POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

Progettazione di un metodo di analisi delle cause di guasto di una macchina CNC a supporto della manutenzione predittiva

Relatore:
prof. Franco Lombardi

Correlatori:
dott.ssa Giulia Bruno
dott. Emiliano Traini

Candidato:
Daniele Calvo

Anno Accademico 2019/2020

«Il sacrificio è l'essenza della vita,
la porta per capirne il significato»

(Roberto Baggio)

SOMMARIO

Indice delle figure 4
Indice delle tabelle 6
CAPITOLO 1. INTRODUZIONE 8
CAPITOLO 2. MANUTENZIONE PREDITTIVA 13
2.1 Politiche di manutenzione 13
2.2 Manutenzione predittiva e stato dell'arte 15
2.2.1 Stato dell'arte 19
2.2.2 Manutenzione predittiva nelle macchine CNC 26
2.3 Costi della manutenzione 31
CAPITOLO 3. FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS 35
3.1 Presentazione della metodologia FMEA 35
3.1.1 Definizioni e terminologia 37
3.1.2 Descrizione teorica FMEA 38
3.1.3 Vantaggi e svantaggi della FMEA 42
3.2 FMEA, CNC e manutenzione 43
CAPITOLO 4. CASO D'USO: APPLICAZIONE FMEA 49
4.1 Machine breakdown structure 49
4.2 Modalità di guasto dei componenti 56
4.2.1 Guasti alle pompe 57
4.2.2 Guasti ai motori 58
4.2.3 Guasto al gruppo cuscinetti 59
4.2.4 Guasti dell'ingranaggio pignone-cremagliera 60
4.3 Risultati della FMEA 62
CAPITOLO 5. MODELLO DEI LEGAMI 64
5.1 Linguaggio di modellazione 64
5.2 Sviluppo modello 69
5.3 Risultati del modello 76
5.4 Proposte per test ed esperimenti 80
CAPITOLO 6. RISULTATI E DISCUSSIONE 84
APPENDICE A: Machine breakdown structure 86
APPENDICE B: Diagrammi di Ishikawa 90

APPENDICE C: Tabelle FMEA 94
APPENDICE D: Modello dei legami 108
Bibliografia e sitografia 116

Indice delle figure

Figura 1 :classificazione e gerarchia delle politiche di manutenzione 13
Figura 2: previsioni di crescita per settore industriale 18
Figura 3: pubblicazioni per Paese 19
Figura 4:evoluzione delle pubblicazioni relative alla manutenzione predittiva 20
Figura 5: andamento temporale degli approcci riscontrati in letteratura 22
Figura 6: Passaggi principale per sviluppare un modello di Machine Learning 24
Figura 7: pubblicazioni su ML applicato alla manutenzione predittiva 24
Figura 8: metodi di ML principalmente impiegati per i modelli di manutenzione predittiva [5] 26
Figura 9: andamento dei risultati della query nel corso degli anni 27
Figura 10: differenze dei costi tra le diverse politiche manutentive 32
Figura 11: diagramma di Pareto degli impatti dell'attuale strategia manutentiva 33
Figura 12: esempio di output del modello di costo PdM proposto da [15] 34
Figura 13: tipologie di analisi FMEA 37
Figura 14: diagramma di Ishikawa 39
Figura 15: integrazione tra grey theory e FMEA (Farshad et al.) 47
Figura 16: fresatrice linea GANTRY ad alta velocità di FIDIA 49
Figura 17: esempio di schema a blocchi di un sistema di controllo di posizione in una CNC [21] 52
Figura 18:denominazione degli assi nelle fresatrici CNC 53
Figura 19: guide lineari e stepper motor impiegati in una macchina utensile CNC 54
Figura 20: cambio-utensile a catena 55
Figura 21: diagramma di Ishikawa per il sistema idraulico 57
Figura 22: avvolgimenti di un motore elettrio bruciati 59
Figura 23: cuscinetti danneggiati per brinellatura e striamento 60
Figura 24: separazione di un pignone in seguito a fatica 61

Figura 25: blocco contenente la funzione di trasferimento di un sistema 64
Figura 26: esempio di rete bayesiana 65
Figura 27: esempio di reti di Petri 66
Figura 28: esempio di modellizzazione di un motore elettrico tramite bond graph 66
Figura 29: nodi ellittici 67
Figura 30: doppio ellisse che indica la presenza di un sotto-modello 68
Figura 31: quadrati rappresentanti le relazioni che coinvolgono i nodi 68
Figura 32: triangolo rappresentante i parametri qualitativi 68
Figura 33: freccia di collegamento 69
Figura 34: pignoni accoppiati sulla stessa cremagliera 72
Figura 35: schema strutturale del precarico adoperato sul sistema 72
Figura 36: Scomposizione del sistema idraulico 86
Figura 37: Scomposizione del sistema di lubrificazione 86
Figura 38: Scomposizione del sistema di raffreddamento 87
Figura 39: Scomposizione del sistema di controllo ed elettrico 87
Figura 40: Scomposizione del sistema meccanico 88
Figura 41: Scomposizione del sistema per cambio utensile..... 88
Figura 42: Altri sistemi ausiliari 89
Figura 43:diagramma di Ishikawa per sistema idraulico..... 90
Figura 44: diagramma di Ishikawa per sistema di lubrificazione 90
Figura 45:diagramma di Ishikawa per sistema di raffreddamento..... 91
Figura 46:diagramma di Ishikawa per sistema elettrico e CNC..... 91
Figura 47: diagramma di Ishikawa per sistema meccanico 92
Figura 48:diagramma di Ishikawa per sistema di cambio-utensile 92
Figura 49:diagramma di Ishikawa per altri sistemi ausiliari 93
Figura 50:modello per pignone-cremagliera con parametri dei motori elettrici, parametri propri di pignone e cremagliera e grandezze cinematiche legate alla movimentazione degli assi..... 111
Figura 51: modello per determinare le forze d’attrito 113
Figura 52 modello per determinare le forze di taglio prodotte in fase di lavorazione 115

Indice delle tabelle

Tabella 1: articoli risultati dalla query effettuata 29
Tabella 2: tabella operativa FMEA 42
Tabella 3: worksheet impiegata per l'applicazione della FMEA alla fresatrice 62
Tabella 4: scala dell'indicatore S 94
Tabella 5: scala dell'indicatore O 94
Tabella 6: scala dell'indicatore D 95
Tabella 7: Worksheet FMEA per sistema idraulico 96
Tabella 8: Worksheet FMEA per sistema di lubrificazione 97
Tabella 9: Worksheet FMEA per sistema di raffreddamento 99
Tabella 10: Worksheet FMEA per sistema elettrico e di controllo 100
Tabella 11: Worksheet FMEA per sistema meccanico 103
Tabella 12: Worksheet FMEA per sistema cambio-utensile 106
Tabella 13: legenda dei simboli adoperati per sviluppare il modello 108
Tabella 14: legenda dei parametri rilevanti del modello per pignone-cremagliera 109
Tabella 15: equazioni adoperate nella prima parte del modello per pignone-cremagliera 111
Tabella 16 : legenda dei parametri determinanti le forze di attrito 112
Tabella 17: equazioni adoperate per determinare le forze d'attrito 113
Tabella 18: parametri determinanti delle forze di taglio 114
Tabella 19: equazioni adoperate per determinare le forze di taglio 115

Abstract

All'interno di un contesto produttivo si ha spesso a che fare con la tematica della manutenzione, il cui approccio, con l'avvento di Industry 4.0, è stato soggetto a cambiamenti. Nella parte iniziale, il lavoro di tesi mira ad acquisire una visione panoramica della manutenzione predittiva e dei trend che la caratterizzano, interessandosi sui principali metodi e strumenti con cui, da letteratura, il problema è affrontato. Nello specifico, ci si focalizza sulla trattazione del problema relativo alle macchine CNC. A tal proposito è trattata la metodologia FMEA, vista all'interno del contesto della manutenzione predittiva delle CNC come un'attività preliminare utile per diminuire i costi da sostenere in fase di condition monitoring. Essa è presentata dal punto di vista teorico e nelle sue varianti legate al tema della manutenzione. Nella parte applicativa, sviluppata relativamente al progetto HOME seguito dal DIGEP, la metodologia FMEA è applicata alla fresatrice oggetto del caso d'uso al fine di individuare i componenti maggiormente critici. Ci si è poi focalizzati su uno di tali componenti della fresatrice, il sistema pignone-cremagliera, sviluppando un modello in grado di fungere da supporto per la gestione degli interventi manutentivi, garantendo l'accuratezza e la precisione delle lavorazioni. Il modello si pone come obiettivo principale quello di individuare tutte le variabili coinvolte nei fenomeni di guasto e le relazioni di dipendenza esistenti tra esse. Inoltre, tale modello è tenuto in considerazione per proporre dei test che siano di aiuto per il costruttore del controllo automatico, identificando i parametri ritenuti rilevanti da monitorare: alcune tra le variabili individuate nel modello, infatti, possono essere viste come driver in grado di segnalare la prossimità del verificarsi del guasto.

CAPITOLO 1. INTRODUZIONE

La manutenzione e le attività ad essa collegate hanno da sempre rivestito un ruolo di primaria importanza all'interno di un contesto produttivo; con il passare del tempo e il ripetersi dei cicli di lavorazione, i macchinari presenti nel sistema produttivo sono soggetti a logoramento con conseguente perdita di efficienza tecnica rispetto alle condizioni ottimali. Gli impianti e i macchinari sono infatti degli asset attraverso cui l'impresa crea valore; di conseguenza una corretta gestione di tali asset, attraverso opportuni interventi manutentivi, può portare l'impresa a raggiungere più facilmente i propri obiettivi.
Quella della manutenzione è una disciplina di primaria importanza nel contesto industriale, al fine di garantire sia la disponibilità degli impianti che la sicurezza degli operatori. Secondo la norma UNI EN 10336 essa è la "Combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, previste durante il ciclo di vita di un'entità, destinate a mantenerla o riportarla in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta". Essa significa garantire la massima affidabilità e disponibilità degli impianti, sostenendo il minimo costo e pianificando le attività necessarie di natura sia tecnica che organizzativa, attraverso l'esecuzione pratica degli interventi. Una politica manutentiva è dunque indispensabile per qualsiasi impianto produttivo e, se attuata in modo opportuno, può portare al raggiungimento di diversi obbiettivi quali:

- riduzione dei fermi macchina;
- aumento della produttività dell'impianto;
- miglioramento dell'indice OEE (Overall Equipment Effectiveness), che raggruppa disponibilità, efficienza e qualità di un impianto;
- minimizzazione dei costi relativi al mantenimento dell'impianto;
- conservazione degli impianti e dei macchinari per tutta la loro vita utile;
- corretta individuazione delle scorte dei materiali tecnici di ricambio, determinando la corretta gestione del magazzino;

- sicurezza degli operatori a bordo linea.

Durante gli ultimi anni, in seguito all'avvento di Industry 4.0, si sta assistendo nei processi di automazione industriale all'impiego sempre crescente delle apparecchiature IIoT (Industrial Internet of Things): attraverso la loro connessione agli impianti e alle strumentazioni presenti nella supply chain, essi danno l'opportunità di elaborare in tempo reale un'ingente quantità di dati e informazioni, contribuendo all'ottimizzazione dei processi, riducendo sprechi di risorse ed errori, incrementando la competitività aziendale all'interno del mercato in cui l'impresa opera. Le opportunità fornite da tali strumenti hanno determinato in molte realtà aziendali il rinnovamento e l'evoluzione dell'approccio alla manutenzione industriale, che ha assunto un ruolo sempre più complesso e centrale nel contesto produttivo; essa è infatti passata da una politica preventiva ad una di tipo predittivo. Il primo approccio si presenta spesso scollegato dal punto di vista temporale alle effettive condizioni degli impianti produttivi, in quanto non è in grado di fornire una gestione efficiente degli interventi, mancando una memoria storica che sia alla base delle decisioni. Viceversa, con un approccio di tipo predittivo, supportato dalla dovuta sensoristica, si è in grado di avere molte informazioni costantemente aggiornate, che fungono da supporto per ottimizzare i tempi e le risorse impiegate. Gli obbiettivi principali della manutenzione predittiva sono infatti:

- monitorare le condizioni delle attività, tracciando le eventuali anomalie;
- diagnosticare le anomalie;
- fornire una stima della vita utile residua (RUL) o del time-to-failure (TTF).

La manutenzione si è dunque trasformata da attività prevalentemente di riparazione e fonte di costo, non in grado di fornire alcun valore aggiunto al prodotto finito, ad un complesso sistema gestionale orientato a prevenire, predirre i guasti ed al miglioramento continuo. Si tratta di un passaggio che implica un considerevole mutamento culturale del management, che deve

progettare un ‘’sistema’’ in grado di operare in modo integrato con gli altri enti della produzione.
Tali considerazioni sono state alla base dello sviluppo dell’elaborato, congiuntamente al contesto in cui esso è stato svolto, ovvero il progetto HOME seguito dal DIGEP, che ha rappresentato un elemento fondamentale per il lavoro di tesi.
Il progetto HOME (Hierarchical Open Manufacturing Europe) si pone come obiettivo quello di migliorare i processi manifatturieri mirando verso la “fabbrica intelligente”: nella sua totalità, esso vede coinvolti 28 partner tra imprese, organismi di ricerca e stakeholders. Tra i diversi WP (Work Package) che lo compongono, il lavoro di tesi è stato svolto in riferimento al WP13; in tale parte, il DIGEP ha collaborato con altre due imprese, ovvero FIDIA Spa, che si occupa della produzione di macchine utensili, e EICAS Automazione Spa, che ha nello sviluppo di controlli automatici il suo core business. In virtù di tale contesto, lo scopo del lavoro di tesi è quello di sviluppare un modello per una macchina utensile, che sia in grado di identificare l’insorgenza di fenomeni di guasto che portano al fermo macchina, andando a rilevare le cause che portano al guasto dell’intero sistema.

Il lavoro di tesi si articola in ulteriori 5 capitoli (escluso il presente capitolo introduttivo), i quali possono essere a loro volta divisi in due macro-parti: la prima prettamente teorica (Cap.2-3), la seconda di natura applicativa (Cap.4-6).

Nel capitolo 2 è presentata una panoramica sulla manutenzione industriale, nella quale è spiegata la sua importanza all’interno dei contesti produttivi e l’evoluzione che essa ha avuto nel corso degli anni: sono infatti presentate brevemente le varie politiche manutentive, con i rispettivi vantaggi, svantaggi e le differenze esistenti tra esse. Successivamente, ci si focalizza nello specifico sulla manutenzione predittiva: si fa riferimento alle caratteristiche e ai trend che caratterizzano tale mercato ed è presentato lo stato dell’arte.
Nel presentare lo stato dell’arte è stata condotta un’attività di ricerca, avvalendosi del database di pubblicazioni scientifiche Scopus: sono esposti in

tale parte diversi articoli che trattano il tema sin dalla sua comparsa in letteratura fino alla situazione attuale, analizzando i cambiamenti e le evoluzioni avvenute in merito alla sua trattazione.
Successivamente, sempre avvalendosi di Scopus, è stata effettuata una query entrando più nello specifico, in quanto l'obiettivo è quello di identificare i trend che caratterizzano la manutenzione predittiva delle macchine a controllo numerico, poiché il caso d'uso del WP13 è relativo proprio ad una fresatrice CNC. I risultati di tale attività sono stati poi confrontati con la trattazione generale del tema manutenzione predittiva, identificando le analogie e le differenze. Nella parte finale del capitolo sono infine brevemente elencati i costi che caratterizzano le attività di manutenzione, mettendo in relazione le differenze esistenti tra le varie strategie manutentive in termini di costo.

Nel Capitolo 3 è presentata dal punto di vista teorico la metodologia FMEA, in quanto dall'attività di ricerca effettuata nel capitolo precedente essa è risultata essere un approccio caratteristico all'interno della manutenzione predittiva delle macchine CNC. Dopo aver chiarito la terminologia e la procedura pratica che va seguita per la sua applicazione standard, sono anche presentati i punti di forza e i punti di debolezza di tale strumento. Infine, nella parte finale del capitolo sono presentati gli approcci "ibridi" trovati in letteratura, che hanno trovato applicazione nelle macchine utensili in contesti predittivi.

Dal Capitolo 4 in poi inizia la fase applicativa dell'elaborato: in tale capitolo è infatti applicata la metodologia FMEA tradizionale alla fresatrice oggetto del caso d'uso del WP13. L'uso della FMEA va vista come un'attività preliminare da effettuare sul macchinario, in modo tale da priorizzare i componenti maggiormente critici, che vanno poi a determinare l'arresto dell'intero sistema. Nel corso di tale attività il macchinario è stato scomposto in sottosistemi, seguendo una logica funzionale, e avvalendosi delle informazioni sui guasti fornite dagli utilizzatori della fresatrice, integrate con qualche ricerca letteraria, si è applicato quanto è stato presentato sul piano teorico nel capitolo precedente. Tra i componenti più critici individuati dall'analisi FMEA, il sistema pignone e cremagliera è stato scelto come componente su cui focalizzarsi nel

prosieguo del lavoro, identificandolo come elemento in merito al quale costruire un sistema di controllo che sia in grado di predirre l'insorgenza del guasto.

Nel Capitolo 5 infatti, è stato sviluppato un modello in grado di essere da supporto per il costruttore del controllo automatico (EICAS Automazione Spa). Dopo aver valutato diverse alternative presenti in letteratura per presentare il modello, si è deciso di formalizzare un nuovo tipo di linguaggio. L'obiettivo del modello è quello di identificare tutte le variabili presenti che determinano il verificarsi del guasto, e le relazioni di interdipendenza esistenti tra esse. Esso è sviluppato, oltre che allo scopo di fungere da supporto in fase di sviluppo del controllore, al fine di identificare tutti i parametri monitorabili, il cui andamento possa essere preso in considerazione per rilevare l'insorgenza del guasto (driver dei guasti). Tra le conseguenze e le conclusioni sono infatti riportate anche alcune azioni correttive per l'utilizzatore da mettere in atto al fine di prevenire il guasto, e alcune proposte da tenere in considerazione nel corso dei futuri test da effettuare, antecedenti allo sviluppo del sistema di controllo.

CAPITOLO 2. MANUTENZIONE PREDITTIVA

2.1 Politiche di manutenzione

Ogni impresa adotta delle politiche manutentive ben precise, che meglio si adattano ai propri impianti produttivi, alle necessità aziendali, e in generale al contesto in cui si opera.

Con il termine politica manutentiva, si intende l'insieme delle strategie e delle azioni, derivate da un opportuno pensiero organizzativo, messe in atto da un'organizzazione per affrontare il tema della manutenzione. Facendo riferimento alla Figura 1, si può notare l'esistenza di una gerarchia tra le varie politiche esistenti.

È possibile effettuare una prima classificazione considerando l'istante temporale in cui si effettuano gli interventi manutentivi. Si parla di manutenzione non programmata quando l'intervento manutentivo è effettuato ex post, ovvero successivamente al verificarsi di un guasto; viceversa, si definisce manutenzione programmata quella manutenzione messa in atto ex ante, ovvero pianificata e schedulata secondo un opportuno piano logico prima che si verifichi un guasto.

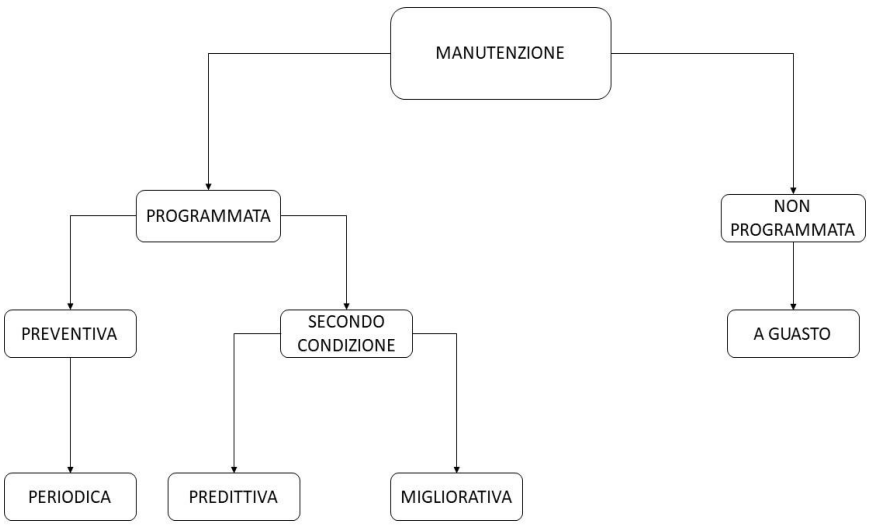


Figura 1 :classificazione e gerarchia delle politiche di manutenzione

Nel seguito sono presentate in sintesi le varie politiche di manutenzione.

Manutenzione a guasto (CM)

Tale politica di manutenzione, anche nota come correttiva, è messa in atto in seguito ad un'avaria, al fine di riportare un'entità nello stato in cui essa possa eseguire la funzione richiesta (UNI 13306). Questo approccio run-to-failure, in cui la macchina è lasciata in esercizio fino a quando l'anomalia costringe il management a fermare la produzione, è adatta per sistemi produttivi non critici e i cui guasti sono riparabili a basso costo. I benefici derivanti dall'attuazione di altre politiche più complesse, infatti, non sono convenienti in virtù dei costi da sostenere. Essa tuttavia presenta anche alcuni svantaggi:

- l'insorgenza dei fermi macchina (failure rate) può presentare una distribuzione casuale e presentarsi in periodi critici per la produzione, per esempio durante periodi in cui vi è un'elevata domanda;
- riparazioni non programmate si possono protrarre per lunghi periodi, impedendo la produzione, e tenendo così inoccupato il personale adibito ad essa;
- un guasto ad un componente può avere conseguenze su altri componenti del macchinario con ulteriore aumento dei costi.

Manutenzione preventiva (PM)

La manutenzione preventiva si fonda sull'idea che sia possibile determinare a priori la vita utile di un componente: essa consiste nell'effettuare interventi manutentivi ad intervalli predeterminati, al fine di ridurre la probabilità di guasto e il logoramento delle funzionalità di un macchinario. Tale approccio ha il vantaggio di permettere al management dell'impresa la programmazione dei fermi macchina, organizzandoli nel modo più conveniente e tenendo conto dei vincoli della produzione. D' altra parte però, ha lo svantaggio dei maggiori costi

da sostenere e la sua applicazione è limitata a quei componenti la cui vita utile è prevedibile, poiché, qualora ciò non fosse possibile, si andrebbero incontro al rischio di sostituire delle parti con ancora un'ampia vita residua.

Manutenzione secondo condizione

In determinati contesti produttivi non è conveniente impiegare né una politica correttiva (per ragioni di sicurezza per esempio), né una preventiva (per ragioni legate ai costi): in questi casi la soluzione principalmente adottata è quella di constatare le condizioni di usura dei vari componenti attraverso il loro monitoraggio, ed in base al loro stato decidere di sostituirli o meno.
La politica di manutenzione secondo condizione può portare a diversi vantaggi, quali:

- riduzione dei costi di manutenzione
- aumento della disponibilità delle macchine (availability)
- riduzione del numero e della gravità dei guasti durante l'esercizio.

2.2 Manutenzione predittiva e stato dell'arte

La manutenzione predittiva, gerarchicamente sottostante alla manutenzione secondo condizione, ha assunto negli ultimi anni un'elevata importanza nel settore manufatturiero. Oggigiorno, in un contesto di fabbrica automatizzata, garantire il normale funzionamento degli asset aziendali non è più sufficiente, ma ci si pone l'obiettivo di avere costantemente la disponibilità e l'affidabilità delle apparecchiature principali. Lo sviluppo di nuove tecnologie consente la raccolta di una grande quantità di dati tramite diverse apparecchiature, situate in diversi punti della fabbrica. Inoltre, le ultime innovazioni di Industry 4.0 integrano persone, macchine e prodotti, consentendo uno scambio più rapido e mirato di informazioni relative ai processi e agli eventi che lo caratterizzano.
L'idea che sta alla base del concetto di manutenzione predittiva è la seguente: un guasto non si manifesta all'improvviso, bensì nella maggior parte dei casi

esso rappresenta il risultato finale di un processo di usura e deterioramento (in particolare nei sistemi meccanici, idraulici, pneumatici). Di conseguenza si effettua un monitoraggio continuo della macchina, verificando l'integrità dei cicli produttivi, ed effettuando interventi di manutenzione solo quando ritenuto necessario.

Una politica predittiva consente di ottenere una diagnosi precoce dei guasti tramite appositi strumenti prognostici, basati su dati storici, fattori di integrità, metodi di inferenza statistica e approcci ingegneristici. Infatti, essa consiste principalmente nel condurre test non distruttivi, ispezioni visive e analisi dati, al fine di conoscere lo stato di salute delle macchine; noto questo, si effettuano stime e previsioni relative all'insorgenza dei guasti, in modo tale da pianificare gli interventi opportuni.

Riprendendo quanto messo in evidenza da studi precedenti, quali quelli di Selcuk [1] e di Mobley [2], alcuni dei risultati raggiungibili grazie all'impiego di una politica predittiva sui macchinari sono:

- diagnostica in tempo reale dei vari componenti che fanno parte della linea produttiva (anche da remoto);
- riduzione dei tempi di fermo macchina imprevisti e dei conseguenti interventi di manutenzione;
- miglioramento dello scheduling relativo agli interventi manutentivi, in virtù di una più ampia visione sullo stato di salute degli impianti produttivi;
- massimizzare i tempi d'utilizzo e di funzionamento dei macchinari;
- riduzione dei costi di manutenzione, manodopera e dei materiali;
- riduzione del costo del lavoro della macchina;
- riduzione della produzione di pezzi non conformi alle specifiche;
- maggior rispetto delle scadenze relative alla produzione, e quindi riduzione dei costi di mancata produzione;
- aumento delle conoscenze relative all'interazione tra i vari componenti presenti all'interno del macchinario, e della linea di produzione;
- aumento della comprensione dei legami causa-effetto interni al processo produttivo.

Le tecniche ispettive adoperate sono molteplici, e spaziano dal monitoraggio visivo per la ricerca di eventuali segnali premonitori al controllo delle specifiche di processo, valutando il disallineamento dai valori di riferimento.
Il toolset necessario per la raccolta dei dati ai fini predittivi consta di diversi elementi: i sensori, indispensabili per la raccolta dei dati provenienti dalle macchine in lavorazione; i software di comunicazione, che facilitano la trasmissione di informazioni tra macchinari e tra le linee del sistema produttivo; l'infrastruttura analitica adoperata con funzione di data ingestion e storage, vista la grande mole di informazioni.

Nel 2018 le dimensioni globali del mercato della manutenzione predittiva sono state valutate pari a 2.804,38 milioni di $, e si prevede che raggiungeranno i 23,014,7 milioni di $ entro il 2026 [3]. Da una parte, l'integrazione con IoT, machine learning e condition monitoring rappresenta un'opportunità per il mercato della manutenzione predittiva; dall'altra parte, si prevede che la mancanza di personale qualificato e le difficoltà di realizzazione ostacoleranno la crescita del mercato.
Effettuando una segmentazione rispetto al modello di distribuzione (canali di distribuzione), il mercato della manutenzione predittiva si può dividere in 2: segmento cloud e segmento on-premise. Quest'ultimo ha dominato il mercato nel 2018 e si prevede che manterrà il dominio per tutto il periodo di previsione, sebbene le soluzioni cloud mostreranno un tasso di crescita più elevato grazie al controllo diretto sull'IT, alla consegna e alla gestione interna dei dati, all'elaborazione più rapida dei dati e all'utilizzo efficiente delle risorse (Figura 2).
Facendo riferimento al settore applicativo, invece, si può notare come il settore manifatturiero abbia dominato il mercato, in quanto la gestione della manutenzione di attrezzature quali macchinari, pompe, ascensori e robot industriali si sta orientando sempre più verso una politica predittiva. Tuttavia, sempre facendo riferimento al periodo di previsione considerato dalla ricerca (2019-2026), si prevede che il settore sanitario avrà il tasso di crescita maggiore, poiché la manutenzione predittiva dei dispositivi biomedici e dei macchinari impiegati per radiografia, risonanza magnetica, tomografia e

mammografia è vista come uno strumento indispensabile per aumentare le capacità decisionali e ottimizzare l'efficienza operativa delle strutture ospedaliere.

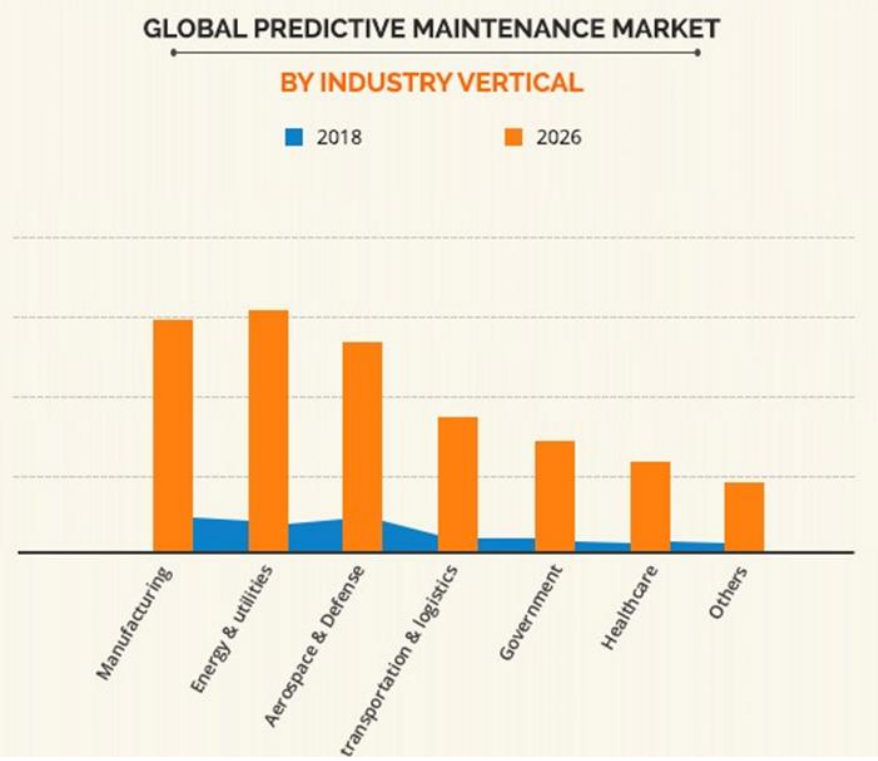


Figura 2: previsioni di crescita per settore industriale

Effettuando una segmentazione per aree geografiche, risulta evidente come nell'ultimo anno il Nord America abbia avuto, in termini di ricavi, la quota maggiore nel mercato della manutenzione predittiva, in virtù della presenza di un gran numero di imprese in grado di fornire soluzioni e servizi, e di una maggiore consapevolezza relativa ai benefici e al vantaggio competitivo che tale politica manutentiva comporta. Tuttavia, si prevede che la regione Asia-Pacifico sarà soggetta al più alto tasso di crescita durante il periodo di previsione. A conferma della bontà di tale previsione, si può notare da diversi studi [4] ,come il numero di pubblicazioni relative alla manutenzione predittiva effettuate in Cina, sia aumentato consistentemente negli ultimi anni, rendendola il secondo Paese per numero di pubblicazioni (Figura 3), con la

Tsinghua University di Pechino che rappresenta la forza trainante per le pubblicazioni in materia.

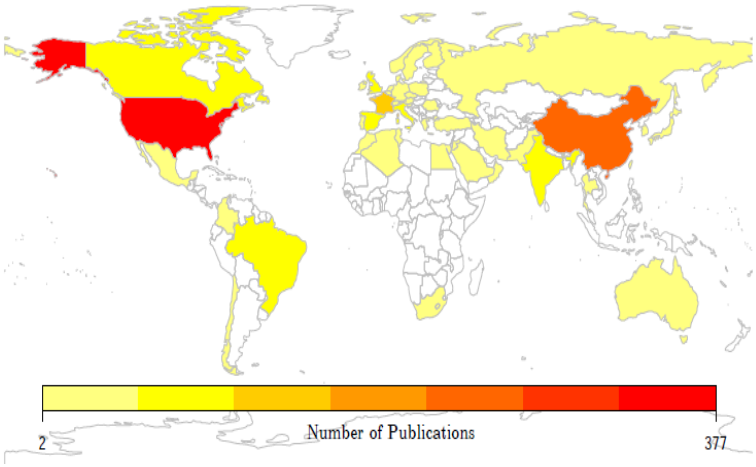


Figura 3: pubblicazioni per Paese

2.2.1 Stato dell'arte

Per avere una visione d'insieme esaustiva dello stato dell'arte relativo alla manutenzione predittiva è necessario prendere in considerazione grandi set di dati provenienti dall'apposita letteratura, suddividendoli tra i diversi settori di ricerca: le analisi bibliometriche rappresentano una metodologia soddisfacente per raggiungere tale obbiettivo, in quanto permettono di trovare pubblicazioni tra loro collegate e di raggrupparle. Le metriche dei cluster infatti, adottate nel lavoro di Hoppenstedt et al. [4], rivelano l'importanza di una singola pubblicazione e lo sviluppo dei cluster temporali indica l'evoluzione dei temi di ricerca. In questo contesto, è stata introdotta una nuova misura per confrontare i risultati di diversi intervalli temporali. Complessivamente, i risultati ottenuti in tale analisi forniscono una panoramica completa delle tecniche consolidate e

delle tendenze emergenti per i sistemi di manutenzione delle apparecchiature, soffermandosi nello specifico sulla manutenzione predittiva. È bene tuttavia presentare anche alcuni limiti che caratterizzano le analisi bibliometriche. Innanzitutto, gli articoli devono essere pubblicati in un database accademico, il che talvolta è problematico in quanto sono necessari anche diversi anni prima che la ricerca venga pubblicata e citata. Inoltre, la query scelta per effettuare le ricerche, per quanto selezionata in modo accurato, non riuscirà a coprire del tutto la letteratura esistente. Infine, nel campo della produzione industriale, gli articoli sono spesso rappresentati come brevetti e documenti aziendali interni, e la concorrenza tra imprese operanti nello stesso settore comporta un gran numero di accordi di non divulgazione.

Il primo articolo relativo alla manutenzione predittiva risale agli anni `70 nel campo dell'ingegneria chimica, ma il numero di articoli pubblicati ogni anno è aumentato significativamente solo a partire dagli anni '90, e negli ultimi anni il numero di pubblicazioni continua ad aumentare (Figura 4) nel 2015 gli articoli di manutenzione predittiva estratti avevano un indice di Hirsch medio pari a 118 e una media di 17,18 citazioni per articolo. Essendo importante in un'analisi bibliometrica la scelta delle stringhe da ricercare sui database di pubblicazioni scientifiche, è bene precisare come *condition montoring* venga spesso utilizzato come sinonimo di manutenzione predittiva, specie nel caso di un approccio di monitoraggio costoso. Di conseguenza, i confini tra manutenzione predittiva e monitoraggio delle condizioni sono piuttosto labili.

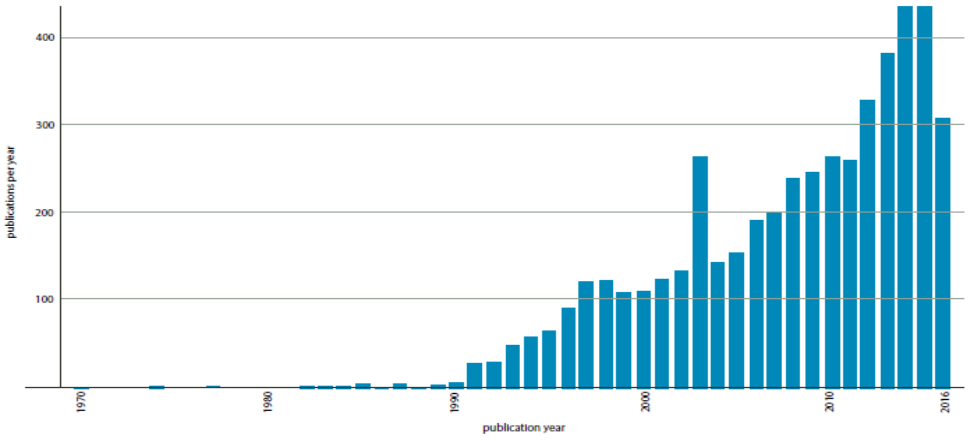


Figura 4:evoluzione delle pubblicazioni relative alla manutenzione predittiva

I risultati dell'analisi bibliometrica effettuata sono stati poi suddivisi per periodo, individuando tre archi temporali di sviluppo della letteratura relativa alla manutenzione predittiva: 1990-2000, 2000-2008, 2008-2016.
Nel primo periodo non è stata identificato nessun argomento particolarmente ricercato; si può evidenziare invece un forte legame tra i termini *predictive maintenance* e *monitoring* (in quanto appartenenti allo stesso cluster), ma non *tra predictive maintenance* e *condition monitoring*, il che fa intendere come in questo primo periodo le due tematiche non siano state trattate congiuntamente. Tra le tecniche adoperato vi sono metodi decisionali che hanno principalmente bisogno dell'intervento umano, quali l'analisi delle frequenze, l'AHP (Analytic Hierarchy Process), i processi markoviani, classificazioni secondo logica fuzzy, ecc… e siano impiegate solo raramente delle tecniche di apprendimento automatico.
Nel secondo periodo, molti dei cluster già individuati sono confermati, ma se ne inseriscono anche dei nuovi, focalizzati sulla visualizzazione, sulla valutazione delle prestazioni, sui costi e sull'aspetto gestionale a causa della crescente complessità dei sistemi di manutenzione predittiva. Tra le metodologie principalmente adoperate in tale periodo si trova la Root Cause Analysis, il data-mining, il machine learning (apprendimento automatico) e le analisi termografiche. Si inizia inoltre a parlare di sensoristica integrata con i sistemi di manutenzione.
Infine, nel periodo 2008-2016, sono di particolare interesse i nuovi cluster individuati. Le applicazioni multicomponente, per esempio, sono adoperate per raccogliere set di dati provenienti da diverse unità di produzione all'interno di un unico modello predittivo; le discipline legate al PHM (Prognostic Health Management) provvedono a creare un collegamento tra i meccanismi di guasto e la gestione del ciclo di vita del sistema. Infine, i nuovi cluster individuati particolarmente rilevanti sono quelli legati all'IoT e al Cloud, che in virtù dei recenti sviluppi di Big Data Analytics e dei Distributed Systems permettono di migliorare i risultati legati alla produzione e alla manutenzione. Per quanto riguarda i campi applicativi, si è avuto un incremento delle pubblicazioni relative

alle turbine eoliche, visto il crescente interesse in materia di energie rinnovabili, mentre tra i componenti vi è molta letteratura su cuscinetti volventi e condensatori.

Altro indicatore per comprendere lo stato dell'arte sulla manutenzione predittiva, è rappresentato dall'evoluzione delle parole chiave nel corso degli anni: si è passati da un approccio dedito al rilevamento dei guasti (fault detection) ad un approccio che mira a predirre i guasti (fault diagnosis). I metodi principalmente adoperati, quali algoritmi genetici e reti neurali, non sono più menzionate esplicitamente come nel passato, a causa del ruolo primario, dato ormai per scontato, di tali metodologie.

Gli approcci esistenti sono stati poi suddivisi in 4 categorie (Figura 5):

- tecnici: basati su applicazioni di specifici parametri tecnici (es: analisi delle frequenze);
- stocastici: in cui si da particolare rilevanza alle questioni stocastiche (es: catene di Markov);
- processi: ci si focalizza sul ciclo di vita della manutenzione;
- generici: comprendono metodi adattivi facendo uso dell'IA, e saranno brevemente presentati nel seguito, vista l'importanza riscontrata in letteratura.

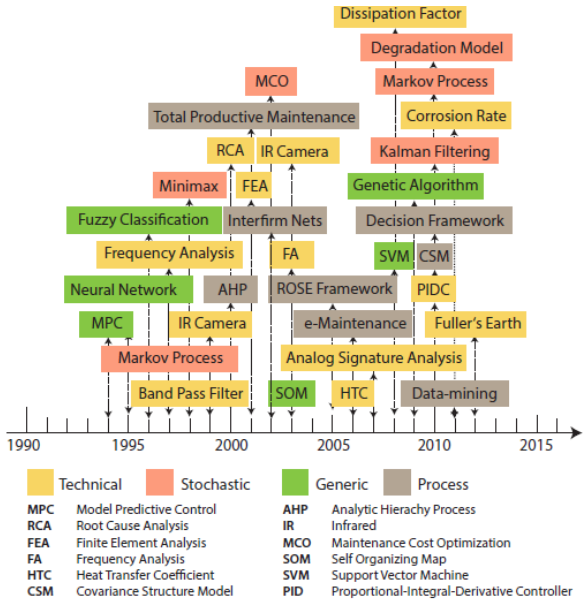


Figura 5: andamento temporale degli approcci riscontrati in letteratura

Machine learning (ML)

Sempre rifacendosi alla letteratura esistente, è possibile effettuare anche un'altra classificazione degli approcci impiegati nel monitorare i macchinari per fini prognostici. Questi si possono dividere in 3 categorie: approcci statistici, approcci basati su modelli e approcci di intelligenza artificiale. Questi ultimi, come visto sopra, sono sempre più applicati nei campi della manutenzione predittiva, poiché gli altri due richiedono un background matematico (statistici) o conoscenza teoriche sulla meccanica dei macchinari (modelli).

Tra gli approcci legati all'intelligenza artificiale, il Machine Learning è risultato essere un potente strumento per lo sviluppo di algoritmi predittivi intelligenti in molteplici applicazioni, in quanto ha la capacità di gestire dati multivariati e ad alta dimensione, estraendo relazioni nascoste in dati provenienti da ambienti complessi e dinamici, come può essere quello produttivo.
Per procedere con l'implementazione di un modello di Machine Learning, è bene seguire la procedura schematizzata in Figura 6, che si articola in diversi step:

- selezione dei dati storici: consiste nel modo in cui sono acquisiti dei dati ritenuti rilevanti per la progettazione del modello;
- pre-processamento dei dati: trasforma i dati acquisiti al fine di renderli più comprensibili, interpretabili, ed elaborabili in modo efficiente dal modello. In tale fase si ha la normalizzazione dei dati e il data cleaning;
- selezione, formazione e validazione del modello: si effettua la selezione, il training e la validazione del modello, ovvero se la scelta effettuata rappresenta adeguatamente il sistema sottostante;
- mantenimento del modello: ha l'obiettivo di mantenere le prestazioni del modello nel tempo, in quanto i processi industriali possono mutare nel tempo, portando alla deriva le prestazioni del modello.

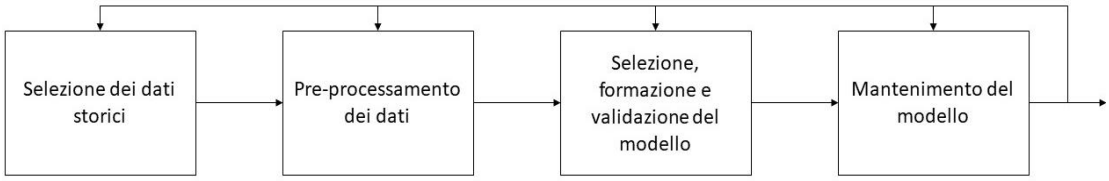


Figura 6: Passaggi principale per sviluppare un modello di Machine Learning

Tuttavia, è bene mettere in evidenza che per costruire un modello di ML all'interno di un contesto produttivo, è necessario sia disporre di personale competente in materia di apprendimento automatico o data science, sia aver adottato in passato diverse politiche di manutenzione (correttive o preventive), in modo tale da poter generare dati storici relativi agli interventi manutentivi. Effettuando delle opportune ricerche, relative al numero di pubblicazioni su alcuni database di articoli scientifici, e analizzando i dati dell'ultimo decennio si è riscontrato un trend crescente come riportato da T. P. Carvalho et al. [5]; infatti tra il 2008 e il 2013 erano stati pubblicati solamente due articoli avente come argomento il machine learning e la manutenzione predittiva, mentre nel periodo 2013-2018 la media di pubblicazioni annuale è salita a 11 (Figura 7). Il recente sviluppo relativo all'acquisizione di dati in tempo reale e il perfezionamento degli algoritmi di ML hanno sicuramente fornito un apporto importante per lo sviluppo del fenomeno.

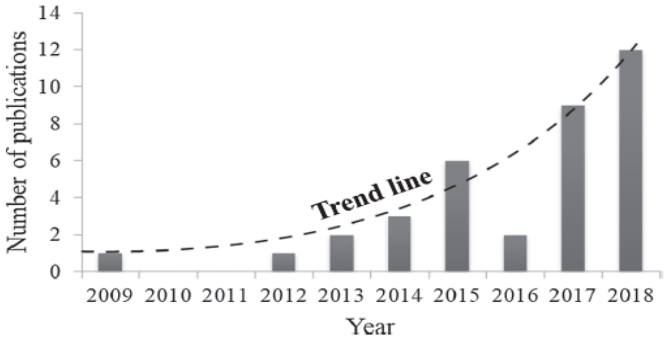


Figura 7: pubblicazioni su ML applicato alla manutenzione predittiva

I dati impiegati per sviluppare un modello di ML possono essere reali o sintetici, ma vi è un maggior uso dei primi (89%) sui secondi (11%). Generare dati

sintetici (ovvero dati ottenuti attraverso un calcolatore che simula dati reali) richiede infatti il possesso delle apposite apparecchiature, e inoltre, in certe circostanze non sono abbastanza soddisfacenti per rappresentare la realtà in modo affidabile.
Per quanto riguarda i metodi di ML, tra quelli più adoperati vi sono le foreste di decisione casuali, le reti neurali, le macchine di supporto vettoriale e gli algoritmi di clustering (Figura 8)
Le foreste di decisione casuali (*random forests*) sono degli algoritmi di apprendimento supervisionato, impiegati sia per effettuare delle classificazioni sia per delle analisi di regressione attraverso la creazione di ''foreste'' contenenti più alberi decisionali randomizzati.
Le reti neurali artificiali (*artificial neural network*, ANN) invece, sono delle tecniche ispirate, in linea di principio, alle reti neurali biologiche; esse sono composte da diverse unità di elaborazione, detti nodi, interconnessi tra loro attraverso dei canali di comunicazione pesati. Sono ampiamente utilizzate in quanto non è necessario avere conoscenze approfondite nella fase decisionale, essendo basate solamente su dati storici (così come i metodi k-means). Tuttavia hanno lo svantaggio di dover lavorare su un enorme mole di dati affinchè si arrivi ad ottenere una rete in grado di apprendere correttamente, ed è impossibile capire come si sia arrivati ad una certa previsione dell'output (approccio ''black-box'').
Le macchine di supporto vettoriale (SVM) sono adoperate principalmente per effettuare delle classificazioni, in virtù della loro alta precisione nel delineare i confini tra diverse classi di dati. In passato erano adoperati come classificatori binari non probabilistici, ma ultimamente se ne è riscontrato un ampio uso anche in problemi multi-class.
Infine, il metodo k-means è un algoritmo di clustering che adotta una tecnica non supervisionata per determinare il numero di cluster (k), in cui può essere partizionato il set di dati: campioni ''vicini'' apparterranno allo stesso cluster, campioni ''lontani'' a cluster diversi. Vantaggio di tale metodo, oltre alla capacità di gestire ampi set di dati, è la dinamicità nell'aggiornare i cluster ogni qual volta il set dei dati subisce delle modifiche, e la capacità di minimizzare la varianza tra le classi.

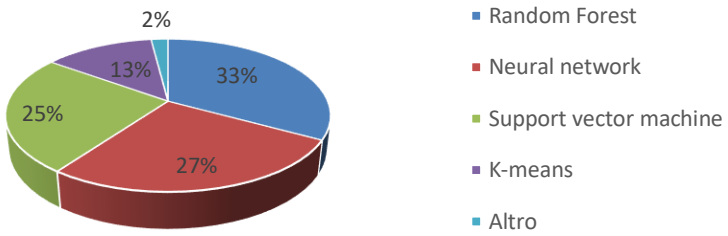


Figura 8: metodi di ML principalmente impiegati per i modelli di manutenzione predittiva [5]

2.2.2 Manutenzione predittiva nelle macchine CNC

Prendendo come riferimento le ricerche condotte da [4] e [5], è stata condotta una ricerca simile per avere una visione dei modelli di manutenzione predittiva adottati nelle macchine a controllo numerico e della tipologia di approcci con cui il tema è affrontato.

Tale lavoro di ricerca è stato condotto su Scopus, un database di articoli e pubblicazioni scientifiche abbastanza noto, sebbene prima si siano valutate alternative di database open source. La query impiegata relativa alle parole chiave da ricercare è stata ‘’(*(predictive maintenance) AND (CNC))”* , aggiungendo dei filtri di ricerca per aree applicative, escludendo aree quali biologia, biochimica, settore medico e agricolo, e per il periodo di pubblicazione, ovvero dal 2008 in avanti. In totale, dai risultati della query si sono ottenute 18 pubblicazioni, distribuite negli anni come riportato Figura 9.

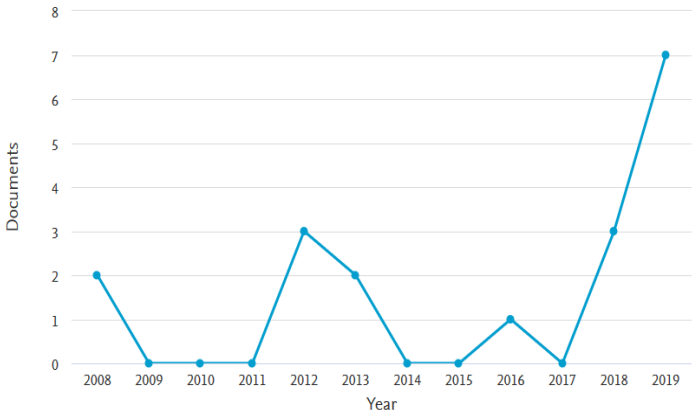


Figura 9: andamento dei risultati della query nel corso degli anni

Dall'analisi dei papers individuati, l'approccio al tema segue, in linea generale, i trend riscontrati in [5] e [4] relativamente alla manutenzione predittiva in generale. Il numero di pubblicazioni ha infatti avuto un consistente aumento negli ultimi anni, con un ampio impiego di algoritmi di machine learning anche per la manutenzione delle macchine CNC (Tabella 1). Nel lavoro di Hesser e Markert [6] ci si focalizza sul concetto di retrofitting, ovvero dell'aggiunta di nuove tecnologie a sistemi preesistenti, al fine di avvicinare quanto più possibile le macchine utensili ad Industry 4.0 ; in tale studio effettuato ci si avvale di reti neurali per monitorare lo stato di usura delle macchine utensili, confrontando poi tale approccio con metodi SVM e K-means per dimostrare il miglior adattamento delle reti neurali. In altri studi, invece, è posta l'attenzione sulla nuova visione della manutenzione predittiva integrata con l'IA, con dei vincoli di budget, e dunque applicabili anche in realtà manifatturiere medio-piccole. Nel lavoro di Vijayakumar et al. [7] è svolta un'analisi comparativa tra un macchinario CNC tradizionale e un altro integrato con tecnologie dell'IoT, che è risultato avere un indice OEE migliore rispetto alla prima casistica. In quello di Sezer et al. [8] ci si avvale di diversi tools open-source, o comunque con un costo limitato: tra questi si fa riferimento ai single-board computer Raspberry Pi 3 e alle rispettive schede aggiuntive, impiegati per la loro flessibilità e adattabilità per acquisire dati, ai servizi di cloud storage offerti da Dropbox e all'ambiente di sviluppo R impiegato per le analisi statistiche dei dati.

Dall'impiego di tali tools, in particolare quelli relativi alla sensoristica, si è notato come questi abbiano risposto in modo soddisfacente in termini di durabilità e stabilità nel corso degli esperimenti condotti riguardanti lavorazioni meccaniche particolarmente critiche.
Il lavoro di Tuma et al. [9], basandosi su una simulazione, pone l'attenzione su una problematica abbastanza rilevante nelle macchine CNC, ovvero la precisione della lavorazione e come questa dipenda dalla vita utile residua (RUL) dei vari componenti. In tale elaborato sono prima analizzati i sensori applicabili nelle macchine utensili, quali gli accelerometri posti sul mandrino per individuare il fenomeno del ''chatter'' (un eccesso di vibrazioni in fase di lavorazione), o gli interferometri laser per monitorare il comportamento degli assi di movimento; si fa però anche riferimento ad un altro modo di monitorare le condizioni dei componenti dei meccanismi di guida, senza alcun sensore aggiuntivo, ma monitorando i valori delle correnti dei servo attuatori. Prendendo come oggetto di analisi i cuscinetti a ricircolo di sfera degli assi lineari, sono presentati i diversi parametri fisici che intervengono nel determinare la loro RUL, e successivamente è svolta una simulazione sul software Simulink.
Tuttavia, il risultato più rilevante della ricerca, che costituisce una differenza sostanziale rispetto allo stato dell'arte della manutenzione predittiva vista in generale, è rappresentato dagli studi riguardanti le modalità di guasto nelle macchine utensili a controllo numerico. Infatti, nelle ricerche condotte da Thoppil et al. [10], Yao et al. [11], Ahmed et al. [12] si pone l'attenzione del lettore su un'analisi preliminare necessaria per prioritizzare i sottosistemi particolarmente critici della macchina utensile, al fine di costruire successivamente dei modelli di manutenzione predittiva.

Tabella 1: articoli risultati dalla query effettuata

Titolo	**Autori**	**Anno**	**Approccio al tema**
An HMM and Polynomial Regression Based Approach for Remaining Useful Life and Health State Estimation of Cutting Tools	Kumar et al	2019	Catene di Markov nascoste
Quality characteristics optimization in CNC end milling of A36 K02600 using Taguchi's approach coupled with artificial neural network and genetic algorithm	Ahmed et al.	2019	ANN e algoritmi genetici ibridi
A predictive maintenance cost model for CNC SMEs in the era of industry 4.0	Adu-Amankwa et al.	2019	Analisi dei costi
Failure Mode Identification and Prioritization Using FMECA: A Study on Computer Numerical Control Lathe for Predictive Maintenance	Thoppil et al.	2019	FMEA
Calculation Of Component Durability Based On Simulation Model	Tuma et al.	2019	Simulazione
Tool wear monitoring of a retrofitted CNC milling machine using artificial neural networks	Hesser e Markert	2019	ANN
Predicting geometric tolerance thresholds in a five-axis machining centre	Rooker	2019	SVM
Exploratory Study On The Application Of IoT In CNC	Vijayakumar et al.	2018	Indici di qualità
An Industry 4.0-enabled Low Cost Predictive Maintenance Approach for SMEs: A Use Case Applied to a CNC Turning Centre	Sezer et al.	2018	IoT con vincoli di budget
Early Fault Detection of Machine Tools Based on Deep Learning and Dynamic	Luo et al.	2018	ANN

Identification			
Cutting tools reliability and residual life prediction from degradation indicators in turning process	Letot et al.	2015	Confronto tra indicatori di parametri fisici per stimare l'usura
Research on PDA-based Predictive Maintenance System of CNC Machine Tools	Sheng et al.	2013	Hardware e software da usare
Study on the Application of the Shock Model in Forecasting Residual Life of CNC System	Yao et al.	2013	FMECA
Condition Monitoring in the Management of Maintenance in a Large Scale Precision CNC Machining Manufacturing Facility	Ahmed et al.	2012	Failure mode avoidance
Prediction of Reliability Model for CNC Machine Tool Based on Exponential Smoothing Model	Yang et al.	2012	Tecniche di previsione
Spindle lubrication fault prediction based on fault symptom decision model and dynamic confidence matching	Gao et al.	2012	ANN
Vision-Assisted Thermal Monitoring System for CNC Machine Surveillance	Zhang et al.	2008	Teoria dei controlli automatici
Application of Support Vector Machine for Equipment Reliability Forecasting	Ding et al.	2008	SVM

2.3 Costi della manutenzione

Il costo di manutenzione è una voce di costo che va a determinare altri costi quali il costo totale di proprietà (TCO, total cost of ownership) e i costi relativi all'intero ciclo di vita del macchinario. Di conseguenza, riducendo i costi di manutenzione, si vanno a ridurre anche tali macro-voci di costo. I costi legati alla manutenzione non sono solamente quelli legati direttamente all'intervento manutentivo, in quanto il costo totale della manutenzione comprende molteplici voci di costo. Tra queste, le principali sono:

1) Costi diretti:
   - materiali impiegati durante l'intervento manutentivo (per esempio il costo del componente da sostituire);
   - manodopera interna, presente nel caso in cui l'azienda possieda al suo interno le conoscenze e le capacità per effettuare direttamente gli interventi;
   - corrispettivi per prestazioni di terzi (consulenze esterne, interventi manutentivi esternalizzati, ecc…).

2) Costi indiretti:
   - costi di struttura, quali quelli sostenuti per assicurare un macchinario;
   - costi dei servizi ausiliari, quali quelli sostenuti per implementare e mantenere per esempio un sistema informativo di manutenzione;
   - costi di mantenimento a magazzino dei componenti di ricambio;
   - ammortamenti di impianti e macchinari.

3) Costi indotti:
   - di mancato servizio o produzione, quali per esempio il pagamento di penali per mancata consegna o ritardi a causa dell'indisponibilità del macchinario in fase di manutenzione;
   - personale addetto alla produzione improduttivo durante le fasi di manutenzione;

- costi d'immagine, sebbene siano difficilmente quantificabili sono piuttosto onerosi;
- scarti dei materiali.

Facendo riferimento alle diverse politiche manutentive impiegate, e ai costi che queste implicano, si è riscontrato dagli studi di Parida et al [13] e di Kans et al. [14], come il passaggio ad una politica predittiva porti a dei risparmi consistenti dei costi di manutenzione (Figura 10).

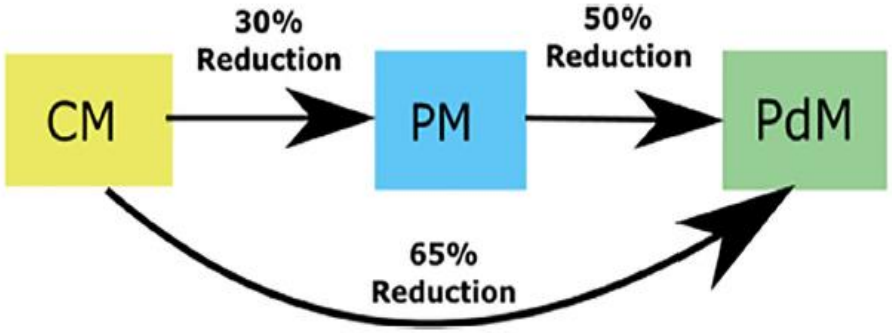


Figura 10: differenze dei costi tra le diverse politiche manutentive

Nell'attività di ricerca effettuata in merito alle macchine CNC, è stato trovato un articolo del 2019 molto importante: così come sottolineato dagli autori stessi, Adu-Amankwa et al. [15], da letteratura si è notato come ci si focalizzi principalmente sulla parte metodologica e sulle modalità di analisi dei dati, tralasciando l'aspetto economico della manutenzione. In tale studio condotto, ci si è focalizzati sulla presentazione di un modello di costo per manutenzione predittiva di centri di lavorazione CNC, applicabile per le PMI. La ricerca è stata condotta effettuando delle analisi di correlazione e di regressione per investigare sulle relazioni esistenti tra i vari parametri, dopo aver sottoposto 21 PMI del Regno Unito a dei questionari, con risposte disposte su una scala Likert. Da una prima analisi preliminare si è riscontrato come la manutenzione preventiva sia di gran lunga quella più impiegata (67%), seguita da quella correttiva (19%), e predittiva (14%), e si è fatta una separazione dei dati, distinguendo tra le imprese che possiedono delle macchine CNC e quelle che

invece hanno stipulato un contratto di leasing: le seconde presentano infatti un costo annuale di manutenzione di gran lunga inferiore alle prime. Successivamente, è stata realizzata un'analisi di Pareto al fine di indagare sulle relazioni esistenti tra l'attuale strategia manutentiva adottata e il suo impatto su costi, qualità, produttività e sicurezza dell'impresa (Figura 11). Da tale analisi è risultato, in ordine di priorità, che l'impatto sui tempi di inattività (*downtime impact*) è la principale preoccupazione per le PMI, specialmente quando le macchine non funzionano a causa della bassa efficienza della macchina; seguono i problemi di arresto della macchina, ovvero il tempo medio tra guasti (MTBF), e la preoccupazione di mettere in atto una strategia di manutenzione inefficace. Queste tre voci, riprendendo il principio di Pareto, rappresentano il 20% delle cause che determinano l'80% degli effetti, tra cui la perdita di produttività e le spese operative (OpEx).

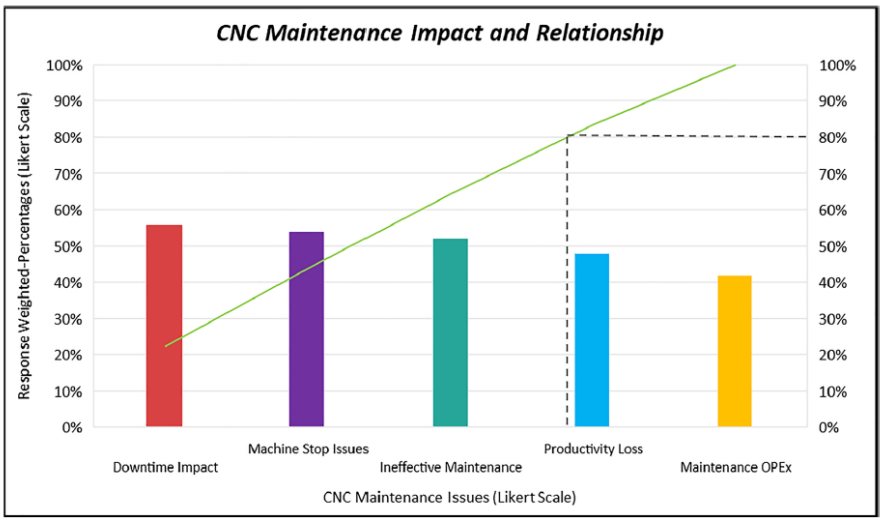


Figura 11: diagramma di Pareto degli impatti dell'attuale strategia manutentiva

Nel modello sviluppato, i parametri principali considerati sono:

- machine data extraction (MDE), che assume un valore numerico a seconda dello scenario in cui vengono presi dati dalle macchine utensili;
- machine tool quantity (MTQ), rappresenta il numero di macchine utensili che lavorano all'interno dello stabilimento;

- machine failure rate (MFR), ovvero il tasso di guasto espresso in guasti per unità di tempo.

Partendo da questi tre parametri, sono state effettuate delle analisi bivariate (regressione lineare) tra queste ed altre variabili, quali il costo operativo della macchina (MOC), il costo di mantenimento della macchina (MMC), i costi di produttività persi della macchina (MLC), i costi di fermo macchina (MDC) e l'efficacia complessiva della macchina (MOE). Alcuni dei risultati ottenuti sono stati:

- inversa proporzionalità tra MTQ e MMC, a dimostrazione della presenza di economie di scala o di scopo;
- diretta proporzionalità tra MFR e MMC, che, come sostenuto dagli autori, supporta l'idea che maggiori guasti richiedano maggiori attività e dunque maggiori costi da sostenere;
- diretta proporzionalità tra MDE e MMC, a conferma della presenza di costi addizionali, dovuti alle infrastrutture impiegate per acquisire dati dalle macchine. I guadagni si ottengono infatti con una riduzione della produttività persa e delle attività di manutenzione non necessarie, in virtù del monitoraggio delle prestazioni e delle condizioni delle macchine utensili.

Nella figura sottostante è riportato un esempio di output del modello che fornisce alcune informazioni sui vari risparmi annuali, date determinate variabili di input.

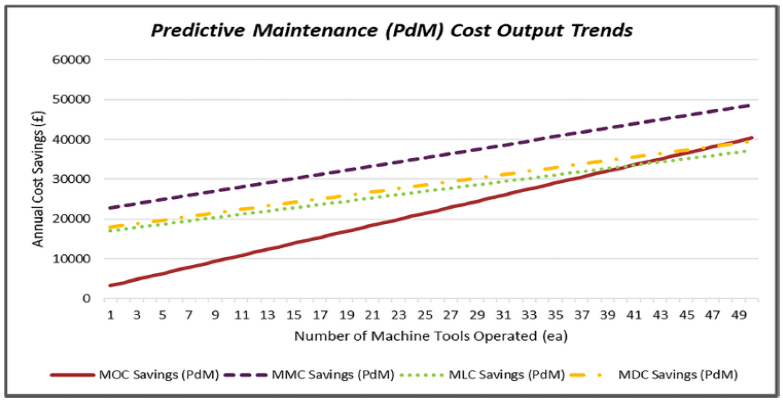


Figura 12: esempio di output del modello di costo PdM proposto da [15]

CAPITOLO 3. FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS

3.1 Presentazione della metodologia FMEA

La metodologia FMEA, acronimo di ‘’Failure Mode and Effect Analysis’’, è una tecnica adoperata per riconoscere e valutare le modalità di guasto o di difetto di un processo, prodotto o sistema, analizzarne le cause e valutare quali sono gli effetti sull'intero sistema produttivo, nell’ottica delle esigenze del cliente. Solitamente, ma non sempre, l’analisi è di tipo preventivo, basandosi dunque su considerazione teoriche e conoscenze a priori. Essa è applicabile a piani di studio di un nuovo prodotto o processo, e anche a piani di miglioramento di prodotti o processi già esistenti. L’analisi FMEA nacque in ambito militare alla fine degli anni ‘40, e successivamente è stata adoperata a partire dalla fine degli anni ‘80 da diverse imprese automobilistiche (Chrysler, Ford e General Motors), che formalizzarono una procedura comune per la sua implementazione.
Correlata alla metodologia FMEA, vi è anche la FMECA (‘’Failure Mode, Effect and Criticality Analysis’’). Quest’ultima è un’estensione della prima, in aggiunta della quale include una sezione di analisi delle criticità usata per valutare la gravità delle conseguenze di un guasto correlata con la probabilità del suo verificarsi; il metodo FMEA fornisce solo informazioni qualitative, mentre l'FMECA fornisce informazioni qualitative e semi-quantitative, che danno la possibilità di misurare in quanto attribuisce un livello di criticità alle modalità di fallimento.
L’analisi FMEA comprende l’insieme di attività svolte al fine di individuare le potenziali modalità di guasto (failure mode) che si possono verificare nel corso di un processo produttivo o durante la fase di utilizzo di un determinato prodotto. Essa si pone l’obbiettivo di quantificare le fonti di rischio, attraverso la costruzione di appositi indici, in modo tale da avere un ordinamento per scegliere e pianificare gli interventi necessari per eliminare (o quantomeno limitare) le fonti dei possibili guasti o per apportare le opportune modifiche ai

sistemi di monitoraggio e controllo di un processo; va vista insomma come uno strumento in grado di guidare lo sviluppo delle azioni messe in atto per ridurre i rischi associati al sistema, ai sottosistemi, fino ad arrivare ai componenti che si trovano ad un livello raggiungibile ed osservabile. Una volta ultimata l'analisi, si procede con la documentazione relativa ai miglioramenti apportati, in modo tale da poter anche creare un database aziendale contenente lo storico delle modifiche apportate: la FMEA non è infatti una tecnica che va applicata una volta soltanto, bensì può essere ripetuta più volte per verificare se le azioni apportate sono state effettivamente di miglioramento.

La FMEA è una metodologia che per essere condotta e applicata correttamente all'interno di un contesto aziendale necessita l'apporto di un team con competenze e conoscenze trasversali relative al design e alla progettazione di un prodotto. Oggigiorno, essa è applicata in molteplici settori manifatturieri, per la sua dimostrata validità e applicabilità, soprattutto nell'ambito della metodologia Six Sigma orientata al miglioramento della Process Capability. Esistono principalmente tre tipologie di applicazione della FMEA, tra loro correlate (Figura 13):

1) di progetto/design (D-FMEA): utilizzata per evidenziare e correggere eventuali debolezze di progetto che possono generare guasti, problemi e malfunzionamenti in fase di utilizzo del prodotto (approccio preventivo più utilizzato per prodotti complessi e beni durevoli)
2) di processo (P-FMEA): utilizzata per evidenziare e correggere eventuali debolezze del sistema logistico-produttivo, che possono influenzare la qualità del prodotto finale (approccio correttivo più utilizzato per prodotti semplici e di consumo).
3) di sistema: è l'analisi di livello più alto su un intero sistema, composto da differenti sottosistemi. Sono attenzionate le interazioni con l'ambiente circostante, i legami tra sottosistemi, e altri fattori che potrebbero portare a non far funzionare il sistema come previsto. In tale approccio ci si concentra su relazioni che sono uniche, essendo collocati nei livelli gerarchici più bassi, e su guasti al punto singolo, che possono determinare il fallimento dell'intero sistema.

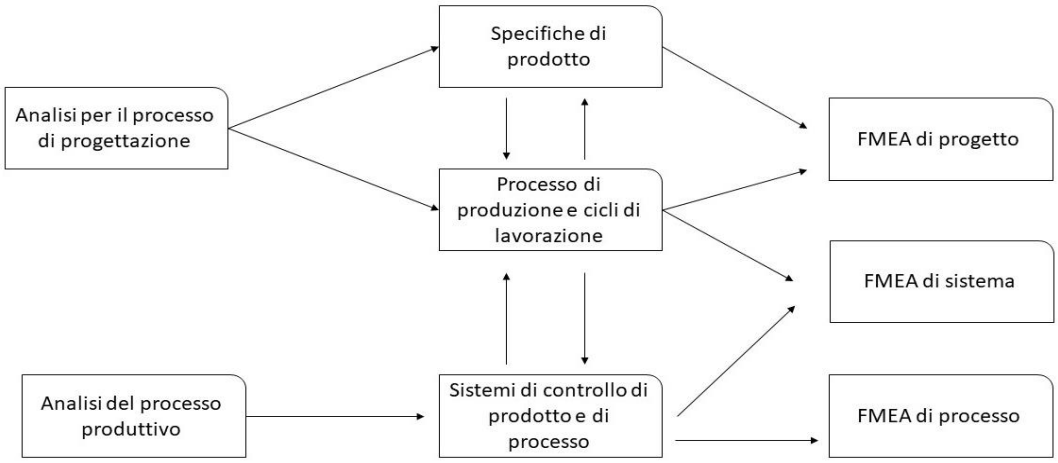


Figura 13: tipologie di analisi FMEA

3.1.1 Definizioni e terminologia

Prima di passare alla descrizione teorica della metodologia, è bene definire e presentare brevemente alcuni termini ricorrenti:

- affidabilità: attitudine di una linea, di un macchinario, di un componente ad eseguire correttamente la propria funzione;
- guasto: stato di anomalia che compromette il regolare esercizio di un sistema;
- causa del guasto: situazione che hanno contribuito al verificarsi del guasto, ovvero i motivi di fondo che lo determinano;
- modo di guasto: modalità con cui il guasto si presenta, da non confondere con la causa. Esso rappresenta la cessazione delle funzionalità svolte dal componente in questione;
- effetto del guasto: sono le conseguenze, percepite dall'utilizzatore del prodotto, che l'evento di guasto ha sulle funzionalità svolte dal componente. Possono manifestarsi a diversi livelli, motivo per cui si parla di effetto in locale (sulla parte analizzata), a livello prossimo (parte soprastante al livello analizzato), finale (sul sistema complessivo nella sua totalità).

3.1.2 Descrizione teorica FMEA

Un buon punto di partenza per applicare la metodologia FMEA è quello di effettuare delle attività preliminari sul sistema o sul processo che si vuole analizzare. Una di tali attività, denominata analisi strutturale, consiste nella costruzione di un diagramma a blocchi in grado di schematizzare e sintetizzare la struttura del sistema, mettendo in relazione le varie parti che lo compongono, le loro dipendenze e influenze reciproche. In alternativa, si può costruire un diagramma ad albero, che fornisca una visione gerarchica dei vari componenti presenti ed illustra la funzione ricoperta da ciascun elemento all'interno del sistema complessivo.
Identificata la funzione del componente di livello più basso, si passa all'identificazione e all'elencazione delle modalità di guasto (failure mode) per ciascun componente. Per identificare le cause relative a ciascuna modalità di guasto, ci si può avvalere di schemi predefiniti, che hanno un ruolo di supporto; tra questi, per esempio, il diagramma causa-effetto è uno dei tool più utili e più usato (Figura 14).
Esso, noto anche come diagramma a lisca di pesce o diagramma di Ishikawa (dal nome del suo ideatore), fu sviluppato in Giappone negli anni '40, in concomitanza allo sviluppo della Total Quality Management. Le cause principali del guasto sono raggruppate in categorie, che rappresentano le macro-aree su cui focalizzarsi, e ciascuna causa principale può contenere ulteriori ramificazioni, rappresentanti le sub-cause che la determinano.
L'importanza di tale strumento nel contesto FMEA è dovuta alla sua capacità di:

- identificare, classificare e relazionare cause ed effetti;
- superare il problema della confusione tra cause ed effetti;
- aiutare a pensare in modo sistematico, raggruppando per categorie le cause;
- identificare le aree dove raccogliere dati per poter implementare determinati accorgimenti.

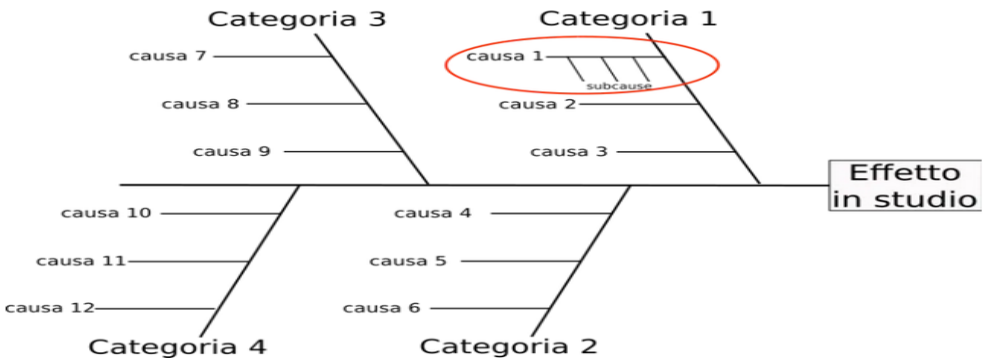


Figura 14: diagramma di Ishikawa

A questo punto, si è in possesso di diverse informazioni che necessitano di essere organizzate, in modo tale da essere reimpiegate per apportare dei miglioramenti al processo o al prodotto in esame. Per farlo, ci si avvale di una tabella di lavoro, riportante ciascuna voce fondamentale che va analizzata (Tabella 2) la tabella può subire qualche variazione a seconda del contesto applicativo, ma le voci principali caratteristiche della metodologia sono sempre riportate. Nel seguito è illustrata ciascuna voce, sebbene qualcuna sia stata già trattata relativamente alla terminologia generale.

Process function requirement

Contiene la descrizione della funzione specifica associata al componente in analisi; qualora abbia più funzioni, queste vanno considerate in modo separato e analizzate singolarmente.

Potential failure mode

È una descrizione delle modalità attraverso cui l'elemento analizzato smette di compiere la propria funzione; tale voce può essere anche la causa di un failure mode di un componente collocato in un livello più alto oppure l'effetto di uno più basso. In tale sezione va dunque fatta una lista dei possibili problemi che potrebbero accadere in fase di funzionamento corretto dell'intero sistema (anche di quelli che potrebbero non verificarsi),

assumendo naturalmente che il montaggio e l'assemblaggio del componente interessato sia avvenuto correttamente. La cessazione della funzione, può essere totale, parziale, continua, discontinua, per cui di conseguenza è bene attenzionare tutti i possibili scenari. Per farlo, si può partire da report aziendali interni relativi al sistema o dal parere di figure tecniche esperte del settore, tenendo sempre presente le esigenze dell'utilizzatore finale.

Potential effect of failure

Gli effetti del guasto sono relativi alla specifica funzione analizzata e bisogna considerare la propagazione dell'effetto, ovvero se esso si ripercuote solo sul sistema o anche sull'utilizzatore. Così come nella voce precedente, per l'identificazione degli effetti si può partire dalle esperienze aziendali pregresse e dal confronto delle informazioni riportate dal personale aziendale, proveniente da diverse aree operative.

Severity (S)

È un indice che valuta la gravità dell'effetto riferita al failure mode in considerazione, ed è compreso all'interno dell'intervallo 1-10. Nell'attribuirlo si considerano delle scale crescenti che variano a seconda del settore in cui si opera; il valore 1 indica la gravità minima, mentre 10 il pericolo massimo. La definizione dell'indice S è fatta congiuntamente dal team di lavoro tramite discussione e confronto fra i componenti, ma in ogni caso il valore attribuito sarà influenzato per certi aspetti dalla soggettività degli individui, in quanto dipende sia da dati storici che da conoscenze pregresse personali.

Potential failure cause/Mechanism of failure

Le potenziali cause del guasto rappresentano un possibile evento che porta al manifestarsi delle modalità di guasto; sono individuate dal team, tenendo presente i collegamenti e le relazioni esistenti tra i vari componenti del sistema. Esse rappresentano i punti deboli degli elementi cui sono riferiti, in quanto stanno alla base delle relazioni che portano alla cessazione della funzione prevista, motivo per cui vanno analizzate e ricercate con attenzione.

Occurence (O)

Come la severity, è anch'esso un indice, ed esprime la probabilità del verificarsi dell'evento di guasto. Va determinato prendendo in considerazione l'esperienza passata relativa alla ricorrenza di quella causa. Per quanto riguarda l'intervallo in cui è compreso e la scala adoperata per valutarlo, valgono le stesse considerazioni fatte per S.

Current Control

La voce relativa ai controlli attuali è un elenco descrittivo dei controlli attualmente adoperati al fine di identificare il failure mode in oggetto. Tale voce varia moltissimo in base al contesto applicativo e a seconda della tipologia di FMEA considerata; per esempio una P-FMEA si avvale anche di indici di capacità di processo statistici, mentre una FMEA di sistema di tecniche ispettive. I controlli effettuati possono essere a fini preventivi, ovvero per anticipare l'insorgenza del failure mode e ridurre l'indice O, o a fini ispettivi, ovvero effettuati per rilevare il failure mode subito nel momento in cui si sono già verificati.

Detection (D)

È l'indice che sintetizza la probabilità di rilevare il guasto quando questo avviene, ed è naturalmente legato alla voce precedente. Compreso tra 1-10, esso è influenzato nel caso di FMEA di sistema o di processo, dalla presenza di sistemi di controllo di livello superiore. Per questo indicatore il valore 1 indica la facilità nell'individuare il guasto, mentre il valore 10 rappresenta la massima difficoltà nel rilevarlo.

Risk priority number (RPN)

È dato dal prodotto tra S, O e D:

$$RPN = S \cdot O \cdot D$$

Può dunque assumere valori compresi tra 1 e 1000, e fornisce dunque un ordinamento relativo alla necessità di intervenire o meno sull'elemento cui si riferisce con opportune azioni correttive, al fine di diminuire uno o più indici tra i tre che lo determinano.

Action Result

Tale voce comprende l'insieme delle azioni correttive da mettere in atto sull'elemento che è risultato critico, calcolando successivamente i nuovi indici per verificare che il rischio di guasto sia effettivamente diminuito. Indipendentemente dal valore assunto dal RPN, è necessario intervenire quando l'indice S assume valori pari a 9-10, in quanto quell'elemento può costituire una fonte di rischio critica per l'utilizzatore finale, e in questi casi si deve effettuare molto probabilmente una riprogettazione del desgn o del processo. Per diminuire D invece potrebbe essere opportuno aumentare i controlli e il monitoraggio dell'elemento in questione.

									Actions Result				
Process function requirement	Potential failure mode	Potential effect of failure	Severity	Potential failure cause/ Mechanism of failure	Occurence	Current control	Detection	RPN	Actions taken	S	O	D	RPN

Tabella 2: tabella operativa FMEA

3.1.3 Vantaggi e svantaggi della FMEA

I vantaggi principali che si hanno dall'adozione della FMEA sono:

- abbassamento dei costi di progettazione, in quanto essa permette di identificare nel processo, nel prodotto o nel sistema le parti critiche, sulle quali intervenire, evitando ulteriori spese;
- riduzione dei reclami da parte del cliente finale/utilizzatore, che vanno a determinare anche un aumento di costi difficilmente quantificabili legati alle riparazioni (nel caso di un prodotto), qualora questo fosse ancora in garanzia;
- miglioramento dei know-how relativi al prodotto, in virtù delle attività di confronto e brainstorming effettuate dal team;

- monitoraggio delle fasi evolutive cui è soggetto il processo o il prodotto, in modo tale da permettere dei confronti dando vita ad uno storico delle modifiche apportate, che potrà essere utile in futuro;
- capacità di sintetizzare in un singolo documento schematico e di semplice lettura un elevato quantitativo di informazioni relative al prodotto o al processo.

Tra gli svantaggi invece si ricordano:

- la dose di soggettività che caratterizza la metodologia, in quanto come visto, gli indici (S, O e D) sono determinati in parte anche dalla soggettività degli individui;
- la difficoltà di isolare e analizzare e valutare in modo isolato i singoli guasti, a causa delle interazioni tra i componenti presenti (ciò è particolarmente riscontrabile nella trattazione di sistemi complessi che comprendono un grande numero di sottosistemi);
- i limiti di applicabilità in contesti di imprese medio-piccole, a causa degli sforzi necessari (anche economici) per organizzare incontri e attività di addestramento del team;
- inadeguatezza nel riconoscere, una volta determinato il RPN, quale tra i 3 fattori che lo determinano deve essere attenzionato (in quanto tutti e 3 gli indicatori hanno lo stesso peso). Si possono avere infatti medesimi risultati di RPN, ma con implicazioni differenti considerando i tre indici S, O e D;
- valori non raggiungibili tra i valori possibili del RPN: facendo riferimento alla formula infatti non è possibile determinare tutti i numeri primi compresi nell'intervallo 1-1000.

3.2 FMEA, CNC e manutenzione

Dopo aver presentato la metodologia FMEA classica, nel seguito è presentata qualche variante ricercata in letteratura, che è stata sperimentata in applicazioni relative alle macchine utensili CNC e alla manutenzione; l'attività

svolta si è fermata alla ricerca di papers in lingua inglese, tralasciando quelli scritti in altre lingue.

Tra le varianti molto diffuse, quelle basate sulla logica fuzzy ricoprono un ruolo molto importante in letteratura, poiché rappresentano una valida alternativa per superare uno degli svantaggi della FMEA elencato in precedenza, ovvero l'influenza della soggettività, e la valutazione dell'incertezza determinata dai differenti gradi di conoscenza degli addetti allo sviluppo della FMEA: la logica fuzzy è un'estensione della logica booleana, nella quale a ciascun evento o proposizione si può attribuire un grado di verità compreso tra 0 e 1.
Il modello presentato da Zhaojun et al. [16], applicato ad un tornio CNC, è sviluppato anche per ovviare ai problemi relativi alla raccolta dei dati di guasto (collocazione fisica degli impianti produttivi, vincoli di tempi e di budget). Tale modello si sviluppa in diversi step, che si avvalgono di un metodo con scala a logica fuzzy, di un diagramma spazio-rischio, e di un calcolo ponderato della distanza euclidea. Composto un team di esperti, per i tre indici è attribuito da ciascun componente del team un valore su una scala linguistica fuzzy a 5 livelli, e si definisce una funzione che calcoli una funzione media per i tre indici, tenendo conto anche di un livello di significatività, in modo tale da ottenere un intervallo con limite destro e sinistro. Successivamente, dai valori ottenuti, si costruisce un diagramma spaziale dei rischi per ciascun failure mode, e si calcola la distanza euclidea ponderata per determinare i due limiti del RPN:

$$RPN_{iL}^{\alpha} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_k^2 \left(x_{iL}^{\alpha} - x_{i\,min}^{\alpha}\right)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_k^2 (x_{i\,max}^{\alpha} - x_{i\,min}^{\alpha})^2}}$$

$$RPN_{iL}^{\alpha} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_k^2 \left(x_{iR}^{\alpha} - x_{i\,min}^{\alpha}\right)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} w_k^2 (x_{i\,max}^{\alpha} - x_{i\,min}^{\alpha})^2}}$$

Con:

- k= S,O,D;
- w_k, peso dei fattori di rischio;

- x_{imin}, indice minimo di x_i che è posto pari a 0;
- x_{imax}, indice massimo di x_i che è posto pari a 10.

Infine, il valore del RPN è soggetto a un processo di defuzzification.

Anche nelle ricerche condotte da Tongtong Jin et al. [17] si affronta la problematica della soggettività che influenza il valore del RPN; gli autori affrontano il problema ed effettuando degli studi che si avvalgono della set pair analysis (SPA), e introducendo due nuovi indici per determinare il RPN. Questi ultimi sono di notevole importanza, e discendono da considerazioni effettuate relativamente all'importanza che la manutenzione ha per affrontare il guasto che si verifica. Tali indici sono M, che fornisce informazioni in merito alla tipologia di intervento manutentivo effettuato (sostituzione parziale, totale, ecc…), ed R, che indica la ricorrenza con cui l'intervento manutentivo è effettuato; dunque, in fase applicativa tali indici sono determinati dalla politica manutentiva adottata.
La SPA, proposta per la prima volta nel 1989, riguarda le certezze e le incertezze relative ad un certo sistema; l'idea alla base di tale teoria è quella di trasformare due problemi di certezza e incertezza in due sistemi di certezza e incertezza che sono collegati tra loro, diversi l'uno dall'altro, e che possono essere trasformati l'uno nell'altro. Essa prevede di analizzare le caratteristiche delle coppie sotto determinate condizioni, e quindi determinare l'equazione relativa al grado di connessione per identità, discrepanza e contraddizione. Tale equazione è:

$$\mu_{(A,B)} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N} \cdot i + \frac{P}{N} \cdot j$$

Con:

- $\mu_{(A,B)}$: grado di connessione tra il set A e il set B;
- $\frac{S}{N} = a$: grado di identità tra i sets A e B;
- $\frac{F}{N} = b$: grado di discrepanza tra i sets A e B;
- $\frac{P}{N} = c$: grado di contrarietà tra i sets A e B;
- N : numero totale delle caratteristiche delle coppie di set.

Riferita nello specifico alla FMEA, noto N, che rappresenta il numero totale di failure mode, si determinano avvalendosi di apposite tabelle i parametri S, F e P; ricavati questi infine, si calcola il grado di connessione: un valore più elevato implica un effetto più pericoloso che il guasto può determinare, e va dunque trattato con attenzione. Applicando sia il metodo proposto sopra, che la FMEA tradizione, al sottosistema del cambio-utensile di una CNC, si sono ottenuti risultati differenti relativi ai failure mode da attenzionare, così come evidenziato dagli autori.

Il metodo proposto da Farshad et al. [18], invece, è stato sviluppato per individuare le possibili modalità di guasto e per priorizzare le possibili azioni da effettuare per far fronte al guasto, al fine di superare i problemi derivanti dalle tecniche ibride basate sulla logica fuzzy sviluppate nel corso degli anni. Il modello sviluppato è una variante ibrida, nella quale è adoperata la FMEA integrata con la grey theory per identificare i possibili failure mode, e per dare un ordine alle possibili azioni da effettuare per ogni failure mode di una macchina CNC, scegliendo la migliore possibile (Figura 15). La grey theory fu svilippata nei primi anni ’80, e si riferisce a quei sistemi nei quali vi è una parte di informazione ben nota e un’altra parte di informazione non conosciuta. Per trovare l’azione correttiva migliore possibile va considerata la seguente funzione obiettivo:

$$T = (U, A\ U\ D, f_{\otimes})$$

Con:

- U, insieme di tutte le possibili strategie di soluzione;
- A, insieme degli attributi di guasto per il RPN;
- D, insieme delle strategie di soluzione conosciute;
- $f_{\otimes,}$ grey function, basata sulla FMEA.

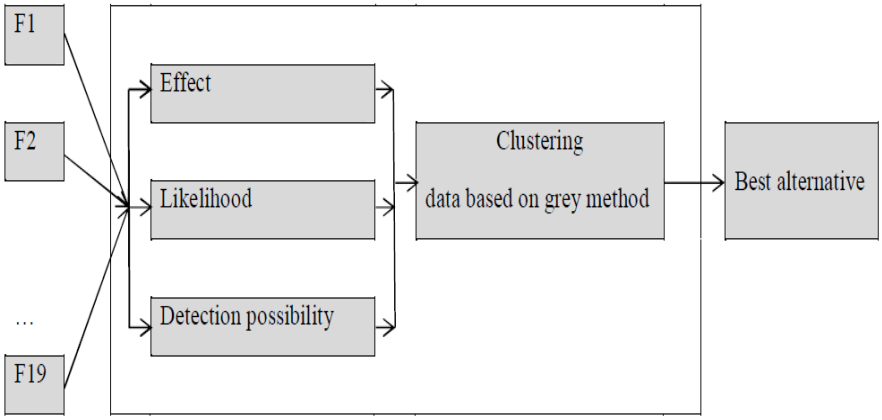


Figura 15: integrazione tra grey theory e FMEA (Farshad et al.)

Ungureanu et al. [19] si avvalgono della FMEA, integrandola in un nuovo modello denominato CFA (Consequence of failure analysis) al fine di avere un modello più semplice dal punto di vista computazionale e che non richieda l'integrazione con software costosi rispetto a quelli presenti in letteratura; oltre alla FMEA, tale metodo tiene conto del periodo di evoluzione del guasto (Failure Developing Period, FDP) e di un fattore economico (Financial Analysis, FA). L'obiettivo dell'analisi condotta è dunque quello di identificare la giusta politica manutentiva da applicare su ciascun componente di una CNC, valutando gli effetti che le azioni manutentive hanno sull'affidabilità del macchinario (reliability) e tenendo conto del costo totale di ripristino:

$$M = f(AF, RPN, FDP)$$

FDP è un fattore che rappresenta il tempo tra la comparsa dei guasti e l'interruzione del funzionamento dell'intero sistema:

- FDP > 0 indica che vi è un certo tempo tra la comparsa e l'interruzione delle operazioni. Di conseguenza l'intervento su tali componenti può essere pianificato (manutenzione programmata)
- FDP → 0 indica un breve o nullo lasso di tempo tra la comparsa e l'interruzione, per cui nei casi in cui il guasto si verifichi in modo casuale vi possono essere casi in cui la manutenzione programmata sia preferibile, ed altri in cui è meglio optare per una politica reattiva.

L’analisi contenuta nella variabile AF, è rappresentata dal rapporto tra il costo totale della manutenzione programmata e il costo totale della manutenzione reattiva ($\frac{Cpm}{Crm}$):

- $\frac{Cpm}{Crm} > 1$, indica l’applicazione di una politica reattiva;
- $\frac{Cpm}{Crm} < 1$, indica l’applicazione di una politica programmata;
- $\frac{Cpm}{Crm} = 1$, indica che l’applicazione dell’una o dell’altra è equivalente.

Dai risultati ottenuti, è stato messo in evidenza come il fattore AF sia quello con maggior peso per determinare la tipologia di politica da adottare, e da un confronto con la metodologia FMEA classica, il metodo CFA fornisce risultati più completi e che trovano maggior riscontro con le pratiche aziendali; inoltre si è evidenziato come attuare azioni programmate di tipo preventivo spesso non sia la soluzione migliore, in quanto diminuendo tali azioni si hanno riduzioni dei costi di manutenzione e una maggiore reliability del macchinario.

CAPITOLO 4. CASO D'USO: APPLICAZIONE FMEA

La metodologia FMEA è stata adoperata nel contesto predittivo del WP13 di HOME come attività preliminare, con l'obiettivo di identificare i componenti maggiormente critici su cui focalizzarsi poi nel prosieguo del lavoro. Essa ha infatti lo scopo di prioritizzare la criticità dei componenti, scegliendone poi uno tra quelli maggiormente critici, diminuendo dunque le applicazioni sensoristiche per il condition monitoring, e mantenendo i costi di installazione al minimo.
Il macchinario oggetto del caso di studio è una fresatrice ad alta velocità della linea GANTRY di FIDIA (Figura 16).

Figura 16: fresatrice linea GANTRY ad alta velocità di FIDIA

4.1 Machine breakdown structure

Come riportato nell'analisi teorica sulla metodologia FMEA del capitolo precedente, il primo step da compiere è quello di scomporre il macchinario in sottocomponenti, arrivando fino ad un livello di dettaglio che permetta di

localizzare dove avviene il guasto. Tale attività, denominata Machine Breakdown Structure (MBS) [20], consiste nella suddivisione della fresatrice secondo una struttura ad albero, in modo tale che partendo dal macchinario nella sua totalità (tronco) si identificano i sottosistemi (rami) e i relativi componenti (foglie), che saranno poi oggetto di manutenzione.
La logica adoperata per effettuare la scomposizione della fresatrice in sottosistemi (1° livello) è stata di tipo funzionale, in quanto ritenuta più opportuna rispetto ad altre, quali per esempio quella spaziale: la complessità caratteristica delle macchine a controllo numerico e le dipendenze tra vari componenti sono stati alla base di tale decisione. Da tale analisi sono stati identificati 7 sottosistemi che sono brevemente presentati nel seguito, e i cui alberi di decomposizione sono riportati in (APPENDICE A)

Sistema idraulico

Il sistema idraulico opera a circuito chiuso attraverso olio idraulico, ed ha un ruolo fondamentale quando sono necessarie alte pressioni di esercizio in piccole aree volumetriche. Tale pressione idraulica è raggiunta tramite un gruppo idraulico, che presenta diverse componenti:

- la pompa idraulica che provvede ad aumentare la pressione fino al valore desiderato;
- il motore idraulico che funge da attuatore, trasformando in energia meccanica l'energia idraulica fornita dalla pompa;
- i tubi di collegamento che provvedono alla distribuzione verso i vari punti di lavoro, coadiuvati da elettrovalvole e regolatori di pressione;
- la tanica, ovvero il serbatoio adibito a contenere l'olio idraulico.

Sistema di lubrificazione

È un sistema automatico (funzionante in questo caso tramite un PLC) che fornisce i giusti quantitativi di lubrificante in vari punti della fresatrice, quali gli organi di trasmissione, ogni certo istante di tempo settato dai progettisti meccanici; in alternativa, pur essendo sempre centralizzato, può richiedere l'attivazione manuale di una pompa o di un pulsante. Nella fresatrice in questione il lubrificante adoperato è il grasso, ma vi sono anche sistemi di

lubrificazione ad olio. L'obiettivo della lubrificazione automatizzata è quello di diminuire i fenomeni di usura, raggiungere tutti i punti difficilmente accessibili e ottimizzare i consumi energetici diminuendo le frizioni. Il sistema consta di:

- timer: attiva e disattiva le operazioni;
- tanica e pompa: immagazzina e provvede a fornire il lubrificante;
- canali di distribuzione: mettono in collegamento la pompa con le valvole e gli iniettori collocati a ridosso dei punti di applicazione (organi degli assi lineari, rotativi, del mandrino, ecc…).

Sistema di raffreddamento

Ha la funzione principale di applicare il refrigerante nell'area di contatto tra workpiece e utensile da taglio, provvedendo a rimuovere i trucioli che contribuiscono ad incrementare le frizioni e la temperatura di esercizio. Presenta componenti simili a quelli del sistema di lubrificazione, quali pompe, serbatoi e canali di distribuzione.

Sistema di controllo ed elettrico

Il sistema di controllo rappresenta il fulcro e la caratteristica peculiare delle macchine CNC, ed è un sistema automatizzato che permette di controllare le varie funzioni della macchina nel corso della lavorazione: dalla movimentazione degli assi, raggiungendo le posizioni dettate dal codice sorgente (G-code), alle attività ausiliare che riguardano i sistemi sopra elencati. Esso presenta un'interfaccia utente che permette all'operatore di interagire con esso.
Il sistema di controllo opera in catena chiusa, confrontando il segnale di riferimento con quello attuale (Figura 17), e consiste nel collegare un computer alla macchina utensile, aumentando notevolmente la sua versatilità, il che porta numerosi vantaggi che hanno contribuito alla diffusione dell'utilizzo di queste macchine (in primis l'aumento di produttività). I computer industriali principalmente adoperati sono i PLC, caratterizzati da vari componenti:

- Central Processing Unit (CPU), costituisce il cervello del PLC;
- schede di memoria, che come in tutti i computer si dividono in primaria e secondaria;

- modulo I/O, ovvero l'interfaccia che permette la comunicazione e lo scambio di informazioni tra vari componenti del controllore;
- trasduttori di posizione vari, quali gli encoder relativi ai vari assi;
- cavi per la retroazione dei segnali.

Tali componenti sono caratterizzati dalla dipendenza da altri, di carattere prettamente elettrico ed elettronico, motivo per cui nella scomposizione sono stati presentati in questo sottosistema, e non in un sistema a sé stante. Tra questi si ricordano:

- i cavi di alimentazione;
- le batterie;
- i contattori;
- i trasformatori;
- i solenoidi;
- gli inverter;
- i relais;
- gli interruttori;
- i potenziometri applicati sul mandrino e sugli assi,
- i circuiti stampati di supporto.

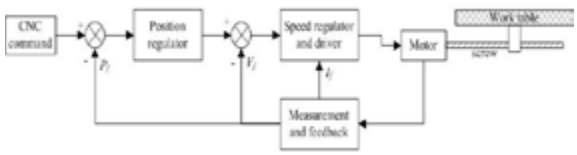


Figura 17: esempio di schema a blocchi di un sistema di controllo di posizione in una CNC [21]

Sistema meccanico

È il sistema che si occupa della movimentazione dell'utensile che esegue la lavorazione sul pezzo fissato nel piano di lavoro. Nello scomporre tale

sottosistema si è tenuto in considerazione la caratteristica peculiare della fresatrice GANTRY, ovvero la presenza di 5 assi, che permettono di ruotare sia la testa porta utensile che il piano di lavoro. Nelle fresatrici gli assi sono denominati seguendo il piano cartesiano di seguito riportato (Figura 18), e rivestono una notevole importanza poiché, congiuntamente al numero di gradi di libertà, determinano una maggiore o minore flessibilità durante le lavorazioni.

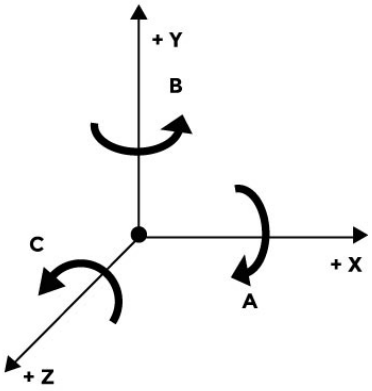


Figura 18:denominazione degli assi nelle fresatrici CNC

Dunque, il sistema meccanico è stato scomposto in prima battuta facendo riferimento agli assi, ovvero alla tipologia: lineari (trasmissione primaria), rotativi e mandrino. A questo punto sono stati identificati i vari componenti, molti dei quali in comune tra i vari assi.
I componenti principali degli assi rotativi sono:

- servomotori elettrici: sono i componenti principali dell'azionamento, ricevono il segnale dal sistema di controllo sotto forma di impulso e provvedono ad azionare il componente responsabile del movimento (di cui si parlerà in seguito). Per questo motivo sono stati inseriti all'interno del sistema meccanico, sebbene la loro natura sia prettamente elettrica. Oltre che negli assi rotativi, sono presenti anche nel sistema di azionamento del mandrino e degli assi lineari;
- gruppo cuscinetti esterni: sono impiegati per supportare l'elemento ruotante e ridurre l'attrito dovuto ai carichi sopportati.

Gli assi lineari X, Y, Z presentano, tranne qualche eccezione, i medesimi componenti, alcuni dei quali sono riportati nelle figure sottostanti (Figura 19):

- cinghia di trasmissione: serve per collegare in modo leggermente elastico due componenti, come due ingranaggi o due alberi, avvalendosi di due pulegge;
- guide: sono i binari adoperati per lo scorrimento degli assi, a protezione delle quali sono collocate delle coperture telescopiche;
- pignone e cremagliera: costituiscono l'alternativa alle viti a ricircolo di sfera, e hanno la funzione di convertire il moto rotatorio generato dal servomotore in moto lineare che determina lo spostamento degli assi. Tra i 3 assi vi è una piccola differenza: gli assi X e Y presentano due pignoni accoppiati sulla stessa cremagliera e su ciascun pignone è collocato un servomotore, mentre sull'asse Z vi è solamente un pignone (l'asse Z coincide con l'asse del mandrino).

  Il mandrino, infine, presenta tra i suoi componenti cinghia, gruppo cuscinetti e servomotore, a cui si aggiunge un'asta che comprende nella parte finale un sistema di bloccaggio, denominato HSK.

Figura 19: guide lineari e stepper motor impiegati in una macchina utensile CNC

Sistema per cambio utensile

Ha la funzione di sostituire gli utensili da taglio a seconda delle esigenze specifiche della lavorazione, o a causa del raggiungimento della vita utile dell'utensile, in modo tale da aumentare la produttività della fresatrice. Gli utensili sono contenuti in un magazzino utensile (chain type, viste le dimensioni, la complessità della fresatrice e l'elevato numero di utensili impiegabili) dal quale sono prelevati tramite un braccio, movimentato da un motore elettrico, al cui termine vi è una pinza (gripper). Dopo aver ricevuto il comando di cambiare utensile dal sistema di controllo, l'utensile da sostituire assume una posizione sempre fissa, nota già a priori da progetto, il braccio arriva in questa posizione e raccoglie lo strumento da sostituire; successivamente ruotando colloca il nuovo utensile tramite l'altro gripper.

Figura 20: cambio-utensile a catena

Sottosistemi vari

Infine altri sottosistemi ausiliari sono stati raggruppati in un unico albero di decomposizione, in virtù del loro ruolo di supporto alla lavorazione. Questi sono:

- il sistema di illuminazione, che determina la sicurezza e le condizioni di lavorazione ottimali per l'operatore a bordo linea;
- il sistema di sicurezza costituito dalle porte scorrevoli che delimitano l'area di lavorazione;
- il sistema di trasporto dei trucioli, costituito da un nastro trasportatore che provvede a rimuovere dall'area di lavoro e da quella adiacente i trucioli prodotti durante l'esercizio della fresatrice.

4.2 Modalità di guasto dei componenti

Dopo aver individuato i componenti dei vari sottosistemi si è passati all'applicazione vera e propria della FMEA; nella trattazione delle cause di guasto, non sono state prese in considerazione quelle relative ad una progettazione o a un montaggio errato. Per individuare le modalità di guasto ci si è avvalsi di strumenti di supporto quali il diagramma a lisca di pesce (Ishikawa). Sono state infatti categorizzate le cause di guasto che portano al guasto per ciascun sottosistema, e successivamente è stato identificato il componente specifico interessato del guasto. Vista l'interdipendenza tra molti componenti, si è notato come le cause del guasto possano avere effetti su diversi componenti della fresatrice. Le categorie principali in cui sono state raggruppate le cause sono:

- chimico-fisiche: comprende tutti quei processi, quali l'ossidazione e la corrosione, che portano al deterioramento e alla perdita di determinate proprietà;
- termodinamiche: appartengono a tale categoria tutti i fenomeni che sono causa di guasti, per via di variazioni di calore e lavoro all'interno di un sistema termodinamico, motivo per cui hanno conseguenze su componenti appartenenti al sistema idraulico, di lubrificazione e di raffreddamento;
- elettrotecniche: variazioni di alcuni parametri elettrotecnici che portano in modo diretto a guasti in componenti di natura elettrica o elettronica, ma che indirettamente possono portare al fermo di un intero sottosistema di altra natura.

- meccaniche: tensioni e sollecitazioni esterne dovute alle condizioni della lavorazione che portano al deterioramento dei componenti meccanici della fresatrice.

Nel seguito è riportato il diagramma di Ishikawa per il sottosistema idraulico (Figura 21), mentre i restanti sono riportati in APPENDICE B

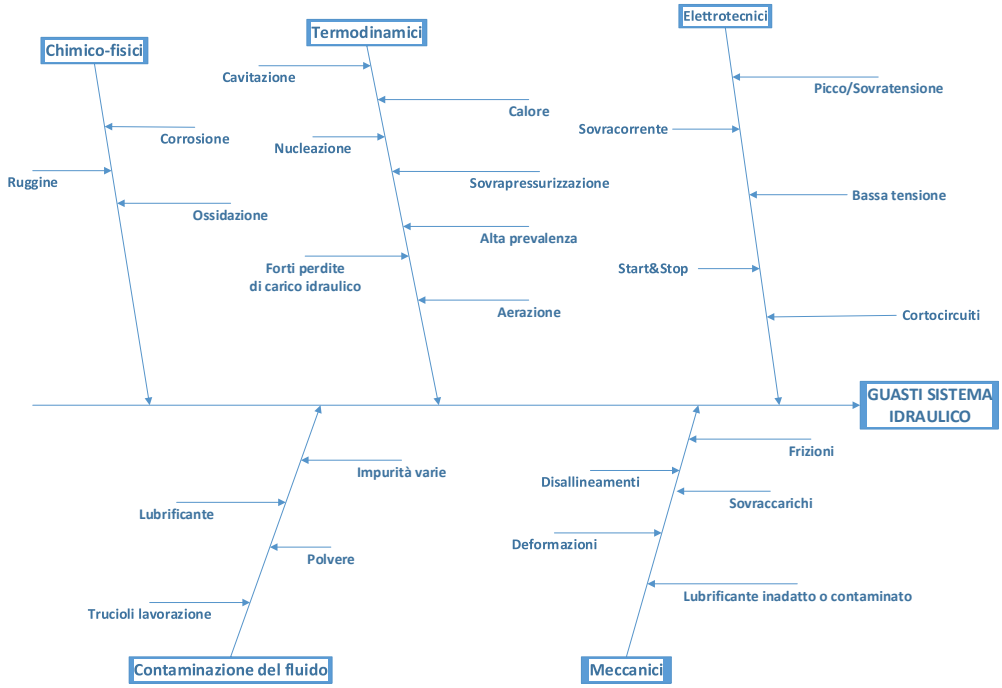


Figura 21: diagramma di Ishikawa per il sistema idraulico

Nei successivi sotto paragrafi sono riportati i principali failure mode riguardanti alcuni componenti.

4.2.1 Guasti alle pompe

Come visto dai diagrammi ad albero della fresatrice, vi sono diverse pompe presenti tra il sistema di lubrificazione, quello idraulico e quello di raffreddamento. Uno dei fenomeni più frequenti di tale macchina idraulica, è quello della cavitazione: esso consiste nella formazione di bolle di vapore (cavità) all'interno di un fluido, generando un'implosione, che può provocare danni sulle superfici in cui avviene, come per esempio accade frequentemente

nelle giranti. La cavitazione è dovuta ad un abbassamento della pressione del liquido sotto la sua pressione di vapore, che porta al cambiamento di fase. La diminuzione di pressione, rintracciabile dalla lettura dei valori misurati dal manometro, può essere causata da una concomitanza di fattori. Tra questi, l'ostruzione dei filtri di aspirazione e il malfunzionamento delle elettrovalvole sono le principali: i trucioli, la polvere, altri corpi estranei, la contaminazione di acqua nell'olio idraulico possono infatti depositarsi su tali componenti, facendo aumentare la temperatura, e compromettendo il loro funzionamento.
Altri guasti frequenti correlati alle pompe idrauliche sono le perdite nei tubi, dovute a un forte aumento di pressione, a disallineamenti meccanici e fenomeni di aerazione che determinano l'allentamento dei giunti, o le perdite nei serbatoi, causate da fenomeni di corrosione, che generano cricche e cavità.

4.2.2 Guasti ai motori

I motori elettrici presentano diverse modalità di guasto, che possono essere sia di natura elettrica che di natura meccanica. I sovraccarichi elettrici appartengono alla prima categoria: essi consistono in un eccessivo flusso di corrente, superiore alle specifiche del costruttore, che attraversa gli avvolgimenti del motore, danneggiandoli, a causa del tentativo di mantenere la coppia di esercizio prodotta (Figura 22). La causa a monte è spesso un'eccessiva caduta di tensione di alimentazione o un cortocircuito dei conduttori. Tali fenomeni non sono però l'unica causa che determina il deterioramento degli avvolgimenti: concorrono infatti anche la presenza di contaminazioni esterne, umidità, danni fisici e aumenti di temperatura dovuti alle condizioni dell'ambiente di lavoro.
Un altro guasto ricorrente è il disallineamento dell'albero, causato dalle eccessive tensioni generate dai carichi applicati: tale failure mode va poi a determinarne altri, come per esempio l'eccentricità tra rotore e statore, che entrano in contatto tra loro.

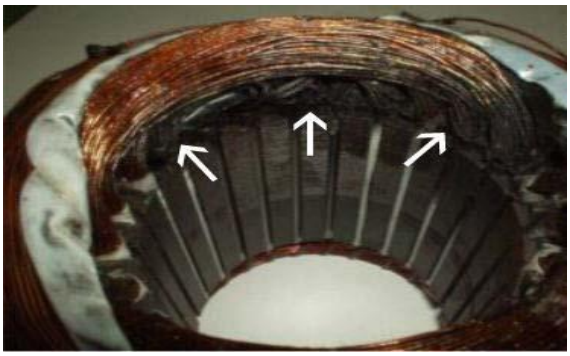


Figura 22: avvolgimenti di un motore elettrio bruciati

4.2.3 Guasto al gruppo cuscinetti

I guasti ai cuscinetti, sia interni ai motori elettrici che quelli collocati nei gruppi esterni adiacenti, sono tra le modalità di guasto più ricorrenti. I failure mode principali, classificabili come consumo dei cuscinetti, sono i seguenti [22]:

- sfaldatura o scagliatura (flaking), si verifica l'asportazione di frammenti di metallo dai corpi volventi, e si propaga verso la superficie interna del corpo danneggiato; la causa principale è dovuta al continuo strisciamento cui sono soggetti i cuscinetti per via degli eccessivi carichi statici e dinamici, cui il motore deve rispondere con la produzione di una coppia elevata;
- smerigliatura e rimozione di materiale, causata dallo strofinamento sotto carico di due superfici non lubrificate, o lubrificate in modo improprio, che porta a fenomeni di saldatura a causa dell'incremento di temperatura;
- macchie dovute a micro-abrasioni o a reazioni con i contaminanti presenti nel lubrificante in grado di attaccare il rivestimento protettivo superficiale;
- scoloritura, si verifica quasi sempre per surriscaldamento, e porta ad una progressiva variazione del colore (giallo, bruno e infine blu);
- striatura, dovuta al contatto superficiale tra i cuscinetti e i contaminanti, principalmente i trucioli del pezzo lavorato. Esse a lungo andare possono deteriorarsi e propagarsi, arrivando fino alla formazione di cricche e alla rottura totale del componente;
- brinellatura, ovvero il rientro permanente di aree superficiali verso l'interno;

- danno elettrico, che porta alla saldatura e al grippaggio tra le parti, in quanto il passaggio di corrente attraverso il materiale porta all'alterazione delle proprietà del lubrificante.

Tutti questi fenomeni di danneggiamento dei cuscinetti possono essere rilevati concentrandosi sul rumore e sull'aumento delle vibrazioni prodotte in fase di lavorazione.

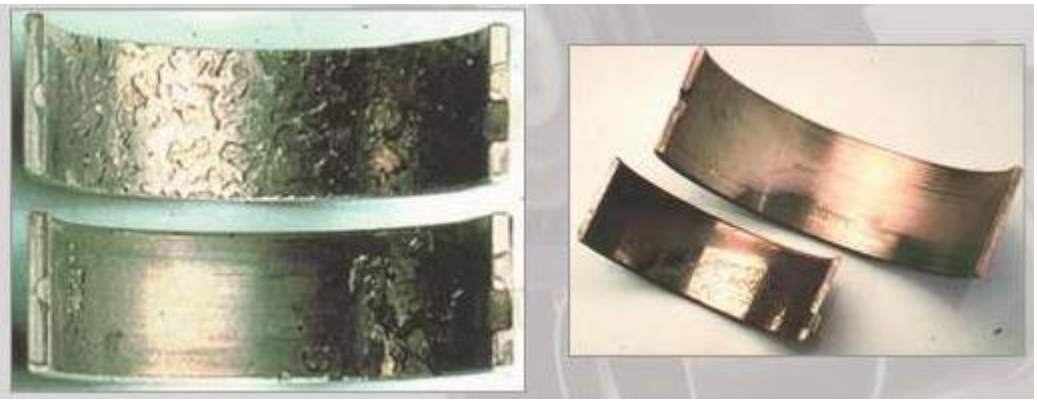


Figura 23: cuscinetti danneggiati per brinellatura e striamento

4.2.4 Guasti dell'ingranaggio pignone-cremagliera

In virtù della sua natura meccanica, il sistema pignone-cremagliera presenta nei meccanismi di guasto qualche analogia con quanto illustrato in precedenza con i cuscinetti. Le modalità di guasto più frequenti sono [23]:

- usura: rimozione degli strati di metallo delle superfici in contatto, che può manifestarsi sia sul pignone che sulla cremagliera. Durante la prima fase di utilizzo di un nuovo componente l'usura si manifesta sotto forma di levigatura, che ricopre un ruolo importante poiché contribuisce a rimuovere le asperità e le piccole imperfezione dovute alla manifattura del componente, fino ad ottenere superfici lisce e lucide. Nella fase successiva tuttavia, l'usura comincia ad essere eccessiva e deleteria, generando imprecisioni sui pezzi lavorati che fungono da segnale sull'insorgenza del guasto;

- fatica: è dovuta alla continua applicazione di carichi e stress eccessivi, fino ad arrivare al superamento della soglia limite del materiale. Essa porta alla formazione di cricche interne e cavità, il che rende difficile rilevare il guasto in tempo utile, e si rileva quanto accaduto solo in seguito alla rottura totale del componente (intesa come frattura o scheggiatura), così come riportato in Figura 24;
- deformazione plastica: in seguito alle sollecitazioni cui è soggetto il sistema pignone-cremagliera è possibile che il materiale non ritorni nella propria forma originaria anche in seguito alla cessazione della sollecitazione. Nel caso del pignone e della cremagliera, le sollecitazioni sono rappresentate dai movimenti rotativi e di scivolamento del pignone, e le deformazioni si manifestano in particolare sui denti degli ingranaggi;
- corrosione alveolare (pitting): si sviluppano sulle aree superficiali dei piccoli danneggiamenti dalla forma caratteristica. La causa di tale fenomeno può avere una duplice natura: una di tipo chimico, dovuta alla contaminazione del lubrificante (anche con sostanze quali l'acqua), l'altra di tipo meccanico, riconducibile a pressioni hertziane elevate;
- grippaggio: consiste nel blocco tra i due componenti per diverse cause. Il raggiungimento di temperature elevate per scarsa, o inadatta, lubrificazione può essere una delle cause, ma anche il dimensionamento errato del gioco meccanico tra i due ingranaggi, o la continuità dei cicli di lavorazione possono essere tra le cause concomitanti.

Figura 24: separazione di un pignone in seguito a fatica

4.3 Risultati della FMEA

Nell'applicare la metodologia FMEA, si è seguito il procedimento teorico illustrato nel capitolo 3, adoperando delle scale per gli indici (Tabella 4,Tabella 5, Tabella 6 in APPENDICE C), e la tabella di lavoro riportata nel seguito (Tabella 3). Per compilare tale tabella (in particolare le colonne relative alle tecniche ispettive attualmente adoperate e a quelle degli indici che vanno a determinare il RPN), ci si è avvalsi di alcune informazioni aziendali fornite dagli utilizzatori e dai produttori della fresatrice relativi agli interventi di manutenzione; tali informazioni sono anche state integrate con alcuni articoli che trattano i guasti di alcuni componenti delle fresatrici CNC [11], [24], [25], [26].

SOTTOSISTEMA	COMPONENTE	Failure mode	Failure effect	Failure cause	S	O	D	RPN	RPN norm

Tabella 3: worksheet impiegata per l'applicazione della FMEA alla fresatrice

Dalle worksheet della FMEA, riportate in (APPENDICE C) il componente maggiormente critico è risultato essere il sistema pignone-cremagliera, il quale ha riportato un RPN maggiore di tutti gli altri componenti; tale risultato è dovuto principalmente a due fattori.
Il primo è rappresentato dalle conseguenze che hanno sulla lavorazione la manifestazione dei guasti: essi determinano infatti una perdita di precisione e accuratezza che porta a scartare molti pezzi lavorati.

La seconda ragione è rappresentata dalla difficoltà nel rilevare tali guasti: mentre su molti componenti vi è un sistema di controllo che riesce ad allarmare l'operatore tramite messaggi di warning, il sistema pignone-cremagliera allo stato attuale non possiede alcun controllore che monitori l'evoluzione del suo stato.
I RPN sono stati poi normalizzati, rapportandoli a quello del componente più critico, e si è notato come altri failure mode particolarmente critici siano quelli relativi al mandrino e ai suoi componenti: tuttavia si è deciso di concentrarsi per il prosieguo del lavoro sul sistema pignone e cremagliera il cui funzionamento è analizzato e approfondito nel dettaglio nel capitolo successivo.

CAPITOLO 5. MODELLO DEI LEGAMI

Identificato il componente più critico, l'obiettivo finale del WP13 del progetto HOME è quello di costruire un osservatore che sia in grado di monitorare in tempo reale l'evoluzione dello stato del componente pignone e cremagliera, riuscendo a identificare l'insorgenza del guasto. Al fine della costruzione dell'osservatore, è stato richiesto dal costruttore del controllore (EICAS) lo sviluppo di un modello, che identifichi tutte le variabili e i parametri che concorrono al guasto e le loro interdipendenze. Il modello proposto deve fungere anche da supporto per proporre dei test presso l'utilizzatore della fresatrice, indicando anche quali grandezze sono ritenute significative, e quindi quali dati raccogliere, per la costruzione del controllore.

5.1 Linguaggio di modellazione

Per sviluppare il modello, è stata svolta un'attività volta alla ricerca di un formalismo grafico con cui presentarlo: sono state valutate diverse alternative, che tuttavia non sono risultate idonee al caso d'uso, arrivando alla conclusione di formalizzare un nuovo linguaggio grafico, quanto più semplice possibile e di facile lettura per l'utilizzatore. Le alternative da cui si è preso spunto per formalizzare alcuni passaggi del modello sono nel seguito riportate:

- schemi a blocchi da teoria dei controlli automatici: è il formalismo impiegato per la costruzione dei controllori, ed ha il vantaggio di rappresentare graficamente l'interazione tra diversi sistemi dinamici, identificando gli input e gli output del sistema. Per adoperarli, tuttavia, è necessario conoscere le funzioni di trasferimento caratteristiche dei sistemi dinamici, attività che va oltre lo scopo del modello da sviluppare;

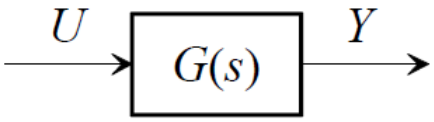


Figura 25: blocco contenente la funzione di trasferimento di un sistema

- reti bayesiane [27]: sono dei modelli grafico-probabilistici, adoperati spesso in campo medico per legare i sintomi alle malattie. Essi si avvalgono di grafici aciclici diretti, motivo per cui non è stato possibile adoperarli (oltre che per l'approccio di tipo probabilistico che li caratterizza), in quanto nel modello sviluppato alcune variabili influenzano altre, ma sono contemporaneamente influenzate da esse. Sono state prese come riferimento nel significato riguardante i nodi, i quali possono essere delle quantità osservabili, delle variabili latenti, parametri sconosciuti o ipotesi;

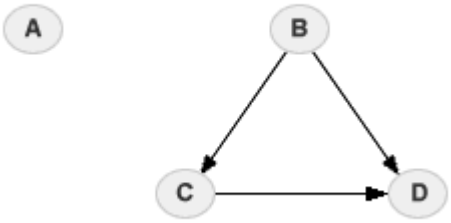


Figura 26: esempio di rete bayesiana

- reti di Petri [28]: sono delle rappresentazioni matematiche adoperate per descrivere un sistema distribuito a tempo discreto (mentre il caso d'uso necessita di un formalismo nel continuo). Esse sono state spesso adoperate per descrivere i sistemi di produzione, analizzando le proprietà comportamentali e l'evoluzione delle prestazioni per costruire dei simulatori di sistemi ad eventi discreti. Consistono in dei grafi orientati con due tipologie di nodi: posti rappresentati da cerchi e transizioni rappresentati da rettangoli. Da tale rappresentazione è stata presa come riferimento l'impossibilità di collegare due nodi dello stesso tipo (un arco può unire solamente due nodi di tipo diverso) e la caratteristica di concorrenza per alcune parti del modello;

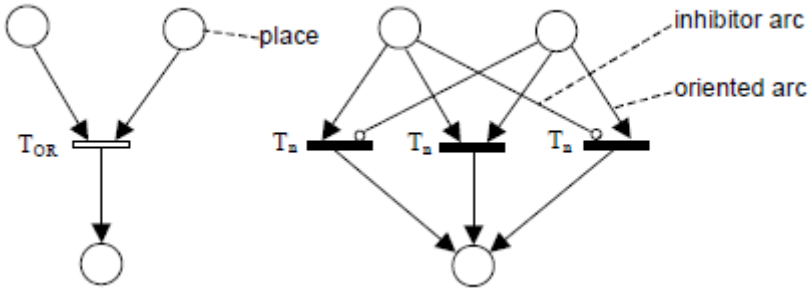


Figura 27: esempio di reti di Petri

- bond graph [29]: si usa per rappresentare un sistema fisico dinamico, permettendo la sua conversione in una rappresentazione dello spazio degli stati. La principale differenza con lo schema a blocchi adoperato in teoria dei controlli sta nel significato assunto dalle frecce, che in questo caso rappresentano il flusso di energia. Per tale motivo sono spesso adoperati per modellare sistemi meccanici, elettrici, idraulici, elettromeccanici, che sono scomposti in parti elementari in grado di scambiare potenza tra loro attraverso delle ''porte energetiche'': le variabili di potenza coinvolte nella metodologia prendono il nome di sforzo, e(t), e flusso, f(t), il cui rapporto fornisce la potenza istantanea che passa attraverso quella porta. Il punto di forza di tale rappresentazione sta nella spiegazione fisica dei fenomeni di causa-effetto che si verificano in un sistema.

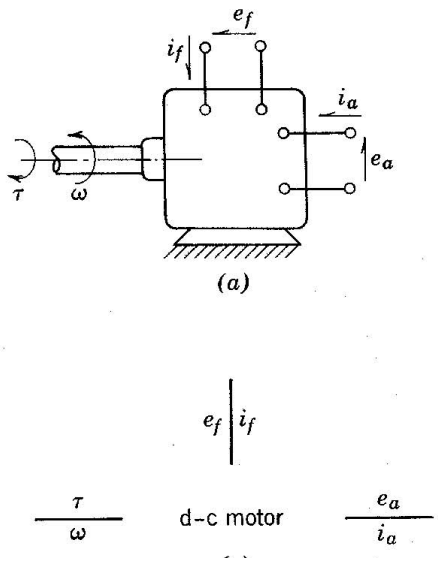


Figura 28: esempio di modellizzazione di un motore elettrico tramite bond graph

Nel linguaggio grafico formalizzato sono stati adoperati i simboli illustrati nel seguito e riportati in sintesi nella Tabella 13 in *APPENDICE D*.

- I nodi a forma di ellisse (Figura 29) rappresentano delle grandezze fisiche, misurabili e quantificabili: esse possono essere parametri caratteristici della lavorazione, output prodotti da un certo componente del sistema analizzato o parametri di progettazione caratteristici del sistema su cui non è dunque possibile intervenire. Una volta ultimato il modello, tali nodi possono anche assumere una colorazione gialla o verde. Nel primo caso la colorazione gialla rappresenta l'importanza della grandezza, che è dunque ritenuta significativa da monitorare come risultato del modello: vi è la possibilità di registrare il suo andamento e la sua evoluzione attraverso funzioni interne al controllo numerico già presenti o tramite l'applicazione di sensori esterni. Nel secondo caso, la colorazione verde va sempre interpretata come risultato del modello: essa indica una grandezza che è influenzabile e sulla quale è possibile intervenire durante i test da effettuare o per apportare delle azioni correttive in grado di posticipare l'insorgenza del guasto, aumentando la vita utile del componente.

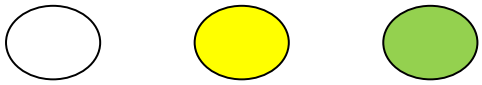


Figura 29: nodi ellittici

- Il doppio ellisse concentrico, indica invece che quella grandezza fisica è analizzata nel dettaglio in un altro sotto-modello, a causa del grado di complessità dei legami che la caratterizzano e dell'elevato numero di parametri determinanti coinvolti.

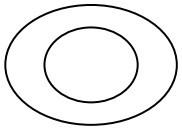


Figura 30: doppio ellisse che indica la presenza di un sotto-modello

- I quadrati rappresentano invece le relazioni tra i nodi che vi convergono (input) e che generano un'altra grandezza in uscita (output). Se di colore bianco esse presentano una relazione matematica nota, che è stata identificata in seguito ad attività di ricerca. Viceversa, se di colore nero, assumono un significato analogo ai modelli ‘’black box’’ in teoria dei sistemi, in quanto si conosce come il sistema reagisce a degli input, fornendo determinati output, ma il funzionamento interno resta ignoto, così che non è possibile legare i parametri attraverso una certa relazione matematica: viene infatti data maggiore importanza al comportamento esterno che a quello interno.

Figura 31: quadrati rappresentanti le relazioni che coinvolgono i nodi

- Il triangolo rappresenta un parametro qualitativo ritenuto rilevante per l’insorgere del guasto, e riconducibile alle condizioni e alle scelte operative dell’utilizzatore.

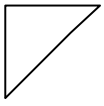


Figura 32: triangolo rappresentante i parametri qualitativi

- Le frecce rappresentano il flusso di informazioni contenuto nei nodi ellittici che convergono verso le relazioni, e da cui hanno origine nuove grandezze fisiche.

Figura 33: freccia di collegamento

5.2 Sviluppo modello

Nello sviluppare il modello per il componente critico, si è partiti da un'analisi cinematica sulle grandezze fisiche coinvolte nella movimentazione degli assi (Figura 50), analizzando il normale funzionamento dei componenti che insieme al sistema pignone-cremagliera determinano gli spostamenti e la precisione della lavorazione. Tali parametri cinematici sono:

- a: accelerazione dell'asse;
- v: velocità di scorrimento dell'asse;
- p: posizione effettiva dell'asse (dall'encoder);
- Δp: errore di posizione, dato dalla differenza tra la posizione letta dall'encoder e quella programmata (è fornita direttamente dal controllo).

L'uso del sistema pignone-cremagliera al posto della vite a ricircolo di sfera, che costituisce la variante maggiormente adoperata nelle fresatrici, determina delle variazioni nella determinazione dell'accelerazione a dell'asse [30]:

$$a = \alpha_s \cdot r_p \cdot \tau_m \qquad \text{Equazione 1}$$

In cui:

- τ_m: rapporto di trasmissione, ovvero un parametro caratteristico che determina le modalità con cui il movimento si trasferisce da una ruota dentata all'altra;
- α_s: accelerazione angolare dell'albero motore;
- r_p: raggio del pignone.

Va considerato nel calcolo dell'accelerazione anche il contributo della variabile jerk: essa fisicamente è interpretabile come la derivata dell'accelerazione, ma nelle lavorazioni a controllo numerico è un parametro che rappresenta un limite imposto all'accelerazione dell'asse, evitando bruschi spostamenti al fine di ridurre le imprecisioni e assicurare l'accuratezza superficiale dei pezzi lavorati [31].
L'accelerazione angolare dell'albero motore è attribuibile all'interazione tra varie coppie; facendo riferimento ai parametri del motore elettrico dell'asse in questione, la coppia motrice è calcolabile come:

$$T_m = k_T \cdot I \qquad \text{Equazione 2}$$

con:

- I: corrente che attraversa gli avvolgimenti del motore, il cui andamento può essere registrato tramite il controllo interno;
- k_T: costante di coppia (specifica del motore).

Il servomotore, producendo la corrente I, eroga una potenza P, raggiungendo determinate temperature di esercizio: questi valori sono entrambi registrabili dal controllo.
Ogni qual volta si voglia imprimere un'accelerazione aggiuntiva al carico (rappresentato in questo caso dall'asse) è necessario imprimere una coppia motrice addizionale, che nel caso specifico dell'ingranaggio pignone-cremagliera è data da [32]:

$$T_{m,\alpha} = \left(J_{in} + J_p + \frac{(m_L + m_Z)}{\eta} \frac{p^2 z^2}{4\pi^2} \right) \left(\frac{\pi}{30}\right) \frac{\Delta\omega_m}{\Delta t_a} \quad \text{(Equazione 3)}$$

Con:

- $T_{m,\alpha}$: coppia aggiuntiva necessaria per imprimere un'accelerazione al carico
- p: passo meccanico della cremagliera, ovvero la distanza tra un dente dell'ingranaggio e il successivo;
- z: numero di denti presenti nel pignone;
- η: parametro che rappresenta l'efficienza meccanica del sistema;
- m_z: massa della cremagliera;
- m_L: massa del carico (inteso in questo caso come l'insieme di asse guide, table, e tutte le parti che sono soggette alla movimentazione);
- J_{in}: momento d'inerzia degli ''input'' (motore, encoder, ecc…);
- J_p: momento d'inerzia del pignone;
- $\Delta\omega_m$: variazione della velocità di rotazione del motore, grandezza che può essere registrata dal controllo per ciascun motore presente.

Un altro parametro caratteristico del sistema pignone-cremagliera è rappresentato dal gioco meccanico, necessario per permettere il moto relativo tra i due organi, che è quindi un fattore determinante per l'accuratezza e la precisione della lavorazione. Esso va infatti a determinare anche l'errore di posizione, che è dato da [32]:

$$\Delta\varphi_{in} = \Delta s_L \frac{2\pi}{p\,z} \qquad \text{(Equazione 4)}$$

Con:

- $\Delta\varphi_{in}$: errore di posizione (radianti);
- Δs_L: gioco meccanico.

Un metodo molto diffuso per ridurre il gioco meccanico nei sistemi pignone-cremagliera è quello di applicare un precarico (inteso come percentuale della coppia normale) che metta in tensione il sistema: questo può essere di tipo meccanico o elettrico. Nel primo caso si applicano due pignoni azionati da un unico motore, ma tale variante è meno utilizzata poiché per variare il precarico è necessaria l'applicazione di una molla, che rende necessaria la riconfigurazione dell'intero sistema. Il precarico elettrico, adoperato anche nella fresatrice in oggetto, è invece più diffuso, e consiste nell'applicazione di due

pignoni guidati da due motori (uno su ogni pignone), in modo tale da esercitare su ciascun pignone due forze uguali e opposte.

Figura 34: pignoni accoppiati sulla stessa cremagliera

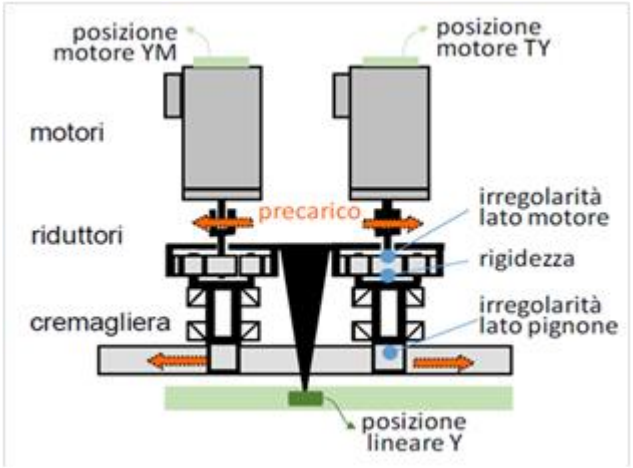


Figura 35: schema strutturale del precarico adoperato sul sistema

La coppia motrice sviluppata dal motore deve contrastare una coppia resistente risultante, costituita da coppie inerziali dovute alle masse che il motore deve mettere in rotazione (già presenti in Equazione 3) e da coppie di attrito. Queste ultime comprendono tutte le forze resistenti risultanti relative ai vari componenti del motore (cuscinetti, albero, ecc…) e del carico, rappresentato in questo caso dal pignone. Nella fase successiva ci si è focalizzati su tale coppia

dovuta agli attriti, considerando i parametri che contribuiscono all'usura degli ingranaggi .
Relativamente ai fenomeni d'usura abrasiva, si è fatto riferimento all'equazione d'usura di Archard, che rappresenta uno dei modelli maggiormente diffusi e adoperati in letteratura [33]:

$$\frac{V}{s} = K \cdot \frac{W}{H} \qquad \text{(Equazione 10)}$$

In cui:

- V: volume del materiale rimosso per usura in seguito a fenomeni abrasivi;
- s: distanza di scorrimento tra i due ingranaggi (dipendente dunque dallo strato di film lubrificante che li separa);
- k: coefficiente di usura, caratteristico delle condizioni di strisciamento e della combinazione dei due materiali a contatto;
- W: carico normale di compressione applicato tra le due superfici in contatto;
- H: durezza delle superfici in contatto.

L'interazione tra le superfici degli ingranaggi è caratterizzata dallo sviluppo di forze di attrito in fase di rotazione: queste sono determinate anche dalla percentuale di precarico impostata per mettere in tensione il sistema. Si è notato infatti, da alcune prove sperimentali, una relazione lineare tra il precarico applicato e le frizioni che si sviluppano tra i due ingranaggi (Equazione 5), e anche con le deformazioni elastiche (ε), intese come spostamenti o allungamenti, che hanno luogo nei componenti coinvolti [34]; di conseguenza il precarico è un determinante dei fenomeni d'usura che si manifestano.

Essendo tra le principali cause dei fenomeni di usura, le forze di attrito sono ulteriormente analizzate nel dettaglio.
Le frizioni e gli attriti che si generano (Figura 51 in *APPENDICE D*) sono dovuti al coefficiente d'attrito (statico nella fase iniziale dei cicli di avvio dei movimenti, dinamico nella fase successiva), che dipende principalmente dalle condizioni di lubrificazione del sistema, oltre che dalle forze inerziali (comprendenti anche l'apporto delle asperità) dovute alle masse che si devono

mettere in rotazione. Le condizioni di lubrificazione sono determinate da diversi fattori:

- T_{pc}: temperatura dell'area di contatto tra gli ingranaggi, che aumenta all'aumentare delle forze di attrito, in quanto si produce calore. Tale temperatura è data dalla somma tra due componenti [35]:
-

$$T_{pc} = T_b + T_f \qquad \text{(Equazione 6)}$$

Il termine T_b rappresenta la bulk temperature, ovvero la temperatura di equilibrio dei denti degli ingranaggi prima di entrare nella zona di ingranaggio (*mesh area*); T_f invece è la flash temperature, ovvero l'aumento istantaneo della temperatura locale che si ha negli ingranaggi dovuto al riscaldamento seguito alle frizioni e agli attriti.
La temperatura di contatto va anche a determinare il raggiungimento di una certa temperatura critica (T_s), secondo il modello di Blok, oltre la quale si hanno fenomeni di grippaggio tra le parti in movimento che portano a usura dei componenti. Tale temperatura non è nota per i lubrificanti sintetici e per quelli che presentano additivi, per cui deve essere determinata con prove sperimentali, in quanto dipende, oltre che dalle proprietà del lubrificante, sintetizzate nell'indice di viscosità υ, anche dalle condizioni operative;

- p: pressione, che viene spesso influenzata dalla presenza delle prese d'aria nelle scatole contenenti gli ingranaggi;
- cont: indica la presenza di contaminazioni tra le parti in contatto, quali polvere, trucioli da lavorazione, ecc… (non essendo quantificabile, è espresso come variabile qualitativa nel modello);
- λ: rapporto di spessore del film di lubrificante applicato tra le parti in contatto, calcolabile come:

$$\lambda = \frac{h_{min}}{\sigma} \qquad \text{(Equazione 7)}$$

Con la rugosità superficiale composta $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$, in cui σ_1 e σ_2 rappresentano gli scarti quadratici medi (RMS) delle rugosità relative alle

due superfici in contatto. Lo spessore minimo necessario di film applicabile h_{min} sulle superfici dipende invece principalmente dalla viscosità del lubrificante che determina la velocità di entrata.

Oltre alle forze d'attrito che si sviluppano tra pignone e cremagliera, anche le forze di taglio (Figura 52 in *APPENDICE D*) sviluppate nel corso della lavorazione concorrono in parte alla coppia resistente [36].
Le forze di taglio prodotte nel corso della lavorazione sono di tre specifiche tipologie [37], ma tralasciando i componenti che non incidono significativamente, possono essere cosi determinate:

$$F_C = k_s \cdot d_c \cdot f \cdot u \qquad \text{(Equazione 11)}$$

In cui:

- k_s: energia specifica di taglio, dipendente dalle caratteristiche del materiale del pezzo lavorato;
- d_c: profondità di taglio, uno dei parametri caratteristici del processo di fresatura;
- f: rappresenta l'avanzamento dell'utensile, ovvero la distanza di avanzamento della fresa durante ogni singola rotazione dell'utensile;
- u: costante caratteristica delle condizioni di lavorazione.

L'avanzamento dell'utensile è poi calcolabile come:

$$f = \frac{v_f}{N} \qquad \text{(Equazione 12)}$$

Con:

- v_f: velocità di avanzamento, ovvero la velocità del movimento della fresa rispetto al pezzo in lavorazione;
- N: velocità del mandrino, rappresenta la velocità di rotazione del mandrino (o dell'utensile), ed è espressa in giri/min.

Quest'ultima è pari a [38]:

$$N = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_t} \qquad \text{(Equazione 13)}$$

In cui:

- v_c: velocità di taglio, ovvero la velocità periferica a cui il tagliente lavora il pezzo;
- D_t: diametro dell'utensile da taglio adoperato.

Il parametro u, come detto, dipende principalmente dalle condizioni di lavorazione:

- γ_t: angolo di spoglia superiore (o principale) dell'utensile, che determina la deformazione e lo scorrimento del truciolo;
- t_t: indica la tipologia del materiale costituente l'utensile impiegato;
- s_t: strategia di taglio impiegata durante la lavorazione (verticale, orizzontale, ecc...);
- z_t: numero di denti presenti nell'utensile;
- T_w: la temperatura cui si trova il lavorato, in quanto influenza la stabilità del processo di fresatura [13]. Quest'ultima è dunque determinata dalle proprietà del refrigerante adoperato (densità e capacità termica) e dalla frequenza con cui viene applicato.

5.3 Risultati del modello

Alla luce del modello sviluppato vanno fatte diverse considerazioni. Esso ha infatti fornito delle risposte inerenti alle seguenti problematiche:

1) introduzione delle azioni correttive da introdurre per migliorare il processo di gestione della manutenzione e l'insorgenza del problema;
2) individuazione delle variabili misurabili che possono essere significative per constatare l'insorgenza del guasto;
3) individuazione delle variabili su cui si può agire nel corso delle prove sperimentali.

Per quanto riguarda le azioni correttive da effettuare, essendo i fenomeni di usura il principale problema che va affrontato, le azioni riguardanti la

lubrificazione devono essere monitorate e analizzate nel dettaglio: il sistema di lubrificazione automatizzato invia dei messaggi di avviso ogni inizio e fine ciclo di lubrificazione del pignone e della cremagliera, che avvengono ogni certo istante temporale settato dai progettisti in base allo stato dei componenti. L'andamento di tali messaggi e le considerazioni fatte dai progettisti possono essere prese in considerazioni come indicatori dell'insorgenza del guasto sugli ingranaggi. Sempre in relazione ai cicli di lubrificazione, un'altra azione opportuna da effettuare è quella di ispezionare periodicamente i consumi di lubrificante rapportati alla produzione e alle ore di utilizzo della fresatrice, così da identificare scostamenti dalle situazioni ottimali di normale funzionamento; questi sono legati al rapporto di film lubrificante presentato nel modello come parametro rilevante.

Inoltre, viste le considerazioni riportate nel modello in merito alla presenza di contaminazioni, si possono effettuare delle analisi tribologiche sul lubrificante usato, in quanto queste rappresentano un valido strumento per avere delle informazioni relative alle condizioni sia dell'olio che del macchinario. Esse prendono in considerazione infatti diversi aspetti: le proprietà chimico-fisiche (viscosità, acidità, additivazione, alterazioni chimiche), la presenza di contaminanti esterni (acqua, polvere), e soprattutto la presenza di metalli dovuti a fenomeni di usura, che possono poi essere soggetti anche ad un'analisi morfologica del particolato per entrare maggiormente nel dettaglio.

Le modalità applicative del lubrificante vanno pure tenute in considerazione, per cui al fine di intervenire sui parametri individuati nel modello, è bene monitorare i quantitativi (dosaggio, numero di getti) e la pressione del getto, e se necessario far rivedere dai progettisti le modalità applicative attualmente in uso.

Un'altra considerazione va fatta in merito alla tipologia di lubrificante impiegato, che allo stato attuale è il grasso. Esso rappresenta il tipo di lubrificante adatto in condizioni di esercizio caratterizzate da basse velocità di rotazione degli ingranaggi, e con bassi carichi applicati. In virtù delle sue proprietà, il grasso ha una capacità refrigerante limitata e trattiene in misura maggiore le particelle di contaminanti, motivo per cui necessita di maggiori accorgimenti manutentivi per ripulirlo: si deve dunque valutare la possibilità di testare un nuovo tipo di

lubrificante. Tra quelli possibili, l'olio rappresenta una valida alternativa, sia per le capacità refrigeranti, che come visto all'interno del modello ricoprono un ruolo importante nel manifestarsi dei fenomeni di usura (temperatura critica di Blok), sia per la maggiore facilità nell'effettuare le operazioni di filtraggio, drenaggio e sostituzione dell'olio contaminato. È ricorrente inoltre aggiungere additivi all'olio, i quali sono in grado di aumentare la viscosità del lubrificante al raggiungimento di una certa temperatura, aumentando il grado di protezione delle ruote dentate.
Il livello di precarico applicato per mettere in tensione il sistema è un altro parametro che risulta rilevante in virtù del modello dei legami; esso infatti, se settato in modo inopportuno, ovvero oltre una certa soglia, contribuisce allo sviluppo degli attriti e dei fenomeni di usura. Nella fase di vita iniziale dei nuovi ingranaggi esso ricopre un ruolo particolarmente importante, poiché l'usura in tale fase contribuisce a rimuovere le imperfezioni dovute ai processi di fabbricazione cui sono stati sottoposti gli ingranaggi, ed è dunque opportuno far ruotare il sistema con carichi più bassi.

È stato inoltre richiesto dal costruttore del controllo automatico di rilevare ed esplicitare tutte le grandezze direttamente misurabili. Alcune di queste possono essere estratte direttamente dal controllo numerico attualmente impiegato; tra queste vi sono parametri caratteristici dei servomotori relativi a ciascun pignone per ognuno dei 3 assi lineari:

- correnti (I), velocità di rotazione del rotore (ω_m), e temperatura di esercizio dei servomotori (T_{motor}), in quanto l'andamento di tali segnali riflette quello dei carichi, delle tensioni e dei fenomeni di usura sul sistema di movimentazione;
- andamento della potenza erogata (P) e dei consumi energetici del servomotore, poiché in altre prove sperimentali ricercate in letteratura si è evidenziato come all'incremento delle forze d'attrito (che vanno poi a determinare l'usura) corrisponda un incremento di tali due grandezze che possono dunque essere utili per rilevare i fenomeni di usura interni non osservabili di cui si è parlato nel capitolo 4;

- differenza tra la posizione reale e quella desiderata dal G-code (Δp), in quanto il raggiungimento di una certa soglia di errore può essere già una condizione sufficiente per stoppare la produzione, evitando la lavorazione di pezzi che saranno poi scartati.

A tali grandezze sopraelencate, i cui valori come detto possono essere estratti dal controllo numerico presente, se ne aggiungono delle altre che necessitano però l'applicazione di sensori esterni.
Facendo riferimento al modello, è rilevante monitorare la temperatura di contatto tra il pignone e la cremagliera, in quanto questa può segnalare in anticipo l'insorgenza di fenomeni di usura, ed in modo particolare fenomeni di grippaggio: essa va infatti a modificare le proprietà del lubrificante (viscosità in primis). Per farlo ci si può avvalere di termocoppie, ovvero di rilevatori di temperatura, applicate nelle aree interessate; qualora ciò non sia invece possibile, è comunque opportuno tenere sotto osservazione la temperatura dell'ambiente di lavoro.

Tra i parametri di output riscontrati nel modello, i rumori e le vibrazioni sono sicuramente quelli più rilevanti, in quanto rappresentano degli effetti derivanti dalle forze di attrito che si manifestano tra i due ingranaggi o dalle forze di taglio che si sviluppano nel corso della lavorazione. Nel primo caso infatti, il monitoraggio delle vibrazioni permette di rilevare in tempo possibili urti che si verificano tra pignone e cremagliere, in quanto un cambiamento dei segnali delle vibrazioni dalla situazione di funzionamento standard può essere ricondotto ad un ingranamento difettoso o all'usura dei denti degli ingranaggi.
Il monitoraggio del livello di misura delle vibrazioni avviene attraverso appositi sensori denominati accelerometri, che sono in grado di rilevare i parametri caratteristici delle vibrazioni, ovvero lo spostamento e la sua derivata prima o seconda.
I dati delle vibrazioni raccolte devono poi essere analizzati per permettere la quantificazione del livello, avvalendosi dei metodi che discendono dalla teoria dei segnali per calcolare diversi parametri di sintesi; alcuni tra questi parametri caratteristici sono:

- peak-to-peak: escursione massima dell'onda (massima sollecitazione);
- peak: escursione massima, positiva o negativa, della vibrazione (rilevante per riconoscere gli urti di breve durata);
- RMS, è il valore medio efficace che tiene conto della storia passata dell'onda, dando un valore di ampiezza correlato al contenuto energetico.

Analogamente, l'approccio per il monitoraggio dei rumori è simile; è infatti possibile applicare sensori vibroacustici come capsule microfoniche, preamplificatori e microfoni.

5.4 Proposte per test ed esperimenti

Partendo dal modello sviluppato, sono state sottoposte al costruttore del macchinario CNC, collaborando con lo sviluppatore del controllo automatico, alcune proposte in merito ai test ed agli esperimenti da effettuare in futuro nel prosieguo del progetto HOME.
Gli step da seguire infatti per la conduzione dei test sono i seguenti:

1) individuazione di un'ipotesi che si vuole validare;
2) progettazione vera e propria dei test e degli esperimenti, cioè della procedura che sarà seguita al fine di validare l'ipotesi considerata al punto 1;
3) svolgimento effettivo dei test e degli esperimenti;
4) analisi dei dati raccolti nel corso del punto 3.

Le proposte presentate sono dunque da tenere in considerazione nel punto 2 della procedura sopra elencata; l'unità sperimentale sarà naturalmente la fresatrice GTF della linea Gantry, e sarà possibile, qualora fosse necessario, effettuare gli esperimenti su diverse fresatrici (comunque tutte della stessa tipologia su cui ci si è focalizzati nell'elaborato).

Individuare gli obiettivi dei test è la prima cosa fondamentale da effettuare per svolgerli nel modo quanto più funzionale possibile. Gli obiettivi e gli scopi di tali

test saranno quelli di legare in termini matematici le variabili individuate, in modo tale da riuscire a predirre l'insorgenza di fenomeni di guasto sugli ingranaggi pignone e cremagliera, e nello specifico i fenomeni di usura. Parallelamente a tale obiettivo, si potranno identificare dei valori soglia relativi ad alcuni parametri (in modo tale da fungere da indicatore per l'insorgenza del guasto), e ottimizzare il valore di alcuni parametri sui quali è possibile intervenire al fine di migliorare le condizioni di esercizio del macchinario.
Nel proporre gli esperimenti da effettuare, si devono necessariamente individuare tutte le variabili coinvolte, che possono essere di 4 tipologie nel seguito riportate.
Le variabili di risposta, chiamate spesso anche variabili dipendenti (Y), sono i risultati di quei parametri sui quali si vuole indagare;esse sono perciò legate ai fenomeni di usura che si vogliono rilevare. Di conseguenza, partendo dalle condierazioni fatte nel modello dei legami sull'equazione di usura, si possono considerare diverse variabili di usura monitorabili che forniscano informazioni sullo stato degli ingranaggi. Queste sono:

- la colorazione delle particelle rimosse dagli ingranaggi;
- la morfologia delle particelle rimosse dagli ingranaggi;
- la distanza esistente tra i picchi e le valli dei denti degli ingranaggi;
- il grado di rugosità superficiale degli ingranaggi;
- la presenza delle particelle nel lubrificante adoperato.

I fattori sperimentali di interesse, noti anche come variabili indipendenti (X), sono quei parametri controllabili sulle quali è possibile intervenire in maniera diretta (settando il loro valore), che influenzano la variabile di risposta. Una volta individuate, è bene esprimere il range dei valori che esse possono assumere. Dal modello dei legami sviluppato, i parametri caratteristici della lavorazione estratti dal codice di programmazione sono dei fattori controllabili sui quali è possibile intervenire; tuttavia, in virtù dei limiti temporali imposti dal costruttore per effettuare le prove e della complessità fattoriale, essi saranno esclusi dai fattori di interesse.

Nel seguito sono riportati i fattori di interesse proposti con i rispettivi valori che possono assumere:

- età/vita utile residua del componente: si potranno per esempio effettuare i test, sostituendo sul macchinario componenti pignone-cremagliera aventi diverso grado di utilizzo ma pur sempre della stessa tipologia (componente nuovo/componente usato). In alternativa, qualora non fosse possibile impiegare ingranaggi con diversa vita utile, si può valutare l'opzione di effettuare i test su più macchinari della stessa tipologia, ma che montano ingranaggi aventi differenti età;
- il tempo totale di movimentazione degli assi, rappresentante il tempo di utilizzo degli ingranaggi. Non essendo questo possibile estrarlo dalle informazioni del controllo, si può adoperare il tempo totale di rotazione del mandrino, che può fornire una buona stima del tempo di movimentazione degli assi;
- settaggio della modalità di utilizzo, in quanto la tipologia di lavorazione (finitura/sgrossatura) imprime sollecitazioni ed effetti differenti sulla movimentazione degli assi;
- livello di precarico, che determina il gioco meccanico e l'intensità delle forze di attrito che hanno luogo tra gli ingranaggi. Esso può assumere valori percentuali (da letteratura comunque non superiori al 20% della coppia prodotta);
- quantitativo, tipologia e frequenza di applicazione del lubrificante, che sebbene sia automatizzata tramite un intervallo di tempo stabilito dai progettisti, può essere modificata anche in fase di utilizzo della fresatrice. Si possono effettuare dunque test impiegando l'attuale lubrificante (grasso) e test impiegando un olio (per vincoli esterni si tralascia l'idea di mettere degli additivi nel lubrificante).

Oltre a queste due tipologie di variabili principali (X e Y) vi sono anche altre tipologie di variabili: quelle intermedie e quelle di disturbo.

Le variabili intermedie sono quei parametri sui quali non si può agire in modo diretto, ma che sono influenzati dai valori attribuiti alle variabili indipendenti. Appartengono a tale tipologia per esempio le forze di attrito, che come evidenziato dal modello sono determinate dalla percentuale di precarico settata e dal coefficiente di viscosità del lubrificante.

Le variabili di disturbo influenzano invece le variabili di risposta, ma a differenza dei fattori di interesse non si può intervenire su di esse; ne sono un esempio alcuni parametri presentati nel modello sviluppato, quali le contaminazioni e i parametri fisici di progetto caratteristici del materiale con cui sono fatti gli ingranaggi (per esempio la durezza).

Qualora non sia possibile operare con le variabili di risposta sopra elencate, per vincoli dovuti alla strumentazione, alla monitorabilità e al budget a disposizione nel progetto, è presentata anche una seconda alternativa riportata nel seguito. Come variabili di risposta che subiscono dei cambiamenti a causa della presenza di fenomeni di usura si possono considerare uno o più parametri presentati nel modello, estraibili dal controllo. Tali grandezze sono quelle presentate nel paragrafo precedente in merito all'identificazione delle variabili monitorabili (pag.76), ovvero: correnti, velocità di rotazione, potenza, temperatura di esercizio dei motori. Per raccogliere i dati relativi a tali variabili, sarà necessario impiegare un'opportuna frequenza di campionamento, in quanto l'attuale sistema di machine monitoring ne adopera una molto bassa, che da confronti con valori di letteratura risulta essere inopportuna per i fini degli esperimenti. Avendo la possibilità di applicare una sensoristica esterna, si ritiene più opportuno, in virtù di quanto ricercato per sviluppare il modello, considerare come variabili di risposta:

- la temperatura delle aree di contatto tra gli ingranaggi (T_{pc});
- il livello di vibrazioni prodotte dagli ingranaggi;
- il livello di rumore ed emissioni acustiche prodotte dagli ingranaggi.

CAPITOLO 6. RISULTATI E DISCUSSIONE

Il presente lavoro di tesi ha fornito diversi risultati sia per quanto riguarda aspetti legati alla ricerca, sia in merito al caso d'uso oggetto dell'elaborato.

Nella parte iniziale del lavoro infatti, si è giunti ad avere una visione panoramica della manutenzione predittiva in generale, e nello specifico la sua applicazione sulle macchine a controllo numerico: effettuando un'apposita ricerca sono stati presentati i metodi attraverso cui la tematica è affrontata, presentando i risultati in una breve review. L'attività di ricerca è stata svolta effettuando una query delle parole chiave ritenute significative per trattare l'argomento. La query impiegata e i filtri di ricerca sono stati scelti, in modo tale da coprire quanto più possibile il tema ed ottenere un numero di papers ragionevole per essere analizzati. Essa, congiuntamente al database su quale è stata effettuata (Scopus), può rappresentare un limite di tale attività di ricerca, in quanto al suo interno possono mancare delle attività di ricerca ancora in stato di pubblicazione, presentate su altri database o secretate in quanto effettuate in ambito aziendale.

Facendo riferimento al caso d'uso invece, l'applicazione della metodologia FMEA al macchinario ha permesso di identificare i componenti maggiormente critici sui quali focalizzarsi nel prosieguo del progetto per sviluppare dei sistemi di controllo a fini predittivi. Diminuire l'insieme dei componenti su cui focalizzarsi, concentrandosi solamente su quello ritenuto più critico (sistema di ingranaggi a pignone e cremagliera) rappresenta un passaggio fondamentale, in quanto permette di mantenere al minimo i costi di installazione che si dovranno sostenere nelle fasi successive per il monitoraggio delle condizioni del macchinario. Nel condurre l'analisi FMEA si sono presentati tuttavia alcuni limiti. Essendo l'analisi stata condotta da un singolo soggetto, e non da un team all'interno del quale si discute e ci si confronta, è probabile che ciò abbia determinato una maggiore influenza del grado di soggettività sui risultati del RPN. Le criticità principali si sono riscontrate nel reperire le informazioni necessarie relative ai dati di guasto e ai fermi macchina. Gli utilizzatori dei macchinari infatti non sono in possesso di un database contenente tutti gli interventi effettuati sulla fresatrice, ma solamente degli interventi effettuati su certi

componenti. Di conseguenza, per analizzare i failure mode di altri componenti, gli utilizzatori finali hanno dovuto fare ricorso alla propria memoria per ricordare i modi di guasto che hanno dovuto affrontare nel tempo.

Il modello proposto relativo al sistema pignone e cremagliera ha avuto diversi risvolti. Per prima cosa esso ha permesso di aumentare il know-how della fresatrice per l'azienda costruttore del controllo automatico, in quanto al suo interno sono riportati i parametri relativi al suo funzionamento in fase di normale esercizio, illustrando la dinamica di esercizio. Attraverso il modello sono state individuate le variabili che caratterizzano lo stato di esercizio della fresatrice, le interdipendenze e influenze che hanno luogo tra esse; in particolare sono state attenzionate quelle monitorabili e quelle sulle quali è possibile intervenire in maniera diretta. Infatti, partendo da tali variabili individuate, sono stati presentati alcuni suggerimenti e alcune proposte in merito ai test ed agli esperimenti che saranno effettuati nei futuri sviluppi del caso d'uso. Nel presentare tali proposte tuttavia sono stati tenuti in considerazione alcuni vincoli imposti dal costruttore e dall'utilizzatore del macchinario, in particolare quelli relativi alla durata temporale ed alla sensoristica aggiuntiva da applicare sono risultati rilevanti nel presentare la procedura da seguire.

Infine, il modello sviluppato è risultato essere utile anche per apportare delle opportune azioni correttive alle procedure attualmente impiegate per le attività di manutenzione degli ingranaggi. Si sono individuati infatti diversi parametri che possono essere modificati, o settati differentemente, in modo tale da migliorare l'accuratezza delle movimentazioni degli assi e ritardare l'insorgenza dei fenomeni di guasto sugli ingranaggi.

APPENDICE A: Machine breakdown structure

La machine breakdown structure (MBS) è la scomposizione della fresatrice in sottosistemi al fine di applicare nello step successivo la metodologia FMEA. I sistemi individuati, con i relativi sottocomponenti, sono nel seguito riportati secondo una struttura ad albero di decomposizione (uno per ciascun sistema).

Figura 36: Scomposizione del sistema idraulico

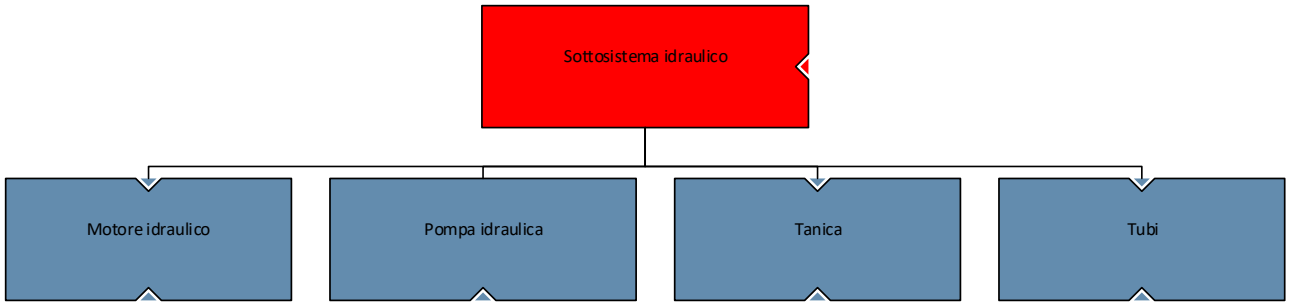


Figura 37: Scomposizione del sistema di lubrificazione

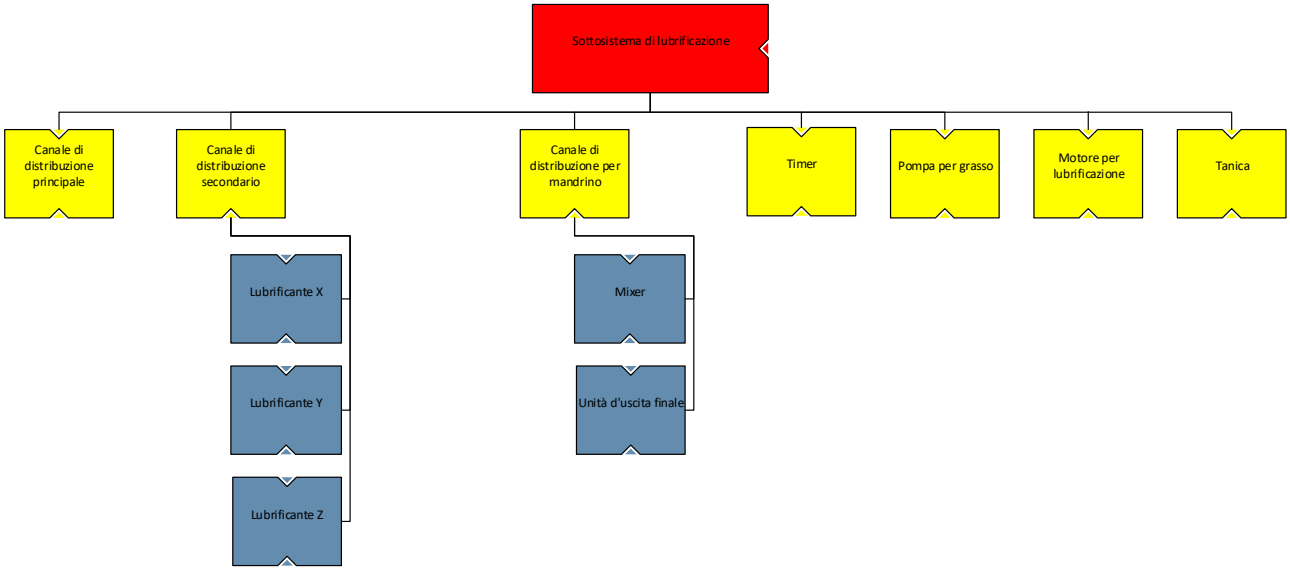


Figura 38: Scomposizione del sistema di raffreddamento

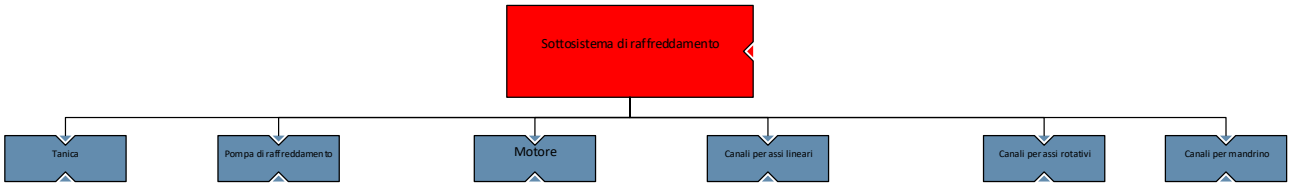


Figura 39: Scomposizione del sistema di controllo ed elettrico

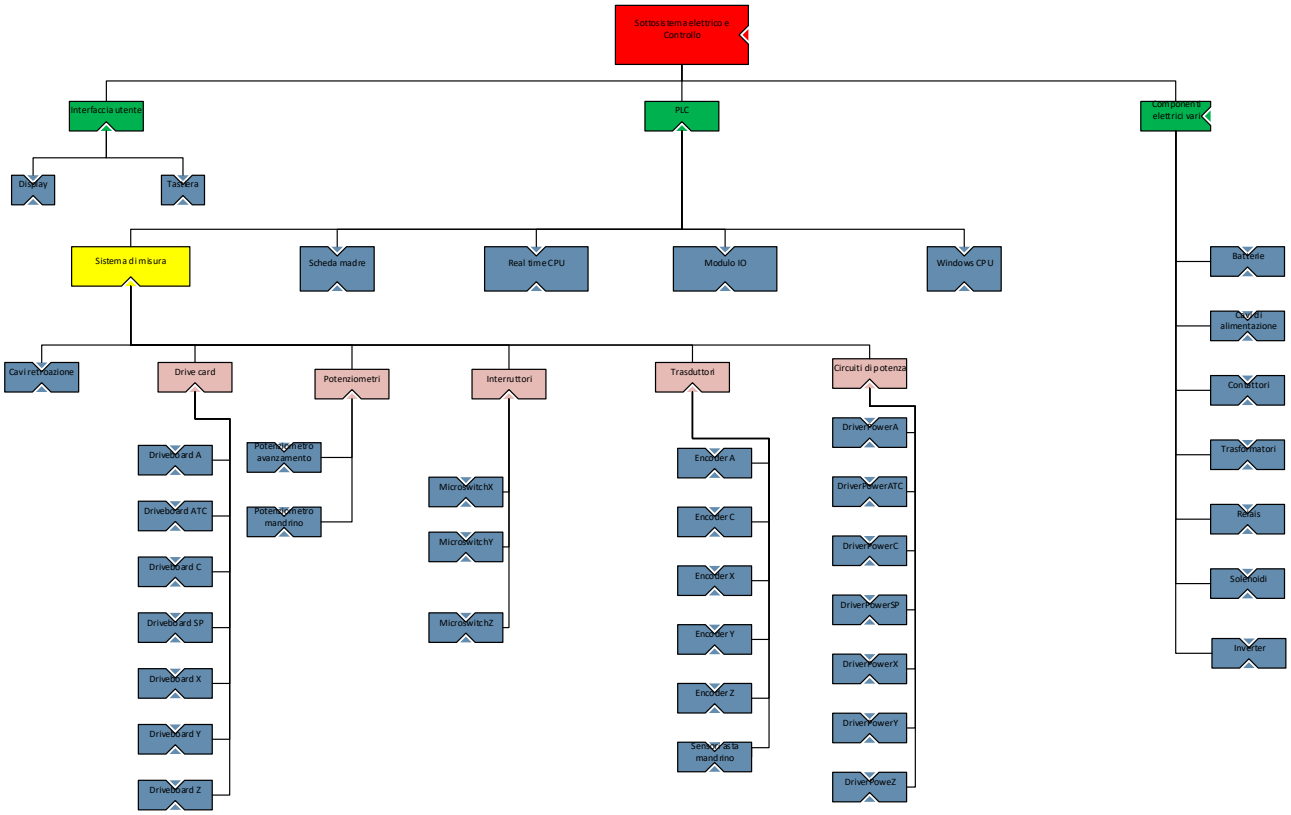


Figura 40: Scomposizione del sistema meccanico

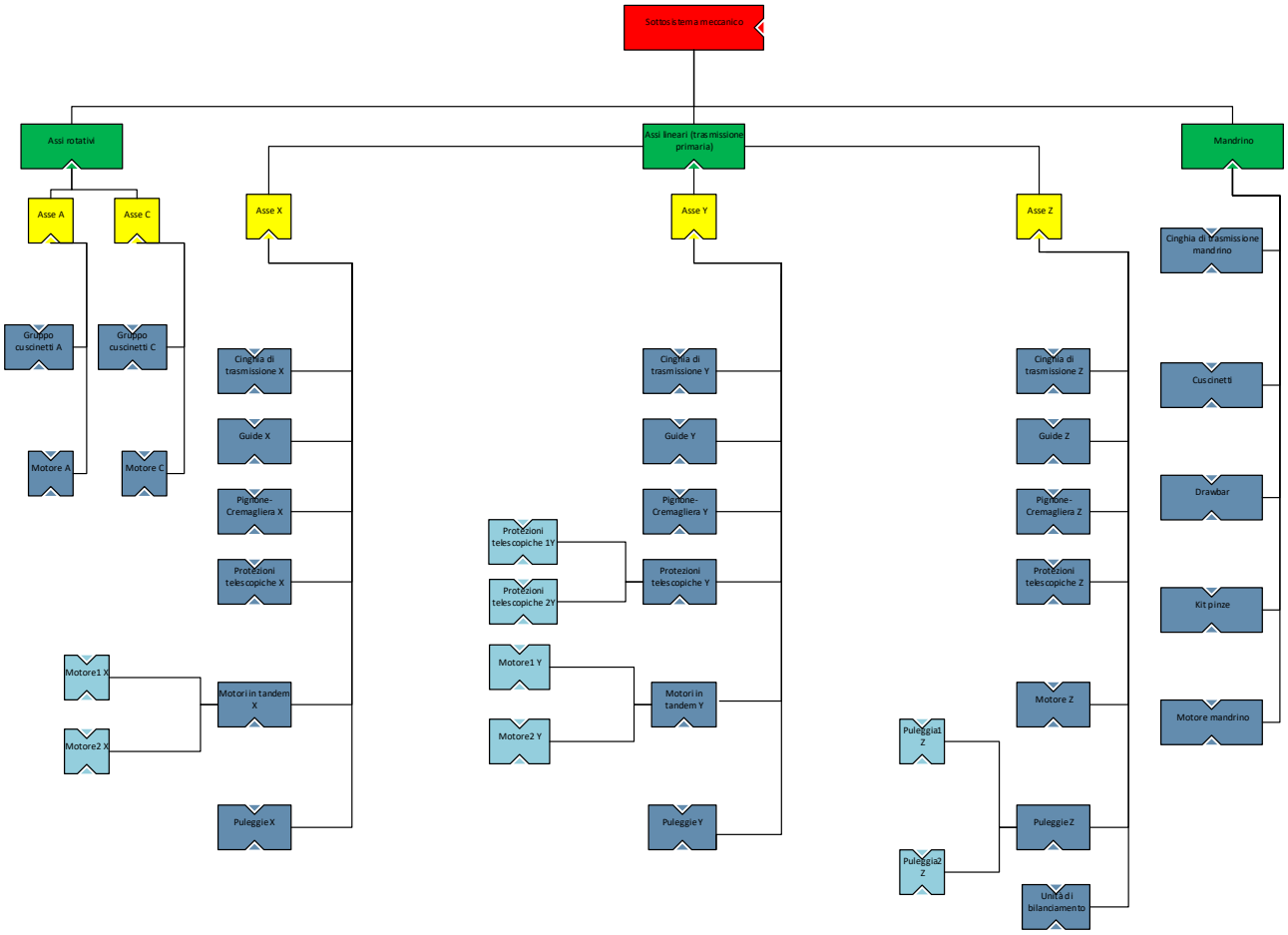


Figura 41: Scomposizione del sistema per cambio utensile

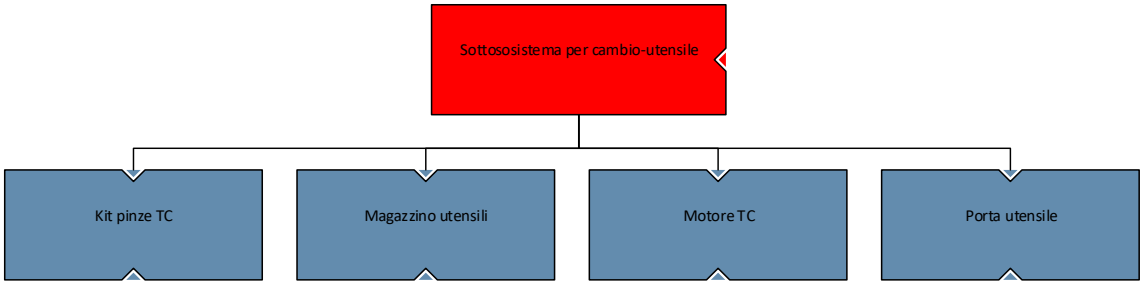
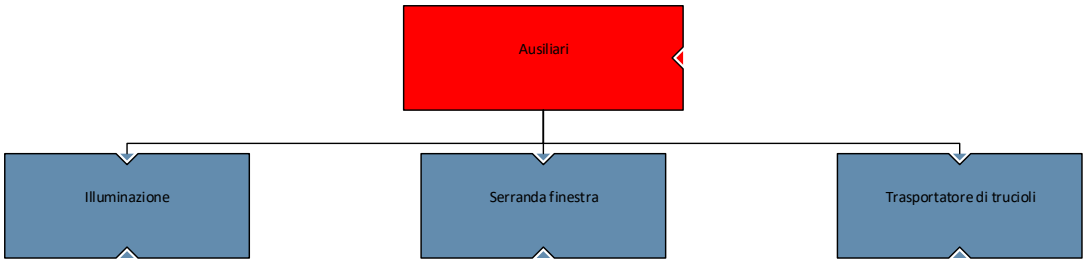


Figura 42: Altri sistemi ausiliari



APPENDICE B: Diagrammi di Ishikawa

A supporto della metodologia FMEA, sono stati utilizzati i diagrammi di Ishikawa per ciascun sottosistema in modo tale da identificare le modalità di guasto ad un macro-livello, raggruppando le cause di guasto per categorie, e identificando successivamente il componente esatto in cui si manifesta il guasto.

Figura 43:diagramma di Ishikawa per sistema idraulico

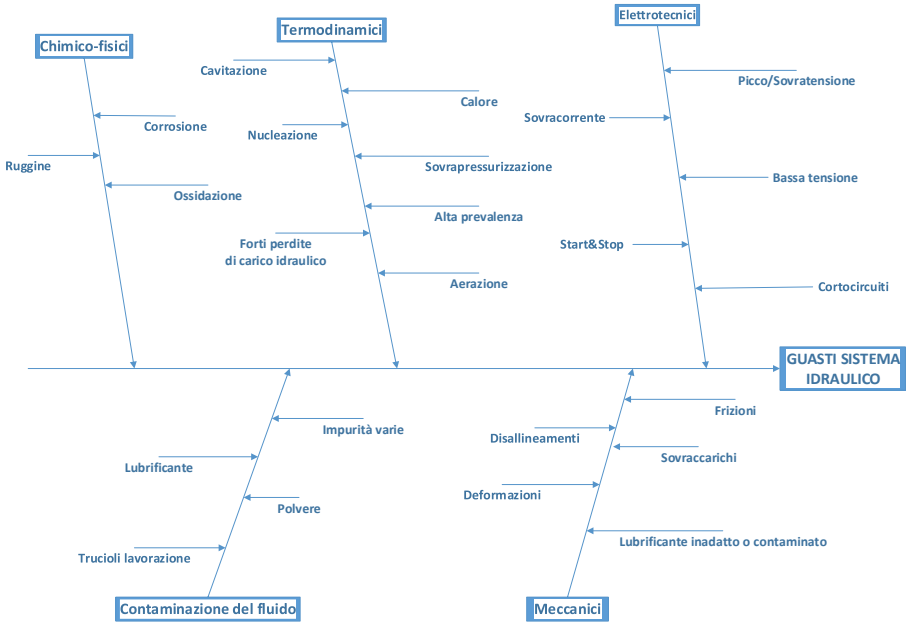


Figura 44: diagramma di Ishikawa per sistema di lubrificazione

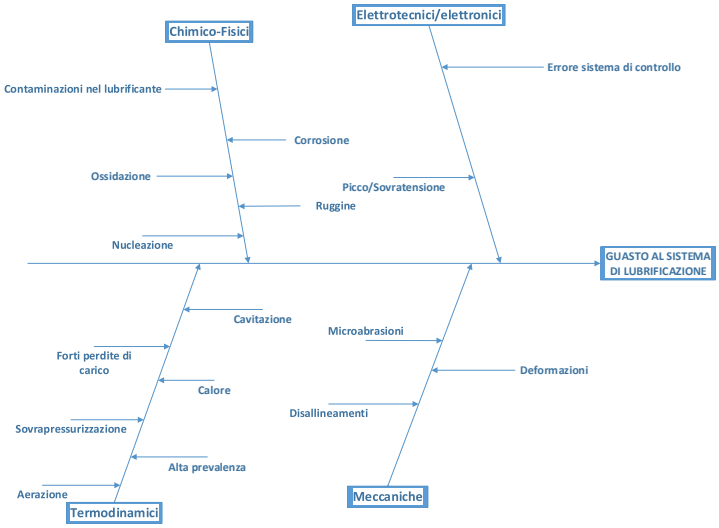


Figura 45:diagramma di Ishikawa per sistema di raffreddamento

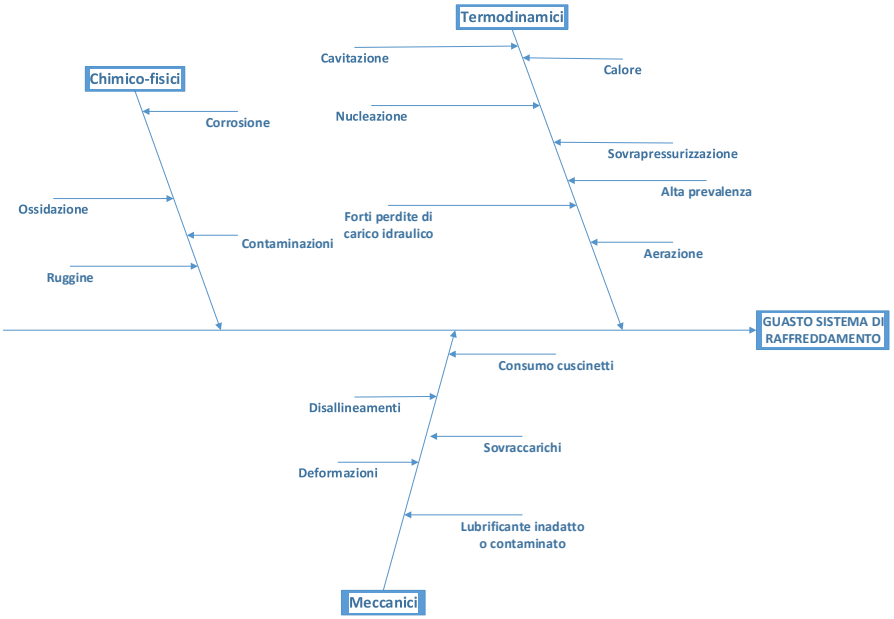


Figura 46:diagramma di Ishikawa per sistema elettrico e CNC

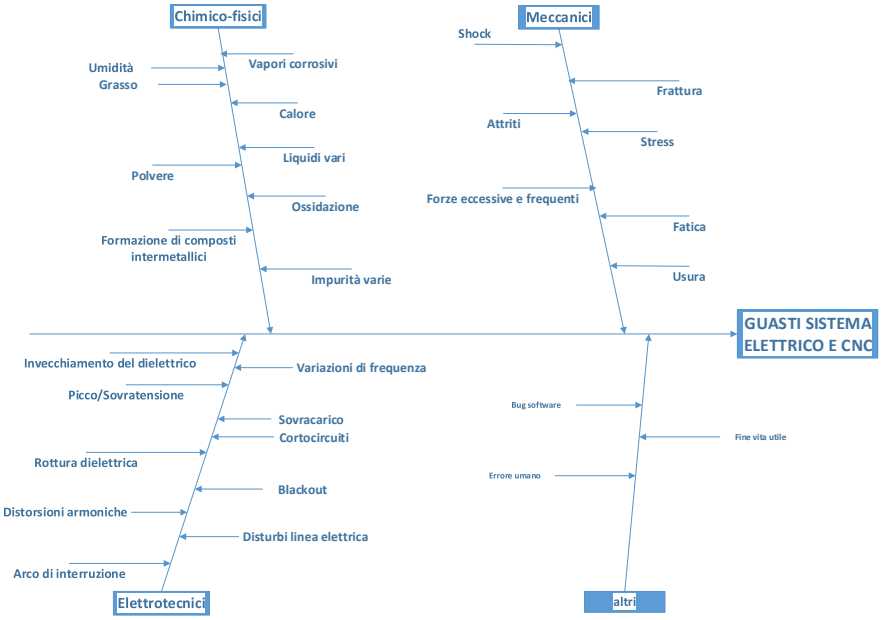


Figura 47: diagramma di Ishikawa per sistema meccanico

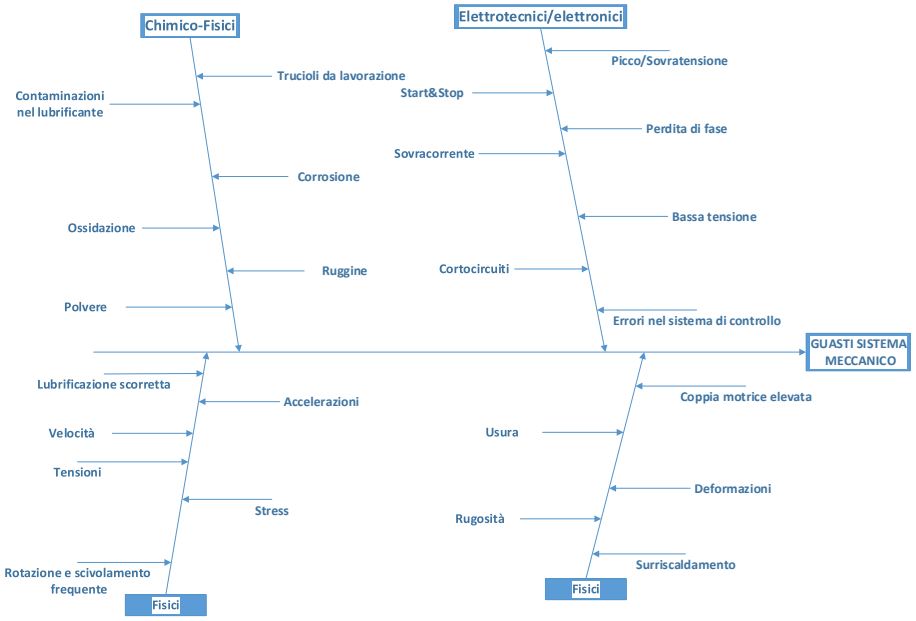


Figura 48:diagramma di Ishikawa per sistema di cambio-utensile

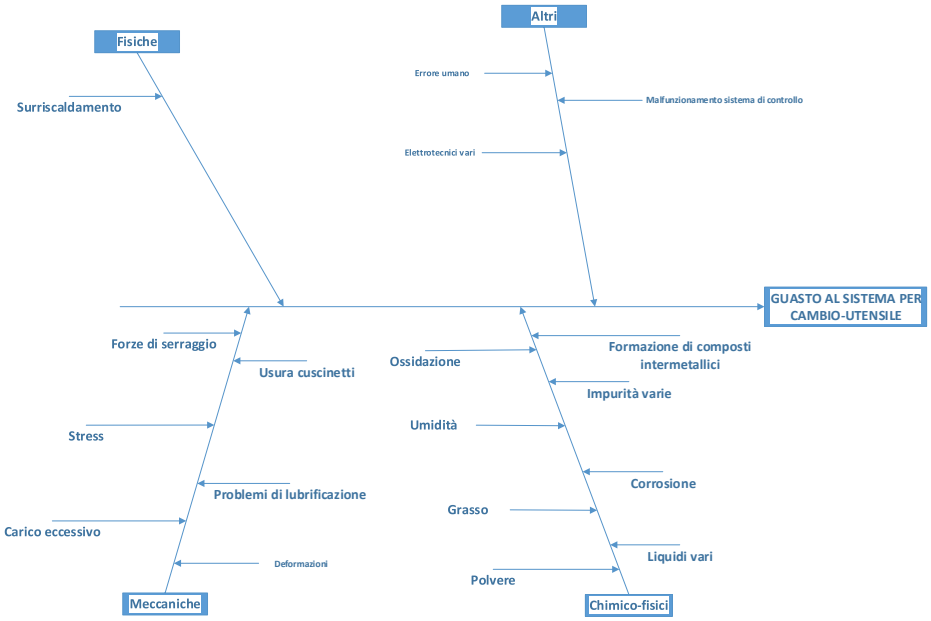
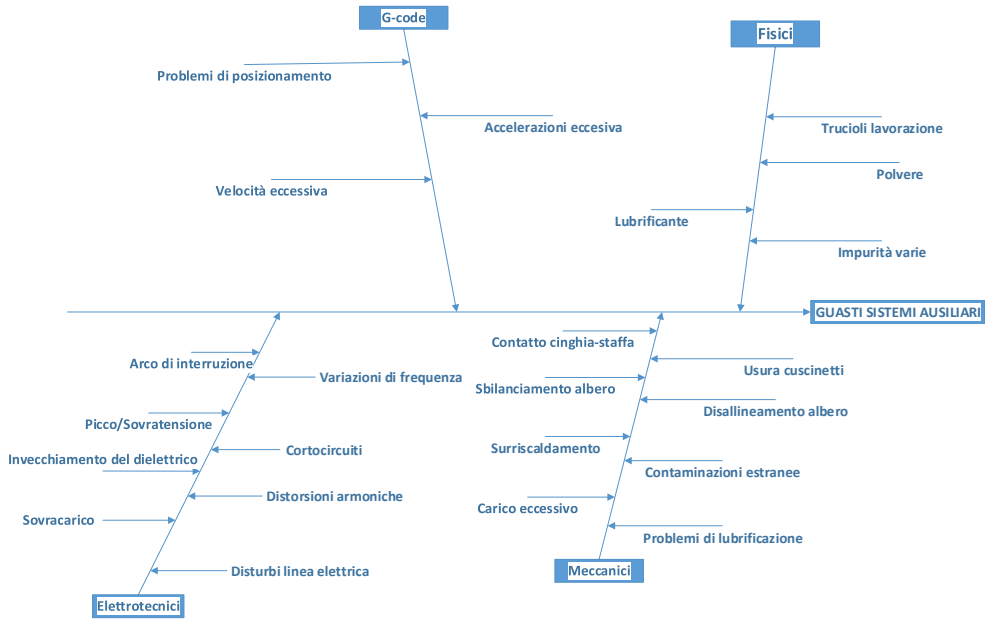


Figura 49:diagramma di Ishikawa per altri sistemi ausiliari



APPENDICE C: Tabelle FMEA

Nel seguito sono riportate le tabelle delle scale degli indici (S, O, D) e le worksheets complete di ciascun sottosistema adoperate nell'applicazione della FMEA alla fresatrice.

Tabella 4: scala dell'indicatore S

Descrizione	Rank
Il guasto può mettere in pericolo l'operatore senza alcun preavviso.	10
Il guasto può mettere in pericolo l'operatore con qualche preavviso.	9
Il guasto può mettere in pericolo la fresatrice,senza preavviso. Necessario demolire la macchina utensile.	8
Il guasto può mettere in pericolo la fresatrice con qualche preavviso. Necessari consistenti interventi di manutenzione per ristabilire lo stato dell'intero sistema. Costo di manutenzione e perdita di produzione sono molto alti.	7
Perdita della funzione principale del sottosistema/componente. Gli obiettivi di produzione non sono raggiunti. Costo di manutenzione e perdita di produzione alti.	6
Riduzione delle funzioni principali del sottosistema/componenti. Gli obiettivi di produzione non sono raggiunti. Costo di manutenzione medio.	5
Il componente richiede interventi o modifiche consistenti. Possibili scarti di produzione. Costo di manutenzione moderato.	4
Il componente richiede una manutenzione ridotta/minima. Gli obiettivi di produzione vengono ugualmente raggiunti. Costo di manutenzione basso.	3
Lieve guasto che ha piccole ripercussioni sull'intero sistema. Gli obiettivi di produzione vengono ugualmente raggiunti. Costo di manutenzione basso.	2
Guasto che non ha nessuna ripercussione sull'intero sistema.	1

Tabella 5: scala dell'indicatore O

Descrizione	Rank
Molto frequente: il verificarsi del guasto è quasi inevitabile	10-9
Frequente: i guasti si verificano ripetutamente e sono aspettati	8-7
Occasionale: i guasti previsti sono occasionali	6-5-4
Remoto: i guasti previsti sono relativamente pochi e non ci si aspetta la ripetizione del guasto	3-2
Improbabile: il verificarsi del guasto è un evento raro	1

Tabella 6: scala dell'indicatore D

Descrizione	Rank
Quasi certo: l'attuale metodo/sistema di monitoraggio rileva quasi sempre il guasto	1
Molto probabile: l'attuale metodo/sistema di monitoraggio rileva con alta probabilità l'esistenza dell'errore	2-3
Moderato: l'attuale metodo/sistema di monitoraggio probabilmente è in grado di rilevare il guasto	4-5-6
Basso: l'attuale metodo/sistema di monitoraggio ha poche probabilità di rilevare il guasto	7-8-9
Nullo: l'attuale metodo/sistema di monitoraggio non ha nessuna possibilità di rilevare il guasto	10

Tabella 7: Worksheet FMEA per sistema idraulico

SOTTOSISTEMA	COMPONENTE	Failure mode	Failure effect	Failure cause	Tecnica di ispezione	S	O	D	RPN	RPN normalizzato
Sistema idraulico	Motore idraulico	Consumo cuscinetti	Rumore anomalo, accumulo di calore, vibrazioni	Lubrificazione inadatta, Carico statico eccessivo	Messaggio di allarme surriscaldamento	5	3	2	30	0,21
		Guasti negli avvolgimenti	Surriscaldamento, mancata accensione motore	Contaminazioni, squilibri di tensione, carichi eccessivi	Messaggio di allarme	4	6	2	48	0,33
	Tubi	Perdita	Aumento consumi liquidi	Crepe, allentamento giunture	Visive	3	1	4	12	0,08
	Tanica	Perdita	Aumento consumi liquidi	Crepe, ruggine, saldatura impropria	Visive, monitoraggio livello liquido	4	1	5	20	0,14
	Pompa idrulica	Brinellatura dei cuscinetti	Rumore eccessivo, aumento consumi energetici	Lubrificazione scorretta, cuscinetti consumati	Attenzione sui rumori	4	2	4	32	0,22
		Bloccaggio filtri	Rilascio contaminanti, ricircolo olio non filtrato	Presenza di materiali contaminanti, temperature elevate	Informazioni pressione lette dal manometro	3	2	3	18	0,13
		Danneggiamento delle giranti	Variazione del flusso	Cavitazione della pompa	Visive, indicatori di pressione	2	1	5	10	0,07
		Difficoltà ad operare nelle elettrovalvole (apertura/chiusura)	Fuoriuscita anomala dei liquidi	Presenza di materiali contaminanti, temperature elevate	Visiva, informazioni pressione lette dal manometro, messaggi di allarme, rumore	4	5	3	60	0,42

Tabella 8: Worksheet FMEA per sistema di lubrificazione

SOTTOSISTEMA	COMPONENTE	Failure mode	Failure effect	Failure cause	Tecnica di ispezione	S	O	D	RPN	RPN norm
Sistema di lubrificazione	Canale di distribuzione principale	Perdita	Aumento consumi liquidi	Crepe, allentamento giunture	Visive	3	1	4	12	0,08
	Motore per lubrificazione	Guasto agli avvolgimenti	Riscaldamento	Squilibri di tensione carichi eccesivi	Messaggio di allarme di riscaldamento	6	4	2	48	0,33
		Brinellatura dei cuscinetti	Rumore eccessivo, aumento consumi energetici	Lubrificazione scorretta, cuscinetti consumati	Attenzione sui rumori	4	2	5	40	0,28
	Mixer	Perdita olio	Lubrificazione impropria	Ingresso di trucioli e sostanze corrose	Visiva, monitoraggio lubrificante	5	3	2	30	0,21
	Unità d'uscita finale	Ugello intasato	Lubrificazione impropria	Ingresso di trucioli e sostanze corrose	Messaggi di allarme, indicatori di pressione olio	6	3	1	18	0,13
	Tanica	Perdita olio	Aumento consumi di lubrificante	Presenza di impurità esterne, formazione di ruggine	Visiva, monitoraggio lubrificante	3	1	4	12	0,08

	Canale di ditribuzione assi X,Y,Z	Perdita	Aumento consumi liquidi	Crepe, allentamento giunture	Visive	3	1	4	12	0,08
	Pompa per grasso	Ostruzione dei filtri di aspirazione	Cavitazione della pompa	Presenza di impurità esterne	Visive, indicatori di pressione olio	2	1	5	10	0,07
		Brinellatura dei cuscinetti	Rumore eccessivo, aumento consumi energetici	Lubrificazione scorretta, cuscinetti consumati	Attenzione sui rumori	4	2	4	32	0,22
		Danneggiamento delle giranti	Variazione del flusso	Cavitazione della pompa	Visive, indicatori di pressione olio	2	1	5	10	0,07
		Bloccaggio filtro di dosaggio	Lubrificazione insufficiente o eccessiva	Polvere, contaminazioni esterne	Smontaggio periodico	6	2	2	24	0,17
		Ugello bloccato	Lubrificazione impropria	Ingresso di trucioli e sostanze corrose	Messaggi di allarme, indicatori di pressione grasso	7	2	1	14	0,10
	Separatore	Bloccaggio canali	Lubrificazione impropria	Ingresso di trucioli e sostanze corrose	Smontaggio periodico	6	1	3	18	0,13

Tabella 9: Worksheet FMEA per sistema di raffreddamento

SOTTOSISTEMA	COMPONENTE	Failure mode	Failure effect	Failure cause	Tecnica di ispezione	S	O	D	RPN	RPN norm
Sistema di raffreddamento	Motore	Guasti negli avvolgimenti	Surriscaldamento, mancata accensione motore	Contaminazioni, squilibri di tensione, carichi eccessivi	Messaggio di allarme	6	1	3	18	0,13
		Guasti ai cuscinetti	Rumore eccessivo	Lubrificazione scorretta, cuscinetti consumati	Attenzione sui rumori del motore	8	3	2	48	0,33
	Pompa per raffreddamento	Bloccaggio filtri	Rilascio contaminanti, flusso anomalo	Presenza di materiali contaminanti, temperature elevate	Informazioni pressione lette dal manometro, smontaggio periodico	2	1	5	10	0,07
		Brinellatura dei cuscinetti	Rumore eccessivo, aumento consumi energetici	Lubrificazione scorretta, cuscinetti consumati	Attenzione sui rumori	4	2	4	32	0,22
		Danneggiamento delle giranti	Variazione del flusso	Cavitazione della pompa	Visive, indicatori di pressione	2	1	5	10	0,07
		Riscaldamento	Pressione di esercizio inesatta	Operazioni a secco, usura dei filtri	Messaggi di allarme, valori letti dal manometro	6	3	3	54	0,38
	Canali per assi rotativi	Perdita	Aumento consumi liquidi	Crepe, ruggine, saldatura impropria, giunti lenti, cavitazione	Visive, monitoraggio livello liquido	3	5	4	60	0,42
	Canali per mandrino	Perdita	Aumento consumi liquidi	Crepe, ruggine, saldatura impropria, giunti lenti, cavitazione	Visive, monitoraggio livello liquido	3	5	4	60	0,42
	Canali per assi lineari	Perdita	Aumento consumi liquidi	Crepe, ruggine, saldatura impropria, giunti lenti, cavitazione	Visive, monitoraggio livello liquido	3	5	4	60	0,42
	Tanica	Perdita	Aumento consumi	Crepe, ruggine,	Visive, monitoraggio	4	1	7	28	0,19

			liquidi	saldatura impropria, giunti lenti, cavitazione	livello liquido						

Tabella 10: Worksheet FMEA per sistema elettrico e di controllo

SOTTOSISTEMA	COMPONENTE	Failure mode	Failure effect	Failure cause	Tecnica di ispezione	S	O	D	RPN	RPN norm
Sottosistema CNC ed elettrico	Display	Nessuna visualizzazione	Assenza di informazioni sulla lavorazione o sulla fresatrice	Guasti collettori o prese, guasto ai LED, bug nei programmi interni, errore umano	Visiva	6	2	1	12	0,10
		Visualizzazione inesatta	Imprecisione di informazioni sullo stato della macchina	Schermo danneggiato, guasto ai LED o alla scheda madre, bug nei programmi interni	Visiva	6	2	1	12	0,10
	Tastiera	Battitura impossibilitata	Impossibilità di visualizzare informazioni sulla lavorazione	Tasti danneggiati, touch non funzionante, errore umano	Visiva	5	2	2	20	0,17
	Real time CPU	Peggioramento o arresto delle performance del controllo	Blocco/rallentamento dell'intero sottosistema,	Riscaldamento, tensioni inesatte, accumulo polvere	Messaggi di allarme, Constatazione in fase di utilizzo	7	2	2	28	0,23
	Scheda madre	Schermata nera, Visualizzazione inesatta	Blocco dell'intero sottosistema	Riscaldamento, tensioni inesatte, accumulo polvere	Constatazione in fase di utilizzo	9	2	2	36	0,30

	Windows CPU	Peggioramento o arresto delle performance del controllo	Blocco dell'intero sottosistema	Riscaldamento, tensioni inesatte, accumulo polvere	Messaggi di allarme Constatazione in fase di utilizzo	8	2	2	32	0,27
	Modulo IO	Errore di allarme	Arresto intero sistema	Cortocirucuiti, sovratensioni	Messaggi di allarme	7	2	4	56	0,47
	Cavi retroazione	Cortocircuito o bruciati	Guasto del relativo sistema di controllo, rapidi movimenti trasversali degli assi	Riscaldamento, tensioni inesatte, polvere	Messaggi di allarme	3	3	6	54	0,45
	Driveboard X,Y,Z,A,C,ATC,SP	Messaggi di warning	Si può arrestare l'avanzamento dell'asse,	Errori nella scheda di controllo	Messaggi di allarme	8	2	2	32	0,27
	Potenziometro mandrino	Risposta insufficiente al comando	Differenze dei parametri dal G-code sorgente	Presenza di impurità (umidità, olio)	Messaggi di allarme	6	3	2	36	0,30
	Potenziometro avanzamento	Risposta insufficiente al comando	Differenze dei parametri dal G-code sorgente	Presenza di impurità (umidità, olio)	Messaggi di allarme	6	3	2	36	0,30
	MicroswitchX,Y,Z,	Movimenti impropri dell'asse	Mancato avvio/fermata asse X, extracorsa, collisione	Uso continuo, raggiungimento fine vita, guasto del cavo di alimentazione, contaminazioni, umidità	Messaggi di allarme, visiva	5	2	3	30	0,25
	Encoder X,Y,Z,A,C	Mancata codifica	Info errate sui parametri di lavorazione, perdita dell'accuratezza desiderata, errori di posizione	Fatica, invecchiamento, presenza di materiali estranei, settaggio errato del guadagno	Messaggi di allarme	5	1	5	25	0,21
	Sensori asta mandrino	Errori di	Errori nelle velocità di	Fine vita utile, polvere,	Mancato	5	1	5	25	0,21

	accoppiamento	avanzamento e di rotazione	accoppiamento lasco	azionamento mandrino Messaggi di allarme					
DriverPowerX,Y,Z,A,C,ATC,SP	Cortocircuito	Arresto asse X	Sovracorrenti, svratensioni	Messaggi di allarme	6	3	3	54	0,45
Contattori	Mancato funzionamento	Mancato avvio/fermata del sistema di livello superiore	Ossidazione, sovra tensioni, polvere	Messaggi di allarme, bloccaggio	3	4	3	36	0,30
Solenoidi	Surriscaldamento bobina	Problemi di start&stop per i sottosistemi di cui fanno parte	Inceppamenti meccanici, dissipazione calore non sufficiente	Messaggi di allarme	3	2	3	18	0,15
Cavi di alimentazione	Nessuna tensione in uscita	Arresto dei relativi sistemi	Guasto nell'unità di alimentazione principale, variazioni di tensione	Visiva, constatazione in fase d'uso	4	1	2	8	0,07
Relais	Mancato funzionamento	Mancato avvio/fermata del circuito in cui sono collocati	Polvere, fatica, danni agli elementi di commutazione	Messaggi di allarme	4	3	2	24	0,20
Batterie	Esaurimento dell'energia	Non funzionameto dei sensori	Malfunzionamento alle batterie, cicli vita utile finiti	Messaggi di pre-avviso	3	3	1	9	0,08
Trasformatori	Nessuna tensione in uscita	Arresto sistema o sottosistema	Surriscaldamento	Messaggi di allarme	4	3	2	24	0,20
Inverter	Corrente in uscita non desiderata	Arresto del componente su cui agiscono	Uso continuo, raggiungimento fine vita, contaminazioni,umidità	Messaggio di allarme	6	3	1	18	0,15

Tabella 11: Worksheet FMEA per sistema meccanico

SOTTOSISTEMA	COMPONENTE	Failure mode	Failure effect	Failure cause	Tecnica di ispezione	S	O	D	RPN	RPN norm
Sistema meccanico	Motore 1 (assi lineari)	Guasto agli avvolgimenti	Riscaldamento	Squilibri di tensione carichi eccesivi	Messaggio di allarme di riscaldamento	6	4	2	48	0,33
		Disallineamento o flessione albero	Rumore anomalo, vibrazioni	Carichi eccessivi	Messaggio di allarme da controllo trasmissione	5	4	2	40	0,28
		Eccentricità rotore-statore	Rumore anomalo, vibrazioni, riscaldamento	Usura parte finale dell'albero	Messaggio di allarme di riscaldamento	4	4	2	32	0,22
		Consumo cuscinetti	Rumore anomalo, accumulo di calore, vibrazioni	Lubrificazione inadatta, Carico statico eccessivo	Messaggio di allarme surriscaldamento	6	4	3	72	0,50
	Motore2 (assi lineari)	Guasto agli avvolgimenti	Riscaldamento	Squilibri di tensione carichi eccesivi	Messaggio di allarme di riscaldamento	6	4	2	48	0,33
		Disallineamento o flessione albero	Rumore anomalo, vibrazioni	Carichi eccessivi	Messaggio di allarme da controllo trasmissione	4	3	5	60	0,42
		Consumo cuscinetti	Rumore anomalo, accumulo di calore, vibrazioni	Lubrificazione inadatta, Carico statico eccessivo	Messaggio di allarme surriscaldamento	6	4	3	72	0,50

	Guide assi lineari	Extra corsa	Impatto, imprecisione movimenti	Disallineamento, lubrificazione, contaminazione cuscinetti, accelerazione o velocità eccessiva	Messaggio di allarme	7	3	3	63	0,44
		Corsa ruvida	Rumore anomalo, accumulo di calore, vibrazioni	Disallineamento, lubrificazione, contaminazione cuscinetti, accelerazione o velocità eccessiva	Visuale, monitoraggio rumore	7	3	3	63	0,44
	Cinghia di trasmissione assi lineari	Usura	Emissione rumori e vibrazioni	Lubrificazione inadatta, Carico statico eccessivo, movimento di avanzamento troppo frequente, tensionamento inadatto	Messaggio di allarme, monitoraggio rumore	4	1	5	20	0,14
		Surriscaldamento, Sfregamento	Rumore anomalo, accumulo di calore, vibrazioni	Disallineamento puleggie, rottura cinghie	Controllo dei giri/min.	4	1	5	20	0,14
	Pulegge	Vibrazioni, rumore	Rottura cinghie	Carichi eccessivi	Monitoraggio rumore	4	1	5	20	0,14
	Pignone-Cremagliera	Danneggiamento ingranaggi	Disallineamenti, chatter, rugosità del pezzo	Pitting, scuffing , usura, abrasioni , deformazioni	Visiva	4	4	9	144	1,00
	Protezioni telescopiche	Rottura	Pericolo operatore	Spostamenti errati	Visiva	2	1	8	16	0,11
	Motore assi rotativi	Guasto agli avvolgimenti	Riscaldamento	Squilibri di tensione carichi eccesivi	Messaggio di allarme di riscaldamento	6	4	2	48	0,33
		Disallineamento o flessione albero	Rumore anomalo, vibrazioni	Carichi eccessivi	Messaggio di allarme da controllo	4	3	5	60	0,42

					trasmissione					
		Consumo cuscinetti	Rumore anomalo, accumulo di calore, vibrazioni	Lubrificazione inadatta, Carico statico eccessivo	Messaggio di allarme surriscaldamento	6	4	3	72	0,50
	Gruppo cuscinetti assi rotativi	Brinellatura dei cuscinetti	Riscaldamento	Contatto eccessivo	Monitoraggio rumore	6	4	3	72	0,50
	Motore mandrino	Consumo cuscinetti	Rumore anomalo, accumulo di calore, vibrazioni, cambi di direzione mandrino	Lubrificazione inadatta, Carico statico eccessivo	Messaggio di allarme surriscaldamento	7	5	3	105	0,73
	Gruppo cuscinetti	Vibrazioni, rumore	Riscaldamento	Contatto eccessivo, tensione della cinghia eccessiva	Monitoraggio rumore	7	5	3	105	0,73
	Drawbar	Fluttuazioni	Inaccuratezza lavorazioni	Tensione della cinghia troppo bassa	Visiva, accorgimenti in fase di lavorazione	4	6	4	96	0,67
		Guasto al filo	Movimento improprio assi	Fatica eccessiva	Visiva, accorgimenti in fase di lavorazione	4	6	4	96	0,67
	Cinghia di trasmissione mandrino	Rottura cinghia	Arresto mandrino	Tensione elevata, carichi eccessivi	Messaggio di allarme	6	3	2	36	0,25
		Surriscaldamento, Sfregamento	Rumore anomalo, accumulo di calore, vibrazioni	Disallineamento puleggie, rottura cinghie, tensione inadatta	Controllo dei giri/min.	6	3	3	54	0,38
	Kit pinze (parte finale)	Vibrazioni da taglio	Inaccuratezza lavorazioni, chatter	Allentamento viti, corrosione, parametri lavorazione	Monitoraggio rumore, ispezione pezzi	6	5	4	120	0,83
		Usura, rigatura	Vibrazioni, rumore	Parametri lavorazione inadatti	Visiva, sistema di controllo	5	2	4	40	0,28

Tabella 12: Worksheet FMEA per sistema cambio-utensile

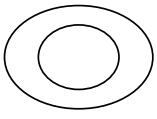
SOTTOSISTEMA	COMPONENTE	Failure mode	Failure effect	Failure cause	Tecnica di ispezione	S	O	D	RPN	RPN norm
Sottososistema per cambio-utensile	Motore TC	Velocità di rotazione inadatta	Contatto tra le parti in movimento	Sovrariscaldamento del riduttore per cambio velocità, interruttori di comando danneggiati	Monitoraggio rumori	6	4	2	48	0,33
		Consumo cuscinetti	Rumore anomalo, accumulo di calore, vibrazioni	Lubrificazione inadatta, Carico statico eccessivo, cuscinetti consumati	Messaggio di allarme surriscaldamento, rumore proveniente dai motori	3	5	2	30	0,21
	Kit pinze TC	Deformazione delle parti meccaniche	Lavorazione errata	Stress, tensioni eccessive dovute a piccole forze di serraggio	Visiva	5	3	4	60	0,42
		Errore nel cambio utensile	Lavorazione errata	Guasto al sistema di controllo TC, errore umano	Visiva	5	3	3	45	0,31
	Porta utensile	Allentamento delle parti di bloccaggio	Lavorazione errata	Guasto al sistema di controllo TC, errore umano	Visiva	6	2	3	36	0,25
	Magazzino utensili	Rotazione non raggiunge la giusta posizione	Collocamento utensili inesatto	Guasto al sistema di controllo TC	Visiva	7	2	2	28	0,19

	Riduttore cambio velocità	Velocità di rotazione inadatta, bloccaggio, mancato arresto	Contatto tra le parti in movimento	Sovrariscaldamento, interruttori di comando danneggiati	Monitoraggio rumori	7	4	2	56	0,39

APPENDICE D: Modello dei legami

Nel seguito sono riportati la legenda del linguaggio grafico che è stato necessario formalizzare, e delle variabili adoperate per sviluppare il modello dei legami. Sono poi presentati i grafici relativi al modello sviluppato per il sistema di azionamento pignone-cremagliera, che lega tra esse tutte le variabili coinvolte nel verificarsi del guasto. Per ciascun grafico è inoltre riportata una tabella che schematizza le formule matematiche o le relazioni empiriche presentate nel modello (con la relativa fonte).

Tabella 13: legenda dei simboli adoperati per sviluppare il modello

Simbolo	Significato
	Grandezza fisica misurabile e quantificabile
	Grandezza fisica misurabile e quantificabile, la cui evoluzione può essere registrata, e che come risultato del modello è ritenuta significativa da monitorare
	Grandezza fisica misurabile, quantificabile, su cui si può intervenire direttamente o indirettamente, e sulla quale si deve agire, come risultato del modello, per apportare delle azioni correttive
	Vi è riportata all'interno l'espressione della relazione matematica, che lega le grandezze in ingresso, fornendo un'altra grandezza in uscita
	Similmente ai modelli "black box" di teoria dei sistemi, si conoscono le variabili in ingresso e quelle in uscita, ma il funzionamento interno rimane ignoto(non si conosce la relazione matematica)
	E' un parametro qualitativo ritenuto rilevante, non una grandezza fisica
	Grandezza fisica misurabile e quantificabile, che è analizzata nel dettaglio in un altro sottomodello, poiché dipendente da altre variabili
	Collega le variabili (grandezze fisiche o parametri qualitativi) alle espressioni in cui sono dei determinanti

Partendo dalla cinematica degli assi, è stata sviluppata la prima parte del modello, che si focalizza principalmente sulle grandezze fisiche proprie del sistema pignone-cremagliera, che influenzano il movimento, e sulle grandezze caratteristiche dei motori elettrici, i cui dati possono essere raccolti.

Tabella 14: legenda dei parametri rilevanti del modello per pignone-cremagliera

Simbolo	*Grandezza fisica/Parametro qualitativo*	Unità di misura
a	*accelerazione dell'asse*	m/s^2
v	*velocità di scorrimento dell'asse*	*m/s*
p	*posizione dell'asse*	*m*
Δp	*errore di posizione (differenza di posizione, letta dal CNC)*	*m*
τ_m	*rapporto di trasmissione*	
α_s	*accelerazione angolare dell'albero motore*	rad/s^2
r_p	*raggio del pignone*	*m*
j	*jerk*	m/s^3
T_m	*coppia motrice prodotta dal motore elettrico*	*N·m*
k_T	*costante di coppia del motore elettrico*	
$T_{m,\alpha}$	*coppia motrice aggiuntiva per imprimere un'accelerazione al carico*	*N·m*
p	*passo della cremagliera*	*m*
z	*numero di denti del pignone*	
η	*efficienza del sistema di trasmissione*	
m_z	*massa della cremagliera*	*kg*
m_L	*massa del carico*	*kg*
J_{in}	*momento d'inerzia degli input (motore, encoder, ecc…)*	$kg·m^2$

J_p	*momento d'inerzia del pignone*	*kg·m²*
$\Delta\omega_m$	*variazione della velocità di rotazione del motore*	*rad/s*
$\Delta\varphi_{in}$	*errore di posizione*	*m*
Δs_L	*gioco meccanico*	*rad*
Precarico	*precarico applicato come percentuale della coppia normale*	*N·m*
T_{motor}	*temperatura raggiunta dal motore elettrico durante la lavorazione*	*°C*
I	*intensità di corrente del motore*	*A*
P	*Potenza erogata dal motore*	*W*
T_r	*Coppia resistente risultante, cui si oppone la coppia motrice*	*N·m*
F_a	*forze d'attrito tra gli ingranaggi in contatto*	*N*
F_c	*forze di taglio*	*N*

Figura 50:modello per pignone-cremagliera con parametri dei motori elettrici, parametri propri di pignone e cremagliera e grandezze cinematiche legate alla movimentazione degli assi

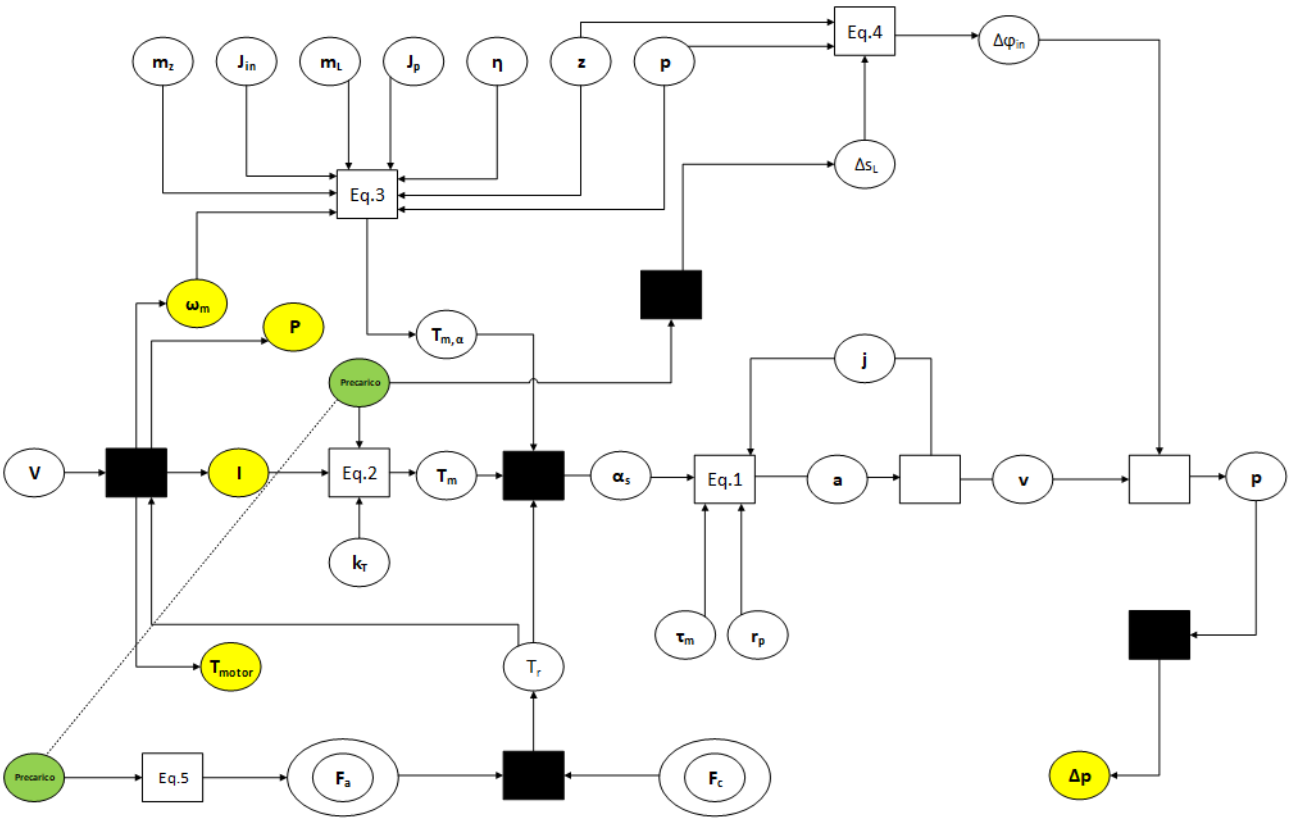


Tabella 15: equazioni adoperate nella prima parte del modello per pignone-cremagliera

Espressione	*Fonti*
Equazione 1 $$a = \alpha_s \cdot r_p \cdot \tau_m$$	[30]
Equazione 2 $$T_m = k_T \cdot I$$	[39]
Equazione 3 $$T_{m,\alpha} = \left(J_{in} + J_p + \frac{(m_L + m_Z)}{\eta} \frac{p^2 z^2}{4\pi^2} \right) \left(\frac{\pi}{30}\right) \frac{\Delta\omega_m}{\Delta t_a}$$	[32]
Equazione 4 $$\Delta\varphi_{in} = \Delta s_L \frac{2\pi}{p z}$$	[32]
Equazione 5 Relazione lineare empirica	[34]

Essendo tra i principali determinanti dei fenomeni di usura, le forze d'attrito sono poi analizzate nel dettaglio, in un ulteriore sottomodello.

Tabella 16 : legenda dei parametri determinanti le forze di attrito

Simbolo	Grandezza fisica/Parametro qualitativo	Unità di misura (SI)
σ	rugosità superficiale composta	*µm*
h_{min}	spessore minimo di lubrificante applicabile	*µm*
λ	rapporto di spessore del film di lubrificante applicato tra gli ingranaggi	
υ	indice di viscosità del lubrificante	*PI (Pa·s)*
p	pressione di esercizio del lubrificante	*Pa*
T_{pc}	temperatura di contatto tra gli ingranaggi	*°C*
T_b	bulk temperature	*°C*
T_f	flash temperature	*°C*
cont	presenza di contaminazioni tra le parti in contatto	
T_s	temperatura critica di Blok	*°C*
μ_D	coefficiente di attrito dinamico	
μ_s	coefficiente di attrito statico	
f_i	contributo delle asperità alle forze normali	*N*
F_N	forze normali	*N*
vib	vibrazioni generate in fase di utilizzo	
rum	rumore generato in fase di utilizzo	*dB*
V	volume del materiale rimosso per usura	m^3
s	distanza di scorrimento tra le due parti	*m*
k	coefficiente adimensionale di usura	
W	carico di compressione tra le superfici	*N*
H	durezza delle superfici di contatto	*Scala adoperata*
k_s	rigidità statica degli organi di trasmissione	*N/m*
ε	spostamento/allungamento dovuto alle proprietà elastiche	*m*

Figura 51: modello per determinare le forze d'attrito

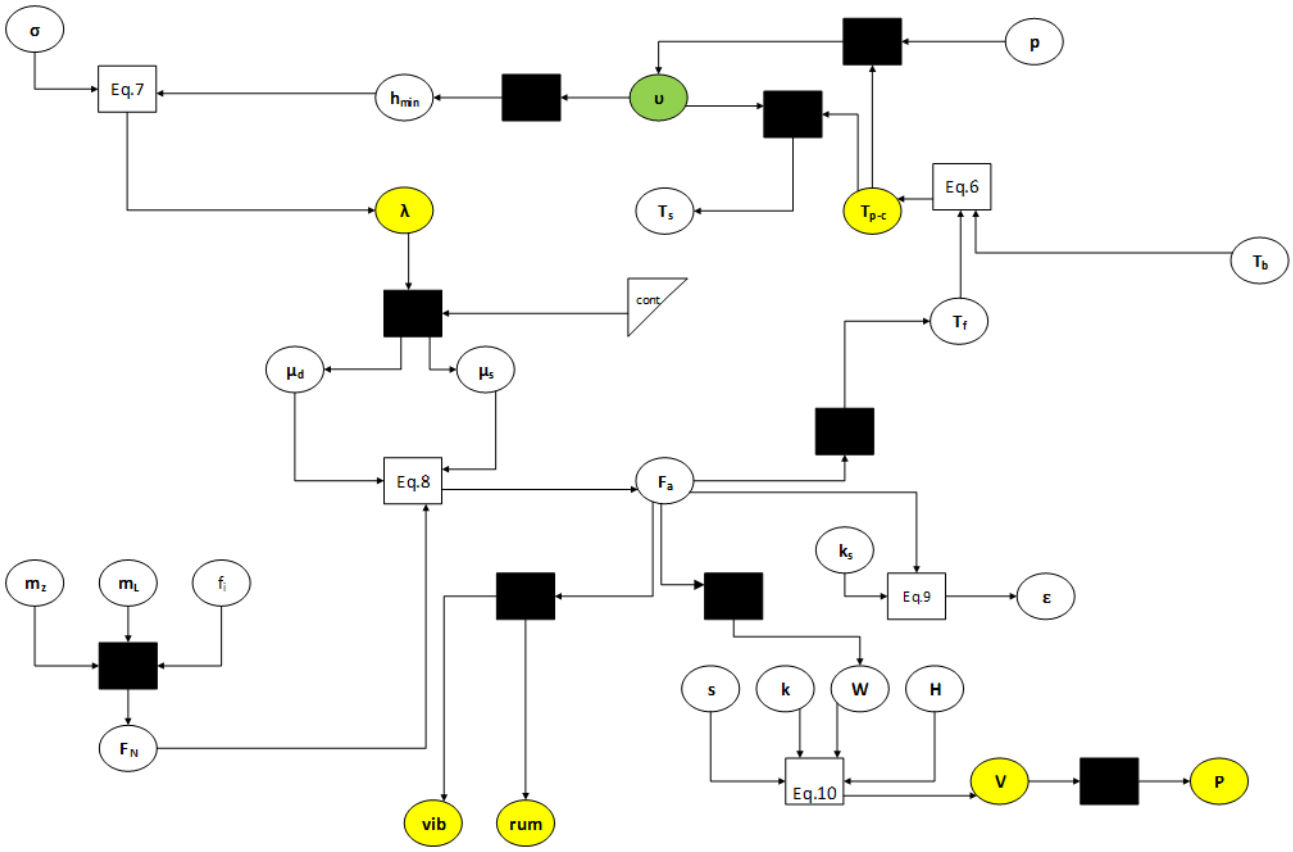


Tabella 17: equazioni adoperate per determinare le forze d'attrito

Espressione	*Fonti*
Equazione 6 $T_{pc} = T_b + T_f$	[35]
Equazione 7 $\lambda = \frac{h_{min}}{\sigma}$	[35]
Equazione 8 $\mathrm{F_a} = \mu \cdot \mathrm{F_N}$	
Equazione 9 $\varepsilon = \frac{\mathrm{F_a}}{\mathrm{k_s}}$	[34]
Equazione 10 $\frac{V}{s} = K \cdot \frac{W}{H}$	[33]

Oltre alle forze di attrito che si sviluppano tra pignone e cremagliera, anche le forze di taglio sviluppate durante la lavorazione contribuiscono in parte alla presenza della coppia resistente.

Tabella 18: parametri determinanti delle forze di taglio

Simbolo	*Grandezza fisica/Parametro qualitativo*	*Unità di misura (SI)*
k_s	costante dell'energia specifica di taglio	
d_c	profondità di taglio	*mm*
f	*avanzamento*	*mm*
u	*costante dipendente dalle condizioni di lavorazione*	
v_f	velocità di avanzamento	*mm/min.*
N	*velocità di rotazione del mandrino*	*giri/min.*
D_t	diametro dell'utensile da taglio	*mm*
v_c	velocità di taglio	*m/min.*
z_t	numero di denti dell'utensile da taglio	
T_w	temperatura del workpiece	*°C*
γ_t	angolo di spoglia	°
t_t	materiale dell'utensile da taglio impiegato	
s_t	strategia di taglio adoperata	
ρ_r	densità del refrigerante	kg/m^3
C_r	capacità termica del refrigerante	*J/K*
f_r	frequenza applicazione refrigerante	
F_c	forze di taglio	*N*

Figura 52 modello per determinare le forze di taglio prodotte in fase di lavorazione

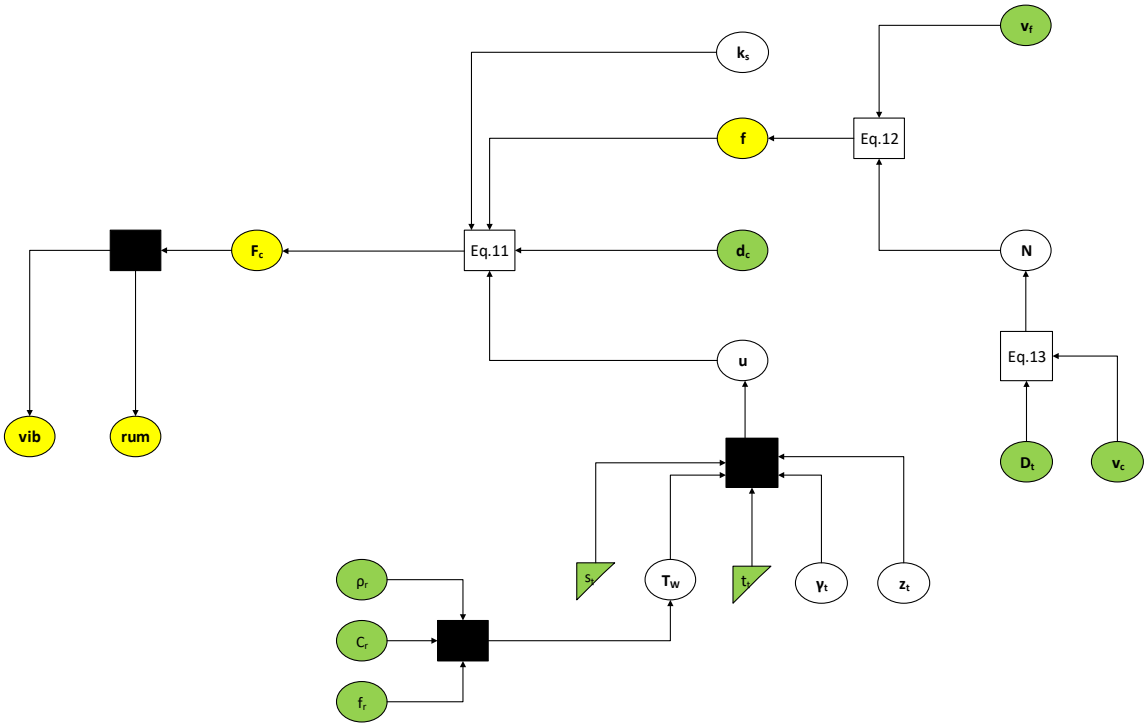


Tabella 19: equazioni adoperate per determinare le forze di taglio

Espressione	*Fonti*
Equazione 11 $$F_C = k_s \cdot d_c \cdot f \cdot u$$	[37]
Equazione 12 $$f = \frac{v_f}{N}$$	[37]
Equazione 13 $$N = \frac{v_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_t}$$	[38]

Bibliografia e sitografia

[1] S. Selcuk, «Predictive maintenance, its implementation and latest trends,» 2017.

[2] R. K. Mobley, An introduction to predictive maintenance, 2002.

[3] Allied Market Research, Agosto 2019. [Online].

[4] R. P. ,. B. S. ,. F. M.-B. Burkhard Hoppenstedt, «Techniques and Emerging Trends for State of the Art Equipment Maintenance Systems-A Bibliometric Analysis,» *Applied Science,* 2018.

[5] T. P. Carvalho, «A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance,» *Computers & Industrial Engineering,* 2019.

[6] B. M. Daniel Frank Hesser, «Tool wear monitoring of a retrofitted CNC milling machine using artificial neural network,» *Manufacturing Letters,* 2018.

[7] A. Vijayakumar, «Exploratory Study On The Application Of IoT In CNC,» in *3rd IEEE International Conference on Computational Systems and Information Technology for Sustainable Solutions*, 2018.

[8] Sezer, «An Industry 4.0-enabled Low Cost Predictive: A Use Case Applied to a CNC Turning Centre,» 2018.

[9] Tuma, «Calculation Of Component Durability Based On Simulation Model,» 2019.

[10] V. Thoppil, «Failure Mode Identification and Prioritization Using FMECA: A Study on Computer Numerical Control Lathe for Predictive Maintenance,» *Journal of Failure Analysis and Prevention,* 2019.

[11] Yao, «Study on the Application of the Shock Model in Forecasting Residual Life of CNC System,» *Chemical Engineering Transactions,* 2013.

[12] Ahmed, «Condition Monitoring in the Management of Maintenance in a Large Scale Precision CNC Machining Manufacturing Facility,» in *2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Bali, Indonesia, 2012 .

[13] K. U. G. D. a. S. C. Parida A., «Performance measurement andmanagement for maintenance: a literature review,» 2015.

[14] I. A. Kans M., «Common database for cost-effective improvement of maintenance performance,» 2008.

[15] K. A.-A. &. A. K. A. M. N. J. &. I. Patel, «A predictive maintenance cost model for CNC SMEs in the era of industry 4.0,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* 2019.

[16] Z. Yang, «A New Failure Mode and Effects Analysis Model of CNC Machine Tool using Fuzzy Theory,» in *International Conference on Information and Automation*, Harbin, China, 2010.

[17] C. C. L. C. H. Tongtong Jin, «Failure Mode and Effects Analysis of CNC Machine Tools Based on SPA,» in *2nd International Conference on System Reliability and Safety*, 2017.

[18] A. D. A. E. C. D. Farshad Faezy Razi, «An FMEA analysis using grey theory and grey rough sets,» *Growing Science,* 2013.

[19] S. B. Ungureanu, «Reducing maintenance costs in agreement with CNC machine tools reliability,» in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016.

[20] G. P. N. D'Addea, Manuale di manutenzione industriale, 2005.

[21] Z. J.-q. W. F. Xie Dong, «Fuzzy PID Control To Feed Servo System of CNC Machine Tool,» *Procedia Engineering,* 2012.

[22] L. ,. Muzakkir, «Failure mode and effect analysis of journal bearing,» *International Journal of Applied Engineering Research,* 2015.

[23] R. Errichello, «How To Analyze Gear Failures,» *Practical Failure Analysis,* 2002.

[24] S. Y. Yabei Shi, «Fault analysis and treatment of CNC machine tool servo system,» *Applied Mechanics and Materials,* 2013.

[25] S. M. Z. W. Lin Guomin, «Study on Fault Diagnosis and Repair Strategy of CNC Machine Tool,» *Advanced Materials Research,* 2013.

[26] C.-h. C. F. C. Q.-b. H. B.-b. X. Zhao-jun Yang, «Reliability analysis of machining center based on the field data,» *Maintenance and Reliability,* 2013.

[27] J. B. A. H. S. Abdelkabir Bacha, «A CNC Machine Fault Diagnosis Methodology based on Bayesian Networks and Data Acquisition,» *Communications on Applied*

Electronics, 2016.

[28] L. A. M. a. P. M. L. A. M. Riascos, «Detection and Treatment of Faults in Manufacturing Systems Based on Petri Nets,» *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,* 2004.

[29] M. FERNEY, «Modelling and controlling product manufacturing systems using bond-graphs and state equations: continuous systems and discrete systems which can be represented by continuous models,» *PRODUCTION PLANNING & CONTROL,* 2000.

[30] Z. P. a. V. Dukovski, «COMPUTER AIDED DESIGN OF FEED DRIVES,» in *INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE*, Dubrovnik, 2002.

[31] Y. Z. S. W. Guoyong Zhao, «The Acceleration/Deceleration Control Algorithm Based on Trapezoid-Curve Jerk in CNC Machining,» *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology,* 2013.

[32] J. Braun, Formulae Handbook, Maxon Academy.

[33] S. A. Anders Flodin, «Simulation of mild wear in spur gears,» 1997.

[34] S. A. J. F. D. C. ,. A. L. Tim Engelberth, «Properties of electrically preloaded rack-and-pinion drives,» *German Academic Society for Production Engineering,* 2014.

[35] R. Errichello, «Friction, lubrication, and wear of gears,» 1992.

[36] A. A. S. N. M. M. D. M. H. Mahdi Sparham, «Cutting force analysis to estimate the friction force in linear guideways of CNC machine,» *Measurement,* 2016.

[37] J. L. D. R. S.-S. Y. Jorge Cubas, «Cutting Force Monitoring and Control System for CNC Lathe Machines,» in *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Banff, Alberta, Canada, 2016.

[38] [Online]. Available: https://www.sandvik.coromant.com/it-it/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx.

[39] [Online]. Available: https://electronics.stackexchange.com/questions/39387/how-are-current-and-voltage-related-to-torque-and-speed-of-a-brushless-motor.

[40] A.-A. e. al., «A predictive maintenance cost model for CNC SMEs in the era of industry 4.0,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,*

2019.

[41] P. R. E. Uhlmann, «Influences on specific cutting forces and their impact on the stability behaviour of milling processes,» *German Academic Society for Production Engineering,* 2011.

[42] A. Olsson, «Friction models and friction compensation,» *European journal of control,* 1998.