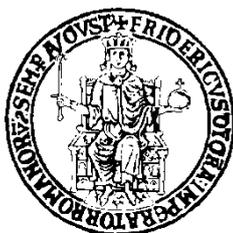


Università degli Studi di Napoli “Federico II”



SCUOLA DI DOTTORATO

in

TECNOLOGIE E SISTEMI DI PRODUZIONE

Ciclo XXVIII – triennio accademico 2013/2016

Dipartimento di Ingegneria Chimica dei Materiali e della Produzione
Industriale

L'importanza del fattore umano e della manutenzione nel *Safety Management System*: dall'approccio *risk based* all'industria 4.0

COORDINATORE

Ch.mo Prof. ing. L. Carrino

TUTOR

Ch.mo Prof. ing. L.C. Santillo

CANDIDATO

ing. Marianna Madonna

ANNO ACCADEMICO 2015 – 2016

*A Lara, che mi ha
fatto scoprire cosa
significa essere
Mamma*

RINGRAZIAMENTI

I miei ringraziamenti vanno in primis alla Prof.ssa ing. L.C. Santillo, per avermi dato la possibilità di intraprendere questo percorso di ricerca che mi vede accresciuta sia in termini professionali che umani. Frequentare il Suo Dipartimento mi ha dato anche l'opportunità di confrontarmi con ingegneri brillanti quali, Teresa Murino, Guido Guizzi, Mosè Gallo, Pino Converso e Mario Di Nardo.

Proprio a Mario, collega ed amico, va un grazie speciale per avermi "sopportato" e "supportato" nella stesura del presente lavoro.

Infine, ma non per ultimi, ringrazio i miei familiari e Davide, che insieme a Lara oggi costituisce la mia nuova famiglia, per il sostegno che mi danno e per il tempo che gli ho sottratto per i miei impegni di studio.

Grazie!

Marianna

INDICE

INTRODUZIONE	7
CAPITOLO I – Evoluzione della manutenzione	
1.1 Il processo di manutenzione	11
1.2 Strategie e tipologie di manutenzione	12
1.2.1 Tipologie di manutenzione	12
1.2.2 Strategia di scelta delle politiche di manutenzione	16
1.2.3 Criteri per l'individuazione dei beni critici	18
1.3 Evoluzione degli approcci manutentivi	19
1.3.1 Approcci moderni alla manutenzione	21
1.3.1.1 <i>Total Productive Maintenance (TPM)</i>	23
1.3.1.2 <i>Reliability Centered Maintenance (RCM)</i>	26
1.3.1.3 <i>Evoluzione della RCM: Risk Based Maintenance (RBM)</i>	29
1.4 La manutenzione verso l'industria 4.0	34
CAPITOLO II - Risk based inspection and maintenance	
2.1 RBM: contesto e ragioni dell'introduzione	37
2.1.1 La metodologia di manutenzione basata sul rischio	41
2.2 <i>Risk based inspection and maintenance</i> : framework RBIMF secondo l'approccio normativo	48
2.3 Le ispezioni: strumento per l'implementazione della <i>Risk Based Inspection</i>	66
2.3.1 Tecniche d'indagine utilizzate per condurre un programma d'ispezione	66
2.3.2 Competenze richieste nella gestione della manutenzione ed ispezione degli impianti	71
2.4 L'ottimizzazione degli aspetti manutentivi: l'importanza del fattore umano	73

CAPITOLO III - Il fattore umano nelle attività di manutenzione e d'ispezione

3.1	L'errore umano nello svolgimento delle attività di manutenzione e di ispezione	76
3.2	Determinazione della probabilità dell'errore umano in manutenzione	78
3.2.1	Affidabilità umana	79
3.2.2	Le tecniche per l'analisi dell'affidabilità umana	82
3.3	Il fattore umano e l'approccio sistemico	84
3.3.1	La <i>System Dynamics</i> come logica realizzativa dell'approccio sistemico	84
3.3.2	Gli strumenti della <i>System Dynamics</i>	86
3.3.3	Modellazione del comportamento umano in un sistema complesso mediante la logica della <i>System Dynamics</i>	91
3.3.3.1	<i>Causal Loop Diagram (CLD) dell'errore umano</i>	92

CAPITOLO IV – Il fattore umano e la manutenzione: fattori chiave del *Safety Management System*

4.1	La cultura della sicurezza	96
4.2	Il <i>Safety Management System</i>	97
4.3	<i>Risk based maintenance</i> : binomio manutenzione e sicurezza	101
4.4	La <i>Risk based Maintenance</i> secondo l'approccio sistemico	104
4.4.1	Sviluppo della CLD della manutenzione basata sul rischio	104
4.4.2	Modello proposto	108
4.4.3	Risultati	111
4.5	Conclusioni	113

Capitolo V – Le nuove frontiere del fattore umano e della manutenzione nell’industria 4.0

5.1	Il paradigma dell’industria 4.0	116
5.1.1	Nuove tecnologie per un nuovo assetto organizzativo/produttivo	117
5.1.2	Dall’ <i>Internet of Things</i> e dal <i>Cloud Computing</i> al <i>Cloud Manufacturing</i>	120
5.2	La manutenzione nello scenario dell’industria 4.0	127
5.2.1	La manutenzione predittiva intelligente nell’industria 4.0	129
5.2.2	Confronto tra l’approccio predittivo intelligente e l’approccio <i>risk based</i>	134
5.3	Dalla <i>Man-Machine Interface</i> alla <i>Human- Robot Collaboration</i> : come cambia il ruolo dei manutentori e degli operatori di <i>frontline</i> nella nuova <i>Smart Factory</i>	138
5.3.1	<i>Human-Robot Collaboration</i> ed i nuovi problemi di <i>safety</i>	141
5.3.2	<i>Augmented Reality</i> : un’opportunità per lo svolgimento delle attività di manutenzione	144
5.4	Punti di forza e di debolezza della manutenzione secondo il paradigma dell’industria 4.0	147
	CONCLUSIONI	152
	BIBLIOGRAFIA	155
	Elenco delle figure	165
	Elenco delle tabelle	167

INTRODUZIONE

Il processo di globalizzazione che sta avvenendo a livello mondiale impone a tutte le imprese di mettere in campo nuove strategie per adeguare il proprio livello di competitività agli standard internazionali per affermare la propria permanenza nel mercato. In questo nuovo scenario, inoltre, la competitività d'impresa si rafforza non solo tramite la "classica leva" della riduzione dei costi, ma anche perseguendo un approccio organizzativo che favorisca, attraverso l'innovazione, il mantenimento della competitività per il futuro. In questo contesto, un'adeguata gestione della manutenzione degli *asset* fisici aziendali assume un'importanza sempre più significativa per i risultati d'impresa poiché una efficiente gestione della manutenzione, prevenendo i guasti, ha ricadute positive sui fattori che ne influenzano la competitività in termini di sicurezza ed impatto ambientale. Tuttavia, anche se un'adeguata gestione della manutenzione, specialmente nelle attività industriali "*asset intensive*", offre buone possibilità per il miglioramento della competitività d'impresa, non sempre vi è all'interno delle stesse imprese coscienza di questa opportunità. Questo avviene poiché la cultura organizzativa maggiormente diffusa nelle aziende rimane ancorata ad un approccio tradizionale alla manutenzione, intesa sostanzialmente come riparazione, senza farla evolvere verso un tipo più complesso di attività che, attraverso azioni di prevenzione e di perseguimento del miglioramento continuo, è capace di dare valore al business aziendale in una prospettiva sistemica più ampia e rivolta a tutto il ciclo di vita delle attrezzature e degli impianti.

Nel primo capitolo, partendo dalle definizioni riportate dalle norme relative alla manutenzione, si è messo in evidenza l'attuale obiettivo della manutenzione, ovvero quello di massimizzare la vita utile degli impianti con il minimo costo possibile, nel rispetto delle normative ambientali e di sicurezza. Questo nuovo orientamento della manutenzione è dovuto alle nuove esigenze che derivano principalmente dall'evoluzione del contesto sociale, dove sempre più importanza è attribuita alla sicurezza, alla qualità della vita e al rispetto dell'ambiente.

In quest'ottica il sistema di manutenzione ha dovuto necessariamente rivedere le sue strategie e, in particolare nell'industria di processo, si è passati da approcci basati sull'affidabilità dei sistemi (*Reliability Centered Maintenance*) ad altri più ampi collegati al rischio (*Risk Based Inspection and Maintenance*), consentendo così di indirizzare la manutenzione/ispezione solo a quei componenti che risultano critici per la sicurezza, ottimizzando le risorse impegnate a beneficio del contenimento dei costi, con il risultato di mantenere comunque inalterato il livello di rischio nel suo complesso.

Nel secondo capitolo, ci si è soffermati sull'approccio *risk based maintenance*, tenendo in conto, sia dello stato dell'arte in letteratura sia che dell'approccio normativo. In questa visione sistemica, il fattore umano gioca un ruolo sempre più fondamentale. Infatti, l'elevato grado di interconnessione tra le attività dell'operatore di *frontline* e le decisioni dell'ingegnere di manutenzione con le altre funzioni e processi aziendali diventa strategico nella gestione operativa.

Nel terzo capitolo, si è resa dunque necessaria una parentesi sull'importanza dell'errore umano nelle attività di manutenzione partendo dalla stato dell'arte in materia fino ad arrivare ad una rappresentazione grafica, mediante *causal loop diagram (CLD)*, di un modello concettuale di comportamento umano all'interno di un sistema socio-tecnico.

Nel quarto capitolo, utilizzando la System Dynamics come strumento di simulazione, presentata già nel terzo capitolo, si è fornita una rappresentazione, prima grafica, della *risk based maintenance* mediante CLD ed il relativo modello realizzato in POWERSIM. Tale analisi ha condotto ad una visione sistemica della problematica che porta a considerare la *Risk Based Inspection and Maintenance* come una delle componenti chiave di un modello generale di *Safety Management*, permettendo una gestione ottimale dei rischi manutentivi con ricadute sulla sicurezza degli impianti industriali. In particolare, si è realizzata il *Causal Loop Diagram* per mettere in evidenza le relazioni causa-effetto all'interno del modello proposto tenendo conto delle interrelazioni tra attività manutentive, errore umano e *Safety Management System*.

Riprendendo quanto già introdotto nel primo capitolo a riguardo della quarta rivoluzione industriale che sta iniziando a modificare il modo di produrre delle nostre fabbriche, non si è potuto non tenere in conto dei cambiamenti che la manutenzione subirà non appena i paradigmi dell'industria 4.0 si affermeranno. Una rivoluzione, quella dell'industria 4.0, tuttora in atto ma i cui paradigmi sono stati già ampiamente discussi e validati all'interno delle comunità scientifiche.

Il quinto capitolo è stato, dunque, dedicato alla manutenzione nell'ambito dell'industria 4.0. Da ricerche effettuate al riguardo è emerso che la manutenzione avrà carattere "predittivo intelligente", dove il termine "predittivo" indica una manutenzione *condition based*, in quanto sarà possibile predire lo stato di salute dell'attrezzatura in base all'enorme mole di dati che saranno rilevati dai sensori posti sulle macchine. L'aggettivo "intelligente" connota, invece, il nuovo aspetto della fabbrica 4.0 in cui le macchine sono in grado di comunicare tra di loro e con le postazioni da remoto tramite l'utilizzo di internet. Dal confronto effettuato tra l'approccio predittivo intelligente e l'approccio *risk based* è emersa una similitudine delle metodologie e soprattutto è stato possibile mettere in luce i punti di forza e di debolezza del nuovo approccio.

Dall'analisi condotta sono emerse alcune considerazioni. In primis che la manutenzione forse è il processo che avrà maggiori ricadute positive derivanti dall'introduzione delle nuove tecnologie e dell'*Internet of things*. Questo perché "tradizionalmente" le attività di manutenzione necessitano di un elevato numero di informazioni, dallo storico degli interventi eseguiti sui singoli macchinari ai dati tecnici e alle procedure di sicurezza per eseguire le operazioni. Il supporto della sensoristica consente la rilevazione di una serie di dati necessari per effettuare previsioni quanto più affidabili sullo stato di salute delle attrezzature ed in base a queste pianificare interventi mirati. Ulteriori ricadute positive, inoltre, investiranno i tecnici di manutenzione, perché nuove tecnologie affiancheranno l'uomo nello svolgimento dei suoi compiti. In particolare, la tecnologia che si prospetta troverà il suo maggiore ed efficiente impiego nelle attività di manutenzione è l'*Augmented Reality* (AR). L'operatore, nello svolgimento delle sue attività, avrà a disposizione un

dispositivo *smart* che permetterà non solo di visualizzare virtualmente dove è collocato il componente da riparare, ma indicherà anche la corretta e sicura procedura da seguire, grazie a degli *alert* che visualmente o con messaggi vocali segnaleranno situazioni di particolare pericolo. Inoltre, tutti i dati tecnici e le informazioni contenuti nei manuali d'uso e d'istruzione saranno disponibili *on-line*. L'analisi porta dunque a soffermarci di nuovo sul "fattore uomo" all'interno della nuova *Smart Factory*, in particolare di come cambia il ruolo dell'operatore di *frontline* nel nuovo sistema. Nella maggior parte delle situazioni lavorative l'operatore assume sempre più il ruolo di "supervisore" dei nuovi processi fortemente automatizzati, ma laddove particolari lavorazioni richiedono specifiche *skills* umane, troviamo l'uomo assistito dal robot. Una nuova forma di interazione uomo-macchina che va sotto il nome di *human-robot collaboration* e che apre a nuovi scenari nell'ambito *safety*.

L'uomo affiancato dal robot senza più nessuna barriera fisica od immateriale che ne arresta il movimento quando l'uomo entra nel suo raggio di operabilità. Tali nuovi scenari portano a rivedere, dunque, le norme sui dispositivi di sicurezza delle macchine che devono ora portare in conto i nuovi cambiamenti legati alle nuove modalità di lavoro.

Ambienti di lavoro fortemente tecnologici, in cui la comunicazione uomo- macchina e macchina-macchina è resa possibile dall'*Internet of Things*.

Il problema, dunque, sarà la gestione di questa enorme quantità di dati che dovranno essere acquisiti, analizzati ed interpretati ed il cui scambio in rete dovrà avvenire in maniera protetta.

Ritorna quindi il concetto di visione sistemica, in quanto il fattore chiave anche in questo nuovo scenario, non sarà la tecnologia, che chiunque può acquisire con facilità, ma la risorsa umana che dovrà possedere la capacità di gestirla al meglio, acquisendo conoscenze tecniche, gestionali, informatiche e statistiche.

CAPITOLO I: EVOLUZIONE DELLA MANUTENZIONE

1.1 Il processo di manutenzione

Lo sviluppo di modelli organizzativi “per processi” ha evidenziato la natura trasversale della manutenzione¹, intesa come processo e cioè come l’insieme delle attività dell’organizzazione e degli strumenti tecnici e di supporto; essa interagisce attivamente con gli altri processi aziendali nel definire e nel perseguire gli obiettivi dell’organizzazione stessa. Quest’affermazione trova particolare riscontro in riferimento alla gestione del ciclo di vita di un’entità (bene).

Nella fase di progettazione di un nuovo prodotto, è opportuno capitalizzare le informazioni tecniche provenienti dall’esperienza e dalla pratica manutentiva, in modo da aumentare la disponibilità, l’affidabilità, la manutenibilità, la sicurezza del bene stesso.

Nella fase di esercizio la manutenzione coopera con il gestore del bene:

- sia nel garantirne la disponibilità,
- sia nel proporre e sviluppare progetti di miglioramento tecnico/organizzativo finalizzati ad un aumento della qualità e dell’efficienza dell’organizzazione,
- sia nel garantire la sicurezza, la salute delle persone e la tutela dell’ambiente.

In questo ruolo, la manutenzione perde la veste di “funzione di fabbrica” per divenire a tutti gli effetti un “processo di servizio alla fabbrica”[1].

Coerentemente con le strategie e gli obiettivi aziendali, l’organizzazione del processo di manutenzione persegue i seguenti obiettivi generali:

- lo sviluppo dell’ingegneria² nel processo di manutenzione;
- il controllo tecnico ed economico del processo di manutenzione (attraverso il monitoraggio di un numero adeguato di indicatori di prestazione);
- l’ottimizzazione del ciclo di vita dei beni;

¹La UNI EN 13306 definisce la **manutenzione** come “combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, durante il ciclo di vita di un’entità, volte a mantenerla o riportarla in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta”.

²L’ingegneria di manutenzione ha il compito di progettare, controllare e migliorare i processi manutentivi collaborando con tutte le altre componenti della manutenzione.

- il dimensionamento delle risorse in persone, mezzi e materiali per l'esecuzione delle attività manutentive nel rispetto dei vincoli tecnici, economici, garantendo il rispetto dei parametri di prestazione e di sicurezza dei beni, la sicurezza e la salute dei lavoratori e la tutela dell'ambiente[1].

L'organizzazione della manutenzione ha la responsabilità di definire la strategia di manutenzione per ciascuna entità in base a tre criteri principali:

- assicurare la disponibilità dell'entità per la funzione richiesta, spesso al costo ottimale;
- considerare i requisiti di sicurezza associati all'entità sia per la manutenzione, sia per il personale utilizzatore e, ove necessario, eventuali impatti sull'ambiente;
- migliorare la durabilità dell'entità e/o la qualità del prodotto o del servizio fornito prendendo in considerazione, ove necessario, i costi [2].

1.2 Strategie e tipologie di manutenzione

L'attuazione di una "politica aziendale di manutenzione" richiede criteri di progettazione della manutenzione indirizzati al rispetto dei piani e degli obiettivi aziendali e all'ottimizzazione del costo globale (costi propri e costi indotti). Questi criteri presidono tutte le azioni della manutenzione, durante il ciclo di vita del bene, nel rispetto dei vincoli legislativi relativi a lavoro, salute, sicurezza e ambiente. I criteri richiedono la preliminare conoscenza di alcuni parametri dai quali ricavare utili indicazioni per definire le risorse e gli strumenti operativi necessari per l'attuazione delle politiche individuate per poter ottimizzare i costi e i risultati aziendali [3].

1.2.1 Tipologie di manutenzione

In ogni realtà industriale convivono in genere, varie politiche di manutenzione cui corrispondono le seguenti tipologie d'intervento:

- manutenzione a guasto o correttiva,
- manutenzione preventiva ciclica,
- manutenzione preventiva su condizione

– manutenzione predittiva.

Ogni politica integra le altre senza annullarle e impegna una quota delle risorse disponibili. Bisogna ottimizzare la distribuzione delle risorse tra i vari interventi. In ogni realtà, può essere applicato un mix di politiche di manutenzione che nel suo insieme costituisce la politica aziendale[3].

La **manutenzione a guasto** viene eseguita a seguito della rilevazione di un guasto o di una perdita di funzione di un macchinario. Si tratta, dunque, di individuare il componente guasto ed intraprendere tutte le misure atte a riportare l'entità nello stato in cui possa eseguire la funzione richiesta[2].

Tale tipologia di manutenzione viene effettuata se:

1. l'intervento alternativo da applicare risulta troppo costoso;
2. il numero dei guasti che potrebbero verificarsi risulta talmente basso che è preferibile stabilire altre priorità;
3. il malfunzionamento non influisce significativamente sulla produzione o genera perdite finanziarie limitate.

Tuttavia la manutenzione a guasto presenta numerosi aspetti discutibili:

- i fermi macchina si verificano in maniera casuale e spesso nel momento meno opportuno;
- un guasto grave e inaspettato su un componente può avere conseguenze deleterie su altri elementi del sistema, compromettendone la funzionalità con un aggravio consistente dei costi, nonché potrebbe compromettere la salute e sicurezza dei lavoratori;
- le riparazioni non programmate comportano spesso tempi lunghi (per ottenere le parti di ricambio, assegnare il tecnico manutentore adatto, ecc.), ostacolando la produzione e tenendo occupato poco proficuamente il personale tecnico [4].

Nell'ambito della manutenzione correttiva distinguiamo:

- **manutenzione d'urgenza** che è eseguita senza indugio dopo la rilevazione di un guasto in modo da evitare conseguenze inaccettabili.

- **manutenzione differita** che non è eseguita immediatamente dopo la rilevazione di un'avaria, ma che è differita in conformità a determinate regole di manutenzione[2].

La **manutenzione ciclica** è un tipo di manutenzione preventiva effettuata in base ad intervalli di tempo o cicli di utilizzo prefissati ma senza una precedente indagine sulle condizioni dell'entità[2].

Nella manutenzione ciclica gli intervalli e i criteri di intervento sono generalmente fissati per tutta la vita utile del componente o della macchina (ad esempio se la sostituzione del componente è specificata dal costruttore oppure è fissata in base alle ore di funzionamento). Questa tipologia di manutenzione risulta efficace sia in termini economici sia di riduzione dell'indisponibilità della macchina quando il guasto si verifica con una certa regolarità. Tuttavia, per un guasto difficilmente rilevabile, non è conveniente applicare tecniche di manutenzione programmata in quanto si rischia realmente di sostituire un componente la cui vita utile è tutt'altro che terminata [5].

La **manutenzione secondo condizione** è un tipo di manutenzione preventiva basata sul monitoraggio delle prestazioni di un'entità e/o dei parametri significativi per il suo funzionamento e sul controllo dei provvedimenti conseguentemente presi. Il monitoraggio delle prestazioni e dei parametri può essere calendarizzato, eseguito su richiesta o effettuato in continuo [2].

Nella manutenzione secondo condizione, il componente viene sostituito prima che termini la sua vita utile, attraverso sostituzioni non programmate bensì decise sulla base della rilevazione di alcuni parametri del componente o del macchinario. La strategia di monitoraggio della condizione, effettuata mediante verifiche ispettive periodiche, tende quindi ad individuare lo stato di un componente che potenzialmente potrebbe provocare un guasto. La manutenzione secondo condizione va quindi intesa come un processo diagnostico che, fornendo indicazioni sullo stato funzionale della macchina, consente di pianificare interventi di revisione, basandosi sulle reali condizioni dei componenti piuttosto che sul tempo di funzionamento.

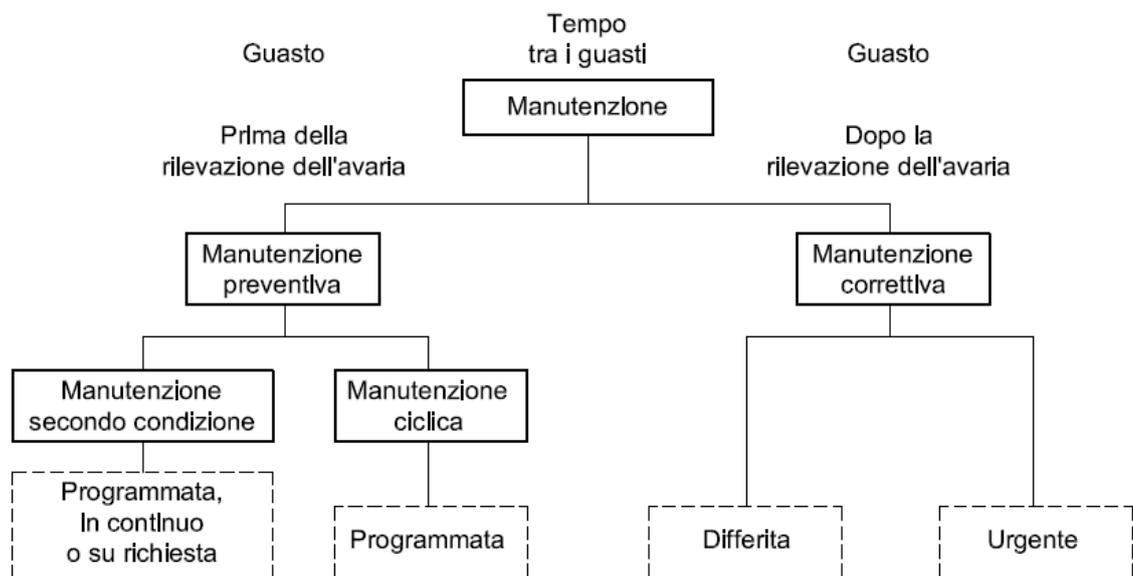


Figura 1 – Manutenzione – Quadro generale [2].

La **manutenzione predittiva** è un tipo di manutenzione su condizione eseguita in seguito ad una previsione derivata dall'analisi e dalla successiva valutazione dei parametri significativi afferenti il degrado dell'entità[2].

La manutenzione predittiva si basa sulla possibilità di riconoscere la presenza di un'anomalia in stato di avanzamento attraverso la scoperta e l'interpretazione di segnali premonitori deboli del potenziale guasto finale. Il segnale, quando riconosciuto, entra poi a far parte di quei fattori che possono essere monitorati attraverso ispezioni continue o periodiche e quindi nella sfera di influenza della manutenzione preventiva (su condizione o programmata). Contrariamente alla preventiva (in particolare alla manutenzione su condizione) l'idea di base della manutenzione predittiva si fonda su un controllo dello stato delle apparecchiature tale da non interrompere il loro normale funzionamento ma da segnalarne anticipatamente ed in modo continuo il progressivo degrado.

La manutenzione predittiva viene dunque definita sulla base di parametri, che consentono di capire qual è lo stato effettivo della macchina e che sono rilevati attraverso una serie di misure, ispezioni visive, controlli non distruttivi, prove

operative o funzionali senza, in genere, dover smontare i componenti del sistema meccanico. Queste azioni, effettuate ad intervalli regolari definiti per ogni caratteristica, consentono di rilevare quando le prestazioni di un componente iniziano a degradare e, sulla base di queste informazioni, di decidere se effettuare un intervento di riparazione o di sostituzione prima che si verifichi il guasto [4].

Questa strategia di manutenzione non utilizza metodi probabilistici per effettuare una prognosi dei guasti, ma adopera l'andamento di trend dei parametri monitorati per predire i guasti potenziali.

1.2.2 Scelta delle politiche di manutenzione

La scelta della politica di manutenzione (tipologia d'intervento) che più si adatta al bene da mantenere dipende dalle seguenti valutazioni:

- effetti prodotti dal guasto del bene sulla sicurezza del personale, sulla tutela dell'ambiente, sul maggior danneggiamento del bene stesso, sulla produttività aziendale o altri effetti;
- obiettiva necessità e probabilità di applicare, a un bene considerato critico, una determinata tipologia di intervento manutentivo in funzione della modalità di guasto e dell'esistenza di segnali deboli;
- convenienza economica di implementare la tipologia individuata [3].

Scegliere una politica di manutenzione non significa escludere tutte le altre, dato che comunque il guasto può sempre accadere e che, in ogni caso, per i diversi componenti di un'entità si possono prevedere politiche di manutenzione diverse. La scelta delle politiche di manutenzione è orientata a determinare il giusto mix di politiche di manutenzione da assegnare alle responsabilità organizzative e alle risorse disponibili. E' anzitutto utile individuare in maniera chiara i criteri strategici da seguire nella scelta delle politiche, perché, quando i beni sono numerosi e diversi tecnologicamente tra di loro, diverse sono le politiche che meglio si adattano ad ogni categoria.

Per la ricerca della politica di manutenzione che meglio si adatta alle specifiche modalità di guasto di un'entità, l'esperto di manutenzione segue un percorso

decisionale che conduce alla scelta della giusta politica tra quelle canoniche, facendo uso dei predetti criteri di scelta.

Le condizioni che devono essere verificate in questo percorso decisionale sono innanzitutto:

- l'esistenza di un segnale debole, intenso come un sintomo premonitore di un futuro guasto e la sua monitorabilità;
- l'esistenza di una previsione di durata per poter programmare ispezioni a cadenza o, almeno, sostituzioni preventive;
- l'esistenza di indicazioni o raccomandazioni sui criteri di manutenzione fornite dal costruttore dell'entità o da normative di legge.

Il percorso decisionale è rappresentato nel diagramma di flusso riportato in Figura 2 così come è normato dalla UNI 10366 [6].

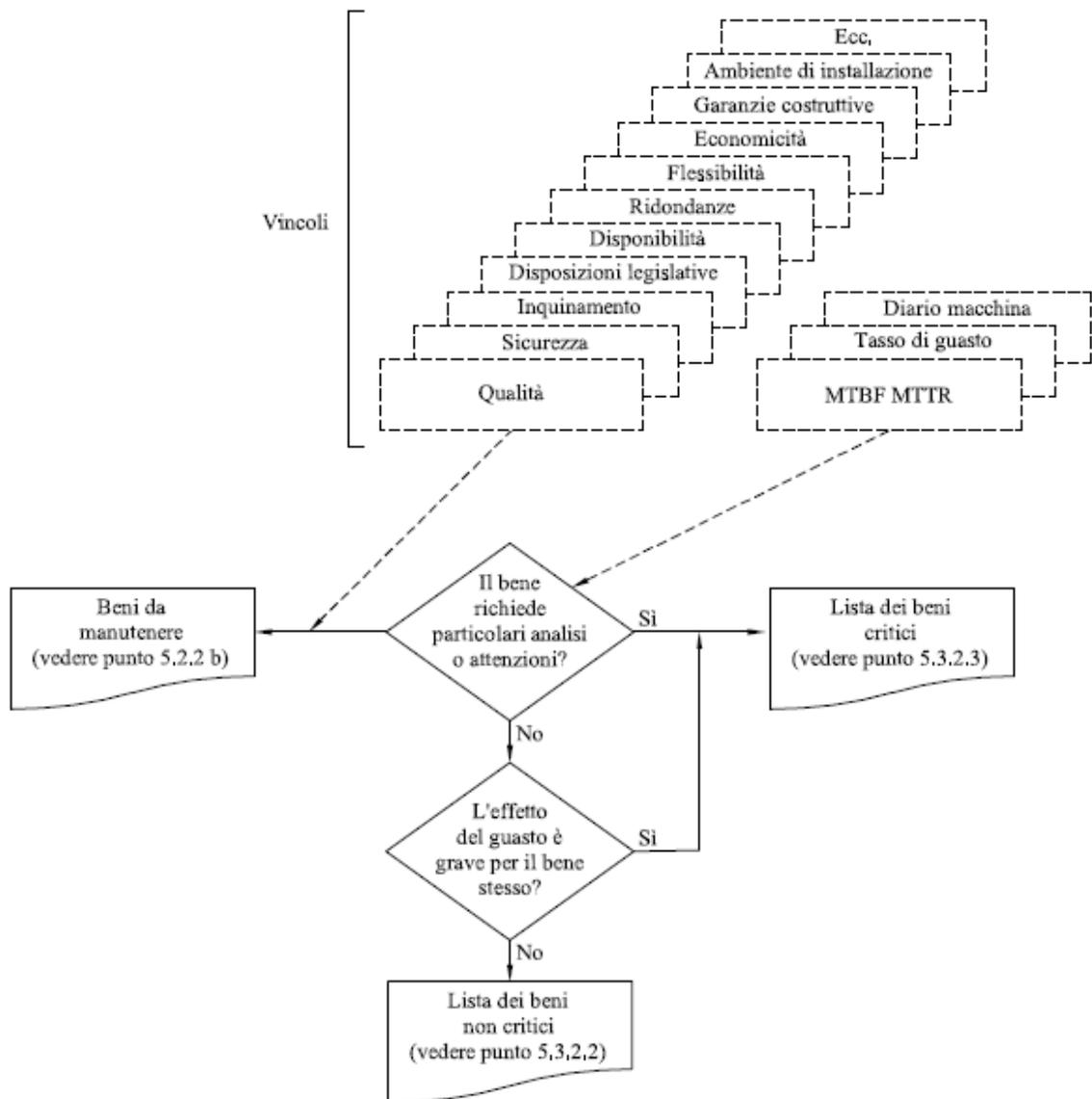


Figura 2 – Diagramma di flusso per l'individuazione dei beni critici [6].

1.2.3 Criteri per l'individuazione dei beni critici

Gli elementi discriminanti in questa fase di selezione, in ordine di priorità, sono:

- a) la sicurezza delle persone in caso di guasto,
- b) effetti sull'ambiente in caso di guasto,
- c) le disposizioni legislative in materia di controlli periodici e di collaudi,
- d) la disponibilità richiesta al bene dai piani di produzione,
- e) l'esistenza di beni di riserva (ridondanza),

- f) la possibilità di alternative al flusso produttivo (flessibilità della struttura impiantistica),
- g) l'effetto sulla qualità del prodotto,
- h) l'effetto sul maggior danneggiamento e/o indisponibilità del bene,
- i) altre.

Tali criteri consentono di raggruppare i beni da mantenere in due liste distinte:

- *lista dei beni non critici*, ovvero i beni che non richiedono altre analisi; si possono pertanto individuare le tipologie di intervento più idonee al loro comportamento:
 - intervento a guasto
 - manutenzione preventiva ciclica
 - manutenzione secondo condizione e predittiva
 - manutenzione migliorativa
- *lista dei beni critici*, ovvero i beni che per definizione richiedono un ulteriore approfondimento d'indagine per poter scegliere la politica (o le tipologie) d'intervento più appropriate per garantirne la disponibilità al minimo costo [3].

1.3 Evoluzione degli approcci manutentivi

Gli obiettivi di una politica di manutenzione sono: pianificare in modo efficace le attività di manutenzione, massimizzare la disponibilità e l'efficienza delle apparecchiature, ridurre i guasti, controllare il deterioramento, garantire un funzionamento sicuro e corretto, e minimizzare il costo per mantenere un'unità operativa all'interno di un livello accettabile di sicurezza [7].

Secondo l'approccio tradizionale, i comportamenti al guasto delle apparecchiature sono in qualche modo prevedibili e possono essere descritti con l'aiuto della famosa curva a vasca da bagno mostrata in figura 3 [8].

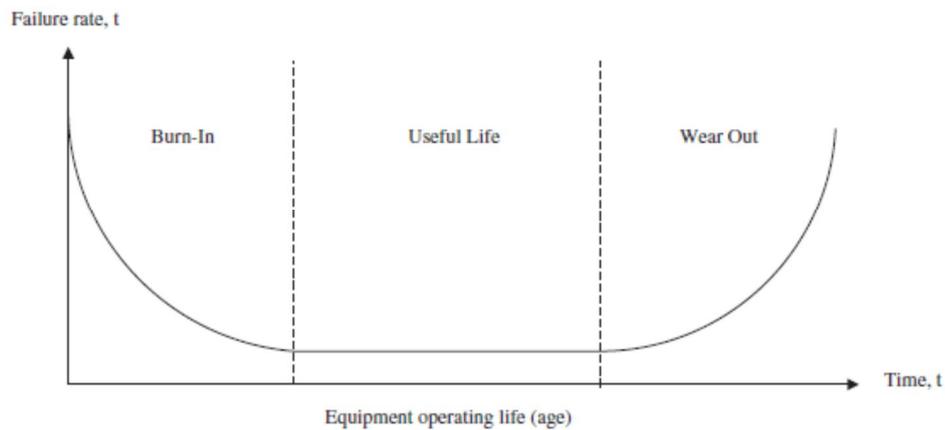


Figura 3 – Curva a vasca da bagno [7].

La curva a vasca da bagno divide l'andamento del guasto in base alle tre fasi della vita di un'apparecchiatura: fase di avviamento, vita utile e fase di usura [9]. La fase iniziale e la fase di usura sono le più critiche per il malfunzionamento dell'unità e potrebbero essere caratterizzate da avere un tasso di manutenzione più alto rispetto a quello della vita utile. Tuttavia, il comportamento effettivo delle attrezzature è molto più complesso di quello semplicemente definito dalla curva a vasca da bagno. Le decisioni di manutenzione vengono prese per superare possibili minacce di guasto a causa di danni esterni, errori di fabbricazione, errori operativi umani ed all'età dell'*asset* entro i vincoli economici [8].

L'implementazione delle politiche di manutenzione è un problema decisionale multicriterio che dipende da diversi fattori, ad esempio dal tipo di *asset*, condizione dell'*asset*, ridondanza e affidabilità del sistema, disponibilità delle risorse di manutenzione (sia umane che logistiche), affidabilità dell'azione di manutenzione, costo dei tempi di inattività, costo dell'azione di manutenzione, tempo di risposta, struttura organizzativa, fattori ambientali e socio-economici [10]. Le politiche di manutenzione si sono evolute nel tempo e possono essere classificate in [11]:

- manutenzione correttiva,
- manutenzione preventiva,
- manutenzione predittiva,
- manutenzione proattiva.

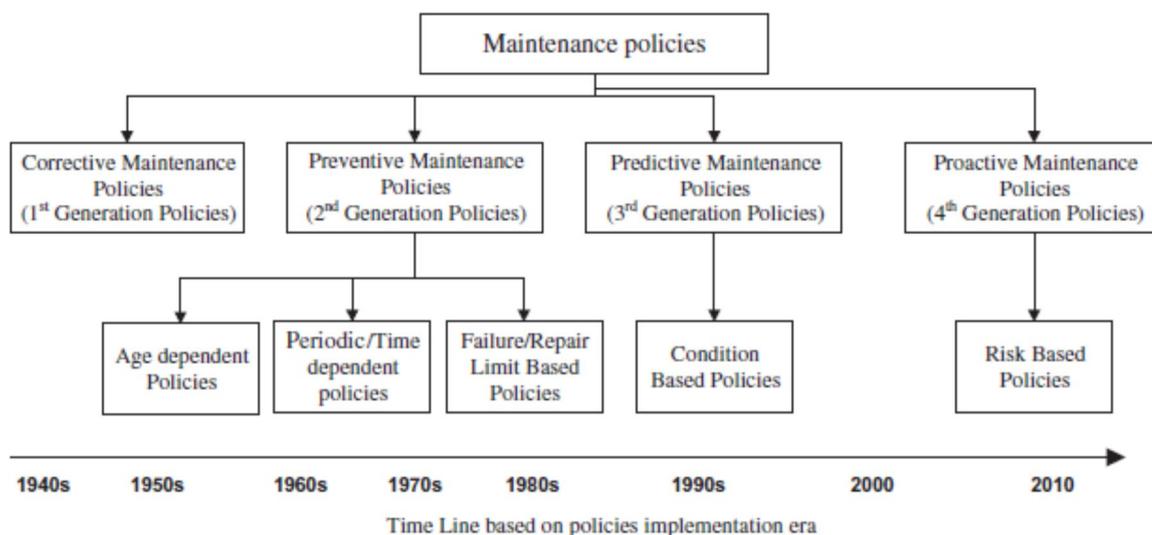


Figura 4 - Evoluzione delle politiche di manutenzione dal 1940 ad oggi [12].

La figura 4 descrive le diverse fasi dell'evoluzione delle politiche di manutenzione. La prima fase è iniziata nel 1940, quando la politica attuativa si basava su una filosofia di manutenzione correttiva: "intervenire quando si è rotto". Questa politica può anche essere riconosciuta come una politica reattiva perché le azioni di riparazione o sostituzione venivano eseguiti solo in caso di completo guasto dell'attrezzature o dell'unità [11]. Nella seconda fase, nel corso del 1970, le politiche si sono basate principalmente sull'approccio di manutenzione preventiva, dove l'obiettivo si è concentrato sulle azioni preventive per ridurre il tasso di guasto e le conseguenze di guasto (ad esempio lunghi periodi di fermo, perdita di produzione e alti costi di manutenzione) [13]. In contrasto con la manutenzione correttiva, le attività di manutenzione venivano effettuate prima del guasto delle apparecchiature o dell'unità.

1.3.1 Approcci moderni alla manutenzione

La manutenzione è un'attività antica, intrecciata con l'evoluzione stessa della civiltà e delle logiche del costruire e del produrre a beneficio della vita e del benessere dell'uomo. Essa nasce con i primi attrezzi e strumenti che l'uomo ha creato per dominare la natura e sviluppare il proprio benessere, costituendo la storia stessa

della civiltà: affilare le lame delle proprie armi di pietra o di metallo è un'attività manutentiva, così come riparare le reti da pesca, riparare un'imbarcazione o un mezzo di trasporto su terra.

Una parte molto rilevante della storia e dei progressi della manutenzione è legata al suo ruolo nella produzione industriale di cui ha seguito l'evoluzione con uno stretto legame ai modi di produzione.

Con l'avvento della rivoluzione industriale, i modi di produzione passano dalla produzione artigianale, alla produzione di massa, alla produzione snella.

La produzione artigianale ha inizio con la nascita della civiltà e vede nei secoli evolvere la figura del manutentore da "polivalente" a "specialistica". Polivalente è colui il quale utilizza l'attrezzo o lo strumento, oltre a curarne la manutenzione, specialista è invece colui che ha le abilità per costruire e mantenere l'attrezzo. Il modo di produrre artigianale si è sviluppato nel corso dei secoli ed ha mantenuto la sua vitalità sia specializzandosi, sia orientandosi verso segmenti di mercato particolari.

La produzione di massa vede per la manutenzione lo sviluppo di un percorso di nobilitazione del "mestiere" che porta a forme di specializzazione spinta ancora presenti nella realtà industriale mondiale e certamente molto diffusi fino agli anni 1970. Sono un risultato di questo sviluppo l'articolazione del personale di manutenzione in aggiustatori da banco, carpentieri, lattonieri, tubisti, saldatori, meccanici specialisti delle varie macchine, elettricisti, elettronici, strumentisti, muratori, falegnami, vetrai, ecc. In stabilimenti di una certa complessità si potevano contare fino a 40 mestieri diversi.

Lo sviluppo di questi mestieri ha certamente portato alla creazione di utili competenze specialistiche, con la conseguenza però di una segmentazione organizzativa causa di scarsa visione sistemica (che è in particolare utile nell'individuazione e analisi dei guasti) e fonte di problemi di coordinamento fra le diverse specializzazioni e in definitiva di forti inefficienze. Si deve però riconoscere che, con la produzione di massa, è nata la cultura della manutenzione e in particolare della prevenzione dei guasti.

Nell'organizzazione snella si elimina l'eccesso di specializzazioni e di livelli con forti riflessi sui ruoli e l'organizzazione della manutenzione. Da questi principi è nata la manutenzione produttiva (*Total Productive Maintenance*, TPM), cioè l'approccio "snello" alla manutenzione. Esso si basa su tre assunti fondamentali:

- l'integrazione fra le funzioni produzione e manutenzione nelle responsabilità manutentive di tipo operativo;
- la creazione della figura dell'operatore/conducente del processo, come esecutore dell'automanutenzione e "sensore intelligente" dell'andamento delle macchine o impianti di cui è conduttore;
- lo sviluppo dell'ingegneria di manutenzione, quale servizio trasversale alle responsabilità produttive (ove risiedono le responsabilità operative di manutenzione).

L'organizzazione snella della manutenzione è quindi basata su un modello organizzativo incentrato su figure operative polivalenti, sull'abbattimento delle barriere tra produzione e manutenzione (propria della produzione di massa) e su strutture ingegneristiche centrali che progettano, controllano e migliorano la manutenzione [6].

1.3.1.1 Total Productive Maintenance

La TPM è molto più di un semplice approccio, è in realtà considerata una filosofia di manutenzione che combina il metodo americano della manutenzione preventiva con quello giapponese del controllo totale di qualità e il coinvolgimento degli operatori a qualsiasi livello aziendale. I concetti di base possono essere riassunti nei tre aspetti seguenti:

- ottenere la massima efficienza e quindi affidabilità dell'impianto, al fine di ridurre l'insieme di tutti i costi sostenuti nell'intero ciclo di vita utile delle installazioni;
- è un sistema totale di manutenzione, ovvero l'implementazione di un mix completo di tecniche, che vanno dalle politiche manutentive (da quella a

guasto a quella su condizione) alla gestione dei ricambi, fino alla pianificazione degli interventi;

- prevede il coinvolgimento operativo di tutto il personale dell'azienda, quindi la partecipazione al progetto TPM di tutti i dipendenti (dalla dirigenza agli operatori in linea).

Uno degli assunti fondamentali di questa strategia manutentiva "globale" è che le cause di inaffidabilità delle macchine sono imputabili a errori nella progettazione e nella gestione dell'impianto. Essa punta pertanto ad eliminare alcune cause di guasto che possono essere riassunte in tre categorie:

1. *errori di progetto*, cioè compiuti in fase di progetto, costruzione ed installazione;
2. *errori di esercizio*, impianti tenuti in cattive condizioni oppure errori in avviamento o conduzione;
3. *errori di manutenzione*, che possono accadere nell'esecuzione degli interventi di ripristino.

Come è possibile osservare, si tratta di una metodologia complessa e innovativa le cui linee di azione peculiari sono:

- mantenere l'impianto nelle condizioni ottimali per tutta la sua vita utile attingendo alle risorse già acquisite dalla manutenzione;
- proteggere l'impianto contro il deterioramento normale;
- correggere le carenze di progetto;
- prevenire gli errori umani attraverso la formazione e la responsabilizzazione degli operatori [14].

La manutenzione produttiva mira, nel contempo, alla semplificazione dei sistemi ed alla stabilizzazione del processo, alla semplificazione delle procedure e alla standardizzazione dei metodi di lavoro che permettono la mobilità degli operatori su più macchine e su diverse postazioni della stessa linea. Per perseguire tale obiettivo è necessaria la diffusione di una cultura manutentiva a tutti i livelli: dal conduttore della macchina al manager del processo, che diventa anche capo della manutenzione. Un ruolo chiave nella Manutenzione Produttiva è quello ricoperto

dall'operatore, che diventa esecutore della Manutenzione Autonoma. Questa mira a trasferire le attività di manutenzione preventiva di primo livello o *routinarie* (ispezioni, pulizie, controlli, sostituzioni, smontaggi, piccole riparazioni ecc.) agli stessi addetti alla produzione. La verifica dello stato della Manutenzione Autonoma viene effettuata mediante *check-list* di controllo e confronto col modello della TPM. Un altro aspetto fondamentale della TPM è costituito dalla prevenzione dei guasti affrontato con l'introduzione del concetto di monitoraggio, attraverso cui è possibile effettuare una valutazione delle condizioni di un impianto o apparato, in ogni istante e in tempo reale. Ciò consente di prevenire i guasti ed effettuare un intervento manutentivo soltanto in presenza di un'avaria potenziale e/o quando risulti compatibile e conveniente con la pianificazione della produzione. I vantaggi derivanti dall'impiego di questi accorgimenti sono:

- miglioramento delle condizioni generali di sicurezza;
- miglioramento della disponibilità degli impianti;
- riduzione dei costi di manutenzione;
- ottimizzazione dell'impiego di parti di ricambio.

Dunque la TPM si adatta interamente alla filosofia del *Total Quality Management* (TQM) ed ai principi dell'approccio *Just in Time* (JIT). Il bagaglio di strumenti TPM è costituito da diverse tecniche, alcune delle quali sono universali come *Six Sigma*, Analisi ABC o di Pareto, diagrammi di *Ishikawa* etc. Altri concetti sono stati invece introdotti proprio dalla TPM come l'efficienza totale dell'impianto (*Overall Equipment Effectiveness*, OEE).

L'OEE è un potente strumento utilizzato per misurare le prestazioni del sistema produttivo, superando il concetto della semplice disponibilità delle attrezzature; prevedendo il calcolo di parametri relativi alla velocità di funzionamento delle macchine e alla qualità del prodotto in uscita dal sistema.

L'OEE può essere calcolato con la seguente espressione:

$$OEE = \frac{\textit{produzione buona effettiva}}{\textit{produzione teoricamente realizzabile}}$$

Per il calcolo dell'OEE si fa riferimento ad un sottoinsieme delle categorie di perdite raggruppate in tre tipologie:

a. perdite di disponibilità, che comprendono:

- perdite per set-up e messa a punto,
- perdite per guasti,

b. perdite di prestazione, che comprendono:

- perdite per piccole fermate,
- perdite per velocità,

c. perdite di qualità che comprendono:

- perdite all'avvio,
- perdite durante il processo [15].

La forza del concetto risiede dunque nell'integrazione delle problematiche legate alla produzione, manutenzione e qualità nello schema unitario delle "sei grandi perdite" di capacità utile [16]. La Figura 5 illustra questo concetto.

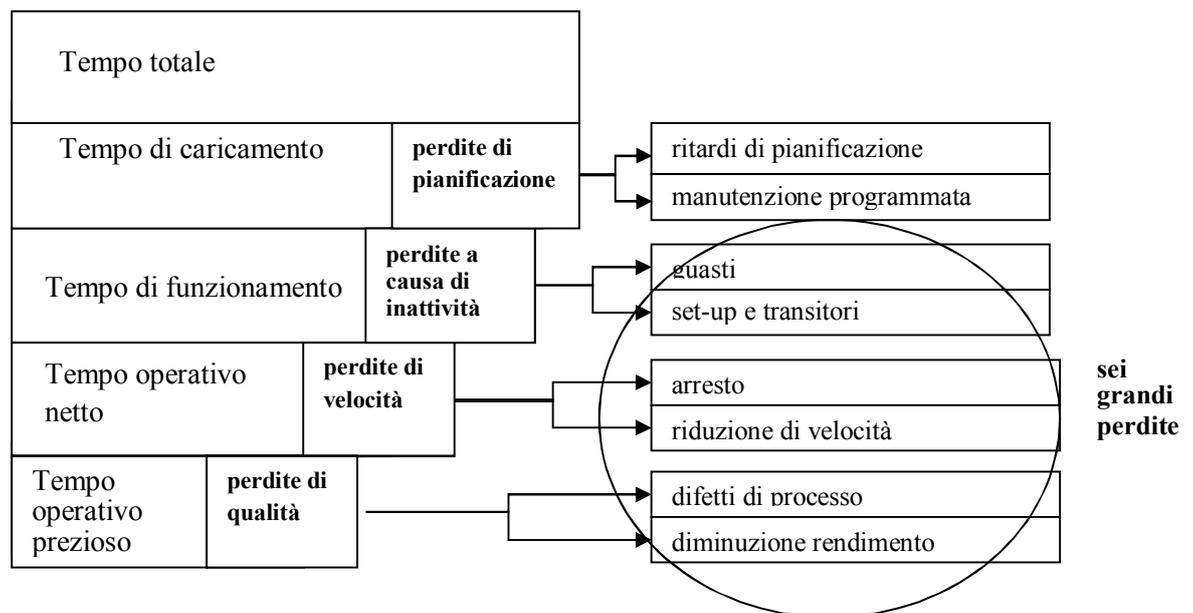


Figura 5 - Le sei grandi perdite di efficienza globale delle apparecchiature [16].

1.3.1.2 Reliability Centered Maintenance (RCM)

La RCM è stata creata con lo scopo di fornire le linee guida per la definizione dei compiti e delle frequenze di manutenzione di un'attrezzatura. Rappresenta un metodo attraverso cui un'industria può utilizzare i propri dati di guasto e le

esperienze operative, per valutare le ridondanze del sistema e sviluppare un piano di manutenzione flessibile e compatto. Non è dunque una politica di manutenzione, bensì rappresenta una serie di comportamenti organizzativi, di regole, di metodi e di procedure per la progettazione e la gestione economica della manutenzione. In particolare, si tratta di un approccio di natura affidabilistica utilizzato per sviluppare e selezionare politiche manutentive alternative, sulla base di criteri quali: sicurezza, operatività ed economicità. Diffusasi a partire dagli anni sessanta nel settore del trasporto aereo nordamericano, la RCM è stata poi adottata dall'aviazione militare e dagli impianti industriali ad alto rischio come le centrali nucleari [17]. Attualmente tale metodologia è largamente utilizzata in diversi contesti produttivi, per i quali sono state realizzate numerose versioni. Tuttavia, la *Society for Automotive Engineers* (SAE) ha fornito la definizione largamente accettata di RCM; affermando che per implementare tale metodologia, è necessario rispondere a sette domande fondamentali:

1. Quali sono le funzioni e gli standard di performance di un'attrezzatura associati alle attività nell'attuale contesto operativo?
2. In quale modo un'attrezzatura può guastarsi mentre svolge le sue funzioni? (anomalie di funzionamento)
3. Quali sono le cause di ciascun guasto? (modi di guasto)
4. Cosa succede quando si verifica un guasto? (effetti di guasto)
5. Quali conseguenze può comportare il guasto? (conseguenze di guasto)
6. Cosa si può fare per prevedere o prevenire ciascun guasto? (attività proattive e intervalli delle attività).
7. Cosa si può fare se non può essere adottata alcuna azione proattiva? (azioni di default).

Qualora anche solo una di queste domande non trovi risposta, il metodo sarà considerato incompleto. La RCM risulta essere innegabilmente un concetto di manutenzione prezioso che tiene conto non solo dell'attrezzatura stessa, ma della funzionalità dell'intero sistema, focalizzandosi su fattori quali: affidabilità, sicurezza ed integrità ambientale, considerati più importanti rispetto al costo.

Combinando, dunque, i suddetti aspetti è possibile applicare la migliore forma di strategia manutentiva ai diversi campi di interesse. Quindi si può affermare che, mentre l'obiettivo finale di un approccio TPM consiste nel mantenere gli strumenti operativi in condizioni tali da permettere il raggiungimento della missione aziendale senza spreco eccessivo delle risorse disponibili; i principi della RCM mirano invece ad incrementare rapidamente e sostenere una crescita della disponibilità e della sicurezza degli impianti. Lo sviluppo della metodologia avviene in tre fasi:

1. Uso delle tecniche RCM per valutare le conseguenze dei guasti per formulare i piani di manutenzione di tutte le apparecchiature. Se questi ultimi sono già presenti, si potrà notare se vi è una effettiva riduzione del carico di lavoro dei nuovi rispetto ai precedenti;
2. Uso delle informazioni emerse dalla prima fase per rivedere le politiche di gestione delle attività di manutenzione;
3. Progettazione o riprogettazione delle procedure e dei sistemi operativi e dei relativi fabbisogni informativi [18].

Con l'implementazione della RCM, si possono ottenere i seguenti benefici:

- il consumo dei ricambi può ridursi fino al 50%,
- la manutenzione ciclica diminuita del 50-70%,
- le relazioni fra manutenzione e produzione migliorano,
- le sostituzioni programmate sono eliminate completamente, quindi ogni componente viene sfruttato per la maggior parte della vita utile.

Sebbene la RCM offra molti vantaggi, vi sono anche delle carenze dal punto di vista concettuale, come testimoniato dalla mancanza nell'impianto originale della RCM di una struttura precisa per la redazione di un piano di manutenzione funzionale. Inoltre, soprattutto dal lato accademico, vengono mosse diverse critiche circa la base scientifica, costituita dall'analisi *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA), che rappresenta il cuore della metodologia. Tale analisi viene spesso effettuata con un approccio *ad hoc* per ciascun caso considerato; inoltre i dati statistici disponibili potrebbero risultare insufficienti o inesatti a causa di una scarsa attenzione verso il processo di degrado delle attrezzature (meccanismi di rottura) o verso l'ambiente

fisico (ad esempio ambienti corrosivi o polverosi). La RCM è dunque un processo continuo che, senza dubbio, comporta un enorme dispendio di risorse da ottimizzare per la ricerca di un equilibrio tra la preziosa logica esperienziale e l'altrettanto fondamentale aspetto statistico. Il connubio di tali concetti rende complessa l'estensione della RCM a tutte le tipologie di attrezzature.

L'adozione di un programma di manutenzione basato sui principi della RCM, offre comunque l'opportunità di raggiungere i seguenti obiettivi:

- Resistenza: migliorare la robustezza delle macchine e dei componenti tramite una costante rivalutazione del programma di manutenzione;
- Costi: nel periodo immediatamente successivo all'adozione della RCM i costi di manutenzione aumenteranno a causa dell'acquisto di nuovi strumenti ed accessori. Questo aumento sarà però seguito da una forte diminuzione non appena i guasti saranno prevenuti e il componente verrà sostituito prima che si deteriori raggiungendo lo stato di guasto;
- Programmazione: prevenendo il guasto è possibile organizzare le operazioni, le parti di ricambio e le risorse con anticipo;
- Sostituzione dei componenti: il vantaggio della RCM è di utilizzare il più possibile un componente, sostituendolo solo dopo una valutazione del suo stato effettivo, non con una programmazione da calendario, permettendo quindi un aumento della vita di un componente;
- Efficienza e produttività: la flessibilità della RCM permette di intervenire solo se necessario senza generare costi aggiuntivi né perdite di produzione.

1.3.1.3 Evoluzione della RCM: Risk Based Maintenance (RBM)

Il gap metodologico legato all'analisi FMEA ad hoc ha rappresentato un ostacolo per la valutazione della bontà della RCM fino al 1995, quando Jones ha proposto una variazione all'impianto generale dell'approccio, incorporando il concetto di rischio nella metodologia [17].

La RCM, infatti, si mostra estremamente valida soprattutto nel caso di impianti complessi, formati da molti componenti tra di loro equi importanti le cui frequenze

di guasto sono in genere fornite dal costruttore o fanno riferimento a dati storici di componenti omologhi. Tuttavia, quest'aspetto rappresenta anche la maggior criticità dell'approccio, in quanto, per attuare le strategie di manutenzione, la RCM si basa solo sulla tipologia di componenti trascurando informazioni significative sulla loro "storia produttiva". Per ovviare a questo limite, l'approccio RCM è stato superato dall'approccio "*Risk Based Maintenance*" (RBM), ovvero dalla manutenzione basata sul rischio.

L'ultima generazione delle tecniche di manutenzione si prefigge, infatti, di definire interventi manutentivi "personalizzati" per ciascun componente, pur essendo analogo, nonché delle diverse condizioni ambientali in cui ciascuno di essi è utilizzato. Ciononostante l'approccio RBM parte da basi in comune con la RCM per quanto concerne:

- identificazione di tutti i possibili modi ed effetti di guasto per ciascun componente;
- identificazione dei criteri di criticità;
- valutazione delle conseguenze dal punto di vista dei criteri di criticità.

La RBM, oltre alle possibili cause di guasto, studia però anche i modelli che possono descrivere l'avanzamento del degrado dell'attrezzatura che porta al suo guasto e quindi i possibili parametri di monitoraggio e tecniche di ispezione che possono rilevarlo.

In definitiva la RBM presenta dei vantaggi rispetto alla RCM, in quanto:

- fa largo uso delle informazioni derivanti dalle ispezioni nel processo decisionale di scelta della politica di manutenzione da adottare;
- aggiorna i dati dell'impianto, in particolare attualizza la vita residua dei componenti in funzione dei risultati delle ispezioni;
- impegna le risorse di manutenzione sui componenti a maggior rischio [19].

Una delle metodologie innovative introdotte da questa nuova tendenza riguarda la *Risk Based Inspection* (RBI) [20], che consente la valutazione della probabilità di accadimento e della severità del danno di un'attrezzatura attraverso lo strumento delle ispezioni. La RBI aiuta quindi a sviluppare specifici piani d'ispezione per le

attrezzature. Questo modo d'intervento ha dunque un forte impatto sulla sicurezza in termini di minori rischi di guasto, meno arresti forzati, e soprattutto, riduzione dei costi operativi. Essendo basato sul rischio, l'approccio richiede un uso sistematico ed integrato di competenze provenienti da diverse discipline e che si interessano dell'integrità dell'impianto industriale nella sua totalità [21]. Tali competenze includono la progettazione, la selezione dei materiali, la valutazione dei parametri operativi e degli scenari, ed infine la comprensione degli attuali e futuri meccanismi di degrado delle apparecchiature e ovviamente dei rischi ad esse connessi.

Elementi come l'obiettivo, il grado, la frequenza delle ispezioni ed il metodo di controllo non distruttivo adottato, necessitano di essere determinati nel piano di manutenzione. In quest'ottica, il rischio è adottato come criterio per individuare le priorità di intervento attraverso l'identificazione preliminare di quei particolari componenti definiti "critici". Tali componenti contribuiscono quindi maggiormente all'incremento del rischio, ovvero possono comportare conseguenze significativamente elevate. Questa situazione mostrata in figura 6, e sottolineata da Koppen [22], dimostra che nella maggior parte degli impianti solo circa il 20% dei componenti contribuisce al "virtuale" incremento del rischio globale dell'impianto (circa l'80% del rischio). Da ciò ne consegue che è sufficiente concentrarsi sul 10 o 20% dei componenti per eliminare la maggior parte del rischio; raggiungendo così due obiettivi tra loro apparentemente incompatibili: da un lato il risparmio; dall'altro la maggiore affidabilità, sicurezza e disponibilità.

In questo caso, sarebbe irrazionale ispezionare tutti i dispositivi con lo stesso livello di priorità, ma sarà importante identificare il 20% dei dispositivi e aumentare il loro livello di priorità nel programma di ispezione. Questo è il concetto cardine della tecnologia di manutenzione basata sul rischio che richiama la regola 80-20 (Principio di Pareto).

La pianificazione della manutenzione sulla base dell'analisi dei rischi consente di valutare gli interventi manutentivi convenienti, che consentono di ridurre al minimo le conseguenze (relative alla sicurezza, all'economia ed all'ambiente) di

un'interruzione o guasto del sistema. Ciò, a sua volta, dà luogo ad una migliore schedulazione delle attività ed utilizzazione del capitale. Inoltre, le strategie di manutenzione sulla base del rischio, possono essere impiegate per implementare le politiche manutentive già esistenti attraverso procedure decisionali ottimali, nelle diverse fasi del ciclo di vita di un sistema [23].

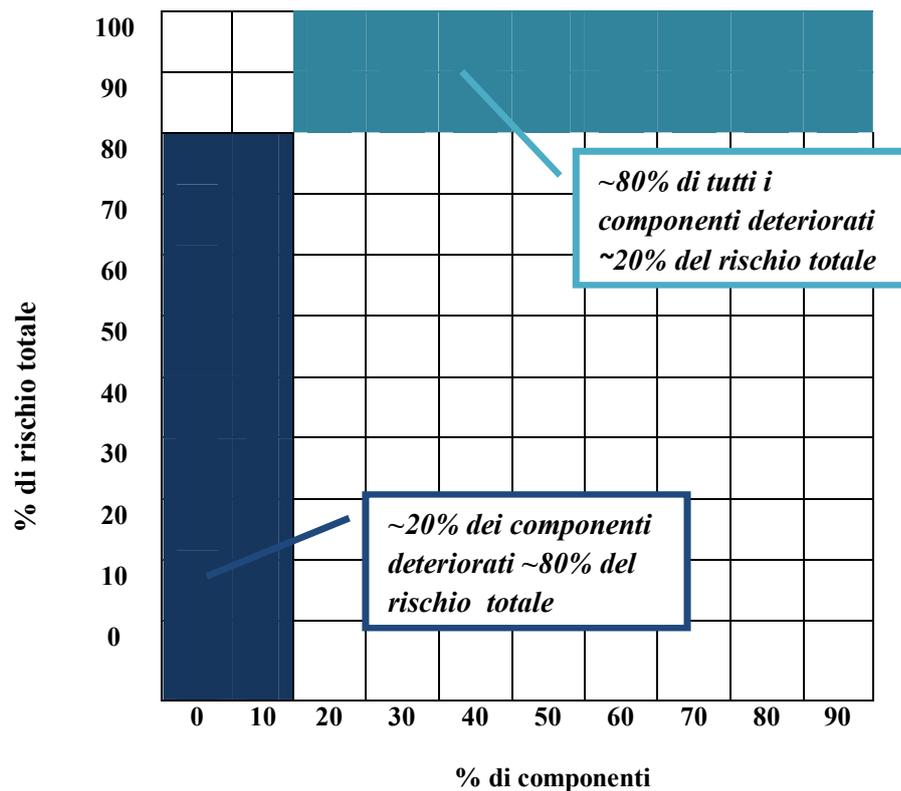


Figura 6 - Contributo tipico dei singoli componenti sul rischio totale di un impianto [22].

Uno dei principali obiettivi di una strategia di manutenzione solida è la minimizzazione dei rischi, sia per l'uomo che per l'ambiente, causati dai guasti improvvisi delle apparecchiature. Utilizzando un approccio basato sul rischio si assicura una strategia che risponde a questi obiettivi. Tale approccio utilizza informazioni ottenute dallo studio dei modi di guasto e dalle loro conseguenze economiche e tenta di rispondere alle seguenti domande:

- Quale criticità potrebbe comportare un guasto al sistema?
- Come si può verificare tale guasto?

- Qual è la sua probabilità di accadimento?
- Quali sarebbero le conseguenze qualora ciò si verificasse?

In questo contesto, il rischio può essere definito qualitativamente o quantitativamente come la seguente coppia di parametri per un particolare scenario di guasto.

$$\text{Rischio} = \text{Probabilità di guasto} \times \text{Magnitudo del danno}$$

L'output di una valutazione quantitativa del rischio sarà tipicamente un numero, che potrebbe essere utilizzato per dare la priorità ad una serie di componenti valutati come rischiosi. La valutazione quantitativa richiede un'elevata numerosità di dati sia per l'analisi probabilistica che per la valutazione delle conseguenze. Per determinare la probabilità che una certa sequenza di eventi possa tradursi in una determinata conseguenza, vengono spesso utilizzati strumenti quali l'albero dei guasti o delle decisioni.

La valutazione qualitativa del rischio è, invece, meno rigorosa ed i risultati sono spesso presenti in forma di matrice di rischio, dove un asse della matrice rappresenta la probabilità e l'altro rappresenta la severità del danno. Se a ciascun parametro viene attribuito un valore, può essere calcolato un certo valore di rischio. È importante riconoscere che il valore qualitativo del rischio è un numero relativo che ha poco significato al di fuori dell'ambito della matrice. All'interno della matrice, fornisce un grado priorità naturale per i componenti valutati utilizzando il suddetto approccio. Tuttavia, poiché tali valori di rischio sono soggettivi, le priorità basate su questi indici sono sempre discutibili.

La strategia di manutenzione basata sul rischio (RBM) mira, quindi, a ridurre il rischio complessivo di danno alle strutture operative. Nelle aree di rischio alto e medio, è necessario uno sforzo di manutenzione mirata, mentre in zone a basso rischio, lo sforzo è ridotto al minimo per ridurre la portata totale di lavoro e il costo del programma di manutenzione. La valutazione quantitativa del rischio è

maggiormente idonea per fornire le priorità alle attività di ispezione e di manutenzione [23].

1.4 La manutenzione verso l'industria 4.0

Dopo aver riportato lo stato dell'arte sulla manutenzione, esistente in letteratura fino ad arrivare all'ultimo approccio di tipo proattivo, non si può non considerare quello che sarà lo scenario degli aspetti manutentivi nell'industria 4.0, seppur una realtà non ancora ben consolidata ed attuata.

Il termine **Industria 4.0**³ indica un processo attraverso il quale le imprese ripensano e digitalizzano i loro processi produttivi rendendoli fortemente automatizzati integrando alcune nuove tecnologie produttive per migliorare le condizioni di lavoro e aumentare la produttività e la qualità degli impianti.

L'industria 4.0 passa per il concetto di *smart factory* che si compone di 3 parti:

- nuove tecnologie produttive che creano collaborazione tra tutti gli elementi presenti nella produzione ovvero collaborazione tra operatore, macchine e strumenti.
- 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.)
- tutto questo sempre con un occhio attento ai consumi energetici, creando sistemi più performanti e riducendo gli sprechi di energia.

La chiave di volta dell'industria 4.0 sono i sistemi ciberfisici (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.

³ Definizione di Industria 4.0 tratta da Wikipedia

L'introduzione negli impianti di produzione dell'*Internet Of Things* e dei *Cyber Physical System* sta facendo evolvere di conseguenza anche l'approccio alla manutenzione. Il ricorso a sensori di nuova generazione e l'enorme mole dei dati generati stanno dotando le macchine di una propria autonomia nel fare autodiagnosi, ad esempio contando le ore di funzionamento, il numero di cicli, misurando grandezze analogiche o incrociando tutte o parte di queste informazioni. La manutenzione 4.0 trova quindi la sua giusta connotazione come "manutenzione predittiva", che grazie alle tecnologie introdotte nel nuovo paradigma industriale, può disporre di informazioni sul corretto funzionamento di macchine e/o impianti e di conoscere in anticipo lo stato di usura di molti componenti.

Una manutenzione predittiva, dunque, che fa ricorso a strumenti innovativi di monitoraggio e sorveglianza delle caratteristiche del processo produttivo, senza dover far più ricorso ai "tradizionali" controlli non distruttivi, dai quali si differenziano in quanto non necessitano di persone nella loro conduzione.

Un sistema di tecnologie che facilita il manutentore sia nella pianificazione preventiva che nella ricerca dei guasti.

Il nuovo approccio basato sull'*Internet-of-Things* e su sensori a basso costo connessi wireless, che consentono uno scambio di una quantità di dati in tempo reale dai sistemi di produzione ai sistemi di controllo che li devono interpretare ed analizzare. In quest'ottica, le attività del servizio di manutenzione predittiva ben si prestano ad essere gestite da remoto, quali ad esempio:

- settare i parametri di misura (frequenza, soglie, etc) sui sensori;
- valutare gli scostamenti rispetto ai valori di riferimento;
- operare in *cloud* e ottenere i risultati delle analisi;
- acquisire i dati raccolti secondo opportuni algoritmi;
- aggiornare i piani di manutenzione con i dati prelevati dal campo;
- analizzare i costi-benefici della ripianificazione della manutenzione programmata e di altre scelte.
- una volta acquisiti i valori delle variabili, eseguire in modo semplice e visuale il planning e lo scheduling degli Ordini di Lavoro.

In sintesi, i due aspetti chiave che caratterizzeranno la manutenzione nell'industria 4.0 e che ne contribuiranno allo sviluppo e consolidamento sono:

1. **manutenzione predittiva:** il cui obiettivo è ridurre a zero le perdite per manutenzioni a guasto o preventive. Il monitoraggio delle condizioni, la capacità di raccogliere ed analizzare i dati che provengono dalla macchina permettono di ridurre al minimo i tempi di fermo degli impianti.
2. **sviluppo delle competenze:** il tecnico di manutenzione non deve avere solo conoscenze operative, ma deve anche sviluppare le capacità di utilizzo di strumenti informatici e strumenti statistici di analisi e di previsione.

CAPITOLO II - Risk based inspection and maintenance

2.1 Risk based maintenance: contesto e ragioni dell'introduzione

Gli ultimi due decenni sono stati caratterizzati da un importante progresso nello sviluppo di nuove strategie di manutenzione. La rapida crescita in tale settore è stata motivata dall'aumento del numero, delle dimensioni, della complessità e della varietà delle attività materiali; con una maggiore consapevolezza dell'impatto della manutenzione sull'ambiente, sulla qualità, sulla redditività e non ultimo sulla sicurezza. È, infatti, il concetto di "*manutenzione per la sicurezza*" che è fortemente mutato a seguito dell'introduzione degli "standard di manutenzione". Questi ultimi sono stati introdotti dapprima nel campo dell'industria nucleare per la fase manutentiva dopo servizio, ottenendo risultati molto soddisfacenti in termini di riduzione dei guasti e di incertezza nella fase di servizio degli impianti. Successivamente, attraverso l'adozione del concetto di rischio e delle relative metodologie di misurazione, i suddetti standard sono stati estesi anche ad altri campi quali: industria chimica e di processo, centrali termoelettriche etc.

La RBM ha reso possibile l'integrazione del meccanismo di priorità degli interventi di ispezione nella pianificazione della manutenzione, focalizzando l'attenzione sui componenti che necessitano realmente delle azioni manutentive [24]. Il primo vantaggio conseguito è sicuramente un decremento di tutti i costi legati alla gestione della manutenzione, dal costo del personale a quello di indisponibilità dei macchinari. Il secondo, di gran lunga più importante del primo, è legato all'aspetto della sicurezza: quest'ultima non è affatto intaccata dalla riduzione del numero di ispezioni, anzi, credere di poter ispezionare tutti i componenti con lo stesso grado di priorità non avrebbe consentito la previsione della totalità dei guasti su una linea di produzione. Se la competitività di un'impresa risiede nel funzionamento a lungo termine dalle apparecchiature stesse, l'elevata capacità ottenuta tramite i meccanismi di RBM risulta piuttosto significativa [25].

La filosofia della seconda fase si basa su controlli preventivi, vale a dire riparazione di attrezzature/unità ad intervalli fissi e programmati a seconda dell'età o del tempo in servizio o per limitare il numero di guasti o riparazioni. Ulteriori evoluzioni delle politiche di manutenzione sono di tipo predittivo e proattivo, che mirano a ridurre i costi e migliorare l'affidabilità. Queste politiche più strategiche come la manutenzione su condizione, la manutenzione incentrata sull'affidabilità, il *computer-aided design* e i sistemi di informazione e di gestione sono stati adottati più di frequente dal 1980; però, il lavoro iniziale è stato introdotto nel 1960 [26]. Queste politiche possono essere considerate come la terza fase delle politiche di manutenzione. Nella maggior parte delle politiche relative alla terza fase che si estende per più di due decenni, tra il 1980 e il 2000, le decisioni di manutenzione erano prese sulla base delle condizioni di salute delle attrezzature/unità. Lo stato delle apparecchiature o unità veniva monitorato ad intervalli regolari o in modo continuo. La manutenzione preventiva veniva effettuata una volta che lo stato di salute dell'apparecchiatura/unità raggiungeva un livello di soglia predefinito.

La quarta generazione del ventunesimo secolo è stata riconosciuta come l'approccio più adattivo nel passato recente in cui le politiche di manutenzione sono caratterizzate da ispezione e manutenzione basata sul rischio (RBIM). Queste politiche sono note anche come politiche proattive [7]. L'obiettivo principale di queste politiche è quello di evitare il guasto e mitigare le cause alla radice prima che il guasto avvenga con conseguenze elevate. La differenza fondamentale tra la manutenzione predittiva e la manutenzione proattiva è che le decisioni nella precedente si concentravano principalmente sulle condizioni delle apparecchiature mentre la successiva considera il rischio di guasto.

La manutenzione su condizione è una delle più note e discusse politiche di manutenzione in letteratura a partire dal 2000 [8]. La CBM parte dal presupposto che un sistema subisca un processo di deterioramento casuale e il suo obiettivo principale è quello di effettuare una valutazione in tempo reale delle attrezzature per migliorarne l'affidabilità e ridurre i costi di manutenzione non necessari [27]. Generalmente, lo stato del sistema è monitorato attraverso un'ispezione perfetta

ad intervalli regolari e l'analisi dello stato è condotta per prendere le decisioni future di manutenzione [28]. Il monitoraggio e l'ispezione dello stato dell'attrezzatura sono condotti come processo on-line o durante il funzionamento o durante il tempo di arresto. Gli intervalli di questo processo sono stabiliti a tempo determinato, in continuo o in base al rischio. Il monitoraggio continuo può essere molto costoso, pertanto nella maggior parte dei casi il guasto è valutato sulla base di determinate condizioni, segnali o indicazioni [29]. Tale politica si concentra sull'affidabilità del sistema invece che sull'impatto delle conseguenze del guasto sull'ambiente e sull'uomo. Tuttavia, i risultati della valutazione dei risultati sono utilizzati per la valutazione del rischio, che è un fattore chiave delle politiche di manutenzione proattiva. L'integrazione delle conseguenze del guasto con la manutenzione su condizione ha gettato le basi per le politiche di manutenzione proattiva. La manutenzione e l'ispezione basata sul rischio (RBIM) è un approccio relativamente recente per la gestione dell'integrità degli *asset* e può essere considerata come un'estensione della manutenzione su condizione. RBIM è una strategia basata sulla necessità di assegnare le priorità in un piano di ispezione e di manutenzione in base al grado di rischio; ciò aiuta i *managers* a eseguire ispezioni su quei componenti ad alto rischio. La figura 7 mostra i processi qualitativi e quantitativi di valutazione dei rischi. Le tecniche quantitative sono utilizzate per stimare la probabilità e l'impatto. Le tecniche qualitative identificano i pericoli e modellano cause ed effetti. L'uscita è un valore qualitativo per le raccomandazioni circa l'identificazione e il controllo dei rischi. La consistenza dei risultati delle analisi di rischio si basa sui fattori quali stima della frequenza, incertezza e analisi di sensitività [7].

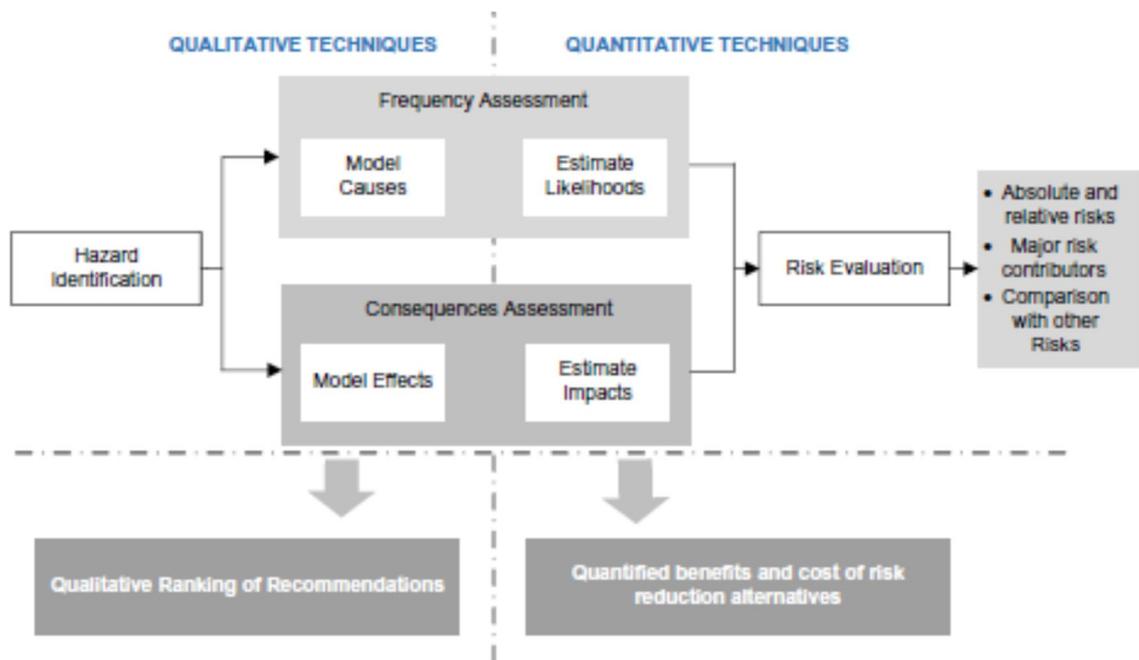


Figura 7–Il processo di valutazione del rischio [7].

Gli standard industriali disponibili per RBIM utilizzano per lo più tecniche qualitative. Le linee guida sull'ispezione basata sul rischio dell'*American Petroleum Institute* [20] utilizza un approccio assoluto di "cifra di rischio" per l'analisi di rischio qualitativa o semi-quantitativa. Diverse metodologie qualitative, semi-quantitative e quantitative riportati in letteratura, sono state utilizzate per la RBIM (ad esempio HAZOP, FMEA, analisi dell'albero dei guasti (FTA), analisi albero degli eventi (ETA)). I metodi deterministici e probabilistici e le loro combinazioni sono le tecniche utilizzate per l'analisi dei rischi. Tuttavia, il giudizio degli esperti è il fattore che più significativamente influenza i risultati delle analisi dei rischi. I problemi segnalati relativi per l'attuazione delle politiche RBM includono l'incertezza e la variabilità, le ipotesi conservative, la soggettività decisionale e le imperfezioni nei dati di ispezione. Le incertezze possono essere suddivise in quattro tipologie: (i) incertezze dovute alla mancanza di dati in modelli quantitativi, (ii) la soggettività nei modelli qualitativi, (iii) le indagini di previsione del difetto e (iv) la variabilità dei risultati dell'ispezione [12].

2.1.1 La metodologia di manutenzione basata sul rischio

La metodologia di manutenzione basata sul rischio è suddivisa in tre moduli principali (figura8):

1. *Determinazione del rischio*, che consiste nell'identificazione e nella stima del rischio;
2. *Valutazione del rischio*, che consiste nella definizione di criteri di accettazione del rischio;
3. *Pianificazione della manutenzione*, considerando i fattori di rischio.

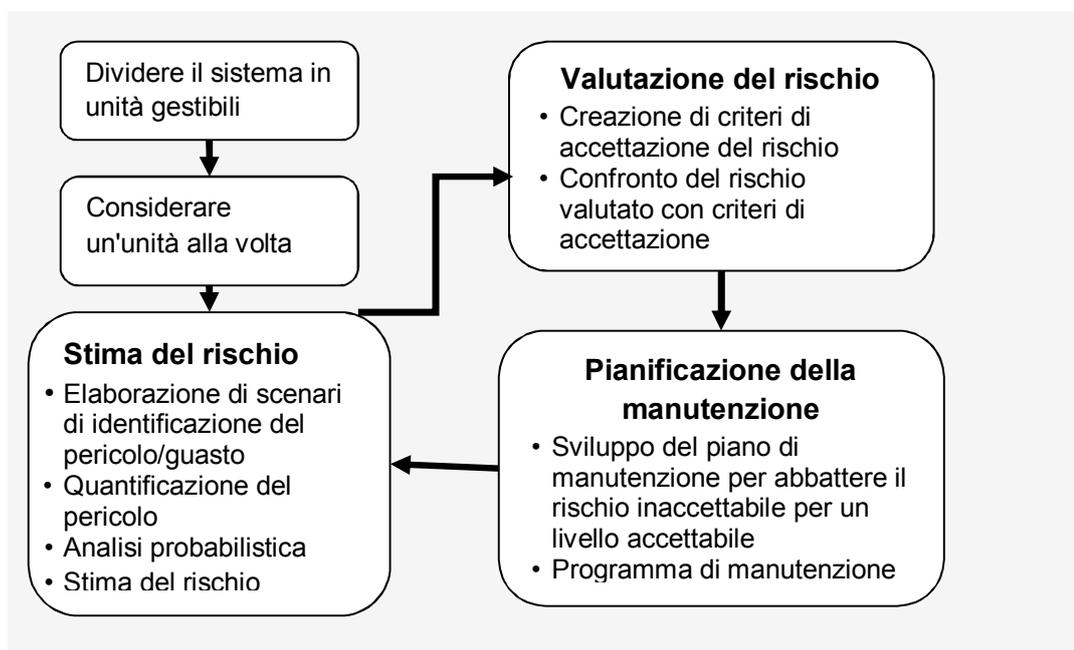


Figura 8 - Architettura della metodologia RBM [23]

Modulo 1: stima del rischio

Il primo modulo comprende quattro fasi, che sono logicamente collegate.

Step 1.1: Sviluppo dello scenario di guasto

Il primo passo è rappresentato dall'elaborazione degli scenari di guasto. Uno scenario di guasto è la descrizione di una serie di eventi che possono portare ad un guasto del sistema. Esso può contenere un singolo evento o una combinazione di eventi sequenziali. Di solito, un guasto del sistema si verifica come risultato

dell'interazione di una sequenza di eventi. La previsione di uno scenario non significa che quest'ultimo si produca realmente, ma che vi è una probabilità ragionevole che esso si verifichi. Tali scenari sono generati sulla base di caratteristiche operative del sistema; su condizioni fisiche per le quali si ha il corretto funzionamento; sulla geometria del sistema e sui dispositivi di sicurezza. Recentemente, Khan [30] ha proposto una procedura sistematica, per valutare gli scenari di guasto (incidenti) in un processo del sistema, definita "*Scenario di guasto massimo credibile*" (MCAS). La procedura introduce il concetto di scenari massimi credibili come alternativa alla metodologia corrente in base al caso peggiore, come raccomandato da molti enti di regolazione. Gli scenari di guasto sviluppati vengono poi proiettati in brevi liste e tra queste vengono scelte quelle che sono più rilevanti per il sistema.

Step 1.2: Valutazione delle conseguenze

L'obiettivo del passo 2, ovvero la valutazione delle conseguenze, è di dare priorità alle apparecchiature ed ai loro componenti sulla base del loro contributo ad un guasto del sistema. Inizialmente, le conseguenze sono quantificate in termini di raggio del danno (il raggio della zona in cui potrebbe facilmente verificarsi il danno), comprendendo danni ai beni (rottura di vetri, speleologia degli edifici) oppure effetti tossici (tossicità acuta, mortalità). I raggi del danno calcolati vengono successivamente utilizzati per valutare gli effetti sulla salute umana, sull'ambiente e sulla produzione. La figura 9 illustra la procedura per questo passo.

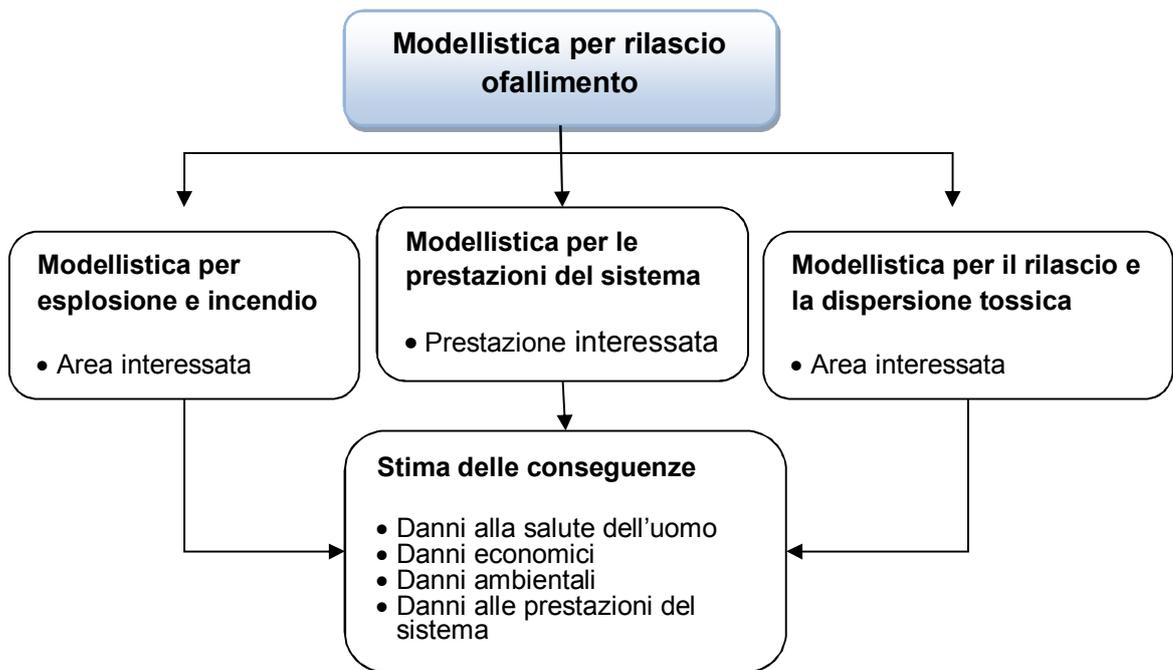


Figura 9 - Diagramma per la valutazione delle conseguenze [23]

La valutazione delle conseguenze comprende una varietà di modelli matematici. Ad esempio, i modelli sorgente vengono utilizzati per prevedere il tasso di rilascio di materiale pericoloso, il grado di incenerimento, e il tasso di evaporazione. I modelli per le esplosioni e gli incendi sono usati per predire le caratteristiche delle detonazioni, deflagrazioni ed incendi. I modelli intensità-impatto vengono invece utilizzati per prevedere le zone di danno dovuti a incendi, esplosioni ed il carico tossico. Infine, i modelli di gas tossici sono usati per predire la risposta umana ai diversi livelli di esposizioni a sostanze chimiche tossiche. Ci sono molti strumenti a disposizione per condurre questa analisi come WHAZAN, MAXCRED, RISKIT, ecc. [31].

La valutazione complessiva della magnitudo è una combinazione di quattro grandi categorie :

- *Perdita di prestazioni del sistema*
- *Perdita finanziaria*
- *Perdita della salute umana*
- *Ambiente e/o perdita ecologica*

Step 1.3: Analisi probabilistica

Il passo 3 viene effettuato utilizzando la *Fault Tree Analysis* (FTA). L'uso della FTA, insieme ai dati di guasto dei componenti ed ai dati di affidabilità, consente la determinazione della frequenza di accadimento di un incidente. Le caratteristiche principali di questa fase sono:

- *Sviluppo dell'albero dei guasti*: il *top event* viene identificato basandosi sullo studio dettagliato del processo, sul dispositivo di controllo, e il comportamento dei componenti dell'unità. Viene poi sviluppata una dipendenza logica tra le principali cause del *top event* (esito negativo).
- *La creazione della matrice booleana*: L'albero di guasto sviluppato si trasforma in una matrice booleana. Se la dimensione di tale matrice è troppo grande per essere gestita dal computer a disposizione, può essere applicata una tecnica di modulazione strutturale [32]. Questa tecnica propone la scomposizione dell'albero dei guasti di partenza, in un numero di moduli più piccoli con relazioni di dipendenza tra loro. Ciò riduce il problema di allocazione di memoria e rende il calcolo più veloce.
- *Individuazione delle sezioni di taglio minime e ottimizzazione*: le sezioni di taglio minime sono determinate attraverso l'algebra booleana [33]. Se il problema è stato strutturalmente modulato, ogni modulo è risolto in modo indipendente, ed i risultati sono combinati. I *cut sets* minimi sono quindi ottimizzati con una tecnica appropriata. L'ottimizzazione è necessaria per eliminare i percorsi non importanti (*cut sets*).
- *Analisi di probabilità*: i punti di taglio minimi ottimizzati vengono utilizzati per stimare le probabilità. Gli attuali autori raccomandano l'uso della Simulazione Monte Carlo [34] per questo scopo. I metodi di simulazione non solo forniscono la probabilità del verificarsi del *top event* ma forniscono anche informazioni sulla sensibilità dei risultati. Inoltre, la simulazione è utile per studiare l'impatto di ciascuno degli eventi scatenanti. Per aumentare la precisione dei calcoli e ridurre il margine di errore a causa di

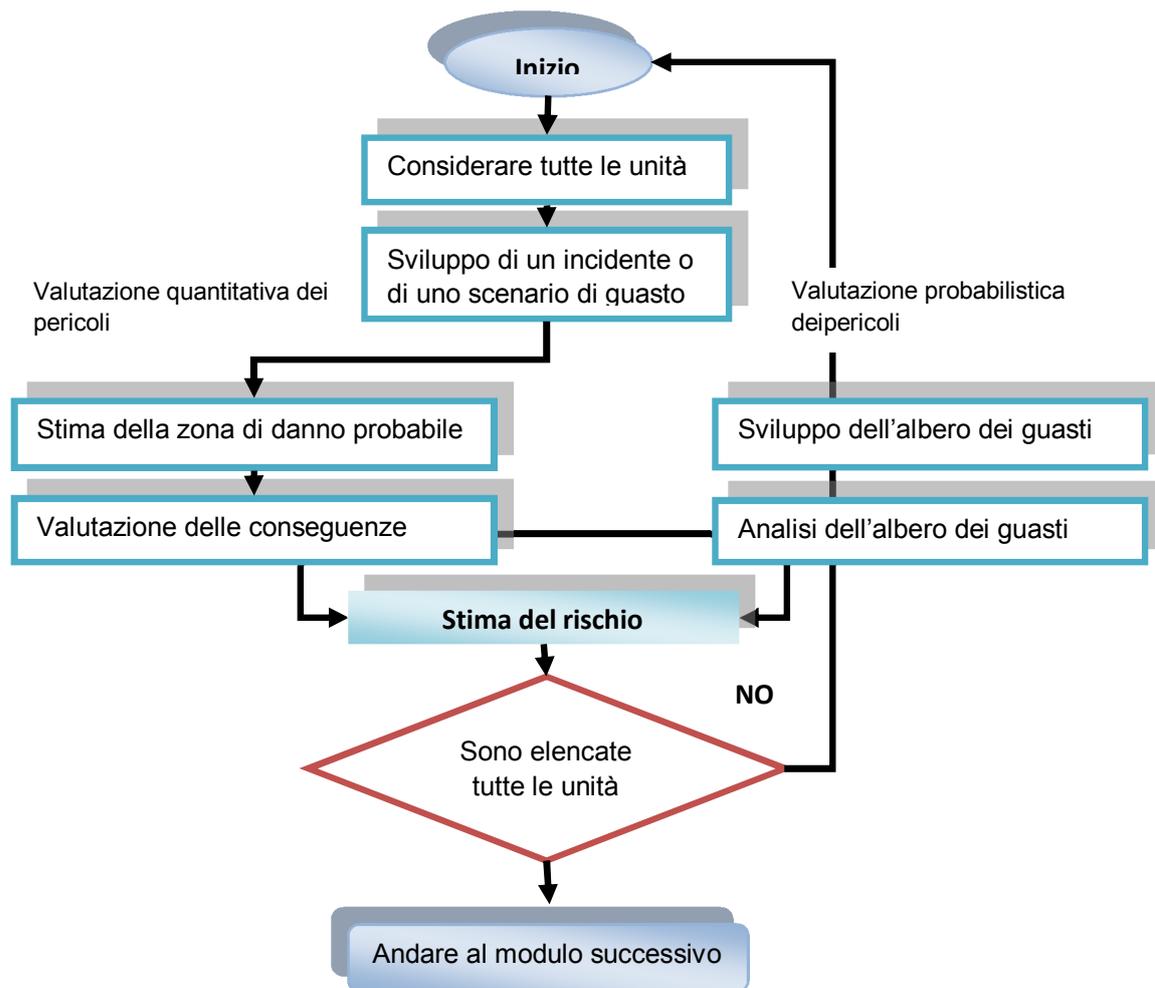


Figura 10 -Descrizione del modulo per la stima del rischio [23]

imprecisioni coinvolte nei dati di affidabilità degli eventi di base (avvio eventi), si consiglia l'uso di un set di probabilità *Fuzzy*.

- *La stima dell'indice di miglioramento*: L'indice di miglioramento fornisce una misura dell'impatto di ogni causa principale sull'evento guasto finale. Gli indici di miglioramento sono stimati utilizzando i risultati della simulazione. Per stimare l'impatto di una causa principale, la simulazione viene effettuata due volte: con e senza la causa. L'indice miglioramento viene quindi ottenuto come una misura della variazione della probabilità del verificarsi dell'evento finale.

Al passo 4 viene effettuata la stima del rischio: i risultati della magnitudo e le analisi di guasto probabilistiche sono poi utilizzati per stimare il rischio che può derivare dal guasto di ciascuna unità.

Modulo 2: valutazione del rischio

L'obiettivo di questo modulo è quello di valutare il rischio stimato considerando due fasi distinte:

- *Impostazione di un criterio di accettazione*: In questa fase, si identificano i criteri specifici di accettazione del rischio da utilizzare nel caso di specie. Sono disponibili in letteratura diversi criteri di accettazione, quali ad esempio ALARP (il più ragionevolmente basso possibile) e i criteri di accettazione USEPA.
- *Confronto del livello di rischio stimato con i criteri di accettazione definiti*: In questa fase, si applicano i criteri di accettazione per il rischio stimato ad ogni unità del sistema. Vengono identificate le unità il cui rischio stimato supera i limiti di accettazione. Queste sono le unità che dovrebbero avere un migliore piano di manutenzione.

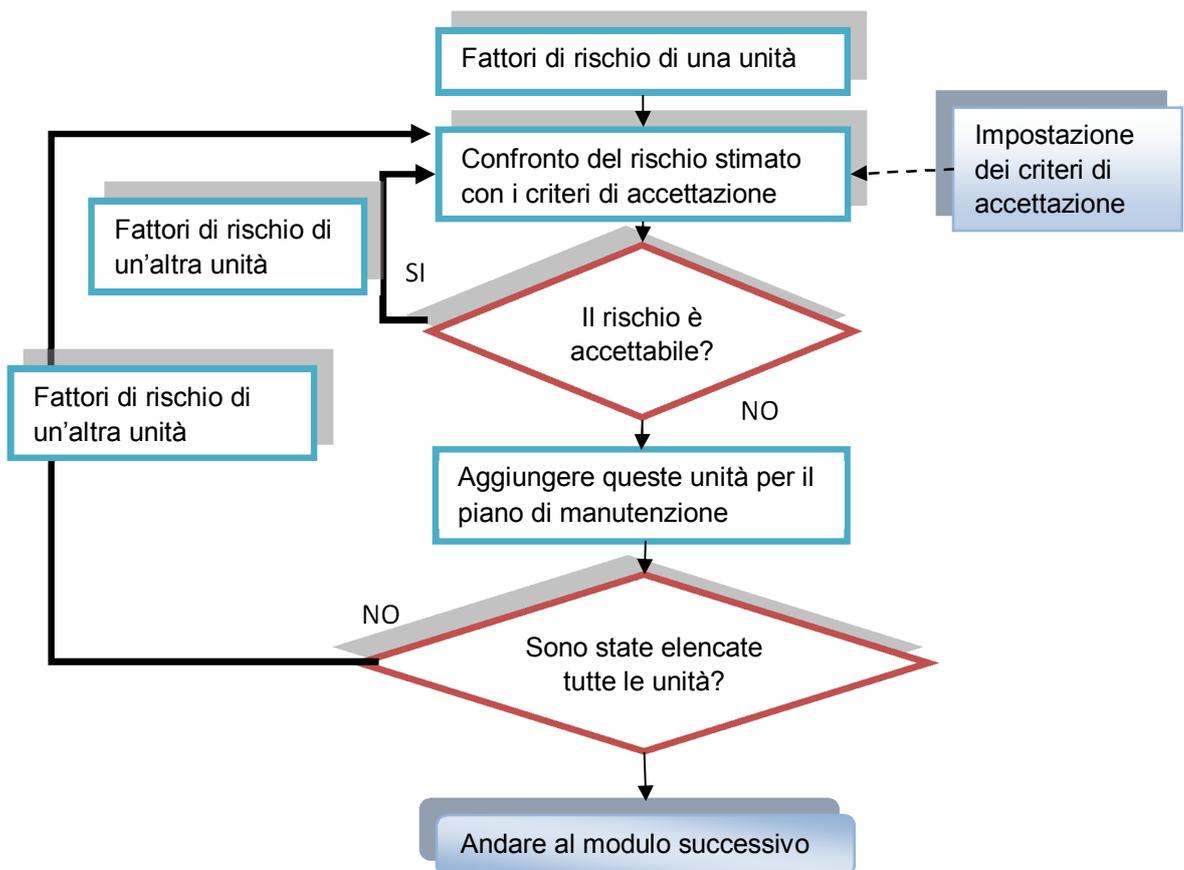


Figura 11 - Descrizione del modulo della valutazione del rischio [23].

Modulo 3: pianificazione della manutenzione

Le unità il cui livello di rischio stimato supera i criteri di accettazione sono studiate in dettaglio con la obiettivo di ridurre il livello di rischio attraverso un migliore piano di manutenzione. I dettagli di questa analisi sono riportati in figura 12.

In prima istanza viene stimata la durata di manutenzione ottimale tramite lo studio delle singole cause di guasto per determinare quale tra queste influenza maggiormente la probabilità di malfunzionamento. Viene poi eseguita una *Reverse Fault Analysis* (RFA) per determinare il valore desiderato della probabilità di guasto dell'evento radice. Il piano di manutenzione viene, poi, completato con le suddette informazioni. L'ultimo passo di questa metodologia mira a verificare che il piano di manutenzione sviluppato produca un livello di rischio complessivo con un grado accettabile per il sistema [23].

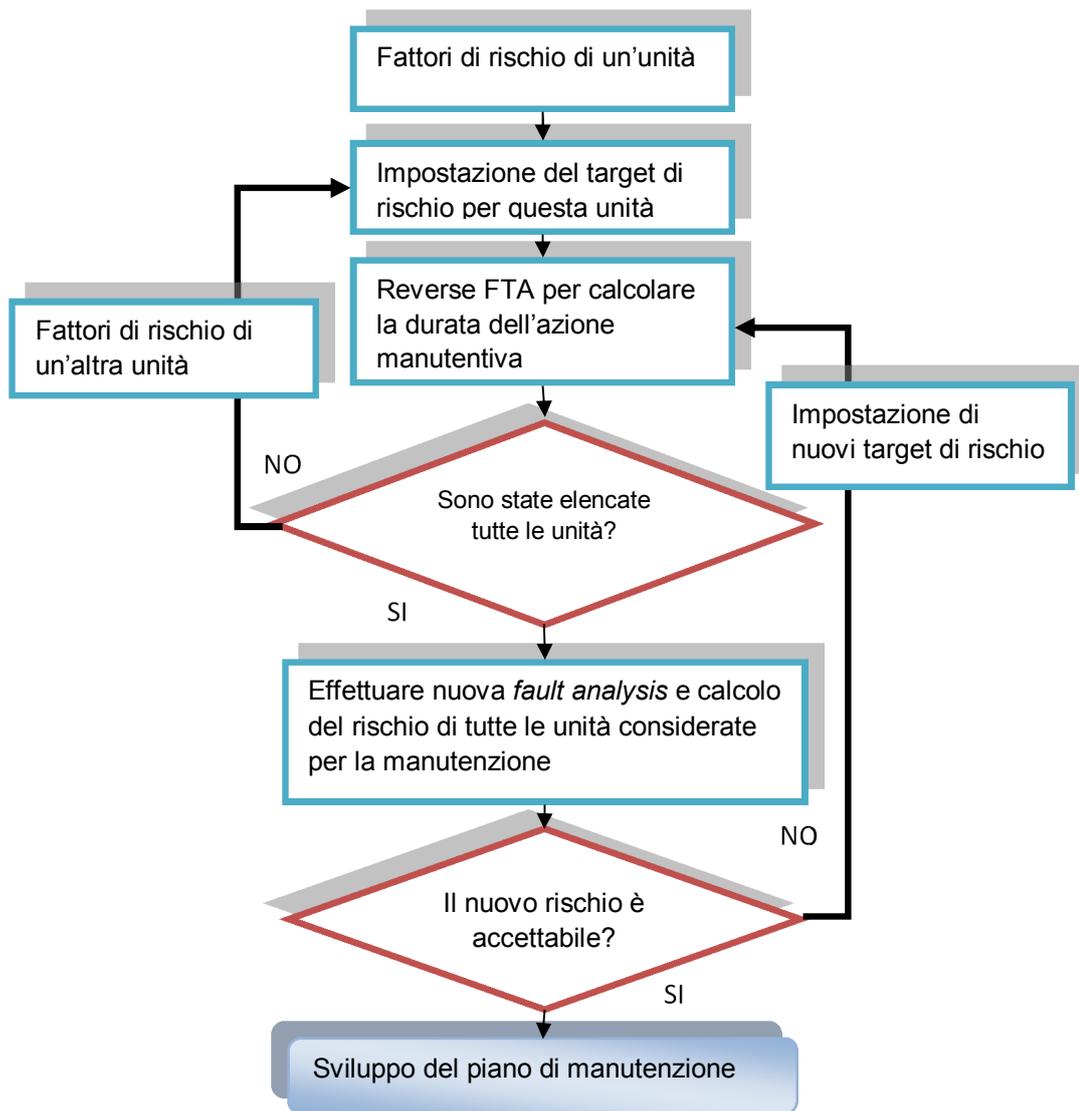


Figura 12 - Descrizione del modulo relativo al piano di manutenzione [23].

2.2 Risk based inspection and maintenance framework (RBIMF): approccio normativo

A partire dal 1990, gli approcci manutentivi industriali hanno subito un drastico cambiamento, passando da una prospettiva *time-based* ad una *risk-based*. Questa tendenza è stata guidata dal chiaro obiettivo di incrementare il tempo di produzione, riducendo i tempi di fermo macchina non pianificati dovuti a guasti del sistema, oppure a condizioni delle attrezzature non profondamente conosciute. In

generale, qualora un'industria fosse intenzionata ad adottare un approccio semplice per la gestione della manutenzione ed ispezione, è sufficiente che essa applichi pedissequamente criteri conservativi nella realizzazione del processo decisionale. Nel caso in cui, invece, si voglia utilizzare una logica basata sul rischio, vi è la necessità di implementare una analisi dettagliata e multidisciplinare che assicuri livelli accettabili di rischio legati alla sicurezza, alla salute, all'ambiente e non ultima alla produzione. Pertanto, una metodologia appropriata dovrebbe indirizzarsi verso i seguenti aspetti:

- ispezione e manutenzione di tutte le tipologie di componenti;
- raccolta di dati tecnici e manageriali da inserire nel piano ispettivo e manutentivo;
- schedulazione delle attività di gestione legate alle ispezioni, alle azioni manutentive ed alla valutazione della vita residua degli impianti, dei sistemi e dei componenti;
- ripercussioni sulla produzione e sulle *operations*.

Tali caratteristiche sono state inserite nel documento proposto dal CEN riguardante la metodologia RBIM nell'ambito della procedura RIMAP (*Risk-Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry*) che fornisce le linee guida per lo sviluppo di un programma di manutenzione/ispezione basato sul rischio, applicabile a diverse tipologie di industrie e a differenti attrezzature [35]. Tale documento sarà sostituito dal progetto di norma pr EN 16991:2016 – *Risk Based Inspection Framework* [36].

La nuova procedura proposta [36] si articolerà in sei macro fasi:

1. *Initial analysis and planning,*
2. *Data collection and validation,*
3. *Multilevel risk analysis,*
4. *Decisionmaking and action plan,*
5. *Execution and reporting,*
6. *Performance review/ evergreen phase.*

Ciascuna macro fase sarà approfondita nei paragrafi successivi.

Initial analysis and planning

Dopo aver preso la decisione di implementare la RBI in un particolare impianto o area, il primo passo è iniziare con una pianificazione e un'analisi preliminare. Questa fase consiste nei seguenti *steps*, compresi quelli effettuati dal management:

1. definizione degli obiettivi aziendali (ad esempio gli obiettivi di salute e sicurezza, ottimizzazione dei tempi (priorità) e definizione della data della prossima ispezione);
2. definizione dei sistemi, sub-sistemi e componenti da considerare, così come i rispettivi limiti;
3. definizione del perimetro di analisi, tra cui le condizioni di funzionamento e le condizioni eccezionali (ad esempio *start-up / shutdown*, guasti, incidenti, ecc);
4. valutazione delle fonti di dati disponibili (ad esempio i dati di progetto, la storia delle attrezzature, dati di ispezione dei componenti, PHA studi, ecc);
5. definizione di norme da prendere in considerazione;
6. specifiche del team;
7. strumenti (software) da utilizzare;
8. accettazione della metodologia e degli obiettivi coerentemente con le istituzioni competenti interessate (ad esempio management, ed autorità esterne).

Un'analisi sulla base del rischio può focalizzarsi su una rete di impianti, sul singolo impianto, su alcuni sistemi o ancora su certi componenti. Il primo passo da effettuare è dunque identificare il sistema o i sottosistemi di interesse. I sistemi sono generalmente definiti sulla base delle funzioni svolte e possono essere suddivisi in sottosistemi, al fine di creare una gerarchia funzionale che consenta di affrontare con maggiore facilità le criticità ad essi legate, quali ad esempio l'individuazione dei meccanismi di degrado dei componenti oppure la distribuzione della vita residua. Per stabilire il rapporto gerarchico, ogni sottosistema viene suddiviso in componenti che presentano delle interdipendenze di tipo strutturale, funzionale o stocastico. Per quanto riguarda il processo di identificazione dei sistemi e sottosistemi, esso può essere effettuato utilizzando le competenze degli operatori di manutenzione e di linea, attraverso la somministrazione di questionari in cui viene esplicitamente richiesta la valutazione qualitativa dell'impatto di un guasto

sulla sicurezza, sull'ambiente e sulla produzione [37]. Per quanto concerne invece l'individuazione dei componenti critici, tale processo può essere realizzato con l'ausilio di norme specifiche per il campo di interesse (come ad esempio gli standard internazionali API 580/ 581 per le raffinerie petrolifere, o ancora la normativa Seveso III per la sicurezza degli impianti industriali); oppure con l'ausilio di strumenti largamente diffusi quali l'analisi FMECA e di Pareto, per quantificare l'impatto del guasto di un componente sulla produttività, sulla sicurezza e sull'ambiente [38]. Per i sistemi e sottosistemi oggetto di osservazione, l'obiettivo dell'analisi è determinare le condizioni operative dei componenti e le situazioni eccezionali che potrebbero comportare guasti o malfunzionamenti del sistema. A tale scopo, risulta fondamentale identificare le fonti di informazione disponibili che possano fornire dati inerenti alla progettazione, alle operazioni ed alle ispezioni/manutenzioni. Prima di collezionare le informazioni, sarebbe opportuno stimare la qualità e la quantità di dati necessari per effettuare una valutazione consistente della probabilità e delle conseguenze di uno scenario di guasto. I dati possono provenire da differenti aree: dalla Produzione, dalla Manutenzione e dal Servizio Sicurezza [39]. I dati di cui si dovrebbe disporre riguardano:

- dati di progettazione,
- dati operativi,
- dati storici (manutenzione e registro delle ispezioni), qualora disponibili.

I dati dovrebbero essere bilanciati in base alle esigenze della domanda (sistema o componente), alla portata della valutazione, al livello atteso di dettaglio (o di incertezza accettabile) nei risultati.

Durante l'analisi preliminare si dovrebbe fare una breve panoramica dell'impianto o dell'unità e del suo funzionamento nel suo complesso e dovrebbe comprendere:

- storia del processo,
- requisiti specifici di funzionamento degli item dell'impianto,
- operazione di routine,
- fattori limitanti specifici per gli item dell'impianto,
- fattori che possono provocare condizioni anomali,

- possibili futuri problemi di processo,
- potenziali meccanismi di degrado e variabili di processo influenti e metodi usuali di mitigazione,
- panoramica della storia di ispezione, comprese le riparazioni e le alterazioni.

Quando non esistono dati, (per esempio la storia di ispezione, ecc), sia perché l'impianto o l'unità è ancora in fase di progettazione, un approccio conservativo del rischio deve essere applicato sulla base delle competenze ed dell'esperienza del *team* di RBI.

Data collection and validation

I dati raccolti devono poi essere validati e successivamente immagazzinati in un database. Il processo di validazione prevede che le informazioni afferenti ad una stessa categoria vengano confrontate, controllandone la compatibilità con limiti fisici e tecnici mediante l'ausilio di standard o linee guida. Il risultato di tale processo sarà una valutazione complessiva di tutti i dati rilevanti per la quantificazione del rischio dei componenti di interesse [36].

La raccolta e la convalida dei dati pertinenti documentati comprendono almeno:

a) i dati tecnici sulla progettazione, produzione e costruzione:

questi dati sono in gran parte specifici per impianto e componente, e sotto forma di dati numerici o diagrammi e disegni del processo e dei sistemi, dei componenti, dei materiali, dati di corrosione e dei sistemi di sicurezza. Questi dati di base descrivono anche i requisiti funzionali e possono indicare potenziali localizzazione dei guasti. La convalida dei dati può essere effettuata con confronti incrociati interni, confronto rispetto ai limiti fisici e tecnici del processo e confronto con i giudizi degli esperti;

b) la storia di manutenzione e di ispezione (compresa l'analisi dei guasti):

questi dati sono specifici dell'impianto e dei componenti, e di solito includono registrazioni dei risultati delle ispezioni ed le eventuali azioni correttive, come riparazioni o modifiche al sistema originale. Le registrazioni devono comprendere anche l'esperienza sulle modalità e cause dei guasti o altre anomalie di processo.

Registrazioni di precedenti analisi dei guasti, nonché i dati e i risultati di altre valutazioni dei rischi di sicurezza di processo (ad esempio RCM, QRA, PHA, HAZOP, etc.) possono essere considerati come input per l'analisi RBI.

c) storia operativa:

questi dati sono specifici degli impianti e dei componenti, e possono includere almeno alcuni record di log dell'operatore per identificare i periodi operativi transitori, start-up, shutdowns, e livelli di carico durante le diverse fasi di funzionamento. Questi dati misurano l'effettivo funzionamento, eventualmente anche le deviazioni da quanto previsto in progettazione. Per predire le prestazioni future è indispensabile considerare le future modalità di funzionamento, se si prevede essere diversi da quelle del passato.

d) sistema di sicurezza:

misure o barriere esistenti per il funzionamento di un impianto, in grado di prevenire o controllare qualsiasi pericolo, innescato da un evento indesiderato o per mitigare le conseguenze nel caso del rilascio di questo pericolo.

Le misure o barriere comprendono:

- parti di impianto, come ad esempio i sistemi di scarico della pressione, sistemi di rilevazioni del gas e di fumo;
- persone e procedure, come ad esempio procedure operative, formazione e competenza.

e) guasto generico e dati operativi di componenti simili:

dati generici sui guasti per componenti simili sono disponibili da varie fonti, dati generici su esperienza operativa sono in parte inclusi in queste fonti, anche se le informazioni disponibili possono variare ampiamente a seconda del caso e del componente. La convalida dei dati può essere principalmente eseguita confrontando tali fonti;

f) i dati economici sull'impianto:

questi dati possono in linea di principio specifici dell'impianto e del componente, ma spesso sono anche presi come generici per ciascun tipo di componente o tipo di azione su di esso. La validazione dei dati può essere eseguita con confronti incrociati

o chiedendo pareri ai fornitori. Le informazioni richieste devono includere anche il costo della perdita di produzione e i costi indiretti a causa ad esempio di multe, ristrutturazioni, ecc.

Multilevel risk analysis

In questa fase della metodologia vengono definite le caratteristiche fondamentali per la valutazione del rischio in termini di complessità e profondità dell'analisi, discriminando un'analisi preliminare da una dettagliata.

Per quanto riguarda l'analisi iniziale dei componenti, essa viene svolta in maniera rapida, semplice ed economica, esaminando una popolazione limitata di item. Generalmente i sistemi e le apparecchiature vengono suddivise in due gruppi: i componenti ad alto rischio e i componenti a medio/basso rischio. Soltanto per i primi verrà effettuata l'analisi dettagliata; mentre per i dispositivi caratterizzati da basso rischio sarà richiesta la minima sorveglianza, al fine di verificare ed assicurare che le assunzioni fatte in fase preliminare risultino ancora valide. Invece, per i componenti a medio rischio è necessario considerare ulteriori caratteristiche che consentano di decidere se eseguire la fase di analisi dettagliata o semplicemente un minimo controllo. Di solito, il livello iniziale di analisi è spesso sufficiente per evidenziare le aree dell'impianto con la più alta probabilità di guasto, eliminando dalle analisi successive le zone a basso e medio rischio [36]. Il risultato ottenuto sarà costituito dai seguenti parametri:

- Valore o categoria di **Probabilità di Guasto (PoF)** per la parte dell'apparecchiatura esaminata;
- Valore o categoria di **Conseguenze del Guasto (CoF)** per la parte dell'apparecchiatura esaminata;
- Valore o categoria di **Rischio** per la parte dell'apparecchiatura esaminata dalla Matrice di Rischio Preliminare.

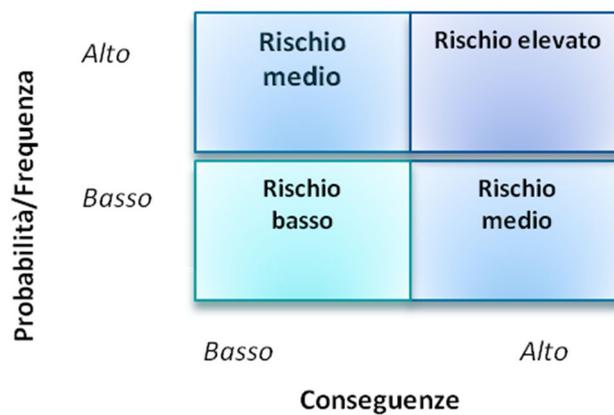


Figura 13-Matrice di rischio per l'analisi preliminare.

Per quanto concerne invece la fase di analisi dettagliata, essa si differenzia dalla precedente in termini di profondità richiesta per la valutazione del rischio. Infatti, per ogni sistema o gruppo di componenti ad alto rischio, viene identificato il meccanismo di degrado e viene stimata l'estensione del danno. Sulla base di queste informazioni possono essere determinati gli intervalli per le attività di ispezione e manutenzione, in accordo con l'esigenza che il livello di rischio sia ancora accettabile. Tale analisi si articola in cinque *steps* fondamentali:

- A. Identificazione dei pericoli;
- B. Identificazione dei meccanismi di degrado rilevanti e dei modi di guasto;
- C. Determinazione delle probabilità di guasto;
- D. Determinazione delle conseguenze di guasto;
- E. Valutazione del rischio.

Per l'individuazione dei pericoli, possono essere utilizzati diversi metodi quali: HAZOP; What-If Analysis e FMECA. Il compito di identificare i meccanismi di degrado rilevanti ed i modi di guasto risulta invece più complesso, in quanto è necessaria la conoscenza della funzione di guasto per poter listare tutti i possibili stati del componente durante i quali esso non svolge correttamente la *performance* richiesta. Inoltre dovrebbero essere inclusi non solo tutti gli eventi connessi ad uno specifico modo di guasto ma anche il tasso di deterioramento dell'attrezzatura. Generalmente, lo strumento utilizzato per risolvere tale problema è la *Root Cause*

Failure Analysis (RCFA), che consente l'approfondimento dei meccanismi di degrado rilevanti.

La figura 14 presenta un esempio delle varie tipologie di degrado ed i relativi meccanismi [36].

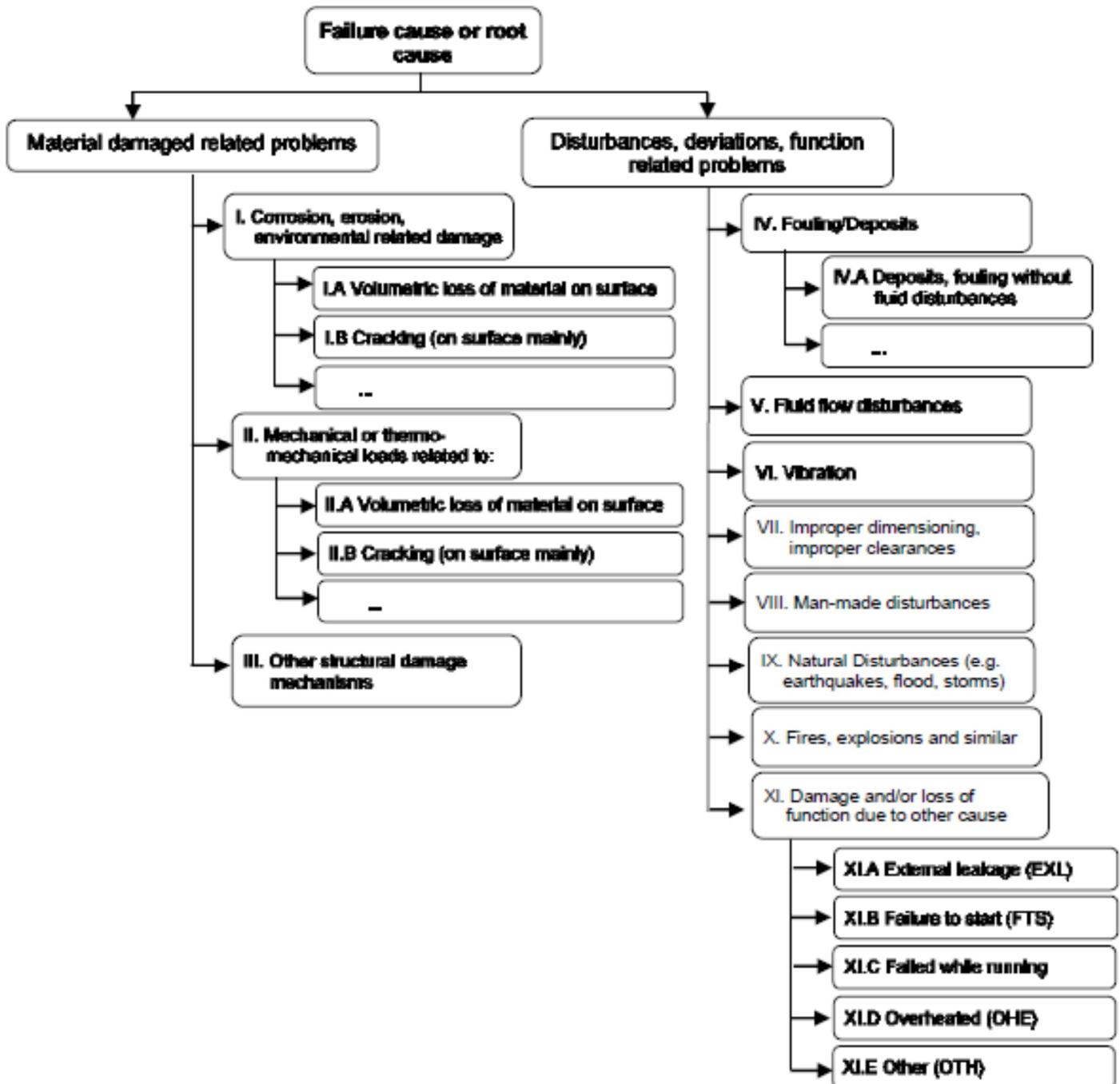


Figura 14 - Tipologie di danno e loro specifici meccanismi [36].

Una volta determinati i meccanismi di degrado per i componenti critici, è possibile determinare le probabilità di guasto necessarie per la scelta delle strategie manutentive da implementare. In generale, la procedura RBIM prevede l'utilizzo di tre differenti sorgenti di informazioni:

- i. Analisi statistiche dei dati storici;
- ii. Modellazione e previsione dei modi di guasto dei componenti;
- iii. Giudizio degli esperti.

Pertanto, la migliore stima della probabilità di guasto di un componente è fornita dalla combinazione di questi tre elementi.

Dal punto di vista logico, la stima della PoF avviene in due fasi sequenziali:

- 1) Valutazione degli scenari di guasto attraverso l'uso di due tipi di modelli:
 - Modelli *data-based* che considerano le incertezze di misura;
 - Modelli *life-based* che calcolano la vita residua di un componente sulla base dei meccanismi di degrado rilevanti.
- 2) Valutazione, controllo e calibrazione delle frequenze di guasto mediante l'utilizzo del giudizio degli esperti. Tali correzioni possono includere fattori quali:
 - Simili meccanismi di degrado già apprezzati in altre aree dell'impianto;
 - Cambiamenti nelle condizioni operative;
 - Indicazioni qualitative che evidenziano irregolarità nel processo.

Terminato il calcolo delle probabilità di guasto, si passa alla determinazione delle conseguenze di malfunzionamento considerando gli aspetti della salute, della sicurezza e della produzione [36].

La quantificazione delle CoF per gli aspetti sopramenzionati richiede calcoli di diversi parametri quali: le proprietà dei materiali, la presenza di persone nell'area a rischio etc.

Infine, calcolate le PoF e le Cof, è possibile valutare il rischio ed inserire i risultati nella relativa matrice, i cui livelli sono espressi in tabella 1.

Livello di Rischio	Criteri Decisionali
Molto alto	Definire il piano ispettivo e manutentivo per la riduzione del rischio, oppure effettuare opportune modifiche alle attrezzature
Alto	Definire il piano ispettivo e manutentivo per la riduzione del rischio.
Medio	Controllare se risulta possibile ridurre il rischio attraverso le azioni ispettive e manutentive a basso costo. Altrimenti trovare il costo ottimale.
Basso	Se non esiste alcun piano di ispezione e manutenzione, non è richiesta l'analisi dettagliata.

Tabella 1 -Esempio di criteri decisionali per ciascun livello di rischio [36].

In questa fase si è determinato il rischio per ciascun componente critico, sulla base delle informazioni dei componenti ad alto rischio e dei dati relativi ai meccanismi di degrado; attraverso i quali è possibile determinare gli intervalli di ispezione e manutenzione teorici. A questo punto si innesta la fase di *Risk Based Inspection*, ricordando che l'attività di ispezione consiste nella "verifica della conformità mediante misurazione, osservazione, prova o rilevazione dimensionale delle caratteristiche relative ad un'entità" [2]. Dunque le attività ispettive consistono principalmente nella stima dell'integrità strutturale delle attrezzature, mediante esami visivi o tecniche di controllo non distruttive, a supporto sia delle revisioni periodiche a cui i componenti pericolosi devono essere sottoposti, sia dell'adempimento alle verifiche di legge previste. In quest'ottica, le ispezioni rappresentano un sostegno per le attività manutentive, in quanto consentono di valutare se l'attrezzatura è in grado di eseguire la funzione richiesta, mediante la misurazione del suo stato prestazionale [40].

Con l'ausilio delle ispezioni si valutano quindi in maniera effettiva le condizioni dei componenti critici, correggendo le stime effettuate a priori senza la conoscenza del reale stato del componente, con le nuove informazioni raccolte nella fase RBI [41]. Il diagramma di flusso in figura 15 mostra il percorso affrontato in questa fase.

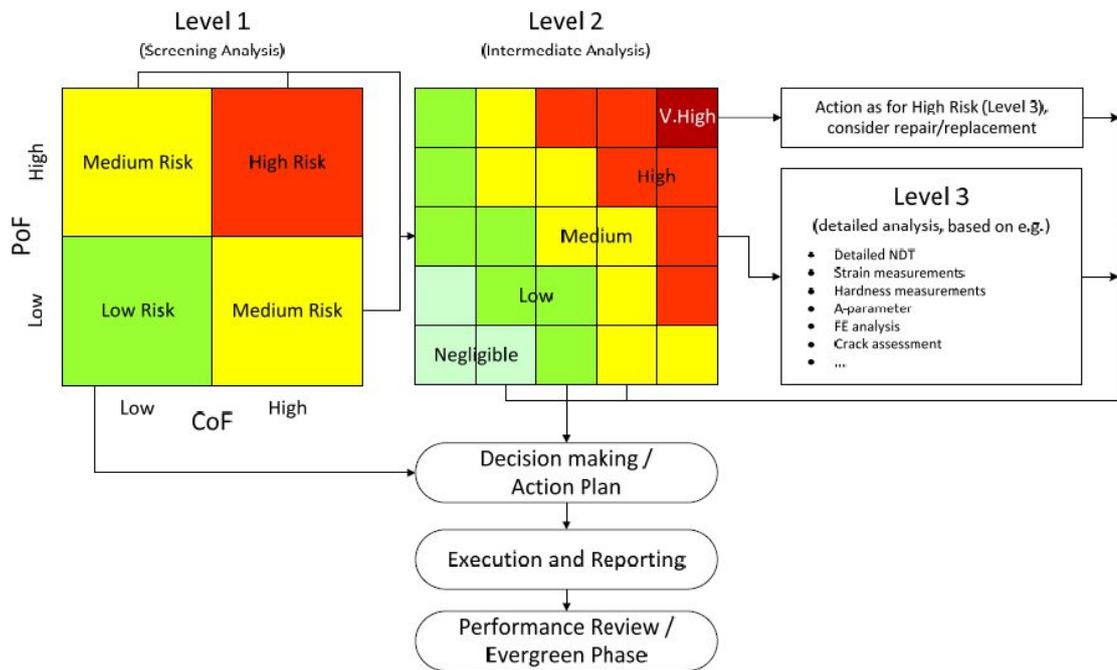


Figura 15 – Processo di risk analysis nell’ambito del RBIM framework [36].

I risultati derivanti dalla metodologia RBI consentono di stimare la probabilità di rottura di un’apparecchiatura, in funzione della distribuzione della vita media residua e dei possibili meccanismi di degrado; mentre le conseguenze di un guasto possono essere correlate alle condizioni operative in cui l’attrezzatura opera [40]. Nella pratica, i nuovi dati resi disponibili mediante le ispezioni, consentono di effettuare una rivalutazione della vita residua di un componente e di conseguenza di migliorare la stima dell’affidabilità dello stesso. I principali approcci utilizzati per valutare l’affidabilità sulla base dei dati collezionati sono generalmente due: il primo approccio deriva direttamente dalle funzioni empiriche di sopravvivenza riguardanti il tempo al guasto del dispositivo e vengono definite funzioni empiriche correlate ai dati (*Empirical Function Direct to Data*) [37]. Il secondo approccio, chiamato di Ricerca di Distribuzioni Teoriche (*Theoretical Distribution Research*), è il più complesso ma anche il più appropriato in quanto considera distribuzioni quali: Weibull, Esponenziale, Normale etc [42]. Tale approccio è preferibile poiché fornisce maggiori informazioni e soprattutto una valutazione migliore dell’affidabilità dei componenti. È opportuno osservare però che si potrebbe iniziare l’analisi con la

procedura EFDD e successivamente considerare la TDR. Sulla base delle nuove informazioni legate alla distribuzione della vita media residua e all'affidabilità, è possibile effettuare una rivalutazione del rischio, necessaria per le attività di RBM, attraverso le quali si definisce la programmazione degli interventi manutentivi. La schedulazione dei suddetti interventi si fonda sul concetto di stabilire una priorità in base al livello di rischio dei componenti, analogamente a quanto fatto per le ispezioni; con l'unica differenza che per la determinazione del livello di rischio viene calcolata una matrice di tipo qualitativo, in cui le valutazioni si basano essenzialmente sull'esperienza ed sul know-how di esperti del settore [36]. La gestione delle priorità diventa, dunque, una fase preliminare alla preparazione ed alla pianificazione dei lavori di manutenzione ed è frutto di una valutazione collegiale di un gruppo di lavoro multidisciplinare, costituito da esperti del reparto produzione, ispezione, manutenzione e sicurezza. In base agli accordi tra le diverse funzioni coinvolte nella definizione delle priorità, vengono stabilite sia le date entro cui gli interventi manutentivi devono essere completati, che i criteri di accettazione dei livelli di rischio, sulla base delle norme vigenti [40]. Quindi, il rischio di ciascun componente viene confrontato con il rispettivo livello di accettazione; se non è accettabile, è necessario impostare delle specifiche misure mitigative. Qualora il livello di rischio sia accettabile, è possibile passare alla fase successiva.

Decision making/action plan

Nel momento in cui il rischio risulta accettabile, è possibile implementare un piano di manutenzione che tenga conto, in prima istanza, dell'aspetto legato alla sicurezza ed all'ambiente, e che successivamente consideri l'aspetto economico; attraverso la stima dei costi relativi alle azioni manutentive da intraprendere ed alle politiche scelte. Sicuramente, nell'ambito del processo decisionale, il fattore economico assume un ruolo rilevante; per tale motivo, per ciascun componente critico analizzato, gli ingegneri della manutenzione, in collaborazione con lo staff di contabilità, reperiscono le informazioni legate ai costi degli interventi manutentivi, che ovviamente variano a seconda della politica adottata [37]. La scelta di

quest'ultima dipenderà sostanzialmente dall'obiettivo prefissato, che può consistere nella:

- Eliminazione delle cause di guasto;
- Regolazione del funzionamento del sistema;
- Riduzione del rischio di infortunio per il personale durante le operazioni ispettive e manutentive;
- Riduzione del rischio di introduzione di nuove cause di guasto [36].

Se si volessero perseguire concomitantemente tutti i suddetti obiettivi, i costi legati al processo di manutenzione risulterebbero elevatissimi. Per questo motivo, si richiede un'analisi di fattibilità che consideri non solo il budget a disposizione, ma la totalità delle risorse tangibili ed intangibili da impiegare nel ciclo ispettivo e manutentivo.

Execution and reporting

Nel momento in cui il piano di manutenzione proposto rispetta i vincoli di budget e di disponibilità delle risorse, esso viene eseguito. Normalmente gli interventi manutentivi coinvolgono tre tipologie di attività:

1. Interventi preventivi definiti sulla base delle valutazioni RBIM (manutenzione su condizione o programmata);
2. Azioni correttive eseguite in seguito a guasti improvvisi;
3. Guasti identificati mediante il *condition monitoring*.

In questo contesto si utilizza generalmente la *Risk Based Work Selection* (RBWS), per assegnare le priorità di intervento su scala giornaliera o settimanale, sia per le azioni correttive che per quelle preventive. Ciò è possibile perché nella pratica, circa il 40% dei suddetti compiti, può essere posticipato per diverse settimane. Perciò, lo strumento proposto, consente di selezionare non solo la politica manutentiva ottimale bensì anche il tempo in cui effettuare l'intervento, tenendo presente che l'allungamento dei tempi di ripristino o di controllo può incrementare il livello di rischio [36]. L'esecuzione dei lavori invece si articola in diverse fasi:

- La richiesta di intervento,

- L'emissione di un ordine di lavoro,
- Esecuzione,
- Controllo del lavoro eseguito,
- Evasione dell'ordine di lavoro,
- Registrazione dell'ordine nel sistema informativo[40].

Per quanto riguarda quest'ultimo punto, le organizzazioni moderne adottano un sistema di gestione della manutenzione computerizzato (CMMS) come strumento chiave per il coordinamento della funzione manutenzione con le altre funzioni aziendali. Tale sistema è costituito tipicamente dai seguenti moduli:

- Gerarchia dei guasti delle apparecchiature che costituiscono l'impianto;
- Informazioni tecniche;
- Piani di manutenzione;
- Ordini di lavoro;
- Reportistica sugli interventi eseguiti.

In particolare, la registrazione degli interventi eseguiti risulta di primaria importanza per diverse ragioni:

- Conoscere la condizione dell'attrezzatura prima e dopo l'intervento manutentivo, in quanto tale informazione consente di migliorare il modello di degrado utilizzato e dunque correggere le stime future in fase di pianificazione.
- Controllare i tempi e i costi del lavoro permettendo l'aggiornamento dei parametri riguardanti le risorse impiegate quali: ore di lavoro svolte, parti di ricambio utilizzate, strumenti adottati etc;

Dunque, una reportistica accurata rappresenta la chiave per analizzare ed aggiornare i piani di manutenzione, attraverso una serie di dati riguardanti:

- backlog – ordini non ancora evasi,
- guasti improvvisi,
- disponibilità delle attrezzature oppure perdite legate alle azioni di manutenzione,
- affidabilità dei sistemi di sicurezza,

- tendenze di parametri chiave del processo produttivo e manutentivo connessi all'affidabilità, alla disponibilità ed all'integrità.

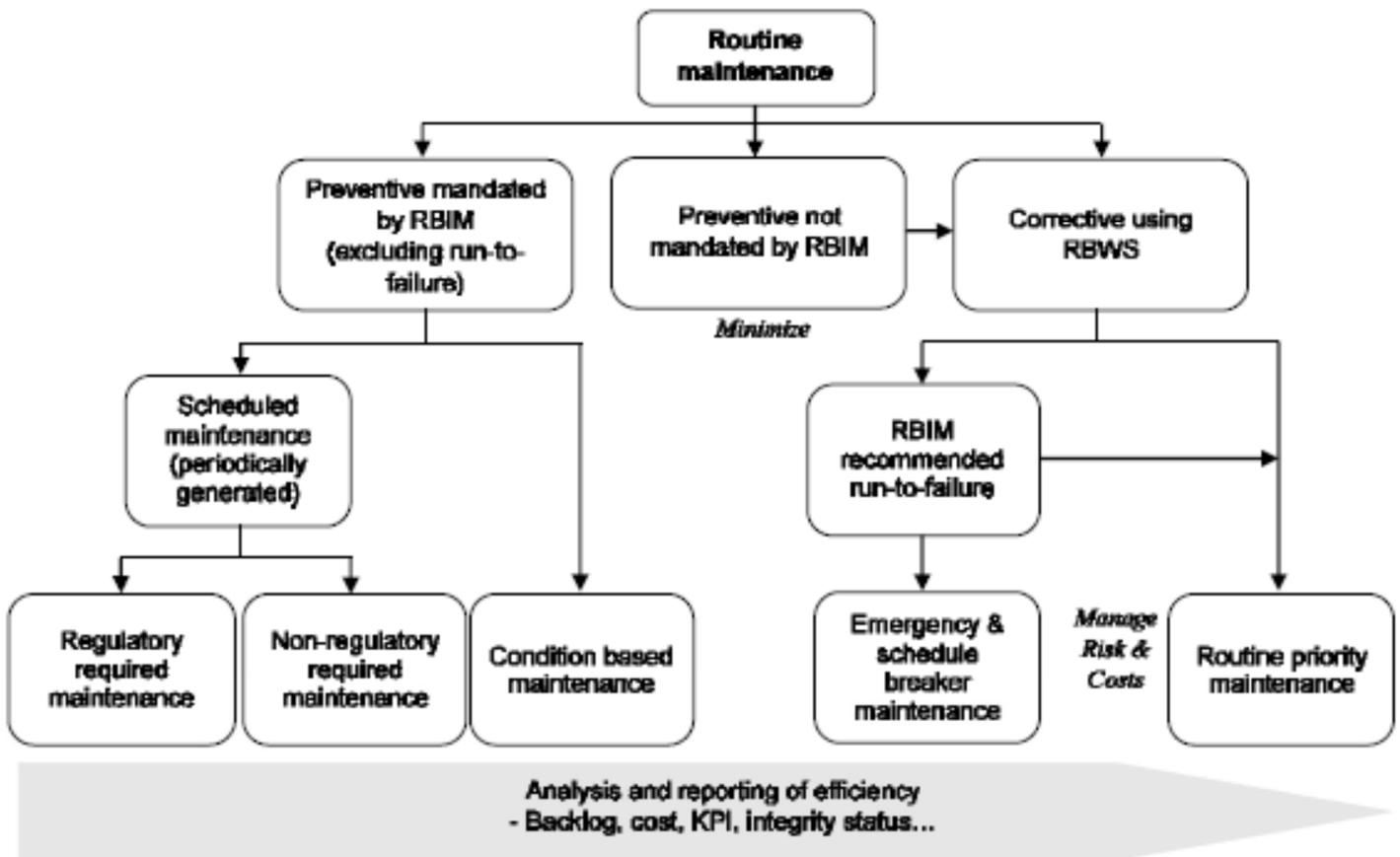


Figura 16 – Esempio di pianificazione della manutenzione mediante RBI [36].

Evergreen phase/ Performance review

A valle del processo di reportistica, è necessario poi considerare le attività di monitoraggio, che consentono di valutare l'efficienza e l'efficacia sia del sistema manutentivo che del sistema produttivo; individuando le criticità che limitano di fatto le prestazioni del sistema nel suo complesso. Dunque, attraverso i risultati del monitoraggio, si possono identificare le aree critiche suscettibili al miglioramento, che possono essere rintracciate sia nel piano manutentivo, compresa la sua esecuzione, che nel piano di produzione. Generalmente la fase di monitoraggio può essere realizzata mediante attività di *audit* oppure attraverso la definizione di una serie di indicatori di prestazione (*Key Performance Indicator*). Nel primo caso, gli

audit possono essere di tipo interno od esterno; quelli esterni forniscono, come valore aggiunto, la possibilità di avere un giudizio oggettivo sullo stato dell'arte del sistema produttivo. I KPIs rappresentano invece degli strumenti di misurazione degli scostamenti rispetto agli obiettivi prefissati e possono essere di natura economica, tecnica ed organizzativa. Inoltre possono essere definiti da diversi attori quali: *top management*, *maintenance management* o ancora dai tecnici della manutenzione. Un set di KPIs relativi al solo processo manutentivo, è proposto in tabella2 [43].

	TOP MANAGEMENT	MAINTENANCE MANAGEMENT	MAINTENANCE TECHNICIANS
ECONOMICAL INDICATORS	$\frac{\text{Total Maintenance Cost}}{\text{Asset Replacement Value}}$	$\frac{\text{Cost Spent in Maintenance}}{\text{Total Maintenance Cost}}$	$\frac{\text{Cost of training in Maintenance}}{\text{Number of Maintenance Personnel}}$
TECHICAL INDICATORS	$\frac{\text{Achieved up time During Require time}}{\text{Require time}} = \text{Op. Availability}$	$\frac{\text{Total Operating Time}}{\text{Total Operating time+DT related to failures}}$	$\frac{\text{Total Operating Time}}{\text{Number of Failures}} = \text{MTTF}$
ORGANISATIONAL INDICATORS	$\frac{\text{Planned and Scheduled Maintenance Man-hours}}{\text{Total Maintenance Man-hours Available}}$	$\frac{\text{Production Operator Maintenance Man-hours}}{\text{Total Production Operator Maintenance Man-hours}}$	$\frac{\text{Preventive Maintenance Man-hours}}{\text{Total Maintenance Man-hours}}$

Tabella 2 - KPIs per il processo manutentivo [43].

Lo schema sintetico dell'intera metodologia è rappresentato in figura 16.

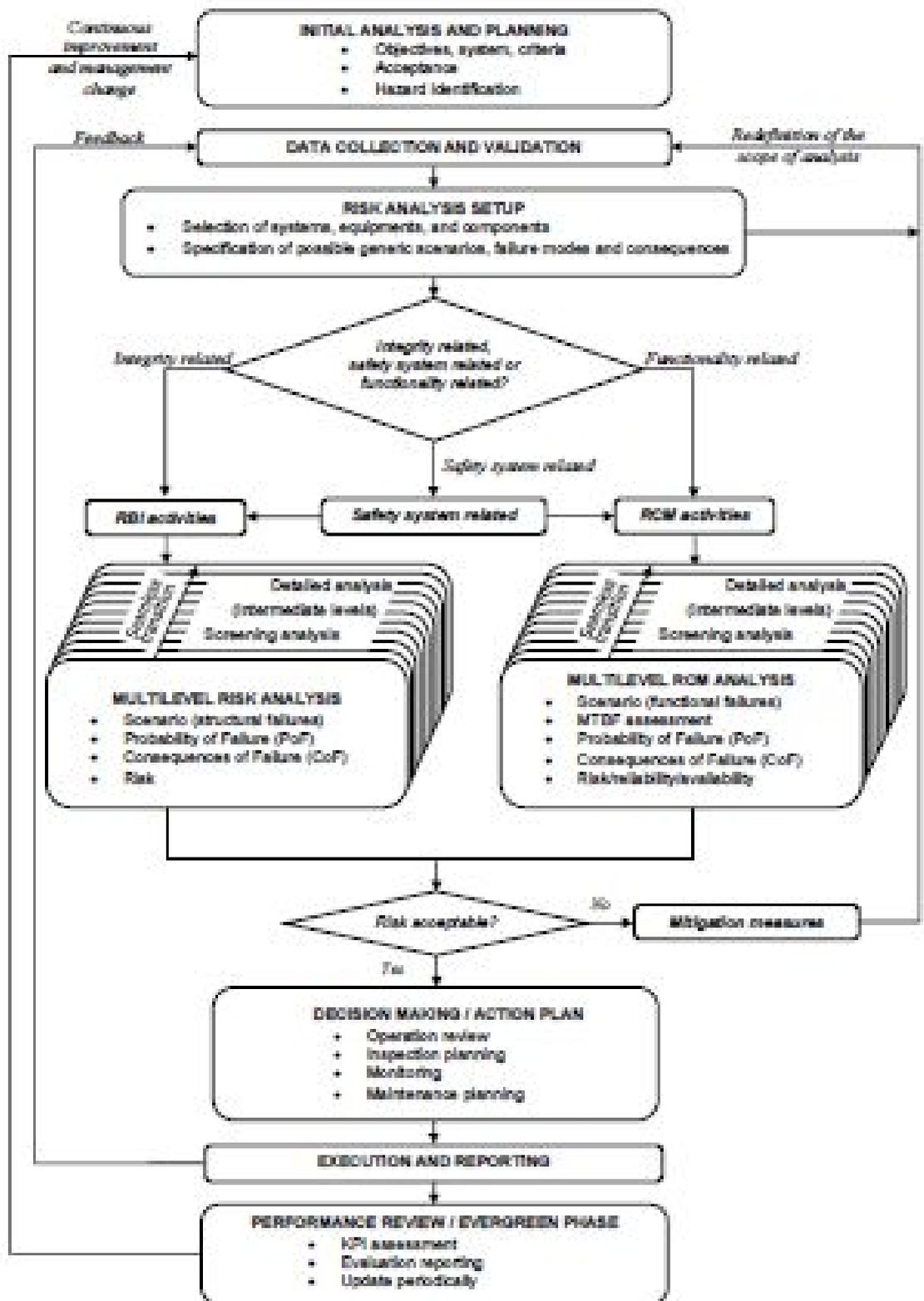


Figura 17 – Framework del RBIM all'interno del Management System[36].

2.3 Le ispezioni: strumento per l'implementazione della *Risk based inspection*

L'ispezione è un'attività di manutenzione che mira alla "verifica della conformità mediante misurazione, osservazione, prova o rilevazione dimensionale delle caratteristiche relative ad un'entità". Generalmente, l'ispezione può essere condotta prima, durante o dopo altre attività di manutenzione.

L'attività di monitoraggio si distingue dall'ispezione in quanto mira ad osservare lo stato attuale di un'entità e ne valuta qualunque cambiamento dei parametri nel tempo. Inoltre il monitoraggio è solitamente effettuato durante lo stato di funzionamento [2].

2.3.1 Tecniche d'indagine utilizzate per condurre un programma d'ispezione

Lo scopo di un programma d'ispezione è di definire ed eseguire quelle attività necessarie per rilevare il deterioramento in servizio di un'attrezzatura prima che si verifichino guasti. Un programma d'ispezione viene sviluppato identificando in modo sistematico:

- Che tipo di danno cercare.
- Dove cercarlo.
- Come ricercare il danno (con quale tecnica di ispezione).
- Quando (o quanto spesso) effettuare l'ispezione.

Alcuni dati devono essere disponibili per iniziare gli *steps* descritti in precedenza. I dati includono informazioni sulla progettazione e sulla costruzione delle attrezzature, le condizioni di processo a cui è esposta l'apparecchiatura e la sua storia.

I seguenti dati di base sono sufficienti a identificare la maggior parte dei meccanismi di danno:

Dati di progettazione e di costruzione:

- Tipo di attrezzatura e funzione
- Materiale di costruzione.

- Trattamento termico.
- Spessore.

Dati di processo:

- Temperatura.
- Pressione.
- Composizione chimica dei fluidi di processo.
- Portata.

Storia dell'attrezzatura:

- Dati della precedente ispezione.
- Analisi di guasto.
- Attività di manutenzione.
- Informazioni sulle sostituzioni.
- Modifiche.

I tipi di danno sono le caratteristiche fisiche del danno che possono essere rilevate da una tecnica d'ispezione.

I meccanismi di danno sono la corrosione o le azioni meccaniche che producono il danno. I tipi di danno e le loro caratteristiche sono stati sviluppati dai membri dell'API ed elencati in tabella 3 estratta dall'API 581.

I danni possono interessare in modo uniforme tutta l'attrezzatura, o può verificarsi localmente, a seconda del meccanismo in atto.

I danni che si verificano uniformemente possono essere ispezionati e valutati in qualsiasi zona dell'attrezzatura, in quanto i risultati sono rappresentativi della condizione generale.

Il danno che si verifica a livello locale richiede un controllo più mirato. Questo può comportare un'ispezione di un'area più ampia per garantire che venga rilevato il danno localizzato. Se il meccanismo di danno è sufficientemente ben noto da consentire la previsione della localizzazione di dove si verificherà, gli sforzi dell'ispezione possono focalizzarsi su quell'area.

Damage Type	Description
Thinning (includes general, localized and pitting)	Removal of material from one or more surfaces may be general or localized
Surface connected cracking	Cracking that is connected to one or more metal surfaces
Subsurface cracking	Cracking beneath the metal surface
Microfissuring/microvoid formation	Microscopic fissures or voids beneath the metal surface
Metallurgical changes	Changes to the metal microstructure
Dimensional changes	Changes in the physical dimensions or orientation of an object
Blistering	Hydrogen-induced blisters forming in plate inclusions
Material properties changes	Changes in the material properties of the metal

Tabella 3 – Tipi di danno e loro caratteristiche [44].

Le tecniche d'ispezione sono selezionate in base alla loro capacità di trovare il tipo di danno; tuttavia, il meccanismo che ha causato il danno può influenzare la scelta della tecnica di ispezione.

La tabella 4 riporta qualitativamente l'efficacia delle tecniche d'ispezione per ogni tipo di danno (elencati nella tabella 3). Un valore di efficacia è dato per ciascuna combinazione tipo di danno/ tecnica d'ispezione basato su osservazioni di varie fonti, tra cui la sottocommissione API sulle ispezioni. La selezione della tecnica d'ispezione dipenderà non solo dall'efficacia del metodo, ma sulla disponibilità dell'attrezzatura ad essere o meno sottoposta ad ispezione interna.

Inspection Technique	Thinning	Surface Connected Cracking	Subsurface Cracking	Microfissuring/ Microvoid Formation	Metallurgical Changes	Dimensional Changes	Blistering
Visual Examination	1-3	2-3	X	X	X	1-3	1-3
Ultrasonic Straight Beam	1-3	3-X	3-X	2-3	X	X	1-2
Ultrasonic Shear Wave	X	1-2	1-2	2-3	X	X	X
Fluorescent Magnetic Particle	X	1-2	3-X	X	X	X	X
Dye Penetrant	X	1-3	X	X	X	X	X
Acoustic Emission	X	1-3	1-3	3-X	X	X	3-X
Eddy Current	1-2	1-2	1-2	3-X	X	X	X
Flux Leakage	1-2	X	X	X	X	X	X
Radiography	1-3	3-X	3-X	X	X	1-2	X
Dimensional Measurements	1-3	X	X	X	X	1-2	X
Metallography	X	2-3	2-3	2-3	1-2	X	X
1 = Highly effective		2 = Moderately effective		3 = Possibly effective		X = Not normally used	

Tabella 4 – Efficacia delle tecniche di ispezione in funzione del tipo di danno da rilevare [44].

La tabella 4 fornisce alcune indicazioni in merito all'efficacia osservata di varie tecniche di ispezione.

. Per quasi tutti i tipi di danno, più di una tecnica d'ispezione può essere utilizzata, ognuna accresce l'efficacia dell'altra. Per esempio, misure di spessore ad ultrasuoni sono molto più efficaci a localizzare la corrosione interna se combinate con una ispezione visiva interna. Tuttavia, quando viene impiegata una combinazione di tecniche (ultrasuoni, radiografia, misure dimensionali e replicazione), i risultati sono generalmente soddisfacenti.

La scelta della tecnica d'ispezione più efficace al fine di individuare il danno per una determinata attrezzatura deve tener conto dei seguenti cinque fattori:

- Densità del danno e variabilità.
- Validità del campione d'ispezione.
- Misura di prova.
- Capacità di rilevamento dei metodi di controllo.
- Validità delle previsioni future sulla base delle osservazioni passate.

Un approccio rigorosamente quantitativo richiederebbe una descrizione probabilistica di ciascuno dei cinque fattori, ottenendo l'efficacia di ispezione come

un'espressione probabilistica. Tale approccio è troppo costoso e complicato per un approccio generale della RBI.

L'approccio RBI per valutare l'efficacia d'ispezione categorizza la capacità dei tipi di ispezione, o combinazioni comuni dei tipi di ispezione, per individuare e valutare in servizio il danno. Un esempio è la combinazione di ispezione visiva e ultrasuoni per la rilevazione e misura della corrosione generale. Le categorie di efficacia si basano sulla valutazione dei cinque fattori sopra menzionati. In base a questi fattori, le ispezioni sono classificati in base alla loro capacità di rilevare e quantificare il danno progressivo previsto. Le categorie di efficacia delle ispezioni sono:

- Molto efficace.
- Solitamente efficace.
- Abbastanza efficace.
- Scarsamente efficace.
- Inefficace.

Poiché l'approccio rigorosamente quantitativo non è di solito possibile con i dati disponibili, la valutazione RBI si basa fortemente sul giudizio professionale e sull'opinione dell'esperto.

L'efficacia di ispezione è qualitativamente valutata assegnando ai metodi di ispezione una delle cinque categorie descrittive elencate nella Tabella 5.

Qualitative Inspection Effectiveness Category	General Corrosion Examples
<p>Highly Effective</p> <p>Inspection methods correctly identify the anticipated in-service damage in nearly every case. (90%).</p>	<p>Assessment of general corrosion by complete internal visual examination coupled with ultrasonic thickness measurements.</p>
<p>Usually Effective</p> <p>The inspection methods will correctly identify the actual damage state most of the time. (70%).</p>	<p>Assessment of general corrosion by partial internal visual examination coupled with ultrasonic thickness measurements.</p>
<p>Fairly Effective</p> <p>The inspection methods will correctly identify the true damage state about half of the time. (50%).</p>	<p>Assessment of general corrosion by external spot ultrasonic thickness measurements.</p>
<p>Poorly Effective</p> <p>The inspection methods will provide little information to correctly identify the true damage state. (40%).</p>	<p>Assessment of general corrosion by hammer testing, telltale holes.</p>
<p>Ineffective</p> <p>The inspection method will provide no or almost no information that will correctly identify the true damage state. (33%).</p>	<p>Assessment of general internal corrosion by external visual examination.</p>

Tabella 5 – Le cinque categorie di efficacia delle ispezioni [44].

Nella norma API 581 - RBI, la riduzione dell'incertezza, legata al ricorso di una tecnica di controllo piuttosto di un'altra, è funzione dell'efficacia del controllo nell'identificare e quantificare il tipo e l'entità del danno. Alcune tecniche di ispezione sono migliori di altre, per esempio, nel rilevare assottigliamenti strutturali (corrosione generale - *thinning*). D'altra parte, una tecnica appropriata di controllo per la corrosione generale può non essere molto efficace nel rilevare e quantificare i danni dovuti all'assottigliamento locale o alle crepe (*cracking*) [44].

2.3.2 Competenze richieste nella gestione della manutenzione ed ispezione degli impianti

La gestione delle attrezzature richiede una serie di competenze. La competenza è avere, e dallo stesso tempo dimostrare, la necessaria conoscenza, capacità ed esperienza per svolgere uno specifico compito all'interno di un particolare contesto. Secondo le dimensioni delle organizzazioni e del tipo di attrezzature, le competenze chiave possono essere interne od esterne.

Le competenze chiavi necessarie per gestire apparecchiature, che contengono fluidi pericolosi e/o pressurizzati, sono i seguenti:

- Istruzione e formazione in ingegneria tecnica e meccanica.
- Comprensione delle prescrizioni della normativa vigente e di qualsiasi codice approvato per l'esercizio e la gestione delle attrezzature.
- Conoscenza dei codici e delle pratiche di progettazione e costruzione.
- Familiarità con l'attrezzatura in questione, insieme con il dettaglio della progettazione e dei materiali di costruzione, e le esigenze di gestione e manutenzione.
- Comprensione dei problemi metallurgici per i materiali da costruzione e l'effetto dell'ambiente in modo da prevedere e/o prevenire i possibili meccanismi di danno.
- Competenze necessarie per il funzionamento e la cura dell'attrezzatura.
- Conoscenza e capacità nel pianificare l'ispezione e la manutenzione per garantire la sicurezza.
- Esperienza nell'ispezione dell'impianto, tecniche di controllo non distruttivo, e la conoscenza delle loro applicazioni e limitazioni.
- Conoscenza e capacità nello svolgere compiti di manutenzione ordinaria e di sapere quando fare riferimento a imprese specializzate.
- Esperienza di saldatura, sia competenze pratiche e sia di ingegneria della saldatura.
- Capacità di gestione dell'organizzazione e garantire le azioni necessarie da intraprendere.
- Capacità di lavoro in squadra e comprensione dei ruoli degli altri.
- Capacità di comunicazione per garantire che tutti sappiano cosa sta succedendo [36].

2.4 L'ottimizzazione degli aspetti manutentivi: l'importanza del fattore umano

L'ambiente manutentivo, con la sua interazione tra uomo e macchina, è definibile come sistema complesso, e in quanto tale raggiunge facilmente livelli di criticità.

Analisi dettagliate dell'incidenza del fattore umano negli incidenti dovuti a errori nella manutenzione attribuiscono a esso percentuali molto elevate con livelli massimi raggiunti su base annua addirittura del 54% del totale [45, 46]. E' dunque ormai accettato che l'attività manutentiva sia in maniera sensibile influenzata dal fattore umano con interessamento di tutte le componenti dell'attività tecnica, vale a dire il livello base dei tecnici, quello intermedio dei responsabili delle ispezioni e anche del management responsabile dell'intero processo [47].

Gli errori che possono verificarsi nel corso della manutenzione, in particolare, sono:

- ispezioni, sostituzioni, riparazioni, modifiche omesse od eseguite in modo non corretto (mal fatte, incomplete, utilizzando dati non corretti);
- attrezzature o strumenti di controllo/misura mancanti o non adeguati;
- valutazioni errate per mancanza di conoscenza da parte degli operatori;
- parti di ricambio mancanti;
- condizioni ambientali sfavorevoli (temperatura, luce, rumore, ecc);
- tempi a disposizione per l'intervento troppo ristretti;
- carichi di lavoro eccessivi (stanchezza);
- problemi personali (stato fisico, aspetti privati, demotivazione, contrasti, ecc);
- condizionamenti organizzativi (costi, rapporti personali, ecc.);
- lubrificazioni inadeguate;
- pannelli non chiusi, tappi non installati, oggetti dimenticati;
- collegamenti elettrici invertiti;
- regolazioni errate;
- errato serraggio di bulloni;
- mancate frenature;
- danneggiamento durante l'installazione;

Indicativamente si è rilevata la seguente casistica nella tipologia di errori:

- Omissioni: 56%
- Installazioni non corrette: 30%
- Montaggio di parti non idonee: 8%

Gli errori di manutenzione sono causa indiretta di incidenti in numerosi casi.

Nella manutenzione inoltre gli effetti negativi di eventuali errori possono non essere immediatamente rilevabili dagli operatori successivi (difetti latenti) ed avere quindi conseguenze difficilmente prevedibili e mitigabili.

Cause frequenti di incidenti e inconvenienti sono carenze nelle comunicazioni e nel coordinamento delle persone all'interno delle organizzazioni. Ad esempio il momento del cambio turno è delicato per il passaggio di consegne che può generare disguidi dovuti a informazioni incomplete sullo stato dell'avanzamento dei lavori e delle valutazioni delle parti in corso.

L'errore umano non sarà mai eliminabile del tutto, e non sarà nemmeno controllabile completamente. E' necessario, dunque, costruire delle strategie per poter gestire l'errore nelle organizzazioni e questo è possibile solo con un approccio sistemico al problema.

Anche se per l'individuazione dell'intervento il manutentore può essere guidato ed integrato con strumentazioni sempre più numerose e sofisticate, l'esecuzione dipende solo dalla capacità dell'operatore, vale a dire dal "Fattore Uomo". Nella pratica manutentiva emerge sempre più l'importanza dell'operatore e la sua capacità di eseguire al meglio l'intervento nelle modalità e correttezza richieste e nel tempo di esecuzione. Se è fondamentale, per un continuo miglioramento dell'efficacia del servizio manutenzione, individuare gli interventi necessari con le diverse tecniche di politica manutentiva, è altrettanto se non più importante l'esecuzione corretta di detti interventi.

Il "Fattore Uomo" si misura nella capacità di svolgimento del proprio ruolo che si riassume nei seguenti punti:

- Interpretazione della segnalazione strumentale;

- Capacità di analizzare le richieste d'intervento, selezionando le segnalazioni più importanti ed eliminando quelle dovute a falsi problemi;
- Capacità di risolvere il problema sempre, anche nei casi in cui non si disponga di quanto sarebbe necessario, quale la mancanza di pezzi di ricambio o dell'attrezzatura specifica;
- Scrupolosità nel seguire e controllare l'affidabilità ristabilita con l'intervento;
- Capacità di migliorare l'affidabilità delle macchine con opportune modifiche.

Da questa sintesi si intuisce l'importanza che la manutenzione deve dedicare al "Fattore Uomo". Tale importanza richiede di curare ed accrescere nell'uomo di manutenzione, con una continua attività formativa, la responsabilità e l'autosufficienza nello svolgimento del lavoro di sua competenza, la capacità di operare in autonomia, la disponibilità all'accrescimento continuo dell'utilizzazione della propria esperienza operativa [48].

Tutt'altro scenario apre invece l'industria 4.0, nel quale il manutentore non è più chiamato ad effettuare bene le operazioni di manutenzione, bensì deve avere capacità di utilizzo delle nuove tecnologie informatiche e capacità gestionali di *problem solving* che si potrebbero presentare dopo l'analisi e l'interpretazione di dati provenienti dalle macchine. Questo perché sarà possibile effettuare le azioni manutentive anche da remoto (tele manutenzione), abbattendo così molte criticità in termini di sicurezza legate proprio allo svolgimento del compito stesso.

CAPITOLO III - Il fattore umano nelle attività di manutenzione e d'ispezione

3.1 L'errore umano nello svolgimento delle attività di manutenzione e d'ispezione

Le operazioni d'ispezione e di manutenzione costituiscono dei fattori chiave per il raggiungimento degli obiettivi di produzione e di gestione di un'industria di processo. Durante l'esecuzione delle ispezioni e delle attività di manutenzione, un piccolo errore e un'omissione nel seguire una linea guida o una chiara procedura, non minimizzano solo tutti i vantaggi dell'ispezione e manutenzione, ma aumenta anche e cambia il tasso di guasto o il comportamento delle apparecchiature o del sistema a causa dell'introduzione di errori umani. Nonostante il progresso tecnologico raggiunto nella progettazione di attrezzature nella quale alta considerazione è posta per la manutenibilità, l'interfaccia uomo-macchina non può non essere considerata. In generale, qualsiasi processo d'ispezione e manutenzione che comporta lo smontaggio, il rimontaggio e/o sostituzione di componenti, richiede l'interazione umana e, in varie circostanze, creano la possibilità del verificarsi dell'errore umano che può portare alla sostituzione di una parte sbagliata o al montaggio della parte in una sequenza sbagliata [49].

Gli errori generati durante le ispezioni e le attività di manutenzione possono verificarsi immediatamente provocando la rottura prematura del sistema o in alcuni casi possono rimanere latenti per un certo periodo di tempo, fino a quando una combinazione di altri fattori accelera il meccanismo di degradazione e porta al guasto.

Le attività d'ispezione e manutenzione sono fondamentali per migliorare l'affidabilità e la disponibilità delle attrezzature. Queste attività sono svolte non solo sotto una forte pressione per portare l'impianto funzionante nel più breve periodo di tempo, ma anche in condizioni difficili e pericolose. Nonostante il progresso tecnologico raggiunto nella progettazione delle attrezzature e dei sistemi, si deve

tenere in conto dell'errore umano nell'esecuzione delle ispezioni e delle attività di manutenzione, poiché errori umani durante le suddette attività hanno già prodotto disastri (in milioni di dollari) come Flixborough, Three Mile Island, Piper Alpha e l'incidente di Bhopal.

Gli errori umani, quali l'errata interpretazione di disegni tecnici e manuali di manutenzione, formazione inadeguata, ambiente di lavoro povero, vincoli di tempo e di lavoro così come i pericoli derivanti dalle lavorazioni, sono solo alcuni dei fattori che influenzano la performance umana [49].

Swain e Guttman [50] hanno definito questi fattori come fattori che condizionano la prestazione umana (*Performance Shaping Factors*) e li hanno classificati in interni, esterni, o di stress correlati con la complessa interfaccia uomo-macchina nelle centrali nucleari.

Wilson e McCutcheon [51] riportano che il layout, la configurazione della postazione di lavoro, i sistemi di controllo, gli utensili, il rumore, le vibrazioni, l'illuminazione, la temperatura, la forza, la ripetizione, la postura, l'orario di lavoro, il carico di lavoro, il comportamento basato sulla sicurezza, le etichette, la segnaletica, le comunicazioni, la formazione, lo stress, l'affaticamento, la motivazione, sono le aree in cui dovrebbe essere considerato il fattore umano. Toriizuka [52] ha valutato l'importanza di ogni fattore che condiziona la performance umana dal punto di vista di efficienza del lavoro, di carico di lavoro e di affidabilità umana.

In letteratura sono state presentate diverse tecniche per stimare la probabilità di errore umano. Alcune delle principali tecniche sono *Success Likelihood Indexing Method (SLIM)*, *Technique for Human Error Rate Production (THERP)*, *Justified Human Error Data Information (JHEDI)* and *Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART)*. Kirwan ed altri [53, 54, 55] hanno confrontato e convalidato queste tecniche, nate in ambito aeronautico e nucleare, nel dettaglio.

3.2 Determinazione della probabilità dell'errore umano in manutenzione

Secondo Norman [56] e Reason [57], un "errore" si verifica in situazioni in cui un'azione viene eseguita sia intenzionalmente che involontariamente. Tuttavia, l'errore stesso e l'intenzione dell'azione sono spesso visti separatamente.

Sanders e McCormick [58], vedono gli errori umani come decisioni inadeguate che hanno un effetto negativo sull'efficacia e sul funzionamento del sistema di sicurezza. Essi sostengono anche che fornire un sistema di classificazione può aiutare ad organizzare i dati sull'errore umano e fornire informazioni su come essi possono essere evitati. Secondo Dhillon e Liu [59] i fattori che principalmente contribuiscono agli errori in manutenzione sono i difetti di progettazione riguardanti anche le attrezzature, la manutenzione e il layout della postazione di lavoro, e le difficoltà incontrate dai lavoratori, come ad esempio strumenti inadeguati di lavoro, la fatica ed i fattori ambientali, quali l'umidità, l'illuminazione, la temperatura, la formazione inadeguata, l'uso di manuali obsoleti di manutenzione e la carenza di adeguata esperienza. Ci sono invece alcuni fattori che possono migliorare l'ambiente di lavoro, così come la maggiore esperienza, la stabilità emotiva e l'assunzione di lavoratori che hanno una maggiore attitudine con l'ambiente di lavoro, in quanto può portare a meno fatica, più soddisfazione ed ad un migliore lavoro di squadra.

Nelson [60] ha evidenziato come che il verificarsi di incidenti a causa delle attività di manutenzione così come i sistemi di protezione per la velocità degli organi in movimento deve essere oggetto di attenzione nell'industria. In conclusione, lo studio dei fattori umani è un importante settore dell'ingegneria di processo e comprende la sistematica applicazione d'informazioni sulle caratteristiche umane e di comportamento per migliorare le interazioni uomo-macchina-sistema.

3.2.1 Affidabilità umana

Lo studio dell'affidabilità umana consiste nello studio di quei fattori interni ed esterni all'uomo che influenzano l'efficienza e l'affidabilità della performance del lavoratore; i primi sono tutti gli eventi casuali tecnici o sistemici (dovuti all'ambiente: attrezzature di lavoro, materiali utilizzati, luogo di lavoro, organizzazione del lavoro), che influenzano e alterano le condizioni di lavoro inducendo gli operatori in comportamenti erranei; i secondi, più difficili da prevedere poiché legati a caratteristiche individuali, sono correlati alle condizioni psico-fisiche che, per loro natura, non si prestano ad essere strutturati in modelli di comportamento sistemico [61]. Appare dunque chiaro quanto complesso sia lo sforzo compiuto in letteratura di proporre modelli di comportamento umano che favoriscano valori numerici di probabilità di errore al fine di prevedere e prevenire comportamenti non sicuri.

L'analisi dei fattori umani costituisce ad oggi un settore di studio fortemente interdisciplinare e non ancora ben definito, per cui non esiste una tassonomia completa ed universalmente accettata dei diversi tipi di errore umano e delle cause che li determinano. Una delle prime rappresentazioni strutturate del comportamento umano si basa su assunzioni e principi teorici della psicologia cognitiva che riconosce il processo cognitivo come dominio sul quale sono definiti gli errori umani. Tale modello è quello basato sul paradigma *information processing system* (IPS) che si riferisce alle funzioni cognitive e comportamentali fondamentali: percezione, interpretazione, pianificazione e azione [62].

Il modello di riferimento più utilizzato da coloro i quali si occupano di affidabilità umana è lo *skill-rule-knowledge* (SRK) postulato da Rasmussen [63] che, insieme alla tassonomia di errori associata, è una rappresentazione specifica del paradigma IPS. Rasmussen propone una classificazione del comportamento dell'uomo in tre diverse tipologie:

1. ***Skill-based behaviour***: comportamento di routine basato su abilità apprese. L'impegno cognitivo richiesto è bassissimo ed il ragionamento è inconsapevole,

ovvero l'azione dell'operatore in risposta ad un input è svolta in maniera pressoché automatica.

2. **Rule-based behaviour**: comportamento guidato da regole di cui l'operatore dispone per eseguire compiti noti, si tratta di riconoscere la situazione ed applicare la procedura appropriata per l'esecuzione del compito. L'impegno cognitivo è più elevato poiché implica un certo livello di ragionamento noto.

3. **Knowledge-based behaviour**: comportamento finalizzato alla risoluzione di problemi in presenza di situazioni non abitudinarie e conosciute, ma nuove o impreviste, per le quali non si hanno delle regole o procedure specifiche di riferimento. Questo tipo di comportamento è definito knowledge-based poiché richiede un elevato impegno cognitivo nella ricerca di una soluzione efficace.

La classificazione di Rasmussen può essere semplificata secondo lo schema di figura 18.

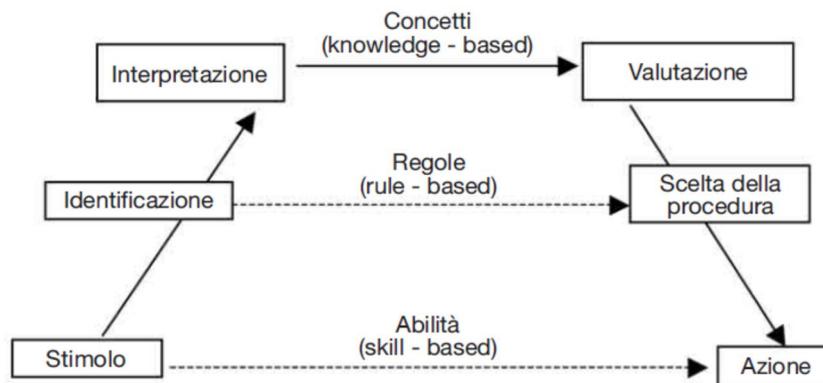


Figura 18 -Modello a gradini [64].

Ogni azione dell'operatore è preceduta da una serie di processi cognitivi che si svolgono secondo una struttura a livelli, ciascuno dei quali contiene funzioni cognitive diverse. La sequenza non è quasi mai né lineare né completa, ma si dispone secondo una scala dove, talvolta, si salta orizzontalmente per evitare gli scalini più alti e faticosi.

Il processo cognitivo che porta dallo stimolo all'azione, infatti, prevede tre differenti percorsi di complessità crescente che richiedono quantità di attenzione e di risorse cognitive via via maggiori. Alla base dello schema è collocato un comportamento

skill-based secondo il quale l'operatore, stimolato da un fatto (input: segnale, rumore, etc.) reagisce quasi istantaneamente eseguendo un'azione legata ad una procedura ben interiorizzata. A livello intermedio, si colloca un tipo di comportamento *rule-based* per cui l'operatore, sulla base delle informazioni ricevute ed eventualmente a valle di un comportamento *skill-based*, ordina una serie di azioni mediante l'uso di procedure e le esegue. A livello più elevato, si trova il tipo di comportamento *knowledge-based*, in cui l'operatore è chiamato a fare uso in modo creativo ed autonomo (cioè senza l'uso di procedure o di comportamenti istintivi) delle informazioni disponibili e delle sue conoscenze, al fine di produrre le valutazioni e le decisioni a cui conseguiranno le azioni opportune [65].

Sulla base del modello proposto da Rasmussen, Reason [66] ha individuato tre diverse tipologie di errore:

- **Slips**: errori di esecuzione che si verificano a livello di abilità. In questa categoria vengono classificate tutte quelle azioni eseguite in modo diverso da come pianificato, cioè l'operatore sa come dovrebbe eseguire un compito, ma non lo fa, oppure inavvertitamente lo esegue in maniera non corretta.

- **Lapses**: errori di esecuzione provocati da un fallimento della memoria. In questo caso l'azione ha un risultato diverso da quello atteso a causa di un fallimento della memoria. A differenza degli slips, i lapses non sono direttamente osservabili.

- **Mistakes**: errori non commessi durante l'esecuzione pratica dell'azione. In questo caso è il piano stesso a non essere valido, nonostante le azioni si realizzano come sono state pianificate. Possono essere di due tipi: *rule-based* e *knowledge-based*.

- **Rule-based mistakes**: errori dovuti alla scelta della regola sbagliata a causa di una errata percezione della situazione oppure nel caso di uno sbaglio nell'applicazione di una regola.

- **Knowledge-based mistakes**: errori dovuti alla mancanza di conoscenze o alla loro scorretta applicazione.

Il risultato negativo dell'azione risiede nelle conoscenze erronee che l'hanno determinata. Tale tipologia di errore è insita nella razionalità limitata o comunque

nella difficoltà di dare risposte a problemi che presentano un'ampia gamma di possibili scelte.

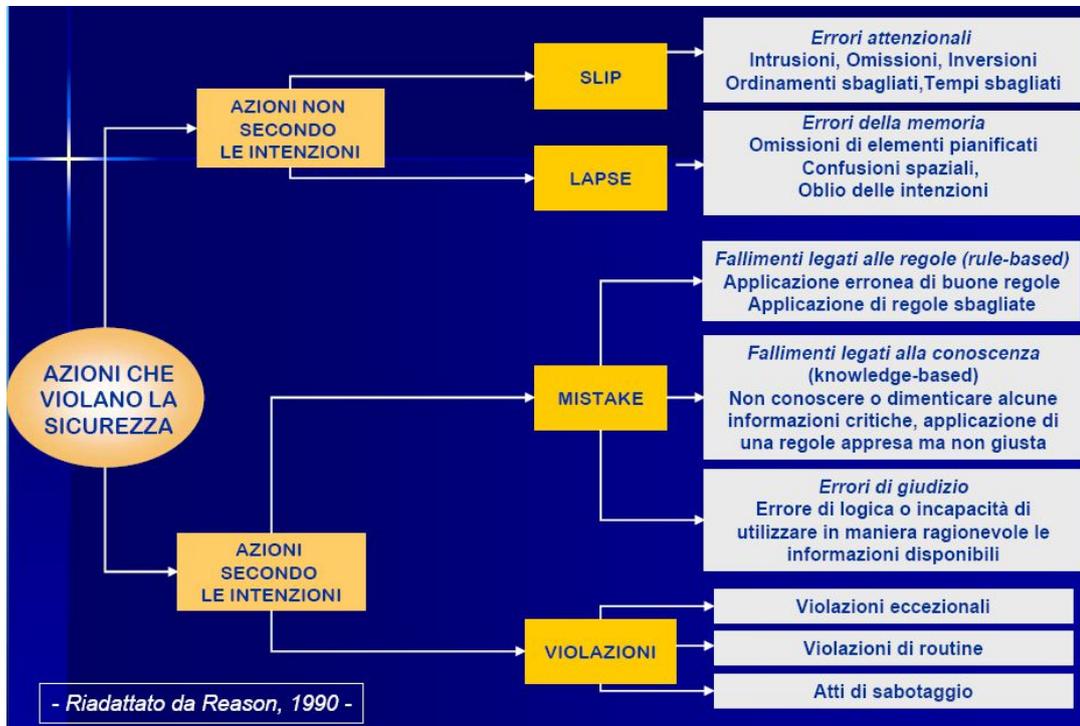


Figura 19 – Tipologie di errore [57].

3.2.2 Le tecniche per l'analisi dell'affidabilità umana

In letteratura sono presenti varie tecniche per l'analisi dell'affidabilità umana (*Human Reliability Analysis - HRA*), volte alla valutazione del rischio lavorativo derivante dall'errore umano.

Tali tecniche sono nate per andare incontro alle esigenze della valutazione probabilistica del rischio (*Probabilistic Risk Assessment - PRA*) al fine di quantificare il contributo dell'errore umano al verificarsi di un incidente. In quest'ottica l'approccio HRA può essere visto come una specializzazione della PRA sui fattori rilevanti dell'affidabilità umana, approccio che fornisce una valutazione più dettagliata dei rischi inerenti il sistema associati al fattore umano. Una valutazione probabilistica del rischio identifica tutti i rischi, compresi gli errori umani, cui il

sistema è esposto, dandone una stima quantitativa ed inserisce queste informazioni in un albero dei guasti o in un albero degli eventi. Lo sviluppo delle tecniche HRA è stato strettamente legato, in bene o in male, a quello dell'industria a rischio di incidente rilevante laddove gli incidenti di Seveso (1976), Three Mile Island (1979), Bhopal (1983), Chernobyl (1986), solo per citare alcuni tra i più disastrosi, hanno messo in luce il contributo sostanziale apportato dalla fallibilità umana al loro verificarsi.

Questi metodi differiscono principalmente nel modo in cui viene stimata la probabilità di errore umano (*Human Error Probability* - HEP), nel modello cognitivo assunto, nella tassonomia delle azioni errate e come i fattori che condizionano la prestazione (*Performance Shaping Factors* - PSF) possano influenzare la probabilità di errore.

Ci sono tre generazioni di metodi HRA. I metodi di prima generazione (quali THERP, HCR, HEART, ecc.) trattano il fallimento umano alla stessa stregua del malfunzionamento di un componente. Le azioni umane sono considerate in modo binario, vale a dire come il successo o il fallimento nell'ottenere il risultato richiesto da un'attività. Compiti e attività hanno una probabilità di errore intrinseca che viene poi modificata dai fattori che condizionano la prestazione a seconda della valutazione del contesto.

La critica alla prima generazione di metodi HRA, risiede nel fatto che essi ignorano i processi cognitivi che portano all'errore umano. Un'altra critica riguarda il non considerare l'impatto del contesto sulle modalità di errore.

La seconda generazione di metodi di affidabilità umana (come CREAM, SPARH ecc.) mira a valutare il contributo umano al verificarsi di un evento incidentale tentando di portare in conto il ruolo del contesto. Essi sono basati su un modello cognitivo più appropriato per descrivere il comportamento umano, in tal modo l'attenzione si è spostata sull'interazione fra i fattori contestuali che aumentano la probabilità di errore umano. La lacuna dei metodi di seconda generazione è costituita dall'impiego di una valutazione qualitativa del comportamento dell'operatore. Infatti, mentre i metodi di prima generazione sono stati convalidati, i metodi di

seconda generazione devono ancora essere empiricamente convalidati per la mancanza di dati empirici e la mancanza di riproducibilità essendo i parametri fortemente dipendenti dalla metodologia utilizzata [64].

La terza generazione di metodi HRA (Nara e Rete Bayesiane) si concentra sulle relazioni e le dipendenze tra i fattori che condizionano la prestazione umana [67]. Esse mirano a superare i *gap* dei metodi di seconda generazione e, in particolare, di modellare l'influenza reciproca tra i fattori di prestazione in termini di impatto sulle prestazioni umane e la loro mutua interazione. Questi metodi sono chiamati "metodi dinamici" in quanto tentano di spiegare l'evoluzione dinamica del comportamento umano che porta all'errore. Da un punto di vista metodologico intendono creare un database di fallimenti umani in modo da limitare le incertezze legate alla valutazione dell'affidabilità umana [67, 68].

3.3 Il fattore umano e l'approccio sistemico

3.3.1 la System Dynamics come logica realizzativa dell'approccio sistemico

Nella valutazione e nella gestione del rischio, un ruolo sempre più importante è stato assunto da strumenti quali la modellazione e la simulazione, destinati a supportare decisioni di carattere strategico ed a favorire l'evoluzione dei modelli mentali degli attori aziendali. Per tale motivo si è sviluppata una logica, nota come **System Dynamics**, la quale offre potenzialità che altri strumenti informativi e di simulazione, in passato, hanno rivelato di non possedere. In un'ottica aziendale, questo approccio costituisce e fornisce una chiave di lettura della realtà, caratterizzandosi come strumentazione di interpretazione delle modalità con cui le politiche e le decisioni degli attori organizzativi influenzano la struttura del sistema di riferimento, incidendo sulle dinamiche delle risorse a disposizione.

Dal punto di vista formale, la *System Dynamics* (SD) è un approccio allo studio del comportamento dei sistemi complessi caratterizzati da meccanismi di feedback, in cui si enfatizza il ruolo dell'intreccio tra politiche, strutture decisionali e ritardi temporali; che influenzano i fenomeni dinamici. Le analisi e le interpretazioni del

comportamento dei sistemi sviluppate nell'ambito della SD si fondano su due concetti:

- la divisione tra variabili di stato (**livello/stock**) e la dinamica di queste (**flow**);
- la presenza di circuiti di retroazione (**feedback loop**).

L'analisi condotta nell'ambito della SD quindi, si ancora a due ipotesi fondamentali. Da una parte, si postula che dall'intreccio di processi decisionali, flussi informativi e relazioni interpersonali all'interno delle aziende, emergano strutture costituite da circuiti di retroazione concatenati. In secondo luogo, la SD ipotizza che i comportamenti dei sistemi siano la conseguenza delle caratteristiche strutturali che assumono tali aggregazioni, che regolano il "tasso" (**rate**) di accumulazione o erosione delle variabili livello (**stock**) in essi compresi.

L'aspetto più interessante risiede nel fatto che la System Dynamics ha una logica estremamente pragmatica. Infatti, l'enfasi non è posta sulla capacità del modello di prevedere particolari stati puntuali del sistema o sul rigore con cui le ipotesi del modello sono state testate empiricamente, bensì sulla possibilità di comprendere la logica con cui le variabili rilevanti interagiscono, il ruolo che ciascuna di essa gioca, i punti in cui il sistema è sensibile agli interventi e gli scenari che emergono come conseguenza di ipotesi alternative circa lo stato iniziale del sistema.

Essa si focalizza, in particolare, sull'individuazione delle relazioni causali tra gli elementi di un sistema, che determinano come esso sia strutturato.

Riprendendo quanto descritto da Forrester [69], l'applicazione della System Dynamics, per modellare un processo, si basa su quattro steps:

1. Definizione dello scopo e dei confini della realtà di studio (system boundaries), identificandone le entità coinvolte, le correlazioni e l'insieme dei comportamenti che si vuole evidenziare;
2. Costruzione di un *Influence Diagram* per la rappresentazione dei rapporti causa-effetto tra gli elementi del sistema: l'elaborazione di una mappa delle relazioni causali (**Causal Loop Diagram**) consente di determinare una prima valutazione, di tipo qualitativo, di una realtà di interesse oggetto di studio;

3. Costruzione di un modello quantitativo, che tiene conto della dimensione temporale;
4. Caratterizzazione di tale modello attraverso la definizione delle leggi, che governano e regolano il comportamento del sistema e l'inizializzazione delle variabili in gioco. Questa fase permette la realizzazione di un modello dinamico (***Stock and Flow Diagram***), ottenuto a partire da una CLD precedentemente costruita, attraverso cui è possibile valutare quantitativamente l'evoluzione del sistema nel lungo periodo.

In particolare, la fase di simulazione rappresenta il momento centrale dell'intera metodologia in quanto è un processo mediante il quale viene rappresentato il comportamento di un sistema reale e la sua dinamica nel tempo, valutando, mediante sperimentazioni, la reazione del sistema a stimoli esterni e interni differenti. In campo aziendale, la simulazione rappresenta una vera e propria metodologia decisionale con cui si analizzano le caratteristiche di un sistema reale, al fine di comprenderne i meccanismi di funzionamento necessari per prevedere il suo sviluppo futuro e per mettere a punto le più opportune linee di comportamento. Dunque, i modelli di simulativi consentono di valutare a priori le prestazioni ottenibili dal sistema considerato prima ancora di procedere alla sua realizzazione o modifica. In questo modo è possibile prevedere il comportamento del sistema al variare di condizioni e parametri, valutare tutti gli indicatori di performance tecnici ed economici, trovare le soluzioni più opportune riducendo i costi di investimento e di esercizio, limitando i rischi. Numerose sono le simulazioni realizzabili, riferite sia al sistema aziendale inteso complessivamente, sia a singole parti opportunamente definite, finalizzate a supportare i processi decisionali ai vari livelli organizzativi. In generale non esistono vincoli o restrizioni nella scelta del campo di applicazione della simulazione.

3.3.2 Gli strumenti della System Dynamics

Nell'ambito della SD vengono utilizzati una serie di strumenti attraverso cui è possibile:

- aumentare la consapevolezza sulle caratteristiche dinamiche dei sistemi di riferimento;
- formalizzare le conoscenze e le informazioni disponibili;
- sviluppare idonee politiche e testare le decisioni prese affrontando diversi scenari gestionali;
- supportare un processo di apprendimento in ciascuna delle suddette situazioni.

Gli strumenti fondamentali dalla cui aggregazione ha origine la struttura di un sistema dinamico sono sostanzialmente due: i *Causal Loop Diagram* e gli *Stock and Flow Diagram*. In questo lavoro ci si è concentrati maggiormente sull'analisi e definizione del *Causal Loop Diagram* (CLD). Tali diagrammi rappresentano le mappe grafiche atte ad individuare la struttura causale del sistema di riferimento, che, nel caso di specie, sono stati realizzati mediante l'ausilio di un *software Open Source* (Vensim).

Causal Loop Diagram

In generale, i *Causal Loop Diagrams* (CLD), costituiscono delle mappe grafiche atte a rappresentare, in maniera semplice ed immediata, la struttura causale del sistema di riferimento. Nel dettaglio, un CLD permette di esplicitare e formalizzare le relazioni causali che legano un insieme di variabili appartenenti al medesimo sistema di riferimento, individuando in tal modo i meccanismi di *feedback* attivi all'interno del sistema in esame e le dinamiche relative. In tal senso, i CLD dimostrano di essere degli strumenti estremamente efficaci in quanto:

- rappresentano un primo approccio di carattere puramente grafico al problema indagato, permettendone una descrizione ed interpretazione preliminare basata su un'impostazione estremamente intuitiva;
- modellano sinteticamente ed efficacemente le ipotesi elaborate in relazione alle cause ritenute alla base delle dinamiche analizzate;
- sono idonei ad esplicitare, approfondire e formalizzare i modelli mentali degli attori aziendali coinvolti;

- favoriscono il processo comunicativo e di condivisione delle conoscenze tra gli appartenenti ad una medesima realtà aziendale.

In riferimento al primo punto è importante sottolineare che l'approccio grafico costituisce il primo dei due *steps* con i quali si articola il processo simulativo; la seconda fase è rappresentata invece dal passaggio, dal diagramma causale (che fornisce ovviamente una rappresentazione qualitativa del modello) al diagramma di flusso vero e proprio che, invece, costituisce l'essenza del modello quantitativo.

In definitiva, è possibile affermare che un CLD rappresenta uno strumento concettuale estremamente utile nell'individuazione e formalizzazione di un processo di tipo dinamico, all'interno del quale gli effetti di una singola causa sono individuati e tracciati attraverso una serie di variabili fino alla medesima causa di origine. In tali diagrammi, tuttavia, il vero valore aggiunto si ottiene quando è possibile legare tra di loro due o più variabili in maniera tale che esse formino un ciclo chiuso, o **loop**. Questi *loops* possono essere principalmente di due tipi:

- **loop di rinforzo**: in questo caso essi portano ad un'espansione o viceversa ad un abbattimento reciproco dei valori assunti dalle variabili connesse;
- **loop di bilanciamento**: in tal caso si verifica, appunto, un bilanciamento dei valori assunti dalle variabili connesse.

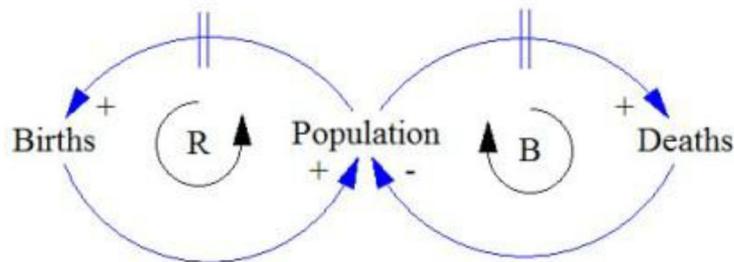


Figura 20. Esempio di Reinforcing e Balancing Loop con delay [70].

Ovviamente ciò dipende dal tipo di relazioni causali che sussistono tra le variabili interessate e che, nel dettaglio, possono essere:

- **relazioni causali positive**: una relazione di questo tipo indica che i due nodi o variabili interessate manifestano un cambiamento nella stessa direzione ossia, se

il nodo da cui origina il legame diminuisce (aumenta) in valore, anche il valore assunto dall'altro nodo si riduce (aumenta);

- **relazioni causali negative:** in questo secondo caso, invece, i due nodi o variabili di interesse mutano secondo direzioni opposte ovvero, se il nodo da cui origina il legame aumenta (diminuisce) in valore, allora il valore assunto dall'altro nodo si riduce (cresce).

Stock and Flow Diagram

Lo Stock and Flow Diagram aggiunge la dimensione temporale alle relazioni causali intercorrenti tra le variabili del sistema/processo di business, mostrando quantitativamente come esse variano.

Gli elementi che caratterizzano uno Stock and Flow Diagram sono [71]:

- Le variabili di stock, indicate anche come level o accumulation, il cui valore può accumularsi o decrescere nel tempo: pertanto, sono da considerarsi come variabili di stato in quanto rappresentative dello stato del sistema (ad esempio, il livello di riempimento di un magazzino).
Esse vengono rappresentate come rettangoli, recanti il nome della variabile stessa;
- Le variabili di flusso, indicate come flow o rate, espresse in funzione del tempo ed in grado di modificare le variabili di stock. Graficamente sono rappresentate da valvole a farfalla, che regolano il flusso in ingresso o in uscita ad un livello (ad esempio, il tasso di produzione o gli ordini che determinano il livello di riempimento di un magazzino);
- Le variabili ausiliarie (auxiliaries), utilizzate per combinare o riformulare informazioni contenute in altre variabili: rappresentano, infatti, calcoli algebrici che coinvolgono livelli, flussi o altre variabili ausiliarie;
- Le costanti (constants), che sono grandezze che, una volta inizializzate, rimangono tali e vengono rappresentate mediante dei rombi

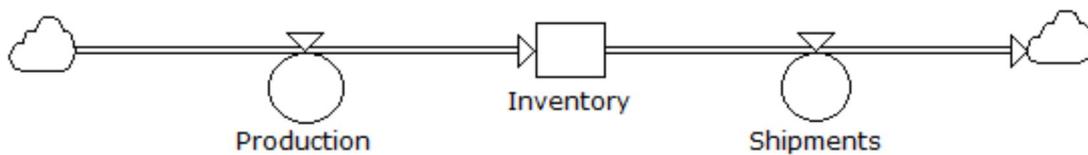


Figura 21. Esempio di rappresentazione delle variabili in uno Stock and Flow Diagram [71].

I confini del sistema sono modellati come particolari variabili di stock, a forma di nuvola, in quanto rappresentano una fonte non definita, al di fuori del contesto che si intende analizzare.

Il passaggio dalla CLD allo SFD non è immediato: ricavare flussi, stock e variabili ausiliari dalla prima richiede un'analisi approfondita e una perfetta conoscenza del processo/sistema che si vuole simulare. Talvolta, nell'applicazione pratica, possono verificarsi situazioni di incertezza circa la caratterizzazione di una data variabile come costante o come livello: in tal caso, la soluzione si ottiene delineando correttamente la finestra temporale di riferimento e determinando se l'elemento in questione possa mutare il proprio valore in tale periodo o, viceversa, se possa ritenersi esente da variazioni, rappresentando quindi una costante.

Una corretta procedura da adottare potrebbe essere la seguente [72]:

- Etichettare le variabili della CLD come stock, flussi o variabili ausiliarie e i collegamenti come dipendenze di flusso o di informazioni: tale step permette di individuare incompletezze, fattori mancanti e collegamenti non corretti;
- Modifica della CLD;
- Traduzione in SFD;
- Quantificazione dello SFD, attraverso la definizione di espressioni matematiche, che regolano il comportamento del sistema.

3.3.3 Modellazione del comportamento umano in un sistema complesso mediante la logica della System Dynamics

La terza generazione di HRA, la cui evoluzione è ancora in corso, si concentra sui fattori che condizionano la performance umana, le loro relazioni e dipendenze. Uno dei cosiddetti metodi HRA dinamici è rappresentato dal ricorso alle reti Bayesiane che tentano di superare alcune delle limitazioni dei metodi precedenti attraverso l'analisi qualitativa, che sottolinea l'importanza di rappresentare le interazioni tra azioni umane e le dinamiche che le sottendono [67]. Cacciabue [73] ha delineato l'importanza della simulazione e della modellazione delle prestazioni umane nel campo dell'affidabilità umana. In particolare, le reti bayesiane (BBNs) sono impiegate per catturare la "natura incerta del rapporto tra prestazioni umane e il contesto organizzativo"[74]. Le BBNs sono state utilizzate per comprendere e catturare le relazioni tra i fattori che condizionano la performance umana (PFSS) e l'impatto quantitativo delle PSFS sulla probabilità di errore.

Tuttavia, dal confronto tra l'utilizzo delle Reti Bayesiane e la System Dynamics, condotto da Gregoriades [75], si può sostenere che la SD è una metodologia più adatta alla modellazione e per valutare l'effetto dell'errore umano sulla affidabilità dei sistemi socio-tecnici nel futuro. Ciò è dovuto al fatto che questi sistemi sono costituiti da elementi che cambiano dinamicamente nel tempo, secondo le diverse condizioni (influenza). Gli esseri umani come agenti in tali sistemi sono influenzati in modo dinamico dai cambiamenti del sistema. Dal momento che l'errore umano è un attributo degli esseri umani (l'elemento più dinamico in qualsiasi sistema socio-tecnico) che viene continuamente modificato in base allo stato del sistema, la metodologia più appropriata per modellare la natura dinamica di tali sistemi, è la System Dynamics [75].

In accordo, quindi, con i vantaggi della SD evidenziati da Gregoriades, nel corso dell'attività di ricerca del presente dottorato è stato proposto uno studio [76], approfondito anche nel lavoro di tesi di dottorato del collega ingegner Di Nardo [77], che utilizza l'approccio SD per modellare dinamicamente l'errore umano e, pertanto, cerca di superare il gap dei metodi HRA di seconda generazione.

3.3.3.1 Causal Loop Diagrams (CLD) dell'errore umano

La Casual Loop Diagram costruita per studiare l'errore umano è mostrata nella figura 22. In particolare si pongono in evidenza i seguenti aspetti:

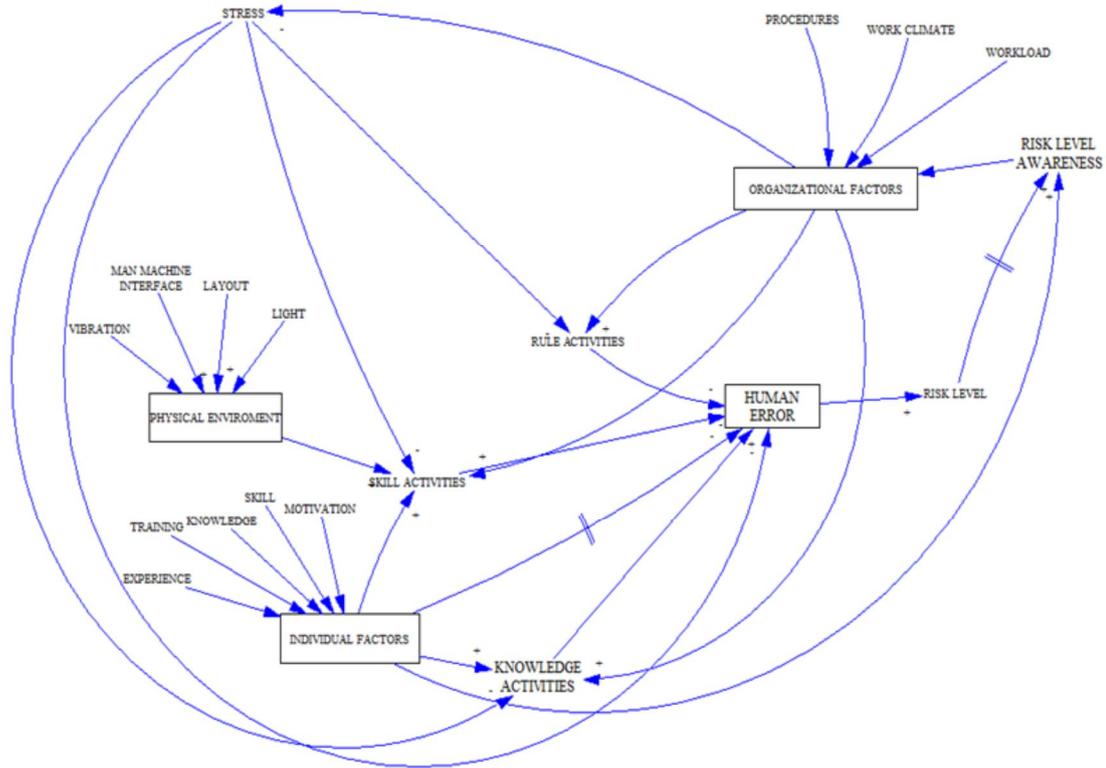


Figura 31 - Casual Loop Diagram dell'errore umano[76].

- **Organizational factors.** Questi fattori sono definiti come fattori prestazionali di forma e che sono il risultato dei requisiti organizzativi e spesso possono essere descritti qualitativamente. Le caratteristiche organizzative riguardano le procedure, l'informazione, la comunicazione, i livelli gerarchici, le strutture organizzative, i flussi di lavoro, la pianificazione del lavoro e di esecuzione. Il processo organizzativo si riferisce alle decisioni aziendali e le regole che governano le attività quotidiane all'interno di un'organizzazione, compresa la creazione e l'uso di procedure operative standardizzate. Queste, in particolare, devono essere scritte in maniera chiara al fine di garantirne il rispetto da parte dell'operatore. Altre caratteristiche come la cultura della sicurezza e il clima possono influenzare la motivazione e il

comportamento umano. La cultura si riferisce alle regole non ufficiali o non dette, valori, atteggiamenti, credenze e costumi di un'organizzazione mentre il clima organizzativo si riferisce a una vasta classe di variabili organizzative che influenzano le prestazioni dei lavoratori. In generale, tuttavia, il clima organizzativo può essere visto come l'ambiente di lavoro all'interno dell'organizzazione [68].

- **Physical environment.** In genere, la stazione di lavoro deve essere progettata per garantire livelli accettabili di benessere mentale, in modo che gli effetti negativi di tutti i fattori fisici (luce, rumore, vibrazioni meccaniche, clima, sporcizia, umidità, pressione dell'aria, gas tossici e radiazione) che interessano gli operatori dovrebbero essere minimizzati. L'interfaccia uomo-macchina deve essere progettata tenendo conto delle caratteristiche fisiche (antropometriche e biomeccaniche) e delle caratteristiche psicologiche (fatica mentale e noia) degli esseri umani. Questa interfaccia dovrebbe migliorare la usabilità della macchina [68].

- **Individual factors.** Questi fattori includono la formazione, abilità, esperienza, conoscenza e fattori motivazionali che, se appropriati consentiranno all'operatore di lavorare in modo più efficace. La motivazione è un fattore importante che influenza direttamente la decisione dell'agire.

- **Stress factors.** Il posto di lavoro resta una delle principali fonti di stress psicologico [75]. Lo stress è uno dei fattori studiati per analizzare il comportamento del fattore umano nel lavoro. Per gli psicologi, esso è il risultato di qualsiasi emozione e che richiede una risposta o un cambiamento in una situazione specifica. Lo stress [78] può essere rappresentato come un processo in tre fasi principali influenzate da fattori personali, sociali e ambientali. Queste fasi sono: fattori di stress, lo stress e le conseguenze [79]. Fattori di stress sono esistenti nell'ambiente di lavoro. Lo stress, seconda fase del processo, può essere a lungo o a breve termine a seconda della natura dei fattori. Infine, le conseguenze, che sono manifestazioni comportamentali, eventi psicologici, fisiologici e organizzative, sono i risultati dello stress prolungato. La CLD sviluppata in figura 23 pone in evidenza come l'errore umano sia influenzato da tre principali gruppi di variabili: fattori organizzativi,

caratteristiche individuali e l'ambiente fisico. Secondo la tassonomia di Rasmussen ed il modello cognitivo, l'errore umano si verifica quando l'operatore effettua o rule-based activities o skill-based activities o knowledge-based activities.

Ciascuna di queste attività implica un aumento dei livelli di attenzione e risorse cognitive, in modo che ognuno di queste sia influenzata da diversi fattori. Se queste attività sono ben eseguite, può diminuire l'errore umano. A livello di attività skill-based, l'operatore esegue l'operazione automaticamente, in modo che i singoli fattori (capacità innate e la formazione), l'ambiente fisico (interfaccia uomo-macchina di supporto, il layout adeguato e altre caratteristiche fisiche) e fattori organizzativi (carico di lavoro) migliorano queste attività di routine, mentre i fattori di stress potrebbero avere un effetto negativo su di loro. A livello di rule-based activities, l'operatore esegue l'operazione mediante l'utilizzo di procedure, in modo che il grande miglioramento derivi da fattori organizzativi, in particolare dal lavoro ben fatto e da procedure ben seguite.

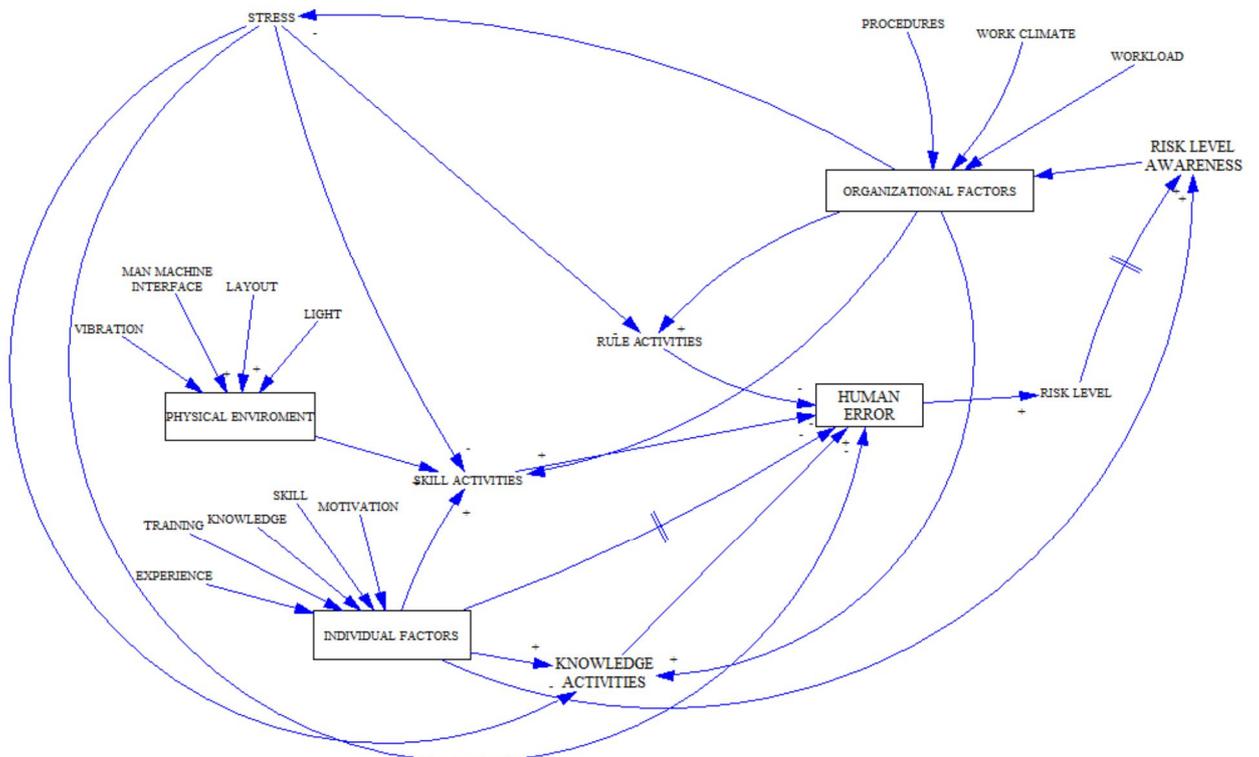


Figura 23 - Casual effect diagram for human performance model [76].

D'altra parte un effetto negativo potrebbe derivare da fattori di stress che possono indurre l'operatore a scegliere procedure sbagliate o applicarle in modo sbagliato.

A livello di *Knowledge-based activities* il gestore è tenuto a utilizzare creativamente e in modo indipendente le informazioni disponibili e la sua conoscenza (cioè senza usare procedimenti o comportamento istintivo), al fine di valutare e decidere quali saranno le azioni appropriate da effettuare, in modo che la maggiore influenza positiva potrebbe derivare da fattori individuali in termini di forte motivazione e di ricchezza di esperienze e conoscenze. Un impatto negativo sulle prestazioni della conoscenza deriva da fattori di stress.

Skill activities, rule activities, knowledge activities, nonché fattori individuali e lo stress contribuiscono alla manifestazione dinamica e danno luogo a errori umani e, indirettamente, aumentano il livello di rischio.

Il ciclo di feedback principale di questo modello incorpora l'errore umano, il livello di rischio, la consapevolezza del livello di rischio, i fattori organizzativi e lo stress. Il ciclo viene avviato dal verificarsi di un errore umano che aumenta successivamente il livello di rischio e la consapevolezza; quest'ultima a sua volta migliora i fattori organizzativi che aumentano il livello di stress. Tuttavia lo stress ha un effetto negativo sul verificarsi di un errore umano; questo costituisce un *loop* di rinforzo.

CAPITOLO IV: Il fattore umano e la manutenzione: fattori chiave del *Safety Management System*

4.1 La cultura della sicurezza

“La cultura della sicurezza è l’insieme delle caratteristiche ed attitudini delle organizzazioni e degli individui che stabilisce che, con assoluta priorità, le problematiche di sicurezza degli impianti nucleari ricevano l’attenzione che meritano in relazione alla loro importanza⁴”. Questa è la definizione della cultura della sicurezza fornita dalla IAEA, in quanto è proprio il settore Nucleare quello che, essendo più critico per gli aspetti relativi alla sicurezza, è stato il principale propulsore di metodologie di analisi dei rischi e degli approcci sistemici. E’ proprio in questo ambito, che si sono iniziata a prendere in considerazione l’importanza dei fattori umani e dei fattori organizzativi nelle dinamiche incidentali.

Il fattore umano (*Human factor*) è uno degli elementi più importante e complesso da trattare nelle analisi di sicurezza. Sono state sviluppate diverse metodologie nel corso degli ultimi decenni per definire la probabilità di fallimento umano da integrare nelle metodologie di analisi per la sicurezza come ad esempio *Fault Tree* ed *Event Tree*. Molte di queste metodologie descrivono il contesto in cui i lavoratori agiscono in termini di parametri che modificano le distribuzioni delle probabilità di guasto. Ognuno di questi parametri si riferisce ad una caratteristica del contesto come l’interfaccia uomo-macchina (HMI), il tempo a disposizione, la qualità delle attrezzature e così via. Naturalmente è molto difficile misurare questi elementi, perché hanno una natura intrinsecamente complessa e qualitativa. Allo stesso tempo, il forte stimolo dato all’integrazione dei fattori umani, organizzativi e tecnici da parte prima di tutto delle organizzazioni impegnate nella sicurezza nucleare (IAEA) ha reso disponibile nuove metodologie per valutare e migliorare la cultura di sicurezza (*Safety Culture*) delle organizzazioni coinvolti nella gestione del rischio industriale. Quest’approccio potrebbe consentire a ingegneri, analisti e *managers* di

⁴ IAEA INSAG Report (Safety series N°75 - INSAG 4, 1991)

andare oltre il divario tra il rigore e le ipotesi statiche delle classiche metodologie di analisi della sicurezza e il comportamento dinamico delle organizzazioni e delle persone che gestiscono i sistemi tecnologici complessi. [80].

L'importanza di un contesto di supporto (infrastrutture, percorsi di comunicazione, fonti di energia, ecc.) dovrebbe essere chiara dalla progettazione, seguendo una visione sistemica. Per queste ragioni, è necessario che le sessioni di formazione attivino la consapevolezza dei *manager* e dei lavoratori sulla percezione individuale e sulle dinamiche di squadra, al fine di passare da una risposta reattiva all'emergenza ad una proattiva e tempestiva non appena si manifesti un singolo sintomo di degradazione della sicurezza. Ciò significa che gli ingegneri, gli analisti, i gestori ed i lavoratori devono avere la possibilità di incontrarsi e condividere il loro punto di vista durante le sessioni di *training*, confrontandosi sui concetti fondamentali di sicurezza in sistemi complessi ed aspirando alla complementarietà nell'organizzazione [80].

4.2 Il Safety Management System

Nel 1970 iniziarono ad essere riconosciuti gli effetti delle azioni umane e dei fattori organizzativi sul verificarsi di un incidente, ma solo a metà del 1980 il *management* assunse la consapevolezza che essi avevano un ruolo chiave per il raggiungimento di un buon livello di sicurezza organizzativa e di processo [81]. Questa consapevolezza ha portato alla necessità di includere nella Seveso II, direttiva europea per la prevenzione degli incidenti rilevanti, il *Safety Management System*.

Il SMS ha dato una spinta per comprendere l'influenza del *management* sul fallimento umano, e la necessità di prendere adeguate misure organizzative come ad esempio la definizione dei ruoli, la formazione, le procedure, l'analisi degli incidenti, gli audits, e la pianificazione delle emergenze.

Tutte le conoscenze acquisite e le misure organizzative hanno ridotto il numero di incidenti significativamente, ma non sufficientemente, e certamente non quelli più gravi.

I cambiamenti nell'industria come l'accresciuta competitività, la tecnologia con una maggiore automazione e complessità ma anche l'invecchiamento dell'impianto e il ridimensionamento della forza lavoro hanno ridotto il livello di consapevolezza di che cosa sia esattamente un sistema di gestione della sicurezza e come potrebbe essere raggiunto [81].

L'idea di Rasmussen di un approccio sistemico e delle sue dinamiche [82], è molto utile per contemplare la complessità e per ottenere una visione più completa sulla causalità di un incidente. Un sistema è costituito da componenti interdipendenti e interagenti che insieme determinano un risultato, che è più della somma delle sue parti. Tale analisi dovrebbe essere fatta a vari livelli del sistema socio-tecnico dalle attrezzature al management fino alle autorità governative. In questo modo ogni possibile causa di incidente, dall'azione umana ai fattori organizzativi o dovuti alla tecnologia, sia nella progettazione che nell'operatività, dovrebbe diventare trasparente ed identificata. Al fine di evidenziare il dinamismo menzionato, uno studio condotto ha utilizzato la System Dynamics come strumento per supportare dinamicamente le decisioni del management in merito alla sicurezza e vedere come evolve il sistema nel tempo al variare delle suddette decisioni [83].

Come affermato in precedenza, esistono limiti nei metodi esistenti di valutazione e gestione del rischio. In primo luogo, c'è una disconnessione tra i fattori tecnici e sociali. La figura 24 mostra l'evoluzione dei vari metodi/politiche/sviluppi che si sono succeduti nel corso del tempo.

Il livello successivo è quello di adottare un approccio olistico di resilienza per il processo di sicurezza e di gestione del rischio.

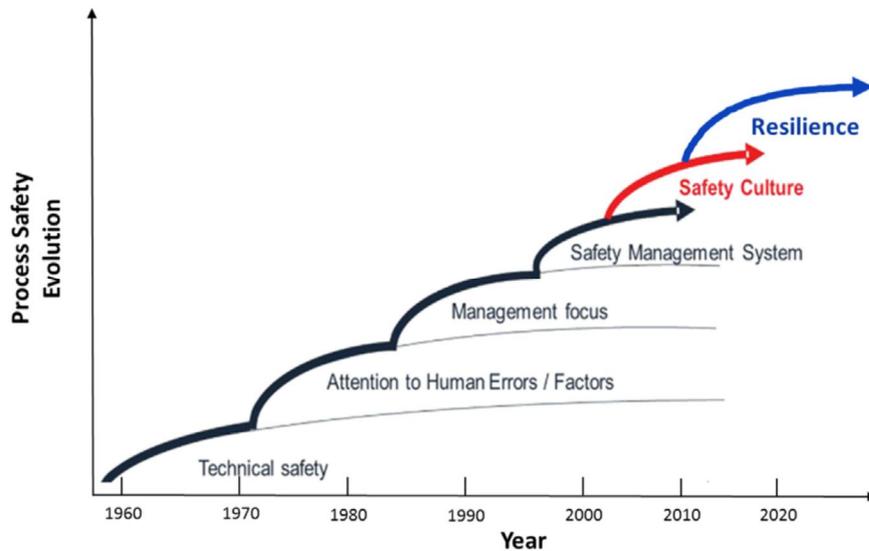


Figura 24 - Evoluzione dei metodi di Risk Management con l'introduzione del concetto di resilienza [81].

Riassumendo la definizione di *Pasman* di resilienza questa viene definita come “la capacità di assorbire e superare gli eventi inaspettati, imprevisi, e le minacce sconosciute che altrimenti potrebbero tradursi in una catastrofe”. Sulla base della letteratura esistente sulla resilienza, gli impianti di processo sono considerati come sistemi socio-tecnici complessi con molte interfacce tra i componenti tecnici, le attrezzature fisiche, gli operatori e l'organizzazione. Questi componenti dei sistemi complessi interagiscono in base a procedure o codici standard. È fondamentale per comprendere il funzionamento di un tale sistema sociotecnico avere una base solida per capire come esso fallisce. Quando si esegue un processo di analisi dei rischi, i pericoli sono identificati e caratterizzati dallo sviluppo di scenari incidentali. In generale, si può concludere che in effetti molto è stato raggiunto nel campo della sicurezza e della gestione del rischio. Molti studi sono stati formalizzati all'interno di regolamenti, norme, codici e pratiche, sia nella progettazione che nel funzionamento. Ma allo stesso tempo i metodi per identificare i possibili scenari, per prevedere anormali situazioni che possono sorgere insieme a quelli per ridurre la probabilità di incidenti sono ancora lontani dall'ottimo.

La gestione del rischio, la complessità e la non linearità del comportamento degli impianti di processo richiedono un approccio di sistema socio-tecnico.

Sulla base di osservazioni, le probabilità delle possibili cause e le influenze sono aggiornate per rivelare la gerarchia di causa - probabilità e per assegnare le priorità alle azioni per ridurre il rischio a livelli accettabili. Quest'approccio porta ad una maggiore attenzione per i fattori organizzativi e umani così che essi sono più attentamente monitorati e caratterizzati tramite misurazioni per rivelare cambiamenti nel sistema per avvisare gli operatori idealmente prima dell'incidente. Il SMS, infatti, avrà bisogno di una serie di dati puntuali, precisi e numerosi per essere proattivo, per misurare le prestazioni e fare previsioni future [84].

In quest'ottica il paradigma dell'industria 4.0 ben si coniuga con le esigenze del *Safety Management System*, in quanto dispone di un enorme mole di dati e degli strumenti per gestirli necessari per prevedere possibili scenari richiesti per una gestione efficace del rischio.

Le regole cardini di un approccio di sistema per la gestione del rischio sono dunque:

1. Definire il sistema socio-tecnico e la sua gerarchia di livelli per includere il sistema tecnico e la sua organizzazione.
2. Nulla deve essere considerato come certo.
3. I parametri, le variabili e i valori di probabilità dipendono dalle condizioni.
4. Tutto è dinamico e quindi dipendente dal tempo.
5. Molte variabili e livelli di sistema sono interdipendenti.
6. Identificare le interazioni dei componenti disfunzionali e amplificare gli effetti di retroazione.
7. Utilizzare tutte le prove e le relative incertezze per le analisi, le conclusioni e le decisioni.

Queste regole possono sembrare piuttosto accademiche, ma data l'esperienza dei decenni passati senza riconoscerle, i nostri limiti umani non ci permetteranno mai il pieno controllo dei rischi connessi alla complessità delle attività che costituiscono un impianto di processo [85].

4.3 Risk Based Maintenance: binomio manutenzione e sicurezza

Quando parliamo di manutenzione, non possiamo prescindere dal concetto di sicurezza cui essa è legata con una doppia relazione:

- le attività di manutenzione e di ispezione sono fondamentali per assicurare lo stato di integrità ed il buon funzionamento di macchine ed impianti, garantendo i requisiti di salute e sicurezza richiesti dalla normativa vigente per quanto riguarda le attrezzature messe a disposizione dei lavoratori nell'ambiente in cui si trova ad operare.
- le attività di manutenzione sono intrinsecamente rischiose. Ciò è dovuto alla complessità delle operazioni che spesso richiedono interventi a macchina/impianto accesi e privi dei dispositivi di sicurezza normalmente attivi su di essi. Tale complessità aumenta se si considera che molto spesso il servizio di manutenzione è affidato a ditte in *outsourcing*, per cui l'ambiente lavorativo in cui sono immessi la macchina e/o l'impianto risultano del tutto sconosciuti ai tecnici di manutenzione, inducendoli con più probabilità a commettere errori con ricadute sulla loro sicurezza nonché sullo stato di integrità delle attrezzature stesse.

Nel primo caso un intervento fatto a regola d'arte può evitare conseguenze gravi; nel secondo caso un compito mal eseguito può essere fonte di pericolo con probabili gravi conseguenze future. In entrambi i casi, una cattiva manutenzione può compromettere la sicurezza degli uomini e degli impianti, per cui è necessario un attento controllo dei lavori di manutenzione per eliminare o ridurre tali rischi. Soprattutto nelle apparecchiature, macchine o impianti ad alto rischio occorre evitare che piccole modifiche degli assetti preesistenti, apparentemente insignificanti, vengano eseguite al di fuori di apposite procedure di verifica e di controllo.

In letteratura, sono disponibili le analisi condotte su molti incidenti, diventati purtroppo "famosi", occorsi a causa di un'errata e/o mancanza di manutenzione. Solo per citarne alcuni:

- Flixborough (UK), 1/6/74, l'errata installazione di un by-pass ad una colonna fuori servizio di un impianto per la produzione di cicloesano comportò un incidente con 28 morti;
- Bhopal (India), 3/12/84, l'errata attività di manutenzione in un impianto per la produzione di pesticidi, anche per effetto del fuori servizio dei sistemi di sicurezza, causarono il rilascio di gas tossici e la morte di più di 2000 persone;
- Pasadena (USA), 23/10/89, l'uso di erranee procedure di pulizia e di manutenzione al drenaggio di un reattore di un impianto di polimerizzazione causò la morte di 26 persone;
- Piper Alpha (UK), 6/6/88, un errore di manutenzione ad una valvola di sicurezza di una pompa in una piattaforma petrolifera causò un'esplosione e un incendio con la morte di 167 persone [4].

Oltre a considerare questi incidenti "rilevanti" per le conseguenze che hanno determinato, è possibile elencare una serie di errori strettamente legati alle attività manutentive che introducono rischi negli impianti industriali:

- mancanza di controllo dei ricambi tale da comportare l'utilizzo di materiale non adeguato o fuori specifica nella sostituzione di apparecchiature o sottosistemi, aumentando il rischio di cattivo o pericoloso funzionamento, perdita di contenimento di fluidi pericolosi, incendio, esplosione, errata indicazione (ad esempio apparecchiature non antideflagranti, apparecchiature di tipo non appropriato, ...);
- mancato drenaggio e/o isolamento di apparecchiature prima dell'apertura di impianti contenenti fluidi con conseguente pericolo di rilascio di sostanze tossiche e/o infiammabili;
- manutenzione non corretta (allarmi blocchi non tarati correttamente, allineamento non corretto tra motori e pompe con possibile surriscaldamento, senso di marcia di motori invertito, dispositivi di sicurezza lasciati dismessi, guarnizioni non montate, tiranti non serrati correttamente o mancanti, flange cieche rimosse o lasciate in posizione, valvole di sicurezza con molle troppo serrate, ecc.);

- manutenzione preventiva (programmata o su condizione) non correttamente progettata con possibili guasti imprevisti di elementi critici per la sicurezza;
- scarsa conoscenza dell'ambiente di lavoro da parte dello staff di manutenzione (ad es. mancata valutazione dei rischi, mancanza della segnaletica di sicurezza e/o di procedure di emergenza) con possibile accadimento di incidenti (es. innesco di sostanze infiammabili con sorgenti di calore quali sigarette, saldatrici) o con infortuni per il mancato o incorretto utilizzo dei dispositivi di protezione personale;
- funzioni manutentive svolte da personale non autorizzato;
- rimessa in servizio di impianti dopo la manutenzione non corretta con conseguenti effetti in termini di sicurezza (ad esempio contaminazione, esplosione, proiezione di parti contundenti, ecc.) per l'uomo, l'ambiente o gli impianti stessi [4].

Talvolta, più cause possono concorrere a provocare un incidente e secondo quanto sostenuto da Reason [66], alcune di queste possono restare latenti nel sistema e manifestarsi solo quando avviene l'allineamento tra più cause nascoste.

In quest'ottica, la *risk based maintenance* ben coniuga questi due aspetti e lo fa assumendo il rischio quale criterio nel processo decisionale che porta alla pianificazione delle priorità di intervento. La RBM va oltre il concetto di affidabilità della macchina, intesa come probabilità della macchina di svolgere la funzione per la quale è stata costruita, portando in conto anche le conseguenze derivanti da un suo possibile guasto/rottura. La sua rilevanza è notevole se si pensa alle industrie a rischio di incidente rilevante dove una cattiva manutenzione degli apparecchi che contengono fluidi pericolosi sotto pressione, possono portare a conseguenze il cui danno è inestimabile considerando l'areale di danno coinvolto e l'entità delle forze sprigionate.

Proprio l'elevata pericolosità di questo tipo di aziende, ha portato alla necessità di includere nella Seveso II il *Safety Management System*. Nello sviluppo del presente capitolo, l'obiettivo è quello di mostrare, per mezzo dello strumento di *System Dynamics*, quanto una efficiente ed efficace manutenzione basata sul rischio,

diventi fattore strategico del *Safety Management* nella riduzione degli incidenti rilevanti.

4.4 La Risk based maintenance secondo l'approccio sistemico

Più autori in letteratura [75], hanno sostenuto l'efficacia della *System Dynamics* quale utile strumento per mettere in evidenza le interrelazioni tra i componenti di un sistema, siano essi persone, cose, funzioni aziendali, elementi socio-tecnici, caratteristiche psicofisiche, ecc. Il *Causal Loop Diagram* è lo strumento grafico a cui si fa ricorso per rendere immediatamente visibili queste relazioni causa-effetto e che costituisce il punto di partenza per la costruzione successiva del modello.

Nel presente lavoro, partendo da quei che sono i criteri e i dati necessari per arrivare a definire un piano di manutenzione e di ispezione basati sul rischio, dedotti dalla norma e dallo stato dell'arte [35, 36], si è dapprima costruito un CLD in cui si è messo in evidenza come la pianificazione e l'esecuzione delle suddette attività siano fortemente influenzate dall'errore umano e come tutto questo incrementi la probabilità di accadimento di un incidente.

4.4.1 Sviluppo del CLD della manutenzione basata sul rischio

Di seguito, si descrivono gli elementi di cui è costituito il *Causal Loop Diagram*, di cui sopra, e per ciascuno di essi si mettono in rilievo anche le relazioni di causa ed effetto con gli altri elementi del sistema.

TYPE OF DAMAGE: la tipologia di danno che ci si aspetta si presenti su una determinata apparecchiatura/impianto dipende molto dalle caratteristiche di costruzione, dai materiali utilizzati e dallo storico dei guasti che si sono presentati sulla stessa tipologia di attrezzatura. In base alla conoscenza del tipo di rottura che si può manifestare, è possibile decidere quale tipologia di tecnica di ispezione utilizzare che sia in grado di rilevarla. In tal senso la conoscenza del tipo di danno che si potrebbe presentare influisce direttamente sulla pianificazione (PLAN), in questo caso per quanto riguarda l'aspetto meramente pratico relativo alla pianificazione degli strumenti e del personale specialistico da impiegare nella conduzione di particolari controlli non distruttivi.

PLAN: la fase di pianificazione è quella in cui si mette in atto il processo decisionale che dovrebbe portare alla scelta ottimale degli interventi, tenendo conto dei criteri di rischio (RISK FAILURE), nonché nel rispetto dei vincoli di budget che a loro volta sono frutto di un processo di stima (COST ESTIMATION). Quanto deciso in questa fase influenzerà l'esecuzione vera e propria di quanto pianificato. Essendo la pianificazione un momento decisionale non può essere avulso da errore umano (HUMAN ERROR) che potrebbe inficiare l'affidabilità del piano e quindi la sua efficacia.

EXECUTION: l'esecuzione del piano di manutenzione/ispezione è influenzata da quanto pianificato (PLAN) in termini di priorità di intervento e di mezzi e personale impiegato (COST ESTIMATION), nonché dalla conoscenza (KNOWLEDGE) di cui necessita chi conduce attività di manutenzione ed ispezione. Scarsa conoscenza ed esperienza, insieme ad altri fattori quali riduzione di costi legati all'acquisizione di idonea strumentazione per condurre le ispezioni aumentano la probabilità di errore umano (HUMAN ERROR).

COST ESTIMATION: la stima dei costi pone dei vincoli alla pianificazione ed alla esecuzione delle attività di manutenzione e di ispezione. Questo processo, se non supportato da un'adeguata conoscenza da parte di chi lo effettua, può avere ricadute negative sia in fase di pianificazione che di esecuzione. Vice versa capacità

adeguate nella stima dei costi può portare ad una pianificazione ottimale in termini di costi-benefici.

HUMAN ERROR: l'errore umano, come già affrontato nel presente lavoro, può concretizzarsi o in uno sbaglio nelle attività routinarie che richiedono l'acquisizione di specifiche capacità (SKILLS), o nell'esecuzione di procedure sbagliate (RULES) o nel aver seguito un ragionamento sbagliato. In quest'ultimo caso, l'errore avvenuto a livello di KNOWLEDGE può inficiare il processo di pianificazione (PLAN) e la fase di stima dei costi (COST ESTIMATION), ed in ultima analisi getta le basi di un evento incidentale che può derivare direttamente dall'esecuzione errata delle attività di manutenzione e/o ispezione od essere la causa latente del processo decisionale che ha condotto alle scelte di pianificazione e di esecuzione.

INCIDENTAL EVENT: l'evento incidentale è la manifestazione di un errore avvenuto o nel processo decisionale o in fase di esecuzione delle attività di manutenzione/ispezione. Il numero degli eventi incidentali, nonché le conseguenze derivanti, diventano i parametri con cui il SAFETY MANAGEMENT deve misurarsi per mettere in atto tutte le strategie per cercare di evitarne l'accadimento.

SAFETY MANAGEMENT SYSTEM: l'ICAO (*International Civil Aviation Organization*) definisce il *Safety Management System* come un approccio organizzato per gestire la sicurezza, che include la necessaria struttura organizzativa, la definizione della politica e delle procedure. L'implementazione di un sistema di gestione richiede risorse umane e finanziarie, tempo ed attrezzature. Il top management decide l'ammontare e l'allocazione di tali risorse (COST ESTIMATION). Il SMS necessita di una serie di dati per essere proattivo, misurare le *performance* e fare le previsioni future. Di conseguenza, l'accadimento di un evento incidentale aggiorna le conoscenze del SM e gli consente di mettere in atto azioni per prevenire futuri incidenti.

4.4.2 Modello proposto

Si procede a definire il processo che ha portato alla costruzione del modello, si analizzeranno i risultati in base alle funzioni inserite. Il software utilizzato è il "Powersim Studio" ed il modello permette una rapida visualizzazione delle frequenze di accadimento connesse agli specifici eventi individuati. Tale modello è lo sviluppo della *Causal Loop Diagram* già analizzata.

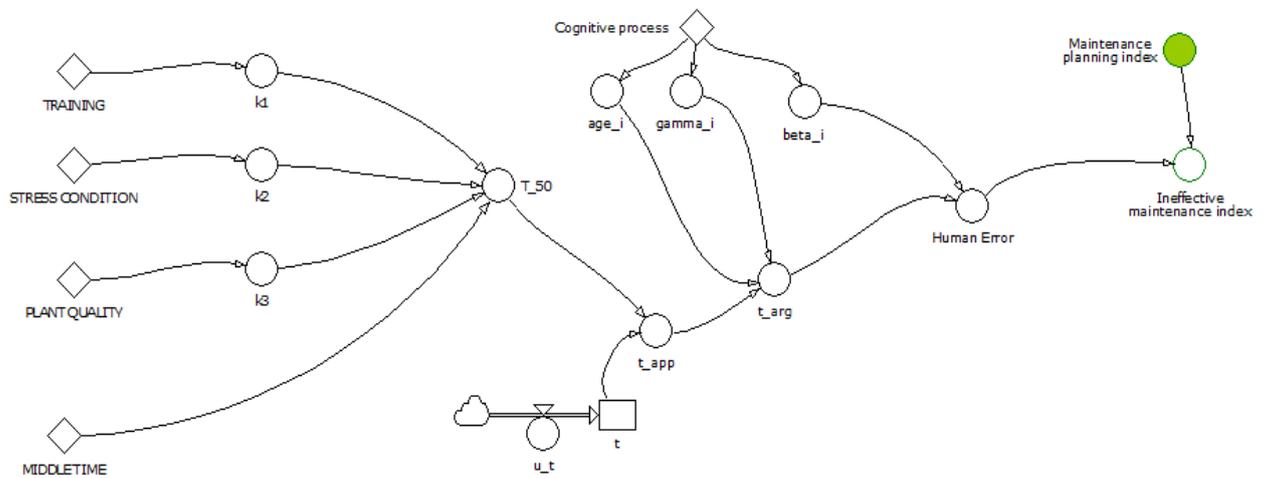


Figura 26 – Costruzione del modello in Powersim.

Si parte dalla definizione dello scenario di riferimento, quindi quale siano i parametri di formazione (TRAINING $\rightarrow k_1$) stress del posto di lavoro (STRESS $\rightarrow k_2$); qualità dell'impianto (PLANT QUALITY $\rightarrow k_3$); il processo cognitivo che viene messo in moto per poter svolgere le attività d'impianto (COGNITIVE PROCESS $\rightarrow \epsilon_i \gamma_i \beta_i$) e il tempo medio che si impiega per lo svolgimento delle attività (AVERAGE TIME).

A questo punto si hanno tutte le variabili per dare l'input alla funzione di modellazione di errore umano, infatti i parametri K_1 ; K_2 ; K_3 e AVERAGE TIME (T_{av}) mi

andranno a definire il tempo medio pesato (T_{50}) che l'operatore medio impiega per svolgere la mansione;

$$T_{50} = Tav * (1 + k1) * (1 + k2) * (1 + k3)$$

il rapporto tra il tempo effettivo t_i e T_{50} mi darà un indice temporale di affidabilità delle tempistiche di intervento dell'operatore che, modulato in una funzione esponenziale di parametri ϵ_i γ_i β_i mi genererà la probabilità puntuale all'istante t_i .

$$P(t_i) = e^{-\left(\frac{t_i}{T_{50}}\right)^{\gamma_i} / \epsilon_i^{\beta_i}}$$

Modulando questa probabilità con l'indice di pianificazione della manutenzione si riesce ad avere un indice di affidabilità umana della manutenzione, quindi quanto effettivamente la manutenzione svolta dall'operatore possa essere efficiente.

TRAINING	RAPPRESENTA LA QUALITA' DELL'ATTIVITA' FORMATIVA	AVANZATO=1 BUONO=2 INIZIALE=3
STRESS CONDITION	RAPPRESENTA COME I LAVORATORI GIUDICANO LE LORO CONDIZIONI DI LAVORO	Grave emergenza=1 Carico di lavoro pesante/ emergenza potenziale=2 Condizioni normali/situazioni ottimali=3 Problemi di vigilanza/emergenza bassa=4
PLAN QUALITY	QUALITA' DELL'IMPIANTO	ECCELLENTE=1 BUONA=2 SUFFICIENTE=3 SCARSA=4 ESTREMAMENTE POVERA=5
AVERAGE TIME	TEMPO MEDIO TEORICO DI INTERVENTO	0,5<<da>>
k1	caratterizzazione del training	IF(TRAINING=1;-0,22;IF(TRAINING=2;0;0,44);0,44)
k2	caratterizzazione delle stress condition	IF('STRESS CONDITION'=1;0,44;IF('STRESS CONDITION'=2;0,22;IF('STRESS CONDITION'=3;0;-0,28)))
k3	caratterizzazione del plan quality	IF('PLANT QUALITY'=1;-0,22;IF('PLANT QUALITY'=2;0;IF('PLANT QUALITY'=3;0,44;IF('PLANT

		QUALITY'=4;0,78;0,92))))
T_50	TEMPO MEDIO PESATO DI INTERVENTO (pesato in base alle tre caratteristiche di training, stress e plan quality)	TEMPO MEDIANO'*(1+k1)*(1+k2)*(1+k3)
t_app	tempo uomo di inizi di intervento	
COGNITIVE PROCESS	TIPOLOGIA DI CAPACITA' COGNITIVA RICHIESTA PER APPRENDERE LE ATTIVITA' DA SVOLGERE	ABILITA'=1 REGOLA=2 CONOSCENZA=3
alfa_i	peso del ritardo in funzione delle capacità cognitive necessarie al completamento delle attività	IF('Cognitive process'=1;0,407;IF('Cognitive process'=2;0,9;0,8))
gamma_i	tempo limite di riferimento per il completamento delle attività	IF('Cognitive process'=1;0,7;IF('Cognitive process'=2;0,6;0,5))
beta_1		IF('Cognitive process'=1;1,2;IF('Cognitive process'=2;0,9;0,8))
t_arg	argomento funzione di mancato intervento umano	((t_app-gamma_i)/alfa_i)
Human_Error	probabilità di mancata esecuzione delle attività da parte dell'operatore per errore cognitivo	(IF(((EXP(-(t_arg)^beta_i))))>1e-9;((EXP(-(t_arg)^beta_i)))));0))
Maintenance planning index	Indice di pianificazione manutenzione	(IF('Budget manutenzione'<=40000<<USD>>;1,2;IF('Budget manutenzione'<=60000<<USD>> AND 'Budget manutenzione'>40000<<USD>>;1;0,8)))
Ineffective maintenance index	Manutenzione inefficace a causa di errori umani	Maintenance planning index'*(1-'Human Error')

Tabella 6– Funzioni utilizzate per la simulazione in Powersim.

4.4.3 Risultati

La simulazione, in base al modello proposto, ha fornito i seguenti risultati che si evidenziano come segue :

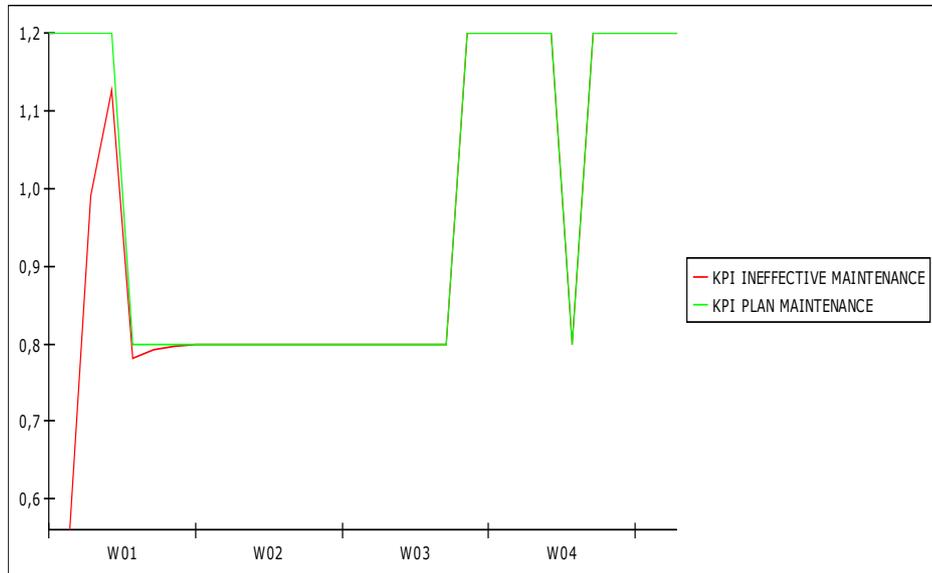


Figura 26 – Confronto tra KPI Ineffective Maintenance e KPI Plan Maintenance.

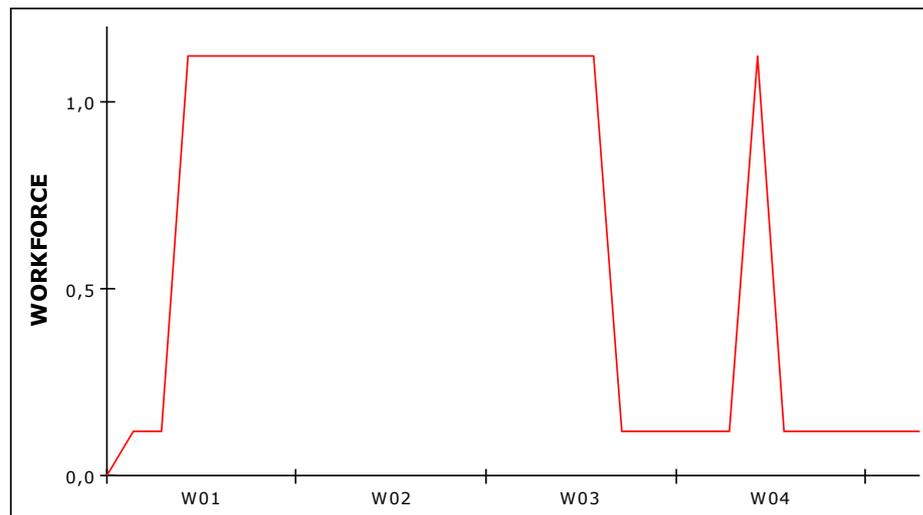


Figura 27 – WorkForce.

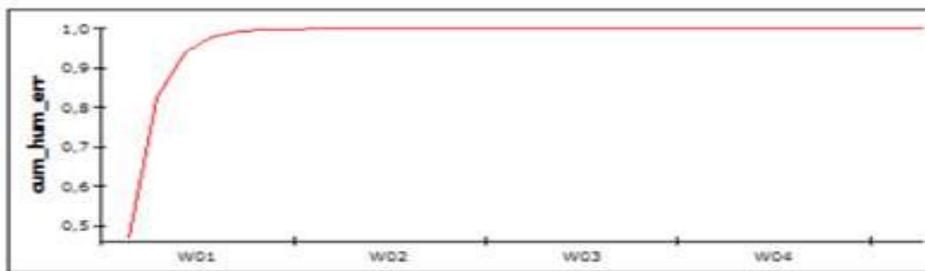


Figura 28 – Human Error Probability.

Si precisa che, nel modello, la probabilità di errore umano è stata modellata senza costruire alcuna funzione di feedback tra gli eventi del modello principale e il sub modello che simula la probabilità di errore umano.

L'indice di inefficienza della manutenzione che risulta essere legato direttamente ai parametri di pianificazione degli interventi di manutenzione (*maintenance planning index*) e di forza lavoro disponibile per effettuarla (*workforce*). Si denota un iniziale aumento della *workforce* per far fronte alle esigenze di gestione e manutenzione (dell'impianto), ma dopo i primi giorni si osserva che questa non è sufficiente basta, visto che l'inefficienza della manutenzione non diminuisce, bensì aumenta in quanto la formazione non ha effetti immediati); per tale ragione si ha un incremento significativo del personale in corrispondenza del valore unitario di possibilità che possa verificarsi un incidente.

La combinazione della formazione e dell'incremento della Forza Lavoro riescono a riportare il sistema /parte di impianto in condizioni di funzionamento, nonostante si verificano tempi di recupero molto lunghi (ben due settimane nelle quali fuoriuscite di materiale potevano essere possibili visto che l'impianto non era stato ancora messo in completa sicurezza).

Terminata l'emergenza, la forza lavoro viene ridotta, con un relativo peggioramento dell'indice di manutenzione dell'impianto, questo fino al successivo guasto.

Il sistema, per come è stato strutturato, va incontro, già nella prima settimana di monitoraggio, ad una perdita di materiale.

Per il ripristino del sistema, con i fondi e personale a disposizione è necessario più di una settimana. In tali condizioni le perdite economiche salgono subito in maniera esponenziale fino alla fine delle operazioni di ripristino.

L'indice di inefficienza della manutenzione raggiunge un picco fino a che i costi degli incidenti non raggiungono il valore massimo, dopo diminuiscono fino ad un valore di 0.8 in quanto cominciano le operazioni di manutenzione e di ripristino dell'impianto.

Come indice di danneggiamento dell'impianto è possibile considerare il *System damage factor* che aumenta di valore durante le fasi di rilascio materiale e massima perdita economica, mentre invece diminuisce durante le fasi di ripristino impianto. Tale valore risulta essere influenzato solo dalle azioni di ripristino impianto e da un aumento della capacità della forza lavoro, e non da un miglioramento delle capacità della formazione dei lavoratori (su cui al momento non sono state previste operazioni di feedback).

4.5 Conclusioni

Quanto si è cercato di mostrare nella rappresentazione del CLD di manutenzione basata sul rischio, ed i suoi collegamenti (relazioni) con il *Safety Management System*, è in linea con alcuni studi condotti di recente. Tali studi [86], infatti, hanno messo in rilievo lo stretto legame tra i principi di sicurezza e la longevità degli *asset* di un impianto, dato il loro impatto quando accadono i disastri. In particolare, gli autori sostengono che le organizzazioni che promuovono una manutenzione proattiva dei beni (intervenire prima che si rompa), piuttosto che una cultura organizzativa reattiva (intervenire per riparare solo ciò che si rompe) hanno le basi solide per garantire risultati sicuri. Gli autori, mediante un supporto empirico, hanno dimostrato come relazioni efficaci nei luoghi di lavoro tra il management e gli impiegati porti allo sviluppo di una cultura della sicurezza che è alimentata soprattutto da una cultura organizzativa di manutenzione proattiva che valorizza le pratiche lavorative sicure. Infatti, efficaci programmi di sicurezza si rendono necessari non solo in fase di progettazione, ma anche per le ispezioni e

manutenzioni degli impianti, il controllo dell'efficacia dei dispositivi di allarme, le valutazioni dei pericoli e dei rischi, lo sviluppo e la comprensione delle procedure, la formazione del personale, la riduzione dell'errore umano. Tutto ciò implica un forte impegno da parte del *management* e da parte dei lavoratori che dovranno adottare le pratiche sicure come parte integrante delle loro attività di lavoro. Il summenzionato studio avvalorava lo studio, fin qui condotto, che evidenzia lo stretto legame tra l'impegno del *management* nel diffondere un'efficace cultura della sicurezza e l'incremento dell'impegno dei lavoratori nel rispettare i principi di sicurezza. Una cultura della sicurezza fortemente legata ad una cultura proattiva della manutenzione che nell'assicurare la longevità ed il buon funzionamento degli impianti ne aumenta il grado di sicurezza.

Anche l'ISO negli ultimi anni ha evidenziato come per i sistemi di gestione di un'organizzazione sia importante che il tipo di processo decisionale sia di tipo **risk based**. A tal fine, nel 2013 ha iniziato la revisione di tutti i Sistemi di Gestione volontari, tra cui ISO 9001 [87] e ISO 14001 [88], per adeguarle ad una struttura di riferimento denominata *High Level Structure* ed entro il 2017 secondo tale struttura verrà realizzato un nuovo standard ISO 45001 [89], il primo Sistema di Gestione per la Salute e Sicurezza sul lavoro in ambito ISO.

La *High Level Structure* è una struttura di alto livello che l'ISO ha sviluppato negli ultimi anni al fine di garantire uniformità tra i vari standard dei Sistemi di Gestione. Elemento fondamentale delle nuove norme e di quelle revisionate secondo lo standard HLS è l'approccio «*risk-based*», per cui l'analisi di rischi diventa trasversale a tutti i requisiti della norma. Il *risk-based approach* diventa la base di una cultura di prevenzione e di miglioramento continuo tanto che non vi è più alcun requisito titolato "azioni preventive" in quanto implicite nel *risk-based thinking*.

In tal modo l'approccio basato sul rischio assume importanza fondamentale al pari dell'approccio per processi che aveva caratterizzato la prima stesura delle norme sui sistemi di gestione (ISO 9001 e ISO 14001) e con il quale deve integrarsi anche in sinergia con il ciclo PDCA (Plan – Do – Check – Act).

Dunque, nuovo requisito delle norme ISO sui Sistemi di Gestione è l'esplicito riferimento al rischio ed alla sua gestione. Nella bibliografia delle tre norme sui sistemi di gestione si cita, infatti, la norma ISO 31000 [90] - Gestione del rischio - Principi e linee guida, come valido riferimento per approcciare in modo strutturato la gestione del rischio [91].

La prevenzione dei rischi, secondo un approccio sistemico, deve considerare il sistema lavorativo nel suo insieme e quindi, non può non tenere in conto il "Fattore Umano". L'obiettivo è il miglioramento del livello di affidabilità dell'operatore e, più in generale, del sistema all'interno del quale il singolo lavoratore opera, tenendo conto della complessità di tutti gli elementi con i quali egli si deve interfacciare.

Per una corretta analisi di uno o più dei molteplici aspetti che caratterizzano un'organizzazione, occorrerà quindi, innanzitutto, studiarla nel suo complesso, e successivamente addentrarsi nell'insieme di relazioni che legano i suoi elementi, (i materiali, le procedure, le persone), per passare, infine, alla gestione dei "modi di essere ed agire" degli individui.

CAPITOLO V – LE NUOVE FRONTIERE DELLA MANUTENZIONE NELL’INDUSTRIA 4.0

5.1 Il paradigma dell’industria 4.0

La necessità di contenere quanto più possibile i costi di produzione per mezzo di economie di scala ha spinto le industrie a distribuire i processi produttivi su più siti, in una parola a *decentralizzare*. Quest’ assetto organizzativo ha reso particolarmente sensibile il mondo dell’industria all’applicazione di strumenti quali internet ed il *cloud computing*, che hanno generato una forte spinta alla *virtualizzazione* della realtà, cioè una sua rappresentazione strumentale al controllo e alla *gestione da remoto*. Decentralizzazione e virtualizzazione sono i paradigmi che hanno dato il via a quella che è considerata la quarta rivoluzione industriale, i cui nuovi assetti così creatisi vanno sotto il nome di *Industria 4.0* [92, 93].

La rivoluzione industriale di cui ci apprestiamo a parlare è quindi “*in fieri*” dal momento che consiste in cambiamenti organizzativi attualmente in atto, iniziati da un tempo relativamente breve e sui quali ci sono grosse aspettative da parte dei governi occidentali oltre che dell’intero mondo industriale. Infatti una riorganizzazione del modello organizzativo sulla base di nuovi strumenti è indispensabile per traghettare, un’industria in crisi per la concorrenza con quella più competitiva dei paesi emergenti, un’industria, quella occidentale, che trova spazio in un contesto sociale dove la popolazione attiva, e quindi la forza lavoro, diminuisce e vede crescere l’età media [92, 93].

In un contesto dove la necessità di realizzare economie di scala impone il ricorso ad una decentralizzazione spinta per cui si pone anche l’impellente necessità di un ambiente produttivo collaborativo ed integrato, all’interno del quale il prodotto è concepito come un sistema costituito a sua volta da sottosistemi, ciascuno dei quali viene prodotto all’interno di uno degli stabilimenti sui quali risulta quindi spalmata la produzione dell’intero prodotto. Inoltre la gestione di realtà produttive complesse può rendere particolarmente vantaggioso l’impiego di *sensori* installati sulle varie macchine utensili e produttrici che raccolgano informazioni sulle lavorazioni, lo stato della macchina e la produzione nel suo complesso. L’impiego di

internet può quindi permettere alle macchine di comunicare questi dati e di gestire, con un sistema di cloud computing, le lavorazioni mediante un sistema CPS.

Industria 4.0 è un termine collettivo per le tecnologie e i concetti di organizzazione della catena del valore. Basata sui concetti tecnologici di Radio Identificazione (**RFID**), Cyber-Physical Systems (**CPS**), l'Internet of Things (**IoT**), Internet dei Servizi (**IOS**), e Data Mining (**DM**), facilita la visione di Smart Factory. All'interno delle fabbriche intelligenti strutturati secondo i moduli di Industria 4.0, i CPS monitorano gli oggetti fisici e i processi per creare una copia virtuale del mondo fisico dove i controlli e le decisioni sono decentrati. Mediante Internet of Things, i sistemi Cyber-fisici comunicano e collaborano tra loro e con gli esseri umani in tempo reale.

5.1.1 Nuove tecnologie per un nuovo assetto organizzativo/produttivo

Come introdotto nel paragrafo precedente, abbiamo individuato nelle nuove tecnologie, già a disposizione delle realtà produttive ed ancora in corso di sviluppo, gli strumenti mediante i quali verranno raggiunti nuovi assetti organizzativi. Si tratta di strumenti di raccolta, gestione avanzata e scambio di dati molto potenti, la cui tecnologia, come vedremo, prende le mosse da dispositivi e reti già esistenti; basta pensare a sensori di localizzazione o lettura ottica, internet e dispositivi ad infrarossi, internet of Things, di come la maggiore disponibilità di sensori sempre più piccoli e sofisticati stia riscrivendo i paradigmi delle macchine utensili a controllo numerico e come l'impiego in industria di nuovi e potenti processori possano permettere di creare un doppio ciberneticamente della realtà produttiva attraverso il quale gestire la produzione mediante sistemi "fisico-cibernetici". Ovviamente le innovazioni introdotte sono tutte connesse tra loro così che il largo impiego di Internet sia strumento indispensabile per una progettazione simultanea, pur se distribuita su postazioni in impianti diversi, e l'impiego di sensori e dell'Internet of Things permetteranno il Cloud Manufacturing e la costruzione di un sistema fisico ciberneticamente.

In generale, l'Industria 4.0 è caratterizzata da quattro elementi:(1) Sistemi di Cyber-fisici (CPS); (2) Internet of Things (IoT); (3) Big dati e Data Mining (DM); (4) Internet of Service (IOS).

- ***Cyberg Physical Systems (CPS)***

Un sistema fisico- cibernetico (CPS) è definito come una tecnologia trasformativa atta a gestire sistemi integrati con due componenti: una concreta ed una virtuale che gestisce con la sua capacità computazionale una gestione dei dati raccolti dal reale. Si tratta di una tecnologia trasformativa perché consiste in un'astrazione che crea, sulla base di dati raccolti dal reale, una sua realtà virtuale gemella, funzionale al controllo della prima ed alla predizione dei fenomeni ad essa connessi [94]. La crescita della disponibilità e della conseguente installazione di sensori sulle macchine utensili ha permesso di raccogliere i dati ad esse relative ed al loro invio per mezzo della connessione alla rete. Tutto ciò ha comportato la generazione di un massiccio volume di dati, fenomeno conosciuto anche col nome di *Big Data*. Sistemi Cyberg-Fisici possono essere sviluppati per gestire Big Data al fine di conseguire l'obiettivo di una produzione intelligente, resiliente ed auto-regolante [95].

Poiché il CPS è in una fase iniziale del suo sviluppo è importante definirlo nella sua struttura essenziale che si basa su un'architettura a *cinque livelli*, dove ad ogni livello corrisponde un momento della fase di integrazione ed interrelazione tra la parte fisica dell'impianto produttivo e quella cibernetica-computazionale.

Il primo livello è costituito da una *connessione intelligente*, cioè l'acquisizione accurata ed affidabile di dati dai componenti delle macchine utensili e di processo per mezzo della misura dai sensori o da controllori su di esse installati. È immediato notare come per questo momento sia cruciale la scelta di sensori adeguati e l'impiego di una connessione senza fili. Il secondo livello della struttura dell'architettura del CPS è la conversione dei dati in informazioni, la quale avviene attraverso algoritmi specifici che permettono, tra le varie cose anche una valutazione sullo stato dei componenti delle macchine utensili.

Tutte le informazioni così dedotte dai dati raccolti sono convogliate verso la *parte cibernetica*, che costituisce il terzo livello della struttura. A questa parte che si trova quindi a gestire questa grossa mole di dati che devono quindi essere interpretati con un modello analitico che quindi permetta di dedurre ulteriori informazioni in modo da avere informazioni più complete sullo stato delle singole macchine utensili ed al contempo della flotta che esse vanno a costituire.

Il livello che si occupa della rappresentazione di questi dati dedotti nel secondo e nel terzo, è il quarto e cioè quello *cognitivo*. Una completa conoscenza del sistema monitorato passa attraverso una corretta rappresentazione che permetta la più corretta decisione da prendere riguardo il settaggio dei parametri che regolano la produzione.

Dal processo *cognitivo* prende mosse la configurazione dei settaggi alle macchine, questo livello come il primo è il punto di raccordo della parte cibernetica con la parte fisica del sistema ed oltre a fungere da feedback attua concretamente una supervisione sul processo. Il tipo di controllo quindi effettuato è quindi detto resiliente.

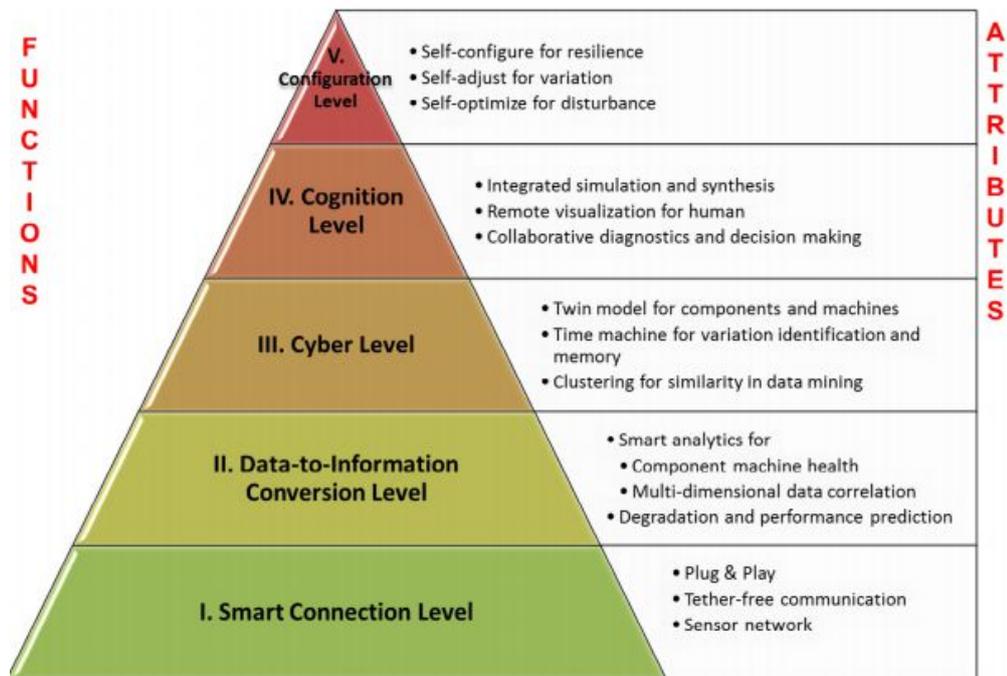


Figura 29 - Modello di Architettura di un CPS tratto da [94].

Internet of Things (IoT)

L'Internet delle cose (IoT) permette alle "cose o oggetti" di interagire tra loro e cooperare con loro componenti "intelligenti" per raggiungere obiettivi comuni. I CPS possono essere definiti come "cose o oggetti." Di conseguenza, l'Internet degli oggetti può essere pensato come una rete in cui CPS cooperano tra di loro attraverso schemi di indirizzamento unici.

Data mining (DM)

Un enorme mole di dati in tempo non necessita solo di un processo per la memorizzazione in un database. Data Mining consente di analizzare e scoprire i modelli, le regole e la conoscenza di una gran quantità di dati raccolti da più fonti. Così puoi prendere la decisione giusta al momento giusto e nel luogo giusto.

Internet of Services (IOS)

L'Internet of Services (IOS) consente ai fornitori di servizi di offrire i loro servizi via Internet. IOS è composta da modelli di business, una infrastruttura per i servizi, i servizi stessi, e partecipanti. I servizi sono offerti e combinati in servizi a valore aggiunto da vari fornitori. Essi vengono comunicate agli utenti come pure ai consumatori e vi si accede attraverso diversi canali.

5.1.2 Dall'Internet of Things e dal Cloud Computing al Cloud Manufacturing

Con la locuzione Internet of Things (IoT) si intende il fenomeno recentissimo per il quale dispositivi, per lo più di uso quotidiano, sono in grado di scambiare dati usando il protocollo Internet (IP).

Questa tendenza che ha preso piede prima tra i prodotti più tecnologici come le TV, i dispositivi di domotica, le automobili, ecc. ha investito anche il mondo industriale poiché sta diventando prassi effettuare un revamping su innumerevoli dispositivi industriali, vecchi o nuovi, che divengono anch'essi capaci di raccogliere e scambiare dati usando sensori. L'utilità di questa tecnologia è stata scoperta con la tendenza a tracciare macchine e dispositivi mediante l'impiego di sensori di

rilevamento della posizione per mezzo di onde radio; con il progredire e l'abbassarsi a dei costi di questa tecnologia, si è avuta la diffusione dell'IoT.

Il "**Cloudbased Manufacturing**" può essere definito come un modello di rete produttiva che, sfruttando l'accesso ad un insieme di risorse produttive diversificate e condivise e quindi a linee produttive CPS riconfigurabili, permette un'allocazione ottimale della produzione con evidenti incrementi sull'efficienza e l'efficacia in base alla domanda [96].

Dall'internet of things al Cloud Computing il passo è stato breve e l'anello di giunzione è stato l'applicazione dell'**Internet of Services** a dispositivi intelligenti.

Il Cloud Computing è una tecnologia che mira a consentire servizi informatici, tramite un agevole accesso alla rete, da qualsiasi postazione ed *on-demand*, con una gestione dei dati quanto più efficiente possibile [97]. Nell'ambito di questa tecnologia è possibile distinguere tre livelli:

- quello dell'infrastruttura che si occupa di processare i dati, archivarli, creare connessioni tra dati correlati, ed effettuare tutti quei processi informatici di base che in genere sono anche standardizzati;
- quello della piattaforma virtuale, si occupa di fornire un ambiente dove sviluppare, testare, mantenere, ed in generale gestire un software o, più in generale un'*applicazione informatica*;
- Il terzo livello, quello con il quale l'utente si interfaccia direttamente è quello del software messo a disposizione.

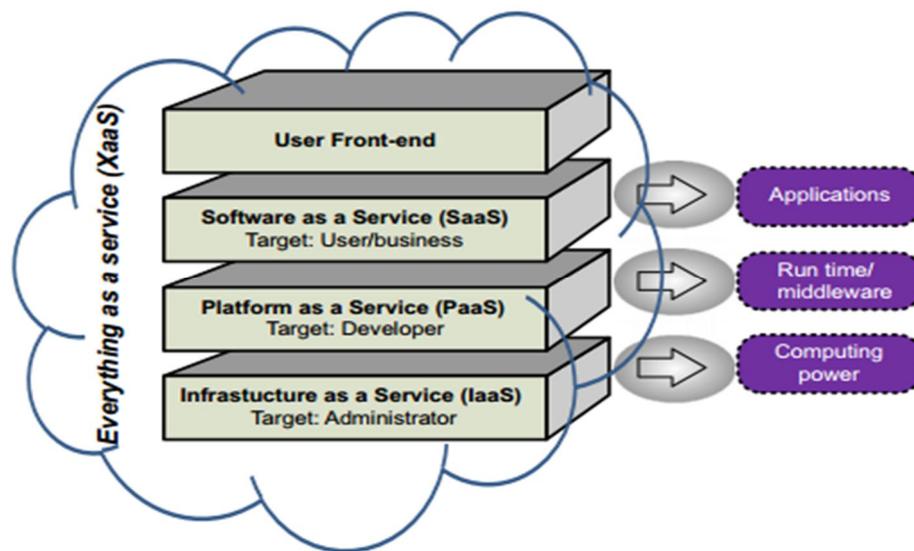


Figura 30 - Modello di struttura di un servizio "cloud".

Poiché nel *Cloud Computing* tutto ciò che è messo a disposizione dell'utenza è visto come un servizio, anche i tre livelli di cui è costituita questa tecnologia sono visti come servizi, e quindi si parla di Infrastructure as a Service (**IaaS**), Platform as a Service (**PaaS**) e Software as a Service (**SaaS**).

L'applicazione del Cloud Computing al mondo delle lavorazioni industriali per il controllo delle macchine utensili e più in generale della linea produttiva è detta **Cloud Manufacturing** ed è una delle tecnologie chiave dell'industria 4.0, quella che permette un controllo integrato ed a remoto di realtà produttive quanto si voglia complesse e distribuite.

Il Cloud Manufacturing appare quindi essere un dominio multidisciplinare che sintetizza l'Internet of Things, la networked manufacturing ed il cloud computing [96].

In ogni caso, il cloud manufacturing opera attraverso una precisa procedura che comporta la virtualizzazione delle risorse produttive, il loro successivo incapsulamento nel servizio cloud e la loro gestione centralizzata anche a remoto.

Le risorse cui abbiamo fatto prima riferimento sono distinguibili in due tipi: risorse fisiche per la produzione e competenze produttive. Le prime possono esistere in forma hardware ed in forma software e comprendono, le prime i materiali grezzi, i

mezzi di produzione, i computer, ecc.; le seconde includono i “know-how”, software di simulazione, strumenti di analisi, la forza lavoro e standard di uso interno. Le competenze produttive invece sono risorse dinamiche ed intangibili che consistono nella capacità di un’organizzazione di ottemperare ad un compito con adeguata competenza.

Una volta individuate le risorse, bisogna “virtualizzarle”, cioè creare delle “categorie virtuali” cui associare le lavorazioni rese disponibili dalle risorse. È quindi come se venissero creati dei domini, nei quali sono incapsulate le lavorazioni, a questo punto, disponibili on demand. Questi domini sono detti STRL, cioè Standard Resource Locator, e sono concettualmente molto simili a quello che sono gli URL per il Web. L’invio di comandi cloud avviene attraverso STRL che contengono sempre quattro informazioni che vanno a costituire una sorta di vettore: [lavorazione, risorsa, esecutore, competenze necessarie].

È chiaro che la trasmissione in rete di dati così delicati e strategici ai fini del conseguimento dell’obiettivo di impresa, all’interno del quale si configura la produzione, pone la delicata questione della riservatezza degli stessi. Si rendono quindi necessarie alcune misure di sicurezza quali:

1. la “compressione” e la criptatura dei dati al livello dell’archiviazione;
2. l’uso di reti LAN virtuali che offrano maggiori livelli di sicurezza;
3. l’uso di firewall e filtri.

Un adeguato livello di sicurezza è indispensabile dal momento che il Cloud Manufacturing si configura come un servizio e di cui l’utente finale deve potersi fidare totalmente [97].

Altra questione molto importante, investigata da Brecher ed altri suoi collaboratori, è quella dell’interoperabilità e della modularità della piattaforma offerta dal servizio cloud (PaaS). Si pone infatti la necessità di usare linguaggi standard e piattaforme modulari, in modo da impiegare il servizio cloud per tutto il ciclo di sviluppo del prodotto, così che la catena CAD-CAM-NC sia continua tra le diverse fasi ed analogamente tra i diversi software [98]. Una simile raffinatezza degli strumenti informatici aumenterebbe l’orientamento al servizio del cloud manufacturing,

allargandone lo spettro; così si verrebbero a gettare le concrete basi per il DAMA per la standardizzazione dei modelli di dati e delle relative piattaforme sulle quali i dati sono scambiati e processati.

Contesti produttivi distribuiti su diversi stabilimenti necessitano un'accurata fase progettuale del prodotto e della sua produzione. Poiché il progetto di uno stesso prodotto potrebbe essere svolto da operatori che lavorano simultaneamente in stabilimenti diversi ma nello stesso tempo, emerge impellente necessità di un ambiente di progetto collaborativo ed integrato; lo stesso dicasi per la pianificazione del processo produttivo.

Per questo motivo appare di fondamentale importanza l'adozione di una piattaforma che permetta la condivisione dei dati e delle informazioni necessarie al progetto del prodotto e della sua realizzazione.

A tal fine è stato adottato uno standard che prevede l'integrazione dei dati relativi alle diverse fasi assistite dal computer di sviluppo del prodotto. Lo standard, il cui acronimo "STEP" sta per **Standard for Exchange of Product data model**, prevede che vengano applicati protocolli indicati con la sigla APs che definiscono il tipo di dato per alcuni domini di applicazione; così ad esempio, per la rappresentazione in 3D di parti o assiemi meccanici ho il protocollo AP203, per indicare una rappresentazione di tipo boundary, si usa l'AP204, per la progettazione di processi per l'industria auto motive si usa l'AP214 [99].

Tuttavia un simile standard non basta. Una realtà industriale multi impianto necessita anche di una piattaforma che si occupi dello scambio dei dati.

Accanto ad innegabili vantaggi, l'applicazione classica dello STEP comporta alcune criticità come il grosso numero di APs, l'elevato costo, in termini di dati elaborati, di duplicazione e ripetizione dei *files* progettuali ed anche la conversione dei vecchi *files* relativi a progetti in archivio.

Quanto invece all'elaborazione di un'architettura idonea per lo scambio e l'integrazione dei dati, c'era il problema di individuarne una che permettesse allo stesso tempo di:

- 1- superare tutte le difficoltà ed i limiti posti dallo STEP;

2. di conciliare le opposte esigenze di consentire a diversi progettisti (magari distribuiti su diversi stabilimenti) di collaborare intervenendo su uno stesso progetto, e dell'integrazione di diversi dati tutti nello standard STEP.

Valilai ed Houshmand, ricercatori operanti nel mondo accademico, propongono una piattaforma in grado di soddisfare tutti i succitati requisiti usando un approccio *modulare e stratificato* anziché uno classico [99].

La piattaforma, che prende il nome di "XMLAYMOD" è una piattaforma derivata da un'altra piattaforma sempre da loro progettata ed implementata, la LAYMOD. Quest'ultima grazie all'adozione di una struttura modulare può evitare duplicazioni di files relativi a stesse voci di dati in diverse APs, superando quindi le limitazioni di un applicazione classica dello STEP. Inoltre la struttura modulare, rappresentata nella figura seguente, consente l'utilizzo di diversi pacchetti di software per la produzione assistita dal calcolatore tali che la struttura dei dati sia la stessa. Gli ingegneri succitati, hanno poi applicato questa piattaforma alla progettazione e la produzione di un particolare, verificandone l'effettiva validità, come riportato in una loro pubblicazione.

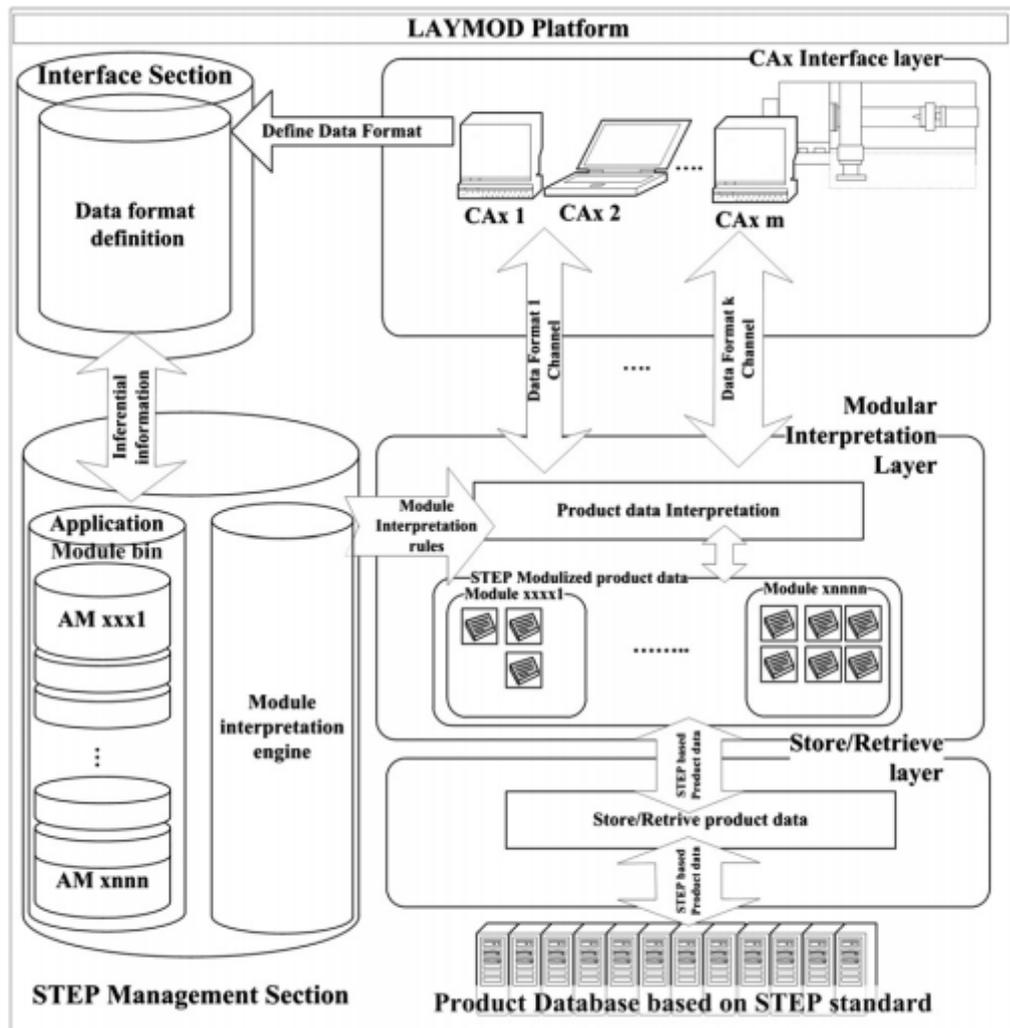


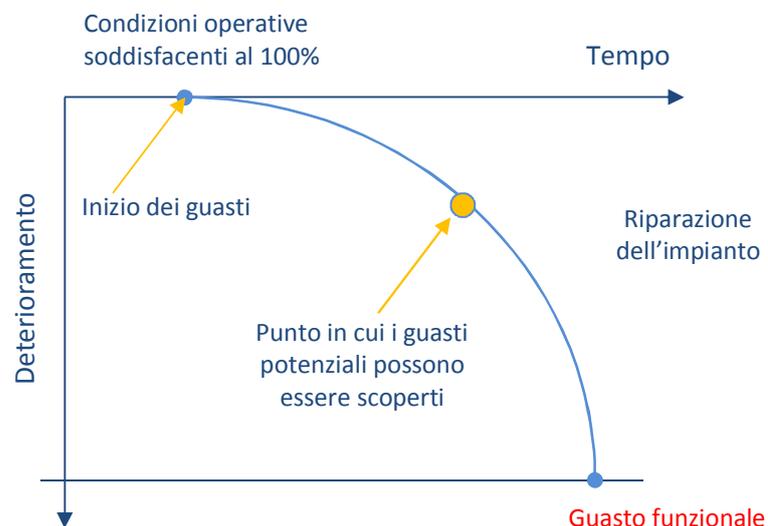
Figura 31 - Schema rappresentativo della piattaforma LAYMOD tratto da [95].

In un contesto di produzione distribuita per la comunicazione *machine-to-machine*, oltre che per la progettazione collaborativa di cui sopra, si è ritenuto opportuno adottare un linguaggio XML (che sta per *eXtensible Markup Language*) poiché questo linguaggio permette una comunicazione più agevole tra dispositivi in rete ed è anche compatibile con lo standard STEP. Un approccio orientato al servizio di questo tipo è basato sui paradigmi dell'informatica che fa uso di server remoti, la "cloud computing" di cui abbiamo ampiamente parlato nel paragrafo precedente.

5.2 La manutenzione nello scenario dell'industria 4.0

Molti scenari dell'Industria 4.0 sono stati implementati e testati dagli Enti di ricerca e dalle industrie ed i loro risultati influenzeranno la progettazione dell'Industria 4.0. L'implementazione del CPS nell'industria di oggi comporterebbe molti vantaggi con ripercussioni in diversi ambiti della produzione: componenti, macchine utensili ed intera produzione, e questa implementazione potrebbe consistere nella creazione di un gemello digitale di ogni macchina, ottenuto per mezzo di una selezione dei dati critici per la lavorazione, che verranno quindi convertiti in informazioni critiche per il processo di lavorazione. In questo modo si potrà creare un gemello digitale dell'intero sistema produttivo che andrà a sovrintendere alle funzioni di quello reale. Le ripercussioni nella gestione della manutenzione aprono scenari del tutto nuovi. Infatti dal classico approccio preventivo, basato su un'organizzazione quanto più accurata possibile rispetto ai guasti che possono immancabilmente verificarsi, si è passati ad una politica di manutenzione predittiva, la cui diffusione è stata catalizzata dalla disponibilità della sensoristica di cui si è diffusamente parlato. Infatti l'uso di sistemi fisico-cibernetici permette di prevenire molti guasti occulti e di evitare quindi perdite da mancato funzionamento dei macchinari. Proprio in questa prospettiva l'applicazione di CPS, mediante l'acquisizione di dati, trasformati in informazioni, dai quali possono essere dedotte altre informazioni per via analitica, ha la potenzialità di garantire un'"auto-coscienza" con capacità di prognosi, *Prognostic Health Management (PHM)*, e conseguenti capacità di auto manutenzione [94]. La raccolta, la gestione sistematica e la sincronizzazione dei dati, è possibile grazie all'Internet of Things, capace al giorno d'oggi di elaborare Big Data, forte di piattaforme adeguate (Platform as a Service, **PaaS**). Il monitoraggio dello stato di salute delle macchine impiegate nella produzione permette quindi interventi manutentivi "su condizione" la cosiddetta *Condition Based Maintenance (CBM)*, creazione di valore, attraverso il continuo controllo delle prestazioni delle macchine e quindi della qualità della produzione, ed in ultima istanza la creazione di valore. La manutenzione predittiva o su condizione, basandosi sulla registrazione di dati significativi che forniscono indicazioni sullo stato di salute delle macchine, è la

tipologia di manutenzione che ben si coniuga con il paradigma dell'industria 4.0. Infatti, i dati provenienti dai sensori vengono elaborati e resi disponibili ai tecnici di manutenzione che da remoto effettuano il processo decisionale che determinerà il momento ottimale in cui intervenire, nell'arco temporale che va dal rilevamento di un segnale debole al guasto funzionale. L'obiettivo è intervenire prima che il guasto si verifichi sulla base dell'analisi di dati di contesto che consentono di raccogliere indizi della tendenza che il guasto si verifichi. Dal grafico seguente che riporta la curva dello stato funzionale del componente in funzione del tempo, si evince che dal momento in cui si iniziano a rilevare anomalie nel funzionamento c'è un arco di tempo in cui poter intervenire prima che si verifichi il guasto.



**Figura 32– Curva della manutenzione predittiva tratta da Technical Pillars – WCM
FIAT**

Questa nuova veste della manutenzione predittiva nell'ambito dell'industria 4.0, ovvero che utilizza il *big data mining* e algoritmi *smart* e basata su sistemi fisico-cibernetici comunicanti mediante Internet of Things e Internet of service, diventa una manutenzione predittiva intelligente (*Intelligent Maintenance*) che influenzerà la gestione della manutenzione in futuro

Il concetto di manutenzione predittiva all'interno delle *Smart Factories* si basa molto sul far affidamento sulla capacità del algoritmo utilizzato per elaborare i dati

del sensore in tempo reale. Il risultato fornirà indicazioni sullo stato di salute dell'attrezzatura e consentirà di individuare esigenze di manutenzione in maniera proattiva[100].

5.2.1 La manutenzione predittiva intelligente nell'industria 4.0

A tal proposito, nell'ambito della ricerca europea da parte degli enti e delle industrie su Industria 4.0, è stato proposto un progetto [101] sulla manutenzione predittiva intelligente, denominato anche *Intelligent Predictive Maintenance (IPdM)* che mette in evidenza come la manutenzione predittiva, che è l'insieme di attività che rilevano cambiamenti nelle condizioni fisiche delle apparecchiature mediante la rilevazione di segnali provenienti da sensori, è la tipologia di manutenzione che ben si coniuga con il paradigma dell'industria 4.0 in cui ogni macchina è dotata di sensoristica collegata alla rete internet. Nel paragrafo successivo si metteranno a confronto l'approccio *risk based*, che rappresenta l'ultima generazione degli approcci manutentivi, con l'approccio di manutenzione predittiva declinato nell'ambito dell'industria 4.0.

I metodi di manutenzione predittiva possono essere di due tipi:(1) statistici e (2) su condizione. La Manutenzione predittiva di tipo statistico (**SBM**) dipende dai dati statistici derivanti dalla registrazione meticolosa dei fermi macchina negli impianti al fine di sviluppare modelli che predicono i guasti, mentre la manutenzione predittiva su condizione (chiamata anche *Condition based Maintenance (CBM)*) dipende dalle condizioni di monitoraggio continuo o periodico di apparecchiature per rilevare i segnali di guasto e prendere decisioni di manutenzione. Lo schema proposto di manutenzione predittiva intelligente (Fig. 33) apre nuove possibilità innovative per le aziende. Dati generati dai CPSs e trasmessi dall'IoT consentono di monitorare lo stato della macchina/processo e vengono automaticamente raccolti e analizzati attraverso eventuali modelli che predicono un possibile guasto attraverso sistemi di *data mining*. Questa decisione utilizza IoS per consentire il riconoscimento immediato dell'insorgenza di un arresto ed essere subito riconosciuto per pianificare misure correttive nel modo più efficace. Ciò implica anche che le

interruzioni non pianificate possono essere evitate e che il personale e le risorse possono essere impiegate in modo più efficiente. Questa soluzione innovativa si chiama Industry 4.0 per *Intelligent Predictive Maintenance* (IPDM) [101].

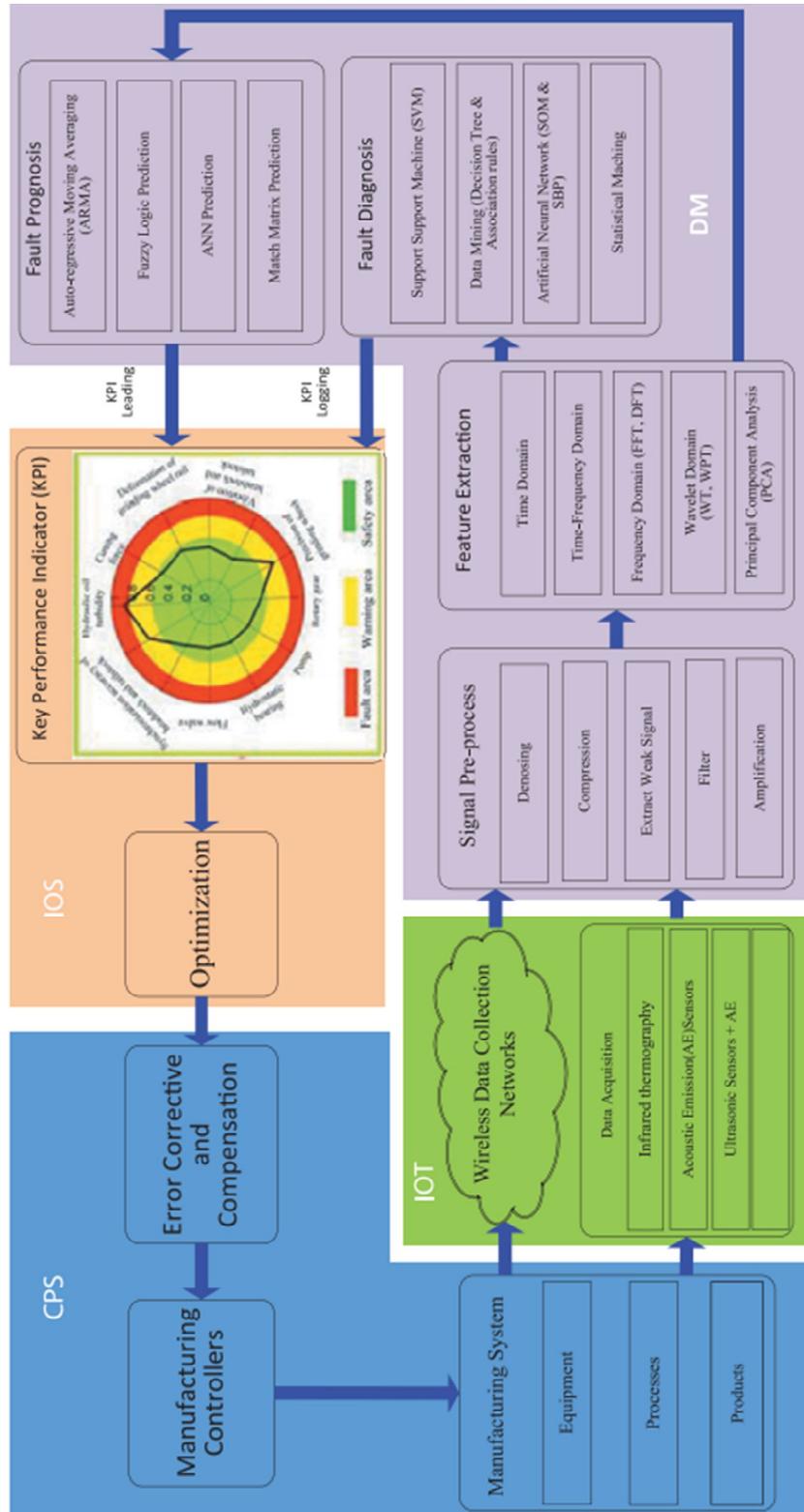


Figura 33 – Framework della Intelligent Predictive Maintenance [101].

L'IPdM, basata su molte tecniche chiave come CPS, IoT, IoS, *Computational Intelligence* (CI), *Data Mining* (DM), *Swarm Intelligence* (SI), necessita di essere sviluppata per adeguarsi ai requisiti industriali.

Il framework della IPdM è costituito da sei moduli elencati nella tabella 7, nella quale vengono elencati anche i sei *steps* principali della metodologia *risk based inspection and maintenance* (RBIM), ampiamente trattata nel capitolo II e con la quale si vuole condurre un confronto con la IPdM, essendo emerso dalla letteratura che la RBIM rappresenta l'ultima evoluzione degli approcci manutentivi. Nell'ottica quindi di seguire l'evoluzione che la manutenzione dovrà subire per adeguarsi alla *cloud manufacturing*, tale confronto sarà utile per capire come ancora una volta la manutenzione è strettamente connessa alla logica della produzione, di cui ne segue i cambiamenti e in questo caso i paradigmi dell'industria 4.0.

Framework IPdM [101]	Framework RBIM [36]
1. Sensor and Data acquisition	1. Initial analysis and planning
2. Signal pre- processing and feature extraction	2. Data collection and validation
3. Maintenance decision making	3. Multilevel risk analysis
4. Key performance Indicators	4. Decision making and action plan
5. Maintenance Scheduling optimization	5. Execution and reporting
6. Feedback control and compensation	6. Performance review/evrgreen phase

Tabella 7 – Confronto tra l'approccio IPdM e l'approccio RBIM.

Per poter condurre un valido confronto tra i due approcci manutentivi, partiamo col descrivere i singoli moduli che caratterizzano il framework IPdM, avendo ampiamente trattato la metodologia RBIM.

Acquisizione dati

Questo è il primo passo per l'attuazione di una strategia per la diagnostica e la prognostica di macchine secondo l' IPDM. In questa fase diventa strategica la selezione di sensori idonei ai parametri da registrare. Il processo di acquisizione dei dati trasforma i segnali del sensore in informazioni sullo stato di salute, di sicurezza e di performance delle attrezzature.

Esistono diversi sensori per acquisire dati diversi., ad esempio micro sensori, sensori ultrasonici, sensori di vibrazione, sensori di emissione acustica, ecc.

Elaborazione dati ed analisi dei segnali

Generalmente, ci sono due *steps* nella gestione dei segnali provenienti dai sensori. L'uno è l'elaborazione del segnale, che esalta le caratteristiche del segnale e la qualità. Le tecniche di elaborazione del segnale includono filtraggio, amplificazione, compressione dei dati, convalida dei dati, e de-noising per migliorare il rapporto segnale-rumore. L'altro è l'estrazione delle caratteristiche, ovvero si estraggono le caratteristiche dai segnali elaborati che sono indicative di un guasto incipiente o un guasto. Generalmente, le caratteristiche possono essere estratte da tre domini: dal dominio del tempo, dal dominio della frequenza, e dal dominio tempo-frequenza. Quali di questi metodi possono essere applicati può essere deciso da una macchina reale o dall'analisi del sistema.

Il processo di “decision making”manutentivo

In questa fase di processo decisionale di manutenzione, il personale addetto alla manutenzione ha a disposizione informazioni sufficienti a prendere decisioni in merito alle azioni di manutenzione da intraprendere. I modelli per il supporto alle decisioni possono essere suddivisi in quattro categorie: (1) modello fisico, (2) modello statistico, (3) modello basato sui dati, e (4) modello ibrido. Poiché la strategia IPdM dipende principalmente da segnali e dati che riflettono le condizioni delle apparecchiature, il modello basato sui dati (*data driven*) sarà quello più utilizzato. IPDM si basa dunque su modelli *data-driven* e modelli ibridi.

Se i dati storici possono essere ottenuti facilmente, il data-driven è molto buono per individuare il guasto e valutare la condizione. Quando solo una parte dei dati storici può essere ottenuto, le tecniche ibride che combinano le tecniche *data driven* e le tecniche basate su modelli possono essere utilizzate per valutare la condizione di macchina efficace. Tutte queste tecniche sono selezionabili secondo una vera e propria analisi del sistema produttivo. Tecniche per il processo decisionale di manutenzione possono essere divise in due principali classi: diagnostica e prognostica. La diagnostica si concentra sulla rilevazione, l'isolamento e l'identificazione dei guasti quando si verificano. D'altra parte, la prognostica tenta di predire guasti o malfunzionamenti prima che si verificano. Le tecniche di CI e di DM vengono sempre più applicate per la diagnosi e il miglioramento delle prestazioni rispetto agli approcci tradizionali. Finora, la maggior parte delle applicazioni in letteratura, sono le tecniche intelligenti che comprendono reti neurali artificiali, sistemi fuzzy logic, reti neurali fuzzy, sistemi neurali-fuzzy, algoritmi evolutivi e swarm intelligence. Rispetto alla diagnostica, il numero di metodi di prognostica è molto più piccolo. I pronostici più utilizzati sono quelli che determinano la vita utile rimanente (RUL). IPDM valuta la RUL utilizzando il modello basato sui dati e cerca di trovare la relazione tra la RUL e la condizione della macchina o del componente.

Key performance Indicators

Un diagramma KPI, chiamato anche "spider chart" o "health radar chart", viene impiegato per indicare il degrado dei componenti. Ciascuna "radio line" mostra la condizione del componente, da zero (perfetto) ad uno (guasto). I colori mostrano i vari livelli di stato dei componenti, come sicuro, che richiede attenzione, in stato di allarme, guasto, difettoso. I diagrammi aiuteranno visivamente gli operatori o i managers nella valutazione della performance dell'attrezzatura.

Ottimizzazione della schedulazione della manutenzione

L'ottimizzazione della pianificazione e schedulazione della manutenzione si ottiene mediante un modello di tipo **NP** (*Non-deterministic polynomial time*) e gli algoritmi

di *Swarm Intelligence (SI)* potrebbero permettere la risoluzione di questo tipo di problema. IPdM applica i *Genetic Algorithms (GA)*, *Particle Swarm Optimization (PSO)*, *Ant Colony Optimization (ACO)*, e *Bee Colony Algorithm (BCA)* e cerca di trovare la schedulazione dinamica ottimale di manutenzione predittiva. Tutti questi metodi sono selezionabili in IPdM per risolvere i problemi di ottimizzazione della schedulazione della manutenzione.

Feedback control

In questa fase si effettua la correzione dell'errore, la compensazione ed il controllo del feedback in base ai risultati derivanti dalla fase di supporto alle decisioni di manutenzione.

5.2.2 Confronto tra l'approccio predittivo intelligente e l'approccio *risk based*

Il confronto tra l'approccio manutentivo *risk based* e l'approccio manutentivo predittivo "intelligente" dell'industria 4.0 verrà condotto lungo le seguenti direttrici:

- Acquisizione dati
- Criteri alla base del processo di "decision making" manutentivo
- Tecniche utilizzate nel processo di "decision making"
- Strumento visivo per individuare i componenti critici
- Ottimizzazione della schedulazione del piano di manutenzione

Acquisizione dati

La fase di acquisizione dati nel nuovo paradigma dell'industria 4.0 ne costituisce l'aspetto più innovativo, in quanto è fortemente legato all'introduzione nelle realtà industriali delle tecnologie più innovative e all'alto grado di comunicazione tra di esse per mezzo dell'IoT. Ciascun componente/apparecchio è dotato di sensori che ne rilevano i principali parametri di funzionamento, così come i relativi valori limite determinati in fase di progettazione, e hanno in memoria la storia dei guasti e degli interventi di manutenzione avvenuti su di essa.

Rispetto all'approccio *risk based* si tratta, quindi, di un notevole ed innovativo cambiamento. Infatti, la fase di acquisizione dati era cruciale per l'affidabilità dell'intero processo decisionale, in quanto avveniva quasi manualmente reperendo quanti più dati inerenti la progettazione delle apparecchiature, ricostruendo lo storico degli interventi di manutenzione e delle ispezioni, deducendo i parametri di funzionamento in base allo specifico impianto in cui erano installate e non ultimo le opinioni degli esperti sui possibili guasti che si potevano presentare.

Criteri alla base del processo di “decision making” manutentivo

I modelli che possono essere di supporto alle decisioni, nell'ambito della manutenzione predittiva intelligente, trovandoci davanti ad un'enorme mole di dati, ottenuti attraverso il ricorso ad una sensoristica spinta, sono di tipo “*data driven*”. Il criterio, invece, alla base del processo decisionale di una manutenzione basata sul rischio non può che essere “*risk based*”.

Tecniche utilizzate nel processo di “decision making”

Le tecniche di supporto alle decisioni di tipo “*data driven*” sono principalmente la diagnostica e la prognostica. In generale il problema della diagnostica è individuare se un guasto specifico è presente o meno sulla base di informazioni disponibili, preferibilmente senza ispezioni intrusive della macchina. La prognostica è la previsione dei guasti basata sulla osservazioni di variazioni di parametri operativi di un sistema industriale durante il suo normale ciclo di funzionamento. L'obiettivo quindi consiste nel predire un guasto incipiente prima che questo provochi un fermo macchina, spesso con conseguenze disastrose sul ciclo produttivo e sulla integrità stessa della macchina.

Il processo decisionale nella metodologia *risk based* fa invece ricorso alle tecniche di *risk assessment* per predire la probabilità di guasto di un componente/apparecchio e le conseguenze derivanti dal verificarsi del guasto.

Strumento visivo per l'individuazione dei componenti critici

Abbiamo visto che la manutenzione predittiva intelligente fa ricorso al diagramma dei KPI detto anche "health radar chart" che consente una valutazione visiva da parte degli operatori e dei managers sullo stato di salute dell'apparecchiatura. Analogamente anche la *risk based maintenance* fa ricorso ad uno strumento visivo che consente l'individuazione dei componenti critici sui quali intervenire, ovvero la matrice di rischio.

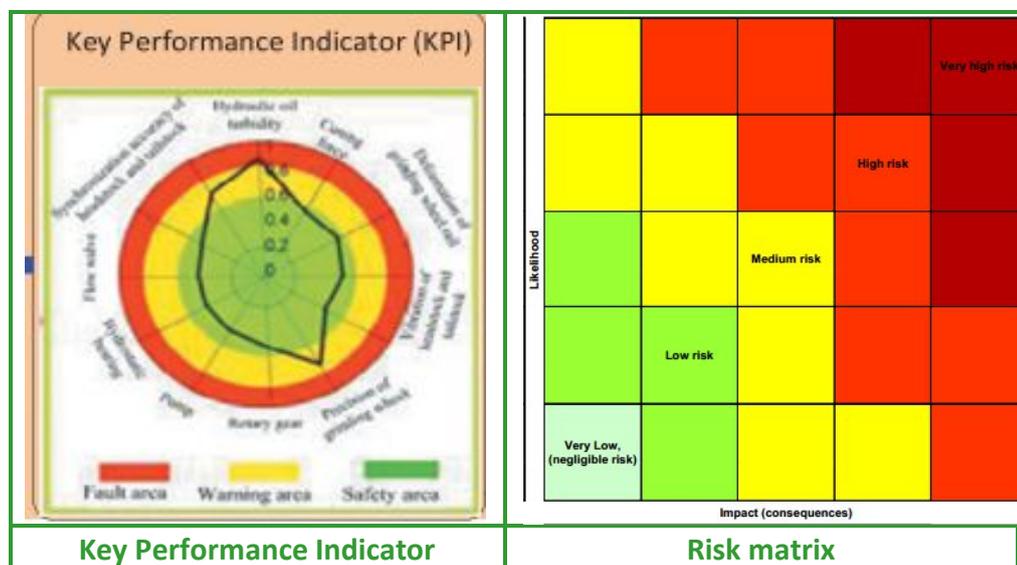


Figura 34 – Strumenti visivi per l'individuazione dei componenti critici.

Ottimizzazione della schedulazione del piano di manutenzione

Il processo decisionale porta alla definizione del piano di manutenzione. Nel caso della manutenzione predittiva intelligente una schedulazione dinamica ottimale si può ottenere applicando gli algoritmi genetici quali: *Particle Swarm Optimization* (PSO), *Ant Colony Optimization* (ACO) e *Bee Colony Algorithm* (BCA). Anche nell'approccio basato sul rischio si arriva ad un piano di manutenzione che deriva dall'algoritmo fornito da uno standard europeo sull'implementazione del framework della *Risk based inspection maintenance* (RBIM).

Il confronto finora riportato può essere sintetizzato nella seguente tabella sinottica:

IPdM [101]	RBIM [36]
DATA ACQUISITION	
By SENSORS	TECHNICAL DATA ON DESIGN INSPECTION and MAINTENANCE history OPERATIONAL HISTORY EXPERT OPINIONS
MAINTENANCE DECISION MAKING	
Models for decision support are DATA DRIVEN based	Models for decision support are RISK BASED
TECHNIQUES FOR MAINTENANCE DECISION MAKING	
DIAGNOSTIC and PROGNOSTIC methods	RISK ASSESSMENT techniques
VISUAL TOOL FOR DECISION MAKING	
KEY PERFORMANCE INDICATOR	RISK MATRIX
MAINTENANCE PLANNING SCHEDULE OPTIMIZATION	
SWARM INTELLIGENCE algorithms	RBIM FRAMEWORK

Tabella 8- Confronto tra approccio predittivo intelligente (IPdM) ed approccio *risk based* (RBIM).

5.3 Dalla *Man–Machine Interface* alla *Human-Robot Collaboration*: come cambia il ruolo dei manutentori e degli operatori di *front-line* nella nuova *Smart factory*

Accanto all'innovazione tecnologica, che caratterizza il nuovo scenario dell'industria 4.0, viene a modificarsi anche il contesto d'uso delle nuove tecnologie nonché le attività degli utenti, ed in particolare quelle degli operatori di *front-line* e dei manutentori. Gli ingegneri, invece, dovranno gestire l'accresciuta complessità dei nuovi sistemi di produzione in fase di progettazione.

Cambiano, dunque, i ruoli degli operatori e dei manutentori in relazione alle mutate condizioni di lavoro:

- gli operatori di linea assumeranno sempre più il ruolo di supervisori e laddove alcune tipologie di lavorazioni richiederanno particolari *skills* umane, ci sarà una vera e propria “collaborazione” tra robot ed uomo.
- i tecnici di manutenzione dovranno continuare a garantire la continuità della produzione ma, grazie alle nuove tecnologie *smart*, questo sarà possibile da remoto [102].

In questo nuovo contesto le macchine svolgono sempre di più i compiti dell'operatore, il quale diventa osservatore e controllore del sistema di produzione automatizzato. Ma l'aumento di informazioni e di comunicazioni di questi sistemi portano ad una complessità che non può essere gestita con le classiche interfacce utilizzate finora. L'operatore necessita di supporto per mantenere il sistema stabile in caso di guasto [103].

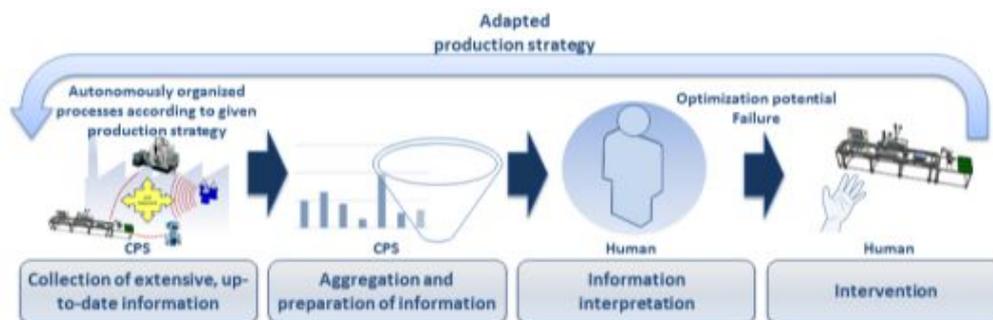


Figura 35 – Il ruolo dell'operatore quale supervisore della produzione e suo intervento nel processo decisionale [103].

In base a tali considerazioni, le interfacce con l'utente devono essere analizzate e ottimizzate. Inoltre, un altro aspetto importante è che, dato l'enorme numero di strumenti diversi di "computer-aided engineering", questi devono essere armonizzati in modo da supportare gli utenti nello svolgimento dei propri compiti ed inoltre si devono tener in conto le questioni ovvie quali un aspetto identico delle interfacce ed un formato unico dei dati per agevolarne lo scambio [104].

Il tecnico di manutenzione deve far in modo che la produzione non si fermi e a tal fine deve intervenire sulle parti usurate della macchina prima che questa si guasti. La tecnologia innovativa dell'industria 4.0 è caratterizzata da macchine in grado di fare auto-diagnosi. Ciò implica che il ruolo del manutentore cambia diventando supervisore del sistema Cyber-fisico.

Per la valutazione e l'interpretazione di questi nuovi dati il tecnico di manutenzione deve essere supportato da un nuovo concetto di interfaccia con accesso sito-diretto alle informazioni.

Una delle rappresentazioni di questo nuovo tipo di manutenzione a distanza, *telemaintenance*, è rappresentata nella figura 36 tratta dal lavoro di F. Sittner ed altri autori [105] nella quale è evidente la separazione fisica tra il servizio di *telemaintenance* ed il sito produttivo del cliente dove situati il robot ed il tecnico del servizio.

Il robot viene tenuto sotto controllo da un sistema di monitoraggio su condizione. I tecnici del servizio di *telemaintenance*, possibilmente con diverse qualifiche, saranno supportati da dispositivi smart di comunicazione col servizio in remoto. Gli esperti, da remoto utilizzeranno i loro dispositivi smart per ricreare l'ambiente in teleassistenza per accedere al robot situato presso l'impianto del cliente e per comunicare con i tecnici locali di servizio. In tal modo si possano risolvere i problemi senza fisicamente spostarsi verso la fabbrica.

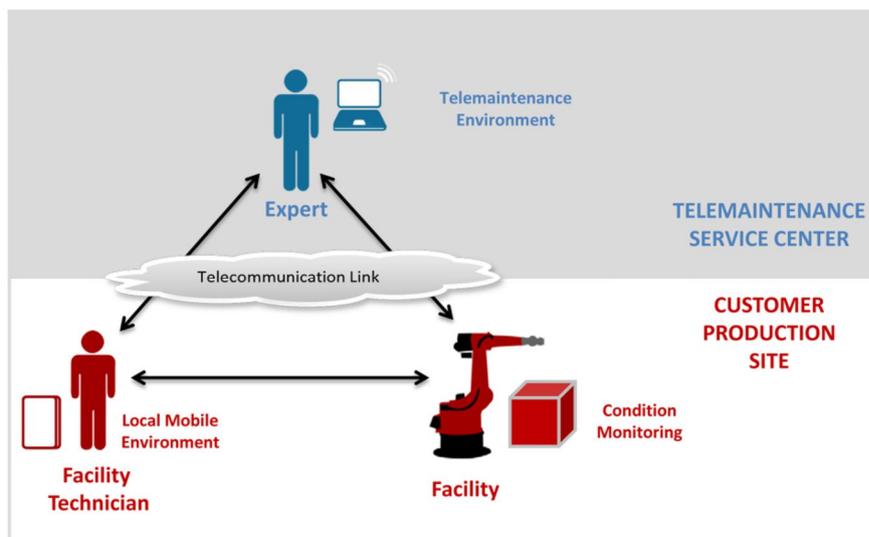


Figura 36 – Schema della tele manutenzione [105].

E' ben noto che l'esecuzione delle attività di manutenzione introducono alcuni rischi conseguenti ad errore umano o a procedure operative o organizzative sbagliate. Sviluppare un sistema quale il sistema di manutenzione predittiva da remoto ha un effetto immediato sul miglioramento del livello di sicurezza non solo degli impianti di produzione, ma anche della singola postazione di lavoro [100].

I dispositivi mobili diventano, dunque, strumenti essenziali (fig. 37), se sono abbastanza robusti per l'uso industriale, fondamentali per gli aspetti di usabilità. Inoltre, data la limitata grandezza dello schermo dei dispositivi mobili, diventa estremamente importante la selezione delle informazioni visualizzate e le possibilità di interazione [102].

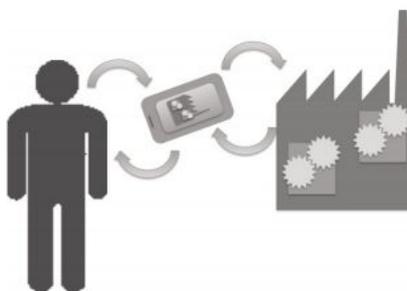


Figura 37 – Interazione tramite dispositivi mobili con i sistemi cibernetici (CPS)

[102].

5.3.1 Human-Robot collaboration ed i nuovi problemi di safety

Il nuovo scenario della produzione nell'industria 4.0 vede l'affermarsi, oltre all'introduzione di tecnologie *smart* a disposizione degli operatori, di una nuova forma di interfaccia uomo-macchina che è da assimilarsi ad una vera e propria collaborazione: il robot al servizio dell'operatore di *front-line* che ne facilita le operazioni rendendole anche più ergonomiche.

Ad oggi il processo di assemblaggio può essere di due tipi. Un tipo di processo completamente automatizzato delimitato da un'area segregata dove l'accesso all'uomo è consentito solo per mezzo di dispositivi di interblocco o barriere immateriali che interrompono il funzionamento della macchina quando ne rilevano la presenza. Un secondo tipo di processo di assemblaggio è di tipo ibrido in quanto richiede la presenza anche dell'uomo per quelle operazioni che richiedono specifiche *skills* [106].

La futura stazione di assemblaggio, invece, prevede la copresenza fisica e temporale dell'uomo e del robot che condividono la stessa postazione di lavoro e gli stessi *tasks*.

In tale panorama va, dunque, rivisitato anche il concetto di *safety* del lavoratore. Infatti, se da un lato la "human-robot collaboration" semplifica le operazioni del lavoratore rendendole meno complesse, e se vogliamo anche meno suscettibili a commettere errori, dall'altra parte la stretta contiguità uomo-robot, priva di qualsiasi barriera fisica, deve garantire lo stesso livello di sicurezza [107].

Il progresso raggiunto nel campo della "sicurezza del macchinario" [108]. con una progettazione sempre più intrinsecamente sicura, si apre quindi a nuovi sviluppi legati a questo nuovo tipo di interazione. In tale scenario, le barriere materiali, che da sempre hanno rappresentato il sistema di protezione per eccellenza e quindi anche il più utilizzato, lasciano spazio ad un utilizzo sempre più diffuso delle barriere immateriali (fotocellule, sensori, barriere laser ecc.) che facilitano questa nuova forma di collaborazione uomo-robot e che vede cadere il primo principio della prevenzione ovvero, l'eliminazione del pericolo alla fonte eliminando qualsiasi tipo di interazione con l'uomo e segregando la macchina. Questo non è più possibile

nella nuova configurazione che viene ad assumere la nuova postazione di lavoro nella *Smart Factory* che ne prevede la condivisione da parte dell'uomo e del robot. Dalla figura seguente si evince il cambiamento che sta avvenendo nell'interazione uomo-robot.

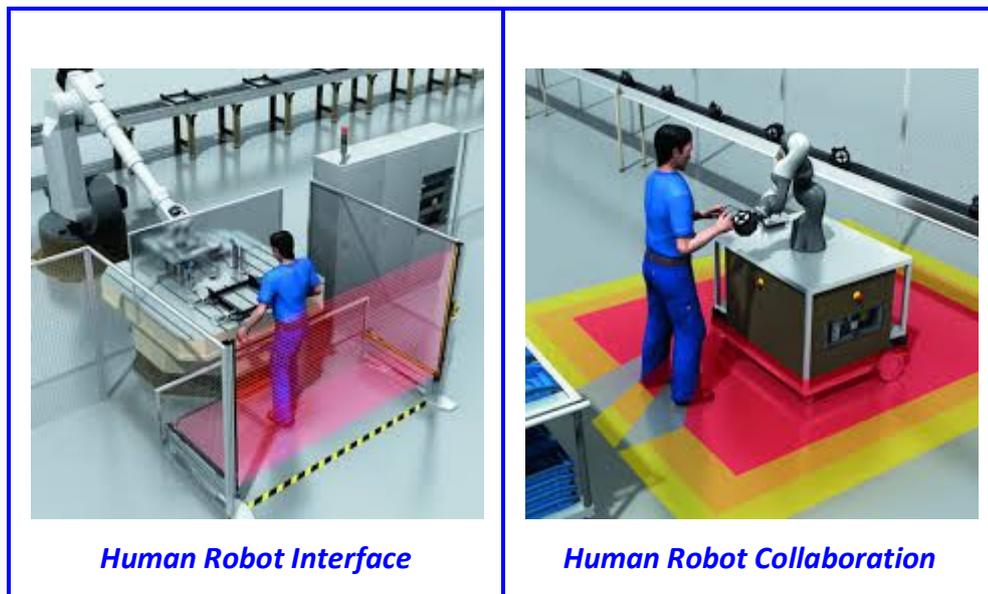


Figura 38 - Differenza tra *human-robot interface* e *human – robot collaboration*.

Il nuovo problema di *safety*, quindi, resta legato alla progettazione intrinseca (*inherent design*) delle attrezzature da lavoro, ma implica la rivisitazione delle direttive comunitarie che dettano i requisiti stringenti sui principi di progettazione e le norme ad esse armonizzate che devono fornire nuove soluzioni tecnologicamente affidabili tali da tutelare la sicurezza del lavoratore in questa nuova forma di interazione.

Ad oggi, la norma vigente ISO 10218-1 riguardante "*Safety requirements for industrial robots*" [109] prevede una separazione rigorosa tra l'uomo ed il robot o almeno un dispositivo di arresto del robot quando l'uomo entra nello spazio di lavoro del robot. Mancano dunque standard normativi che tengano conto della copresenza dell'uomo e del robot e della loro interazione. Per superare questo *gap* normativo è stato proposto un *draft* di norma: ISO/TS 15066 "*Collaborative robots*" [110] che potrebbe includere ulteriori specifiche sui requisiti di sicurezza dei

robot in particolare per quanto riguarda le forze massime consentite ai robot quando sono in movimento in prossimità dell'uomo [106].

La simbiotica collaborazione uomo-robot migliorerà la produttività e l'efficacia delle risorse combinando la flessibilità degli esseri umani e la precisione delle macchine. La collaborazione uomo-robot sarà resa fattibile dai sistemi cibernetici che Lee [111] definisce: *“Cyber –physical systems are integrations of computation and physical processes. Embedded computers and networks monitor and control the physical, usually with feedback loops where physical processes affect computations and vice versa”*.

I sistemi cibernetici (CPS) consentono la collaborazione uomo-robot nelle aree di pianificazione dinamica, di prevenzione attiva della collisione e di controllo adattativo del robot. Come mostrato in figura 39, gli esseri umani possono istruire i robot con il linguaggio, i segni, i gesti e le loro combinazioni in fase di montaggio collaborativo. Dall'altra parte, l'assistenza umana in-situ, ad esempio, sarà possibile e fattibile per mezzo di occhiali 3D.

La standardizzazione è un ulteriore sforzo necessario per trasformare la collaborazione uomo-robot in realtà nelle fabbriche del futuro [112].

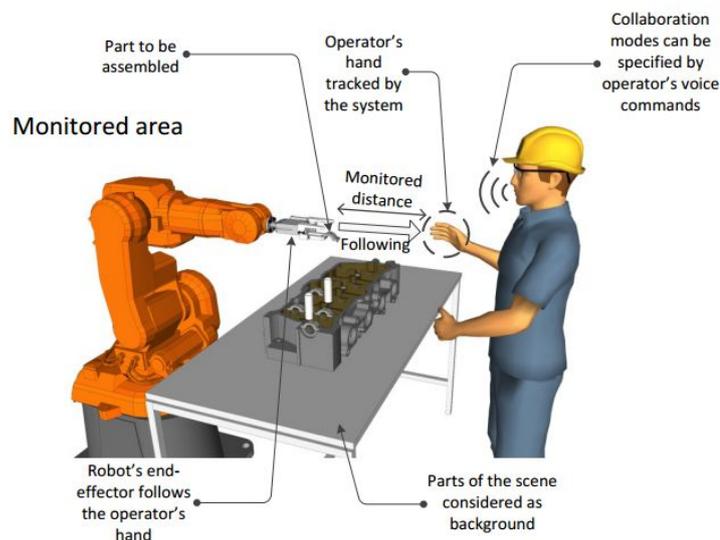


Figura 39- Human- Robot Collaboration mediante un'applicazione CPS [112].

Tra gli studi effettuati al fine di garantire la sicurezza del lavoratore durante questa nuova interazione fisica uomo-robot senza barriere, viene di seguito accennato ad un robot equipaggiato con un sistema integrato di sensori di diverso tipo risultato di un lavoro di ricerca [113], partendo dalla considerazione che più tipologie di sensori possono integralmente garantire la sicurezza dell'operatore. Tale sistema è costituito da un sensore di visione (vision sensor) che consente al robot di rilevare e riconoscere la faccia umana, la mano priva del carico e ogni oggetto trasportato dall'uomo. Inoltre, questo sensore consentirà al robot di definire la direzione lungo la quale applicare la forza e non quelle pericolose per l'uomo. Un altro sensore è quello di forza (force sensor) che aiuterà il robot a reagire al movimento della mano umana durante il compito di consegna pezzo o di assemblaggio. Il sensore di pelle consentirà di prevenire ogni tipo di collisione tra l'uomo ed il braccio del robot. In aggiunta a questi sensori, il robot è dotato di un sistema vocale per informare l'uomo sullo stato in corso del sistema.

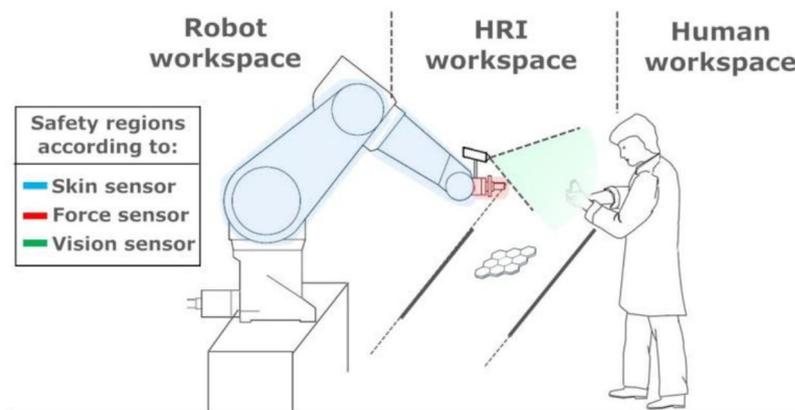


Figura 40 – Sistema di *Human-Robot Interaction* con sensori di sicurezza integrati [113].

5.3.2 *Augmented reality*: un'opportunità per le attività di manutenzione

Nella trattazione del presente lavoro di tesi, è stato più volte sottolineato il concetto di rischio legato allo svolgimento delle attività di manutenzione. Queste ultime consistono spesso sia in operazioni complesse che richiedono una specifica formazione, sia in attività da svolgersi in ambienti severi e non familiari e questo

accade soprattutto quando l'attività di manutenzione viene affidata a servizi in *outsourcing*. Tutto ciò porta ad aumentare il rischio di *errore umano* nelle attività di manutenzione.

Il rapido sviluppo delle nuove tecnologie, che sta caratterizzando l'evoluzione verso l'industria 4.0, offre nuove opportunità per rivedere le modalità di svolgimento delle operazioni di manutenzione minimizzandone il rischio connesso e rendendole più efficaci in termini di qualità e di tempo [114]. In particolare la tecnologia di *Augmented Reality* (AR) ben si presta a facilitare le operazioni di manutenzione, guidando il tecnico nello svolgimento del *task*, aggiornandolo in tempo reale sulle condizioni e i limiti dell'ambiente lavorativo, riducendo i costi ed il tempo legati alle attività di manutenzione, riducendo la documentazione necessaria, aumentando il livello di sicurezza diminuendo quindi la probabilità di errore.

Lo scopo di un tecnologia AR è quello di migliorare la performance umana fornendo in tempo reale informazioni rilevanti per lo svolgimento di uno specifico *task*.

Ad oggi, il settore della manutenzione sembra quello più idoneo per testare l'efficacia di questa tecnologia, soprattutto per i summenzionati vantaggi che questa comporta nel supportare questo tipo di attività.

Lo sviluppo di un sistema AR implica la scelta di un hardware, lo sviluppo di un software e di un metodo di visualizzazione [115].

In letteratura è stato proposto un modello di architettura per realizzare un sistema AR [114]. Tale architettura prevede un sistema di interfaccia AR (AR module), un sistema *knowledge based* (KBS module) ed uno che integra i suddetti sistemi (Unifier module).

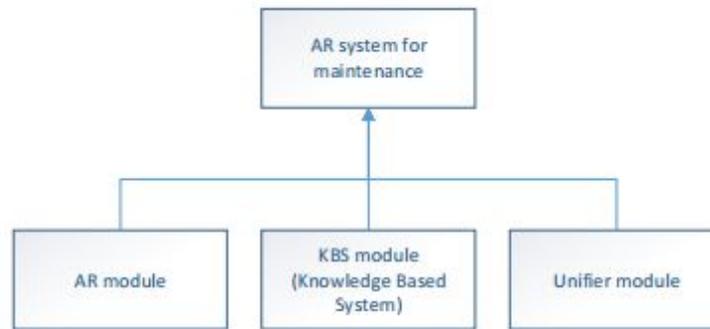


Figura 41 – I principali componenti di un sistema AR di manutenzione [114].

Il modulo di interfaccia AR deve fornire informazioni relative allo specifico task da eseguire secondo le seguenti modalità [114]:

Text instructions: istruzioni sul compito da svolgere in modo che l'utente venga guidato nelle operazioni mediante visualizzazione delle stesse.

Verbal instructions: le istruzioni vengono fornite anche mediante messaggi verbali.

Registered labels: le targhette mostrano la localizzazione precisa del componente sul quale intervenire rispetto anche all'ambiente circostante.

3D models of tools: per facilitare il compito riducendo i tempi, gli strumenti necessari vengono mostrati all'utente tramite display

Images of correct conditions: all'utente vengono fornite anche immagini relative alle corrette condizioni di esecuzione del task.

Le operazioni di manutenzione, sono caratterizzate dalla necessità di disporre di un elevato quantitativo di informazioni, a partire dai contenuti del manuale d'uso e manutenzione che specificano le modalità e la periodicità degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, le caratteristiche tecniche della macchina nonché i relativi dispositivi di sicurezza installati.

A tal fine il modulo *Knowledge based* fornisce le nozioni fondamentali per svolgere uno specifico *task* di manutenzione e nello specifico:

Technical documents: informazioni contenute nel manuale che possono essere analizzate e valute per poi essere selezionate dal sistema digitale.

Videos and clips: materiale multimediale utilizzato per la formazione e l'addestramento.

Pictures and icons: disegni ed illustrazione dei rischi che si potrebbero presentare durante l'esecuzione di un task.

Collection of snap shots: momenti dello svolgimento di un particolare task che descrivono situazioni particolari, errori e problemi che si potrebbero presentare.

Il modulo di KBS costituisce uno *step* importante per il processo di “*decision making*” e che avrà ricadute sulla performance e la sicurezza dei task svolti mediante la tecnologia AR.

Il modulo Unifier riceve informazioni dal modulo AR circa il contesto e le informazioni tecniche dal modulo KBS, dopo li processa e li presenta sotto forma di testo, video, ecc mediante il dispositivo di visualizzazione.

E' dunque chiaro che una tale tecnologia può supportare il tecnico di manutenzione fornendo tutta una serie di informazioni sul compito da svolgere che ad oggi riceve in fase di addestramento, ma che temporalmente è lontana dal momento in cui dovrà applicarle. Questo sistema digitale, quindi, dovrà gestire un'enorme quantità di dati ma risolverà anche la frammentarietà delle informazioni legate alla conoscenza di una macchina: dal manuale d'uso e manutenzione fornito dal costruttore della stessa al registro dei controlli e degli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria effettuati su di essa.

Tuttavia, ad oggi, si devono ancora fare passi in avanti per ottenere *benefits* dall'implementazione di questa tecnologia nelle pratiche manutentive in quanto oltre a risolvere la gestione dei *big data*, particolare approfondimento richiede la fase di progettazione dell'interfaccia uomo-macchina che è la vera sfida da vincere per incidere significativamente sulla sicurezza delle operazioni di manutenzione.

5.4 Punti di forza e di debolezza della manutenzione secondo il paradigma dell'industria 4.0

La gestione della manutenzione risulta essere un fattore chiave anche nel panorama dell'industria 4.0. Essa è proattiva e orientata al conseguimento di risparmi sui costi,

miglioramento della redditività, migliori livelli di servizio per la soddisfazione del cliente, il miglioramento della salute, la sicurezza e le prestazioni ambientali.

La manutenzione predittiva, grazie agli opportuni supporti informatici, consente di accedere ad informazioni utili per il business dell'azienda e di fare scelte strategiche in termini di scelta di ricambi, di tecnologie più appropriate, di piani di interventi mirati evitando fermi improvvisi, etc. Ricapitolando essa consente:

- controllo/riduzione dei costi;
- gestione del ciclo di vita dei beni;
- misura delle performances (KPIs)
- estensione della vita dei beni e degli impianti;
- fare attività manutentive mirate;
- raccogliere dati sullo stato di salute delle macchine/impianti;
- avere una mappatura dei rischi;
- rendere le attività manutentive meno rischiose, grazie alle tecnologie smart ed alla possibilità di gestirle da remoto.

Tuttavia, è bene sottolineare quelli che costituiscono ancora dei fattori limitanti al piano raggiungimento dei benefici che una manutenzione predittiva intelligente potrebbe conseguire. Questi sono dovuti principalmente alle seguenti fasi:

- *Sviluppo del sistema di monitoraggio*: la definizione del processo da monitorare prevede una fase di analisi e sviluppo per definire le variabili di interesse da monitorare e la scelta dei sensori ad hoc.
- *Raccolta dati*: definizione della frequenza e delle modalità con cui effettuare la raccolta dati.
- *Generazione di big data*: nel caso di raccolta dati in continuum, trasmettere e ricevere tutti i dati senza inserire regole e filtri a monte porta a dover gestire grandi moli di dati con un *overhead* di *storage* e di calcolo.
- *Costruzione e/o scelta dell'algoritmo predittivo*: per individuare fenomeni non noti a priori, occorre prima sviluppare una ricerca del segnale opportuno con

diverse tipologie di sensori poi utilizzare i risultati con cui costruire l'algoritmo predittivo opportuno.

- *Revisione continua*: continua revisione degli studi per lo sviluppo degli algoritmi e per la correlazione dati, per il monitoraggio degli impianti e per i sistemi di raccolta dati, per l'individuazione in tempo reale dello stato di malfunzionamento delle macchine/impianti.
- *Acquisizione di specifiche competenze*: il manutentore deve saper utilizzare gli strumenti informatici ed avere capacità di analisi ed interpretazione dei dati.
- *Idonei sistemi di interfaccia uomo-smart technologies*: il sistema di interfaccia deve essere tale da garantire una lettura omogenea dei dati e un unico sistema di analisi degli stessi. Inoltre devono essere *user friendly*.

Di seguito si riporta una tabella sinottica con i punti di forza e di debolezza della Manutenzione 4.0.

IPdM	Strengths	Weaknesses
ACQUISIZIONE DATI	<ul style="list-style-type: none"> • Completezza delle informazioni. • Affidabilità dei dati acquisiti. 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestione di un'enorme mole di dati: BIG DATA. • Scelta dell'ideale sensore atto a rilevare i parametri di interesse ai fini della valutazione dello stato di salute dell'apparecchiatura. • Sistema di raccolta dati.
DECENTRALIZZAZIONE DEL SERVIZIO DI MANUTENZIONE	<ul style="list-style-type: none"> • Manutenzione da remoto con conseguente riduzione dei rischi legati alle attività manutentive. 	<ul style="list-style-type: none"> • Problematiche legate all'interfaccia con i dispositivi intelligenti. • Necessità di avere banche dati omogenee e stessi criteri di analisi ed interpretazione dei dati.
NUOVI STRUMENTI DI MANUTENZIONE (tools and methos)	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Augmented reality</i>. • Migliore performance delle apparecchiature • Maggiore sicurezza per i manutentori. 	<ul style="list-style-type: none"> • Introduzione di nuovi problemi di interfaccia uomo-smart technology

COSTI	Aumento dell'affidabilità delle macchine e conseguente minor numero di fermi macchina con ricadute positive sulla produttività.	<ul style="list-style-type: none"> • Maggiori investimenti in tecnologie smart, sensoristica, macchine altamente automatizzate.
--------------	---	--

Tabella 9 – Punti di forza e di debolezza della manutenzione nell'industria 4.0

Di fronte a questo scenario così profondamente tecnologico, una delle principali sfide è cogliere le opportunità derivanti dall'introduzione dei dispositivi e dei paradigmi tipici dell'Industria 4.0: a partire da un'automazione sempre più spinta delle attività produttive all'adozione dell'*Internet of things* in cui è presente una forte integrazione informativa sia nei sistemi macchina-macchina che macchina-uomo.

Tuttavia, il Big Data, tecnologia cardine dell'industria 4.0, porta in sé ancora una grande criticità, ovvero la presenza di banche dati disomogenee e criteri dissonanti di interpretazione dei dati.

Diventa quindi strategica la standardizzazione dei modi di raccolta e di analisi dei dati. Ed è qui che il "Fattore Uomo" diventa determinante nel suo nuovo ruolo di supervisore che gli richiede di avere capacità di "Problem solving" e conoscenze degli strumenti statistici ed informatici.

Il manutentore, in particolare, avrà un ruolo fondamentale nell'analisi e nella predizione dei guasti, a cui sarà richiesto un "know how" non più misurato in azioni ed operazioni, bensì dovrà avere un certo grado di autonomia ed una visione sistemica del processo.

Le nuove figure professionali, che si vengono a delineare in questo nuovo scenario, devono seguire questo progresso tecnologico, per cui diventa fondamentale rivedere anche tutti i processi formativi, per evitare che essi possano costituire un freno verso l'evoluzione dell'industria 4.0.

Ritorna quindi il concetto di visione sistemica, in quanto il fattore chiave anche in questo nuovo scenario, non sarà la tecnologia, che chiunque può acquisire con facilità, ma la risorsa umana che dovrà possedere la capacità di gestirla al meglio, acquisendo conoscenze tecniche, gestionali, informatiche e statistiche.

CONCLUSIONI

L'importanza della manutenzione, quale fattore strategico di competitività per le organizzazioni, è stato più volte trattato ed approfondito in letteratura.

Il presente lavoro, si è invece soffermato sullo stretto legame tra manutenzione e sicurezza. Un binomio, quest'ultimo, messo ancor più in evidenza dagli ultimi sviluppi degli approcci manutentivi che tendono verso una visione proattiva.

In questo quadro, la *Risk Based Maintenance*, il cui criterio decisionale è costituito dal rischio delle attrezzature/impianti, ben coniuga entrambi gli aspetti: assicurare la longevità degli *asset* con ricadute sulla salute e sicurezza dei lavoratori e sulla salvaguardia dell'ambiente. Tuttavia, il binomio manutenzione-sicurezza, si presta anche ad un'altra considerazione: le attività di manutenzione sono intrinsecamente pericolose per la peculiarità delle modalità di esecuzione delle stesse.

In questa prospettiva, non si può non tenere in conto del "Fattore Umano", dapprima come "decisore" nel processo che porta alla definizione dei piani di manutenzione e di ispezione, e poi come "manutentore", ed in quanto tale è esposto a pericoli nello svolgimento delle attività.

Un approccio sistemico al problema necessita di un utile strumento per mettere in evidenza le interrelazioni tra i componenti di un sistema, siano essi persone, cose, funzioni aziendali, elementi socio-tecnici, caratteristiche psicofisiche, ecc. Il System Dynamics, ed in particolare lo strumento grafico a cui si fa ricorso, il *Causal Loop Diagram*, rende immediatamente visibili queste relazioni causa-effetto e che costituiscono il punto di partenza per la costruzione successiva del modello.

Dal modello proposto, emerge quanto sia il "fattore uomo" che le "attività di manutenzione" siano elementi chiave all'interno del *Safety Management* e sui quali dover agire in maniera congiunta o singola (gli aspetti sono tra loro interconnessi) al fine di migliorare lo stato del sistema.

Il *Safety Management System* per essere proattivo, per misurare le prestazioni e fare previsioni future necessita di una serie di dati puntuali, precisi e numerosi [84].

In quest'ottica il paradigma dell'industria 4.0, la quarta rivoluzione industriale che ci accingiamo a sperimentare, ben si coniuga con questa esigenza, in quanto dispone di un enorme mole di dati e degli strumenti per gestirli necessari per prevedere possibili scenari richiesti per una gestione efficace del rischio.

Nell'ottica dell'industria 4.0, vengono inoltre rivisti i due fattori chiave del SMS: la manutenzione ed il fattore uomo.

La manutenzione 4.0. assume carattere "predittivo intelligente", dove il termine "predittivo" indica una manutenzione *condition based*, in quanto sarà possibile predire lo stato di salute dell'attrezzatura in base all'enorme mole di dati che saranno rilevati dai sensori posti sulle macchine. L'aggettivo "intelligente" connota, invece, il nuovo aspetto della fabbrica 4.0 in cui le macchine sono in grado di comunicare tra di loro e con le postazioni da remoto tramite l'utilizzo di internet.

La manutenzione, sarà il processo che avrà maggiori ricadute positive derivanti dall'introduzione delle nuove tecnologie e dell'*Internet of things*.

Il supporto della sensoristica e delle nuove tecnologie consentiranno la rilevazione di una serie di dati necessari per effettuare previsioni quanto più affidabili sullo stato di salute delle attrezzature ed in base a queste pianificare interventi mirati.

In questo scenario fortemente automatizzato, cambia anche il ruolo dell'uomo all'interno della nuova *Smart Factory*: "supervisore" dei robot e dei processi. Alla risorsa umana saranno richieste nuove "skill" per la gestione dell'enorme mole di dati che dovranno essere acquisiti, analizzati ed interpretati.

Ritorna quindi il concetto di visione sistemica, in quanto il fattore chiave anche in questo nuovo scenario, non sarà la tecnologia, che chiunque potrà acquisire con facilità, ma la risorsa umana per poterla gestire al meglio.

Invece, per particolari lavorazioni che richiederanno ancora specifiche *skills* da parte dell'operatore di *frontline*, troviamo l'uomo assistito dal robot. Una nuova forma di interazione uomo-macchina che va sotto il nome di *human-robot collaboration* e che apre a nuovi scenari nell'ambito *safety*.

L'uomo affiancato dal robot senza più nessuna barriera fisica od immateriale che ne arresta il movimento quando l'uomo entra nel suo raggio di operabilità. Tali nuovi

scenari portano a rivedere, dunque, le norme sui dispositivi di sicurezza delle macchine che devono ora portare in conto i nuovi cambiamenti legati alle nuove modalità di lavoro.

E' stato messo in evidenza come il ricorso ad alcune tecnologie, quali l'*Augmented Reality* (AR), renderà il lavoro del manutentore più sicuro ma al tempo stesso gli saranno richieste maggiori conoscenze per lo svolgimento delle sue attività, per cui la problematica si sposterà a livelli cognitivi e il "*knowledge management*" sarà la nuova sfida.

BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI EN 10224:2007 – Manutenzione – Processi, sotto processi e attività principali – Principi fondamentali.
- [2] UNI EN 13306:2003 – Manutenzione – Terminologia.
- [3] UNI EN 10366:2007 – Manutenzione – Criteri di progettazione della manutenzione.
- [4] Fedele, L., Furlanetto, L. e Saccardi, D. *Progettare e Gestire la Manutenzione*. Mc GrawHill. Milano. 2004.
- [5] Manzini, R., Regattieri, A. *Manutenzione dei sistemi di produzione*. Progetto Leonardo. Esculapio. Bologna. 2006.
- [6] L. Furlanetto, M. Garetti, M. Macchi - *Principi generali di gestione della manutenzione* – Franco Angeli. 2014.
- [7] Arunraj, N., & Maiti, J. *Risk-based maintenance-techniques and applications*. Journal of Hazardous Materials, 142, 653–661. 2007.
- [8] Ahmad, R., & Kamaruddin, S. *An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application*. Computers & Industrial Engineering, 63, 135–149. 2012.
- [9] Ebeling, C. E. *An introduction to reliability and maintainability engineering*. New York, NY: Tata McGraw-Hill Education. 2004.
- [10] Arunraj, N., & Maiti, J. *Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming*. Safety Science, 48, 238–247. 2010.
- [11] Barnard, I. *Asset management – An insurance perspective* (pp. 44–53). Engineering Asset Management: Springer. 2006.
- [12] Hassan Iqbal, Solomon Tesfamariam, Husnain Haider & Rehan Sadiq. *Inspection and maintenance of oil & gas pipelines: a review of policies*. Structure and Infrastructure Engineering. 2016.
- [13] Usher, J. S., Kamal A. H. & Syed, W.H. Cost optimal preventive maintenance and replacement scheduling. IIE transactions, 30, 1121-1128. 1998.
- [14] Takahashi, Y. e Takashi, O. *TPM: Total Productive Maintenance*. Asian Productivity Organization. Tokyo. 1990.

- [15] L. Furlanetto, M. Garetti, M. Macchi - *Ingegneria della manutenzione* – Franco Angeli. 2016.
- [16] Pinteleon, L. e Parodi-Hertz, A. *Complex System Maintenance Handbook*. Springer. 2008.
- [17] Jones, R.B. *Risk-Based Management: A Reliability-Centered Approach*. Gulf Publishing Co., Houston, TX, 1995.
- [18] Moubray, J. *Reliability-Centered Maintenance*. Second Edition. Butterworth-Heinemann, Oxford.1997.
- [19] D. Geraci, M. Madonna, L. Monica, C. Delle Site, F. Giacobbe. *La pianificazione della manutenzione e delle ispezioni delle attrezzature in pressione secondo la logica del Risk Management*. Atti del Convegno Scientifico Nazionale “Sicurezza nei Sistemi Complessi”. 2011.
- [20] API 580, 2009, *Risk Based Inspection*, Washington, D.C., US.
- [21] Jovanovic, A. *Risk-based inspection and maintenance in power and process plants in Europe*. Nuclear Engineering and Design, 226:165-182. 2003
- [22] Koppen, G. *Development of risk-based inspection*. In: M. Bieth, J. L. Monjaret (Eds.), Proceedings of the First International Conference on NDE Relationship to Structural Integrity for Nuclear and Pressurised Components, vol. II, 20–22 October 1998, Amsterdam, Woodhead Publishing Ltd.
- [23] Khan, F.I. e Haddara, M.M., *Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 16:561-573. 2003.
- [24] Sakai, S. *Risk-based Maintenance*. Special feature article: JR EAST Technical Review, 17:1-4. 2007.
- [25] Khan, F.I., Haddara, M.M. e Sadiq, R. *Risk-based inspection and maintenance (RBIM) Multi-attribute Decision-Making with Aggregative Risk Analysis*. Process Safety and Environmental Protection, 82:398-411.2004.
- [26] Moan, T. *Reliability-based management of inspection, maintenance and repair of offshore structures*. Structure and Infrastructure Engineering, 1, 33–62. 2005.

- [27] Gupta, A., & Lawsirirat, C. *Strategically optimum maintenance of monitoring-enabled multi-component systems using continuous time jump deterioration models*. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 12, 306–329. 2006.
- [28] Zio, E. *Prognostics and health management of industrial equipment*. *Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems: Methods and Techniques*. 333–356. 2012.
- [29] Jardine, A. K., Lin, D., & Banjevic, D. *A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20, 1483–1510. 2006.
- [30] Khan, F. I. *Maximum credible accident scenario for realistic and reliable risk assessment*. *Chemical Engineering Progress*, November, 55–67. 2001.
- [31] Khan, F. I., & Abbasi, S. A. *MAXCRED—a new software package for rapid risk assessment in chemical process industries*. *Environment Modeling and Software*, 14, 11–25. 1999.
- [32] Shafaghi, A. *Structure modeling of process systems for risk and reliability analysis*. In Kandel, & Avni (Eds.), (pp. 45–64). *Engineering risk and hazard assessment*, vol. 2. Florida: CRC Press Inc. 1988.
- [33] Greenberg, H. R., & Slater, B. B. *Fault tree and event tree analysis*. New York: Van Nostrand Reinhold. 1992.
- [34] Rauzy, A. *New algorithms for fault tree analysis*. *Reliability Engineering and System Safety*, 40, 203–211. 1993.
- [35] CWA 15740. *Risk Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry (RIMAP)*. 2008.
- [36] prEN 16991:2016 – *Risk Based Inspection Framework (RBIF)*.
- [37] M. Faccio, A. Persona, F. Sgarbossa, G. Zanin. *Industrial maintenance policy development: a quantitative framework*. *Int. J. Production Economics*. 147, 85-93. 2014.
- [38] Waeyenbergh, W., Pintelon, L. *Maintenance concept development: a case study*. *International Journal of Production Economics*. 89, 395–405. 2004.

- [39] Kroning, S., Denkena, B. *Dynamic scheduling of maintenance measures in complex production system*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 6, 292-300. 2013.
- [40] Geraci, D., Monica, L., Ferraro, A., Madonna, M., Righetti, R. *La gestione della manutenzione secondo la logica Risk Management nella realtà produttiva delle raffinerie*. Atti del convegno INAIL SAFAP 2012.
- [41] ABS. *Guide for surveys using risk-based inspection for the offshore industry*. Houston, TX , USA. 2003.
- [42] Manzini, R., Regattieri, A., Pham, H., Ferrari, E. *Maintenance for Industrial Systems*. London. Springer, London Ltd. 2009.
- [43] UNI EN 15341:2007. MANUTENZIONE – Indicatori di prestazione della manutenzione (KPI).
- [44] API 581, 2008. *Risk Based Inspection, Base Resource Document*. Washington, D.C., US.
- [45] Wenner, C.A., Drury, C.G. *Analyzing human error in aircraft ground damage incidents*. International Journal of Industrial Ergonomics 26, 177-199. 2000.
- [46] National Transportation Safety Board, *General Aviation Maintenance-Related Accidents: A Review of 10 Years of NTSB Data*, NTSB, 2002.
- [47] Latorella, K.A., Prabhu, P.V. *A review of Human error in Aviation Maintenance and Inspection*. International Journal of Industrial Ergonomics 26, 133-161. 2000.
- [48] Meneguzzo G., *Manutenzione: "Fattore uomo"*, Manutenzione – Tecniche e management, Giugno 2004.
- [49] A. Hameed, F. Khan, S. Ahmed. *A risk-based shutdown inspection and maintenance interval estimation considering human error*. Process Safety and Environmental Protection 100 (9-21). 2016.
- [50] Swain A.D., Guttman H. E. *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*. NUREC/CR-1278, U.S. Nuclear Regulatory Commission. Agosto 1983.
- [51] L. Wilson, D. McCutcheon. *Industrial Safety and Risk Management*. The University of Alberta Press, Edmonton, Alberta, Canada. 2003.

- [52] Toriizuka, Takashi. *Application of performance shaping factor (PSF) for work improvement in industrial plant maintenance tasks*. Int. J. Ind. Ergon. 28 (2001), 225–236. 2001.
- [53] Kirwan B. *The validation of three human reliability quantification techniques – THERP, HEART and JHEDI; Part 1 –technique descriptions and validation issues*. Appl. Ergon. 1996.
- [54] Kirwan, B., Kennedy, R., Taylor-Adams, S., Lambert, B. *The validation of three human reliability quantification techniques—THERP, HEART and JHEDI; part II—results of validation exercise*. Appl. Ergon. 28 (1), 17–25. 1997.
- [55] Kirwan, B. *The validation of three human reliability quantification techniques—THERP, HEART and JHEDI; part III—practical aspects of the usage of the techniques*. Appl. Ergon. 28 (1), 27–39. 1997.
- [56] Norman, D.A. *Categorization of action slips*. Psychol. Rev. 88, 1–15. 1981.
- [57] Reason, J. *Human Error*. Cambridge University Press, Cambridge. 1990.
- [58] Sanders, M., McCormick, E. *Human Factors in Engineering and Design*, 7th ed. McGraw-Hill, New York, NY.1993.
- [59] Dhillon, Y., Liu, B.S. *Human error in maintenance: a review*. J. Qual. Maint. Eng. 12 (1), 21–36. 2006.
- [60] Nelson, W.E. *Steam turbine over speed protection*. Chem.Process.59 (7), 48–54. 1996.
- [61] Mantovani G. *Ergonomia - Lavoro, sicurezza e nuove tecnologie*. Bologna: Il Mulino. 2000.
- [62] Neisser U. *Cognitive Psychology*. New York: Appleton Century Crofts. 1967.
- [63] Rasmussen J. *Information processing and human-machine interaction: An approach to cognitive engineering*. Wiley; 1986.
- [64] G. Martella, M. Madonna, L. Monica, , E. Pichini Maini, L. Tomassini. *Il fattore umano nella valutazione dei rischi: confronto metodologico fra le tecniche per l'analisi dell'affidabilità umana*. Prevenzione Oggi, Volume 5, n. 1/2. Gennaio 2009.
- [65] Vestrucci P. *Modelli per la valutazione dell'affidabilità umana*. Milano. Franco Angeli; 1990.

- [66] Reason J. *L'errore umano*. Bologna: Il Mulino; 1994.
- [67] Di Pasquale, V., Miranda, S., Iannone, R., Riemma, S.: *A simulator for human error probability analysis (SHERPA)*. Reliab. Eng. Syst. Saf. 139, 17–32. 2015
- [68] IEC 62508: *Guidance on human aspects of dependability*. 2010.
- [69] J.W. Forrester, *Industrial Dynamics*. MIT Press, Cambridge. 1961.
- [70] J.D. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw-Hill, 2006.
- [71] J.M. Garcia, *Theory and Practical Exercises of System Dynamics*, Universitat Politècnica De Catalunya, Barcelona, Spain; 2006.
- [72] T. Binder et al., *Developing System Dynamics models from Causal Loop Diagram*, University of Lubeck, Germany.
- [73] Cacciabue, C.: *Modelling and simulation of human behavior for safety analysis and control of complex system*. Saf. Sci. 28, 97–110. 1998.
- [74] Mohaghegh, Z., Kazemi, R., Mosleh, A.: *Incorporating organizational factors into probabilistic risk assessment (PRA) of complex socio-technical systems: a hybrid technique formalization*. Reliab. Eng. Syst. Saf. 94(5), 1000–1018. 2009.
- [75] Gregoriades, A.: *Human error assessment in complex socio-technical systems-system dynamic versus Bayesian belief network*. In System Dynamics Conference, Manchester. 2008.
- [76] Di Nardo M., Gallo M., Madonna M., Santillo L.C., *A Conceptual Model of Human Behaviour in Socio-technical Systems*, SOMET, Naples, 2015.
- [77] Di Nardo M., Tesi di Dottorato in Tecnologie e Sistemi di Produzione “Dal Rischio alla Resilienza degli impianti industriali applicati alla gestione dei sistemi socio – tecnologici”. 2015.
- [78]. Hart, P., Cooper, C., Occupational Stress: toward a more integrated framework. In: Anderson, N., Ones, D.S., Sinangil, H.K., Viswesvaran, C. (eds.) *Handbook of Industrial Work and Organizational Psychology*, vol. 2. Sage, London, 2001.
- [79]. Harvey, S., Courcy, F., Petit, A., Hudon, J., Teed, M., Loiselle, O., Morin, A., *Organizational interventions and psychological health in the work: a synthesis of*

Approaches. Report, Institute de Research en Sante et Securitie au Travail (IRSST), Montreal, 2006.

[80] Rusconi C. *“Training labs: a way for improving Safety Culture”* in Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 109, Washington, D.C., November 10–14, 2013

[81] P. Jain, H. Pasman, S. Waldram, W. Rogers, M. Mannan. *Did we learn about risk control since Seveso? Yes, we surely did, buti t enough? An historical brief and problem analysis.* Journal of Loss Prevention in the Process Industry xxx, 1-13. 2016.

[82] Rasmussen. J. *Risk Management in a dynamic society: a modelling problem.* Safety Science 27, 311-20. 1997.

[83] M. Di Nardo, M. Madonna, L. C. Santillo. *Safety Management System: a System Dynamics Approach to Manage Risks in a Process Plant.* Articolo pubblicato su International Review on Modeling and Simulations 9(4):256. Agosto 2016.

[84] E. Gerede. *A qualitative study on the exploration of challenges to the implementation of the Safety Management System in aircraft maintenace organizations in Turkey.* Journal of Air Transport Management 47, 230-240. 2015.

[85] Pasman, H. *A System perspective for Assessing and Avoiding Low probability, High – Consequence Events.* Risk Analysis and Control for Industrial Processes –Gas, Oil and Chemicals. Butterworth Heinemann, Copyright Elviesier ISBN 978-0-12-800057-1. 2015.

[86] J. Novak, B. Farr-Wharton, Y. Brunetto, K. Shacklock, K. Brown. *Safety outcomes for engineering asset management organizations: Old problem with new solutions?.* Reliability Engineering and System Safety 166, 67-73. 2017.

[87] ISO 9001:2015. *Quality management systems – Requirements.*

[88] ISO 14001:2015 *Environmental management systems -- Requirements with guidance for use.*

[89] ISO/DIS 45001:2016. *Occupational health and safety management systems - Requirements with guidance for use.*

[90] UNI ISO 31000: 2010 – *Gestione del rischio – Principi e linee guida.*

[91] P. Addonizio, L. Bianchi, I. Ferrara, M. Madonna, I. Mazzarelli. *Aziende a rischio di incidente rilevante: stato dell’arte dei sistemi di gestione della sicurezza.* Atti del

Convegno Scientifico “Sicurezza e Affidabilità delle Attrezzature a Pressione – SAFAP2016”. ISBN 978-88-7484-520-0. 2016.

[92] Hermann Mario, Pentek Tobias, Otto Boris. *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review*. Working Paper no.01/2015.

[93] Jian Qin, Ting Liu, Roger Grosvenor. *A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 on Beyond*. Procedia CIRP 52, 173-178. 2016.

[94] Jay Lee, Behrad Bagheri, Hung-An Kao. *A Cyberg-Physical System architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems-* Manufacturing Letters 3, 18-23. 2015.

[95] Jay Lee, Hossein Davari Ardakani, Shanhu Yang, Behrad Bagheri. *Industrial big data analytics and cyberg-physical systems for future maintenance &service innovation*. Procedia CIRP 38, 3-7. 2015.

[96] Lane Thames, Dirk Schaefer. *Software-Defined Cloud Manufacturing for industry 4.0*. Procedia CIRP 52, 12-17. 2016.

[97] Xun Xu. *From cloud computing to cloud manufacturing*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 28, 75-86. 2012.

[98] Brecher C, Lohse W, Vittr M. *Module-based platform for seamless interoperable CAD-CAM-CNC planning*. In: XU XW, NEE AYC, editors. *Advanced design and manufacturing based on STEP*. London: Springer; 2009.

[99] Omid Fathai Valilai, Mahmoud Houshmand. *A collaborative and integrated platform to support distributed manufacturing system using a service-oriented approach based on cloud computing paradigm*. 2012.

[100] Douglas Okafor Chukwuekwe, Per Schjøberg, Harald Rødseth, Alex Stuber. *Reliable, robust and Resilient systems: Towards Development of a Predictive Maintenance Concept within the Industry 4.0 Environment*. Conference Paper. June 2016.

[101] K. Wang. *Intelligent Predictive Maintenance (IPdM) system – Industry 4.0 scenario*. WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol 113, WIT Press. 2016.

- [102] C. Wittenberg – *Human – CPS Interaction – requirements and human-machine interaction methods for the Industry 4.0*. IFAC (International Federation of Automatic Control) Conference Paper. 2016.
- [103]. Dominic Gorecky, Mathias Schmitt, Matthias Loskyll, Detlef Zühlke. *Human-Machine-Interaction in the Industry 4.0 Era*. Published in: 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2014.
- [104] Automation ML Consortium: White paper Automation ML Part 1 – *Architecture and General Requirements*. Automation ML e. V. c/o IAF, Magdeburg. 2014.
- [105] F. Sitter, D. Aschenbrenner, M. Fritscher, A. Kheirkhah, M. Kraub, K. Schilling. *Maintenance and Telematics for Robots (MainTelRob)*. Conference Paper. 2013.
- [106] M. Faber, J. Butzler, C.M. Schlick. *Human-robot cooperation in future production systems: analysis of requirements for designing an ergonomic work system*. Procedia Manufacturing 3, 510-517. 2015.
- [107] G. Michalos, S. Makris, P. Tsarouchi, T. Guasch, D. Kontovrakis, G. Chryssolouris. *Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces*. Procedia CIRPe 37 – 248-253. 2015.
- [108] UNI EN ISO12100:2010 – Safety of machinery – *General Principles for design – Risk assessment and risk reduction*.
- [109] ISO 10218-1:2011 – Robots and robotic devices -*Safety requirements for industrial robots – Part 1*.
- [110] ISO/TS 15066 - Robots and robotic devices - *Collaborative robots*.
- [111] Lee et al. *Cyber physical systems: design challenges*. Technical Report, UCB/EECS-2008-8.
- [112] L. Wang, M. Torngren, M. Onori. *Current Status and Advancement of Cyber-Physical Systems in Manufacturing*. Article in Journal of Manufacturing Systems. May 2015.
- [113] M. Bdiwi. *Integrated sensors system for human safety during cooperating with industrial robots for handing-over and assembling tasks*. Procedia CIRP 23, 65-70. 2014.

[114] A. Martinetti, M. Rajabalinejad, L. van Dongen. Shaping the future maintenance operations: reflections on the adoptions of Augmented Reality through problems and opportunities. *Procedia CIRP* 59, 14-17. 2017.

[115] R. Palmarini, J. Erkoyuncu, R. Roy. An innovative process to select Augmented Reality (AR) technology for maintenance. *Procedia* 59, 23-28. 2017.

Elenco delle figure

Figura 1 – Manutenzione – Quadro generale [2].

Figura 2 – Diagramma di flusso per l'individuazione dei beni critici [6].

Figura 3 – Curva a vasca da bagno [7].

Figura 4 - Evoluzione delle politiche di manutenzione dal 1940 ad oggi [12].

Figura 5 - Le sei grandi perdite di efficienza globale delle apparecchiature[16].

Figura 6 - Contributo tipico dei singoli componenti sul rischio totale di un impianto [22].

Figura 7 – Il processo di valutazione del rischio [7].

Figura 8 - Architettura della metodologia RBM [23].

Figura 9 - Diagramma per la valutazione delle conseguenze [23].

Figura 10 -Descrizione del modulo per la stima del rischio [23].

Figura 11 - Descrizione del modulo della valutazione del rischio [23].

Figura 12 - Descrizione del modulo relativo al piano di manutenzione [23].

Figura 13 -Matrice di rischio per l'analisi preliminare.

Figura 14 - Tipologie di danno e loro specifici meccanismi [36].

Figura 15 – Processo di risk analysis nell'ambito del RBIM framework [36].

Figura 16 – Esempio di pianificazione della manutenzione mediante RBI [36].

Figura 17 – Framework del RBIM all'interno del Management System [36].

Figura 18 -Modello a gradini [64].

Figura 19 – Tipologie di errore[57].

Figura 20. Esempio di Reinforcing e Balancing Loop con delay [70].

Figura 21. Esempio di rappresentazione delle variabili in uno Stock and Flow Diagram [71].

Figura 22 - Casual Loop Diagram dell'errore umano [76].

Figura 23 - Casual effect diagram for human performance model [76].

Figura 24 - Evoluzione dei metodi di Risk Management con l'introduzione del concetto di resilienza [81].

Figura 25 – CLD della manutenzione basata sul rischio.

Figura 26 – Confronto tra KPI Ineffective Maintenance e KPI Plan Maintenance.

Figura 27 – Workforce.

Figura 28 – Human Error Probability.

Figura 29 - Modello di Architettura di un CPS tratto da [94].

Figura 30 - Modello di struttura di un servizio "cloud".

Figura 31 - Schema rappresentativo della piattaforma LAYMOD tratto da [95].

**Figura 32– Curva della manutenzione predittiva tratta da Technical Pillars –
WCM FIAT**

Figura 33 – Framework della Intelligent Predictive Maintenance [101].

Figura 34 – Strumenti visivi per l'individuazione dei componenti critici.

**Figura 35 – Il ruolo dell'operatore quale supervisore della produzione e suo
intervento nel processo decisionale [103].**

Figura 36 – Schema della tele manutenzione [105].

**Figura 37 – Interazione tramite dispositivi mobili con i sistemi cibernetici (CPS)
[102].**

Figura 38 - Differenza tra *human- robot interface* e *human – robot collaboration*.

Figura 39- Human- Robot Collaboration mediante un'applicazione CPS [112].

**Figura 40 – Sistema di *Human-Robot Interaction* con sensori di sicurezza integrati
[113].**

Figura 41 – I principali componenti di un sistema AR di manutenzione [114].

Elenco delle tabelle

Tabella 1 -Esempio di criteri decisionali per ciascun livello di rischio [36].

Tabella 2 - KPIs per il processo manutentivo [43].

Tabella 3 – Tipi di danno e loro caratteristiche[44].

Tabella 4 – Efficacia delle tecniche di ispezione in funzione del tipo di danno da rilevare [44].

Tabella 5 – Le cinque categorie di efficacia delle ispezioni [44].

Tabella 6– Funzioni utilizzate per la simulazione in Powersim.

Tabella 7 – Confronto tra l’approccio IPdM e l’approccio RBIM.

Tabella 8- Confronto tra approccio predittivo intelligente (IPdM) ed approccio *risk based* (RBIM).

Tabella 9 – Punti di forza e di debolezza della manutenzione nell’industria 4.0.