

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale



STRATEGIE DI MANUTENZIONE NEGLI
IMPIANTI INDUSTRIALI E IMPATTO SU
EFFICIENZA E SOSTENIBILITÀ

Relatrice: Prof.ssa Martina Calzavara

Laureando: Kevin Dardha

N° matricola: 1168559

Anno Accademico 2025-2026

INDICE

INTRODUZIONE	3
Contesto e motivazione	3
Obiettivi della tesi	4
Capitolo 1	6
Fondamenti della manutenzione industriale.....	6
1.1 Obiettivo del capitolo	6
1.2 Definizione e ruolo della manutenzione	6
1.3 Tipologie tradizionali di manutenzione	7
1.4 Indicatori di performance della manutenzione	10
1.5 Relazione tra manutenzione ed efficienza produttiva	11
Capitolo 2	13
Strategie moderne e manutenzione sostenibile.....	13
2.1 Obiettivo del capitolo	13
2.2 Evoluzione verso la digitalizzazione	13
2.3 Strategie di manutenzione avanzate	15
2.4 Impatto delle strategie sui KPI e sull'efficienza operativa	17
2.4.2 Riduzione dei tempi di fermo	19
2.4.3 Ottimizzazione delle prestazioni degli impianti	20
2.5 Manutenzione sostenibile	22
2.5.1 Definizione e principi	23
2.5.2 Integrazione con la strategia aziendale	23
2.5.3 Riduzione di scarti, downtime e consumi energetici.....	24
2.5.4 Monitoraggio energetico e ottimizzazione risorse.....	24
2.5.5 Life Cycle Assessment (LCA)	25
CAPITOLO 3	27
Valutazione dell'impatto delle strategie manutentive sulla sostenibilità	27
3.1 Obiettivo del capitolo	27
3.2 Caso Toyota: TPM e sostenibilità	27
3.2.1 Stabilità operativa e implicazioni sulla sostenibilità	28
3.2.2 Impatto sull'utilizzo delle risorse in ottica LCA.....	29
3.3 Caso Renault: PdM e sostenibilità data-driven	31
3.3.1 Gestione delle condizioni operative e degli interventi	31
3.3.2 Impatto sull'utilizzo delle risorse in ottica LCA.....	33

3.4 Discussione critica delle strategie in ottica di sostenibilità	35
Conclusioni	39
Bibliografia.....	41

INTRODUZIONE

Contesto e motivazione

La manutenzione rappresenta uno degli aspetti più importanti nella gestione degli impianti industriali. Garantire il corretto funzionamento di macchinari e sistemi produttivi oltre a prevenire guasti o arresti improvvisi significa anche assicurare la sicurezza, la continuità operativa e un utilizzo efficiente delle risorse disponibili.

Nei contesti produttivi più moderni, caratterizzati da elevati livelli di automazione e da una complessità crescente, un fermo macchina non programmato può comportare conseguenze rilevanti, sia a livello economico sia nella gestione dei flussi produttivi. Per questo motivo, nel tempo, la manutenzione ha assunto un ruolo più centrale, diventando un elemento chiave per il corretto funzionamento e la competitività delle aziende.

Con l'evolversi delle tecnologie, gli approcci tradizionali, basati su interventi a guasto o su pianificazioni rigide, hanno evidenziato diversi limiti, soprattutto in termini di inefficienza e capacità di prevenire i guasti. Si stanno così affermando modelli sempre più avanzati, basati sull'analisi dei dati, sul monitoraggio continuo delle condizioni operative e sull'integrazione tra tecnologie digitali e processi produttivi.

Tra questi rientrano la Time-Based Maintenance (TBM), che prevede interventi a intervalli regolari, la Use-Based Maintenance (UBM), basata sull'utilizzo effettivo dell'impianto, la Predictive Maintenance (PdM), che sfrutta dati e sensori per anticipare i guasti, e la Total Productive Maintenance (TPM), che coinvolge gli operatori nella gestione della manutenzione. A questi, vi si possono affiancare due approcci complementari: l'approccio migliorativo, orientato ad aumentare l'affidabilità e le prestazioni, e quello opportunistico, che sfrutta i downtime programmati per interventi aggiuntivi.

Queste strategie consentono di intervenire in modo più mirato sugli impianti, contribuendo a ridurre i tempi di fermo e a migliorare le prestazioni complessive. L'efficacia, tuttavia, dipende molto dal contesto applicativo e dal tipo di dati disponibili.

Accanto alle strategie di manutenzione, gli indicatori di performance, o KPI (Key Performance Indicators), svolgono un ruolo fondamentale, poiché consentono una valutazione quantitativa dell'efficacia delle attività manutentive.

Tra i principali ci sono il Mean Time Between Failures (MTBF), indicatore dell'affidabilità delle macchine, il Mean Time To Repair (MTTR), utile per valutare la gestione dei fermi macchina e la velocità di risposta, la disponibilità, che esprime la percentuale di tempo in cui l'impianto è operativo, e l'Overall Equipment Effectiveness (OEE), che combina disponibilità, prestazioni e qualità in misura sintetica.

L'analisi di questi indicatori oltre al monitoraggio delle prestazioni degli impianti permette di comprendere in che modo le diverse strategie di manutenzione influenzino l'efficienza operativa e l'uso delle risorse. Il rapporto tra manutenzione e performance produttive risulta quindi particolarmente significativo.

Negli ultimi anni è inoltre aumentata l'attenzione al tema della sostenibilità nei sistemi industriali. In questo contesto, la manutenzione assume un'importanza ancora maggiore, poiché una gestione efficiente degli impianti permette di ridurre i consumi energetici, limitare gli sprechi di materiale e diminuire i tempi di fermo non programmati.

In molti contesti industriali, infatti, una manutenzione ben organizzata rappresenta non solo un vantaggio economico, ma anche un elemento importante sotto il profilo ambientale.

L'integrazione tra strategie di manutenzione, monitoraggio delle prestazioni e sostenibilità è oggi fondamentale per lo sviluppo di sistemi produttivi più efficienti e competitivi.

Obiettivi della tesi

Questo lavoro analizza le principali strategie di manutenzione adottate negli impianti industriali, con attenzione al loro impatto sull'efficienza operativa e sulla sostenibilità dei processi produttivi.

Il primo obiettivo è descrivere le principali strategie di manutenzione moderne e comprenderne il funzionamento, soffermandosi sul ruolo degli indicatori di performance nella valutazione delle attività manutentive. Viene quindi messo in

evidenza il legame tra scelte manutentive ed efficienza degli impianti, mostrando in che modo tali approcci possano influenzare le prestazioni complessive.

Un secondo aspetto riguarda il contributo della manutenzione alla sostenibilità, con particolare riferimento alla riduzione dei consumi, degli scarti e dei tempi di fermo. L'analisi viene condotta anche in ottica di ciclo di vita, per valutare l'impatto delle strategie non solo durante il funzionamento degli impianti, ma lungo l'intero arco di vita. A partire da questi elementi, la tesi propone una sintesi delle principali evidenze della letteratura scientifica, confrontando approcci diversi per farne emergere punti di forza e limiti in termini di sostenibilità.

Capitolo 1

Fondamenti della manutenzione industriale

1.1 Obiettivo del capitolo

Questo capitolo introduce i principali concetti della manutenzione industriale, fornendo la teoria necessaria per comprenderne il ruolo nei sistemi produttivi. Vengono presentate le definizioni di manutenzione e le principali tipologie utilizzate in ambito industriale, mettendone in evidenza caratteristiche e ambiti di applicazione.

Viene inoltre analizzato il ruolo degli indicatori di performance, utili a valutare in modo oggettivo l'efficacia delle attività manutentive. Attraverso questi strumenti è possibile comprendere meglio il legame tra manutenzione ed efficienza degli impianti.

Infine, è introdotto il tema della sostenibilità, evidenziando come una gestione efficace della manutenzione possa contribuire alla riduzione dei consumi e degli sprechi. Questo capitolo fornisce quindi le basi teoriche per l'analisi delle strategie più avanzate trattate nei capitoli successivi.

1.2 Definizione e ruolo della manutenzione

Negli impianti industriali, la manutenzione può essere definita come l'insieme delle attività volte a garantire che impianti, macchine e attrezzature siano in grado di svolgere in modo continuo e sicuro le funzioni per cui sono stati progettati.

Una definizione di riferimento in ambito europeo è fornita dalla norma EN 13306, secondo cui la manutenzione comprende tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali volte a mantenere o riportare un bene in uno stato in grado di soddisfare la funzione richiesta (CEN, 2017).

La manutenzione quindi non si limita alla riparazione dei guasti, ma comprende anche attività di pianificazione, controllo e gestione.

Storicamente, la manutenzione veniva considerata una funzione di supporto alla produzione e, in molti casi, era vista più come un costo inevitabile che come una risorsa strategica. In questi casi si interveniva principalmente in modo reattivo, cioè solo dopo il verificarsi di un guasto.

Tuttavia, diversi studi recenti sottolineano che una gestione non strutturata della manutenzione comporta elevati costi indiretti, legati ai fermi macchina non programmati, alla perdita di produttività e al peggioramento delle condizioni di sicurezza (Anaba et al., 2024).

Con l'aumento della complessità degli impianti e l'intensificarsi della competizione nei mercati industriali, il ruolo della manutenzione ha progressivamente assunto una valenza più strategica. Una gestione efficace delle attività manutentive consente infatti di migliorare l'affidabilità e la disponibilità degli impianti, contribuendo alla riduzione dei tempi di inattività e alla stabilità dei processi produttivi (Werbińska-Wojciechowska e Winiarska, 2023).

Negli ultimi anni, la letteratura ha inoltre evidenziato il forte legame tra manutenzione e trasformazione digitale. L'adozione delle tecnologie riconducibili ai paradigmi di Industry 4.0 e Maintenance 4.0, quali sensori intelligenti, sistemi IoT e strumenti di analisi avanzata dei dati, ha permesso il superamento degli approcci reattivi, favorendo strategie manutentive più proattive e basate sulle condizioni reali degli impianti (Jasiulewicz-Kaczmarek, 2024).

Un ulteriore aspetto di crescente rilevanza riguarda il contributo della manutenzione agli obiettivi di sostenibilità. Una corretta pianificazione delle attività manutentive consente infatti di ridurre i consumi energetici, limitare gli sprechi e prolungare la vita utile degli asset produttivi, con benefici sia economici che ambientali (Franciosi et al., 2020).

1.3 Tipologie tradizionali di manutenzione

Le attività manutentive possono essere classificate in diverse tipologie basate sul momento in cui l'intervento viene effettuato rispetto al manifestarsi del guasto e al livello di pianificazione adottato. Questa classificazione permette di seguire l'evoluzione degli approcci di manutenzione nel tempo e ne espone i punti di forza e i limiti applicativi.

In letteratura si distinguono generalmente quattro tipologie principali di manutenzione: correttiva, preventiva, predittiva e proattiva. Tali approcci non devono essere interpretati come alternativi in senso assoluto, ma come strategie che possono

coesistere all'interno dello stesso sistema produttivo, in funzione delle caratteristiche degli impianti e degli obiettivi aziendali (Anaba et al., 2024).

Manutenzione correttiva

La manutenzione correttiva è la forma più semplice di intervento manutentivo. Essa consiste nell'azione eseguita a seguito del verificarsi di un guasto o di un malfunzionamento che compromette, parzialmente o totalmente, il funzionamento dell'impianto.

Questo approccio non prevedendo attività di pianificazione o di monitoraggio continuo ha il vantaggio di richiedere costi iniziali più bassi. Tuttavia, i fermi macchina risultano imprevedibili e spesso associati a tempi di inattività elevati, con conseguenti ripercussioni su produttività, sicurezza e qualità del processo produttivo.

La manutenzione correttiva è generalmente adottata per apparecchiature non critiche o caratterizzate da costi di fermo limitati, mentre risulta poco adeguata in contesti industriali automatizzati e ad alta complessità.

Manutenzione preventiva

La manutenzione preventiva si basa su interventi programmati effettuati a intervalli temporali prestabiliti o in funzione di un numero definito di cicli di funzionamento dell'impianto. Lo scopo è ridurre i guasti improvvisi, intervenendo prima che l'usura dei componenti impatti negativamente le prestazioni dell'impianto.

Essa consente una pianificazione delle risorse e dei tempi di intervento migliore rispetto alla manutenzione correttiva e di conseguenza garantisce una maggiore continuità operativa dell'impianto. Va però considerato che uno dei limiti di questa strategia è la possibile esecuzione di interventi non sempre necessari, con un conseguente impiego non ottimale delle risorse e un incremento dei costi manutentivi complessivi.

Manutenzione predittiva

La manutenzione predittiva si basa sul monitoraggio delle condizioni operative degli impianti attraverso misure e controlli periodici o continui di specifici parametri, come ad esempio vibrazioni, temperatura, pressione o consumo energetico. Questa analisi individua i segnali di degrado anticipando i guasti.

Grazie a questa metodologia, è possibile programmare gli interventi in modo più mirato, intervenendo solo quando le condizioni dell'impianto rendono necessaria la manutenzione. È quindi possibile ridurre sia i fermi macchina non programmati sia le manutenzioni superflue, con un conseguente miglioramento dell'efficienza complessiva del sistema produttivo.

Va però considerato che richiede l'uso di strumenti di monitoraggio dedicati e di competenze specifiche per la raccolta e l'analisi dei dati. Ciò comporta costi iniziali più elevati rispetto agli approcci basati su interventi pianificati nel tempo. Tali costi in impianti complessi sono compensati nel medio-lungo periodo grazie alla riduzione dei tempi di inattività e a un miglior utilizzo delle risorse manutentive.

Manutenzione proattiva

La manutenzione proattiva rappresenta un'evoluzione ulteriore rispetto agli approcci precedenti e si concentra sull'eliminazione delle cause profonde dei guasti. Attraverso l'analisi delle modalità di guasto e gli interventi migliorativi, questa strategia mira ad aumentare l'affidabilità intrinseca degli impianti e a prolungarne la vita utile.

In quest'ottica, la manutenzione non si limita al ripristino delle condizioni operative, ma contribuisce attivamente al miglioramento delle prestazioni del sistema. Essa risulta particolarmente efficace se integrata con attività di miglioramento continuo e con una visione di lungo periodo della gestione degli asset industriali.

Posizionate rispetto al momento del guasto (EN 13306)

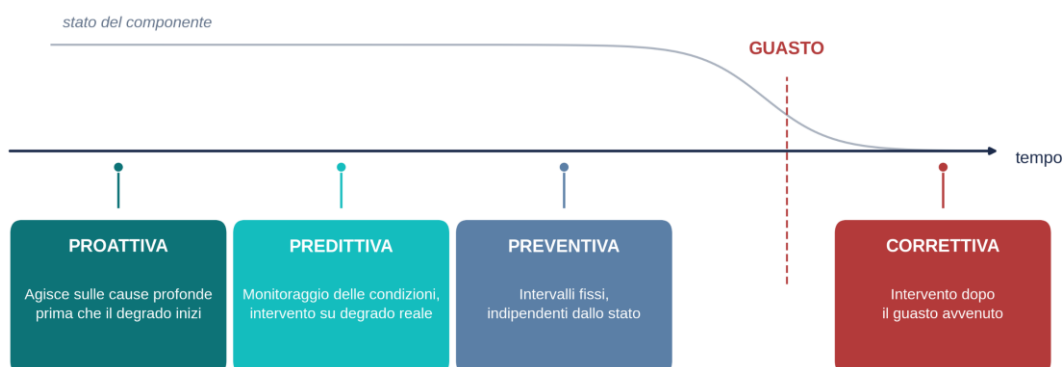


Figura 1: rappresentazione delle strategie manutentive rispetto al momento del guasto (elaborazione personale)

1.4 Indicatori di performance della manutenzione

Per valutare oggettivamente l'efficacia delle attività di manutenzione e il loro impatto sulle prestazioni del sistema produttivo, si utilizzano specifici indicatori di performance, chiamati anche KPI (Key Performance Indicators). Misurano aspetti fondamentali quali l'affidabilità, la manutenibilità e l'efficienza degli impianti, supportando così le decisioni operative e gestionali in modo quantitativo.

Nella manutenzione, alcuni KPI sono particolarmente utilizzati poiché mettono in relazione le attività manutentive con le prestazioni produttive dell'impianto. Tra questi, i più importanti sono MTBF, MTTR, disponibilità e OEE.

MTBF – Mean Time Between Failures

Il MTBF è il tempo medio di funzionamento di un impianto o di una macchina tra due guasti consecutivi. Questo indicatore viene utilizzato principalmente per valutare l'affidabilità delle apparecchiature: valori elevati di MTBF indicano che i guasti sono meno frequenti e che l'impianto è in grado di operare per lunghi periodi senza interruzioni improvvise.

Dal punto di vista formale, è definito come:

$$\text{MTBF} = \text{Tempo totale di funzionamento} / \text{Numero di guasti}$$

Esso è influenzato sia dalle condizioni operative sia dalle qualità delle attività manutentive. Strategie orientate alla prevenzione e alla predizione dei guasti tendono, nel tempo, ad aumentare questo indicatore, migliorando la continuità operativa del sistema produttivo.

MTTR – Mean Time To Repair

Il MTTR indica il tempo medio necessario per riparare un guasto e ripristinare il corretto funzionamento dell'impianto. Esso rappresenta un indicatore chiave della manutenibilità, ovvero la capacità di un sistema di essere riparato in modo rapido e efficace.

In termini quantitativi, può essere espresso come:

$$\text{MTTR} = \text{Tempo totale di riparazione} / \text{Numero di interventi}$$

Un MTTR contenuto è generalmente associato a una buona organizzazione delle attività manutentive, alla disponibilità di ricambi, alla standardizzazione delle procedure e al

livello di competenza del personale. La riduzione del MTTR contribuisce direttamente alla diminuzione dei tempi di fermo macchina e migliora la reattività complessiva del sistema produttivo.

Disponibilità

La disponibilità misura la percentuale di tempo in cui un impianto è operativo rispetto al tempo totale pianificato. Questo parametro nasce dalla combinazione di affidabilità e manutenibilità ed è quindi influenzato sia dal numero dei guasti (MTBF) sia dalla loro durata (MTTR).

Essa può essere formalmente espressa nella forma:

$$A = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

Dal punto di vista pratico, si tratta di uno degli indicatori più immediati per capire quanto la manutenzione incida sulla produzione, poiché esprime in modo diretto la reale capacità dell'impianto di essere utilizzato quando richiesto.

OEE – Overall Equipment Effectiveness

L'OEE è un indicatore sintetico ampiamente utilizzato in ambito industriale per valutare l'efficienza complessiva di un impianto. Esso combina tre componenti fondamentali:

- Disponibilità, la quale tiene conto delle perdite dovute ai fermi
- Prestazioni, legate alla velocità di produzione
- Qualità, che considera gli scarti e i prodotti non conformi

In forma sintetica, l'OEE è calcolato come:

$$\text{OEE} = \text{Disponibilità} * \text{Prestazioni} * \text{Qualità}$$

L'OEE permette di quantificare complessivamente le perdite di efficienza di un sistema produttivo ed è utile per individuare le aree di miglioramento. Dal punto di vista manutentivo, una gestione efficace degli impianti contribuisce soprattutto al miglioramento della disponibilità, influenzando direttamente il valore complessivo dell'indicatore.

1.5 Relazione tra manutenzione ed efficienza produttiva

La manutenzione e l'efficienza produttiva sono strettamente interconnesse all'interno dei sistemi industriali. Il livello di efficienza di un impianto dipende dalla sua capacità di

operare in modo continuo, affidabile e conforme alle prestazioni progettuali, aspetti direttamente influenzati dalla gestione delle attività manutentive.

L'efficienza produttiva è legata alla capacità di ridurre le principali perdite del processo industriale: fermi macchina non programmati, cali di velocità operativa e produzione di scarti. La manutenzione incide direttamente su questi aspetti contribuendo al miglioramento delle prestazioni complessive dell'impianto.

Quando è gestita correttamente, aumenta l'affidabilità delle apparecchiature, riducendo la frequenza dei guasti e prolungando il tempo medio di funzionamento tra due arresti consecutivi. Allo stesso tempo, una corretta organizzazione degli interventi limita la durata dei fermi macchina. Questo si traduce, nella pratica, in un sistema produttivo più reattivo in situazioni di criticità.

Il legame tra efficienza e manutenzione emerge chiaramente anche con l'analisi dei principali KPI. Un MTBF più alto e un MTTR ridotto si traducono in una maggiore disponibilità, mentre una gestione manutentiva adeguata contribuisce a mantenere nel tempo sia le prestazioni operative sia la qualità del prodotto. Di conseguenza, l'efficacia delle strategie di manutenzione si riflette in modo significativo sull'OEE, il quale rappresenta una misura sintetica dell'efficienza complessiva del sistema.

La letteratura sottolinea inoltre come la manutenzione non debba essere considerata esclusivamente come una funzione di supporto o un centro di costo, ma piuttosto come una leva strategica per il miglioramento dell'efficienza operativa (Franciosi et al., 2020). Investire nella manutenzione significa quindi ottenere benefici concreti, quali l'aumento della produttività, la riduzione delle perdite e un uso più efficiente delle risorse industriali.

Capitolo 2

Strategie moderne e manutenzione sostenibile

2.1 Obiettivo del capitolo

Questo capitolo approfondisce lo sviluppo delle strategie di manutenzione nel contesto industriale attuale.

L'attenzione è rivolta al passaggio da una classificazione generale degli interventi manutentivi a soluzioni più avanzate, che sfruttano i dati e il monitoraggio continuo degli impianti per migliorare le prestazioni operative.

Vengono quindi analizzati i principali approcci adottati in ambito industriale, tra cui TBM, UBM, PdM, TPM, insieme a interventi migliorativi e opportunistici, evidenziandone caratteristiche e differenze.

Nella parte finale, il capitolo introduce il tema della sostenibilità applicata alla manutenzione, mostrando come le strategie più evolute possano contribuire sia all'efficienza operativa sia alla riduzione degli impatti e degli sprechi.

2.2 Evoluzione verso la digitalizzazione

Nello scenario industriale attuale, la manutenzione sta attraversando una profonda fase di trasformazione, legata alla diffusione progressiva delle tecnologie digitali. Oltre agli strumenti impiegati, questo cambiamento riguarda anche il modo in cui le attività di manutenzione vengono organizzate e integrate nei processi produttivi.

In passato, la manutenzione si basava su informazioni limitate e su decisioni spesso legate all'esperienza degli operatori. Oggi, grazie alla diffusione di sistemi informativi più evoluti e alla disponibilità di dati in tempo reale, le condizioni degli impianti possono essere monitorate in modo continuo. Di conseguenza, gli interventi sono più precisi e, rispetto a quanto avveniva in precedenza, sono molto più tempestivi.

Un contributo fondamentale a questa evoluzione è arrivato con il paradigma di Industry 4.0, che ha favorito una maggiore integrazione tra le macchine e i sistemi digitali. La

disponibilità di dati aggiornati consente l'individualizzazione delle anomalie, la valutazione dello stato degli impianti e il supporto alla pianificazione degli interventi manutentivi.

Da questo si sviluppa il concetto di Maintenance 4.0, che rappresenta il passaggio dagli approcci tradizionali a modelli basati sull'analisi dei dati.

La manutenzione non è più vista come un'attività separata, ma diventa parte integrante del sistema produttivo, dando maggiore attenzione ad aspetti come affidabilità, disponibilità ed efficienza (Jasiulewicz-Kaczmarek, 2024).

Un elemento fondamentale di questa evoluzione è la possibilità di effettuare interventi più mirati, basati su informazioni costantemente aggiornate e più affidabili. Questo riduce il numero di fermi non programmati, migliorando così sia la continuità operativa sia l'utilizzo delle risorse.

Allo stesso tempo, la digitalizzazione rende possibile la sincronizzazione tra manutenzione e produzione. Le due attività non sono più separate, ma si coordinano, avendo così una gestione più organizzata del sistema. Questo si riflette direttamente in un miglioramento complessivo delle prestazioni.

Nonostante i vantaggi, l'introduzione di questi approcci richiede un adeguamento organizzativo, dovuto alla gestione dei dati e allo sviluppo di competenze tecniche adeguate. Tuttavia, i benefici derivanti dalla digitalizzazione risultano rilevanti e sono un elemento chiave per il miglioramento delle prestazioni industriali (Werbińska-Wojciechowska e Winiarska, 2023).



Figura 2: evoluzione della manutenzione verso la digitalizzazione (elaborazione personale)

2.3 Strategie di manutenzione avanzate

Nel contesto industriale moderno, le strategie di manutenzione si sono evolute verso approcci sempre più strutturati e orientati all'ottimizzazione delle prestazioni degli impianti.

Rispetto alle macrocategorie introdotte nel capitolo precedente, basate sulla tipologia di intervento, l'attenzione ora è spostata sulle modalità operative con cui la manutenzione viene pianificata e gestita.

In ambito industriale, le strategie possono essere ricondotte a diversi approcci, tra cui la Time-Based Maintenance (TBM), la Use-Based Maintenance (UBM), la Predictive Maintenance (PdM) e la Total Productive Maintenance (TPM). Esse possono essere affiancate da interventi di tipo migliorativo e opportunistico, contribuendo così a incrementare le prestazioni degli impianti sfruttando al meglio le condizioni operative.

Time-Based Maintenance (TBM)

La TBM si basa sull'esecuzione di interventi manutentivi a intervalli temporali fissi, generalmente definiti sulla base dell'esperienza storica e delle raccomandazioni del costruttore. Si tratta, in sostanza, di una forma strutturata di manutenzione preventiva, che consente di pianificare le attività in modo sistematico e con una certa regolarità.

L'aspetto più rilevante di questa strategia è la facilità con cui può essere applicata. Questo permette non solo di organizzare le attività con maggiore chiarezza, ma anche di pianificare con un buon livello di precisione sia le risorse sia i tempi di intervento. Tuttavia, uno dei limiti più evidenti è la mancanza di adattamento alle reali condizioni dell'impianto: componenti ancora funzionanti possono essere sostituiti prematuramente, mentre altri possono guastarsi prima dell'intervallo previsto.

Use-Based Maintenance (UBM)

L'UBM rappresenta un'evoluzione della TBM, in quanto gli interventi non vengono più pianificati esclusivamente su base temporale, ma in funzione dell'utilizzo effettivo dell'impianto. In questo caso, la programmazione tiene conto di parametri come le ore di funzionamento, il numero di cicli di lavoro o i carichi operativi.

Questo porta a una manutenzione più aderente alle reali condizioni di utilizzo e a gestire le attività in modo più efficiente. Rimane tuttavia un approccio basato su soglie prefissate, che non considera in maniera diretta lo stato di degrado dei componenti.

Predictive Maintenance (PdM)

Tra le strategie più avanzate rientra la Predictive Maintenance (PdM), che si basa sull'analisi dei dati raccolti durante il funzionamento degli impianti. L'obiettivo è individuare segnali di degrado e stimare con maggiore precisione il momento in cui l'intervento diventa necessario.

A differenza delle strategie basate su intervalli, questa consente di intervenire solo quando le condizioni dell'impianto lo richiedono, evitando sia fermi imprevisti sia interventi non necessari. Studi recenti mostrano come l'adozione di strategie predittive possa ridurre i tempi di inattività fino al 20-30% e i costi manutentivi complessivi fino al 10-15% (Anaba et al., 2024).

Va però considerato che l'efficacia della PdM dipende in modo significativo dalla qualità dei dati disponibili e dalla capacità di analizzarli. Ciò comporta la necessità di strumenti adeguati e competenze specifiche, ma permette, se implementata correttamente, un miglioramento rilevante delle prestazioni operative.

Total Productive Maintenance (TPM)

La TPM si distingue dagli altri approcci in quanto non si limita alla pianificazione degli interventi, ma coinvolge l'intera organizzazione aziendale. L'obiettivo della TPM è massimizzare l'efficienza degli impianti attraverso il coinvolgimento diretto degli operatori e l'integrazione tra manutenzione e produzione.

Uno degli elementi caratterizzanti della TPM è la manutenzione svolta direttamente dagli operatori. In questo caso, gli stessi partecipano alle attività di base, come la pulizia, l'ispezione e la segnalazione delle anomalie.

Questo tipo di coinvolgimento permette di individuare eventuali problemi già nelle fasi iniziali e, di conseguenza, di ridurre la probabilità che si verifichino guasti improvvisi.

La TPM è fortemente legata al miglioramento continuo e all'ottimizzazione dell'OEE, contribuendo a ridurre le perdite e ad aumentare l'efficienza complessiva del sistema produttivo (Werbińska-Wojciechowska e Winiarska, 2023).

Manutenzione migliorativa e opportunistica

Tra gli approcci più avanzati vi sono la manutenzione migliorativa e quella opportunistica; sono strategie complementari rispetto alle modalità tradizionali di gestione degli interventi.

La manutenzione migliorativa introduce modifiche tecniche o organizzative con l'obiettivo di migliorare nel tempo le prestazioni degli impianti. A differenza degli interventi tradizionali, che si limitano principalmente a ripristinare il funzionamento a seguito di un guasto o un'interruzione, questo approccio interviene sulle cause delle inefficienze, modificando il sistema in modo strutturale.

Essa è così uno strumento di miglioramento continuo: gli interventi contribuiscono a ridurre la probabilità di fermo e a rendere il comportamento dell'impianto stabile e prevedibile, in linea con le metodologie di affidabilità, senza limitarsi alla sola riparazione (Smith, 1993).

La manutenzione opportunistica si basa su una logica diversa.

Effettua interventi aggiuntivi sfruttando fermi già programmati o momenti in cui l'impianto è comunque inattivo. In questo modo è possibile concentrare più attività nello stesso intervallo temporale, limitando le interruzioni e migliorando l'impiego delle risorse manutentive (Jardine e Tsang, 2013).

Questi due metodi, considerati nel loro insieme, si inseriscono in una logica di ottimizzazione intervenendo su aspetti differenti ma complementari. L'approccio migliorativo agisce sulle cause strutturali delle inefficienze di sistema, mentre quello opportunistico consente di sfruttare fermi programmati per organizzare al meglio le manutenzioni.

2.4 Impatto delle strategie sui KPI e sull'efficienza operativa

Le diverse strategie di manutenzione influenzano in modo significativo le prestazioni operative degli impianti industriali. Il loro impatto può e deve essere analizzato

attraverso indicatori quali MTBF, MTTR, disponibilità e OEE, che consentono di valutare in modo sistematico come le politiche manutentive incidano sull'efficienza complessiva del sistema produttivo.

2.4.1 Influenza su MTBF, MTTR, disponibilità e OEE

Le strategie basate sulla pianificazione, come TBM e UBM, influenzano il MTBF attraverso l'esecuzione di interventi a intervalli prefissati, che consentono di contenere l'incidenza delle failure entro margini controllati. Tuttavia, l'assenza di un collegamento diretto con lo stato reale dei componenti rende questo risultato fortemente dipendente dalla correttezza dei parametri di pianificazione.

Per quanto riguarda il MTTR, le strategie basate su pianificazione consentono di organizzare gli interventi programmati, ma non garantiscono una riduzione significativa dei tempi medi di riparazione quando si verificano eventi di inattività non previsti. In queste situazioni, infatti, gli interventi avvengono spesso in condizioni non pianificate.

La mancanza di informazioni preventive rende inoltre più complessa la fase di diagnosi del guasto. Questo porta inevitabilmente a un certo livello di incertezza, che può riflettersi in alcune inefficienze operative.

L'effetto combinato di MTBF e MTTR si traduce nella disponibilità complessiva. Le politiche basate sulla pianificazione introducono fermate programmate, che rendono il funzionamento più prevedibile e semplice da gestire; tuttavia, se applicate con frequenza elevata, possono ridurre il tempo effettivo di operatività.

Le strategie basate sull'analisi dei dati, come la PdM, intervengono invece in modo più diretto su questi indicatori. Attraverso il monitoraggio continuo si individuano i segnali di degrado e si interviene prima che il guasto si verifichi, aumentando di conseguenza il MTBF e riducendo la probabilità di arresti improvvisi (Anaba et al., 2024).

Un ulteriore aspetto da considerare riguarda la pianificazione degli interventi: quando questi vengono organizzati in anticipo e svolti in condizioni più controllate, si può ottenere anche una riduzione del MTTR.

Nel complesso, ciò comporta un aumento della disponibilità, dovuto soprattutto alla riduzione delle interruzioni non pianificate e a una gestione più efficiente dei tempi di intervento.

La TPM agisce contemporaneamente su più indicatori. Intervenendo sulle cause delle inefficienze, contribuisce a rendere il funzionamento dell'impianto più stabile e, allo stesso tempo, a limitare la variabilità dei tempi di intervento. Ne derivano effetti positivi anche sulla disponibilità complessiva del sistema.

L'OEE, che integra disponibilità, prestazioni e qualità, sintetizza questi miglioramenti. Le strategie basate su pianificazione incidono prevalentemente sulla disponibilità, mentre approcci integrati come la TPM influenzano tutte le componenti dell'indicatore, contribuendo a un miglioramento complessivo dell'efficienza del sistema produttivo (Werbińska-Wojciechowska e Winiarska, 2023).

2.4.2 Riduzione dei tempi di fermo

La gestione dei tempi di fermo rappresenta uno degli aspetti più critici, in quanto influisce direttamente sulla continuità operativa e sulla produttività.

Le strategie basate sulla pianificazione consentono di programmare gli interventi, ma non impediscono completamente il verificarsi di arresti imprevisti, che possono comunque manifestarsi in modo discontinuo. Ne deriva così una gestione dei downtime meno efficiente e una maggiore variabilità nelle prestazioni.

Un approccio diverso è rappresentato dalle strategie basate sull'analisi delle condizioni operative, che consentono di anticipare i guasti e di trasformare parte delle interruzioni non pianificate in interventi programmati. In questo modo si riduce la variabilità dei tempi di inattività e si ottiene una gestione del ciclo produttivo più stabile e prevedibile.

Studi recenti evidenziano, a questo proposito, una riduzione dei downtime fino al 20-30% rispetto a strategie non basate sui dati (Anaba et al., 2024).

A questi si affianca la manutenzione opportunistica, che introduce un ulteriore livello di ottimizzazione. Sfruttando fermi già programmati, consente di eseguire interventi aggiuntivi senza generare nuove interruzioni, con un effetto positivo sull'utilizzo del

tempo macchina e, di conseguenza, sull'efficienza operativa complessiva (Jardine e Tsang, 2013).

2.4.3 Ottimizzazione delle prestazioni degli impianti

Le strategie di manutenzione non influenzano solo la gestione dei guasti, ma anche la capacità degli impianti di operare in condizioni stabili e controllate nel tempo.

Le strategie basate su pianificazione garantiscono una certa regolarità operativa, ma non introducono meccanismi di miglioramento continuo. Diverso è il caso delle strategie basate sull'analisi dei dati e sull'integrazione dei processi, che permettono di intervenire direttamente sulle cause delle inefficienze, producendo effetti progressivi sul funzionamento del sistema produttivo.

In questo contesto, la TPM si distingue per un approccio a 360 gradi, che coinvolge sia gli aspetti tecnici sia quelli organizzativi, contribuendo a una riduzione progressiva delle perdite operative.

In modo simile si comporta l'approccio migliorativo, che introduce interventi di natura tecnica e organizzativa con l'obiettivo di aumentare l'affidabilità intrinseca degli impianti. Nel tempo, ciò si traduce in un incremento del MTBF e in una riduzione strutturale della probabilità di guasto, sostenendo così il miglioramento continuo delle prestazioni (Smith, 1993).

Considerate nel loro insieme, le strategie analizzate non devono essere viste come alternative tra loro, ma come elementi tra loro complementari, da adottare in funzione delle specifiche esigenze. La loro integrazione bilancia affidabilità, tempi di intervento ed efficienza complessiva, rendendo la gestione della manutenzione un problema a più criteri.

Dal punto di vista tecnico, l'influenza delle strategie manutentive sulle prestazioni operative può essere ricondotta ai seguenti aspetti:

- Incremento dell'affidabilità del sistema, misurato attraverso l'aumento del MTBF e la riduzione della variabilità dei guasti

- Ottimizzazione dei tempi di intervento, con conseguente riduzione del MTTR e miglioramento della pianificazione delle attività manutentive
- Miglioramento della disponibilità, grazie alla diminuzione dei fermi non programmati e a una gestione più efficiente degli interventi
- Aumento della stabilità operativa, attraverso la riduzione delle fluttuazioni nei parametri di processo
- Riduzione delle perdite operative, con effetti diretti sulle prestazioni complessive del sistema produttivo

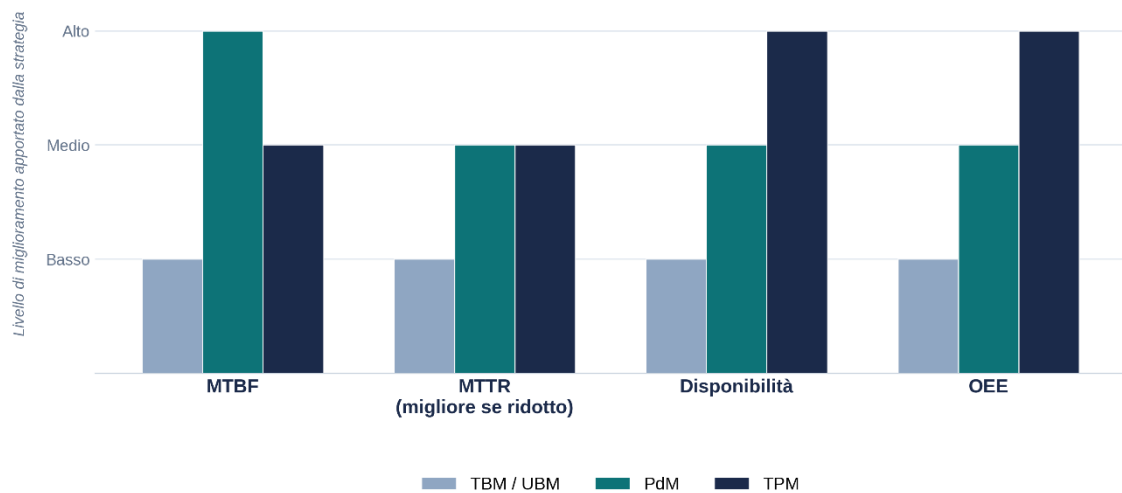


Figura 3: miglioramento apportato dalle strategie di manutenzione sui KPI operativi (elaborazione personale)

Tabella 1: impatto strategie manutenzione sui KPI operativi

Strategia	MTBF	MTTR	Disponibilità	OEE
TBM / UBM	Incremento limitato, dipendente dagli intervalli	Variabile, legato ai guasti imprevisti	Influenzata dai fermi programmati	Impatto limitato, soprattutto sulla disponibilità
PdM	Incremento significativo grazie alla prevenzione dei guasti	Riduzione dovuta a interventi pianificati	Aumento grazie alla riduzione dei fermi non programmati	Miglioramento indiretto legato alla maggiore stabilità operativa
TPM	Incremento della stabilità e riduzione delle cause di guasto	Riduzione grazie al coinvolgimento operativo	Aumento complessivo per la riduzione delle perdite	Miglioramento globale su disponibilità, prestazioni e qualità
Manutenzione migliorativa	Incremento strutturale nel lungo periodo	—	Incremento progressivo	Miglioramento nel tempo grazie all'ottimizzazione del sistema
Manutenzione opportunistica	—	Riduzione tramite aggregazione degli interventi	Aumento grazie alla riduzione del numero di fermi	Impatto limitato, legato alla gestione dei tempi

2.5 Manutenzione sostenibile

Garantire il funzionamento degli impianti è solo una parte del problema. La domanda che si pone la manutenzione sostenibile è un'altra e più complessa: come poterlo fare riducendo al minimo il consumo di risorse e gli impatti ambientali?

Le attività manutentive possono infatti influenzare simultaneamente più aspetti: la dimensione economica, ambientale e sociale del sistema produttivo, rendendo così la

manutenzione qualcosa di più di una semplice funzione tecnica, come confermato anche da evidenze empiriche raccolte in contesti industriali reali (Holgado et al., 2020).

2.5.1 Definizione e principi

La manutenzione sostenibile può essere definita come l'insieme di attività finalizzate a garantire l'efficienza e la continuità operativa degli impianti minimizzando al contempo il consumo di materiali, l'energia impiegata e la produzione di rifiuti. Questo approccio si basa su una visione integrata del sistema produttivo, in cui la gestione delle attività manutentive tiene conto dell'intero ciclo di vita degli asset.

I principi alla base di questo approccio includono:

- Riduzione degli interventi non necessari
- Prolungamento della vita utile dei componenti
- Minimizzazione degli scarti e dei rifiuti
- Ottimizzazione delle condizioni operative

In questo senso, la manutenzione sostenibile si configura come una naturale estensione delle strategie moderne, integrando aspetti tecnici e ambientali nella gestione degli impianti (Franciosi et al., 2020).

2.5.2 Integrazione con la strategia aziendale

Affinché la manutenzione possa contribuire in modo efficace alla sostenibilità, deve essere integrata con le strategie aziendali, in particolare con quelle relative all'efficienza produttiva e alla gestione delle risorse.

Le strategie manutentive non operano in modo isolato, ma influenzano direttamente:

- La continuità della produzione
- Il consumo energetico
- L'utilizzo delle materie prime

Ad esempio, in un sistema produttivo altamente automatizzato, una gestione non ottimale della manutenzione può generare fermi macchina improvvisi che comportano:

- Riavvii energivori

- Scarti di produzione
- Inefficienza nei flussi operativi

Al contrario, l'adozione di strategie come la PdM consente di pianificare gli interventi in momenti controllati, riducendo l'impatto complessivo sul sistema produttivo (Jasiulewicz-Kaczmarek, 2024).

2.5.3 Riduzione di scarti, downtime e consumi energetici

Uno degli aspetti principali della manutenzione sostenibile riguarda la riduzione degli sprechi operativi, che si manifestano sotto forma di scarti, tempi di fermo e consumi energetici non ottimali.

Dal punto di vista pratico, un impianto non mantenuto correttamente tende a lavorare fuori dalle condizioni ottimali, generare prodotti difettosi e aumentare il consumo energetico.

Strategie avanzate consentono di intervenire prima che tali condizioni si possano tradurre in inefficienze:

- La PdM riduce i guasti e i downtime
- La manutenzione migliorativa introduce soluzioni più efficienti
- La TPM riduce le perdite legate all'operatività

Questi effetti si traducono concretamente in una riduzione degli sprechi operativi e in un miglioramento dell'efficienza del sistema (Franciosi et al., 2020).

Un esempio concreto di questo tipo di risultati arriva da uno studio condotto su un'azienda industriale che ha digitalizzato la propria gestione manutentiva. Dopo l'introduzione di strumenti digitali per il monitoraggio e la pianificazione degli interventi, l'azienda ha registrato una maggiore affidabilità dei macchinari, una riduzione dei consumi e una minore quantità di scarti, con un miglioramento dell'OEE (Bouyahrouzi et al., 2022).

2.5.4 Monitoraggio energetico e ottimizzazione risorse

Il monitoraggio continuo rappresenta uno degli strumenti più efficaci per implementare una manutenzione sostenibile.

Attraverso l'analisi dei dati operativi si identificano deviazioni nei parametri energetici, si rivelano condizioni operative non ottimali e si ottimizza il funzionamento degli impianti.

Un esempio significativo è rappresentato dai sistemi ad aria compressa:

- Perdite o inefficienze possono portare a sprechi rilevanti di energia, stimati fino al 20-30 % in alcuni casi
- Un monitoraggio accurato consente di individuare tali perdite e intervenire tempestivamente

Strategie basate sui dati, come la PdM, permettono quindi di migliorare l'efficienza energetica attraverso una gestione più precisa degli impianti, riducendo sprechi e migliorando le prestazioni operative (Werbińska-Wojciechowska e Winiarska, 2023).

2.5.5 Life Cycle Assessment (LCA)

Per valutare nel profondo l'impatto delle strategie manutentive, è necessario considerare l'intero ciclo di vita degli impianti.

Il Life Cycle Assessment (LCA) è una metodologia che consente di analizzare in modo sistematico gli impatti ambientali associati a un prodotto o a un sistema lungo tutto il suo ciclo di vita, dalla fase di produzione alla dismissione.

In questo senso, l'LCA risulta particolarmente utile, in quanto consente di valutare gli effetti ambientali non solo durante il funzionamento degli impianti, ma anche in relazione alle attività manutentive.

Attraverso l'LCA è possibile prendere in considerazione diversi aspetti, come il consumo di materiali come ricambi e componenti, l'energia richiesta durante il funzionamento e gli impatti legati alle attività manutentive. Questo consente di andare oltre una valutazione limitata alla sola fase operativa e di considerare in modo più completo le conseguenze delle scelte manutentive.

In quest'ottica, la manutenzione non viene più valutata in termini di costi o frequenza degli interventi, ma anche rispetto ad un eccessivo utilizzo delle risorse e alla produzione di rifiuti. Ad esempio, interventi più frequenti comportano un maggior consumo di

materiali con relativi scarti, mentre interventi più mirati permettono di ridurre l'impatto ambientale, grazie alla conoscenza delle condizioni effettive dei componenti.

Di conseguenza, strategie che favoriscono un aumento del MTBF e limitano gli interventi non necessari risultano più sostenibili nel lungo periodo, poiché consentono di ottimizzare l'uso delle risorse e ridurre gli sprechi lungo il ciclo di vita degli impianti (Franciosi et al., 2020).

Nel complesso, integrare l'LCA nella gestione della manutenzione consente di prendere decisioni più complete, in cui gli aspetti economici e operativi vengono considerati insieme agli impatti ambientali associati. Questo approccio rafforza il ruolo della manutenzione come elemento chiave non solo per l'efficienza degli impianti, ma anche per la sostenibilità dei sistemi produttivi nel lungo periodo.



Figura 4: inquadramento della manutenzione sostenibile nel ciclo di vita del sistema (elaborazione personale)

La figura mostra le principali fasi del ciclo di vita del sistema, dalla produzione all'utilizzo operativo fino al fine vita, passando per la fase di utilizzo operativo. In quest'ultima si collocano le attività di manutenzione sostenibile, che influenzano sia le prestazioni del sistema sia gli impatti ambientali complessivi.

Lo schema aiuta quindi a comprendere che la manutenzione non è un elemento separato, ma parte integrante del ciclo di vita, in linea con l'approccio del Life Cycle Assessment.

CAPITOLO 3

Valutazione dell'impatto delle strategie manutentive sulla sostenibilità

3.1 Obiettivo del capitolo

Il presente capitolo ha l'obiettivo di analizzare qualitativamente l'impatto delle strategie manutentive sulla sostenibilità dei sistemi produttivi. Ora il focus è spostato dalla descrizione delle strategie e dei KPI al loro utilizzo per interpretare il comportamento degli impianti in contesti reali.

L'analisi si concentra sia sugli aspetti legati all'efficienza operativa, sia sulla sostenibilità, incentrandosi principalmente su quest'ultima, facendo emergere che le strategie odierne non sempre migliorano entrambi gli aspetti allo stesso tempo.

Infine, viene adottata una prospettiva basata sul ciclo di vita, in linea con l'approccio del Life Cycle Assessment, potendo così valutare in modo più completo gli impatti delle strategie manutentive non solo durante il funzionamento, ma lungo l'intero ciclo di vita degli impianti stessi.

I casi analizzati sono utili per mettere a confronto approcci diversi e di poterne così evidenziare gli effetti in termini di sostenibilità.

Infine, il capitolo si chiude con una riflessione critica, volta a mettere in luce i limiti delle diverse strategie e a capire in quali condizioni ciascun approccio possa risultare più sostenibile.

3.2 Caso Toyota: TPM e sostenibilità

Il caso Toyota rappresenta un riferimento consolidato nello studio delle strategie manutentive applicate ai sistemi produttivi, in particolare per quanto riguarda l'impiego della TPM. L'importanza ora è rivolta alle implicazioni in termini di utilizzo delle risorse e di gestione delle inefficienze dovute a questa strategia.

In particolare, l'analisi considera qualitativamente gli effetti del TPM sul comportamento del sistema nel tempo, con riferimento alla relazione tra le condizioni operative, la stabilità del processo e il consumo effettivo delle risorse.

In questo modo, la manutenzione non viene più considerata solo come un insieme di attività tecniche, ma anche come un elemento che incide direttamente sulla sostenibilità.

3.2.1 Stabilità operativa e implicazioni sulla sostenibilità

Nel caso Toyota, l'adozione della TPM consente di intervenire sulle inefficienze operative agendo direttamente sulla stabilità del processo produttivo. In questo contesto, la gestione delle condizioni operative assume un ruolo centrale, in quanto influisce sull'utilizzo effettivo delle risorse durante il funzionamento.

La presenza di variabilità operativa introduce condizioni transitorie che allontanano il sistema dal regime ottimale. Riavvii frequenti, regolazioni e deviazioni dai parametri di processo comportano un aumento dei consumi specifici e una minore efficienza nell'impiego dei materiali, generando perdite che non sempre sono quantificabili immediatamente.

Alla diminuzione di questi fenomeni consegue una stabilizzazione delle condizioni operative, consentendo di limitare le inefficienze legate al funzionamento non stazionario. In questa prospettiva, il contributo della TPM alla sostenibilità non è legato soltanto al miglioramento delle prestazioni operative, ma soprattutto alla capacità di contenere le dispersioni di risorse dovute alla variabilità dei processi.

Un secondo aspetto, distinto dagli effetti sul funzionamento del sistema, riguarda la gestione degli interventi manutentivi. In presenza di instabilità operativa, la frequenza degli interventi correttivi tende ad aumentare, con un conseguente uso meno efficiente di componenti e risorse tecniche. Al contrario, condizioni più stabili portano ad una gestione più controllata degli interventi, riducendo la necessità di sostituzioni non pianificate.

Alla luce di quanto osservato, la TPM mostra come la sostenibilità sia influenzata dalla capacità di ridurre le inefficienze strutturali del processo produttivo. Questo legame tra pratiche manutentive e sostenibilità è stato analizzato anche in relazione agli effetti dei modelli produttivi Toyota sulle performance complessive (Bergenwall et al., 2012).

3.2.2 Impatto sull'utilizzo delle risorse in ottica LCA

Nel caso Toyota, l'analisi della TPM può essere estesa considerando gli effetti lungo il ciclo di vita degli impianti, adottando una prospettiva coerente con l'LCA. In questo contesto, la valutazione della sostenibilità non si limita alla riduzione delle inefficienze operative, ma riguarda la capacità del sistema di limitare il consumo complessivo di risorse nel tempo.

La stabilità operativa contribuisce a ridurre forme di spreco che, pur non essendo sempre direttamente quantificate, incidono in modo significativo sul bilancio complessivo. Tali sprechi possono essere accostati al concetto di muda, inteso come l'insieme delle attività che non generano valore ma utilizzano risorse. Nel caso dei sistemi produttivi, queste si manifestano, ad esempio, attraverso funzionamenti non stazionari, riavvii frequenti e deviazioni dei parametri, che determinano un consumo energetico superiore senza un corrispondente incremento della produttività.

Tuttavia, la riduzione di queste forme di spreco non implica necessariamente una minimizzazione dell'impatto lungo tutto il ciclo di vita. La diminuzione degli interventi manutentivi comporta infatti un minore utilizzo di componenti e materiali, ma può portare, in alcune condizioni, a un utilizzo più prolungato degli elementi, con possibili effetti sul rendimento nelle fasi avanzate di esercizio.

Da questo punto di vista emerge un aspetto critico: un sistema stabile può risultare efficiente nel breve periodo, ma non necessariamente ottimale lungo l'intero ciclo di vita. Mantenere componenti in condizioni operative non adeguate può infatti generare inefficienze energetiche, annullando così i benefici legati alla riduzione delle sostituzioni nel lungo periodo.

La TPM inoltre interviene principalmente nella fase operativa del sistema; pertanto, gli impatti associati alla produzione e al fine vita dei componenti variano in modo limitato. Di conseguenza, la sostenibilità complessiva dipende dalla capacità di bilanciare la durata degli elementi con le condizioni di funzionamento, evitando sia sostituzioni premature sia utilizzi inefficaci.

Nel complesso, l'analisi evidenzia come il contributo della TPM alla sostenibilità debba essere valutato in termini di riduzione del muda operativo, ma anche in relazione agli effetti che tale riduzione genera lungo l'intero ciclo di vita. Questo approccio consente di superare una visione puramente prestazionale della manutenzione, introducendo una valutazione più articolata del rapporto tra efficienza e utilizzo delle risorse (Franciosi et al., 2020).

Tabella 2 : Effetti TPM

Aspetto analizzato	KPI coinvolti	Effetto operativo	Impatto sulla sostenibilità
Stabilità operativa	Disponibilità ↑	Riduzione delle interruzioni del sistema	Minore consumo energetico dovuto a funzionamento stabile
Riduzione della variabilità	OEE ↑ (componente prestazioni)	Maggiore regolarità del processo produttivo	Riduzione degli sprechi legati a funzionamenti non ottimali
Diminuzione guasti	MTBF ↑	Maggiore intervallo tra i guasti	Minore utilizzo di componenti e ricambi
Gestione degli interventi	MTTR ↓	Riduzione dei tempi di riparazione	Riduzione dei tempi di fermo e degli scarti
Limite dell'approccio	—	Effetti concentrati sulla prestazione operativa	Impatto limitato nelle altre fasi del ciclo di vita

3.3 Caso Renault: PdM e sostenibilità data-driven

Nel caso Renault, ci si concentra sull'analisi della strategia qui implementata, cioè la PdM. A differenza dell'approccio nel caso Toyota, il focus si sposta dalla stabilità del processo alla capacità di anticipare il comportamento degli impianti attraverso il monitoraggio continuo delle condizioni operative.

Qui, la sostenibilità non è legata principalmente alla riduzione delle inefficienze sistemiche, ma alla possibilità di ottimizzare il momento in cui avviene l'intervento, eseguendolo solo quando effettivamente necessario. Questa strategia consente di ridurre gli interventi non necessari al corretto funzionamento dell'impianto e di limitare l'uso di materiali e risorse tecniche, introducendo una logica più selettiva nella gestione della manutenzione.

La PdM trasforma la manutenzione da attività pianificata su base temporale a processo decisionale basato sulle condizioni effettive del sistema. Tale trasformazione ha implicazioni dirette sull'utilizzo delle risorse, consente infatti di evitare sia sostituzioni premature sia interventi tardivi, migliorando l'equilibrio tra affidabilità e consumo di materiali.

Questo approccio, però, introduce anche un diverso livello di complessità. L'efficacia di tale strategia dipende infatti dalla qualità dei dati disponibili, dall'affidabilità dei sistemi di monitoraggio e dalla capacità di interpretare le informazioni raccolte. La sostenibilità del modello non è quindi determinata unicamente dai risultati operativi, ma anche dalle risorse necessarie per implementare e gestire le tecnologie impiegate.

In sintesi, il caso Renault evidenzia un modello in cui la sostenibilità è legata all'ottimizzazione degli interventi attraverso i dati, ma dipende al tempo stesso dall'equilibrio tra benefici operativi e impatti associati all'infrastruttura tecnologica (Fernandes et al., 2021).

3.3.1 Gestione delle condizioni operative e degli interventi

Nel caso Renault, a partire dalle informazioni ottenute grazie alla PdM, è possibile stimare l'evoluzione del degrado e supportare la decisione relativa al momento

dell'intervento, introducendo una gestione della manutenzione fortemente dipendente dall'interpretazione dei dati.

Ora, la natura delle inefficienze si modifica rispetto agli approcci tradizionali. Non si tratta più esclusivamente di perdite legate al funzionamento del sistema, ma di inefficienze dovute alla qualità della valutazione effettuata sullo stato effettivo dei componenti. La decisione manutentiva, anche se basata su dati reali, non è infatti priva di incertezza, poiché dipende dall'accuratezza dei modelli di analisi, dalla completezza delle informazioni disponibili e dalla variabilità intrinseca del comportamento dei materiali.

Di conseguenza, lo spreco non si manifesta solamente a livello operativo, ma può emergere nella fase decisionale. Interventi anticipati rispetto alla reale necessità comportano un utilizzo non necessario di risorse, mentre interventi tardivi possono portare a condizioni di funzionamento degradate, con effetti negativi sull'efficienza del sistema. In entrambi i casi si introduce una forma di dispersione che non dipende dal processo produttivo in sé, ma da quanto è distante lo stato reale rispetto alla sua interpretazione, tipica dei contesti in cui la decisione manutentiva è basata su modelli predittivi.

Questa dinamica può essere ricondotta a una forma di muda di natura informativa o decisionale, in cui l'utilizzo non ottimale delle risorse deriva da una valutazione non allineata alle condizioni effettive del sistema. Rispetto a quanto osservato nel caso Toyota, lo spreco non è quindi legato alla variabilità del processo produttivo, ma alla gestione dell'informazione su cui si basa l'intervento.

Un ulteriore elemento riguarda la sensibilità del sistema alla qualità dei dati. Errori nella raccolta o nell'elaborazione delle informazioni, infatti, compromettono l'efficacia della decisione manutentiva, amplificando le inefficienze anziché ridurle. In questo senso, la sostenibilità dell'approccio non dipende unicamente dal comportamento operativo del sistema, ma anche dall'affidabilità del processo informativo che guida le decisioni.

In definitiva, il caso Renault evidenzia come la PdM introduca una nuova dimensione nella gestione della sostenibilità, in cui il controllo delle inefficienze dipende non solo

dalle condizioni fisiche del sistema, ma dalla capacità di interpretare correttamente i dati e tradurli in decisioni coerenti (Fernandes et al., 2021).

3.3.2 Impatto sull'utilizzo delle risorse in ottica LCA

L'analisi della PdM in ottica di LCA evidenzia come gli effetti sulla sostenibilità non siano limitati alla fase operativa, ma coinvolgano l'intero sistema di supporto necessario alla gestione dei dati.

L'utilizzo di sensori, sistemi di acquisizione e piattaforme di analisi introduce infatti un consumo aggiuntivo di risorse che non è direttamente legato al funzionamento dell'impianto. Tali elementi comportano un impiego continuo di energia, oltre alla necessità di componenti hardware e infrastrutture digitali, che contribuiscono all'impatto ambientale complessivo durante l'intero ciclo di vita.

In questo contesto emerge un primo elemento di discontinuità rispetto al caso Toyota. Mentre l'approccio basato sul TPM consente di ridurre lo spreco operativo mantenendo stabile il sistema, la PdM introduce una struttura informativa che, pur migliorando la gestione degli interventi, comporta un costo aggiuntivo in termini di risorse.

Un secondo aspetto riguarda l'effetto delle decisioni manutentive sul comportamento del sistema nel tempo. La riduzione degli interventi non necessari contribuisce a limitare il consumo di materiali, ma non garantisce automaticamente una riduzione degli impatti. La presenza di errore nella stima delle condizioni operative, già evidenziata, può infatti portare a scelte che, nel lungo periodo, risultano non ottimali in termini di efficienza energetica o durata dei componenti.

Di conseguenza, la valutazione della sostenibilità deve tenere conto di un equilibrio tra benefici e costi. Da un lato, la PdM consente di ridurre forme di muda legate alla decisione, evitando interventi non giustificati; dall'altro lato, però, introduce nuove fonti di consumo legate alla gestione dell'informazione e alla tecnologia utilizzata per la raccolta dati. C'è poi un rischio che spesso passa in secondo piano: molte aziende che intraprendono questo percorso non arrivano mai a sfruttarlo fino in fondo, restando

bloccate a metà per limiti organizzativi o di competenze, con i costi dell'infrastruttura già sostenuti ma i benefici pieni mai realizzati (Hoffmann e Lasch, 2025).

Un ulteriore elemento riguarda la distribuzione degli impatti lungo il ciclo di vita. Gli effetti positivi della PdM si concentrano principalmente nella fase operativa, mentre gli impatti legati alla produzione e allo smaltimento dei dispositivi di monitoraggio rimangono invariati o possono aumentare. Questo aspetto rende necessario considerare la sostenibilità in modo più ampio, evitando di limitare la valutazione ai soli benefici operativi.

Quindi infine, il caso Renault, mostra come l'adozione della PdM non comporti un automatico miglioramento della sostenibilità, ma richieda una valutazione più complicata e dettagliata che consideri sia l'ottimizzazione degli interventi sia gli impatti dovuti alle tecnologie impiegate per tali scopi. Questa strategia evidenzia come, in un'ottica di ciclo di vita, l'efficacia delle strategie manutentive dipenda dalla capacità di bilanciare complessità, utilizzo delle risorse e benefici operativi (Fernandes et al., 2021).

Tabella 3 : Effetti PdM

Aspetto analizzato	KPI coinvolti	Effetto operativo	Impatto sulla sostenibilità
Monitoraggio continuo	MTBF ↑	Migliore previsione dei guasti	Riduzione degli interventi non necessari
Interventi mirati	MTTR ↓	Migliore pianificazione della manutenzione	Ottimizzazione dell'utilizzo di materiali e risorse
Gestione dei dati	Disponibilità ↑	Riduzione dei fermi macchina non programmati	Maggiore efficienza operativa del sistema
Ottimizzazione decisionale	OEE ↑	Miglior coordinamento tra manutenzione e produzione	Riduzione degli sprechi legati a interventi anticipati/tardivi
Limite dell'approccio	—	Dipendenza da qualità dei dati e modelli	Consumo energetico e materiale legato all'infrastruttura digitale

3.4 Discussione critica delle strategie in ottica di sostenibilità

Nel complesso, l'analisi dei casi Toyota e Renault mostra in modo abbastanza chiaro come le strategie manutentive incidano sulla sostenibilità secondo logiche molto diverse, che non possono essere interpretate limitandosi agli indicatori di performance operativa.

Gli indicatori introdotti nei capitoli precedenti restano fondamentali per comprendere il comportamento del sistema, ma, da soli, non sono sufficienti a rappresentare la sostenibilità lungo il ciclo di vita. Migliorare l'affidabilità, la continuità operativa o la gestione degli interventi non implica la riduzione dell'impatto complessivo, soprattutto quando entrano in gioco fattori come il consumo di risorse e la complessità del sistema.

Nel caso di Toyota, l'approccio basato sulla TPM evidenzia come la sostenibilità possa essere migliorata attraverso il controllo della variabilità operativa. La riduzione del muda

operativo limita le dispersioni energetiche e l'uso inefficiente dei materiali, mantenendo il sistema in condizioni di funzionamento più stabili. In questo senso, i KPI diventano una misura indiretta dell'efficienza nell'utilizzo delle risorse. Non è un effetto isolato al settore automotive: anche in un impianto farmaceutico, dopo l'introduzione di un programma strutturato di TPM, si è registrata una riduzione del 70% degli interventi di manutenzione correttiva e un aumento del 20% dell'OEE, segno che il legame tra stabilità operativa e riduzione degli sprechi vale al di là del singolo contesto industriale (Shannon et al., 2023).

Tuttavia, questa visione presenta un limite importante: il miglioramento è concentrato quasi del tutto nella fase operativa. Il TPM non modifica in modo significativo gli impatti legati alla produzione o al fine vita dei componenti e di conseguenza la sua efficacia in termini di sostenibilità dipende molto dal contesto. In altre parole, un sistema può essere estremamente efficiente durante il funzionamento, ma non necessariamente sostenibile nel suo insieme.

Il caso di Renault mette in luce un'interpretazione diversa. Qui la sostenibilità non passa principalmente dalla stabilità del processo, ma dalla capacità di prendere decisioni manutentive più coerenti con lo stato reale dei componenti. La PdM consente di ridurre il muda decisionale, evitando interventi inutili o non ottimali e migliorando l'uso delle risorse.

Anche qui il principio si ripete altrove: in un'operazione mineraria, un sistema di PdM basato su intelligenza artificiale ha ridotto dell'8% i costi di manutenzione e aumentato del 10% la disponibilità degli impianti (Chambi et al., 2025).

Allo stesso tempo però, introduce un problema che, a mio avviso, è di fondamentale importanza: la dipendenza dalla tecnologia. Sensori, sistemi di acquisizione dati e piattaforme di analisi non sono esterni al concetto di sostenibilità. Richiedono energia, materiali e gestione, generando un impatto che non è direttamente visibile nel funzionamento dell'impianto.

Questo porta a un punto cruciale: la PdM comporta un miglioramento reale, ma ad un costo. E soprattutto, non è detto che il bilancio complessivo sia positivo se si considera l'intero ciclo di vita.



Figura 5: confronto tra muda operativo (Toyota) e muda decisionale (Renault) (elaborazione personale)

Guardando i due approcci insieme, emerge quindi un aspetto chiaro: la sostenibilità non è il risultato dell'adozione di una strategia più avanzata, ma il risultato di un equilibrio tra benefici operativi e risorse impiegate per ottenerli.

Così si collocano anche strategie meno complesse, come la TBM e l'UBM, le quali non puntano a massimizzare le prestazioni, ma a mantenere un equilibrio tra semplicità e funzionalità. Anche la letteratura più recente sottolinea come l'adozione di sensoristica intelligente e modelli avanzati, pur offrendo benefici, richieda competenze, infrastrutture e investimenti non sempre giustificati in contesti a basso rischio o bassa criticità (Pech et al., 2021). Ed è proprio questo il punto interessante: in sistemi caratterizzati da una bassa complessità o da dei costi di fermo limitati, la semplicità diventa un vantaggio per la sostenibilità.

Una riduzione della complessità implica una riduzione delle risorse necessarie per gestire il sistema. Nessuna infrastruttura digitale avanzata, componenti in minor numero e consumo energetico più basso. In questi casi, il fatto di non avere la soluzione

tecnologicamente più avanzata non rappresenta necessariamente uno svantaggio, ma può anzi portare a un impatto complessivo più contenuto.

Da qui emerge una considerazione che, personalmente, ritengo di fondamentale importanza: il miglioramento dei KPI non dovrebbe essere l'unico criterio di scelta della strategia manutentiva. Se l'obiettivo è la sostenibilità, è necessario considerare anche il costo delle soluzioni, in termini di risorse, complessità e tempo.

La vera sfida non è scegliere l'approccio più avanzato, ma quello più coerente con l'impianto in cui viene applicato. La sostenibilità non è quindi una proprietà esclusiva della tecnologia, ma anche il risultato di una decisione manutentiva consapevole, in cui prestazioni, complessità e uso delle risorse vengono bilanciati in modo critico.

Conclusioni

Nel corso di questo lavoro è emerso come la manutenzione non sia più una semplice attività di supporto, ma una parte centrale della gestione degli impianti.

Non si tratta più soltanto di evitare guasti, ma di influenzare direttamente il modo in cui gli impianti operano e utilizzano le risorse.

Analizzando le diverse strategie, sembra naturale pensare che soluzioni più avanzate portino automaticamente a risultati migliori. In realtà, andando più a fondo, questa idea si dimostra solo parzialmente vera.

Il caso Toyota, ad esempio, mostra quanto la stabilità operativa possa incidere sul consumo di risorse. Ridurre la variabilità, evitare riavvii continui e mantenere condizioni di funzionamento costanti porta a un sistema più efficiente, in cui gli sprechi si riducono in modo quasi “naturale”.

Allo stesso tempo, questo tipo di miglioramento resta concentrato principalmente nella fase operativa. Il sistema funziona meglio, è più stabile, ma questo non significa automaticamente che sia ottimale considerando tutto il ciclo di vita.

Il caso Renault porta invece in un'altra direzione. Qui il punto è capire meglio quando intervenire. La manutenzione diventa una questione di decisione, appoggiata dai dati e dalle informazioni disponibili.

Questo permette di evitare interventi inutili, ma introduce un'altra complessità: le decisioni non sono perfette. Anche con modelli predittivi, resta sempre un discostamento tra lo stato reale del sistema e la sua interpretazione. È proprio in questa distanza che può nascere una nuova forma di inefficienza.

Inoltre, tutta la struttura che rende possibile questo approccio richiede molte risorse. Energia, componenti e gestione, elementi che non sono neutri dal punto di vista sostenibile.

Mettendo insieme questi due casi, la cosa che colpisce di più è che la sostenibilità non dipende tanto da quanto una strategia è avanzata, ma da quanto è adatta al contesto. Strategie più complesse migliorano di molto le prestazioni, ma non sempre portano a un bilancio complessivo migliore. In alcuni casi, soluzioni più semplici risultano più sostenibili proprio perché richiedono meno risorse e meno struttura.

Alla fine, il punto non è scegliere la strategia “migliore in senso assoluto”.

È capire quale strategia ha senso utilizzare in quel determinato impianto, in quelle condizioni, con quelle risorse.

Anche i KPI, centrali nei primi capitoli, hanno un limite: aiutano nella lettura del comportamento degli impianti, ma non bastano a descrivere la sostenibilità.

La conclusione a cui si arriva è: migliorare i KPI non riduce automaticamente l’impatto ambientale.

La manutenzione diventa così una scelta gestionale oltre che tecnica. Una scelta di bilancio tra prestazioni, complessità e uso delle risorse.

In questo equilibrio si gioca la sostenibilità dei sistemi produttivi.

Bibliografia

- Anaba D.C., Kess-Momoh A.J., Ayodeji S.A., 2024, Innovative maintenance strategies for industrial equipment, *Open Access Research Journal of Science and Technology*, vol. 11, n. 2, pp. 29–37.
- Bergenwall A.L., Chen C., White R.E., 2012, TPS's process design in American automotive plants and its effects on the triple bottom line and sustainability, *International Journal of Production Economics*, vol. 140, n. 1, pp. 374–384.
- CEN, 2017, Maintenance – Maintenance terminology (EN 13306:2017), European Committee for Standardization.
- Chambi N., Sanga C., Ortiz J., Sanga A., Sanga P., Manrique R., Lu-Chang-Say J., 2025, Predictive Maintenance in Underground Mining Equipment Using Artificial Intelligence, *Eng*, vol. 6, n. 10, art. 261.
- El kihel Y., El kihel A., Bouyahrouzi E.M., 2022, Contribution of Maintenance 4.0 in Sustainable Development with an Industrial Case Study, *Sustainability*, vol. 14, n. 17, art. 11090.
- Fernandes J., Reis J., Melão N., Teixeira L., Amorim M., 2021, The role of Industry 4.0 and BPMN in the arise of condition-based and predictive maintenance: a case study in the automotive industry. *Applied Sciences*, vol. 11, n. 8, art. 3438.
- Franciosi C., Voisin A., Miranda S., Riemma S., lung B., 2020, Measuring maintenance impacts on sustainability of manufacturing industries, *Journal of Cleaner Production*, vol. 259, art. 120831.
- Hoffmann M.A., Lasch R., 2025, Unlocking the Potential of Predictive Maintenance for Intelligent Manufacturing: a Case Study on Potentials, Barriers, and Critical Success Factors, *Schmalenbach Journal of Business Research*, vol. 77, pp. 27-55.
- Holgado M., Macchi M., Evans S., 2020, Exploring the impacts and contributions of maintenance function for sustainable manufacturing, *International Journal of Production Research*, vol. 58, n. 15, pp. 1–19.
- Jardine A.K.S., Tsang A.H.C., 2013, *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications*, CRC Press.
- Jasiulewicz-Kaczmarek M., 2024, Maintenance 4.0 technologies for sustainable manufacturing, *Applied Sciences*, vol. 14, n. 16, art. 7360.
- Pech M., Vrchota J., Bednář J., 2021, Predictive Maintenance and Intelligent Sensors in Smart Factory: Review, *Sensors*, vol. 21, n. 4, art. 1470.
- Shannon N., Trubetskaya A., Iqbal J., McDermott O., 2023, A total productive maintenance & reliability framework for an active pharmaceutical ingredient plant utilising design for Lean Six Sigma, *Heliyon*, vol. 9, n.10, art. e20516.
- Smith A.M., 1993, *Reliability-Centered Maintenance*, McGraw-Hill.

- Werbińska-Wojciechowska S., Winiarska K., 2023, Maintenance performance in the age of Industry 4.0, *Sensors*, vol. 23, n. 3, art. 1409.