, in sistemi di controllo ambientale e di infrastrutture critiche, in sistemi di conservazione e distribuzione dell'energia e nelle strutture smart in genere. Le potenzialità e l'utilità dei Cyber Physical System aumentano se vengono interfacciati alla rete internet.

### 1.3.4. Cloud

Il cloud è un servizio erogato da un fornitore, come aziende o provider esterni, che permette a qualsiasi cliente autorizzato di condividere, archiviare o elaborare dei dati. Tra cliente e fornitore può esistere una terza figura, quella del cliente amministratore, il quale sceglie e configura i servizi offerti dal fornitore ma offrendo un valore aggiunto come applicazioni software.

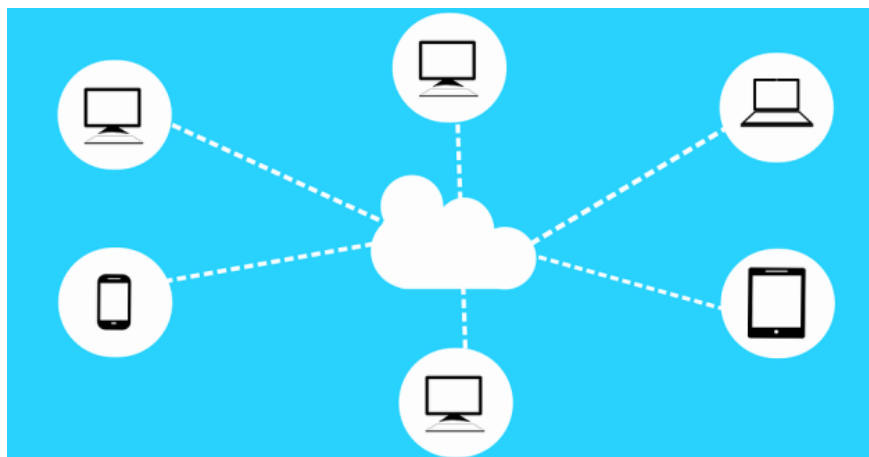


Figura 5. Cloud

Un servizio cloud, per definirsi tale, deve rispettare determinate caratteristiche. Una di queste è l'accessibilità globale. Essa costituisce il carattere distintivo del clouding, ovvero, il poter accedere a delle informazioni da qualsiasi terminale e da qualsiasi parte del mondo.

Dalla fine degli anni '90, con l'enorme crescita degli utenti internet, il cloud ha riscosso sempre più successo. Anche i giganti dell'IT, come Microsoft, iniziarono ad investire in questa tecnologia potenziando, pian piano, i propri servizi web. Oggi il cloud ha permeato molti aspetti della vita quotidiana: dai servizi di acquisti online ai servizi di posta elettronica, da applicazioni di editor online (foto, testi) alle piattaforme per lo streaming, ecc. Il suo utilizzo, con l'integrazione dell'IoT nella società, sta ulteriormente espandendosi. Molti dispositivi quali microcontrollori, possono richiedere, a lungo periodo, una memoria troppo grande da poter essere incorporata in qualche oggetto oppure necessitano di informazioni elaborate da altri microcontrollori. Viene quindi sfruttato uno storage cloud il quale può contenere

centinaia di TeraByte di dati e renderli accessibili a chiunque ne possenga l'autorizzazione.

### 1.3.5. Wearable

I wearable devices sono dei dispositivi o 'gadget' indossabili da persone e animali. Ciò che differenzia un oggetto wearable da qualsiasi altro è la capacità di interagire con altri device e di interfacciarsi ad internet. Può essere in grado di salvare informazioni sul web collegandosi, via bluetooth o wifi, ad uno smartphone. I dispositivi indossabili hanno, fin da subito, colpito l'attenzione dell'uomo. Solo nel 2014 sono stati venduti nel mondo circa 19 milioni di dispositivi, di cui 600 mila solo in Italia. Secondo un indagine di mercato, svolta dall'IDC (International Data Corporation), nel 2018 è prevista la vendita di oltre 112 milioni di pezzi, anche se questo numero è destinato ad aumentare. Il successo è dato dalla varietà di dispositivi esistenti attirando così l'interesse di ogni tipo di persona. I più noti e più diffusi sono i fitness tracker con la principale funzione di contapassi e gli sport watches i quali, oltre al contapassi, possono rilevare la frequenza cardiaca, la posizione, orologio e tanto altro a seconda dei modelli. Sempre in ambito sportivo abbiamo gli smart clothing, indumenti all'apparenza normali ma dotati di particolari tecnologie che li rendono più funzionali. Per rimanere in tema, in Italia sono in attivo due progetti ritenuti, dall'OWT (Osservatorio di Wearable Technology), molto validi. Uno è 'ComfTech', che fa abbigliamento hi-tech per monitorare i parametri vitali dei neonati, mentre l'altro è 'Sensoria', con i suoi Fitness Socks, Fitness Bra e Fitness T-Shirt. Ai noti dispositivi wearable dedicati al fitness, si aggiungono : gli Head-mounted displays per la realtà virtuale, i gioielli intelligenti (6), i dispositivi impiantabili (7) e tanti altri.



Figura 6. Smart Jewelry



Figura 7. Wireless implantable medical devices



### 1.3.6. Robotica

La robotica, nata come branca della mecatronica, è una scienza interdisciplinare in quanto richiede il coinvolgimento di più discipline: informatica e psicologia, linguistica e automazione, meccanica e biologia. Si dedica alla progettazione e alla costruzione di sistemi automatizzati atti ad aiutare o sostituire a pieno l'uomo nelle sue mansioni.

La robotica, per quel che riguarda l'automazione, non è più fantascienza ma è diventata una realtà che ci coinvolge nei nostri riti quotidiani, quindi dal settore primario che è stata l'industria, con i 'bracci robotizzati', si giunge la :

- *Robotica umanoide* - uno dei campi di ricerca più affascinanti nel quale si cerca di realizzare robot dalle sembianze umane, dotati di intelligenza artificiale e in grado di agire autonomamente con l'ausilio di servomotori e videocamere. La nazione guida è il Giappone, dove da una quindicina di anni si lavora al robot 'Asimo', il più avanzato al mondo. Anche l'Italia si è dedicata a questo campo di ricerca costruendo, presso l'Istituto Italiano di Tecnologia di Genova, il robot umanoide 'R1'.
- *Robotica di servizio* - si occupa di produrre robot che compiono servizi utili agli esseri umani (escludendo l'ambito manifatturiero). In questo campo vengono sviluppati non solo robot badanti per gli anziani, robot di soccorso come il vigile del fuoco o i robot domestici che puliscono e cucinano, ma vengono sviluppati anche esoscheletri e protesi robotiche per la riabilitazione post malattia o incidente.
- *Robotica per la chirurgia e la telepresenza medica* - nella chirurgia robotica è stato sviluppato il robot 'Da Vinci' che con i suoi sottili bracci comandati a distanza consente di eseguire interventi poco invasivi a cuore, prostata, utero e polmoni. Per quanto riguarda la telepresenza medica, invece, vengono studiate possibili soluzioni che permettano allo specialista di visitare, da remoto, i propri pazienti.
- *Robotica educativa* - introduce i bambini e i ragazzi nel mondo della robotica. Consente, infatti, di realizzare dei robot partendo da zero. Molte scuole nel mondo hanno già integrato questa disciplina nel proprio percorso di studi in quanto non richiede competenze ingegneristiche, ma è necessario un apposito kit e l'utilizzo del software 'Choregraphe'.

### 1.3.7. Realtà virtuale & Realtà aumentata

Il mercato oggi offre a prezzi abbordabili, strumenti che consentono all'utente di vedere oggetti virtuali mantenendo però un legame con il mondo reale. Questa operazione è svolta, anche se in modo diverso, da due tecnologie riconosciute con il nome di : realtà virtuale e realtà aumentata. Di seguito viene spiegata la differenza che c'è tra queste due espressioni consentendo, in tal modo, di riconoscere gli strumenti che utilizzano una tecnologia piuttosto che l'altra.

La *Realtà virtuale* è una simulazione o ricostruzione, generata da un computer, della vita, ambienti o situazioni reali. Essa è in grado di immergere l'utente in un mondo non reale, coinvolgendolo a pieno stimolando il senso della vista e dell'udito. In un primo momento la realtà virtuale veniva utilizzata per simulare determinati lavori. Questo dava la possibilità, per esempio ai piloti, di addestrarsi e far pratica nelle più svariate condizioni atmosferiche e di avaria. Poi si sono diffusi strumenti indossabili come gli Oculus Rift (8).



Figura 8. Oculus Rift

Essi hanno permesso a chiunque di poter usufruire di questa tecnologia in quanto, con un costo contenuto, è possibile sfruttarla per ogni tipo di intrattenimento come videogiochi, video, navigazione sul web. La realtà virtuale ha utilizzi che possono interessare tutti i settori. Sta all'uomo capire come sfruttarli. In Italia, Salvatore Giuliano, dirigente scolastico del liceo "Ettore Majorana" di Brindisi, ha portato l'istruzione ad un livello successivo introducendo, da Novembre del 2015, l'utilizzo degli Oculus Rift. Essi infatti permettono all'utente di sfruttare una vista a 360° con

la quale può vagare nel cosmo oppure visitare un monumento. Con i fondi previsti dal PON (Programma Operativo Nazionale), la scuola è intenzionata ad ampliare la postazione per la realtà virtuale con altri 6 dispositivi e inoltre acquistare i Leap Motion. Essi sono dei joystick da attaccare alle mani che consentono ad uno studente di entrare in un laboratorio di chimica o biologia ed afferrare degli oggetti (virtuali) rendendo così lo studente più propenso all'apprendimento delle materie. Come per tutte le nuove tecnologie è necessaria una parte software, quindi, per quanto riguarda l'istruzione, dove si trovano i contenuti? Sul web esistono dei contenuti opensource sia gratuiti che a pagamento, ma secondo Salvatore Giuliano «C'è, infine, una terza via: quella di cominciare a produrli in autonomia». Questo permetterebbe di avere un materiale di studio personalizzato secondo la scuola e secondo le esigenze delle insegnanti, anche se questa via richiede delle conoscenze avanzate non solo nel campo della programmazione ma anche della grafica.

Oltre agli Oculus Rift che occupano nel mercato una fascia di prezzo medio-alta, esistono i gear VR, per la fascia di prezzo bassa e mediobassa, e gli HTC vive (9) per quella alta. L'HTC vive è, forse, lo strumento più avanzato (in vendita al pubblico) per quanto riguarda la VR poiché, mediante dei sensori ambientali al laser, consente all'utilizzatore di 'entrare' nel mondo virtuale anche con il proprio corpo : sarà in grado di sedersi, alzarsi in piedi o correre. È dotato inoltre di telecamera e sensori di prossimità che rilevano la presenza di ostacoli e, cosa forse meno rilevante, non distacca completamente la persona dal mondo reale in quanto potrà ricevere notifiche, chiamate o messaggi.



Figura 9. HTC Vive

La *Realtà aumentata* è una tecnologia che aggiunge agli oggetti già esistenti dei livelli digitali generati da un computer e con i quali si può interagire. Possono essere immagini, informazioni o istruzioni che l'utente può utilizzare per propri scopi. Semplicemente navigando nel web si trovano quantità innumerevoli di applicazioni che si appoggiano su questo concetto. Alcune 'app', per esempio, vengono fornite dai rivenditori di complementi per arredamento, e danno la possibilità all'acquirente di vedere in tempo reale la disposizione e lo stile del futuro acquisto. Esistono applicazioni dedicate alla consultazione di cataloghi, mappe con il relativo navigatore, portali web per recensioni di viaggi, ristoranti e negozi (10). Da non dimenticare poi altre forme di intrattenimento come i videogiochi, molti dei quali sfruttano dei 'marker' ovvero dei simil QR-Code, che trasmettono informazioni sulla localizzazione tridimensionale dei componenti, sviluppando un oggetto 3D virtuale. Come per la realtà virtuale, gli strumenti che permettono ad una persona di sfruttare la realtà aumentata sono tanti e si differenziano per caratteristiche e per portabilità. Il più comune è lo smartphone in quanto necessita solo della fotocamera e di una applicazione. Poi ci sono gli smart glasses. Essi hanno determinato lo sviluppo di un vero e proprio mercato basato sulla competitività tra aziende già affermate e startup. L'elenco delle applicazioni e dei settori in cui si può usufruire di questa tecnologia sono numerosi. Quelli elencati sono la minima parte e ogni giorno se ne trovano di nuovi. Nel 2015, la commissione della sede Australasia del brand di Maranello ha incaricato la ZSPACE per lo sviluppo di un applicazione basata sul concetto della realtà aumentata. Questa applicazione consente ai visitatori degli showroom Ferrari di vedere alcuni componenti delle autovetture e di configurarli, in modo che gli acquirenti acquisiscano una piena conoscenza del loro futuro acquisto.



Figura 10. Utilizzo della realtà aumentata per visualizzare negozi e ristoranti più vicini, con le rispettive recensioni

### 1.3.8. BigData

È importante sapere che oggi qualsiasi oggetto connesso alla rete e qualsiasi servizio, online e non, producono dei dati. Il flusso di informazioni è tale che, i soli dati accumulati negli ultimi due anni hanno raggiunto ormai l'ordine di zetabyte (10<sup>21</sup> bytes). Se, a causa delle dimensioni, questi dati non vengono utilizzati, viene resa vana la memorizzazione degli stessi. Con il termine BigData non ci si riferisce unicamente all'effettiva quantità di dati, bensì alla sua analisi. A riguardo, l'analista Doug Laney, che collabora oggi con Gartner.inc, articolò nel 2001 una definizione di BigData basandosi su tre concetti:

- Volume - necessità di determinare i dati rilevanti all'interno di un enorme mole di dati.
- Velocità - con un flusso dati che viaggia ormai a velocità senza precedenti, è necessario, da parte di organizzazioni, riuscire ad elaborare i dati abbastanza velocemente.
- Varietà - oltre alla velocità, le organizzazioni si devono confrontare con l'enorme varietà di dati esistenti (file numerici, file di testo, audio, video, dati provenienti da quotazioni in borsa, ecc).

Dall'analisi dei dati possono essere estrapolate ogni tipo di informazioni utili a privati o società e viene eseguita mediante il data mining, processo di estrazione di 'conoscenza' da banche dati di grandi dimensioni. Il data mining sfrutta opportuni algoritmi e tecniche come grid computing, in-database processing e in-memory analytics che individuano associazioni, pattern o sequenze rendendo le informazioni disponibili e immediatamente utilizzabili nell'ambito del decision making. È il caso della UPS, il rinomato corriere a livello mondiale, che tiene traccia dei dati riguardanti 16,3 milioni di colli per 8,8 milioni di consumatori, con una media giornaliera di 39,5 milioni di richieste di monitoraggio da parte dei clienti. Solo analizzando i dati provenienti dai sensori di circa 46000 veicoli, la UPS ha risparmiato solo nel 2011 oltre 8,4 milioni di litri di benzina tagliando 85 milioni di miglia effettuate sulle rotte giornaliere. A tale riguardo c'è l'iniziativa ORION (On-Road Integration Optimization and Navigation), il progetto di ricerca, su queste attività, più grande al mondo. Il progetto si avvale di numerosi dati tra i quali quelli provenienti dalle mappe online, con i quali sarà in grado di riconfigurare, anche in tempo reale, i tragitti che gli autisti devono percorrere. Un altro utilizzo dei BigData

sono le proposte di siti e-commerce, di shopping online o di streaming (Netflix, Infinity, ecc). Amazon, Ebay e tanti altri mostrano nella 'home' del proprio sito i prodotti consigliati in modo specifico per ciascun cliente. La scelta tra i miliardi di prodotti viene effettuata analizzando gli acquisti, le ricerche e le preferenze che l'utente esegue quotidianamente online. Al di là del semplice marketing o, per quanto importante, dell'ottimizzazione dei trasporti e dei processi in genere, le reali capacità dell'elaborazione dati sono già state dimostrate anni fa da Google. A Mountain View, quartier generale di Google, lo chiamano processo di 'nowcasting' (previsione del presente), secondo il quale è possibile effettuare previsioni analizzando le ricerche su google effettuate dai milioni di utenti. È il caso di Google Flu Trends, un sistema che nel 2008 è stato in grado di prevedere l'avanzamento dei focolai di influenza negli USA unicamente analizzando le ricerche effettuate di sintomi influenzali e le aree geografiche in cui le ricerche stesse venivano effettuate.

### **1.3.9. Internet of Things (IoT)**

Internet of Things, termine utilizzato per la prima volta da Kevin Ashton, ricercatore presso il MIT (Massachusetts Institute of Technology), definisce quell'insieme di oggetti 'smart' che, oltre allo svolgere azioni di geolocalizzazione, elaborazione, acquisizione e identificazione, riescono ad interfacciarsi al mondo della rete e di conseguenza accedere a tutti i servizi che essa può offrire. Ogni oggetto, come un cyber physical system, è identificato da un indirizzo IP oppure da particolari etichette Rfid, QRcode o NFC.

Con questa tecnologia la rete viene sfruttata come mezzo per trasmettere dati a server remoti o ad altri dispositivi, anch'essi interfacciati ad internet. Un oggetto classificabile come IoT, a seconda dell'hardware che lo definisce e dell'ambiente in cui deve operare, può essere in grado di comunicare con uno o più device a seconda dei casi. Parliamo quindi di una connessione:

- One to One - è la funzionalità base e più semplice che un dispositivo IoT possa eseguire : la comunicazione diretta con un secondo device. È il caso di un automobile che, dotata di strumenti di auto diagnostica, è in grado di inviare informazioni al computer del meccanico.
- One to Many - trasmissione dati più su larga scala nella quale c'è un centro che istruisce molti sensori riceventi, sulla base di informazioni che a sua volta aveva

ricevuto da essi, ed elaborato in precedenza. Come la casa automobilistica Tesla la quale migliora l'efficienza delle proprie autovetture, già in circolazione, basandosi su dati rilevati dalle stesse.

- Many to Many - è la forma più completa di IoT nella quale milioni di sensori comunicano con milioni di dispositivi creando una fitta rete di informazioni in grado di gestire autonomamente intere attività.

L'Internet of Things è quindi un'evoluzione che estende internet ad oggetti e luoghi reali. Secondo alcune stime, svolte da società di ricerca e operatori del settore, entro il 2020 gli apparati IoT potranno superare i 25 miliardi di unità. Questo perché sempre più settori (domotica, robotica, avionica, industria automobilistica e biomedicale, telemetria) utilizzano un numero sempre maggiore di devices, connessi ad internet, per monitorare e poi svolgere azioni conseguenti. Per esempio, in urbanistica, i lampioni possono essere dotati di sensori che segnalano se la lampada funziona oppure rilevare la qualità dell'aria informando in modo opportuno l'ente di riferimento.

### **1.3.10. Machine Learning**

Con il Machine Learning si va oltre la semplice automazione e si entra nell'ambito dell'intelligenza artificiale, nella quale si studia il come far riprodurre i processi mentali da un computer. Il Machine Learning è simile al già descritto data mining. Entrambi analizzano grandi quantità di dati da cui estrapolare informazioni utili. Ciò che differenzia queste specifiche tecniche di analisi sono gli utilizzatori. Le informazioni ottenute con il data mining vengono sfruttate dall'uomo al fine di apportare migliorie a determinate operazioni, mentre quelle ottenute mediante il Machine Learning vengono utilizzate dalle macchine. Quindi un oggetto diventa intelligente non solo perché invia e riceve dati ma anche perché è in grado di imparare da essi senza l'intervento dell'uomo. Elaborando i risultati di precedenti computazioni svolte e di dati appena ricevuti può produrre risultati via via sempre più precisi ed affidabili. L'utilizzo di un sistema intelligente permette di raggiungere, in ogni settore, obiettivi altrimenti difficili da raggiungere. Se un computer è in grado di imparare sarà possibile creare sistemi di sicurezza sempre più all'avanguardia e bypassabili, oppure creare sistemi in grado di prevedere il verificarsi di determinate problematiche.





## **2. La manutenzione nei sistemi produttivi**

La crescente automatizzazione dei sistemi produttivi viene realizzata per mezzo dell'installazione di macchinari sempre più moderni e sofisticati che mirano, a differenza di quanto avvenisse in passato, non solo all'ottimizzazione della produttività ma anche alla salvaguardia della qualità del prodotto e della sicurezza sul lavoro. La crescente complessità dell'impianto che ne consegue richiede una gestione più attenta e razionale di tutti i macchinari. La manutenzione ha lo scopo di rispondere a tale necessità mettendo in campo una serie di azioni volte a garantire la disponibilità dei sistemi, l'economicità della loro conduzione, la sicurezza del lavoro e la sicurezza ambientale. Al fine di realizzare tutto questo, è importante scegliere correttamente le attività gestionali da intraprendere, le quali saranno inevitabilmente guidate da necessità che si pongono all'incrocio fra il tecnico e l'amministrativo. La manutenzione non fa eccezione in quanto la sua impostazione strategica è un'attività gestionale molto complessa, legata ad aspetti sia tecnici che amministrativi e la cui buona riuscita risulta fondamentale alla luce dei numerosissimi risvolti operativi che da essa scaturiscono. Una prima distinzione da fare da subito è quella fra politica manutentiva e strategia manutentiva. La politica manutentiva rappresenta l'attitudine generale dell'impresa rispetto ai problemi manutentivi ed è da tale attitudine che scaturiscono poi tutti gli interventi operativi volti alla risoluzione di tali problemi. La strategia manutentiva dunque, si presenta a valle rispetto alla politica manutentiva e rappresenta la traduzione in interventi operativi dell'atteggiamento generale dettato dalla politica aziendale.

### ***2.1. L'ingegneria di manutenzione***

Il moderno modello di impresa, i cui principi risultano largamente applicati nelle realtà produttive odierne, si pone come obiettivo quello della valorizzazione economica di ogni singola funzione aziendale. In questo contesto, assumono grande rilievo attività come la riduzione dei costi di produzione e la salvaguardia della corretta funzionalità dei macchinari e dei beni aziendali. Da quest'ultima necessità deriva il ruolo cruciale assunto dalla moderna manutenzione. Mentre in passato essa

veniva vista semplicemente come una funzione generatrice di costo, la manutenzione è percepita nel moderno modello aziendale come una funzione in grado di creare valore economico dell'azienda preservando la "salute dell'impianto" e prevenendo possibili condizioni di degradato funzionamento dei macchinari. Tale scopo "nobilita" la funzione manutentiva che è da considerarsi come condizione necessaria della produttività dell'azienda, avendo essa il compito di garantire la qualità e la continuità della produzione, senza ovviamente trascurare la sicurezza sul lavoro e la sicurezza ambientale. Per garantire ciò, gli interventi manutentivi devono essere opportunamente pianificati in maniera che il piano manutentivo si sposi al meglio con il piano di produzione. L'ingegneria di manutenzione non può dunque esclusivamente limitarsi alle competenze tecniche ma deve dotarsi di strategie, indicatori e strumenti gestionali volti a sfruttare le limitate risorse a disposizione per conseguire una serie di obiettivi come la riduzione dei costi di manutenzione, la creazione di una pianificazione flessibile rispetto alle esigenze della produzione, la conservazione di beni e macchinari e l'implementazione di politiche volte al sistematico miglioramento di tutte le funzioni.

## ***2.2. Le attività della manutenzione***

Alla luce di quanto esposto finora riguardo ai profondi cambiamenti del ruolo della manutenzione, è lecito attendersi una crescente complessità di ciascuna delle sue funzioni. La moderna manutenzione è fondata sulla disponibilità di informazioni e dati ricavati direttamente dall'area produttiva e che possano costituire uno specchio fedele delle condizioni dell'impianto. L'istantanea di tali condizioni è rappresentata da alcuni indicatori ben definiti che prendono il nome di Key Performance Index (KPI). L'efficacia di questo processo di raccolta dei dati sul campo risulta inoltre massimizzato dall'utilizzo delle moderne tecnologie di trasferimento dei dati a distanza (LAN, Wi-Fi, ecc.) e dalla nascita di modelli affidabilistici dei macchinari. Sono infatti stati sviluppati sofisticati modelli basati sulla continua osservazione di specifici parametri legati ai macchinari durante il loro intero ciclo di vita, portando così a una gestione degli interventi secondo il modello della manutenzione a condizione. Si tratta di un metodo di gestione della manutenzione in grado di portare

ad ottimi risultati, ma che necessita di una notevole conoscenza dei macchinari e delle loro condizioni di funzionamento, necessaria per interpretarne correttamente le condizioni di lavoro e stimarne la durata. Uno degli aspetti da considerare assolutamente prioritari all'interno della manutenzione è quello dei ricambi. La presenza di ricambi in magazzino è condizione necessaria perché vengano rispettati i piani di produzione e manutenzione. Infatti, la mancanza di un certo pezzo di ricambio determina l'impossibilità della sostituzione del pezzo stesso e questo può portare a un fermo delle linee o ad un funzionamento a regime ridotto dei macchinari, portando così a sostanziali perdite economiche per l'impresa. Il reperimento dei materiali a seguito del fabbisogno aziendale, può essere portato a termine secondo due differenti logiche.

- *Logica a fabbisogno*: l'ordine dei materiali avviene contestualmente al sorgere della necessità. Ne esistono due tipologie:

- Sistemi push come il Material Requirement Planning (MRP);
- Sistemi pull come il Just in Time (JIT);

- *Logica a scorta*: i ricambi vengono gestiti attraverso una scorta a magazzino. Questo tipo di approccio incide sulla voce di costo legata alla suddetta scorta. Si possono anche qui individuare due differenti tipologie:

- Sistemi a intervallo di riordino costante: il livello delle scorte viene ripristinato a cadenza temporale fissa;
- Sistemi a livello di riordino costante: il livello delle scorte viene ripristinato non appena esso scende al di sotto di un determinato valore prefissato.

La logica a scorta introduce un problema di non semplice gestione ovvero la scelta da parte dell'ingegnere del compromesso fra il costo di un possibile mancato ricambio e il costo del mantenimento di un codice inattivo a magazzino, in maniera tale da individuare la logica di riordino più consona.

### ***2.3. I principi chiave della manutenzione***

Essendo quello manutentivo un campo di complessa applicabilità, tale applicabilità deve essere validata dalla definizione ed analisi di alcuni principi fondanti della stessa. Tali principi sono infatti sempre al centro di qualsiasi tipo di valutazione o

ragionamento aziendale volto a stabilire se sia effettivamente possibile e conveniente mettere in atto una determinata strategia manutentiva.

### 2.3.1. Il costo globale

La valutazione basilare da prendere in considerazione per decidere quale strategia manutentiva applicare ad una determinata attrezzatura riguarda sicuramente il costo della stessa. Si può a tal proposito introdurre il concetto di costo globale (11). Il costo globale di acquisto ed utilizzazione di un'attrezzatura comprende:

- Costo dell'attrezzatura A: incluso il costo dei capitali investiti, costante nel tempo;
- Costo cumulato d'utilizzazione F: linearmente variabile nel tempo;
- Costi diretti cumulati di manutenzione M: variabili con legge quadratica nel tempo.

$$C=A+F+M$$

L'introduzione del concetto di costo globale permette per ogni attrezzatura di valutare il costo di ogni possibile strategia di manutenzione. Al passare del tempo, l'intervento attraverso una determinata strategia manutentiva non risulta conveniente laddove il suo costo superi il valore residuo dell'attrezzatura.

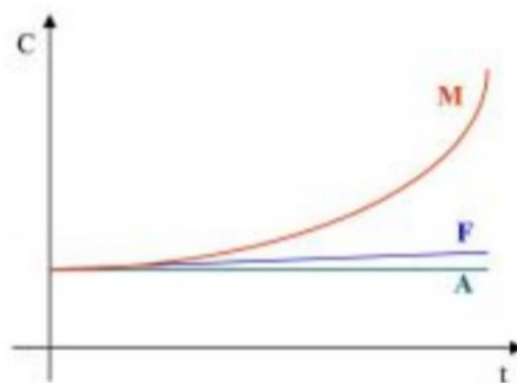


Figura 11. Andamento della funzione costo globale

### 2.3.2. Affidabilità e costo globale

L'affidabilità è definita come “l'attitudine di un dispositivo a svolgere una funzione richiesta secondo le condizioni di utilizzazione e per un periodo di tempo definito”.

Detta  $f(t)$  la densità di probabilità di guasto e definita come la probabilità infinitesima che l'attrezzatura si rompa al tempo  $t$  o in un suo intorno infinitesimo  $dt$ , allora è

possibile anche definire analiticamente l'affidabilità come la probabilità che l'elemento studiato sopravviva al passare del tempo  $t$ :

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$$

Mentre, analogamente è possibile definire l'inaffidabilità come la probabilità che l'attrezzatura effettivamente si rompa proprio entro l'istante  $t$ :

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

Dunque appare chiaro come le due funzioni risultino essere il complemento ad 1 l'una dell'altra. Il tasso di guasto è “la funzione  $\lambda(t)$  tale che la probabilità infinitesima che il componente si rompa al tempo  $t$  o in un suo intorno infinitesimo  $dt$  sia pari a  $\lambda(t)dt$ , nell'ipotesi che in  $t$  sia ancora funzionante”:

$$\lambda(t) = \lim_{dt \rightarrow 0} \frac{P(t < \bar{t} < t + dt | \bar{t} > t)}{dt}$$

Si può dimostrare che:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Il *tasso di guasto* (12) può dunque essere definito come una probabilità di guasto residua legato alle attrezzature ancora in buono stato al tempo  $t$ .

Dalla definizione di tasso di guasto è possibile delineare la tipica curva dei guasti di un componente elettromeccanico (anche nota come curva a vasca da bagno):

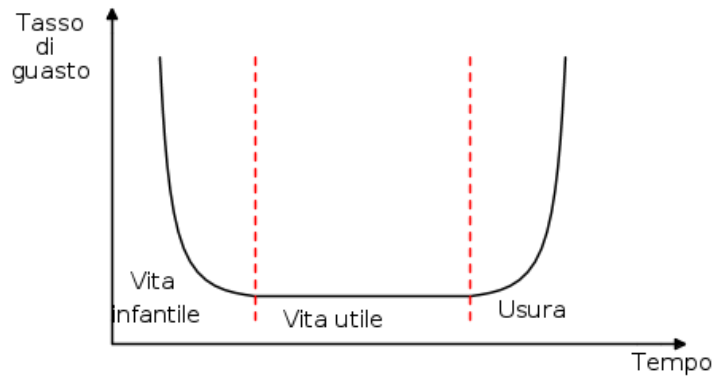


Figura 12. Curva dei guasti di un componente elettromeccanico

Nel periodo di rodaggio si riscontrano i cosiddetti “guasti infantili”, causati principalmente da errori progettuali oppure errori nell’utilizzo della nuova attrezzatura dettati dall’inesperienza. La maturità del pezzo è invece caratterizzata da cause di guasto del tutto casuali mentre, una volta superato tale periodo, le cause di guasto sono principalmente usura e fatica. La legge di affidabilità di più tipico utilizzo è quella di Weibull:

$$R(t) = e^{-\frac{(t-\gamma)^\beta}{\alpha}}$$

Laddove:

$\alpha$ : parametro di scala;

$\beta$ : parametro di forma;

$\gamma$ : parametro di posizione;

$t$ : tempo di utilizzazione.

La manutenibilità viene invece definita come “l’attitudine (la probabilità) di una data attrezzatura ad essere mantenuta o ad essere riportata – in un prefissato periodo di tempo – in uno stato nel quale può svolgere la funzione richiesta”. Come indicatore di manutenibilità è tipicamente utilizzato il Mean Time To Repair (MTTR), ovvero il tempo medio necessario a ripristinare la normale funzionalità di una determinata attrezzatura, a partire dal momento del guasto.

### **2.3.3. Mean Time Between Failures (MTBF)**

Il Mean Time Between Failures (MTBF) non è un vero e proprio principio manutentivo ma è da considerare come un Key Performance Index della manutenzione. Esso è definito come: “tempo operativo medio tra i guasti. Il valore atteso del tempo operativo tra i guasti”. Lo studio di questo KPI è fondamentale alla luce dell’implementazione di strategie manutentive non a guasto: l’implementazione di qualsiasi altro tipo di strategia manutentiva richiede la necessità di anticipare il guasto ripristinando il corretto funzionamento del componente prima che esso si verifichi e dunque l’MTBF rappresenta un’informazione fondamentale onde stabilire le tempistiche dell’intervento.





### 3. Le politiche manutentive

Il più basilare dei compiti della manutenzione era in passato quello di porre rimedio ai guasti dei macchinari al fine di allungare la loro vita utile. Qualsiasi funzione o ruolo lavorativo legato alla manutenzione risultava dunque limitato a tale missione. Il concetto primordiale di politica manutentiva prevedeva dunque l'attesa della comparsa di un guasto e la successiva organizzazione tecnica dell'intervento al fine di porre rimedio allo stesso ripristinando la funzionalità originale del macchinario. Una politica manutentiva più moderna è quella che invece associa alla manutenzione anche lo scopo di prevenire il guasto, qualora possibile, attraverso l'utilizzo di specifiche tecniche. In questo modo il ruolo della manutenzione inizia a divenire parte integrante dell'attività produttiva dell'azienda. Un esempio di politica manutentiva ancora più recente è invece quello di manutenzione predittiva il quale, mettendo a disposizione dell'azienda strumenti sempre più all'avanguardia mira a ridurre il personale addetto alla manutenzione, responsabilizzando in merito a tali attività gli operatori di processo. L'addetto alla manutenzione viene così visto come una figura specialistica a cui la produzione attinge esclusivamente in caso di circostanze che richiedano competenze più elevate. Prima di introdurre nello specifico come le principali politiche manutentive vengano tradotte nell'applicazione pratica attraverso strategie manutentive, occorre specificare come l'orientamento manutentivo scelto sia dipendente anche da chi è il richiedente dell'intervento manutentivo.

“A fronte della necessità di eseguire un lavoro, deve essere formulata una richiesta. Il richiedente può essere chiunque. Gli utenti più tradizionali sono:

- La Produzione, di solito su guasto, ma anche per assistenza o supporto in fasi specifiche del Processo.
- La Manutenzione, a fronte di uno scadenziario piuttosto che dell'esito di un'ispezione che evidenzia la necessità di un intervento (Predittiva). Non rare e sempre auspicabili, le attività migliorative.
- Il Servizio Prevenzione e Protezione (SPP), in seguito ad evidenze da audit interno piuttosto che da prescrizioni delle varie Autorità preposte.
- La Progettazione, in determinate fasi della realizzazione dei nuovi Investimenti. Il contributo diretto della manutenzione è importante, in quanto diviene

automaticamente formazione in campo. Inoltre, il poter dimostrare la capitalizzazione su progetto di un certo numero di ore da parte dei manutentori costituisce prova di “diligenza” agli effetti delle vigenti norme sulla Sicurezza. Attenzione: le ore devono essere caricate sul budget dell’investimento, non su quello della manutenzione.”

Alla luce di quanto appena affermato è allora utile specificare che le strategie manutentive descritte nel paragrafo 3.1 potranno essere molto difficilmente applicate come compartimenti stagni all’interno di una realtà aziendale complessa. La strategia manutentiva aziendale sarà un mix delle strategie descritte e sarà volta per volta dettata dalle caratteristiche del macchinario e dagli scopi di chi richiede l’intervento.

### ***3.1. Le strategie manutentive***

Si possono individuare quattro principali strategie di manutenzione:

- *A guasto o correttiva;*
- *Preventiva;*
- *Migliorativa;*
- *Predittiva o su condizione;*

Uno degli indici sulla base dei quali è significativo valutare il successo di una strategia manutentiva rispetto ad un’altra è l’efficacia di una detta strategia nel prevenire i guasti andando a diminuire il tempo complessivo di fermo macchina legato alla manutenzione ed andando dunque ad incidere positivamente sull’uptime dell’impianto.

#### **3.1.1. La manutenzione correttiva (o a guasto)**

La manutenzione a guasto prevede semplicemente di preparare e realizzare un intervento manutentivo su un determinato macchinario a valle del verificarsi di un guasto, con lo scopo di ripristinare la funzionalità che il macchinario stesso aveva prima dell’avvenimento di guasto. La manutenzione a guasto può tuttora essere considerata una scelta vincente laddove applicata su macchinari non critici e/o a basso costo. Infatti, si tratta della strategia manutentiva che richiede minori costi e minore complessità organizzativa. Tuttavia, intraprendendo questa strategia, si espone matematicamente l’impianto ad un fermo o ad una produzione a regime

ridotto, andando in ciascuno dei due casi a ledere sulla produttività dell'impianto. Inoltre, l'utilizzo del personale di manutenzione risulta altamente inefficiente mentre il magazzino ricambi dovrà necessariamente essere sovradimensionato al fine di garantire l'immediatezza dell'intervento a guasto.



Figura 13. Andamento dei costi di manutenzione a guasto e preventiva

In Fig.13 è possibile osservare come differiscano gli andamenti dei costi di manutenzione a guasto e preventiva al variare della frequenza di manutenzione preventiva. Più sono frequenti gli interventi di manutenzione preventiva (che sarà illustrata nel dettaglio nel paragrafo 3.1.2), più rari sono i guasti dunque si abbassano i costi legati alla manutenzione a guasto.

### 3.1.2. La manutenzione preventiva

La manutenzione preventiva è una strategia che prevede l'esecuzione di interventi manutentivi "ad intervalli predeterminati o in accordo a criteri prescritti e volta a ridurre la probabilità di guasto o la degradazione del funzionamento di una entità" e dunque prevenendo l'avvenimento di un guasto. Una delle attività fondamentali che stanno dunque alla base dell'applicazione di tale teoria è la determinazione a priori della vita media utile del componente al fine di proporre una pianificazione degli interventi manutentivi che vada ad anticipare il guasto. Proprio per questa ragione, come specificato nel paragrafo 2.3.3, la conoscenza di KPIs come l'MTBF risulta cruciale.

Si tratta della tipologia di manutenzione pianificata più di uso comune e la sua efficacia viene esaltata se gli interventi seguono criteri volti a rilevare segni di usura

o funzionamento degradato dei macchinari. Infatti, uno degli aspetti che maggiormente può porre in discussione l'approccio d'intervento ad intervalli temporali predeterminati, è l'evidenza sperimentale del fatto che la maggior parte dei guasti avvengono in maniera casuale, rendendo così inefficace questa soluzione.

La manutenzione preventiva ha come punti di forza tutti gli aspetti che rendono debole la manutenzione a guasto: implementando la manutenzione preventiva si riesce a ridurre il numero di guasti, ad ottimizzare l'utilizzo del personale di manutenzione e delle scorte a magazzino. Tuttavia, con tale strategia si va certamente incontro ad un aumento dei costi diretti della manutenzione e bisogna tenere in conto che gli interventi dettati da tale strategia possono essi stessi condurre a dei guasti.

Come già accennato nel paragrafo 2.3.1, uno dei fattori decisivi al fine di valutare la convenienza dell'applicazione di un programma di manutenzioni preventive è quello dei costi. Il costo aggiuntivo delle manutenzioni preventive deve tuttavia essere giustificato da una riduzione del costo complessivo di riparazione e dal miglioramento delle performance dell'attrezzatura in questione. Infatti, se il costo di un intervento preventivo non supera quello di una riparazione a guasto (accompagnata da ispezioni preventive), l'approccio preventivo non può essere ritenuto conveniente. Se invece il verificarsi di un guasto può introdurre un grave danneggiamento dell'attrezzatura o elevati costi di riparazione, allora deve essere presa in considerazione l'applicazione di una strategia preventiva. Altro fattore cruciale da valutare è l'utilizzazione percentuale dell'attrezzatura da mantenere. In particolare, in ogni linea produttiva possono essere individuati elementi ed attrezzature cruciali per cui l'applicazione di una strategia preventiva può essere considerata sicuramente conveniente. Laddove invece si considerino elementi piccoli e non cruciali come piccoli motori elettrici, si osserva come l'applicazione di una strategia manutentiva supera di gran lunga come costo quello della sostituzione a guasto, che si conferma in questi casi essere l'approccio più conveniente. Per questa ragione nelle realtà aziendali è raro trovare l'applicazione di programmi centralizzati di manutenzione preventiva, che invece viene applicata a determinati elementi singoli dell'attrezzatura. Tale soluzione di compromesso è spesso la più efficace data la sua flessibilità: non avendo infatti un piano di manutenzione rigido da applicare su ogni singolo elemento dell'attrezzatura, viene dato valore alla familiarità con le

attrezzature e all'abilità da parte dei manutentori di riuscire ad individuare in anticipo i problemi meccanici di una determinata attrezzatura.

Un approccio molto efficace può essere la programmazione di shutdown periodici completi delle singole unità produttive aziendali per effettuarne la revisione completa. Tuttavia, si tratta di una strategia che non si sposa bene con le esigenze produttive, specialmente dove si realizzano quotidianamente grandi volumi di produzione. Una soluzione di compromesso molto efficace in tal senso è quello di sfruttare proprio i breakdown accidentali delle linee produttive per realizzare importanti ispezioni e sostituzioni che necessitano il fermo della linea. Si tratta tuttavia di un approccio che richiede una registrazione continua delle inefficienze dell'impianto e di interventi repentini e perfettamente coordinati fra manutenzione e supervisione. In ciascuno dei due approcci esaminati, può manifestarsi la necessità di prolungare il tempo di shutdown della linea produttiva oltre lo stretto necessario proprio per portare a termine cruciali interventi di ispezione o sostituzione. Alla base della manutenzione preventiva vi è la presenza fondamentale dell'ingegneria preventiva. Si tratta di uno strumento molto potente per la riduzione dei downtime, e per la verità si tratta di un approccio che viene applicato anche in realtà dove non vi è un programma di manutenzioni preventive. La principale attività dell'ingegneria preventiva è l'analisi delle cause di guasto. Essa non si limita semplicemente a implementare supporti con maggiore aspettativa di vita o migliori sistemi di lubrificazione, ma si addentra nell'analisi di ogni singolo guasto verificatosi andandone a scoprirne puntualmente la causa, perseguendo gli obiettivi tangibili della riduzione della frequenza di guasto e del costo di riparazione. La differenza sta dunque nella capacità di chi è preposto all'ingegneria preventiva di saper direzionare gli sforzi in maniera intelligente ed efficace proprio laddove è sorta la problematica. Per questo, potrebbe essere utile affidare tali attività a unità speciali di riduzione del costo definite dall'azienda. Un'analisi di questo tipo ha ovviamente senso solo laddove un problema risulta verificarsi in maniera troppo frequente sulla linea produttiva o comunque comporta elevati costi di manutenzione. L'efficienza di questo tipo di approccio può essere raggiunta solo e soltanto laddove le esigenze di tale approccio siano considerate svincolate ed indipendenti da quelle della produzione.

### **3.1.3. La manutenzione migliorativa**

La manutenzione migliorativa punta ad intervenire prima del verificarsi di un guasto. Il primo passo è l'individuazione delle cosiddette "radici del guasto", ovvero gli elementi scatenanti dello stesso. La presente strategia mira dunque ad attaccare il problema a livello del primo degrado, ovvero prima ancora che ciò si traduca in condizioni di lavoro degradate del componente e poi in un guasto. Si tratta di una strategia manutentiva profondamente legata non solo a funzioni aziendali come pianificazione e produzione ma anche al rapporto con i fornitori, determinante per ottenere buoni risultati. La manutenzione migliorativa dà la possibilità di risolvere alcuni problemi con interventi a basso costo ma elevata efficacia e attraverso questa strategia è molto spesso possibile riuscire ad eliminare in modo permanente dei problemi ricorrenti. Per contro, talvolta questo approccio strategico si rivela inefficiente laddove sia difficile individuare la causa primaria di un guasto. L'implementazione della strategia migliorativa può richiedere importanti azioni di riprogettazione dell'impianto, conducendo dunque ad elevati costi e ad elevati periodi di fermo macchina. Allo stesso tempo, l'introduzione di nuove attrezzature implica l'introduzione di nuove possibilità di guasto. A valle di questo, occorre affermare come ovviamente le soluzioni proposte da questa strategia non sempre possono garantire il raggiungimento dei risultati sperati, nonostante gli elevati costi e complicazioni che esse introducono.

### **3.1.4. La manutenzione predittiva**

La manutenzione predittiva è una particolare tipologia di manutenzione su condizione o Condition Based Maintenance (C.B.M.). L'idea principale su cui tale strategia manutentiva si fonda è quella secondo la quale un guasto tipicamente non avviene in maniera istantanea ma è frutto del deterioramento nel tempo delle condizioni di un determinato componente. Il monitoraggio di alcuni parametri può denunciare condizioni di funzionamento anomale e dunque segnalare la necessità di un intervento. Chiari sintomi di un funzionamento fuori standard sono variazioni di temperatura, presenza di particelle di usura degli oli o un anomalo spettro di vibrazioni. Tutte queste grandezze possono essere facilmente misurate e portare alla corretta identificazione del problema. La strategia predittiva è fondata sul Condition

Monitoring, ovvero sul monitoraggio di alcune condizioni e/o indici considerati cruciali ai fini del corretto funzionamento della macchina, allo scopo di rilevare in anticipo condizioni di non corretto funzionamento o comunque condizioni preparatorie ad un possibile guasto. Una volta effettuata la rilevazione, vi è una successiva fase di analisi della problematica ed eventuale pianificazione dell'intervento. Fra le strategie finora introdotte si tratta di quella che ha le maggiori potenzialità dal punto di vista della massimizzazione dell'uptime e della riduzione dei costi di manutenzione. Il presente approccio, permette di condurre un'analisi approfondita che porti alla comprensione della radice del problema (cosa non sempre possibile adottando ad esempio la strategia a guasto) e di poter anche condurre ispezioni a bassissimo costo.

Queste caratteristiche della manutenzione predittiva la rendono una strategia manutentiva molto attuale, la cui implementazione in area produttiva è fondamentale per ritenere un'azienda competitiva. L'evoluzione degli apparati informatici e della sensoristica rende ancora più potente questo approccio fornendo alla manutenzione dati sempre più puntuali e precisi. Una strategia di manutenzione preventiva non è da considerare alternativa alle tradizionali strategie di manutenzione ma come un valore aggiunto all'interno di un programma manutentivo complessivo. Laddove i tradizionali piani manutentivi si occupano di fornire una rapida risposta a guasti inaspettati, la strategia di manutenzione preventiva agisce solo laddove richiesto dalle condizioni dell'attrezzatura. Ne consegue che l'implementazione di questo tipo di strategia non può totalmente eliminare l'utilizzo di strategie a guasto o preventive, ma può costituire un utilissimo supporto al funzionamento di entrambe le strategie manutentive. La manutenzione predittiva permette infatti di ridurre il numero di guasti o anche di costruire un piano di manutenzioni preventive più affidabile. La manutenzione predittiva è basata sul principio secondo il quale il monitoraggio sistematico delle condizioni reali dei macchinari e dell'efficienza operativa del processo porta ad ottenere il massimo intervallo di tempo fra due interventi manutentivi consecutivi, il minimo numero e costo dei guasti non programmati e migliorare l'uptime complessivo dell'impianto. Da alcuni sondaggi condotti su un campione eterogeneo di impianti negli Stati Uniti, emerge come i maggiori benefici derivanti dall'implementazione di questo tipo di strategia riguardino: costi di manutenzione, guasti non programmati, downtime di riparazione, inventario dei pezzi di ricambio. Inoltre sono stati individuati eccezionali miglioramenti riguardo la

vita della macchina, la produzione, la sicurezza degli operatori e anche la qualità del prodotto. Secondo i dati ricavati da queste fabbriche dall'implementazione delle predittive ci si può attendere una riduzione dei costi di manutenzione anche superiore al 50%, senza considerare i costi di mancata produzione dovuti ai downtime della linea e altri costi direttamente attribuibili ad inefficienti pratiche di manutenzione. Allo stesso tempo è stata riscontrata una riduzione del 55% del numero di guasti dei macchinari ma con l'implementazione più estesa della strategia è anche possibile arrivare ad una riduzione del 90%. Si può anche notare una riduzione del tempo necessario per portare a termine l'intervento manutentivo, data la riduzione del 60% del Mean Time To Repair (MTTR) riscontrata a valle dell'implementazione delle predittive. Questo dato può essere spiegato considerando che l'approccio predittivo permette di individuare più nello specifico qual è il componente della macchina che non sta lavorando bene, permettendo ai manutentori un intervento più rapido e mirato. L'implementazione di questo tipo di approccio ha condotto negli impianti sotto esame ad una riduzione media del 30% dell'inventario dei pezzi di ricambio. Un vantaggio "incidentale" che può essere attribuito all'adozione di questa strategia è l'abilità di monitorare automaticamente l'MTBF. Conoscendo questo dato è possibile avere un'indicazione anche temporale di quando può essere considerato conveniente sostituire o revisionare l'attrezzatura, esattamente come avviene per le strategie di manutenzione preventiva. Conoscendo alla perfezione e costantemente il dato di MTBF si potrà monitorarne lo sviluppo e procedere alla sostituzione del pezzo laddove si giunge ad un valore dell'MTBF tale per cui il costo di manutenzione risulta superiore a quello della sostituzione stessa. Attraverso questo tipo di approccio operativo si ha la certezza dell'utilizzo del miglior equipment possibile. Un altro vantaggio molto importante misurato è stato l'incremento del 30% dell'uptime dei macchinari, senza nemmeno prendere in considerazione l'incremento di efficienza degli impianti. L'applicazione di un piano predittivo integrale che coinvolge anche i parametri di processo porta ad un miglioramento dell'efficienza operativa e dunque della produttività dell'impianto. Nei casi di alcuni impianti è stato possibile riscontrare un incremento dell'output di produzione anche del 50% dovuto semplicemente all'efficientamento del processo di produzione. Una strategia preventiva porta alla riduzione degli infortuni come confermano le statistiche ed anche il fatto che le compagnie assicurative offrano premi assicurativi ridotti alle imprese che si impegnano ad adottare ed implementare questo tipo di strategia



manutentiva. L'analisi delle vibrazioni, che rappresenta uno degli strumenti chiave della manutenzione preventiva, può essere utilizzata per comprendere, prima della ripartenza della linea, se l'intervento ha risolto il problema o aggiunto un ulteriore comportamento insolito dal punto di vista vibrazionale. Questa possibilità è importantissima in quanto consente di evitare il secondo fermo della linea spesso necessario per correggere errori aggiuntivi dovuti proprio all'intervento di manutenzione. La strategia sotto esame consente inoltre di acquisire una notevole quantità di dati che sono utili alla pianificazione anche a lungo termine dei fermi dell'impianto. Complessivamente dunque si può concludere come la manutenzione preventiva si è dimostrata poter migliorare le attività di produzione e la conduzione dell'impianto. Statisticamente è possibile notare come i vantaggi si manifestino in maniera tangibile anche nel giro di tre mesi.

| <b>GRANDEZZA</b>                    | <b>Variatione a seguito dell'approccio predittivo</b> |
|-------------------------------------|---|
| <b>Costi di manutenzione</b>        | <b>-50%</b>   |
| <b>Numero di guasti</b>             | <b>-55%</b>   |
| <b>MTTR</b>                         | <b>-60%</b>   |
| <b>Inventario pezzi di ricambio</b> | <b>-30%</b>   |
| <b>Uptime macchinari</b>            | <b>+30%</b>   |

Figura 14. Tabella dei benefits dell'approccio predittivo

Nonostante gli innumerevoli vantaggi appena analizzati la manutenzione predittiva presenta anche degli svantaggi.

L'implementazione di una simile strategia richiede comunque un investimento iniziale cospicuo se si considerano tutte le attrezzature necessarie per il monitoraggio dei parametri di interesse e per trasmettere al personale le conoscenze necessarie per il corretto utilizzo di tali attrezzature.

Inoltre, tale approccio richiede una conoscenza sul comportamento della macchina fondata sulla disponibilità di uno storico dati e di trends che possono essere ottenuti in maniera affidabile solo dopo lunghi tempi di rilevazione.

Attraverso l'analisi di un caso di studio è possibile delineare quali siano i principali aspetti che un'azienda deve prendere in considerazione al momento di decidere se implementare una strategia di Condition Based Maintenance. Innanzitutto la scelta deve essere affrontata da un punto di vista manageriale. Occorre partire dalla precisa

identificazione della strategia manutentiva attuale e dei suoi costi diretti e indiretti, avendo definito in questo modo il punto di partenza è possibile definire quali vantaggi siano effettivamente raggiungibili attraverso l'implementazione della CBM, in termini di produttività e sicurezza. In merito, è opinione diffusa che la strategia in questione abbia maggiori probabilità di impattare in maniera positiva sulla produzione, laddove venga supportata e promossa in maniera esplicita e convinta sia dal management che dal personale tecnico. La scelta dell'implementazione di una strategia di manutenzione come la CBM, non può essere calata dall'alto sul personale ma deve essere adeguatamente comunicata e motivata. Il successo della CBM è inoltre favorito da una strategia di comunicazione volta a sottolineare in modo particolare i risultati positivi ottenuti per merito dell'implementazione della nuova strategia, soprattutto nella fase iniziale. Ricopre grandissima importanza anche lo sviluppo di un piano di aggiornamento del personale a tutti i livelli, in modo tale che l'intera popolazione aziendale sviluppi familiarità e confidenza con la nuova strategia.

La cooperazione e il coinvolgimento in merito alla scelta deve essere totale e riguardare sia gli imprenditori che i clienti. A livello organizzativo è importante creare organizzazioni temporanee interne interfunzionali a capo dello sviluppo e implementazione della CBM, in modo da minimizzare i problemi e le difficoltà che sorgono puntualmente con lo sviluppo di ogni nuova strategia. In letteratura è inoltre addirittura possibile trovare una descrizione dettagliata degli otto passi da seguire per l'implementazione pratica della strategia in azienda:

- 1) Diffondere un senso comune di necessità del cambiamento;
- 2) Formare un gruppo di lavoro che funga da guida;
- 3) Sviluppare una precisa visione e una strategia;
- 4) Comunicare e diffondere il cambio di visione;
- 5) Agire in modo generalizzato in accordo con la nuova strategia;
- 6) Enfatizzare i primi successi dovuti alla nuova visione;
- 7) Consolidare i miglioramenti e sviluppare nuove modifiche;
- 8) Rendere il nuovo approccio parte integrante dei principi fondamentali della cultura aziendale.

### **3.1.4.1 Le tecniche di manutenzione predittiva**

Un programma di manutenzioni predittive prevede una discreta varietà di tecnologie. Gran parte degli impianti è tipicamente formato da sistemi meccanici e dunque fra le tecnologie dominanti figura certamente l'analisi vibrazionale. Tuttavia tale tecnologia è limitata al monitoraggio delle condizioni meccaniche mentre l'affidabilità della manutenzione e l'efficienza del macchinario dipendono anche da altri parametri critici. Di seguito verranno analizzate le principali tecniche di manutenzione predittiva.

### **3.1.4.2 Analisi dei lubrificanti**

Nella ricerca delle cause di guasto capita spesso di sentir dare la colpa all'olio, che può venir talvolta definito "degradato" o "non idoneo" sulla base di analisi eseguite a posteriori, quando diventa difficile distinguere le cause del guasto dagli effetti dello stesso. In questi frangenti, l'olio diventa una sorta di "capro espiatorio" a cui spesso fa comodo addossare le colpe. Nella realtà, l'esperienza insegna che solo una piccola percentuale dei guasti dovuti a problemi di lubrificazione è da attribuire ad un lubrificante degradato o che ha perso le sue caratteristiche fisiche e prestazionali.

I lubrificanti moderni sono quasi sempre molto al di sopra delle necessità del macchinario, in termini di performance, specialmente in campo industriale; esiste anche un certo "margine di sicurezza" considerato dai costruttori dei macchinari, specificando l'uso di un certo lubrificante (per esempio, in termini di viscosità). Questa osservazione non deve far trascurare la verifica della condizione chimico-fisica, tra i vari aspetti da prendere in considerazione analizzando un campione di olio. La "condizione olio" è tanto più importante quanto più è lunga la vita attesa del lubrificante (ad esempio nelle turbine a vapore o nei grandi sistemi oleodinamici), oppure quanto più le condizioni di esercizio risultino difficili in termini di stress termico, ossidativo o tribologico (ad esempio nei motori diesel o nei compressori per aria).

Infatti, gli obiettivi delle analisi per valutare le "condizioni olio" sono essenzialmente due: in senso "proattivo" appunto, per monitorare le caratteristiche chimiche e fisiche del lubrificante per assicurare che l'olio rientri nelle specifiche prestazionali previste dal costruttore del macchinario: in breve per stabilire se l'olio è ancora adatto per l'esercizio oppure va sostituito; in applicazioni specifiche, ad esempio nei motori a

gas, queste analisi si sono universalmente affermate proprio perché aiutano a “tarare” le frequenze di sostituzione del lubrificante, e i costruttori di tali macchinari forniscono dettagliate procedure per il monitoraggio dei parametri, tra cui i limiti per l’olio usato, e le relative formule per l’extrapolazione della frequenza di sostituzione. In senso “predittivo” si ricercano segni di degradazione o alterazione dell’olio che indichino un funzionamento non ottimale del macchinario: l’obiettivo è quindi conoscere lo stato di salute della macchina, in maniera indiretta, attraverso le modificazioni che il macchinario stesso (quando non perfettamente funzionante) induce sulla condizione chimico-fisica dell’olio. Si tratta di valutazioni che difficilmente possono essere eseguite solo sulla base di limiti prefissati: piuttosto, l’analista valuta il trend della condizione olio e, se individua un cambiamento significativo delle tendenze, può suggerire di eseguire controlli di efficienza del macchinario. Per esempio, un incremento nella quantità di fuliggini (dette anche soot) in un olio usato da motore diesel, a parità di ore o km di esercizio dell’olio, può far ipotizzare un peggioramento della qualità della combustione, o perdite di compressione per usura del complessivo segmenti/cilindri. In definitiva, l’analisi della condizione dell’olio usato permette di ottimizzare i costi connessi con l’esercizio degli impianti, tra cui l’acquisto, l’immagazzinamento e lo smaltimento di un lubrificante ancora in buone condizioni, nonché gli oneri per manodopera e mancata produzione relativi all’operazione stessa di cambio olio. A ciò si aggiunge il vantaggio di ottenere indicazioni sullo stato di salute del macchinario, con conseguente risparmio in termini di prevenzione dei fermi imprevisti.

### **3.1.4.3 Analisi termografiche**

Le termografie rappresentano un’altra tecnica di manutenzione predittiva da utilizzare per il monitoraggio delle condizioni delle attrezzature dell’impianto. Viene utilizzata una strumentazione progettata per monitorare l’emissione di radiazioni infrarosse come la temperatura. In questo modo è possibile individuare anomalie termiche dell’attrezzatura e prevenire incipienti condizioni di guasto. Questa tecnologia è particolarmente adatta per individuare l’eccessivo calore sviluppato da fenomeni d’attrito in componenti meccanici rotanti malfunzionanti. Un classico esempio può essere rappresentato dal malfunzionamento di una valvola di

raffreddamento: questo tipo di fenomeno induce un'immediata crescita della temperatura della macchina portando all'avvio di una serie di reazioni a catena come perdite dalle guarnizioni, stop della macchina e grippaggio del motore. Le tecnologie ad infrarossi sono basate sul fatto che tutti i corpi aventi temperatura superiore allo zero assoluto emettono energia o radiazioni. La radiazione infrarossa rappresenta una forma di energia emessa. Le radiazioni infrarosse sono quelle aventi lunghezza d'onda inferiore e sono visibili solo mediante ausilio di specifiche attrezzature. L'intensità delle radiazioni infrarosse emesse da un determinato corpo è direttamente correlata alla temperatura superficiale del corpo stesso. Tuttavia, misurare la temperatura superficiale di uno specifico corpo è complicato attraverso il solo utilizzo di tecnologie ad infrarossi, in quanto verrebbero rilevate tre diverse fonti di energia: quella emessa dal corpo, quella riflessa dal corpo e quella trasmessa dal corpo. Tuttavia, essendo interessante da un punto di vista manutentivo solo l'energia emessa, c'è bisogno dunque di filtrare le radiazioni infrarosse derivanti da riflessione e trasmissione. Un corpo perfettamente emissivo è detto "corpo nero" ed ha un coefficiente di emissione pari ad 1. Questi tipi di superficie non presentano riflessione, ma assorbono tutta l'energia esterna che verrà poi riemessa all'esterno sotto forma di radiazione infrarossa. Le superfici che riflettono le radiazioni infrarosse sono invece note come "corpi grigi" ed il loro coefficiente di emissione è inferiore ad 1. Tale definizione è molto più accurata per la descrizione fisica delle attrezzature presenti in un impianto produttivo. Il coefficiente di emissione reale di molti materiali è tabulato in apposite tabelle che possono fungere da linea guida per poter risalire all'emissività di un macchinario. Le variazioni della superficie della macchina, vernici, rivestimenti protettivi e condizioni dell'ambiente di lavoro possono generare una variazione del reale coefficiente d'emissione del corpo. La misurazione termografica può anche essere influenzata dall'ambiente che si trova fra lo strumento di misurazione ed il corpo. Infatti, gas e vapori sono in grado di assorbire le radiazioni infrarosse. Allo stesso tempo, la rilevazione può essere distorta da polveri e dall'illuminazione. Considerando anche le costanti variazioni dell'ambiente circostante, i dati termografici vanno acquisiti con grandissima cura. Molti sistemi di misurazione ad infrarossi sono dotati di speciali filtri in grado di isolare gli effetti negativi derivanti dall'attenuazione atmosferica delle radiazioni infrarosse. Tuttavia, è necessaria l'abilità da parte dell'utilizzatore di individuare quali sono i fattori in grado di influenzare la misura ed applicare gli appositi filtri.

Dunque, l'applicazione di questo tipo di tecnica richiede la rilevazione di una serie di indicatori ottici all'interno dell'impianto. Gli strumenti di misurazione basati su tecnologie termografiche utilizzano come sensori microbolometri non raffreddati e creano false immagini a colori dette termogrammi, in grado di "mostrare" le radiazioni infrarosse, tipicamente nella regione di lunghezza d'onda compresa fra i 7 e i 14  $\mu\text{m}$ . Attraverso tali strumenti è possibile ottenere uno scanning remoto di grandi aree e di numerosi componenti come interruttori, trasformatori ecc. La rilevazione di elevate temperature può anche essere fondamentale nella rilevazione di difetti nelle attrezzature meccaniche relativi al serraggio dei supporti in motori e pompe oppure blocchi ed intasamenti all'interno di condotte. L'utilizzo di tali tecniche può essere fondamentale per il monitoraggio di condensatori e scambiatori di calore. Il costo dell'applicazione di questo tipo di tecnica dipende da tipo di strumentazione impiegata. Un termometro ad infrarossi ad utilizzo puntuale può avere un costo inferiore ai 1000 €. L'impiego di un sistema ad immagini infrarosse dotato di uno scanner in bianco e nero ma senza memoria interna può arrivare agli 8000 €, mentre un sistema simile ma basato sull'utilizzo di un microprocessore e con immagini a colori può avere un costo superiore ai 60000 €. Tecnologie più avanzate sono in grado di sfruttare principi magnetici oltre ai principi termici.

#### **3.1.4.4. Analisi delle vibrazioni**

L'analisi vibrazionale è la tecnica di manutenzione predittiva dominante. Infatti si tratta della tecnica di più vasta applicazione in ogni impianto data la natura prevalentemente meccanica di gran parte dell'attrezzatura dell'impianto. Si tratta tipicamente della tecnica che porta ai maggiori benefici dal punto di vista della pianificazione manutentiva. L'obiettivo di questa tecnica è quello di utilizzare le vibrazioni create dall'attrezzatura meccanica o da un generico sistema dell'impianto per determinarne le reali "condizioni di salute". Le tecnologie e strumentazioni utilizzate per questo tipo di analisi sono ritenute molto affidabili ed efficienti nell'individuazione delle radici di un non corretto funzionamento del macchinario. Tuttavia, gli elevati costi delle attrezzature e le competenze necessarie per l'analisi dei dati ricavati da questo tipo di analisi rappresentano spesso un deterrente per l'applicazione di questa tecnica. Spesso una strategia manutentiva di questo genere viene applicata solo sui macchinari più critici, in modo da giustificarne la spesa. Gli

ultimi progressi nella tecnologia dei microprocessori, unita alla sempre maggiore competenza industriale rispetto alla diagnostica dei problemi dei macchinari, hanno portato allo sviluppo di modelli manutentivi basati su tale tecnica predittiva che risultano allo stesso tempo efficaci anche dal punto di vista economico. I sistemi basati su questi microprocessori rendono molto semplice l'acquisizione e l'analisi dei dati, rendendoli più accessibili anche ai meno esperti. I sistemi oggi più diffusi a livello commerciale sono in grado di valutare trend temporali e riportare le condizioni meccaniche di tutte le attrezzature analizzate. Attraverso questo programma, è possibile schedare la manutenzione potenzialmente di tutte le macchine rotanti e alternative. Infatti, è semplice attraverso queste tecnologie riuscire a stabilire una correlazione diretta fra le condizioni meccaniche di un'attrezzatura e i dati vibrazionali rilevati.

L'applicazione di questa tecnica è molto comune per identificare problemi di equilibramento o malfunzionamenti dei supporti. L'ampiezza e la frequenza dei segnali vibrazionali ricavati dai sensori risultano determinanti al fine di determinare l'entità del malfunzionamento e la sua origine. Di seguito è riportato un esempio degli effetti di un malfunzionamento dei supporti sul segnale vibrazionale di un motore elettrico AC trifase. Il deterioramento delle prestazioni dei supporti passa tipicamente attraverso quattro fasi.

- 1) I supporti funzionano normalmente e non sono danneggiati (Fig.15);
- 2) Compaiono i primi picchi nello spettro delle frequenze relativo al motore, in corrispondenza di specifiche frequenze correlate alla tipologia di malfunzionamento e dette "defect frequencies";
- 3) Appaiono numerosi picchi in corrispondenza di numerose "defect frequencies". La buona prassi impone la sostituzione dei supporti una volta raggiunta questa fase (Fig.16);
- 4) I picchi delle "defect frequencies" scompaiono e sono sostituiti da rumore casuale in corrispondenza della zona delle basse frequenze. Giunti a questo livello, il supporto è a rischio di generare rotture catastrofiche in quanto molto costose in termini di riparazione di componenti danneggiate.

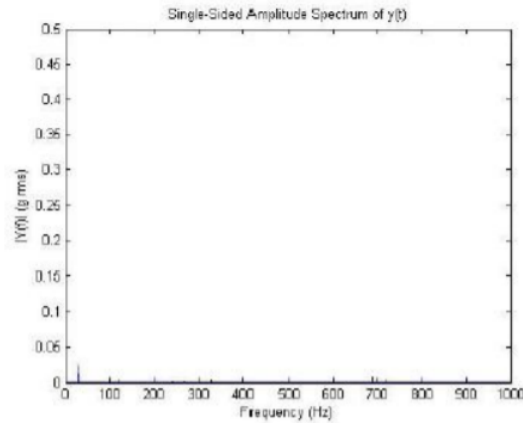


Figura 15. Spettro delle frequenze motore AC trifase con supporti non danneggiati (0-1 kHz)

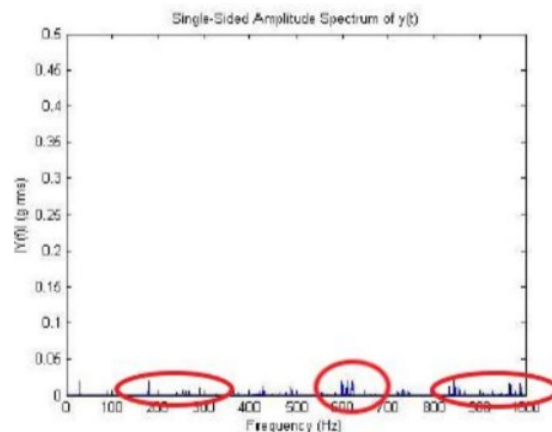


Figura 16. Spettro delle frequenze motore AC trifase con supporti danneggiati (0-1 kHz)

Dal confronto fra le Figure 4 e 5 si ha un'evidente conferma di quanto affermato nell'analisi delle varie fasi di guasto dei supporti. Si nota come nello spettro del motore con supporti danneggiati compaiano numerosi picchi in corrispondenza delle "defect frequencies", le quali non risultano multiple della frequenza di rotazione (in questo caso 30 Hz). I costi fissi necessari per implementare un programma di manutenzioni predittive basate sulle analisi vibrazionali può variare fra gli 8000 e i 50000 €, a seconda delle tecniche specifiche che si decide di implementare.

### 3.1.4.5. Analisi acustica

L'analisi acustica dei macchinari ed attrezzature durante il corso del loro funzionamento può essere una tecnica molto efficace al servizio della strategia



predittiva. Al fine di condurre un'analisi appropriata del fenomeno è opportuno definire un limite inferiore e un limite superiore entro i quali il rumore prodotto dal macchinario può essere ritenuto normale. Il limite inferiore può essere fissato al rumore prodotto dalla macchina nel corso del suo funzionamento a vuoto, mentre quello superiore sarà rappresentato dal rumore prodotto dalla macchina in fase di produzione. Se il rumore prodotto dalla macchina ha un'intensità inferiore rispetto al limite inferiore settato, si tratta di un segnale allarmante, allo stesso modo di un rumore troppo forte. Ad esempio, in una macchina contenente catene, un rumore troppo basso può essere indice che una o più di queste catene sono disingaggiate o rotte. Questo tipo di approccio può essere decisivo laddove un'ispezione visiva richiederebbe di rimuovere carter e organi di protezione.

#### **3.1.4.6. Analisi delle correnti indotte**

Questa tecnica, ancora una volta, può essere utilizzata per controllare la qualità dei prodotti in uscita da una linea, oppure per tenere sotto controllo lo stato di salute di strutture metalliche soggette a sollecitazioni meccaniche o di altra natura. Il campo magnetico generato da una bobina alimentata con corrente alternata produce, nel pezzo da esaminare, correnti indotte: tali correnti influenzano il valore di impedenza della bobina che le ha generate.

La presenza di una qualsivoglia discontinuità nel materiale (difetto) modifica l'intensità e il percorso delle correnti indotte; questa variazione può essere misurata e interpretata per riconoscere i difetti. È possibile misurare lo spessore di rivestimenti sopra materiali conduttori.

Il limite principale di questa tecnica risiede nel fatto che essa è applicabile soltanto su materiali conduttori e per localizzare discontinuità superficiali o a profondità non superiore a qualche decina di millimetri. In maniera simile, si generano correnti indotte, o parassite, muovendo un corpo conduttivo in un campo magnetico (costante o variabile).

Misurando intensità e fase delle correnti indotte, che dipendono dalla conducibilità elettrica e dalla permeabilità magnetica del materiale da esaminare, è possibile ricostruire l'intensità dei difetti facendo riferimento ai campioni di taratura.

La profondità di penetrazione delle correnti indotte è inversamente proporzionale al quadrato della frequenza della corrente di eccitazione della bobina:

- per raggiungere i 10 mm di profondità, nei materiali ferromagnetici si utilizzano frequenze dell'ordine di 1 kHz;
- per rilevare difetti superficiali si utilizzano alte frequenze (10 kHz - 1 MHz).

Le discontinuità nel materiale possono essere rilevate misurando la variazione di corrente, associata alla variazione di impedenza della bobina, mediante un amperometro di precisione (milliamperometro) e osservando le variazioni di ampiezza e di fase del vettore impedenza con un oscilloscopio. Gli strumenti per le analisi alle correnti indotte sono disponibili nelle versioni analogiche e digitali, e vengono normalmente classificati sulla base del metodo di visualizzazione dei risultati:

- visualizzazione analogica;
- visualizzazione digitale;
- visualizzazione dell'ampiezza in funzione del tempo (oscilloscopio);
- visualizzazione del piano d'impedenza (fase e grandezza).

Gli strumenti analogici sono i più semplici, ma richiedono una maggior competenza per interpretare i risultati: l'ago del microamperometro si comporta in maniera differente sul campione da analizzare rispetto al riferimento. Le deviazioni indicano la presenza di cricche o altri difetti superficiali. Le sonde sono disponibili in varie forme e dimensioni, anzi uno dei vantaggi di questa tecnologia è proprio la possibilità di progettare sonde specifiche per le applicazioni. In generale, i passi da eseguire per realizzare l'ispezione del materiale sono i seguenti:

- selezionare e tarare lo strumento e la sonda;
- selezionare la frequenza adatta al materiale per raggiungere la profondità voluta;
- tarare lo strumento in modo da avere una risposta riconoscibile in presenza del difetto (occorre disporre di un campione di riferimento);
- posizionare la sonda sulla superficie e azzerare lo strumento;
- muovere la sonda su tutta la superficie, in modo da coprirla tutta (la posizione della sonda rispetto alla superficie deve essere invariata);
- osservare il segnale visualizzato dallo strumento per riconoscere variazioni nell'impedenza dovute a un difetto.

### 3.1.4.7. Analisi magnetoscopica

Il metodo magnetoscopico consiste nel produrre un campo magnetico disperso in corrispondenza dei difetti superficiali, o sub-superficiali (con certe limitazioni in quest'ultimo caso), mediante una opportuna magnetizzazione del pezzo in esame. La rivelazione dei difetti viene fatta grazie alla captazione dei corrispondenti campi magnetici dispersi.

Il procedimento più diffuso per ottenere la rivelazione è quello delle polveri, o particelle magnetiche; esso però è sostanzialmente basato sull'osservazione visiva delle indicazioni ottenute, con tutte le conseguenze derivanti dalla soggettività dell'intervento dell'uomo. A ciò in certi casi (ove è possibile ed economicamente accettabile) si sopperisce mediante la rilevazione strumentale. Scaturiscono quindi tre procedimenti fondamentali di rilevazione del campo magnetico disperso:

- polveri magnetiche (metodo magnetoscopico);
- sonde magnetiche (sonde di Hall, sonde di Förster);
- nastri magnetici (magnetografia).

Le tecniche di magnetizzazione sono fondamentalmente due: magnetizzazione col sistema elettrico, nel pezzo in esame viene inviata una corrente elettrica; magnetizzazione col sistema magnetico, il pezzo in esame viene immerso in un campo magnetico.

In assenza di difetti le linee di campo sono tutte parallele ed equidistanti, mentre in presenza di difetti, superficiali o sub superficiali, queste vengono deviate anche al di fuori del contorno geometrico del pezzo: quindi in corrispondenza della discontinuità viene a formarsi un campo magnetico disperso.

La rilevazione di questo, mediante un qualsiasi mezzo, rappresenta il testimone del difetto stesso. In linea di principio la rivelazione del campo magnetico disperso può avvenire per mezzo di apposite sonde di tipo pick-up, tuttavia questa tecnica non è di impiego universale per le difficoltà connesse con la geometria più o meno complessa dei pezzi che si incontrano nella pratica. Il metodo più diffuso è invece quello delle particelle magnetiche, consistente nello spruzzare in prossimità del campo magnetico.

disperso delle fini particelle, o polveri, di materiale ferromagnetico. Il risultato è che le particelle sono attratte a ridosso della discontinuità per cui formano un accumulo sufficientemente consistente da essere osservabile direttamente ad occhio, anche se

non lo era il difetto. Il corretto svolgimento dell'esame magnetoscopico richiede le seguenti fasi esecutive, come anche imposto dalla specifica norma di riferimento UNI EN ISO 9934-1:

- Preparazione dei pezzi. Consiste essenzialmente nel preparare la superficie ripulendola da depositi o tracce di grassi, oli e sostanze contaminanti in genere. La pulizia è necessaria per evitare che il grasso o lo sporco trattenga del rivelatore per aderenza, causando delle tracce di disturbo, ovvero non corrispondenti a difetti reali;
- Magnetizzazione. Essa rappresenta la fase fondamentale dell'intero esame e deve essere eseguita con accortezza. La direzione di magnetizzazione deve essere per quanto possibile perpendicolare alla direzione presunta dei difetti; se ciò non è noto, occorre eseguire più di un esame con due magnetizzazioni tra loro perpendicolari, onde assicurare la rivelazione dei difetti indipendentemente dalla loro giacitura;
- Irrorazione del rivelatore. Bisogna fare una distinzione tra due possibili tecniche di analisi. Il metodo continuo, ove, per l'individuazione del difetto, si sfrutta il campo magnetico imposto dall'esterno; in tal caso il rivelatore è irrorato prima e durante l'applicazione della magnetizzazione, l'irrorazione deve però cessare un attimo prima che cessi la magnetizzazione, in modo da evitare che per l'azione meccanica del getto parte dell'indicazione venga cancellata. In tal modo l'entità dell'indicazione ottenuta è la massima possibile, essendo stata prodotta mentre era massima l'azione attrattiva del campo disperso. Il metodo residuo, ove, per l'individuazione del difetto, si sfrutta il magnetismo residuo del pezzo; in tal caso il rivelatore è irrorato solo dopo che è cessata la magnetizzazione. Le indicazioni così ottenute sono meno marcate a causa del più debole campo magnetico disperso. Il metodo continuo è quello di gran lunga più usato, essendo più sensibile, tuttavia in certi casi il metodo residuo è preferito per evitare di rilevare difetti irrilevanti in pezzi grezzi.
- Smagnetizzazione. E' necessaria per eliminare l'eventuale magnetismo residuo dai pezzi. Essa avviene generalmente per passaggio dei pezzi attraverso un tunnel di smagnetizzazione dove essi subiscono una sequenza di cicli di isteresi magnetica simmetrici decrescenti. Per pezzi di grandi dimensioni, od in casi speciali, la smagnetizzazione può essere fatta con passaggio diretto di corrente a cicli decrescenti.

In conclusione la tecnica magnetoscopica è applicabile su tutti i materiali ferromagnetici per la ricerca di difetti superficiali o sub-superficiali. E' un CnD più rapido, meno laborioso e più efficace di quello con i liquidi penetranti. Essa è poco

adatta per l'esame di pezzi con superfici troppo scabrose, rugose, filettate e di geometria troppo complessa. Infatti in tali casi presenta il grosso inconveniente, già citato per i liquidi penetranti, della necessità di un operatore esperto e particolarmente attento. E' un processo difficilmente automatizzabile se non con l'impiego di rivelatori a sonda, peraltro più costosi e non sempre utilizzabili.

#### **3.1.4.8. Analisi radiografiche**

L'analisi radiografica è impiegata generalmente per esaminare lo stato di integrità interna dei materiali mediante la rappresentazione della relativa immagine su una pellicola radiografica (o illuminando uno schermo rivelatore, radioscopia), ottenuta con raggi X o  $\gamma$ . Il metodo radiografico si basa sull'attenuazione differenziale che i suddetti raggi subiscono nell'attraversamento del materiale e sul conseguente grado di annerimento prodotto sulla pellicola radiografica esposta alle radiazioni da questo trasmesse. Dall'immagine ottenuta si possono ricavare innumerevoli informazioni:

- individuazione di difetti interni;
- variazioni della struttura reticolare del materiale, causato da stress interno o presenza di impurità;
- discontinuità del materiale più denso in alcune zone e più espanso in altre.

Questo sistema di indagine è applicato per il controllo di pezzi per prevenire rotture e per il controllo di qualità di tipo macroscopico (presenza di incrinature, cavità etc.) o reticolare (presenza di impurità, omogeneità del materiale, etc.) e può essere utilizzato anche per materiali non metallici. Le immagini bidimensionali che si ottengono, in genere, non forniscono informazioni sulla profondità del difetto, esse si possono avere, però, effettuando radiografie su più lati dell'oggetto o con esame agli ultrasuoni.

L'indagine radiografica è molto efficiente e rapida nel caso di oggetti di semplice geometria, consente analisi approfondite e molto mirate. L'interpretazione dei risultati può essere immediata per oggetti di semplice geometria o richiedere adeguata esperienza dell'operatore se l'oggetto possiede una geometria complicata. Nell'ultimo caso si richiedono analisi più complesse. Anche se le applicazioni sono le più svariate (non solo in campo industriale), l'utilizzo di questa tecnica di PnD è limitata dalle costose apparecchiature che richiede, soprattutto per quanto riguarda la protezione degli operatori dalle radiazioni e dalle sorgenti di raggi. Infatti per legge è

obbligatorio operare i test in adatti locali di irraggiamento (bunker), opportunamente protetti con schermature di piombo o con pareti di cemento armato, e dotati di opportuni allarmi che impediscano agli operatori di dare il via all'emissione di raggi X, finché le porte d'accesso al bunker non siano state chiuse e le dovute protezioni inserite. Anche nelle applicazioni esterne (per controlli in opera su impianti e cantieri industriali), mediante unità radiografiche mobili, è necessario, per legge, operare opportuni accorgimenti per la protezione e l'incolumità dei lavoratori e della popolazione. Tutte le disposizioni a riguardo sono riportate nella Norma di riferimento per questo tipo di controllo, la UNI EN 444, dove è esplicitamente contenuta la seguente avvertenza: "L'esposizione del corpo umano o di sue parti ai raggi X o  $\gamma$  può essere gravemente nociva per la salute. Ovunque siano in uso apparecchiature a raggi X o sorgenti radioattive devono essere applicate le disposizioni legislative vigenti". La scelta tra l'utilizzo di raggi X o raggi  $\gamma$  (che hanno un maggiore potere di penetrazione) dipende dallo scopo dell'indagine e dal tipo di materiale da testare. I raggi X anche più potenti non superano spessori d'acciaio superiori a circa 70 mm; mentre i raggi  $\gamma$ , anche nei casi migliori, non superano i 180 mm. Il sistema PnD radiografico è spesso utilizzato dopo l'esecuzione di test con altri metodi di indagine per avere degli esami più approfonditi e precisi. In conclusione il sistema di indagine radiografico è una tecnica che permette la ricerca di difetti interni ed esterni ai materiali, è applicabile su tutti i materiali (ghisa, acciai, alluminio e leghe leggere, materiali compositi, ceramiche, plastiche, ecc.). Un grosso vantaggio di questo metodo è che è assoluto, cioè, non richiede procedure complesse di calibratura o comparazione con campioni di confronto. Le limitazioni sono legate allo spessore massimo e alla complessità geometrica dei pezzi da esaminare, alla forma e giacitura dei difetti e soprattutto all'elevato costo delle attrezzature e della loro manutenzione.

#### **3.1.4.9. Analisi degli ultrasuoni**

Col termine ultrasuoni si intendono vari tipi di onde elastiche, atte a propagarsi in un materiale per il quale sia possibile definirne le caratteristiche elastiche e la densità. Queste onde sono costituite da vibrazioni elastiche di particelle di materia e possono quindi avvenire in un mezzo solido, liquido, o gassoso. Non possono esistere in assenza di materia, contrariamente alle onde luminose che, essendo di natura

elettromagnetica, si propagano anche nel vuoto. Come per tutti i fenomeni ondulatori, anche gli ultrasuoni sono caratterizzati da parametri fisici quali: la frequenza, la lunghezza d'onda, la velocità di propagazione, l'intensità, ecc. Inoltre nella loro propagazione, analogamente alle onde luminose, subiscono i noti fenomeni della riflessione, rifrazione e diffrazione, quando incontrano discontinuità od ostacoli. In generale, quando un'onda attraversa la superficie di separazione fra due mezzi, la direzione di propagazione subisce una variazione: questo fenomeno si definisce rifrazione, ed è dovuto al fatto che la velocità di propagazione dipende dal mezzo in cui essa avviene. La riflessione si ha ogni volta che un'onda incide sulla superficie di separazione tra due mezzi, separandosi in due componenti: una prosegue nel secondo mezzo, subendo rifrazione, l'altra viene riflessa all'interno del primo mezzo. Inoltre tutte le onde (a parte quelle monodimensionali, proprie di una corda), se passano attraverso piccole aperture o incontrano un ostacolo sul loro cammino, deviano dalla direzione di propagazione rettilinea, e si sparpagliano in direzioni diverse. Questo fenomeno, detto diffrazione, diventa particolarmente intenso quando l'apertura, attraverso cui l'onda s'insinua, è piccola rispetto alla sua lunghezza d'onda. La Norma di riferimento, la UNI EN 583-1, prevede che si utilizzino ultrasuoni longitudinali o trasversali, di frequenza tipicamente compresa tra 1 e 10 MHz; negli ultimi tempi, in un contesto applicativo più ampio, il range si è esteso a 20 kHz-200 MHz.

La generazione di un fascio di ultrasuoni la si ottiene per mezzo di trasduttori, ossia dispositivi capaci di trasformare energia da una forma in un'altra. Nel caso degli ultrasuoni sono utilizzati trasduttori che trasformano energia elettrica in energia meccanica e viceversa, sfruttando gli effetti: piezoelettrico, elettrostrittivo, magnetostrittivo ed elettromagnetico. L'applicazione degli ultrasuoni alle PnD è, a tutt'oggi, uno dei metodi di analisi maggiormente utilizzato per l'ispezione volumetrica dei materiali che consentono un suo utilizzo diretto. I trasduttori trasmettono all'interno del componente in esame una serie di "impulsi ultrasonori" i quali, una volta attraversato il materiale e raggiunto il fondo, vengono riflessi e ricevuti da un'adeguata strumentazione che li elabora opportunamente. A seconda della geometria e del tipo di materiale in esame, possono essere impiegate differenti tecniche operative: alcune prevedono l'utilizzo di sonde che fungono contemporaneamente da trasmettitori e ricevitori degli ultrasuoni (tecnica in Riflessione), altre invece utilizzano due trasduttori diversi, uno per l'emissione e

l'altro per la ricezione (tecnica in Trasparenza). In ogni caso il fascio ultrasonoro, così come esce dal trasduttore è caratterizzato dalla sua forma geometrica (dimensioni e campo). Il segnale ultrasonoro in ricezione (riflesso o trasmesso) è invece caratterizzato da due parametri fondamentali e precisamente l'ampiezza (valore di picco dell'impulso elettronico mostrato sullo schermo dello strumento in una particolare rappresentazione denominata A-scan) ed il tempo di volo (tempo intercorso tra l'impulso di trasmissione e quello di ricezione, indicato dalla distanza tra i due impulsi mostrati sullo schermo) che fornisce la misura indiretta del percorso effettuato dall'onda ultrasonora nel mezzo. In altre parole il segnale di partenza degli ultrasuoni (chiamato "eco di partenza") e quello riflesso dalla superficie opposta a quella d'entrata (chiamato "eco di fondo"), vengono visualizzati sullo schermo dello strumento con dei picchi, la cui distanza risulta proporzionale al tempo che gli ultrasuoni impiegano per percorrere il viaggio di andata e di ritorno dalla sonda alla superficie riflettente presente all'interno del materiale. Se durante tale percorso il fascio ultrasonoro incontra delle discontinuità esse fungono da riflettori, e sullo schermo, tra i due precedenti picchi (eco di partenza ed eco di fondo), ne compariranno degli altri che rappresentano delle indicazioni relative al tipo di discontinuità incontrate.

#### **3.1.4.10. Esempi di applicazione**

Le tecniche di manutenzione predittiva trovano larga affermazione nei più disparati settori produttivi. Uno degli esempi più interessanti è rappresentato dall'applicazione di tali tecniche in campo navale. I componenti strutturali navali si danneggiano tipicamente per fenomeni di fatica, dunque il monitoraggio attraverso tecniche di indagine non distruttiva consente di monitorare con maggiore precisione la tolleranza al danno e la vita residua di ogni componente. Oggi questi tipi di controllo vengono effettuati prevalentemente in fase di assemblaggio, laddove vengono controllate saldature e giunzioni fra le componenti strutturali e gli apparati di propulsione. Le tecniche più utilizzate sono:

- Radiografia: analisi che presenta come limitazione l'accessibilità di entrambe le superfici del componente;
- Magnetoscopia: utilizzata per determinare l'eventuale presenza di cricche all'interno di alberi di trasmissione;



- Liquidi penetranti: utilizzati per verifiche di cricche superficiali in piccoli componenti oppure difetti superficiali nelle saldature;
- Indagini ultrasonore: utilizzate non solo per la verifica di saldature e giunzioni ma anche per verifiche strutturali di componenti critici per la sicurezza come timoni, eliche o alberi di trasmissione.

Attualmente, sono in fase di sviluppo metodologie per l'applicazione della manutenzione predittiva anche in ambito ferroviario. Attraverso analisi geostatiche del terreno e analisi tensionali dei componenti, è possibile infatti sviluppare precisi modelli matematici che permettono di gestire in modo predittivo la manutenzione dei componenti ferroviari (rotaie, deviatori ecc.). In questo modo è possibile tenere in conto l'evoluzione della natura porosa dei materiali coinvolti, della frequenza dei carichi, delle condizioni tensionali e a fatica dei componenti.

### ***3.2. Scelta della strategia manutentiva***

La scelta della strategia manutentiva da implementare passa dall'identificazione dei significant items. Si tratta di quei componenti il cui fallimento/rottura può causare gravi problemi di produzione o sicurezza. Una volta definiti i significant items e i non significant items è possibile definire la strategia manutentiva da applicare per ognuno di essi.

- Manutenzione a guasto: applicabile a non significant items oppure a quei significant items la cui condizione è difficile da monitorare o per le quali l'applicazione di una strategia preventiva sarebbe troppo costosa;
- Manutenzione preventiva: da applicare agli items significativi per la sicurezza le cui condizioni non possono essere monitorate.
- Manutenzione predittiva o su condizione: applicabile a tutti i significant items caratterizzati da condizioni operative monitorabili senza eccessivi costi.

Sicuramente fra i principali aspetti da valutare in sede di scelta di una determinata strategia manutentiva figurano dunque i costi. Non è tuttavia semplice analizzare tale aspetto in maniera completa. I costi più semplici da analizzare sono quelli diretti dovuti ai costi di manodopera, consumo energetico, pezzi di ricambio ecc. Oltre a questi costi vengono però spesso trascurati i costi indiretti ovvero quelli associati ad

ogni inefficienza di impianto. Tali costi includono mancata produzione, scarti, capacità produttiva insufficiente o danni di immagine e sono spesso delle fonti di costo difficili da valutare. Un errore comune da parte delle aziende è quello di risparmiare sui costi diretti della manutenzione, andando però in questo modo a pesare sui costi indiretti che risultano però appunto molto difficili da valutare e rintracciare nonostante in realtà rappresentino innegabilmente un danno per il business.

Una delle strategie più adottate a livello aziendale è la Reliability Centered Maintenance, una metodologia volta a rendere razionale la manutenzione basandosi su “dati certi”. I principi cardine di questa strategia sono:

- Utilizzo dell’esperienza acquisita ma accompagnato da una sistematica verifica di tutte le assunzioni;
- Applicazione di strategie di manutenzione preventiva basata su criteri affidabilistici;
- Analisi logica delle decisioni finalizzate a prevenire laddove possibile gli interventi correttivi.

L’RCM si dimostra molto utile all’aumentare della complessità dell’impianto. Gli indicatori della metodologia RCM permettono un immediato riscontro relativo a guasti e costi di ogni macchinario, permettendo di gestire dunque al meglio gli interventi manutentivi e la produzione. Uno degli esempi che è possibile citare in merito è tratto dal progetto Europeo CRAFT Tomas e riguarda l’applicazione della RCM in una fonderia francese. Uno dei risultati più significativi ottenuti a valle di quest’analisi riguarda una revisione delle gerarchie degli interventi manutentivi: a valle di un approccio logico applicato alla manutenzione si è notato come determinati interventi sino ad allora messi in secondo piano si sono dimostrati in realtà molto più importanti e dunque da ritenere prioritari. L’implementazione della RCM ha inoltre consentito di monitorare più da vicino determinati indicatori tecnici di produzione e basare le scelte manutentive su tali valori. Una volta effettuata la scelta strategica relativa alla manutenzione è poi possibile valutare in modo concreto se la gestione della manutenzione è più o meno efficiente, attraverso alcuni indicatori.

$$\frac{\text{Costi diretti di manutenzione}}{\text{Valore aggiunto della produzione}}$$

Laddove i costi diretti di manutenzione comprendono i costi di manodopera, materiali e dei lavori esterni mentre il valore aggiunto della produzione è calcolato come differenza fra il costo della produzione e il costo dei materiali grezzi. Il valore di questo rapporto è compreso fra 10 e 11 per gli impianti del settore meccanico.

$$\frac{\text{Costi diretti di manutenzione}}{\text{Costi di sostituzione dei componenti}}$$

Il valore di questo rapporto è compreso fra 12 e 13 per gli impianti del settore meccanico.

$$\frac{\text{Downtime della linea dovuto ad accidentali}}{\text{Ore teoriche di produzione calcolate su base annuali}}$$

Il valore di questo rapporto è compreso fra 10 e 11 per gli impianti del settore meccanico.



## 4. L'utilizzo dell'IoT in manutenzione

La manutenzione degli asset produttivi dunque si sta evolvendo in modo da rendere questa funzione aziendale il più efficiente possibile. Ciò non sarebbe ovviamente possibile se alla base non ci fosse un'importante evoluzione tecnologica. Il Transparency Market Report valuta la crescita di questo mercato stimando un passaggio dai 2 ai 6,5 miliardi di euro, nel periodo fra il 2013 e il 2019. La strategia manutentiva che maggiormente può beneficiare di tale progresso tecnologico è sicuramente la predittiva. Tale strategia presenta potenzialità notevolmente maggiori attraverso l'implementazione di queste tecnologie. Infatti, lo stato di degrado del componente e la vita residua del componente possono essere determinati in maniera molto più accurata attraverso l'utilizzo di precisi modelli matematici. Inoltre, la disponibilità di nuovi strumenti può permettere di trovare nuovi servizi a valore aggiunto da affiancare all'offerta tradizionale. Fondamentale è la disponibilità di dati in tempo reale riguardanti lo stato di macchinari, dispositivi e impianti: grazie alla grande velocità di reazione e alla diagnostica strumentale via Internet, i sensori applicati sui macchinari possono sensibilmente ridurre i costi degli interventi manutentivi, eliminando possibilmente ogni tipo di manutenzione a guasto. Il servizio di monitoraggio in tempo reale dell'impresa, potrebbe inoltre anche essere rivenduto a terzi, rappresentando così un'attività a valore aggiunto. I segnali registrati dai sensori devono inoltre essere correttamente interpretati ed integrati con la piattaforma software adibita alla manutenzione aziendale. I segnali vengono interpretati anche grazie alle tecniche di machine learning che sfruttano tecniche tipiche dell'intelligenza artificiale per modellizzare sistemi non lineari di difficile interpretazione, utilizzati per la modellizzazione del funzionamento dei macchinari. Per garantire tutto questo, l'azienda deve focalizzare la propria attenzione sull'infrastruttura di rete relativa a sensori e storage di informazioni. Tali attività possono essere portate a termine in maniera notevolmente più efficace attraverso le ultime innovazioni legate al cloud computing, big-data e Internet of Things. Il concetto di Internet of Things può essere descritto come un sistema di connettività intelligente finalizzato a permettere la comunicazione fra i vari dispositivi tecnologici. Il passo principale è l'utilizzo di una piattaforma IoT in grado di raccogliere dati da differenti attrezzature. L'obiettivo è la creazione di un sistema di

manutenzione predittiva avanzato e basato su piattaforme cloud. Per permettere la trasmissione di grandi moli di dati è necessario impiegare sistemi di comunicazioni molto veloci che leghino il sensore alla storicizzazione, scopo per cui possono essere adoperate le attuali reti Ethernet industriali. Attraverso questi progressi tecnologici è possibile anche immaginare una remotizzazione della manutenzione. A valle di derive rilevanti di determinate variabili d'impianto può scattare un'opportuna allarmistica, a valle della quale avviene l'intervento manutentivo in remoto, che anticipa il guasto evitando l'interruzione della produzione. Il più grande svantaggio dell'utilizzo di tecnologie IoT è la difficoltà di riuscire a connettere macchinari industriali tradizionali con piattaforme web. Alcune ricerche scientifiche presentano un metodo per superare questo problema, attraverso un'integrazione fra dispositivi e software basata su nuove procedure di traduzione di differenti linguaggi dei macchinari industriali in protocolli web. L'introduzione di un importante apparato di sensoristica a livello industriale introduce un'importante problematica riguardante l'affidabilità di tali sensori. In sistemi critici per la produzione o la sicurezza laddove sia previsto l'utilizzo di sensori, vengono introdotti software e hardware ridondanti in modo da assicurare che il breakdown del sensore non abbia alcun effetto sul funzionamento del sistema. Alcune nuove ricerche scientifiche, propongono inoltre specifici modelli matematici in grado di stimare con accuratezza, per sensori di pressione, il grado di invecchiamento del sensore in base alla rilevazione dei regimi operativi e dei sovraccarichi sopportati dallo stesso. Adoperando simili metodologie con tutte le tipologie di sensori è possibile immaginare di conferire grande affidabilità a tutto l'impianto sensoristico e dunque poter applicare in maniera efficace e credibile una strategia di manutenzione predittiva.

#### ***4.1. Analisi delle modalità di guasto***

Un guasto è un danno permanente in un sistema o in un impianto, non eliminabile con i mezzi a disposizione, senza effettuare la fermata del sistema o dell'impianto stesso. I guasti possono derivare da numerosissime differenti cause producendo altrettanti differenti effetti: per questa ragione è necessario condurre delle analisi volte a classificare tali guasti. Condizione necessaria ai fini di una corretta analisi dei

guasti è il possesso della conoscenza completa delle caratteristiche di ogni singolo componente del prodotto, in ogni fase del suo ciclo di vita, e la traduzione di tali caratteristiche in specifiche tecniche. Tale conoscenza è fondamentale per garantire una corretta classificazione delle diverse tipologie di guasto, conferendo maggiore priorità a quei guasti che hanno un maggiore impatto potenziale sulla qualità del prodotto. Si può certamente considerare buona norma in ambito aziendale implementare un'analisi del rischio di guasto. Si tratta di uno studio semplificato volto a scomporre in unità elementari i macchinari e le linee di trasferimento che ad essi fanno capo per condurre un'analisi su ciascuna di tali unità. Lo studio si concentra sull'analisi delle linee ritenute significative (ovvero critiche per la qualità del prodotto, per la stabilità del processo o per potenziale pericolosità), e parte dalla definizione della funzionalità di ogni singolo componente al fine di avere l'esatta conoscenza di quali possano essere le conseguenze potenziali a valle di un guasto dello stesso. La visione d'impresa oggi dominante sullo scenario mondiale propone obiettivi di produttività e di efficienza sempre più ambiziosi al fianco dei quali vengono imposti tuttavia vincoli di sicurezza altrettanto sfidanti e stringenti. L'affidabilità diviene dunque aspetto centrale nella vita dell'azienda causando una crescita di sensibilità e di conoscenze in merito da parte di tutte le figure aziendali. L'industria di processo rispetto alla classica industria manifatturiera deve far fronte a un'ulteriore difficoltà in merito al problema dei guasti. La maggior parte dei guasti in un'azienda legata alla produzione in serie sono legati al fenomeno dell'usura e dunque alla variabile tempo. Analizzando i guasti allo stesso modo in un contesto legato all'industria di processo significherebbe trascurare la componente umana e quella processuale. Infatti, all'interno di queste realtà, si nota che la maggior parte dei guasti avviene anzitempo ad esempio per via di erosioni o danneggiamenti causati da manovre errate o da temperature e pressioni troppo elevate. Un approccio basato su uno studio approfondito dei guasti permette una lucida presa di coscienza sulle conseguenze derivanti da ogni singolo guasto e dunque un'oculata scelta su che tipo di strategia manutentiva adottare per ogni componente e per ogni macchinario a seconda di quanto esso risulti critico. Si stima che adottando un corretto piano manutentivo studiato su base affidabilistica si possa prolungare la vita utile dell'impianto anche del 30%.

## ***4.2. La Total Productive Maintenance (TPM)***

Uno dei concetti più innovativi relativi alla teoria della manutenzione è quello di manutenzione produttiva. Con questo termine si intende “l’insieme di azioni volte alla prevenzione, al miglioramento continuo ed al trasferimento di funzioni elementari di manutenzione al conduttore dell’entità, avvalendosi del rilevamento di dati e della diagnostica sull’entità da mantenere”.

Essa dunque si fonda su alcuni principi fondamentali:

- Prevenzione mediante il monitoraggio dei segnali deboli;
- Miglioramento continuo;
- Manutenzione autonoma;
- Attività di piccoli gruppi interfunzionali.

Uno dei risultati più interessanti ottenibili a valle di questo tipo di approccio è l’abbandono di mentalità settoriali da parte delle singole funzioni aziendali, proprio attraverso l’attivazione di gruppi interfunzionali e dunque non legati unicamente ad una singola funzione. La definizione di questo tipo di approccio deriva dall’esperienza e ha dato forma alla teoria giapponese della Total Productive Maintenance (TPM).

L’obiettivo della TPM è quello di massimizzare affidabilità ed efficienza dei macchinari rendendo l’intera popolazione aziendale responsabile delle attività manutentive. Attraverso la responsabilizzazione di tutte le risorse aziendali in merito al tema della manutenzione, essa non sarà più compito esclusivo dei soli manutentori e ciò conduce ad una gestione manutentiva sempre più continuativa e tempestiva. Per coinvolgere l’intera popolazione aziendale è necessario che tutti gli operatori seguano training mirati al miglioramento delle loro competenze tecnico/gestionali relative alla manutenzione. Fra gli obiettivi della TPM figura anche la riduzione dei ritardi di messa in opera delle nuove apparecchiature. Ciò può essere ottenuto attraverso una progettazione mirata delle apparecchiature che miri a semplicità e funzionalità in modo da ottimizzare costi e utilizzazione dei macchinari.



### ***4.3. La pianificazione degli interventi manutentivi***

La pianificazione degli interventi manutentivi è una delle attività più complesse dell'intera realtà produttiva. Essa rappresenta la traduzione delle strategie manutentive che si intendono applicare in una sequenza di attività pratiche da realizzare concretamente sull'impianto nel corso della settimana. Tale attività è resa complessa in particolare dal fatto che in un impianto moderno non può esistere una sola strategia manutentiva attiva e dunque il piano manutentivo deve riuscire a far coesistere interventi manutentivi figli di strategie fra loro differenti se non contrastanti fra di loro. Tuttavia, si deve tenere presente, che la manutenzione a guasto deve sempre godere della priorità più elevata fra le quattro principali strategie manutentive enunciate, proprio perché si tratta della strategia che deve tempestivamente intervenire laddove sorgono necessità manutentive non previste. Per quanto riguarda le strategie "periodiche" si deve sempre tenere presente come esse possano migliorare manutenibilità e durata ma non possono evitare il fisiologico decadimento delle prestazioni delle attrezzature nel tempo dovuto all'usura. Ne consegue, che l'usura lavora costantemente su qualsiasi componente dei macchinari produttivi e dunque strategie manutentive come la preventiva e la predittiva, che puntano ad intervenire in anticipo rispetto al guasto, devono meticolosamente definire una precisa logica d'intervento basata su un preciso modello di usura. Gli approcci possibili sono differenti:

- 1) Primo approccio: adottare il tempo trascorso come misura dell'usura. Il numero di cicli fatti da un organo rotante, il numero di pezzi fatti e molte grandezze tipiche della produzione sono legate a doppio filo con il tempo trascorso. Tuttavia, esiste anche un insieme di variabili che incidono sull'usura ma non sono correlabili al tempo.
- 2) Secondo approccio: effettuare controlli sull'attrezzatura a frequenza temporale determinata. A seconda dei risultati ottenuti da tale controllo si può scegliere di programmare l'intervento manutentivo oppure di intensificare/diradare i controlli sull'equipment. Si tratta di una delle principali applicazioni pratiche dei principi della Total Productive Maintenance, in quanto attraverso questo approccio è possibile coinvolgere attivamente l'intero personale della produzione nelle attività manutentive. Questo approccio raggiunge la sua massima efficacia laddove sia possibile misurare univocamente il segnale debole sull'attrezzatura, ovvero una

determinata condizione di lavoro premonitrice di un imminente degrado delle prestazioni.

#### ***4.4. La programmazione degli interventi manutentivi***

Per inquadrare il problema della programmazione è utile sintetizzare la situazione che si ritrova tipicamente in ambito aziendale:

- Manutenzione e produzione fanno programmazione congiunta solo riguardo le attività soggette a controlli di legge;
- Le funzioni di gestione manutentiva sono in grado per ogni componente di scegliere la strategia manutentiva, le frequenze ed il personale necessario. Inoltre, tempi e costi degli interventi sono perfettamente noti come anche la necessità di effettuare o meno l'intervento a linea ferma;
- La Produzione ha ben precisi piani e fermate programmate. Fra questi spesso si inserisce un'attività condivisa con la manutenzione ovvero la taratura periodica degli strumenti. Tale attività dovrà essere tenuta in conto anche in fase di redazione del piano manutentivo;
- Non sempre le condizioni di processo consentono il rispetto delle fermate programmate in termini di data e/o durata.
- La manutenzione non riesce a saturare i tempi morti. Raggiungere il 100% di efficienza di pianificazione delle attività manutentive è pressoché impossibile, dove con efficienza di pianificazione si intende il rapporto fra gli slot di lavoro pianificati per i manutentori e gli slot totali disponibili.

#### ***4.5. Linee guida della programmazione***

Da letteratura si possono individuare delle preziose linee guida per una ottimale programmazione degli interventi manutentivi:

- 1) **Selezionare i paletti:** Alcune attività manutentive, come quelle soggette a controllo per legge, sono da inserire con priorità nel piano manutentivo rispetto a qualsiasi altro tipo di attività pianificata;

2) **Evitare fermate per sola manutenzione programmata normale:** è preferibile se possibile sfruttare i fermi dettati da esigenze primarie come ad esempio i sopra citati controlli di legge;

3) **Saturare la “manutenzione opportunistica”:** i fermi dettati dalla produzione come ad esempio i cambi campagna o i lavaggi periodici sono slot temporali ideali da sfruttare per effettuare interventi manutentivi a macchina ferma. Il concetto di “manutenzione opportunistica” è basato sulla convenienza dell’eventuale prolungamento della fermata tecnologica laddove sia necessario;

4) **Verificare la registrazione dei lavori di automanutenzione:** i lavori di “automanutenzione” ovvero quelli eseguiti in autonomia dagli operatori devono essere puntualmente segnalati, in modo da avere una panoramica attendibile e aggiornata delle “condizioni di salute” dell’equipment;

5) **Assicurare il rispetto dei programmi di fermata:** non è raro che alcune fermate programmate possano saltare, ad esempio per necessità di produzione, tuttavia bisogna evitare che ciò accada con frequenza troppo elevata. Se ciò accade, sta a significare che probabilmente il piano manutentivo in essere non è praticabile e va rivisto.

Il risultato finale di questo processo è la pianificazione macchina per macchina, formato da un elevato numero di attività elementari, caratterizzate dalle più disparate frequenze. Tale piano va messo in pratica spalmando le attività sul calendario e dunque nel pieno rispetto di paletti, turni, festività, fermate programmate ecc. Si deve dunque realizzare una calendarizzazione ottimale ed attendibile che può anche servirsi di strumenti automatici e appositi software.



## 5. Conclusioni

La progressiva diffusione dei dispositivi e delle applicazioni IoT (Internet of Things), assieme alla disponibilità di strumenti analitici evoluti e all'emergere delle tecnologie di intelligenza artificiale e machine learning (ML), permettono oggi di integrare nei macchinari industriali sensori d'ogni tipo, e di connettere in rete tali attrezzature, per poi monitorarne di continuo lo stato di funzionamento. In base ai dati raccolti, vengono elaborati modelli predittivi che consentono di ottimizzare la strategia di manutenzione. Ad esempio, il modello può indicare che gli attuali programmi e pratiche sono ideali e non richiedono modifiche, oppure che è urgente evitare un guasto; o, ancora, che è possibile rimandare un intervento dispendioso perché quella determinata attrezzatura non ne ha realmente necessità. In aggiunta, più dati vengono acquisiti dai sensori e più gli algoritmi di ML possono apprendere sulla storia e sulle condizioni delle macchine, migliorando di continuo le metodologie di manutenzione.

La manutenzione, dunque, ricopre un ruolo fondamentale all'interno dello scenario industriale.

Una corretta gestione della manutenzione industriale influenza positivamente l'azienda: l'abbassamento dei costi di manutenzione, il tempo risparmiato e la possibilità di **evitare fermi impianto** sono dei vantaggi considerevoli.

Ma per capire come gestire correttamente le riparazioni, bisogna capire quanto gravano i guasti e la frequenza con cui avvengono: i costi diretti di manutenzione predittiva possono sembrare più alti ma, proprio grazie a questo tipo di intervento, vengono **evitate perdite di produzione** ben maggiori.

Il consiglio di chi si occupa professionalmente di manutenzione di impianti industriali, in questa nuova era, è **“predire è meglio che prevenire”**.



## 6. Bibliografia

1. Gonzalez Carlo, What are Human Machine Interface and Why are they becoming more important?, [www.machinedesign.com](http://www.machinedesign.com), 16/9/2015.
2. Favero Marco, Produzione sottrattiva vs stampa 3D: quando il meno è di più, [www.stampa-3d.com](http://www.stampa-3d.com), 2/1/2013.
3. What is Additive Manufacturing?, [additivemanufacturing.com](http://additivemanufacturing.com).
4. Palermo Elizabeth, What is Stereolithography?, [www.livescience.com](http://www.livescience.com), 16/7/2013.
5. Palermo Elisabeth, Fused Deposition Modeling: Most Common 3D Printing Method, [www.livescience.com](http://www.livescience.com), 19/9/2013.
6. Stampa 3D a metallo: cosa dovete sapere, [www.replicatore.it](http://www.replicatore.it).
7. Pace Alice, Dopo le protesi, la biomedicina sfrutterà la stampa 3D per replicare i tessuti molli dell'organismo. Ecco come e, soprattutto, perché, [www.wired.it](http://www.wired.it), 29/10/2015.
8. LaMonica Martin, Additive Manufacturing GE, the world's largest manufacturer, is on the verge of using 3-D printing to make jet parts, [www.technologyreview.com](http://www.technologyreview.com).
9. Il ponte MX3D, [www.processinnovation.wordpress.com](http://www.processinnovation.wordpress.com), 12/5/2016.
10. Cyber-Physical Systems, [www.cpse-labs.eu](http://www.cpse-labs.eu), 2016.
11. I sistemi cyberfisici, [www.automazione.it](http://www.automazione.it), 20/5/2016.
12. Cos'è il Cloud: i diversi tipi di Cloud, [html.it](http://html.it).
13. Paparo Alexis, Wearable Technology, cosa succede in Italia, [www.wired.it](http://www.wired.it), 16/01/2015.
14. Sung Dan, What is wearable tech? Everything you need to know explained, [www.wearable.com](http://www.wearable.com), 3/8/2015.
15. Wearable device - definizione, [www.economyup.it](http://www.economyup.it), 2/5/2016.
16. Balena Carlotta, A scuola con Oculus Rift: «Siamo i primi a usare la realtà virtuale per fare lezione», [ischool.sturtupitalia.eu](http://ischool.sturtupitalia.eu), 7/1/2016.
17. Virtual Reality vs. Augmented Reality, [www.augment.com](http://www.augment.com), 6/10/2015.
18. Big Data : Cosa sono e perché sono importanti, [sas.com](http://sas.com).
19. Cosa sono i Big Data: esempi concreti della vita quotidiana, [www.cloudtalk.it](http://www.cloudtalk.it).
20. Madrigal Alexis C., In Defense of Google Flu Trends, [www.theatlantic.com](http://www.theatlantic.com), 27/3/2014.
21. Russo Massimiliano, Privacy, Internet delle cose, big data e intelligenza artificiale: ecco perché serve un nuovo contratto sociale, [www.wired.it](http://www.wired.it), 7/4/2015.
22. Bellini Mauro, Internet of Things, gli ambiti applicativi in Italia, [www.internet4things.it](http://www.internet4things.it), 25/11/2015.
23. A. Topi, «Il processo di definizione di politiche di manutenzione predittiva di una linea di produzione. Il caso Philip Morris MTB».
24. C. Galasso, «Generalità sul servizio manutenzione,» in Appunti di Impianti Industriali.
25. UNI 9910, 1991.
26. F. M. Cominoli, La manutenzione si può anche fare, Pitagora, 2006.
27. F. Martini, Analisi comparata delle tecniche innovative di manutenzione degli impianti industriali.

28. L. Higgins e K. Mobley, Maintenance Engineering Handbook, Mc Graw-Hill Education, 2002.
29. K. Mobley, Plant Engineer's Handbook, Butterworth-Heinemann, 2001.
30. M. Bengtsson e M. Jackson, «Important aspects to take into consideration when deciding to implement Condition Based Maintenance».
31. K. Mobley, An Introduction to Predictive Maintenance, Butterworth-Heinemann/Elsevier Science, 2002.
32. B. Mitchell e R. Murry, «Predictive Maintenance Program Evolution-Lesson Learned,» 1995 PROCEEDINGS Annual RELIABILITY and MAINTAINABILITY Symposium, pp. 7-10, 1995.
33. D. Edwards, G. Holt e F. Harris, «Predictive maintenance techniques and their relevance to construction plant,» Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 4, n. 1, 1998.
34. R. Bogue, «Sensors for condition monitoring: a review of technologies and applications,» Sensor Review, vol. 33, n. 4, 2013.
35. T. Plante, A. Nejadpak e C. X. Yang, «Faults detection and failures prediction using vibration analysis,» 2015.
36. M. Al-Haboubi e S. Selim, «Noise change as an indicator of maintenance requirement,» Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 6, n. 1, 2000.
37. C. Santulli, «Qualità e manutenzione predittiva mediante il controllo non distruttivo in campo navale,» in Le nuove tecnologie dei materiali e le loro applicazioni in campo navale, Livorno, 1995.
38. G. Della Vecchia e A. Galli, «Un approccio semplificato per la valutazione delle strategie di manutenzione delle infrastrutture ferroviarie,» 2017.
39. R. Horner, «Building maintenance strategy: a new management approach,» Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 3, n. 4, pp. 273-280, 1997.
40. P. De Groote, «Maintenance performance analysis: a practical approach,» Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 1, n. 2, pp. 4-24, 1995.
41. C. Fragassa, «Manutenzione centralizzata in una fonderia di media grandezza,» luglio 2005.
42. D. Richet, N. Cotaina e O. Kenneth, «Guide TOMAS, Rapport de fin de projet,» Paris, 1992.
43. C. Randieri, «Tavola Rotonda "Predire...in manutenzione",» Fieldbus & Networks, vol. 84, 2015.
44. R. C. Parpala e R. Iacob, «Application of IoT concept on predictive maintenance of industrial equipment,» Bucharest, 2017.
45. M. Zarnik, F. Novak e G. Papa, «Sensors in proactive maintenance-A case of LTCC pressure sensors,» Maintenance and Reliability, 2018.



## **Elenco delle figure**

1. Le rivoluzioni industriali
2. Esempio di Human Machine Interface
3. Stampante 3D
4. Schema delle 3 “C”
5. Cloud
6. Smart jewelry
7. Wireless implantable medical devices
8. Oculus rift
9. HTC Vive
10. Utilizzo della realtà aumentata per visualizzare negozi, ristoranti più vicini, con le rispettive recensioni
11. Andamento della funzione costo totale
12. Curva dei costi di un componente elettromeccanico
13. Andamento dei costi di manutenzione a guasto e preventiva
14. Benefits dell’approccio predittivo
15. Spettro delle frequenze motore AC trifase con supporti non danneggiati
16. Spettro delle frequenze motore AC trifase con supporti danneggiati

