

Simulazione dinamica del processo di manutenzione basato sul rischio

L. C. Santillo*, M. Gallo*, M. Di Nardo*, L. Monica**, M. Madonna**, F. Giacobbe***

*Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale

**INAIL - DIT

***INAIL - UOT CVR Messina

Sommario

Il rapido sviluppo dei sistemi complessi, in particolar modo dell'industria chimica e petrolifera, impone che gli impianti siano progettati, costruiti ed eserciti senza pericoli per l'incolumità e la salute dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente circostante.

In questo quadro, la manutenzione è senz'altro una delle attività più delicate da attuare in grossi insediamenti industriali. Tali situazioni potenzialmente pericolose richiedono una pianificazione delle attività di manutenzione tale da prendere in considerazione non solo gli aspetti economici e di affidabilità ma anche e soprattutto la sicurezza delle persone e l'impatto ambientale. La pianificazione della manutenzione, quindi, può contribuire significativamente alla minimizzazione del rischio e diventa un'attività strategica nella gestione del rischio di un'organizzazione. Tali considerazioni hanno portato negli ultimi anni alla diffusione di una strategia di manutenzione basata sul rischio laddove il livello di rischio è utilizzato come criterio per la pianificazione delle attività manutentive.

Scopo del presente lavoro è quello di analizzare le relazioni causali nel processo di manutenzione basato sul rischio. Il primo passo è quello di fornire una rappresentazione del modello, che consiste in una descrizione del processo di manutenzione tenendo conto delle principali norme internazionali. Ciò consente di definire e delineare la sequenza delle attività, dei compiti e degli attori coinvolti. Per catturare il comportamento dinamico non descritto nel modello sarà strutturato un diagramma causa-effetto (*Causal Loop Diagram*) che sarà propedeutico in un futuro lavoro alla modellizzazione e simulazione del processo analizzato.

1. 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.

Negli ultimi anni si è passati così dalla metodologia *Reliability Centered Maintenance* (RCM) alla *Risk Based Maintenance* (RBM) che prende in considerazione non solo gli aspetti economici e di affidabilità, ma anche la sicurezza del personale e l'impatto ambientale attraverso il ricorso a metodi di analisi del rischio. 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 [3]. Il primo vantaggio 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. [6].

Il presente lavoro presenta una procedura per la pianificazione degli interventi di manutenzione ed ispezione sulla base della metodologia innovativa definita *Risk-based*

Inspection and Maintenance (RBIM). In particolare, il valore aggiunto del lavoro consiste nel correlare gli aspetti ispettivi e manutentivi alle caratteristiche produttive di un impianto industriale. Partendo dalle caratteristiche della metodologia di manutenzione/ispezione basata sul rischio, proposta in ambito europeo nel progetto denominato RIMAP (Risk-Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry) al fine di armonizzare le disposizioni nazionali di regolamentazione dell'UE relative ai programmi di ispezione e manutenzione, si è cercato di strutturare un modello di gestione che integrasse la produzione e la manutenzione basata sul rischio. Per raggiungere questo obiettivo è risultato indispensabile, ai fini della semplificazione della trattazione, partire dalle peculiarità sia del processo produttivo che manutentivo mettendo in rilievo le relazioni e le interdipendenze esistenti tra tutti i fattori che influenzano i fenomeni dinamici. Alla luce di ciò, nella parte conclusiva del lavoro, si introduce l'utilizzo della logica della *System Dynamics* (SD) che, nell'ambito della valutazione e gestione del rischio, sta assumendo un ruolo sempre più importante come strumento di modellazione e simulazione. A seguito di una breve descrizione dei moderni approcci basati sulla SD, ci si è concentrati maggiormente sull'analisi dei meccanismi di feedback instaurati tra le variabili della procedura proposta e dunque sulla stesura del Causal Loop Diagram (CLD). Tale diagramma rappresenta la mappa grafica atta ad individuare l'essenza delle relazioni causali tra le diverse variabili considerate.

2. Metodologia per l'ottimizzazione della manutenzione e delle ispezioni: Risk Based Inspection and Maintenance (RBIM)

Partendo dal documento proposto dal CEN riguardante la metodologia RBIM nell'ambito del progetto RIMAP (Risk-Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry), che fornisce linee guida per lo sviluppo di un programma di manutenzione/ispezione basato sul rischio applicabile a diverse tipologie di industrie e a differenti attrezzature, il presente lavoro si propone di valutare l'impatto che una metodologia *risk based* per lo sviluppo del piano manutentivo/ispettivo ha sulla produttività del sistema. La procedura proposta si articola in cinque macro fasi (Figura 1):

1. Equipment analysis,
2. Risk analysis,
3. Survival data collection and analysis,
4. RBM decision making process,
5. Execution, reporting and performance review.

2.1 Equipment analysis

Il primo passo fondamentale del metodo è la raccolta di tutti i dati tecnici (P&ID, diagrammi logici, lista dei componenti, manuali, ecc.) necessari per l'analisi successiva, anche attraverso interviste al personale e consultazione degli archivi storici delle avarie e degli interventi di manutenzione/ispezione.

La metodologia parte quindi, in un approccio top-down, dall'individuazione dei livelli funzionali più importati dell'impianto e scende poi al livello di componenti o elementi strutturali da individuare come oggetto della manutenzione/ispezione. Il livello di dettaglio a cui la metodologia permette di arrivare dipende solo dalla presenza di dati affidabilistici sufficientemente dettagliati ed il più possibile personalizzati per l'impianto in analisi.

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. [4]. L'individuazione dei componenti critici, invece, può essere realizzata 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 [12]. Per i sistemi e sottosistemi in 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, al funzionamento ed alle ispezioni/manutenzioni. Prima di raccogliere le informazioni necessarie, 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: Produzione, Manutenzione e Servizio di Prevenzione e Protezione [7]. I dati raccolti devono poi essere validati e successivamente immagazzinati in 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 di 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; definiti "*raw technical data*" [2].

2.2 Risk Analysis

Nella seconda fase della metodologia vengono definiti i parametri fondamentali per la valutazione del rischio, discriminando un'analisi preliminare da una dettagliata.

L'analisi preliminare dei componenti viene svolta in maniera rapida, semplice ed economica, esaminando una popolazione limitata di items. Da questa analisi, generalmente i sistemi e le apparecchiature vengono suddivisi in due gruppi: gli items ad alto rischio e gli items a medio/basso rischio. Soltanto per i primi verrà effettuata l'analisi dettagliata; mentre per i componenti 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 [2]. 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 di guasto (CoF) per la parte dell'apparecchiatura esaminata;
- valore o categoria di rischio per la parte dell'apparecchiatura esaminata dalla matrice di rischio preliminare.

L'analisi dettagliata, invece, 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 compiti 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. [2].

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. La procedura RIMAP 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.

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 [2]. 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. Ai fini dell'elaborato è opportuno soltanto evidenziare che i riferimenti metodologici per l'effettuazione di questa fase sono riportati nel dettaglio nella procedura RIMAP. Infine, calcolate le PoF e le CoF, è possibile valutare il rischio ed inserire i risultati nella relativa matrice.

In questa macro 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”* [9]. 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 [5]. 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 [1].

2.3 Survival data collection and analysis

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 [5]. 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) [4]. 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 [8]. 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 [2]. Controllare il livello di rischio consente di variare le politiche manutentive a seconda dello stato dei componenti più critici, avendo ben chiaro quali sono le probabilità di accadimento di ogni singolo modo di guasto di ogni singolo componente, sempre correlato con le relative conseguenze economiche e di sicurezza.

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 [5]. Quindi, il rischio di ciascun componente viene confrontato con il rispettivo livello di accettazione e se qualora non fosse accettabile si impostano specifiche misure mitigative.

Qualora il livello di rischio risultasse accettabile, si passerebbe alla fase successiva.

2.4 RBM Decision making process

Nel momento in cui il rischio risulta accettabile, è possibile implementare la quarta fase della metodologia, in cui viene proposto 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 [4].

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.

2.5 Execution, reporting and performance review

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 azione 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 [2]. L'esecuzione dei lavori invece si articola in diverse fasi:

- richiesta di intervento,
- emissione di un ordine di lavoro,
- esecuzione,
- controllo del lavoro eseguito,
- evasione dell'ordine di lavoro,
- registrazione dell'ordine nel sistema informativo [5].

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.

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 KPI's 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. Poiché l'obiettivo dell'elaborato è quello di valutare gli effetti delle azioni manutentive sulle prestazioni del processo produttivo, risulta importante valutare dei KPI's che perseguano tale scopo.

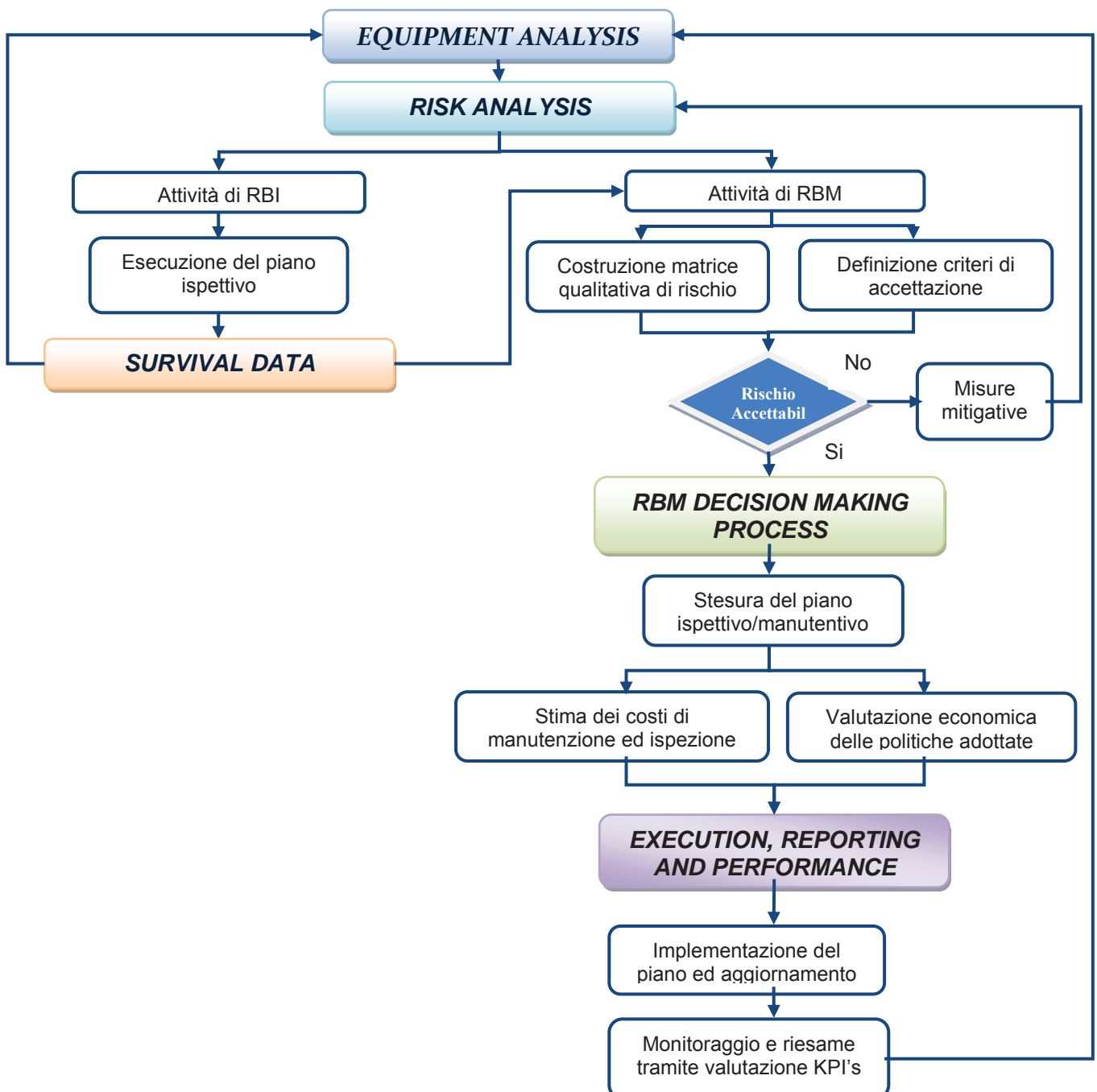


Figura 1: Schema sintetico della metodologia RBIM

3. La logica della System Dynamics per la pianificazione RBIM e costruzione del Causal Loop Diagram

3.1 L'approccio System Dynamics

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.

La metodologia prevede una serie di fasi che possono essere riassunte nei seguenti punti:

- identificazione di un problema;
- sviluppo di ipotesi dinamiche e mappe causali per spiegare la causa del problema;
- costruzione al computer di un modello di simulazione che rappresenti il sistema alla radice del problema;
- test del modello per verificare che sia in grado di riprodurre il comportamento osservato nel mondo reale;
- elaborazione e test nel modello di politiche alternative finalizzate ad alleviare il problema;
- implementazione della soluzione ottimale.

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.

3.2 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*).

3.2.1 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 *loop* 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.

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).

3.2.2 Costruzione del Diagramma Causale

Definiti gli elementi fondamentali atti a permettere un'efficace realizzazione di un diagramma causale, si riporta di seguito lo specifico *Causal Loop Diagram* relativo alla metodologia proposta nel presente lavoro.

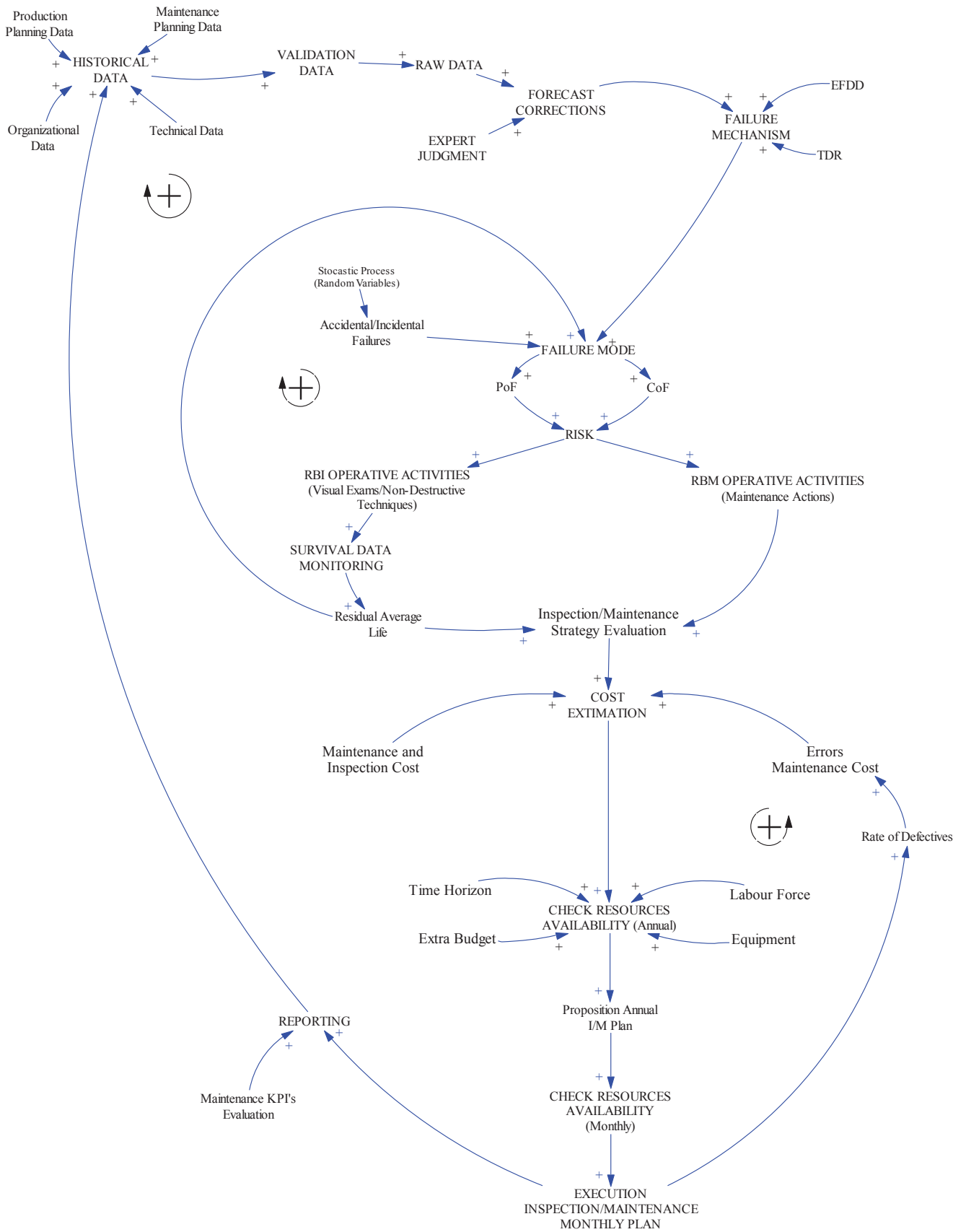


Figura 2 – Causal Loop Diagram relativo alla metodologia RBIM

Dalla figura 2 è possibile individuare quattro macro fasi per lo sviluppo della metodologia: una fase preliminare di raccolta e validazione dei dati necessaria per la previsione dei meccanismi di degrado e dei modi di guasto di un componente o di una attrezzatura. Una seconda fase valutazione del livello di rischio associato ad ogni componente ed una conseguente attività di definizione delle priorità di intervento, in termini di ispezioni e manutenzioni. Una terza fase legata alla valutazione economica della strategia ispettiva e manutentiva proposta, con la relativa analisi delle risorse disponibili, sia su scala annuale che mensile, necessaria per l'esecuzione del piano. Infine vi è poi una fase di reportistica consistente nella valutazione degli indicatori prestazionali legati alle attività di manutenzione ed agli effetti di queste ultime sulla produzione. Nel dettaglio si può osservare che, l'incipit è fornito dai dati storici immagazzinati nel sistema informativo industriale. Tali dati non riguardano solo ed esclusivamente gli aspetti legati alla manutenzione ed ispezione, bensì vengono considerati tutta una serie di elementi correlati alla produzione, all'organizzazione del lavoro e dei macchinari ed alle caratteristiche tecniche di questi ultimi. La peculiarità principale da sottolineare in questa fase riguarda il fatto che, ogniqualvolta viene raccolto un nuovo dato, esso deve essere validato. 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; definiti "raw data" [2]. I dati grezzi sono utilizzati per effettuare delle previsioni sui meccanismi di degrado dei componenti. Tali previsioni vengono però corrette attraverso il giudizio degli esperti del settore. In questo modo è possibile predire i meccanismi di degrado delle apparecchiature soggette ad usura, grazie alla conoscenza delle distribuzioni teoriche e delle funzioni empiriche correlate ai dati a disposizione. Tramite i meccanismi di degrado, è possibile conoscere i possibili modi di guasto di un componente o del sistema, che nella realtà non sono meramente di tipo binario. Inoltre, poiché i guasti possono essere anche di natura accidentale, è necessario modellare la casualità di un malfunzionamento attraverso un processo stocastico, ovvero una collezione di variabili aleatorie randomiche, che immettono nel sistema considerato un certo grado di incertezza. Una volta definiti i possibili modi di guasto dell'attrezzatura o del sottosistema considerato, si prosegue con la valutazione della probabilità e delle conseguenze di guasto, per poi determinare il livello di rischio. Tale livello risulta indispensabile per definire il grado di priorità delle attività operative RBI e RBM. In particolare, attraverso i controlli non distruttivi e gli esami visivi realizzati durante le ispezioni, si avranno a disposizione dei dati di sopravvivenza più robusti, in termini di affidabilità e vita media residua del componente che, attraverso un loop di rinforzo, consentono di migliorare la stima legata ai possibili modi di guasto del sottosistema considerato. Attraverso le attività operative di RBI ed RBM, è possibile valutare le strategie ispettive e manutentive da applicare alla linea produttiva nel suo complesso. Ovviamente tale valutazione non può prescindere da un'opportuna analisi economica basata sulla valutazione dei costi, non solo diretti ma anche indiretti, ovvero correlati agli errori commessi durante le attività RBI ed RBM, che comportano inevitabilmente delle spese derivanti da un elevato tasso di difettosità degli item prodotti. L'analisi dei costi dovrà inevitabilmente interfacciarsi con il controllo della disponibilità delle risorse, in termini di tempo, manodopera, attrezzature ed extra budget. In base a tale disponibilità, viene realizzato un piano ispettivo/manutentivo su scala annuale che deve poi essere tradotto in piani mensili, prevedendo una nuova analisi delle risorse. Se queste ultime possono essere allocate in maniera bilanciata nei vari intervalli di tempo previsti per le attività operative di manutenzione ed ispezione, si passa all'esecuzione del piano mensile. Per

ogni esecuzione, viene svolta un'attività di reportistica basata sulla valutazione di KPI's legati alle attività di manutenzione ed all'influenza che queste ultime hanno sulla produzione di item conformi alle specifiche. Dunque, da un lato viene valutata la bontà delle attività manutentive, e dall'altro il tasso di difettosità delle parti prodotte, che se superiore ad un certo valore soglia, comporta elevati costi indiretti legati agli errori di manutenzione. Dalla figura inoltre si evidenzia come la fase di reportistica basata sugli indicatori generali di prestazione delle attività manutentive formi un loop di rinforzo con i dati storici, mentre il tasso di difettosità costituisce un loop dello stesso tipo con i costi di manutenzione imperfetta. In definitiva, nella figura allegata è possibile identificare l'essenza delle relazioni causali che sussistono tra le diverse variabili considerate e che risultano essere tutte delle relazioni causali positive. Inoltre, sono identificati i tre circuiti di rinforzo che determinano un aggiornamento continuo delle informazioni, secondo gli aspetti precedentemente commentati.

Come già accennato, questo diagramma, estremamente semplice ma altamente informativo, al fine di un futuro lavoro, costituisce il primo passo per una successiva particolarizzazione dei concetti appena esposti all'interno di un *software* simulativo basato sulla *System Dynamics*.

4. Conclusioni

In conclusione, le evidenze ottenute con tale lavoro dimostrano che è possibile adottare una procedura rigorosa per la gestione della manutenzione che consenta di tenere presenti molteplici aspetti di un impianto industriale quali:

- la definizione delle priorità di intervento ispettivo - manutentivo sulla base del rischio di rottura di un componente critico;
- la valutazione delle performance del processo manutentivo ed i riflessi di queste ultime sul processo produttivo;
- l'impostazione delle eventuali misure mitigative sulla base di dati storici, scenari previsionali e giudizio degli esperti;
- l'aggiornamento continuo del Data Base attraverso l'analisi in "real time" delle condizioni di un componente.

In questo studio si cerca di superare la staticità delle metodologie consolidate, quali RBM e RBI, che risultano ampiamente utilizzate nell'industrie di processo. Questo limite viene superato grazie alla logica della *System Dynamic* mediante l'analisi e lo sviluppo di un *Causal Loop Diagram*. E' in fase di sviluppo un modello che possa coniugare gli aspetti statici della metodologia RBIM, presentati in questo studio, con l'esigenza di un'analisi che possa tener conto dell'importanza della variabile tempo, pur considerando funzioni di tipo affidabilistico il cui controllo nel tempo diventa fondamentale nella riduzione del rischio.

Bibliografia

- [1] ABS *Guide for surveys using risk-based inspection for the offshore industry*. Houston, TX, USA, 2003.
- [2] CWA 15740: 2008 – *Risk Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry* (RIMAP).
- [3] Sakai, S., "*Risk-based Maintenance*", Special feature article: JR EAST Technical Review, 2007, 17:1-4.
- [4] Faccio M., Persona A., Sgarbossa F., Zanin G., "*Industrial maintenance policy development: a quantitative frame work*". Int. J. Production Economics. 147 (2014) 85-93.

- [5] Geraci D., Monica L., Ferraro A., Madonna M., Righetti R., *“La gestione della manutenzione secondo la logica Risk Management nella realtà produttiva delle raffinerie”*, SAFAP, Dipartimento Tecnologie di Sicurezza – INAIL, 2012.
- [6] Khan, F.I., Haddara, M.M. e Sadiq,R., *“Risk-based inspection and maintenance (RBIM) Multi-attribute Decision-Macking with Aggregative Risk Analysis”*, Process Safety and Enviromental Protection, 2004, 82:398-411.
- [7] Kroning S., Denkena B., *“Dynamic scheduling of maintenance measures in complex production system”*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 6, 2013, 292-300.
- [8] Manzini R., Regattieri A., Pham H., Ferrari E., *“Maintenance for Industrial Systems”*, London, Springer, London Ltd., 2009.
- [9] Norma UNI EN 13306:2003 – *Manutenzione* – Terminologia.
- [10] Norma UNI EN 10336:2007 – *Manutenzione* – Criteri di progettazione della manutenzione.
- [11] Nasirzadeh F., Afshar A., Khanzadi M., *“System dynamics approach for construction risk analysis”*, International Journal of Civil Engineering, Vol. 6, No.2, June, 2008, 120-131.
- [12] Waeyenbergh W., Pintelon L., *“Maintenance concept development: a case study”*, International Journal of Production Economics, 2004, 89, 395-405.
- [13] Yu D., Pei Z., Yaqiao Z., Xuekui Z., Yunsheng Z., *“Simulation experiment of safety experience based on system dynamics”*, 2012 International Symposium on Safety Science and Technology, Procedia Engineering 45, 2012, pp. 199-203.