

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

**Sviluppo di un progetto di manutenzione preventiva per macchine
a controllo numerico: il caso studio LMA**



Relatore

Ch.mo Prof. Ing. Eugenio Brusa

Candidato

Vincenzo Campanale

Tutor Aziendale

Ing. Roberto Mancini

Anno Accademico 2019/2020

Sommario

La manutenzione degli *asset* (intese come risorse di tipo fisico) assume oggi un'importanza cruciale per l'affermazione di una realtà aziendale vincente. Sebbene spesso sia percepita come del tempo sottratto allo svolgimento del core business di un'azienda, l'attività di manutenzione può concorrere a determinare il successo o il fallimento della stessa, incidendo su molteplici aspetti: sulla maggior durata operativa di un bene, ovvero sul rispetto dei tempi di consegna degli articoli prodotti, nonché sull'immagine aziendale. Per tale ragione, un'adeguata progettazione della manutenzione risulta fondamentale. Questo lavoro di Tesi si pone l'obiettivo di proporre un progetto di manutenzione per le macchine CNC (*Computer Numerical Control*) a 5 assi presenti in LMA, un'azienda operante nell'ambito della meccanica di precisione per il settore aeronautico e aerospaziale. Partendo dall'introduzione dei concetti base del *Systems Engineering* e della RAMS (*Reliability, Availability, Maintainability, Safety*), necessari per una completa comprensione degli argomenti trattati, si è proceduto con la presentazione dello status "as is" della politica di manutenzione adottata dall'azienda, valutandone le prestazioni di carattere affidabilistico con i dati a disposizione. In seguito, con la FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*), strumento di analisi delle modalità di guasto ed effetti, e con le informazioni ricavate dallo studio dei manuali dei produttori delle macchine, si è proposto un progetto di manutenzione atto a migliorare il processo manutentivo aziendale nella sua totalità. Particolare attenzione è stata posta all'attività di manutenzione di tipo preventivo, di cui si sono illustrati pregi e limitazioni, ma che è la tipologia di manutenzione sicuramente da intraprendere per la maggior parte delle macchine a controllo numerico di una realtà attiva in un settore altamente competitivo. Riferimento costante per il lavoro sono state le normative europee e italiane in ambito manutentivo, che trattano il tema in ogni suo aspetto e fungono da guida anche per la progettazione della manutenzione stessa. I risultati finali sono

raccolti in delle schede di manutenzione redatte per la macchina esaminata, nelle quali sono elencate le azioni da intraprendere e le tempistiche da rispettare per un mantenimento ottimale delle condizioni operative.

INDICE

Sommario	3
Elenco acronimi.....	9
1 Introduzione	11
2 <i>Systems Engineering</i>	13
2.1 <i>Systems Engineering</i> e sistema	13
2.1.1 I quattro obiettivi del SE	14
2.1.2 I quattro capisaldi del SE	16
2.2 <i>System Model Language</i>	17
2.3 <i>Product Lifecycle Development</i>	19
2.3.1 <i>Waterfall Diagram</i>	19
2.3.2 <i>V-Diagram</i>	20
2.3.3 <i>Spiral Diagram</i>	21
2.4 Approfondimento sulla metodologia del <i>Systems Engineering</i>	22
2.4.1 Analisi funzionale (<i>functional analysis</i>)	22
2.4.2 Analisi logica (<i>logical analysis</i>).....	23
2.4.3 Verifica e validazione del sistema (<i>verification and validation</i>)	24
2.4.4 Relazione tra <i>Systems Engineering</i> e manutenzione	26
2.5 Il <i>Systems Engineering</i> nell'ottica dell'Industria 4.0.....	27
3 La manutenzione	31
3.1 <i>Total Productive Maintenance (TPM)</i>	31
3.2 Obiettivi della manutenzione	33
3.3 Normativa UNI sulla manutenzione	33

3.3.1	Normative relative alla terminologia della manutenzione	34
3.3.2	Normative relative alla progettazione e alla gestione della manutenzione	35
3.3.3	Normative relative alla contrattualistica nel campo manutentivo	36
3.4	Meccanismi, cause di guasto, stati e tempi dell'entità	37
3.5	Politiche di manutenzione	43
3.6	Affidabilità, manutenibilità e disponibilità.....	45
3.6.1	Affidabilità (<i>Reliability</i>).....	45
3.6.2	Manutenibilità (<i>Maintainability</i>).....	52
3.6.3	Disponibilità (<i>Availability</i>).....	56
3.6.4	Ulteriori definizioni.....	58
3.7	<i>Failure Mode, Effects and Criticality Analysis: FMECA</i>	58
3.7.1	Scomposizione dell'entità	59
3.7.2	Individuazione dei modi, dei meccanismi e delle cause di guasto.....	60
3.7.3	Individuazione degli effetti di guasto.....	61
3.7.4	Individuazione dei sintomi e dei metodi di rilevazione del guasto	61
3.7.5	Analisi delle criticità	62
3.7.6	Individuazione delle azioni correttive e pianificazione della manutenzione	70
3.7.7	Scheda FMECA SAE J1739	72
3.7.8	Il motivo della scelta della FMECA.....	73
3.8	I costi della manutenzione	74
3.9	I <i>Key Performance Indicator</i> (KPI).....	75
4	Il caso studio LMA.....	77
4.1	L'Azienda LMA	77
4.1.1	Presentazione dell'azienda	77
4.2	Status " <i>as is</i> " della manutenzione in LMA	81
4.2.1	Descrizione della gestione della manutenzione macchine	81
4.2.2	Valutazione della gestione della manutenzione e analisi delle prestazioni.....	83
4.3	Applicazione del <i>Systems Engineering</i>	87

4.3.1	Motivazioni e modalità di implementazione del SE	87
4.3.2	Livelli di scomposizione e ipotesi effettuate	88
4.3.3	<i>Product Breakdown of System</i> e architettura logica	88
4.3.4	<i>Functional Breakdown of System</i> e architettura funzionale	89
4.4	FMECA	90
4.5	Status “ <i>to be</i> ” della manutenzione	91
4.5.1	Definizione dei nuovi piani di manutenzione	91
4.5.2	Valutazione delle prestazioni con attuazione del nuovo piano manutentivo	95
4.5.3	Sviluppi futuri	99
5	Conclusioni.....	103
Appendici		105
Appendice A.	Dati dei guasti inerenti alla Fidia K411 matricola n°1	107
Appendice B.	Elaborazione dei dati della macchina Fidia K411 matricola n°1	109
Appendice C.	<i>Product Breakdown of System</i>	111
Appendice D.	<i>Functional Breakdown of System</i>	118
Appendice E.	BDD più caratteristici delle architetture logiche e funzionali della macchina in esame	128
Appendice F.	Analisi FMECA	139
Appendice G.	Elenco guasti nel “ <i>best case</i> ” con nuova manutenzione programmata ciclica 173	
Appendice H.	Elaborazione dei dati della macchina Fidia K411 matricola n°1 nel “ <i>best case</i> ”.....	175
Appendice I.	Elenco guasti nel “ <i>worst case</i> ” con nuova manutenzione programmata ciclica	177
Appendice J.	Elaborazione dei dati della macchina Fidia K411 matricola n°1 nel “ <i>worst case</i> ”.....	180
Indice delle figure.....		183
Indice delle tabelle		185
Bibliografia.....		187
Sitografia		189

Elenco acronimi

ALM	<i>Application Lifecycle Management</i>	PDM	<i>Product Data Management</i>
BDD	<i>Block Definition Diagram</i>	PLD	<i>Product Lifecycle Development</i>
CEI	Comitato Elettrotecnico Italiano	PMP	Percentuale di manutenzione preventiva
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>	RAMS	<i>Reliability, Availability, Maintainability, Safety</i>
DT	<i>Down Time</i>	RCA	<i>Root Cause Analysis</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>	RPN	<i>Risk Priority Number</i>
FBS	<i>Functional Breakdown of System</i>	SE	<i>Systems Engineering</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effects Analysis</i>	SysML	<i>System Model Language</i>
FMECA	<i>Failure Mode, Effects and Criticality Analysis</i>	TAR	Tempo Attivo di Riparazione
FTA	<i>Fault Tree Analysis</i>	TBF	<i>Time Between Failures</i>
INCOSE	<i>International Council on Systems Engineering</i>	TBM	<i>Time Between Maintenance</i>
JIT	<i>Just-In-Time</i>	TD	<i>Tempo di diagnosi</i>
KPI	<i>Key Performance Indicator</i>	TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
MBSE	<i>Model-Based Systems Engineering</i>	TRG	Tempo di Ritardo Gestionale
MDT	<i>Mean DownTime</i>	TRL	Tempo di Ritardo Logistico
MTBF	<i>Mean Tme Between Failures</i>	TRS	Tempo di Ripristino del Servizio
MTTF	Mean Time To Failure	TTF	<i>Time To Failure</i>
MTTR	Mean Time To Repair	UML	<i>Unified Modeling Language</i>
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>	UNI	Ente italiano di normazione
PBS	<i>Product Breakdown of System</i>	UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>

1 Introduzione

Il *Systems Engineering* ha da sempre riscontrato successo per la progettazione di nuovi sistemi: la sua metodologia e i suoi strumenti permettono una visione completa dello sviluppo del progetto, dalla sua ideazione fino alla fine della sua operatività.

Tuttavia, come detto, è un approccio sviluppato fin dalla fase progettuale di un sistema, ma le cui potenzialità potrebbero essere sfruttate anche adottandolo su elementi già completi, come effettuato in questo lavoro di Tesi.

L'obiettivo prefissato è, quindi, lo sviluppo di un progetto di manutenzione preventiva per macchine a controllo numerico partendo da uno studio sistemistico degli impianti, ossia utilizzando gli strumenti tipici del *Systems Engineering*; la sua implementazione in ottica manutentiva porta a risultati immediati, fungendo da fondamenta migliorative per le operazioni tipiche della manutenzione, ma anche a possibili sviluppi atti al miglioramento del processo manutentivo dei beni di un'azienda o dell'adesione della stessa alla filosofia di Industria 4.0.

Inoltre, il raggiungimento di un'ottima qualità dell'attività di manutenzione preventiva si inserisce pienamente nella visione moderna di manutenzione, la *Total Productive Maintenance*.

Questa Tesi si prefigge così il raggiungimento dell'obiettivo intersecando *Systems Engineering* e manutenzione in una realtà già pienamente attiva, quale l'azienda LMA, operante nel settore produttivo aeronautico e aerospaziale, e con un'attenzione rivolta anche all'utilizzo delle normative UNI, al fine di avere uniformità nelle terminologie adottate.

La Tesi è strutturata nel modo seguente, al fine di guidare il lettore ad una comprensione dei principali argomenti introdotti e alla successiva realizzazione del progetto manutentivo: nel Capitolo 2 vengono presentati metodologia e strumenti propri del *Systems Engineering* e una sua contestualizzazione nello scenario produttivo moderno.

Nel Capitolo 0 si spiega come agisce la *Total Productive Maintenance* e, successivamente, si introducono i concetti che definiscono la manutenzione, nonché le normative UNI adottate in questo campo; si prosegue con la spiegazione della *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, necessaria per l'analisi affidabilistica del sistema.

Quindi, nel Capitolo 0 si presenta l'azienda LMA, dove è stato possibile realizzare questo studio e di cui si analizzano le prestazioni in ambito manutentivo; in questa fase si applicano gli strumenti del *Systems Engineering* e la *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* al caso in esame e si procede alla proposta di miglioramento dell'attività di manutenzione preventiva, presentando gli sviluppi futuri che lo studio effettuato può implicare.

Le conclusioni inerenti al lavoro di Tesi vengono, infine, riportate nel Capitolo 5.

2 *Systems Engineering*

2.1 *Systems Engineering* e sistema

Come definito dall'INCOSE¹, il *Systems Engineering* (abbreviato, SE) è “un approccio transdisciplinare e integrativo per consentire la realizzazione, l'utilizzo e il ritiro di sistemi ingegnerizzati con successo, utilizzando principi e concetti sistemistici e metodi scientifici, tecnologici e di gestione”; si utilizzano “i termini ‘*engineering*’ e ‘ingegnerizzati’ nel loro senso più ampio: ‘l'azione di lavorare ad arte per raggiungere un risultato’. I sistemi ingegnerizzati possono essere costituiti da persone, prodotti, servizi, informazioni, processi ed elementi naturali” (www.incose.org).

L'INCOSE pone in evidenza il carattere non solo interdisciplinare del SE, identificabile con l'aggettivo “integrativo”, ma anche transdisciplinare: questo approccio infrange le barriere tra le differenti discipline, al fine di avere una visione olistica del problema.

Questa definizione rappresenta l'essenza del SE, ma, per comprenderne pienamente il significato, è necessaria una descrizione più approfondita.

Focalizzando l'attenzione su un prodotto da sviluppare, lo scopo di una progettazione deve essere il sistema, costituito da differenti componenti, tra loro connessi e uniti. Questo sistema deve soddisfare le richieste dei futuri utilizzatori e deve compiere esclusivamente le funzioni richieste, opportunamente verificate e validate. La selezione dei componenti e le loro connessioni, che definiscono l'architettura del sistema, è basata su un processo di *trade-off* tra requisiti necessari, tecnologie utilizzabili e costi. Il SE consente il perseguimento di questo risultato attraverso il raggiungimento dei quattro obiettivi principali, tramite l'utilizzo dei suoi quattro capisaldi, come suggerito in [1].

¹ *International Council on Systems Engineering*, un'organizzazione senza scopo di lucro, fondata nel 1990, con lo scopo di promuovere e implementare le tecniche del *Systems Engineering* per affrontare problemi complessi.

Nei paragrafi successivi è riportata sia una sintesi dei quattro obiettivi e dei quattro capisaldi del SE, come descritti in [1], sia l'introduzione di ulteriori aspetti che caratterizzano il SE, mettendo in risalto i concetti necessari per conseguire l'obiettivo del lavoro di Tesi.

2.1.1 I quattro obiettivi del SE

- **Strumenti adatti alla complessità**

Oggi, un sistema può essere costituito da differenti componenti *embedded*, ossia dotati di microprocessori per l'elaborazione dei dati raccolti dai sensori equipaggiati sull'elemento. Inoltre, molti prodotti possono essere dotati di sistemi di comunicazione dei parametri che li caratterizzano. Per tale ragione, gli strumenti classici di documentazione utilizzati nel passato per le analisi, ovvero il modo in cui venivano raccolte le differenti informazioni, non sono più sufficienti per una gestione di sistemi così complessi.

- **Tracciabilità**

Uno degli obiettivi da perseguire con il SE è sicuramente quello della tracciabilità: una visione completa dello sviluppo del ciclo di vita del prodotto, a partire dai requisiti richiesti fino ad arrivare alle funzioni ad esse correlate e alle singole parti che le soddisfano, è utile al fine di prevedere i possibili guasti o criticità relative alla *safety*, come definita nel Paragrafo 3.6.4.

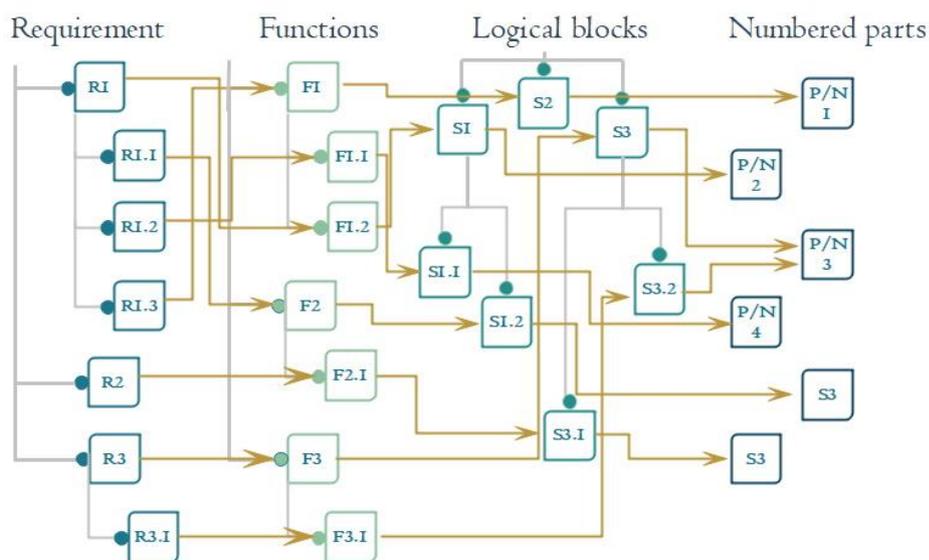


Figura 2-1 Schematizzazione della tracciabilità [1]

La Figura 2-1 illustra il concetto di tracciabilità; le fasi in essa indicate vengono trattate nei paragrafi successivi.

- **Creazioni di modelli, digitalizzazione, riutilizzo e documentazione automatica**

Per la realizzazione dei primi due obiettivi elencati, è necessaria una condivisione della documentazione relativa a tutte le fasi di un sistema. Un metodo più efficace della classica documentazione è la creazione di opportuni modelli, provvedendo alla digitalizzazione della documentazione stessa; questi modelli hanno la possibilità di essere riutilizzati e di essere autonomamente compilati, rendendo automatico il processo di documentazione.

- **Riduzione dei costi dello sviluppo del sistema, degli errori umani e dell'attività di re-ingegnerizzazione**

Rispondere alle esigenze dei tre obiettivi precedenti consente anche di soddisfare quest'ultimo scopo: considerare interamente il ciclo di sviluppo del prodotto permette di ridurre i costi in fase di utilizzo del sistema, avendo agito in una prima fase di progettazione sulla riduzione delle possibili criticità.

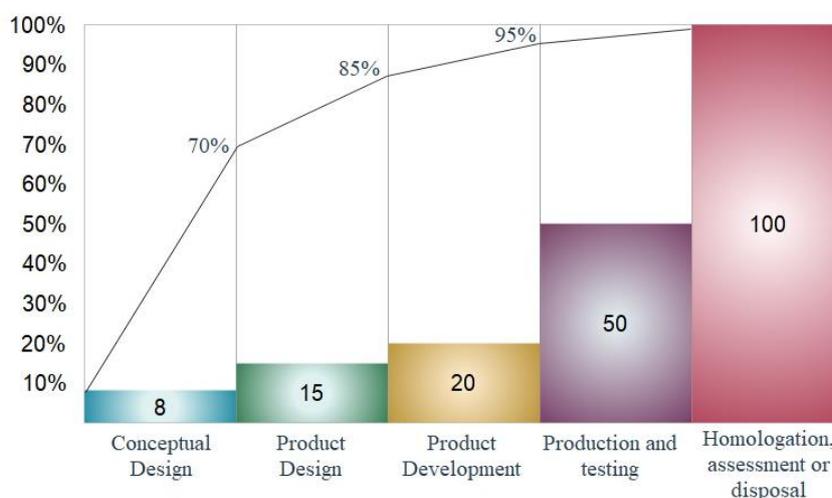


Figura 2-2 Andamento delle risorse impegnate (curva) e percentuale della spesa effettuata (istogramma) [1]

Il risultato di ciò è evidente nella Figura 2-2, dove è possibile notare il cosiddetto “spostamento a sinistra” delle risorse impegnate: il 70% circa del costo complessivo del sistema è determinabile già a valle della fase di progettazione, avendo così una visione chiara del progetto anche dal punto di vista economico fin dal principio.

2.1.2 I quattro capisaldi del SE

- **La metodologia**

Il SE è basato sull'utilizzo di modelli digitali, come già anticipato. Per tale ragione, la metodologia del SE è definita *Model-Based Systems Engineering* (MBSE). Due modelli principali sono implementati nel MBSE: il primo riguarda lo sviluppo del prodotto (*Product Lifecycle Development*, PLD), il secondo inerente al prodotto in sé (*Architecture Frameworks*). In questa Tesi si introduce il primo modello, il PLD. È opportuno sottolineare che le varie fasi del progetto possono essere suddivise in due macrocategorie, ossia quella dell'effettiva progettazione del sistema, la cui gestione è detta *Application Lifecycle Management* (ALM), e quella relativa alla messa in servizio del sistema stesso, le cui modalità di interazione costituiscono il *Product Data Management* (PDM). L'integrazione e la correlazione tra le singole parti costituenti queste due macrocategorie, che, in tal modo, non vanno mai considerate in modo separato, costituiscono quella che è una visione completa del sistema, la “*big picture*” dello stesso, nonché il fondamento del PLD.

- **Gli strumenti**

Gli strumenti fondamentali per il MBSE sono di tipo teorico, come differenti tipologie di diagrammi o metodi, ovvero i software che consentono la loro realizzazione tramite linguaggi dedicati; tra questi, si citano *IBM Rational DOORS*[®], utilizzato per la verifica del soddisfacimento dei requisiti, e *IBM Rational Rhapsody*[®], che permette l'utilizzo del *System Model Language* (SysML), il linguaggio utilizzato nel SE, come spiegato successivamente. Quest'ultimo è il software utilizzato nel lavoro di Tesi.

- **Il linguaggio**

Un linguaggio basato sull'uso di simboli e oggetti standard è stato implementato con lo scopo di essere univocamente interpretato da tutti gli attori che agiscono nell'attività di sviluppo di un sistema. Questo linguaggio era inizialmente l'*Unified Modeling Language* (UML), successivamente reso più completo e divenuto SySML.

- **La gestione dei dati**

Affinché tutti coloro che operano nella progettazione di un sistema possano comunicare, condividere e salvare le informazioni inerenti allo stesso, essi devono poter operare su

una piattaforma comune, atta a soddisfare tutte le esigenze; per tale ragione, una rete di connessione su *data bus* o *cloud* è necessaria.

2.2 System Model Language

Il *System Model Language*, SysML, è il linguaggio utilizzato per la progettazione di un sistema in tutte le sue fasi [1]. Estensione del linguaggio UML, si basa sull'utilizzo di differenti tipologie di diagrammi, atti alla risoluzione di un ampio range di problemi [2].

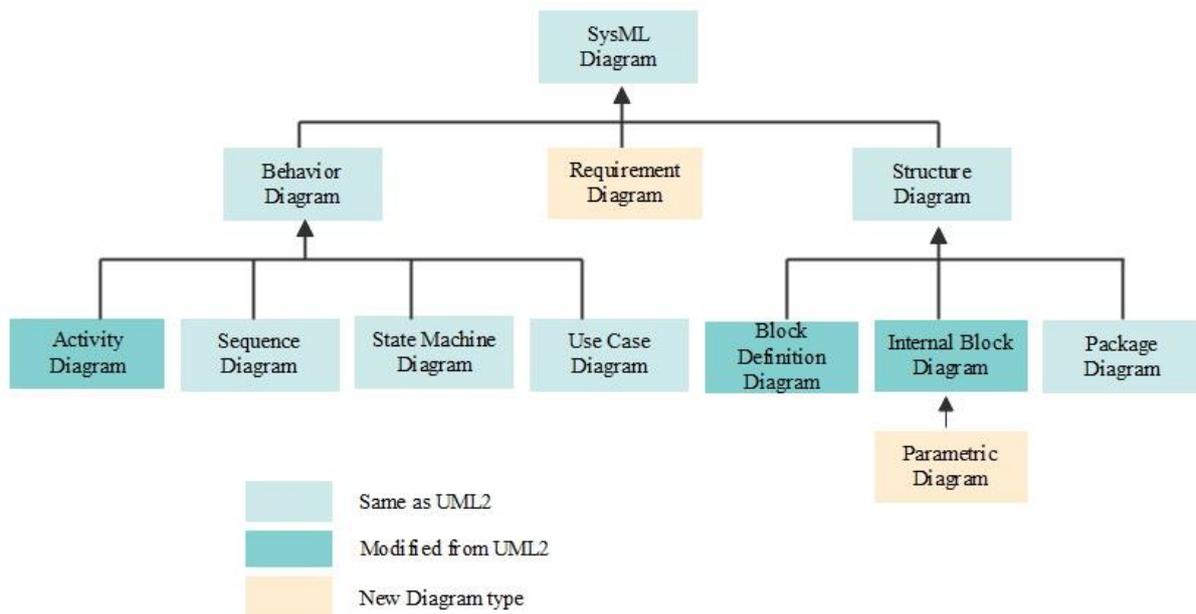


Figura 2-3 *Diagram Taxonomy* del SysML [2]

In Figura 2-3 è riportata una schematizzazione dei diagrammi utilizzati nel SysML., di cui viene riportata una breve descrizione.

- *Requirements Diagram*: consente di riportare anche nell'ambiente di lavoro con linguaggio SysML i requisiti che il sistema deve soddisfare, dando la possibilità di scomporre un requisito in subrequisiti, mettendo così in risalto un'eventuale gerarchia esistente tra gli stessi [2].

- *Behaviour Diagram*: utile per rappresentare il comportamento del sistema; per fare ciò, sono possibili differenti approcci.
 - *Use Case Diagram*, descrizione di come un sistema interagisce con gli attori che lo utilizzano, siano esse persone o altri sistemi [2];
 - *State Machine Diagram*, modello del comportamento del sistema in maniera discreta, ossia come esso risponde al variare di parametri misurabili, detti valori soglia, che variano le condizioni in cui opera il sistema stesso [1];
 - *Sequence Diagram*, rappresentazione di come il sistema interagisce nel tempo con gli altri attori con cui si interfaccia, evidenziando le azioni e i messaggi che intercorrono fra gli stessi [1];
 - *Activity Diagram*, descrizione del flusso delle attività che il sistema deve compiere [2].
- *Structure Diagram*: necessario per un'analisi dell'architettura del sistema. A questa categoria fanno parte
 - *Block Definition Diagram*, rappresentazione del sistema con uso dei blocchi, unità base della struttura del diagramma che contengono un insieme di caratteristiche atte alla descrizione degli elementi a cui si riferiscono. Risultato del *Block Definition Diagram* (BDD) è la messa in risalto sia dei livelli in cui è scomposto il sistema, nonché delle relazioni tra i differenti blocchi, ossia le interfacce tra gli stessi [2];
 - *Internal Block Diagram*, definizione delle connessioni interne ad un sistema con evidenza del flusso delle azioni che lo stesso deve intraprendere per il raggiungimento, ad esempio, di una funzione [1];
 - *Package Diagram*, descrizione delle attività eseguite sul sistema, ossia elenco dei differenti livelli di astrazione in cui lo stesso è stato analizzato [1].
- *Parametric Diagram*: diagramma necessario per una prima modellazione quantitativa delle leggi e delle condizioni al contorno che caratterizzano il sistema; è considerabile come il diagramma da utilizzare subito prima di un'analisi più dettagliata del sistema dal punto di vista fisico con altri software, come, ad esempio, *Simulink*[®] [1].

2.3 Product Lifecycle Development

Il *Product Lifecycle Development*, introdotto nei paragrafi precedenti, può essere descritto in maniera completa grazie all'utilizzo di alcuni modelli a diagrammi. In letteratura sono presenti differenti diagrammi che definiscono le fasi da compiere per il raggiungimento della progettazione e la seguente messa in opera del sistema. Nei paragrafi successivi se ne riportano i più significativi proposti.

2.3.1 Waterfall Diagram

Il *Waterfall Diagram* (diagramma a cascata), riportato in Figura 2-4, è costituito da una serie di blocchi indicanti le azioni da eseguire consecutivamente per soddisfare l'approccio PLD. Questa tipologia di diagramma, tuttavia, non mette in risalto le interazioni presenti tra ALM e PLM, che, come già evidenziato, è la peculiarità del PLD [1].

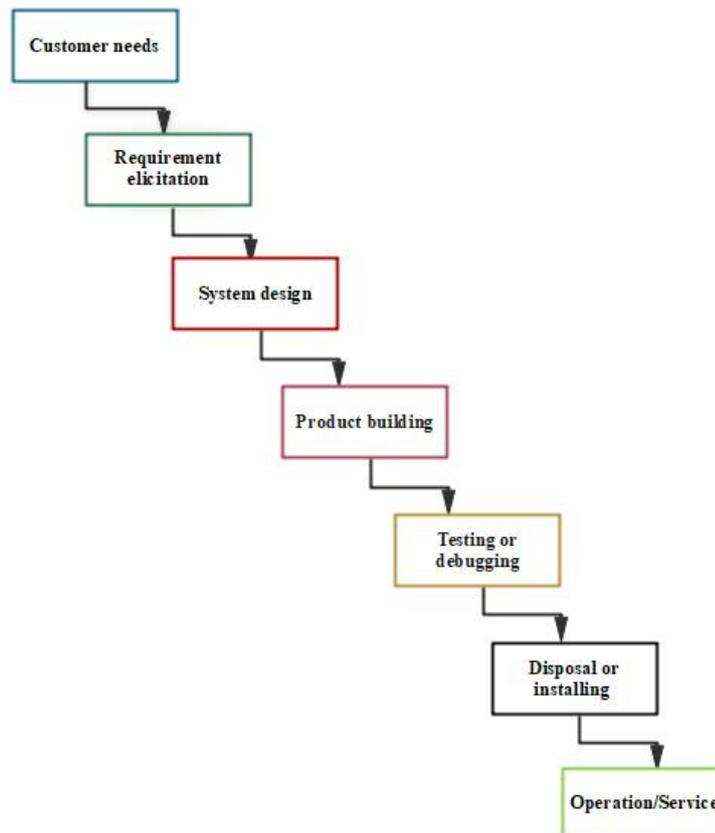


Figura 2-4 *Waterfall Diagram* [1]

2.3.2 V-Diagram

Uno strumento sicuramente più accurato nella descrizione del PLD è il *V-Diagram* (diagramma a V), di cui una rappresentazione è fornita in Figura 2-5.

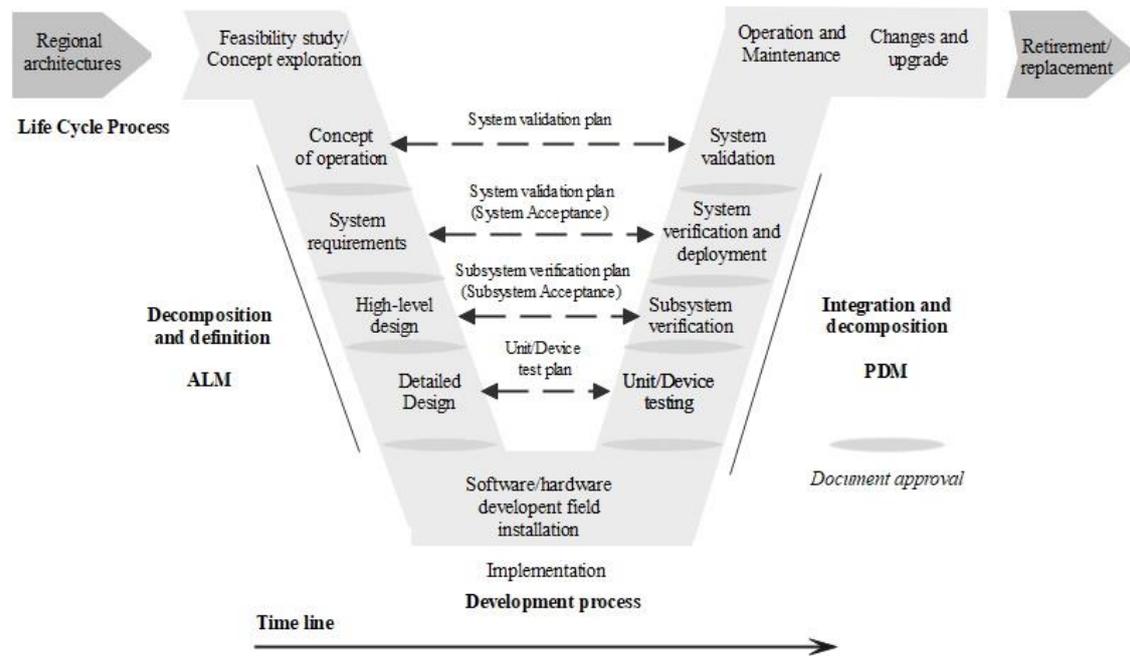


Figura 2-5 V-Diagram [3]

Le azioni da compiere per la progettazione del sistema, considerando globalmente tutte le sue fasi, sono elencate partendo dall'apice del ramo sinistro; qua sono riportati i differenti step che caratterizzano la ALM, partendo dalle esigenze dei clienti fino a giungere alla progettazione a livello di componente: l'approccio utilizzato per questa fase è definito quindi *top-down*, in quanto parte dal sistema globale per giungere al dettaglio. Le azioni successive alla progettazione, ossia quelle inerenti all'integrazione del sistema, afferenti al PDM, sono riportate sul ramo destro del diagramma, in cui è evidenziato un approccio detto *bottom-up*, giungendo, infine, alla messa in servizio del prodotto.

Grazie a questo diagramma possono essere messi in risalto:

- i test eseguiti tra i vari step, utili al processo di verifica e validazione (cfr, Paragrafo 2.4.3)
- le correlazioni tra ALM e PDM, da considerare simultaneamente per la corretta applicazione del PLD.

Sebbene questo diagramma sia molto usato e punto di riferimento per il PDM, ha una limitazione: la non esplicitazione di un processo iterativo per la completa definizione dei requisiti del sistema, i quali sembrano tutti determinati fin dai primi step della progettazione, ma che, in realtà, possono essere più dettagliatamente esplicitati solo a valle di una completa analisi del sistema stesso [1].

2.3.3 *Spiral Diagram*

La limitazione del diagramma a V conduce alla formulazione di un nuovo modello, detto “a spirale”, ossia lo *Spiral Diagram*, il quale mette in risalto il carattere iterativo del processo del SE. Partendo dalla parte più esterna del diagramma, si eseguono tutte le azioni necessarie per la progettazione del sistema, dall’elenco dei requisiti alla validazione, per poi cominciare un nuovo giro, passando ad un livello di scomposizione successivo del prodotto, ripartendo e aggiornando (eventualmente) i requisiti del sistema [1].

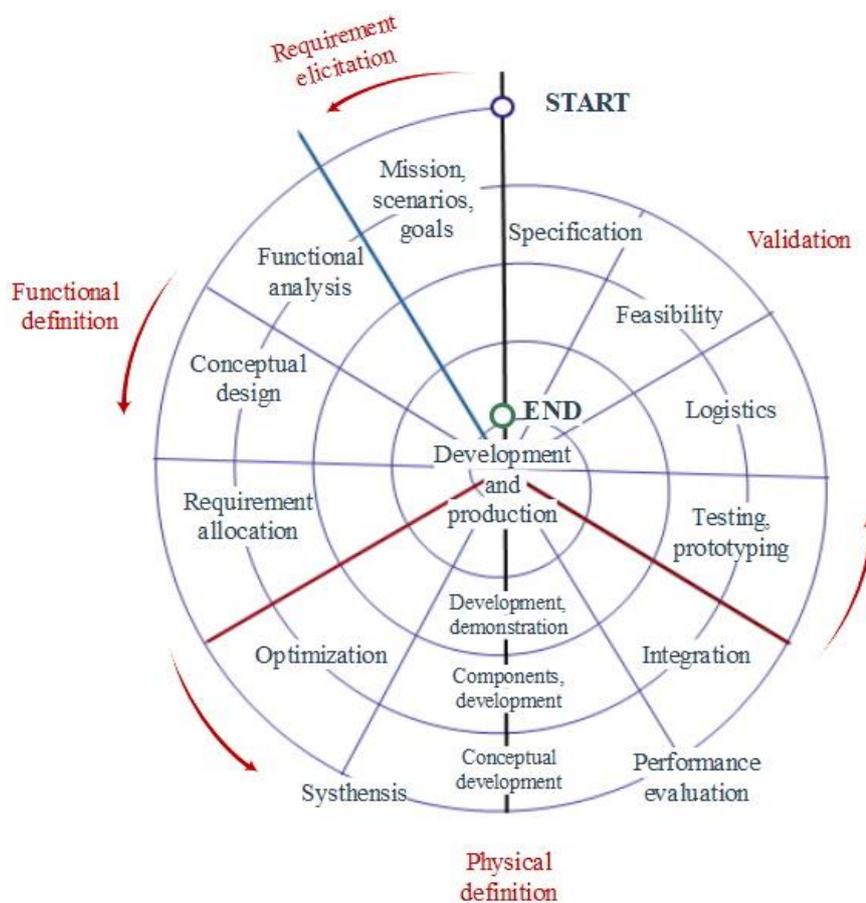


Figura 2-6 *Spiral Diagram* [1]

2.4 Approfondimento sulla metodologia del *Systems Engineering*

In questo paragrafo viene illustrata la metodologia del SE secondo il PLD ([1],[3]), costituita da una serie di step; si possono riassumere come di seguito, facendo riferimento al *V-diagram* illustrato in Figura 2-5.

- Step dell'ALM:
 - individuazione dei bisogni dei clienti (*needs*), da cui deriva un elenco preliminare dei requisiti del sistema (*requirements*), i quali delineano come i bisogni del cliente si andranno a riversare sul sistema stesso, ad esempio, in termini di funzioni o architettura [1];
 - analisi operativa (*operational analysis*), utile per la determinazione delle condizioni al contorno del sistema, date dalla missione da compiere e dagli scenari possibili [1];
 - analisi funzionale del sistema (*functional analysis*), atta a definire una prima architettura dello stesso, individuando così le interfacce tra le varie funzioni;
 - analisi logica del sistema (*logical analysis*), grazie alla quale si definisce un'architettura logica;
 - analisi fisica del sistema (*physical analysis*), nella quale vengono descritte le caratteristiche degli elementi atti alla realizzazione di corrispettive componenti logiche e funzionali.
- Step del PDM:
 - verifica e validazione (*verification and validation*) del sistema.

Poiché affrontate e utilizzate in questo lavoro di Tesi, si approfondiscono le fasi di analisi funzionale, di analisi logica e di verifica e validazione.

2.4.1 Analisi funzionale (*functional analysis*)

L'analisi funzionale consiste nel processo iterativo di identificare le funzioni di un sistema, descriverle e provvedere alla definizione di un'architettura funzionale (*functional architecture*). Per funzione si intende la rappresentazione di cosa il sistema dovrebbe realizzare per soddisfare un requisito, in un determinato scenario; inoltre, una funzione non va considerata come un

elemento inscindibile, ma può essere soggetta a scomposizione, in quanto può essere espressa con una serie di operazioni di livello inferiore. Risultati della scomposizione funzionale sono l'individuazione di un'architettura funzionale, nella quale vengono evidenziate le relazioni tra funzioni, nonché il livello di scomposizione delle stesse, sottoforma di un albero funzionale, ovvero un *Functional Breakdown of System* (FBS) [1].

Per il perseguimento di tale obiettivo si possono usare diverse metodologie, afferenti al MBSE, basate sull'utilizzo dei diagrammi riportati nel Paragrafo 2.2, che rendono la rappresentazione dell'architettura funzionale dinamica e oggetto di continuo sviluppo [1].

In questo lavoro di Tesi, si utilizza il BDD, grazie al quale può essere individuata facilmente l'architettura funzionale, prestando particolare attenzione all'identificazione delle interfacce tra le varie funzioni.

Ogni singolo blocco ha dei campi che lo caratterizzano; tra i vari a disposizione, è da sottolineare la presenza del campo di allocazione, che indica la correlazione tra l'elemento dello step in analisi con un blocco di un'altra struttura, assicurando l'integrazione del modello. [2]

Nel caso dell'analisi funzionale, ad esempio, viene assegnata l'unità dell'analisi logica che soddisfa la funzione considerata e, dovendo l'analisi funzionale stessa rispondere all'esigenza di soddisfare i requisiti elencati nella fase precedente del progetto, i requisiti possono essere allocati alle funzioni correlate: si nota come la tracciabilità, uno degli obiettivi del SE (cfr. Paragrafo 2.1.1), viene così soddisfatta nei vari step di analisi.

2.4.2 Analisi logica (*logical analysis*)

È durante la realizzazione dell'analisi logica (*logical analysis*) che si esegue il processo di allocazione delle funzioni, ossia di assegnazione di una delle funzioni derivanti dall'analisi funzionale ad elementi logici in grado di effettuarla. Per elementi logici si intendono quei componenti che riescono a realizzare la funzione per cui sono introdotti, ma la cui tecnologia non è stata ancora definita [1].

Per tale ragione, l'analisi logica è necessaria come unione tra l'analisi funzionale e l'analisi fisica, in cui si valutano le prestazioni di elementi ben definiti da un punto di vista quantitativo, e il risultato di questa analisi sono la definizione di una prima architettura fisica del sistema (*logical architecture*) o un *Product Breakdown of System* (PBS), nonché la possibilità, in fase

di progetto, di effettuare una ricerca approfondita sulle tecnologie ritenute più adatte per il soddisfacimento delle funzioni [1].

Come per l'analisi funzionale, anche per l'analisi logica non esiste un modo univoco per essere compiuta; in questo lavoro di Tesi, si ricorre nuovamente all'uso del BDD, le cui peculiarità riportate nel Paragrafo 2.4.1 sono valide anche nello step adesso introdotto.

2.4.3 Verifica e validazione del sistema (*verification and validation*)

L'ultimo step del SE presentato è quello inerente alla verifica e validazione del sistema (*verification and validation*). È in questa fase che si assicura il soddisfacimento dei requisiti del sistema, domandandosi quanto lo stesso risponda alle esigenze elencate nella fase iniziale di progetto (*requirements*) con la verifica, e quanto le richieste del cliente (*needs*) siano efficacemente soddisfatte grazie alla validazione [1].

Considerando nuovamente il *V-diagram*, riportato in Figura 2-5, si può affermare che la fase di verifica e validazione si trovi nel ramo destro del diagramma, inerente al PDM: l'attività di verifica viene eseguita con test (grazie a simulazioni o alla realizzazione di prototipi, ad esempio) ai vari livelli di scomposizione di sistema, mentre la validazione avviene a valle della completa realizzazione dell'elemento sviluppato; si sottolinea, inoltre, che non esiste un metodo univoco per eseguire la verifica e la validazione di un sistema, in quanto dipende dal caso in esame [1].

In questo paragrafo ci si sofferma sulla definizione degli obiettivi di progettazione di un sistema (*Design Objectives*). Questi obiettivi sono utili per l'individuazione degli opportuni test di verifica e la successiva validazione e possono essere raggruppati in base alla particolare abilità del sistema a cui fanno riferimento [1].

- Abilità intrinseche (*intrinsic abilities*)
 - Semplicità (*Simplicity*), intesa come la capacità di un sistema di essere facilmente compreso.
 - Sicurezza, intesa sia come *Safety* che come *Security* (cfr. Paragrafo 0).

- Abilità di produzione (*production abilities*)
 - Producibilità (*Producibility*), che indica la facilità di realizzazione del sistema.
 - Testabilità (*Testability*), che esprime il tempo per cui un requisito del sistema consente di definire dei criteri da applicare nei test di valutazione delle performance del sistema.
- Abilità di installazione (*installation abilities*)
 - Portabilità (*Portability*), che definisce la difficoltà di movimento del sistema sotto determinate condizioni.
 - Trasportabilità (*Transportability*), indice della possibilità del sistema di essere trasportato da mezzi opportuni.
- Abilità operative (*operation abilities*)
 - Efficienza (*Efficiency*), che definisce “il grado per cui un sistema realizza le funzioni designate con il minimo consumo di risorse” [1].
 - Riconfigurabilità (*Re-configurability*), espressione della possibilità di riconfigurare un sistema automaticamente o manualmente per supportare le operazioni adeguatamente.
- Abilità di servizio (*service abilities*)
 - Disponibilità (*Availability*), Manutenibilità (*Maintainability*), Affidabilità (*Reliability*), che costituiscono la RAMS (definite e argomentate nel Paragrafo 0).
 - Capacità di sopravvivenza (*Survivability*), ossia di completare la missione in condizioni operative ostili.
 - Usabilità (*Usability*), indica “quanto facilmente un utente può imparare ad operare, preparare gli input e interpretare gli output del sistema” [1].
- *Smartness abilities*, ossia le capacità del sistema di elaborare autonomamente una risposta opportuna ai cambiamenti delle condizioni di operatività.
- *Smart-nect-ness abilities*, riferite alle abilità di comunicazione eventualmente possibile tra i sistemi, correlate al concetto di Industria 4.0 (cfr. Paragrafo 2.5)

2.4.4 Relazione tra *Systems Engineering* e manutenzione

È nella fase di verifica e validazione che è evidenziato il legame tra SE e manutenzione, espressa come attributi che la definiscono tra le abilità di servizio che sono state poste tra gli obiettivi di progettazione.

Scopo dell'attività manutentiva (di cui vi è una trattazione approfondita nel Paragrafo 3.2) è, quindi, il mantenimento degli obiettivi inerenti alla RAMS definiti in fase di progettazione del sistema.

Nella Figura 2-5 si identifica il posizionamento dell'attività di manutenzione nel *V-diagram* dello sviluppo di un sistema, a valle della messa in opera dello stesso.

Si sottolinea che già in fase di progettazione di sistema, il SE provvede a fornire delle informazioni necessarie per la valutazione delle caratteristiche RAMS: durante la fase di analisi funzionale, infatti, può essere parallelamente svolta un'analisi disfunzionale (*dysfunctional analysis*), grazie alla quale possono essere determinate le condizioni per cui si verifica un guasto; successivamente, a valle dell'analisi logica, è possibile attribuire gli obiettivi di affidabilità ai vari componenti logici del sistema e, infine, si può prevedere l'affidabilità del sistema una volta scelti i componenti fisici che lo costituiscono [1]. La Figura 2-7 schematizza questa correlazione tra le fasi di progettazione e le caratteristiche RAMS.

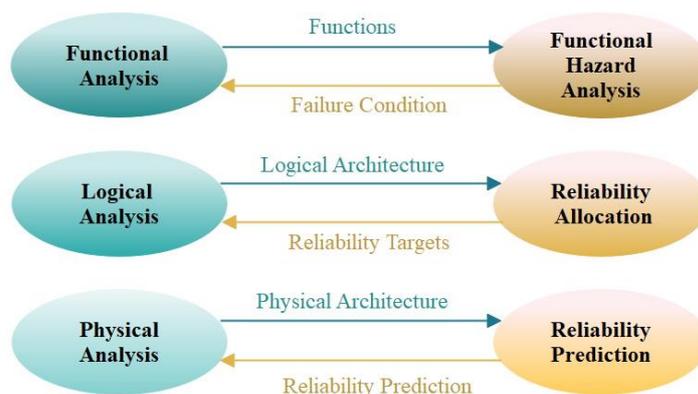


Figura 2-7 Schematizzazione delle relazioni tra le fasi di progettazione e le valutazioni sulle caratteristiche manutentive [1]

Il SE risulta un supporto utile per l'attività manutentiva e gli output provenienti dall'approccio MBSE aiutano nello sviluppo di tecniche di analisi affidabilistica, come la *Fault Tree Analysis* (FTA) o la *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* (FMECA), quest'ultima utilizzata in questo lavoro di Tesi e trattata nel Paragrafo 3.7.

2.5 Il *Systems Engineering* nell'ottica dell'Industria 4.0

Osservando gli obiettivi e la metodologia del SE riportata nei paragrafi precedenti, si può affermare che l'approccio del Systems Engineering può essere parte integrante dell'Industria 4.0.

Industria 4.0 è il nome dato al modello di sviluppo industriale basato sulla integrazione di Internet e delle tecnologie d'informazione con i processi di produzione, costituendo una nuova tipologia di impianti industriali, che assumono il nome di *smart factories* [4].

L'avvento di una moderna tipologia di produzione è dovuto essenzialmente ad esigenze date da una variazione dello scenario operativo, un *application-pull*, con richieste di una riduzione dei tempi, customizzazione e flessibilità per lo sviluppo di un prodotto, senza trascurare una maggior necessità di efficienza dell'utilizzo delle risorse; tuttavia, ciò è reso possibile da un incremento dell'automazione, di digitalizzazione e di connessioni, nonché da una riduzione delle dimensioni dei calcolatori, che costituiscono la *technology-push* [5].



Figura 2-8 Tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 [6]

Proprio l'adozione di nove specifiche tecnologie, definite abilitanti (*enabling technologies*) e riportate in Figura 2-8, caratterizza l'Industria 4.0 [6]. Queste tecnologie sono:

- *Advanced Manufacturing Solutions*: grazie alla sensoristica integrata e ai protocolli di comunicazione standard, robot industriali collaborano tra loro in maniera autonoma;
- *Additive Manufacturing*: tecnologie di produzione di tipo additivo, utili soprattutto nella realizzazione di particolari difficili da realizzare con processi di taglio e che consentono un minor consumo di materie prime [4];
- *Augmented Reality*: basata su visualizzazioni di informazioni aggiuntive e di supporto nelle varie fasi di produzione, attraverso particolari dispositivi, quali occhiali ad essa dedicati;
- *Simulation*: simulazione e ottimizzazione dei processi, grazie alla raccolta dati in tempo reale scambiati tra i vari sistemi;
- *Horizontal and Vertical Integration*: integrazione delle informazioni tra i vari reparti dell'azienda e tra aziende differenti, tra loro collaboranti;
- *Industrial Internet*: rete di comunicazione multidirezionale tra sistemi e prodotti interconnessi;
- *Cloud*: sistemi aperti atti alla archiviazione e gestione dei dati raccolti;
- *Cyber Security*: adozione di sistemi di sicurezza idonei per la protezione dei dati scambiati;
- *Big Data and Analytics*: elaborazione dei dati raccolti, con successiva ottimizzazione e supporto nel processo di *decision-making*.

Il SE afferisce alle tecnologie di *Horizontal and Vertical Integration*, consentendo proprio l'integrazione delle informazioni nei differenti step della produzione o, eventualmente, tra fornitore e cliente; considerando come sistema l'intera *smart factory*, questa condivisione di dati consente di avere sempre una visione completa del sistema, soddisfacendo i requisiti del modello PLD. Le operazioni di integrazione, inoltre, possono essere di supporto ai processi di *Simulation* e certamente richiedono una interconnessione tra macchine e prodotti fornita dall'*Industrial Internet* o l'utilizzo di *Cloud*, che sono alcuni degli elementi fondanti del SE, come già evidenziato nel Paragrafo 2.1.2.



Figura 2-9 *Assembly System 4.0* [4]

Infine, individuate in [4] le caratteristiche principali dell'*assembly system 4.0*, la cui progettazione è necessaria per una configurazione e gestione opportuna nei sistemi operanti nella *smart factory*, si sottolinea come il SE non solo possa essere di supporto per la caratteristica di tracciabilità del processo, ma possa contribuire al raggiungimento di altre caratteristiche peculiari dell'Industria 4.0, come l'*Assembly Control System*, agendo da supporto alle elaborazioni dei dati.

In conclusione, il SE è un approccio che deve essere presente per l'implementazione delle tecnologie e per il conseguimento degli obiettivi nell'ottica dell'Industria 4.0.

3 La manutenzione

3.1 *Total Productive Maintenance (TPM)*

Così come il processo industriale si è evoluto nel tempo, giungendo alla moderna visione dell'Industria 4.0 (cfr. Paragrafo 2.5), l'attività manutentiva, supporto della produzione, ha anch'essa subito dei cambiamenti: mentre fino agli anni '80 dominava la produzione di massa, i cui principi furono sviluppati da Ford e Sloan tra il 1905 e il 1920, oggi è largamente diffuso l'approccio *Lean Manufacturing*, ossia la produzione snella, introdotta da Eiji Toyoda e Taiichi Ohno per la prima volta in Toyota [7].

Come descritto in [8], il *Lean Manufacturing* è caratterizzato da dieci fattori, riportati nell'elenco sottostante.

- Feedback dei fornitori (*Supplier feedback*) su servizio e prodotti.
- Consegna dei fornitori *Just-In-Time (JIT)* (*JIT delivery by suppliers*) dei soli prodotti richiesti.
- Sviluppo del fornitore (*Supplier development*), di pari passo con il produttore, per mantenere un pari livello di competenza.
- Coinvolgimento del cliente (*Customer involvement*): il principale motore di un'azienda deve veder soddisfatte le sue esigenze il più possibile.
- *Pull production*: il successore del processo produttivo dà il via al predecessore attraverso una "kanban", termine giapponese che sta per "insegna".
- Flusso continuo (*continuous flow*), necessario da implementare, cercando di evitare periodi di arresto lunghi.
- Riduzione dei tempi di setup (*Setup time reduction*), per adattarsi il più velocemente possibile alle variazioni dei prodotti.

- *Total Productive Maintenance (TPM)*: efficaci processi manutentivi dovrebbero evitare il guasto delle attrezzature; in caso di guasto, invece, è richiesto un tempo di intervento contenuto.
- Controllo statistico dei processi (*Statistical process control*): essendo fondamentale la qualità del prodotto, un elemento difettoso non dovrebbe continuare il normale processo produttivo.
- Coinvolgimento dei dipendenti (*Employee involvement*), per dare un contributo attivo all'evoluzione aziendale.

Diverse tecniche sono utilizzate per il conseguimento della produzione snella; tra queste si citano la mappatura del valore (*value stream mapping*), ossia come si genera il valore di un prodotto lungo un processo, e il metodo 5S, che consente di rendere univoci i concetti di ordine e pulizia [7].

Inoltre, è interessante sottolineare come l'Industria 4.0, con le sue caratteristiche, riesca ad intervenire per una implementazione maggiormente efficiente della filosofia *Lean Manufacturing* [8].

L'attività manutentiva nell'approccio *Lean Manufacturing* diviene quindi TPM; questa si basa su tre principali caratteristiche [7]:

- forte integrazione fra produzione e manutenzione, contrariamente a quanto accadeva nella produzione di massa;
- centralità dell'automanutenzione, basata sull'importanza dell'operatore come primo sensore dello stato degli impianti;
- sviluppo dell'ingegneria di manutenzione, per una corretta progettazione e gestione delle attività manutentive.

Tra gli obiettivi del TPM vi sono la necessità di impiegare gli impianti in modo più efficace ed efficiente, di un avere sistema atto a eliminare le fonti di perdita o di prevenirle [9].

È in questo contesto che si inserisce il lavoro di Tesi, realizzando un progetto di manutenzione preventiva volto al perseguimento di tali scopi.

3.2 Obiettivi della manutenzione

La normativa UNI EN 13306:2018 [10] definisce la manutenzione come la “combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, durante il ciclo di vita di un’entità, destinate a mantenerla o riportarla in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta”, riferendosi all’elemento su cui viene eseguita l’attività manutentiva come entità.

Questa definizione è concettualmente completa, ma affinché si possa raggiungere lo scopo da essa evidenziato, bisogna introdurre degli obiettivi tangibili da soddisfare; alcuni di questi obiettivi, come riporta [7] sono:

- miglioramento continuo dell’affidabilità e della manutenibilità, concetti sviluppati nel Paragrafo 3.6;
- miglioramento dell’efficienza globale, che nel TPM consiste nel considerare, nella sua valutazione, tutte le perdite temporali dovute non solo alla indisponibilità della macchina, ma anche alle perdite per setup, tempi morti e produzione di scarti;
- ottimizzazione dei costi di manutenzione (cfr. Paragrafo 3.8);
- sviluppo della pianificazione lavori, ossia delle azioni manutentive che consentono il raggiungimento degli obiettivi precedenti, sia da compiere in periodi di tempo lunghi (mesi o anni), sia da compiere quotidianamente.

I concetti sopra esposti saranno più chiari alla fine della trattazione della manutenzione, ma si è preferito introdurli sin da ora per esporre le finalità della manutenzione e il soddisfacimento delle quali è anche scopo della trattazione che segue.

Infine, proprio al termine di questo capitolo, si introducono i *Key Performance Indicator* (KPI), dei parametri che quantificano lo stato di raggiungimento o meno di un obiettivo della manutenzione (cfr. Paragrafo 3.9).

3.3 Normativa UNI sulla manutenzione

È ritenuto ora opportuno illustrare le normative legate alla manutenzione redatte dall’UNI, l’Ente italiano di normazione; questo ente² si occupa di normazione, ossia di standardizzare i

² Oltre all’UNI, vi è anche il CEI, Comitato Elettrotecnico Italiano, che si occupa delle normative in ambito elettrotecnico

differenti concetti che caratterizzano un particolare ambito. Le normative di seguito elencate guidano alla progettazione della manutenzione in ogni sua fase e alcune di esse sono state un punto di riferimento anche per lo sviluppo di questo lavoro di Tesi. Nei capitoli successivi, infatti, viene fatto un costante riferimento alle normative UNI con il fine di rendere inequivocabili i concetti esposti.

Tutte le normative elencate di seguito sono in vigore, ad eccezione della UNI 9910:1991, e sono consultabili sul sito dell'UNI (www.uni.com), a cui si rimanda il lettore per maggiori approfondimenti; per ognuna di esse sono elencati:

- normativa: anno entrata in vigore;
- titolo;
- breve descrizione della normativa.

Inoltre, come suggerito in [7], tali normative possono essere suddivise in tre gruppi, relativamente alla:

- terminologia della manutenzione;
- progettazione e alla gestione della manutenzione;
- contrattualistica nel campo manutentivo.

3.3.1 Normative relative alla terminologia della manutenzione

Le prime normative riportate sono quelle relative alla terminologia utilizzata in ambito manutentivo, necessarie per una definizione univoca ed inequivocabile dei termini del settore esaminato. Nella Tabella 3-1 sono riportate le normative UNI che soddisfano questa esigenza.

NORMATIVA: ANNO ENTRATA IN VIGORE	TITOLO	BREVE DESCRIZIONE
UNI EN 13306:2018	Manutenzione - Terminologia di manutenzione	Specifica i termini relativi alla manutenzione di carattere tecnico, amministrativo e gestionale
UNI 10147:2013	Manutenzione - Termini aggiuntivi alla UNI EN 13306 e definizioni	Aggiunta di definizioni, a completamento della UNI EN 13306
UNI 9910:1991	Terminologia sulla fidatezza e sulla qualità del servizio	Adottata anche dal CEI, indica i principali termini relativi alla fidatezza
UNI 11082:2013	Manutenzione - Terminologia specifica per il settore del trasporto	Approfondimento dedicato al settore dei trasporti sulla terminologia della manutenzione
UNI 11063:2017	Manutenzione - Definizione di manutenzione ordinaria e straordinaria	Definisce i concetti di manutenzione ordinaria e straordinaria, dando un riferimento uniforme per gli utenti su tali argomenti

Tabella 3-1 Normative relative alla terminologia della manutenzione

Sebbene ritirata, ancora oggi si fa spesso riferimento alla normativa UNI 9910:1991, la quale contiene definizioni formali utili per la comprensione completa di alcuni concetti; anche in questo lavoro di Tesi si è fatto riferimento a questa normativa.

3.3.2 Normative relative alla progettazione e alla gestione della manutenzione

Il secondo gruppo di normative, riportato in Tabella 3-2, è relativo alle normative UNI da utilizzare come guida per la progettazione e la gestione della manutenzione; queste normative trattano differenti argomenti, come l'introduzione degli indicatori di prestazione, ossia i *Key Performance Indicator* (KPI) relativi al servizio di manutenzione, la realizzazione del budget di manutenzione o la gestione del servizio di manutenzione da remoto, detta telemanutenzione. Queste normative sono necessarie, quindi, come supporto nei differenti step del processo manutentivo aziendale.

NORMATIVA: ANNO ENTRATA IN VIGORE	TITOLO	BREVE DESCRIZIONE
UNI EN 17007:2018	Processo di manutenzione e indicatori associati	Descrive genericamente il processo di manutenzione, dando delle linee guida
UNI 10366:2007	Manutenzione - Criteri di progettazione della manutenzione	Introduce i metodi generali per la progettazione della manutenzione, indirizzando il lettore alla più coerente politica manutentiva
UNI EN 15341:2019	Manutenzione - Indicatori di prestazione della manutenzione (KPI)	Descrive un sistema per la gestione degli indicatori della manutenzione
UNI 10584:1997	Manutenzione. Sistema informativo di manutenzione	Introduce i sistemi informativi utilizzati in ambito manutentivo
UNI 10749:2017	Manutenzione - Guida per la gestione dei materiali per la manutenzione	Suddivisa in sei parti, descrive genericamente come procedere nella gestione dei materiali necessari all'attività manutentiva
UNI 10652:2009	Manutenzione - Valutazione e valorizzazione dello stato dei beni	Illustra un metodo quantitativo e qualitativo per stimare lo stato di un bene
UNI 10992:2002	Previsione tecnica ed economica delle attività di manutenzione (budget di manutenzione) di aziende produttrici di beni e servizi - Criteri per la definizione, approvazione, gestione e controllo	Guida alla realizzazione del budget di manutenzione
UNI 11126:2004	Telemanutenzione - Criteri per la predisposizione dei beni e per la definizione del servizio collegato	Descrive le funzioni e i requisiti del sistema e le indicazioni per una corretta gestione da remoto della manutenzione
UNI EN 13460:2009	Manutenzione - Documentazione per la manutenzione	Guida alla gestione della documentazione da allegare ad un bene mantenuto

Tabella 3-2 Normative relative alla progettazione e alla gestione della manutenzione

3.3.3 Normative relative alla contrattualistica nel campo manutentivo

Si introducono, infine, le normative UNI, legate all'aspetto burocratico e amministrativo inerenti alla manutenzione, riportate nella Tabella 3-3. Questo argomento esula da questo lavoro di Tesi e non viene ulteriormente approfondito, ma si introducono queste normative per completare il quadro sugli strumenti forniti dall'ente UNI come supporto al processo manutentivo.

NORMATIVA: ANNO ENTRATA IN VIGORE	TITOLO	BREVE DESCRIZIONE
UNI 10144:2006	Classificazione dei servizi di manutenzione	Propone una classificazione dei servizi in ambito manutentivo in base alle caratteristiche del servizio offerto
UNI 10145:2007	Definizione dei fattori di valutazione delle imprese fornitrici di servizi di manutenzione	Aiuta nella valutazione delle aziende che forniscono il servizio manutentivo, secondo opportuni criteri
UNI 10146:2007	Criteri per la formulazione di un contratto per la fornitura di servizi finalizzati alla manutenzione	Guida alla stesura dei contratti di manutenzione stipulati con aziende esterne
UNI 10148:2007	Manutenzione - Gestione di un contratto di manutenzione	Definisce i criteri di tipo tecnico-amministrativo per il corretto ottemperamento delle condizioni del contratto di manutenzione
UNI 10449:2008	Manutenzione - Criteri per la formulazione e gestione del permesso di lavoro	Definisce i requisiti per la gestione dei permessi di lavoro di carattere manutentivo
UNI 10685:2007	Manutenzione - Criteri per la formulazione di un contratto di manutenzione basato sui risultati (<i>global service</i> di manutenzione)	Costituisce un riferimento per la stesura di un contratto di manutenzione di <i>global service</i>
UNI EN 13269:2016	Manutenzione - Linee guida per la preparazione dei contratti di manutenzione	Anche questa normativa costituisce una guida per la stesura dei contratti per servizi di manutenzione

Tabella 3-3 Normative relative alla contrattualistica nel campo manutentivo

3.4 Meccanismi, cause di guasto, stati e tempi dell'entità

In questo paragrafo si introducono tutte le definizioni correlate al guasto di un'entità. Tali definizioni sono tratte dalla normativa UNI EN 13306:2018 [10] e, per il proseguimento della trattazione, risulta necessario approfondirle qui di seguito.

- **Guasto (*failure*)**

“Perdita dell'attitudine di un elemento ad eseguire una funzione richiesta”.

Da questa definizione si evince che è necessario dapprima esplicitare la “funzione” eseguita dall'entità in esame. Inoltre, con il termine “guasto” si indica un evento, che comporta uno stato detto di “avaria” dell'elemento.

- **Funzione richiesta (*required function*)**

“Funzione, combinazione di funzioni o combinazione totale di funzioni di un’entità, considerate necessarie per soddisfare un dato requisito”.

Si può osservare come una profonda conoscenza del sistema analizzato tramite il SE vada a determinare questa caratteristica dello stesso.

- **Avaria (*fault*)**

“Stato di un’entità caratterizzato dalla sua inabilità ad eseguire una funzione richiesta, esclusa l’inabilità intervenuta durante la manutenzione preventiva o in altre azioni pianificate, oppure dovuta alla mancanza di risorse esterne”.

L’avarìa può essere di differenti gradi:

- avaria parziale (*partial fault*), quando “un’entità può eseguire solo alcune, ma non tutte le funzioni richieste”;
- avaria intermittente (*intermittent fault*) (UNI 9910:1991 [11]), quando si ha “l’avarìa di un’entità che persiste per una limitata durata di tempo a seguito della quale l’entità recupera l’attitudine a eseguire una funzione richiesta senza essere soggetta ad alcuna azione di manutenzione correttiva”;
- avaria totale (*total fault*), quando tutte le funzioni richieste non sono eseguibili dall’elemento soggetto a guasto.

Nella definizione di avaria si è introdotto il concetto di risorse esterne (*external resources*); per risorse esterne, la [10] identifica le “risorse diverse dalla manutenzione, utilizzate dall’entità per eseguire la funzione richiesta”. Esempi di risorse esterne sono la forza lavoro, il materiale al bordo macchina, i servizi di sollevamento o l’alimentazione elettrica.

- **Meccanismi di guasto (*failure mechanism*)**

“Processi fisici, chimici o di altra natura che possono condurre o che hanno condotto a un guasto”.

Tra questi meccanismi di guasto vi sono sicuramente:

- processi fisici di carico di tipo meccanico: il guasto avviene per superamento dei limiti del materiale di resistere alle condizioni di carico applicate;
- processi fisici di carico di tipo termico: il guasto si genera a causa delle temperature a cui è soggetta l'entità;
- processi chimici e fisici che causano invecchiamento.

Questi meccanismi elencati causano il degrado dell'entità.

- **Degrado (*degradation*)**

“Cambiamento pregiudizievole nella condizione fisica, dovuto al passare del tempo, al tempo di utilizzo o a una causa esterna”.

- **Cause di guasto (*failure causes*)**

“Circostanza durante la specifica, la progettazione, la fabbricazione, l'installazione, l'utilizzo o la manutenzione che portano ad un guasto”.

Le cause di guasto possono essere differenti e di varie tipologie (ad esempio, in normativa sono riportate le definizioni di guasto per usura o per invecchiamento), ma si possono fondamentalmente suddividere in due macrocategorie:

- cause di guasto sistematiche, tipicamente dovute ad errori compiuti nelle fasi iniziali della vita di un'entità, ossia in fase di progetto, costruzione o scelta degli elementi che la compongono. La loro individuazione consente di eliminare completamente il guasto, una volta adottate le dovute contromisure;
- cause di guasto aleatorie, che necessitano di analisi di tipo probabilistico per essere prevenute.

- **Errore del software (*software fault, bug*)**

“Stato di un'entità di un software che impedisce a quest'ultimo di funzionare come richiesto”. A tale stato si associa il guasto dell'elemento.

- **Stati dell'entità**

Il verificarsi di un guasto cambia lo stato dell'entità in esame. La normativa presa in esame [10] definisce i differenti possibili stati per un elemento:

- stato di disponibilità (*up state*): “stato di un'entità in grado di eseguire una funzione richiesta, partendo dal presupposto che la fornitura di risorse esterne sia assicurata”;
- stato di indisponibilità (*down state*): “stato di un'entità incapace di eseguire una funzione richiesta a causa di manutenzione preventiva o di un guasto”;
- stato di incapacità o fuori servizio (*disabled state or outage*): “stato di un'entità incapace ad eseguire una funzione richiesta, qualunque ne sia la ragione”;
- stato di incapacità per cause esterne (*external disabled state*) o per cause di tipo esterno (*externally disabled state*): “stato di un'entità che, pur disponibile, manca delle risorse esterne richieste o che è resa sì indisponibile a causa di attività programmate diverse da quelle della manutenzione”. Tra le cause vi possono essere sia il setup della macchina, sia eventuale mancanza di materiale a bordo macchina da trattare;
- stato di degrado (*degraded state*): “stato di capacità ridotta a eseguire una funzione richiesta, ma con prestazione ridotta accettabile”;
- stato di funzionamento (*operating state*): “stato in cui un'entità funziona come richiesto”;
- stato di riposo (*idle state*): “stato di un'entità che si trova in uno stato di disponibilità e di non funzionamento durante un tempo non richiesto”;
- stato di attesa (*standby state*): “stato di un'entità che si trova in uno stato di disponibilità e di non funzionamento durante un tempo richiesto”;
- stato di pericolo (*hazardous state*): “stato di un'entità che è giudicato come fonte probabile di lesioni alle persone, di rilevanti danni ai materiali o di altre conseguenze inaccettabili”;
- arresto programmato o fuori servizio pianificato (*shutdown; planned outage*): fuori servizio programmato in anticipo per la manutenzione o altri scopi.

- **Tempi dell'entità**

Come si può osservare, sono stati introdotti anche i concetti relativi ai tempi di una macchina, strettamente correlati agli stati della stessa:

- tempo di disponibilità (*up time*): “intervallo di tempo durante il quale un'entità si trova in uno stato di disponibilità”;
- tempo di indisponibilità (*down time*): “intervallo di tempo durante il quale un'entità si trova in uno stato di indisponibilità”;
- tempo di funzionamento (*operating time*): “intervallo di tempo durante il quale un'entità si trova in uno stato di funzionamento”;
- tempo richiesto (*required time*): “intervallo di tempo durante il quale si richiede che l'entità si trovi nello stato di disponibilità”;
- tempo non richiesto (*not required time*): intervallo di tempo durante il quale non si richiede che l'entità si trovi nello stato di disponibilità;
- tempo di attesa (*standby time*): “intervallo di tempo durante il quale un'entità si trova in uno stato di attesa”;
- tempo di inoperosità (*idle time*): “intervallo di tempo durante il quale un'entità si trova in uno stato di inoperosità”;
- tempo di manutenzione (*maintenance time*): “intervallo di tempo durante il quale è effettuata una manutenzione su un'entità, compresi ritardi tecnici, logistici e amministrativi”.

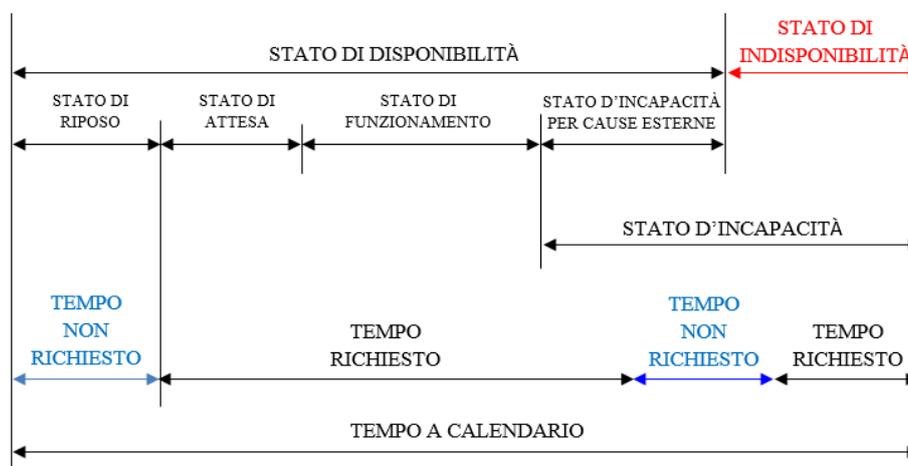


Figura 3-1 Stati e tempi di un'entità [10]

In Figura 3-1 vengono visualizzati gli stati e i tempi di un'entità, evidenziandone le relazioni. Si osservi come vi possa essere uno stato di disponibilità anche in tempo non richiesto; in tal caso, si parla di disponibilità potenziale, la quale può indicare una eventuale capacità aggiuntiva di operatività della macchina, oltre a quella collocata durante il tempo richiesto. Questi tempi di mancato funzionamento devono quindi essere considerati nello stato di disponibilità dell'elemento, come sottolineato in [7], dove è proposto lo schema riassuntivo riportato in Figura 3-2

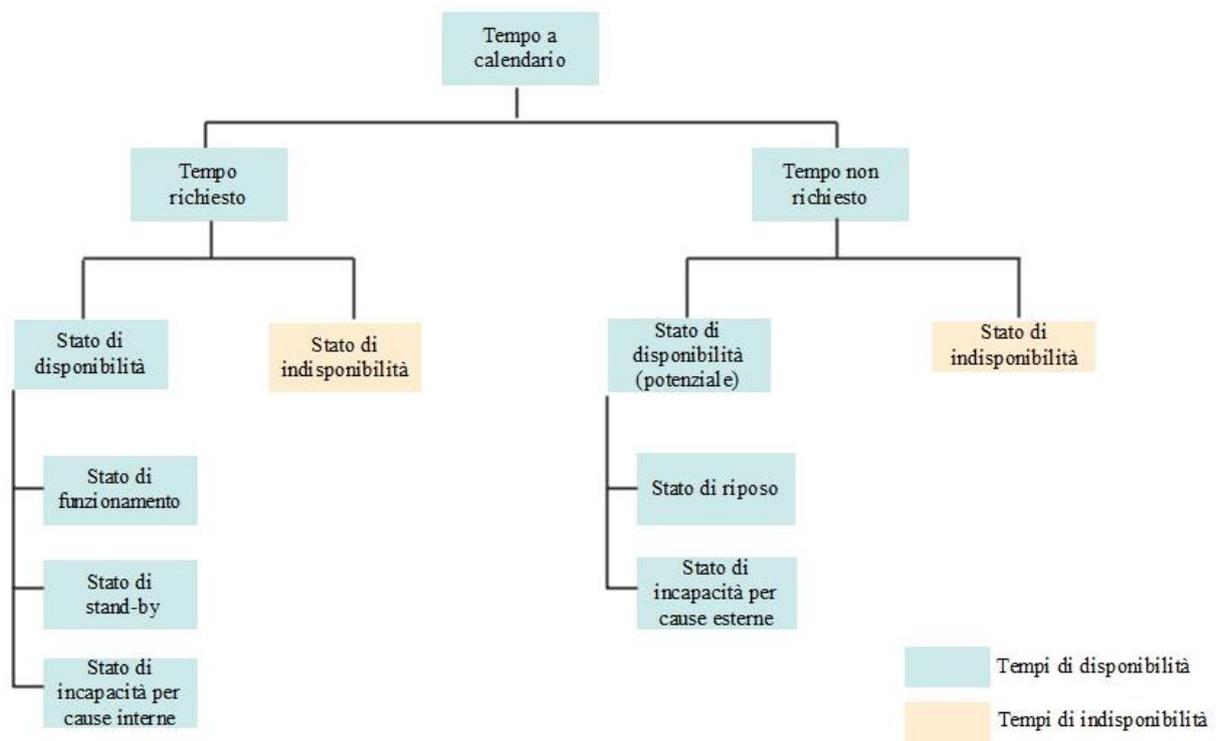


Figura 3-2 Schema riassuntivo delle relazioni tra tempi e stati [7]

I concetti esposti vengono ripresi nel Paragrafo 3.6.3, dove si approfondisce il tema della disponibilità.

3.5 Politiche di manutenzione

Occorre ora introdurre le definizioni delle politiche di manutenzione, ovvero come la manutenzione può essere effettuata.

- Manutenzione correttiva o a guasto (*corrective maintenance*): “manutenzione eseguita a seguito della rilevazione di un’avarìa e volta a ripristinare l’entità in uno stato in cui possa eseguire una funzione richiesta” [10]. A seguito del guasto, quindi, si effettua la riparazione del componente o la sua sostituzione.
- Manutenzione preventiva (*preventive maintenance*): “manutenzione eseguita, destinata a valutare e/o mitigare il degrado e a ridurre la probabilità di guasto di un’entità” [10].

Questa tipologia di manutenzione prevede delle sottocategorie:

- manutenzione preventiva ciclica (*predetermined maintenance*): “manutenzione preventiva effettuata in conformità a intervalli di tempo stabiliti o un numero di unità di misura di utilizzo, ma senza una precedente indagine sulla condizione dell’entità” [10];
 - manutenzione secondo condizione (*on-condition*): “manutenzione preventiva che comprende la valutazione delle condizioni fisiche, l’analisi e le possibili azioni di manutenzione conseguenti” [10];
 - manutenzione predittiva (*predictive maintenance*): “manutenzione secondo condizione eseguita in seguito a una previsione derivata da analisi ripetuta o da caratteristiche note e dalla valutazione dei parametri significativi afferenti al degrado dell’entità” [10].
- Manutenzione migliorativa (*improved maintenance*): con lo scopo di migliorare l’affidabilità di un’entità, si effettuano delle azioni mirate atte alla realizzazione di tale obiettivo; si può provvedere, ad esempio, all’eliminazione dei guasti sistematici, ovvero a migliorare la gestione degli interventi da eseguire (cfr. manutenibilità Paragrafo 3.6.2). Il carattere migliorativo di questa tipologia di manutenzione la rende particolarmente affine al TPM [7].

L’insieme delle varie tipologie di manutenzione illustrate costituiscono il piano manutentivo attuato sull’entità in esame. Scopo del lavoro di Tesi è la realizzazione di questo piano

manutentivo di carattere preventivo programmato (*scheduled maintenance*), ossia “in conformità ad un programma temporale specificato o a un numero di unità di misura di utilizzo specificato” [10]; la manutenzione programmata è attuata per evitare il più possibile interventi per guasti non previsti, che inficiano sulle prestazioni della manutenzione.

Uno degli strumenti utilizzabili per definire la politica di manutenzione è il diagramma di flusso, messo a disposizione dalla [13], riportato in Figura 3-3.

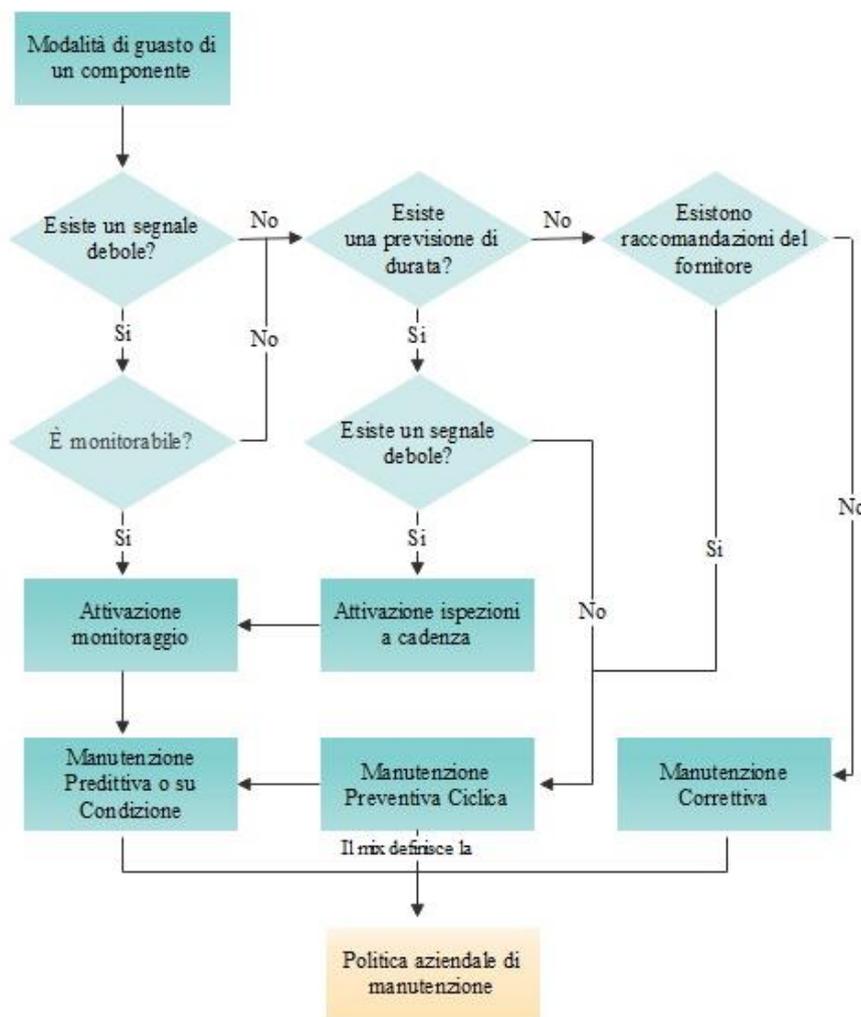


Figura 3-3 Diagramma di flusso per la definizione della politica di manutenzione secondo UNI 10366:2007 [13] (semplificato secondo [7])

Applicando ad ogni modalità di guasto il flusso di azioni indicato, in base alle caratteristiche intrinseche della possibile percezione del guasto, si può determinare la tipologia di

manutenzione da applicare al caso esaminato; le varie azioni di manutenzioni determinate definiscono la politica di manutenzione attuata sull'entità e, a livello superiore, la politica aziendale.

3.6 Affidabilità, manutenibilità e disponibilità

Si procede ora con la necessaria introduzione di altri concetti fondamentali in ambito manutentivo, per i quali viene data la definizione riportata in normativa e la metodologia di calcolo dei parametri necessari per un'analisi del sistema, rispetto alla proprietà considerata.

3.6.1 Affidabilità (*Reliability*)

La normativa UNI EN 13306:2018 [10] definisce l'affidabilità come “l'attitudine di un'entità a svolgere una funzione richiesta in date condizioni durante un intervallo di tempo stabilito”. La normativa UNI 9910:1991 [11] indica anche una definizione più formale dal punto di vista del calcolo dell'affidabilità, correlandola al concetto di probabilità; infatti, l'affidabilità viene anche definita come “la probabilità che un'entità possa eseguire una funzione richiesta in condizioni stabilite per un dato intervallo di tempo (t_1, t_2)”.

Si illustrano di seguito gli indici di affidabilità, utili per la valutazione della stessa nelle entità esaminante, e altre definizioni dell'affidabilità, necessarie per ulteriori analisi, quale, ad esempio, la FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*), trattata nel Capitolo 3.7.

Concetti di probabilità

Essendo l'affidabilità una particolare probabilità, si richiamano ora alcuni concetti di statistica e probabilità, riportati in letteratura ([7],[12] e [15]).

- Probabilità P

Sia definita Y una variabile aleatoria continua, ossia il possibile risultato di un campionamento che può assumere qualsiasi valore reale nel suo campo di esistenza K , e $y \in K$ il risultato di un singolo evento di campionamento.

Data una successione di valori y_i risultati di campionamento e A un sottoinsieme di K , si definisce la probabilità come [15]:

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\#\{i \in (1, \dots, n): y_i \in A\}}{n} \quad (3-1)$$

e indica la possibilità che un evento appartenente al sottoinsieme A accada.

- Densità di probabilità

Definita Y una variabile aleatoria continua con campo di esistenza K , e $y \in K$, si definisce funzione di densità di probabilità $f(y)$ come [15]:

$$f(y) = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{P(Y \in (y, y + \Delta])}{\Delta} \quad (3-2)$$

Se $\Delta = dy$, incremento infinitesimo, allora risulta che:

$$f(y)dy = P(Y \in (y, y + \Delta]) \quad (3-3)$$

ossia la probabilità di trovare Y nell'intervallo dei valori $(y, y + \Delta]$.

- Probabilità cumulata

La probabilità cumulata indica, invece, la probabilità che la variabile aleatoria Y sia inferiore al valore della variabile dipendente y :

$$F(y) = P(Y \leq y) = \int_0^y f(y)dy \quad (3-4)$$

3.6.1.1 Affidabilità come probabilità e modelli di probabilistici di affidabilità

Si consideri il grafico riportato in Figura 3-4. Esso rappresenta una funzione di densità di probabilità gaussiana. La variabile dipendente è ora il tempo, indicato con t .

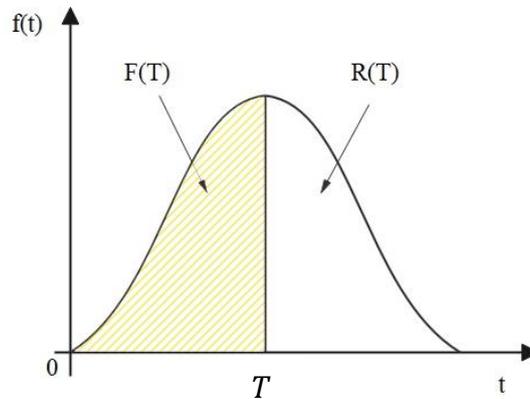


Figura 3-4 Grafico densità di probabilità con distribuzione gaussiana

Nel caso di analisi dell'affidabilità di un elemento soggetto a guasti, è possibile riportare con istogrammi il numero di guasti nel tempo e, passando dal discreto al continuo, si ha come possibile risultato la curva di cui sopra.

La probabilità cumulata rappresenta l'inaffidabilità dell'elemento, ossia la probabilità che un guasto si verifichi entro il tempo t , secondo la definizione

$$F(T) = \int_0^T f(t) dt \quad (3-5)$$

L'affidabilità, invece, viene definita come la funzione complementare a $F(T)$, in quanto con essa si indica la probabilità che il sistema sopravviva oltre il tempo T . La definizione è quindi:

$$R(T) = 1 - F(T) = 1 - \int_0^T f(t) dt \quad (3-6)$$

Un ultimo concetto da definire è il tasso di guasto (*failure rate*), λ ; questo indica la possibilità di sopravvivenza oltre il tempo T di un elemento; esso si calcola secondo la formula seguente:

$$\lambda(T) = -\frac{1}{R(T)} \frac{dR}{dt} \quad (3-7)$$

In letteratura, sono riportati anche modelli di affidabilità per differenti tipologie di cause di guasto (cfr. Paragrafo 3.4).

- Per i guasti dovuti a usura, la funzione densità di probabilità è proprio quella gaussiana vista precedentemente in Figura 3-4; nelle figure sottostanti si riportano gli andamenti delle probabilità cumulate, affidabilità e tasso di guasto nel caso di guasti da usura.

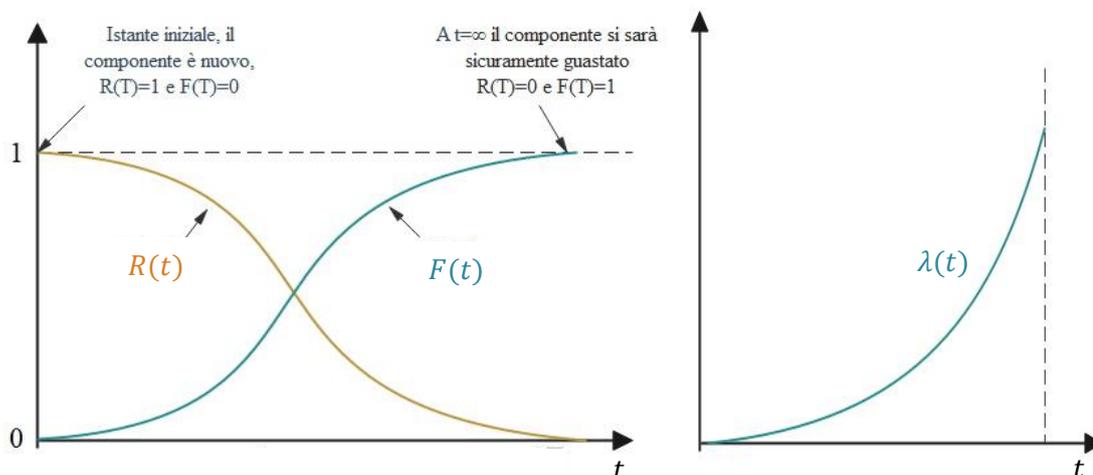


Figura 3-5 Probabilità cumulata $F(T)$ e affidabilità $R(T)$ (a sinistra); andamento del tasso di guasto λ nel tempo (a destra)

- Per i guasti casuali, intesa come loro indipendenza rispetto al tempo nel manifestarsi, la funzione densità di probabilità è di tipo esponenziale.

La funzione esponenziale di densità di probabilità è espressa dalla formula

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3-8)$$

mentre la funzione probabilità di inaffidabilità è data da

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3-9)$$

Applicando la definizione di tasso di guasto dell'Eq. (3-7), si ha che

$$\lambda = -\frac{1}{e^{-\lambda t}} \frac{d(e^{-\lambda t})}{dt} = \text{cost.} \quad (3-10)$$

con valore quindi indipendente dal tempo, come da definizione di guasto casuale.

Si riportano, quindi, i gli andamenti delle funzioni densità di probabilità, probabilità cumulata e affidabilità nel caso di guasti casuali.

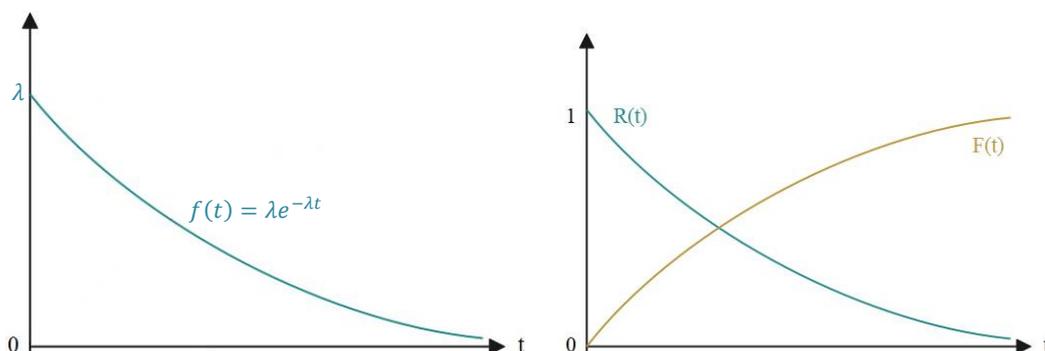


Figura 3-6 densità di probabilità, probabilità cumulata e affidabilità nel caso di guasti casuali

Considerando insieme i due modi di guasto ed usura, come riportato in [12], si ha che l'affidabilità totale è data, per il teorema della probabilità composta, da:

$$R_{TOT} = R_{usura} \times R_{casuali} \quad (3-11)$$

mentre il tasso di guasto totale, per il teorema della probabilità totale, è dato da:

$$\lambda_{TOT} = \lambda_{usura} + \lambda_{casuali} \quad (3-12)$$

Riferendoci all'Eq. (3-12), si riporta nella figura sottostante la somma effettuata tra i tassi di guasto e ad usura, corretta nella parte iniziale, che, contrariamente, sarebbe quasi lineare.

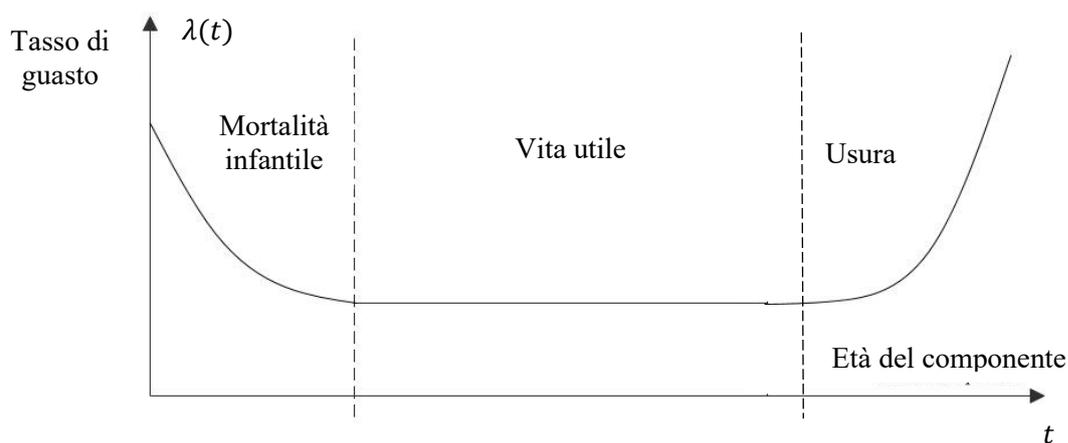


Figura 3-7 Diagramma a vasca da bagno, somma dei tassi di guasto a usura e casuali

Si è così ricavato il diagramma a vasca da bagno (*bathtub diagram*) del tasso di guasto considerando gli effetti combinati del guasto ad usura e casuale.

Si possono evidenziare tre regioni su questo diagramma [7]:

- la prima zona, quella soggetta a modifica, è nota come “mortalità infantile”. Durante questa prima fase di messa in opera del componente, il tasso di guasto, elevato all’inizio, tende a diminuire. Gli elementi soggetti a tale tipologia di guasto possono aver avuto tipicamente difetti in ambito di progettazione, di realizzazione o di installazione;
- la seconda zona è definita “vita utile”. in questo range temporale, la curva di tasso di guasto si mantiene circa costante (per semplicità, in Figura 3-7 è stato riportato un andamento costante) e il guasto avviene solo per motivi casuali;
- la terza zona è quella di “usura”, in cui il tasso di guasto cresce a causa del degradarsi del sistema.

Di seguito verrà specificato come il tasso di guasto vada ad inficiare sulla determinazione delle performance manutentive.

3.6.1.2 Indici di misura dell’affidabilità

La manutenzione ha, tra gli obiettivi, quello di limitare, controllare o eliminare i fenomeni che generano i guasti (cfr. Paragrafo 3.4) e, se possibile, anche eliminarli [7].

Si introducono di seguito, come riportati in letteratura ([7] e [12]), gli indici di misura dell’affidabilità, i quali consentono di analizzare da un primo punto di vista l’attività manutentiva esaminata.

- **Tempo medio tra i guasti (*Mean Time Between Failures, MTBF*)**

Definito il tempo tra i guasti il tempo trascorso tra la fine di una riparazione a guasto e il tempo in cui è individuato un nuovo guasto (*Time Between Failures, TBF*), come è visibile nella figura sottostante, ed n il numero di periodi osservati tra i guasti, il MTBF si calcola nel modo seguente:

$$MTBF = \frac{\sum_i TBF_i}{n}, i = 1, \dots, n \quad (3-13)$$

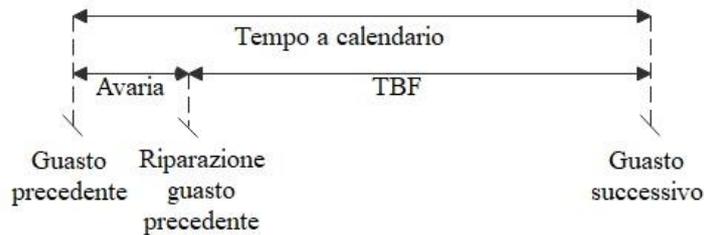


Figura 3-8 Individuazione del TBF

In Figura 3-8 è riportato il tempo a calendario; questo può essere solare o operativo, ossia considerando il tempo in cui l'entità in esame è in operatività teoricamente.

Come riportato in [12], considerando la funzione densità probabilità di tipo esponenziale (descrittiva dei guasti casuali), la relazione tra MTBF e λ è la seguente:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (3-14)$$

- **Tempo medio alla rottura (*Mean Time To Failure, MTTF*)**

Questo indice è riferito a componenti che sono soggetti a rottura e che, quindi, vanno sostituiti, una volta verificatosi il guasto.

Considerando la figura sottostante, è definito il tempo a rottura (*Time To Failure, TTF*) quello compreso tra l'inizio e la fine della vita operativa dell'elemento in esame.

Il MTTF si calcola, quindi, come

$$MTTF = \frac{\sum_i TTF_i}{n}, i = 1, \dots, n \quad (3-15)$$

con n che indica il numero di periodi osservati tra i guasti.

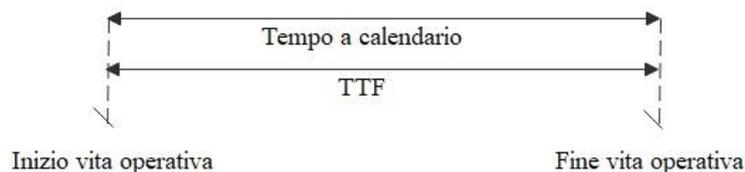


Figura 3-9 Individuazione del TTF

- **Tempo medio tra le manutenzioni (*Mean Time Between Maintenance, MTBM*)**

In Figura 3-10 è riportato il tempo medio tra le manutenzioni (*Time Between Maintenance, TBM*), definito come il range temporale che va dalla riparazione di un guasto all'inizio dell'attività manutentiva successiva, sia che esse siano interventi di manutenzione correttiva che preventiva.

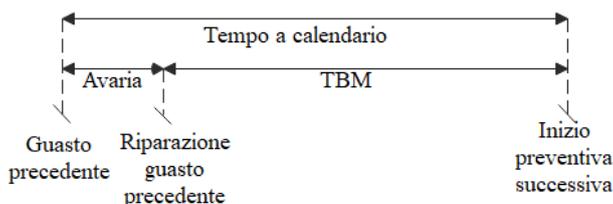


Figura 3-10 Individuazione del TBM

La formula per calcolare il MTBM, detti n i periodi osservati tra le manutenzioni, è la seguente:

$$MTBM = \frac{\sum_i TBM_i}{n}, i = 1, \dots, n \quad (3-16)$$

3.6.2 Manutenibilità (*Maintainability*)

La normativa UNI EN 13306:2018 [10] definisce la manutenibilità come “l’attitudine di un’entità, in certe condizioni di utilizzo, ad essere mantenuta o ripristinata in uno stato in cui essa possa eseguire la funzione richiesta, quando la manutenzione è effettuata in date condizioni e sono adottate le procedure e le risorse prescritte”. Anche per questa proprietà, una definizione più formale dal punto di vista matematico è data dalla normativa UNI 9910:1991 [11], la quale definisce la manutenibilità come “la probabilità che un’azione di manutenzione attiva, per un’entità data, utilizzata in condizioni assegnate, possa essere eseguita durante un intervallo di tempo dato, quando la manutenzione è assicurata nelle condizioni date e mediante l’uso di procedure e mezzi prescritti”.

Nei paragrafi successivi si introducono le caratteristiche della manutenibilità, spiegando anche la funzione del supporto logistico, nonché i tempi e gli indici utili per la descrizione di questa proprietà.

3.6.2.1 Caratteristiche di manutenibilità e supporto logistico

Differenti sono le caratteristiche proprie dell'entità che condizionano la sua manutenibilità; queste, elencate in [7], sono riportate di seguito.

- Accessibilità: l'entità è accessibile se le parti interessate dalla manutenzione sono facilmente raggiungibili.
- Estraibilità: facilità di smontaggio delle parti da mantenere.
- Manipolabilità: le parti da controllare sono facilmente trasportabili.
- Pulibilità: facilità di raggiungere le parti da pulire.
- Modularità: possibilità di sostituire rapidamente sottoassiemi del sistema, potendo procedere alla riparazione della parte soggetta a guasto senza perdite di tempo di utilizzo dell'entità.
- Intercambiabilità: proprietà che è presente in un'entità se le parti da smontare sono facilmente scambiabili con altri componenti ad essi compatibili.
- Testabilità: capacità di diagnostica dei guasti della macchina.

A queste proprietà della manutenibilità si deve affiancare anche il supporto logistico, ossia la capacità di un'organizzazione di fornire l'attività di manutenzione, agevolandone lo svolgimento delle operazioni, ad esempio garantendo il materiale necessario; avere a disposizione un buon supporto logistico contribuisce al miglioramento dell'attività manutentiva, come è possibile osservare una volta introdotti i tempi e gli indici di misura della manutenibilità [7].

3.6.2.2 Tempi dell'attività di manutenzione e indici di misura della manutenibilità

Come riportato in letteratura [7], è possibile definire i tempi caratteristici della attività manutentiva, nel caso essa sia di tipo correttivo o preventivo; in Figura 3-11 viene riportata una loro schematizzazione.

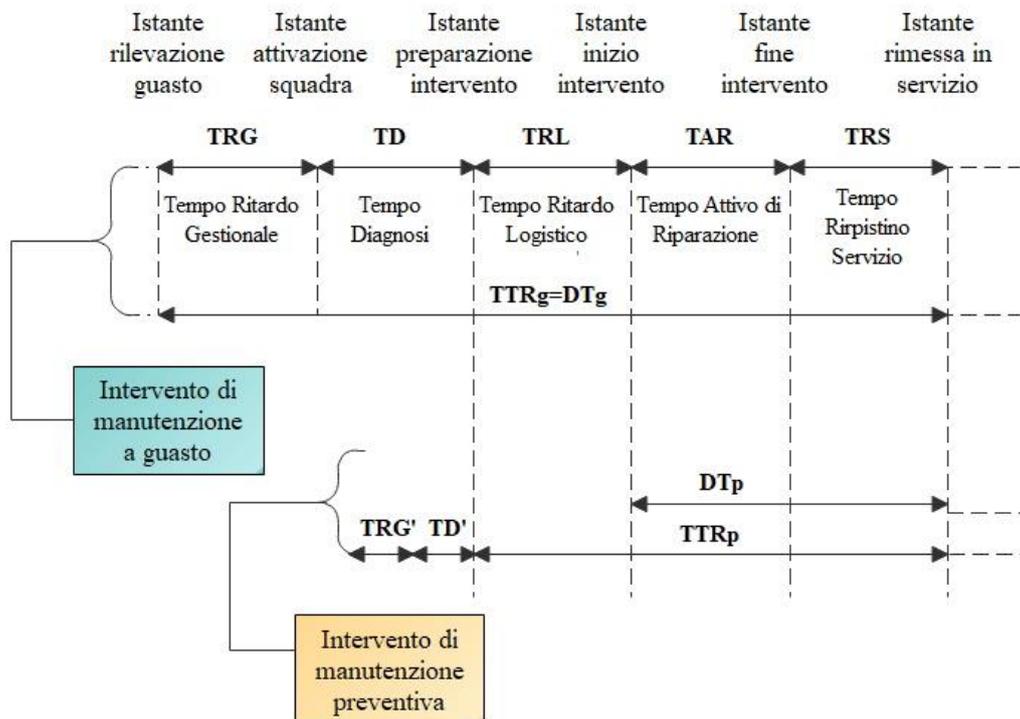


Figura 3-11 Schema dei tempi caratteristici della manutenzione

Si effettua ora una spiegazione dei termini riportati nella figura soprastante.

- Tempo di Ritardo Gestionale (TRG): tempo che intercorre tra la rilevazione del guasto e l'inizio di azioni manutentive; in particolar modo, è dovuto ai tempi amministrativi o logistici preliminari (ad esempio, procurarsi particolari attrezzature atte alla diagnosi dell'elemento guasto), necessari in vista dell'intervento manutentivo da effettuare.
- Tempo di Diagnosi (TD): è il periodo di tempo in cui si effettua l'analisi dello stato dell'entità soggetta a guasto.
- Tempo di Ritardo Logistico (TRL): tempo necessario per compiere le azioni di carattere logistico (attesa di ricambi o altri materiali necessari alla manutenzione), nonché tempo di set-up degli strumenti di manutenzione.
- Tempo Attivo di Riparazione (TAR): periodo in cui si effettua praticamente l'intervento manutentivo.
- Tempo di Ripristino del Servizio (TRS): lasso di tempo per riportare l'entità mantenuta alle sue condizioni operative usuali.

Una prima osservazione va fatta su come questi termini introdotti si differenziano negli interventi di manutenzione preventiva o a guasto: nel primo caso, TRG' e TD' risultano inferiori rispetto al caso a guasto, non essendoci attività di tipo diagnostico e potendo considerare tutte insieme le attività inerenti alla logistica; inoltre, una buona organizzazione del supporto logistico può ridurre il TRL, mentre per quanto concerne il TAR', esso può anche essere minore nel caso di intervento preventivo, avendo la possibilità di preparare meglio le attività da svolgere [7].

Si possono così stimare il tempo totale di riparazione (*Time To Repair*, TTR) nel caso di guasto

$$TTR_g = TRG + TD + TRL + TAR_g + TRS \quad (3-17)$$

e nel caso di intervento preventivo

$$TTR_p = TTRL + TAR_p + TRS + (\text{eventuali piccoli TRG' e TD'}) \quad (3-18)$$

Inoltre, si può valutare il *down-time* DT, che, in caso di guasto, coincide con il TTR, mentre nel caso di intervento preventivo è dato dai soli tempi di TTR e TRS, in quanto l'entità da mantenere è disponibile prima dell'inizio delle azioni di manutenzione, rendendo possibile trascurare i tempi di attesa.

Infine, si possono valutare i tempi medi dei risultati trovati precedentemente, ossia:

- tempo medio di riparazione (*Mean Time To Repair*, MTTR), indice della manutenibilità dell'entità;
- tempo medio di *downtime* (*Mean DownTime*, MDT), che indica, invece, l'efficacia dell'attività di supporto logistico, considerando nel calcolo, in aggiunta rispetto al MTTR, tutti i tempi caratteristici della logistica.

Entrambi questi valori si calcolano considerando la media rispetto agli interventi eseguiti: definiti con m il numero di azioni di manutenzioni intraprese, si ha

$$MTTR = \frac{\sum_i TTR_i}{m}, i = 1, \dots, m \quad (3-19)$$

$$MDT = \frac{\sum_i DT_i}{m}, i = 1, \dots, m \quad (3-20)$$

3.6.3 Disponibilità (*Availability*)

La normativa UNI EN 13306:2018 [10] definisce la disponibilità come “l’attitudine di un’entità ad essere in uno stato atto a funzionare come e quando richiesto, in determinate condizioni, partendo dal presupposto che siano fornite le risorse esterne necessarie”.

La disponibilità risulta quindi essere dipendente dall’affidabilità e dalla manutenibilità, ma anche da altre risorse dette “esterne”, necessarie per lo svolgimento della funzione richiesta all’entità, come definite nel Capitolo 3.4.

3.6.3.1 Calcolo della disponibilità

Definiti il tempo di disponibilità, T_{UP} , e il tempo di indisponibilità, T_{DOWN} , secondo la normativa [10], la disponibilità A si calcola nel modo seguente:

$$A = \frac{\sum T_{UP}}{\sum T_{UP} + \sum T_{DOWN}} \quad (3-21)$$

La disponibilità indica, quindi, la percentuale del tempo in stato di disponibilità dell’entità rispetto al tempo complessivo considerato a calendario, così come definiti nel Capitolo 3.4: date queste definizioni, la A evidenzia le perdite di disponibilità causate solo dal servizio di manutenzione, consentendone una sua valutazione [6].

Altri indici, tra cui l’*Overall Equipment Effectiveness* (OEE), vanno a definire la disponibilità dell’entità considerando anche altre tipologie di perdite, come esposto nel Paragrafo 3.9.

3.6.3.2 Indici della disponibilità

Tuttavia, tenendo in considerazione sia la definizione di disponibilità sopra riportata, sia i concetti sui tempi introdotti nel Paragrafo 3.6.2 dedicato alla manutenibilità, in letteratura ([7],[12]) sono riportati tre differenti modi per la valutazione della disponibilità.

- **Disponibilità intrinseca (*inherent availability*), A_I**

$$A_I = \frac{MTBF(MTTF)}{MTBF(MTTF) + MTTR_g} \quad (3-22)$$

Nel calcolo della disponibilità intrinseca intervengono il MTBF, se l’entità è riparabile, o il MTTF, se l’entità non è riparabile, e il MTTR necessario per compiere l’intervento

manutentivo a guasto. La disponibilità intrinseca indica quindi la disponibilità di un'entità che si lascia guastare, senza compiere alcuna azione di manutenzione differente da quella correttiva.

- **Disponibilità raggiunta (*achieved availability*), A_A**

$$A_A = \frac{MTBM_{g+p}}{MTBM_{g+p} + MTTR_{g+p}} \quad (3-23)$$

La disponibilità raggiunta considera nel calcolo anche tutti gli interventi di manutenzione preventiva, oltre che quelli correttivi; nella sua valutazione intervengono, per tale ragione, il MTBM e il MTTR, entrambi valutati considerando tutte le tipologie di intervento manutentivo.

- **Disponibilità operativa (*operational availability*), A_O**

$$A_O = \frac{MTBM_{g+p}}{MTBM_{g+p} + MDT_{g+p}} \quad (3-24)$$

Anche nella disponibilità operativa si considerano tutte le tipologie di manutenzione, ma, contrariamente alla A_A , al denominatore si introduce il MDT: considerando gli altri tempi caratteristici della manutenibilità, si ha una fotografia più realistica dell'efficacia della manutenzione.

Risulta, tuttavia, sempre utile calcolare i tre indici di disponibilità sopra riportati, in quanto:

- il calcolo della A_I indica quanto le eventuali azioni di manutenzione preventiva adottate risultino efficaci nel mantenimento dell'affidabilità dell'entità, ossia del suo MTBF designato in fase progettuale, nonché se sono effettivamente necessarie politiche manutentive su di essa, le quali potrebbero ridurre il MTTR;
- la A_A valuta l'efficacia delle azioni di manutenzione di carattere preventivo eseguite sull'elemento in esame, mentre il confronto con la A_O consente di apportare le dovute azioni correttive per predisporre di un miglior supporto logistico, atto a ridurre il DT in caso di guasto, agendo su TRG, TD e TRL.

3.6.4 Ulteriori definizioni

Si introducono adesso altre definizioni, utili nel contesto affidabilistico; queste sono:

- *Safety*, intesa come probabilità che non si verifichino guasti pericolosi, ossia guasti che conducano a conseguenze con effetti particolarmente gravi [12]; è intesa, quindi, come sicurezza tecnica.
- *Security*, intesa come attitudine dell'entità esaminata di non subire danni qualora dovesse subire azioni con volontà di nuocere dall'esterno [12].
- Fidatezza (*Dependability*), intesa come “attitudine del sistema a funzionare come e quando richiesto” [10]. Essa risulta, quindi, funzione dell'affidabilità, della manutenibilità, della disponibilità e della sicurezza, intesa come *safety* e *security*.
- RAMS, dato dall'acronimo dei termini *Reliability*, *Availability*, *Maintainability* e *Safety*; nominando quindi il termine RAMS, si fa riferimento a questi quattro argomenti.

3.7 Failure Mode, Effects and Criticality Analysis: FMECA

La *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*, ossia la FMECA, è una modalità di analisi affidabilistica di un sistema. Questa è lo sviluppo della FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), tecnica introdotta dalla NASA negli anni '50 per il programma “Apollo”, e in inizialmente adottata per la progettazione di nuovi sistemi; in seguito, tuttavia, è stata introdotta anche in altri ambiti, tra i quali vi è la manutenzione [9]. Richiami ai concetti della FMECA sono riportati nella normativa UNI 10366:2007 [13], esaltandone le peculiarità e la necessità della sua applicazione per un corretto processo manutentivo.

Obiettivo della FMECA è lo sviluppo di un adeguato piano manutentivo con il fine di controllare l'affidabilità di un sistema, analizzando ogni suo componente [12].

Le differenti fasi per una corretta applicazione della FMECA sono riportate in letteratura ([9], [12]) e vengono elencate nella Tabella 3-4 sottostante.

N° FASE	FASE	Descrizione
1	Scomposizione dell'entità	Scomposizione del sistema nei sottosistemi e quindi nei componenti che lo costituiscono, fino al livello di dettaglio ritenuto opportuno
2	Individuazione dei modi, dei meccanismi e delle cause di guasto	Analisi dei modi, meccanismi e cause di guasto per le entità in esame, ossia nei componenti considerati del sistema
3	Individuazione degli effetti di guasto	Analisi di come il modo di guasto avvenuto vada ad influire sul componente e sul sottosistema a cui appartiene, nonché sul sistema stesso
4	Individuazione dei sintomi e dei metodi di rilevazione del guasto	Dettagliata indagine di come individuare i segnali che indicano la presenza di un guasto e delle metodologie per la loro rilevazione
5	Analisi delle criticità	Per ogni modo di guasto, assegnazione di un indice di criticità, definito secondo la metodologia di valutazione considerata
6	Individuazione delle azioni correttive e pianificazione della manutenzione	Stesura di un piano manutentivo atto a soddisfare l'obiettivo della FMECA, agendo su differenti leve

Tabella 3-4 Fasi della metodologia FMECA

Queste fasi sono approfondite nei paragrafi successivi dal punto di vista teorico, mentre nel Paragrafo 4.4 viene applicata la metodologia FMECA al caso studio e si evidenziano le assunzioni fatte, nonché le fonti da cui sono stati ricavati i dati successivamente elaborati.

3.7.1 Scomposizione dell'entità

L'attività di scomposizione di un'entità può essere eseguita principalmente in due modi [9]:

- in base al grado di severità degli effetti dovuti ai guasti, ovvero alla probabilità di accadimento degli stessi per determinati componenti di un sottosistema;
- secondo un carattere di supporto logistico della manutenzione, ossia si scompone un'entità fino a raggiungere il livello di elementi rimpiazzabili o tenuti sotto controllo.

Si sottolinea come tale attività preveda una conoscenza approfondita del sistema esaminato, che è possibile raggiungere attraverso l'approccio SE.

3.7.2 Individuazione dei modi, dei meccanismi e delle cause di guasto

Per questa fase della FMECA si richiamano i concetti espressi nel Paragrafo 3.4, nel quale, richiamando la normativa UNI EN 13306:2018 [10], sono stati definiti:

- i modi di guasto (*failure modes*), definiti come causa di differenti tipologie di avaria, ossia:
 - parziale (*partial*);
 - intermittente (*intermittent*);
 - totale (*total*).

Definendo in questo modo di guasto, si è specificata la modalità con cui il guasto va ad impattare su una determinata funzione dell'entità esaminata. Tuttavia, in letteratura sono presenti altre descrizioni di modo di guasto, come, ad esempio, la modalità di effettiva manifestazione dello stesso. Si è deciso di adottare la prima definizione, in quanto ritenuta più coerente con la normativa [10] sopra citata.

- i meccanismi di guasto (*failure mechanism*);
- le cause di guasto (*failure causes*).

Per ottemperare adeguatamente a questa fase della FMECA, è necessaria una conoscenza profonda delle funzioni compiute da ogni componente e sottosistema del sistema; quindi, si riscontra nuovamente uno stretto legame tra il SE e la manutenzione, in quanto l'analisi funzionale, nonché disfunzionale, è proprio uno dei temi trattati nel *Systems Engineering* (cfr. Paragrafo 2.4.1). Nella Tabella 3-5 si riporta uno schema esempio di studio dei modi, meccanismi e cause di guasto.

Sistema	Funzione	Componente	Funzione Componente	Modo di Guasto	Meccanismo di Guasto	Causa di Guasto
Sistema 1	Funzione 1	Componente 1	Funzione C 1	Modo 1	Meccanismo 1	Causa 1
		Componente 2	Funzione C 2	Modo 2	Meccanismo 2	Causa 2
		Componente 3	Funzione C 3	Modo 3	Meccanismo 3	Causa 3

Tabella 3-5 Schema esempio di studio dei modi, meccanismi e cause di guasto

3.7.3 Individuazione degli effetti di guasto

Le conseguenze causate da un modo di guasto sono indicate dal termine effetto di guasto.

Gli effetti di guasto possono essere generalmente suddivisi in tre livelli [9]:

- effetto locale (*local effect*): conseguenze sull'entità di livello più basso della scomposizione effettuata;
- effetto superiore (*higher level effect*): conseguenze del guasto di un'entità sulla funzionalità dell'elemento posto a livello di scomposizione superiore a quello considerato;
- effetto finale (*final effect*): conseguenze del modo di guasto sul sistema completo.

Anche in questo caso, è necessaria una approfondita conoscenza del sistema analizzato, per poter indicare come si riversa il guasto di un componente sul livello di scomposizione superiore.

3.7.4 Individuazione dei sintomi e dei metodi di rilevazione del guasto

Successivamente, si passa alla valutazione dei sintomi che caratterizzano il verificarsi di un modo di guasto e la causa ad esso connessa, ovvero una situazione di avvicinamento ad una condizione di guasto. Sia i sintomi che le metodologie di rilevazione degli stessi sono molteplici e nella Tabella 3-6 vengono riportati solo alcuni esempi, tratti da [9].

Sintomo	Metodo di rilevazione
Perdite d'olio, rumore, surriscaldamento, ecc.	Ispezioni sensoriali (non strumentali)
Variazioni della finitura di lavorazione	Ispezioni strumentali, con strumenti non specialistici
Difetti di saldatura	Test mirati sui materiali, come raggi X
Variabili di processo: velocità di rotazione, portata di un fluido, ecc.	Monitoraggio di processo, con strumenti ad esso dedicato
Variabili non di processo: temperature, vibrazioni, ecc.	Monitoraggio diagnostico, con strumenti dedicati

Tabella 3-6 Esempi di sintomi e metodi di rilevazione dei guasti

Si sottolinea che la possibilità di avere a disposizione strumenti di monitoraggio di processo, diagnostico, la capacità di elaborare i dati raccolti o persino segnalare anticipatamente un guasto (prognostica) sono alla base per l'applicazione di una politica di manutenzione preventiva di

tipo *on condition* o predittivo. Sebbene nella trattazione della FMECA del caso in esame vengano individuati gli strumenti idonei per alcune rilevazioni, la descrizione e il funzionamento degli stessi esula dagli obiettivi di questo lavoro di Tesi; perciò, per una loro più approfondita descrizione si rimanda a testi specialistici.

Comp.	Funz. Comp.	Modo di guasto	Meccanismo di guasto	Causa di guasto	Effetto di Guasto			Sintomo	Metodo di rilevazione
					<i>Effetto Locale</i>	<i>Effetto Superiore</i>	<i>Effetto finale</i>		
Comp. 1	Funz. Comp. 1	Modo di guasto 1	Meccanismo di guasto 1	Causa di guasto 1	Effetto Locale 1	Effetto Superiore 1	Effetto Finale 1	Sintomo 1	Metodo di rilevazione 1

Tabella 3-7 Schema esempio di studio di cause, effetti, sintomi e rilevazione per un dato modo di guasto

3.7.5 Analisi delle criticità

Lo step successivo nella trattazione della FMECA è la valutazione dell'indice di criticità (*criticality number*) per ogni causa di guasto; questo parametro è necessario per determinare quantitativamente le conseguenze di un ipotetico guasto sul sistema, ossia valutare il rischio operativo dovuto ad esso, prendendo in considerazione differenti aspetti caratterizzanti il guasto.

In letteratura sono presenti differenti metodologie per la valutazione dell'indice di criticità; nei paragrafi successivi vengono introdotti due tra i metodi più utilizzati in ambito manutentivo: la modalità di calcolo suggerita dalla SAE³ nella normativa SAE J1739 e la valutazione secondo normativa MIL-STD-1639(A) del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti [14].

Infine, nel Paragrafo 3.7.5.3, viene evidenziato il motivo per cui si è adottata la normativa SAE J1739 in questo lavoro di Tesi.

³ Society of Automotive Engineers, ente di normazione nato negli USA, operante nel settore industriale aerospaziale e autoveicolistico (www.sae.org)

3.7.5.1 SAE J1739 ⁴

Nella normativa SAE J1739, l'indice di criticità, definito RPN (*Risk Priority Number*) è calcolato secondo la formula seguente:

$$RPN = O * S * D \quad (3-25)$$

In questa formulazione sono introdotti i termini:

- *O (Occurrence)*, è il parametro che indica la stima di probabilità di accadimento di uno dei guasti;
- *S (Severity)*, è il fattore che sintetizza la severità delle conseguenze di un guasto;
- *D (Detectability)*, è il valore che misura la possibilità di rilevazione di un guasto prima che si verifichi o quando è già avvenuto.

La SAE J1739 propone delle scale di punteggi da attribuire ai tre indici sopra esplicitati.

L'*Occurrence* è valutata in maniera quantitativa secondo tre possibili metodologie: confrontando il MTBF con il tempo di utilizzo richiesto dall'utente, considerando l'affidabilità al tempo T , $R(T)$, oppure basandosi sul numero di guasti avvenuti in ore di funzionamento. I punteggi attribuibili a *O* sono riportati nella Tabella 3-8 sottostante; si noti come il valore assegnato a *O* aumenti all'aumentare della probabilità del verificarsi di un guasto.

⁴ Tutti i riferimenti e le tabelle inerenti a questa normativa sono state tratte da [9].

MTBF / T RICHIESTO DI UTILIZZO	AFFIDABILITÀ $R(T)$	NUMERO DI GUASTI / ORE DI FUNZIONAMENTO	O
MTBF circa 10% del T richiesto di utilizzo	$R(T) < 1\%$	1 [guasto] in 1 [ora]	10
MTBF circa 30% del T richiesto di utilizzo	$R(T) = 5\%$	1 [guasto] in 8 [ore]	9
MTBF circa 60% del T richiesto di utilizzo	$R(T) = 20\%$	1 [guasto] in 24 [ore]	8
MTBF circa pari al T richiesto di utilizzo	$R(T) = 37\%$	1 [guasto] in 80 [ore]	7
MTBF pari a circa 2 volte il T richiesto di utilizzo	$R(T) = 60\%$	1 [guasto] in 350 [ore]	6
MTBF pari a circa 4 volte il T richiesto di utilizzo	$R(T) = 78\%$	1 [guasto] in 1000 [ore]	5
MTBF pari a circa 6 volte il T richiesto di utilizzo	$R(T) = 85\%$	1 [guasto] in 2500 [ore]	4
MTBF pari a circa 10 volte il T richiesto di utilizzo	$R(T) = 90\%$	1 [guasto] in 5000 [ore]	3
MTBF pari a circa 20 volte il T richiesto di utilizzo	$R(T) = 95\%$	1 [guasto] in 10000 [ore]	2
MTBF pari a circa 50 volte il T richiesto di utilizzo	$R(T) = 98\%$	1 [guasto] in 25000 [ore]	1

Tabella 3-8 Tipologie di ranking di O secondo SAE J1739

Per la valutazione della *Severity*, la normativa propone una tipologia di assegnazione del punteggio di carattere misto, quantitativo e qualitativo, come riportato nella Tabella 3-9.

EFFETTO	SEVERITÀ DEL GUASTO	S
PERICOLOSO (SENZA WARNING)	Incide sulla sicurezza degli operatori del personale di manutenzione e/o incide sulla non conformità con le regolamentazioni governative; avviene senza segnali di warning	10
PERICOLOSO (CON WARNING)	Incide sulla sicurezza degli operatori del personale di manutenzione e/o incide sulla non conformità con le regolamentazioni governative; avviene con segnali di warning	9
MOLTO ALTO	<i>Mean Down Time</i> maggiore di 8 ore o produzione di parti difettose per più di 4 ore	8
ALTO	<i>Mean Down Time</i> compreso tra 4 e 8 ore o produzione di parti difettose per un periodo compreso tra 2 e 4 ore	7
MODERATO	<i>Mean Down Time</i> compreso tra 1 e 4 ore o produzione di parti difettose per un periodo compreso tra 1 e 2 ore	6
BASSO	<i>Mean Down Time</i> compreso tra 30 minuti e 1 ora o produzione di parti difettose per un periodo fino 1 ora	5
MOLTO BASSO	<i>Mean Down Time</i> compreso tra 10 e 30 minuti, ma non produzione di parti difettose	4
MENO IMPORTANTE	<i>Mean Down Time</i> fino a 10 minuti, ma non produzione di parti difettose	3
ANCOR MENO IMPORTANTE	Variazione dei parametri di processo non all'interno dei limiti di specifica. RegISTRAZIONI o ulteriori controlli da approntare durante la produzione. <i>Mean Down Time</i> nullo e non produzione di parti difettose	2
NESSUNO	Variazione dei parametri di processo all'interno dei limiti di specifica. RegISTRAZIONI o ulteriori controlli possono essere eseguiti durante la fase di manutenzione	1

Tabella 3-9 Ranking di S secondo SAE J1739

La valutazione della *Detectability* è, invece, prettamente di carattere qualitativo. Nella Tabella 3-10 è riportata la lista dei punteggi assegnabili a seconda della probabilità di rilevazione del guasto.

RILEVAZIONE	PROBABILITÀ DI RILEVAZIONE DEL GUASTO	D
QUASI IMPOSSIBILE	I controlli di design (di processo o diagnostico) o dell'impianto (aggiuntivi) non riescono a rilevare una potenziale causa di guasto e il conseguente modo di guasto o non sono presenti controlli di design o dell'impianto.	10
MOLTO PICCOLA	Probabilità molto piccola che i controlli di design (di processo o diagnostico) o dell'impianto (aggiuntivi) riescano a rilevare una potenziale causa di guasto e il conseguente modo di guasto.	9
PICCOLA	Piccola probabilità che i controlli di design (di processo o diagnostico) o dell'impianto (aggiuntivi) riescano a rilevare una potenziale causa di guasto e il conseguente modo di guasto. Controlli dell'impianto (aggiuntivi) forniscono un'indicazione del guasto avvenuto.	8
MOLTO BASSA	I controlli di design (di processo o diagnostico) o dell'impianto (aggiuntivi) non riescono a prevenire il guasto. I controlli dell'impianto isolano la causa e il conseguente modo di guasto dopo che il guasto stesso è avvenuto.	7
BASSA	Bassa probabilità che i controlli di design (di processo o diagnostico) o dell'impianto (aggiuntivi) riescano a rilevare una potenziale causa di guasto e il conseguente modo di guasto. Controlli dell'impianto (aggiuntivi) forniscono un'indicazione del guasto imminente.	6
MODERATA	Probabilità moderata che i controlli di design (di processo o diagnostico) riescano a rilevare una potenziale causa di guasto e il conseguente modo di guasto. Controlli dell'impianto (aggiuntivi) prevengono il guasto imminente.	5
MODERATAMENTE ALTA	Probabilità moderatamente alta che i controlli di design (di processo o diagnostico) riescano a rilevare una potenziale causa di guasto e il conseguente modo di guasto. Controlli dell'impianto (aggiuntivi) prevengono il guasto imminente.	4
ALTA	Probabilità alta che i controlli di design (di processo o diagnostico) riescano a rilevare una potenziale causa di guasto e il conseguente modo di guasto. Controlli dell'impianto (aggiuntivi) prevengono il guasto imminente e isolano la causa.	3
MOLTO ALTA	Probabilità molto elevata che i controlli di design (di processo o diagnostico) riescano a rilevare una potenziale causa di guasto e il conseguente modo di guasto. Controlli dell'impianto (aggiuntivi) non sono necessari.	2
QUASI CERTA	I controlli di design (di processo o diagnostico) riescono quasi certamente a rilevare una potenziale causa di guasto e il conseguente modo di guasto. Controlli dell'impianto (aggiuntivi) non sono necessari.	1

Tabella 3-10 Ranking di *D* secondo SAE J1739

3.7.5.2 MIL-STD-1629(A)

Un'altra stima della criticità di un guasto è data dalla MIL-STD-1629(A) [14], che propone due possibili approcci per questa valutazione.

- Un approccio detto “qualitativo”, in cui si valutano, per ogni modo di guasto e similmente alle modalità viste nella SAE J1739, un indice di probabilità di accadimento (*Occurrence, O*) dello stesso, e un indice di severità (*Severity, S*) delle conseguenze date dal guasto; nelle Tabelle Tabella 3-11 e Tabella 3-12 sottostanti sono riportati i punteggi assegnati a *O* e *S* seguendo le indicazioni date dallo standard.

PROBABILITÀ DI ACCADIMENTO DI GUASTO	<i>O</i>
Probabilità di accadimento del modo di guasto maggiore del 20% della probabilità di guasto complessiva dell'entità durante la missione	Livello A (frequente)
Probabilità di accadimento del modo di guasto tra il 10% e 20% maggiore della probabilità di guasto complessiva dell'entità durante la missione	Livello B (ragionevolmente probabile)
Probabilità di accadimento del modo di guasto tra il 1% e 10% maggiore della probabilità di guasto complessiva dell'entità durante la missione	Livello C (occasionale)
Probabilità di accadimento del modo di guasto tra il 0.1% e 1% maggiore della probabilità di guasto complessiva dell'entità durante la missione	Livello D (remota)
Probabilità di accadimento del modo di guasto minore dello 0.1% della probabilità di guasto complessiva dell'entità durante la missione	Livello E (estremamente improbabile)

Tabella 3-11 Ranking di *O* secondo MIL-STD-1629(A) [14]

SEVERITÀ DEGLI EFFETTI DI GUASTO	S
Guasto con morte o perdita del sistema	Categoria I (catastrofico)
Guasto che potrebbe causare lesioni importanti, danni severi all'entità o che porterebbe al fallimento della missione	Categoria II (critico)
Guasto che potrebbe causare lesioni minori, minori danni all'entità o che porterebbe a ritardo, perdita di disponibilità o degradazione della missione	Categoria III (marginale)
Guasto non abbastanza severo dal causare lesioni o danni all'entità, ma che condurrebbe ad una azione di manutenzione non pianificata	Categoria IV (minoritario)

Tabella 3-12 Ranking di S secondo MIL-STD-1629(A) [14]

La valutazione finale della criticità viene eseguita sulla matrice di criticità (*criticality matrix*), riportata nella Figura 3-12 sottostante. Ogni modo di guasto si colloca in un riquadro della matrice e, in base alla sua localizzazione, si ha la sua criticità: andando verso valore del ranking di O e S più elevati, la criticità aumenta.

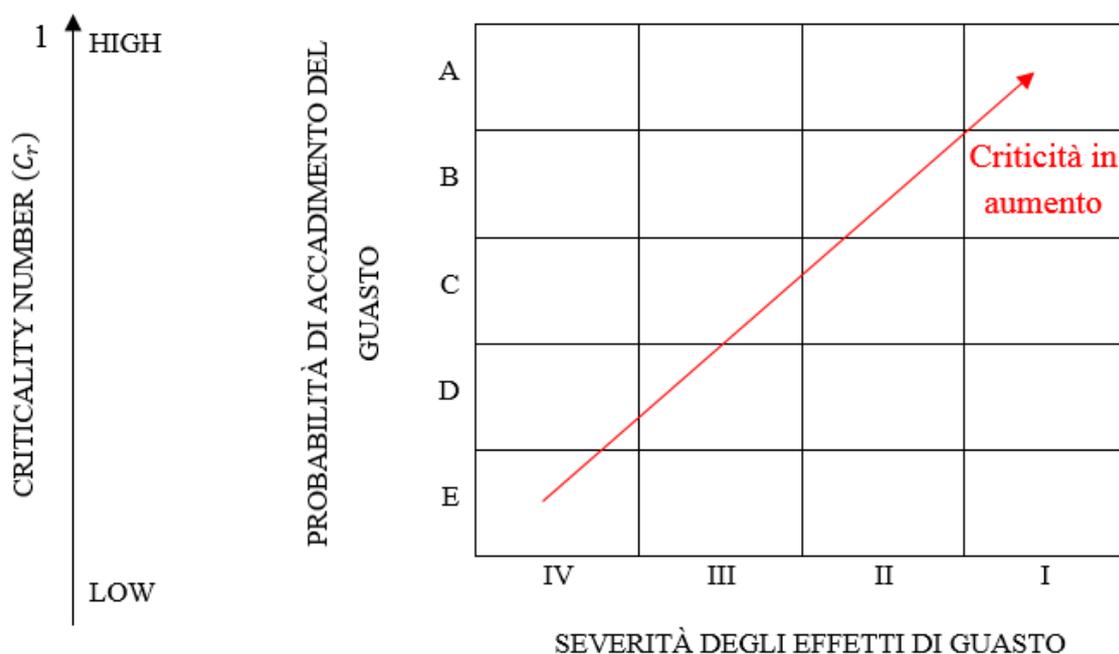


Figura 3-12 Matrice di criticità secondo MIL-STD-1629(A) [14]

- Un approccio detto “quantitativo”, in cui si può calcolare l’indice di criticità secondo la formula

$$C_m = \beta * \alpha * \lambda_p * T \quad (3-26)$$

dove:

- C_m indica l’indice di criticità del modo di guasto;
- β è la probabilità condizionata di accadimento dell’effetto dato dal modo di guasto;
- α indica la frazione del modo di guasto, considerando tutti i modi di guasto dell’entità;
- λ_p è il tasso di guasto dell’elemento;
- T indica la durata della missione.

Noti questi valori, per il singolo elemento del sistema può essere valutato l’indice di criticità (complessivo), C_r :

$$C_r = \sum_j C_{m_j} = \left(\sum_j \beta_j * \alpha_j \right) * \lambda_p * T \quad (3-27)$$

con $j = 1, \dots, m$ indicante i differenti modi di guasto.

In Figura 3-12 viene sovrapposto questo approccio a quello precedente di carattere qualitativo: aumentando l’indice di criticità, aumenta il livello di probabilità di accadimento di un guasto.

3.7.5.3 La scelta della normativa SAE J1739 e dei tassi di guasto

In questo lavoro di tesi si è scelto di adottare la normativa SAE J1739 per la valutazione della criticità, in quanto, nel calcolo dell’RPN, viene coinvolto il termine di *detectability* D ; la normativa, quindi, attribuisce un peso anche alla modalità di rilevazione di una causa guasto, che sia questa una rilevazione precedente o successiva al guasto stesso. Nell’ottica di uno sviluppo di un piano di manutenzione di sistemi complessi, quali le macchine a controllo numerico, la rilevabilità di una causa di guasto assume un ruolo fondamentale per l’attuazione delle misure opportune, atte a garantire una corretta manutenzione dell’entità: vi è una notevole differenza tra la possibilità di disporre e di elaborare in tempo reale i segnali provenienti da un

sistema, avendo così la capacità di individuare i sintomi di una causa di guasto, rispetto a poter solo ispezione a cadenze prefissate il sistema stesso.

Anche la *detectability* va, quindi, ad incidere sulla manutenzione e la normativa SAE J1739, come sottolineato, ne tiene opportunamente in conto.

Inoltre, si evidenzia come sia necessario possedere i valori dei tassi di guasto λ di un elemento nella valutazione della sua criticità. Tuttavia, molte volte non si hanno a disposizione sufficienti dati storici per una sua valutazione, ovvero l'entità esaminata è nuova. Per tale ragione, si ricorre all'utilizzo di banche dati dei tassi di guasto⁵. In questo lavoro di Tesi si è fatto riferimento alle fonti [15] e [16] per ricavare questi dati.

Questi tassi di guasto sono in riferimento alla vita utile dell'elemento considerato (cfr. al Paragrafo 3.6.1.1) e sono quelli utilizzati nell'analisi FMECA; sebbene si sia consapevoli che in questa fase predominino guasti di tipo casuale, essi vengono considerati per cause di guasto anche differenti.

3.7.5.4 Valutazione degli RPN

A valle del calcolo degli indici di criticità, si passa ad una loro prima valutazione, andando ad individuare gli RPN con valore superiore ad un determinato valore stabilito, detto "valore soglia". Una tipologia di analisi utilizzabile può essere quella di Pareto, che mette in risalto gli indici più alti e le rispettive cause di guasto.

Con lo step successivo, si procede in modo prioritario all'individuazione di risposte adeguate per ridurre gli RPN superiori al limite stabilito, e, secondariamente, anche nel tentare di diminuire il valore di indici più bassi, ove fosse possibile [9].

3.7.6 Individuazione delle azioni correttive e pianificazione della manutenzione

Trovati gli RPN su cui intervenire, si possono attuare differenti azioni correttive atte a diminuire il valore dell'indice di criticità per quella determinata causa di guasto; di seguito, vengono riportate alcuni esempi di interventi effettuabili per giungere allo scopo.

⁵ La FMECA è stata originariamente introdotta per uno studio affidabilistico di un sistema dalla fase di progetto; perciò, non potendo esistere uno storico dei dati per sistemi da progettare, le banche dati dei tassi di guasto risultano fondamentali.

- Si può diminuire il valore dell'*Occurrence*; ciò implica il tentativo di aumentare l'affidabilità del componente, agendo su leve direttamente connesse a questa proprietà, come il MTBF. Questo obiettivo può essere raggiunto cercando di eliminare le cause di guasto sistematiche o apportando delle modifiche significative al sistema, come la possibilità di avere ridondanza di un componente.
- Si può ridurre il valore della *Severity*, agendo, ad esempio, sulla riduzione del MDT; diminuire il numero degli interventi a guasto su un'entità, favorendo una politica di manutenzione preventiva e associando un adeguato supporto logistico, può aiutare nel perseguimento di questo scopo. Anche disporre di un sistema di controllo prognostico, avvertendo in anticipo del verificarsi di un guasto, può aiutare nella riduzione dei tempi precedenti il TAR (cfr. Paragrafo 3.6.2.2).
- Si può agire sulla *Detectability*, introducendo nuove tipologie di ispezione, migliorando la tecnologia per la realizzazione dei controlli già presenti o avvalendosi di sistemi prognostici.

Si osservi, però, che sono anche necessarie attente valutazioni di carattere tecnico-economico per le eventuali attuazioni di azioni correttive; alcuni interventi, infatti, potrebbero richiedere budget molto elevati o tempi molto lunghi per la loro realizzazione.

Al termine di una FMECA, si ottiene il piano di manutenzione, dato dall'insieme di tutte quelle azioni proposte per ridurre l'incidenza di criticità, come, ad esempio, ispezioni, pulizie, sostituzioni preventive o lubrificazioni [9].

3.7.7 Scheda FMECA SAE J1739

Tutte le informazioni ricavate nei passi per lo svolgimento della FMECA secondo SAE J1739 vengono riportate in una scheda dedicata, di cui si fornisce un esempio nella Tabella 3-13.

SCHEDA FMECA										
<u>ID Macchina</u>			<u>ID Sistema</u>				<u>Revisione</u>			
<u>Macchina</u>			<u>Sistema</u>				<u>Autore</u>			
<u>Matricola</u>			<u>ID Sottosistema</u>				<u>Data Creazione Scheda</u>			
<u>Tipologia</u>			<u>Sottosistema</u>				<u>Data Modifica Scheda</u>			

Campi derivanti da Tabella 3-7	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	Tasso di guasto λ	O	S	D	R P N	Azioni Raccomandate	Risultati				
									Azioni Intraprese	O	S	D	R P N
Zona di Analisi								Zona di Azione					

Tabella 3-13 Esempio di una scheda FMECA

Nell'intestazione della scheda vengono riportate le informazioni generali relative alla macchina, l'identificazione del sistema e dell'eventuale sottosistema in esame, la revisione della scheda, l'autore, la data di creazione e di modifica della scheda. Nel corpo della scheda si riportano le informazioni principali derivate dall'analisi FMECA per ogni componente; si evidenzia la presenza di due zone di lavoro:

- una “zona di analisi”, in cui si riportano effettivamente le informazioni derivate dalla FMECA, tra cui il modo di guasto, la causa e il meccanismo dello stesso, la valutazione degli effetti, tutte le attuali azioni di prevenzione e rilevazioni eseguite sul componente in esame, nonché i punteggi di *O*, *S* e *D* attribuiti e, infine, l'RPN attuale della macchina;
- una “zona di azione”, dove vengono indicate le azioni raccomandate per il miglioramento dell'indice di criticità, quelle effettivamente intraprese e i nuovi valori di *O*, *S* e *D* derivanti da queste azioni di miglioramento individuate. Si può quindi inserire il nuovo RPN calcolato.

Come riportato in [9], si possono inserire ulteriori informazioni nella scheda FMECA per SAE J1739, in particolar modo si possono indicare i responsabili del servizio manutentivo o, per il singolo modo di guasto, segnalare la data completamento prevista per l'esecuzione di un'azione di miglioramento.

Nel lavoro di Tesi effettuato, la FMECA presenta una struttura grafica differente per motivi di layout di impaginazione.

3.7.8 Il motivo della scelta della FMECA

In Tabella 3-14 è riportata una comparazione tra le differenti tecniche per la *Root Case Analysis* (RCA), ossia l'individuazione della causa di un guasto, tratta da [17]. Sebbene questo argomento esuli dalla trattazione in corso, è opportuno individuare le peculiarità della FMECA (lo studio riporta la FMEA, ossia una FMECA senza valutazione della criticità)

RCA Metodologia / Livello della caratteristica	Capacità di definizione del problema	Facilità d'uso	Requisiti di informazione	Dipendenza dalla esperienza	Consumo di tempo e di risorse	Definizione di tutte le relazioni causali	Percorso previsto per la <i>Root Cause</i>	Spiegazione della prevenzione al guasto data dalle soluzioni applicate	Capacità di includere l'errore umano	Capacità di prevedere eventi futuri
Cause and Effect Analysis	High	✓	✓		✓				✓	
	Low			✓	✓	✓	✓	✓		✓
HAZOP	High	✓		✓	✓	✓		✓		
	Low		✓				✓		✓	✓
Bayesian Networks	High	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓
	Low		✓		✓				✓	
FMEA	High	✓	✓		✓		✓			
	Low			✓		✓		✓	✓	✓
Fault Tree Analysis	High	✓	✓	✓		✓	✓	✓		
	Low				✓	✓			✓	✓

Tabella 3-14 Comparazione tra le tecniche di RCA [17]

Si può notare come, a discapito di un processo con consumo elevato di risorse e tempo, la FMEA dia un'alta definizione del problema con il pregio di essere anche facilmente implementabile. Inoltre, è evidenziata una dipendenza del processo dall'esperienza: la FMEA

o FMECA, infatti, viene efficacemente sviluppata con un'attività di gruppo tra differenti figure professionali, che assicura una molteplicità di punti di vista e competenze, tali da poter il più possibile dettagliare l'analisi stessa. Purtroppo, non sono individuabili con questa tecnica né i possibili errori umani, né eventi futuri.

In conclusione, la FMECA è uno strumento utile come step iniziale per una approfondita analisi affidabilistica di un sistema, ma anche come una futura base per la RCA. Per il lavoro di Tesi, le peculiarità della FMECA sono state ritenute positive ai fini del raggiungimento degli obiettivi ed è stata adottata questa tecnica, sebbene si sia consapevoli che dovrebbe essere sempre accompagnata dalle altre metodologie di analisi, che consentirebbero di superare i limiti della FMECA.

3.8 I costi della manutenzione

L'attività manutentiva, sebbene sia necessaria per il corretto svolgimento delle operazioni in azienda, ha un suo costo. In questo capitolo si procede, quindi, ad una sintesi dei costi possibili legati alla manutenzione, necessaria per avere una visione globale dell'argomento.

Facendo riferimento anche in questo caso alla normativa UNI, in particolare alla UNI 10992:2002 [20], i costi di manutenzione possono essere ripartiti in:

- costi di manutenzione straordinaria, ossia quella “tipologia di interventi non ricorrenti e d'elevato costo in confronto al valore di rimpiazzo del bene o ai costi annuali di manutenzione ordinaria” [20];
- costi di manutenzione ordinaria, a loro volta suddivisibili in:
 - costi propri, i quali possono essere diretti, se riferiti alla manodopera aziendale, alle prestazioni attuate da aziende esterne o ai materiali necessari, oppure indiretti, se riferiti alla spesa necessaria per il mantenimento generale della struttura organizzativa della manutenzione [7];
 - costi indotti, ossia tutti quei costi che sono dovuti alla mancata erogazione del servizio (mancata produzione e mancato utilizzo di manodopera non impiegata per altri scopi), alla mancata qualità del prodotto, alle inefficienze del processo e agli eventuali costi di sicurezza [7].

Una buona pratica manutentiva deve anche analizzare attentamente gli effetti delle azioni da essa eseguite sui costi, in modo tale da scegliere le soluzioni più adeguate non solo dal punto di vista tecnico, ma anche economico.

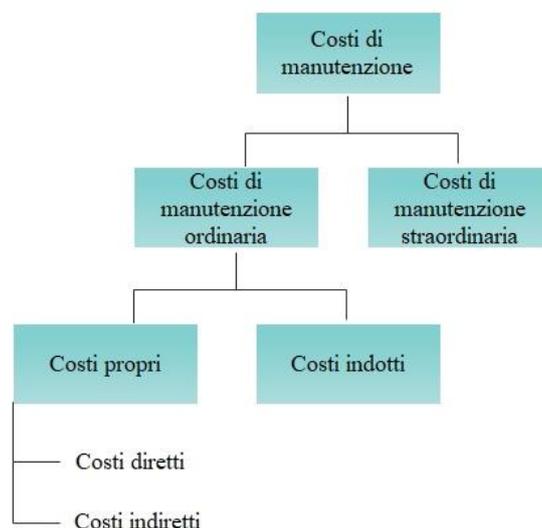


Figura 3-13 Tipologie dei costi di manutenzione

3.9 I *Key Performance Indicator* (KPI)

Al fine di valutare quantitativamente il raggiungimento degli obiettivi prefissati dall'attività di manutenzione, di cui si è argomentato nel Paragrafo 3.2, si introducono degli indicatori di prestazione (*Key Performance Indicator*, KPI).

In letteratura [18] e nelle normative UNI (cfr. normativa UNI EN 15341:2019) sono riportate le modalità di definizione di differenti KPI. In questo lavoro di Tesi, tenendo presente i dati a disposizione per le analisi, si è deciso di prendere in considerazione i seguenti parametri:

- *MTTR*, per valutare il tempo medio di esecuzione dell'intervento di manutenzione;
- *MTBF* (*MTTF*), al fine di valutare il tempo medio tra due guasti successivi, considerando sia entità riparabili che non;
- *MDT*, indicante il tempo medio di *down-time* della macchina;
- *MTBM*, per valutare il tempo medio tra due interventi successivi, siano essi sia programmati che non;

- *PMP*, ossia la Percentuale di Manutenzione Preventiva (*Preventive Maintenance Percentage*), indice dell'efficienza dell'attività di manutenzione preventiva, che ha come scopo quello di evitare il più possibile guasti accidentali;
- A_I , valutando così la disponibilità intrinseca dell'entità;
- A_A , per indicare quanto vadano ad incidere gli interventi di manutenzione programmata sull'efficienza dell'attività manutentiva;
- A_O , indice di come le attività correlate alla manutenzione vadano ad incidere sulla stessa;
- *OEE*, *Overall Equipment Effectiveness*, parametro caratterizzante l'analisi secondo i principi del TPM. Con questo parametro si tengono in conto tutte le perdite del sistema, ossia tutte quelle attività che non riescono a far percepire al cliente il valore da esse prodotto [9].

La valutazione dell'OEE è effettuata tramite la seguente formula⁶:

$$OEE = A * P * Q \quad (3-28)$$

dove si indicano i termini:

- *A*, *availability*, quindi la disponibilità del sistema. Nell'analisi effettuata viene presa in considerazione la disponibilità operativa;
- *P*, *performance*, parametro che considera tutte le perdite dovute a rallentamento del ciclo o piccole fermate;
- *Q*, *quality*, indice delle perdite dovute alla mancanza di qualità del prodotto.

Per tenere sotto osservazione questi parametri, la normativa UNI EN 15341:2019 [20] propone l'utilizzo di un *radar diagram*, tipologia di grafico usato per la rappresentazione dei KPI in questa Tesi (cfr. Figura 4-5)

⁶ Formula riportata sul sito www.oee.com

4 Il caso studio LMA

4.1 L'Azienda LMA

4.1.1 Presentazione dell'azienda

LMA è un'Azienda che si occupa della realizzazione di componenti meccanici ad altissima precisione per il mondo dell'aeronautica e dell'aerospazio, sia di ambito civile che militare.

Fondata nel 1970 da Giuseppe Boscolo e dalla moglie Oriana Fazioni, LMA, attualmente situata a Pianezza (TO), oggi è guidata da Fulvio e Cristina Boscolo e ha costantemente ampliato il proprio mercato di riferimento.

La filosofia di LMA si basa su tre principi: massimi livelli di prestazioni e qualità, massima competenza e professionalità e costante attenzione all'innovazione; ciò ha consentito di raggiungere un considerevole livello di *know-how* produttivo e di operare sempre con tecnologie di ultima generazione, oltre che diventare punto di riferimento per clienti nazionali ed internazionali.

I prodotti realizzati sono tra i più vari: parti strutturali dell'ala, come centine o longheroni, e parti della fusoliera, come *bulkhead* o *ring*, sono solo alcuni esempi degli elementi complessi lavorati.

In Tabella 4-1 e Tabella 4-2 vengono riportate le macchine utensili ad alta precisione di cui l'azienda dispone, le macchine di misura e per processi termici, nonché le loro caratteristiche principali.

<i>Produttore</i>	<i>Modello</i>	<i>Numero di Assi</i>	<i>Numero di Mandrini</i>
MCM	TANK 1300	5	1
MCM	TANK 1300	5	1
OMV	ACTIVE 4000 LINEAR XL	5	1
OMV	ACTIVE 4000	5	1
PARPAS	P18-A	3 + 2	1
HERMLE	C1200	5	1
FIDIA	K411	5	1
FIDIA	K411	5	1
PARPAS	XS63	5	1
PARPAS	XS63	5	1
PARPAS	XS63	5	1
PARPAS	XS83	5	1
FPT	DINOMAX SCUDERIA	5	1
MATSUURA	H-PLUS630	4	1
MATSUURA	H-PLUS800	4	1
FOREST	FV3	3	3
PARPAS	BF134NC	3	4
MORI SEIKI	NV5000 A	3	1
MORI SEIKI	NV5000 B	3	1

Tabella 4-1 Macchine utensili presenti in LMA

MACCHINE DI MISURA

<i>Produttore</i>	<i>Modello</i>	<i>Numero di Assi</i>	<i>Numero di Sonde</i>
DEA	DELTA 4507	5	1
DEA	DELTA SLANT PERFORMANCE C.R. - 358020	3	1
DEA	IOTA 1203 - DIAMOND	5	1

FORNO

<i>Produttore</i>	<i>Modello</i>	<i>Potenza [kW]</i>	<i>Max. Capacità di Carico [kg]</i>
SAT	SAT 2200-10	78	200

Tabella 4-2 Macchine di misura e forno presenti in LMA

Gli ulteriori punti di forza utilizzati da LMA per il conseguimento della sua *mission* sono:

- reparto dedicato all'assemblaggio dei componenti;
- il sistema informatico Infor[®], software di gestione e controllo del processo produttivo (*Enterprise Resource Planning*, ERP), che consente l'integrazione completa tra i differenti reparti aziendale;

L'attenzione di LMA alla qualità ha portato al conseguimento delle certificazioni secondo la normativa UNI EN ISO 9001:2015, in merito ai sistemi di gestione per la qualità, e la UNI EN 9100:2018, per i sistemi di gestione della qualità per organizzazioni del settore dell'aeronautica, dello spazio e della difesa.

Infine, l'apertura all'innovazione ha portato l'azienda ad affacciarsi nel mondo dell'Industria 4.0 e del *lean manufacturing*: sono in sviluppo progetti inerenti all'ambito dell'*addictive manufacturing* e si è adottata la tecnica delle 5S, uno degli strumenti atti alla realizzazione degli scopi del *lean manufacturing* (cfr. Paragrafo 3.1). Dal punto di vista della manutenzione, si è introdotta la TPM, favorendo lo sviluppo dell'attività di automanutenzione, oltre che di comunicazione e integrazione dei processi produttivi con la manutenzione stessa.

La macchina esaminata in questo lavoro di Tesi è la Fidia K411, che viene identificata con la matricola n°1 per la trattazione, un centro di fresatura a 5 assi dotata di testa birotativa, che

consente la movimentazione secondo i cinque gradi di libertà. Le caratteristiche tecniche principali vengono riportate in Tabella 4-3.



Figura 4-1 Fidia K411 (www.fidia.it)

Dati tecnici K411					
Dimensioni			Corse degli assi lineari		
X	Y	Z	X	Y	Z
7400 mm	4640 mm	4540 mm	4200 mm	1100 mm	1000/1400 mm
Velocità degli assi lineari			Tavola portapezzo		
X	Y	Z	Dimensioni	Portata massima	
50 m/min	40 m/min	30 m/min	5000 x 1500 mm	32000 kg	
Precisione di posizionamento X Y Z			Magazzino utensili: numero posizioni		
± 0,0075 ± 0,005 ± 0,004 mm			42-84		
Peso					
32000 kg					

Tabella 4-3 Dati tecnici della Fidia K411 (www.fidia.it)

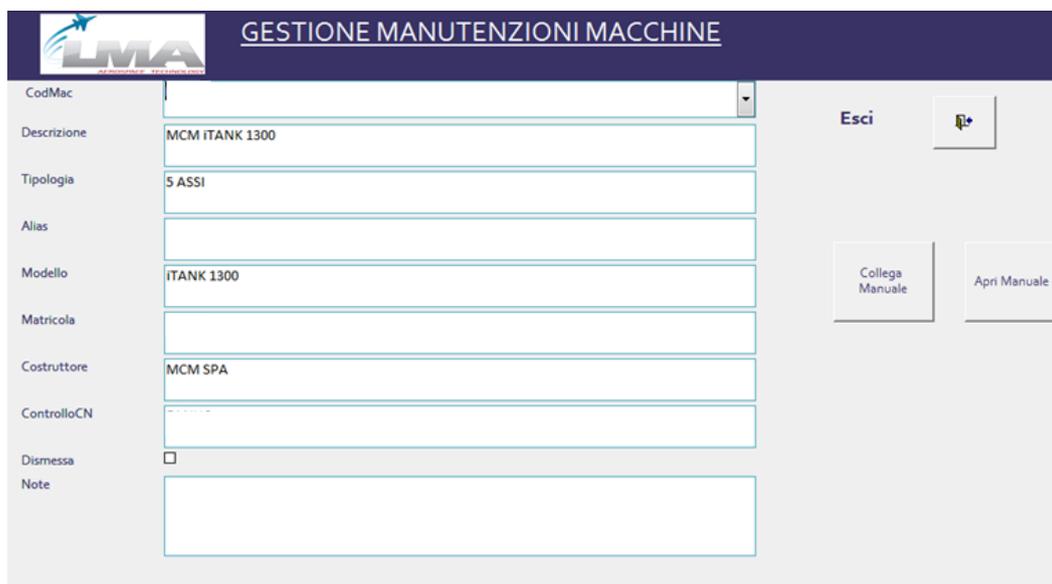
Si procede, di seguito, ad una disamina dello status “*as is*” della manutenzione in LMA, valutando le prestazioni dal punto di vista manutentivo della Fidia K411; quindi, si effettua

tutto lo studio applicando dapprima l'approccio SE e poi la FMECA, per giungere alla proposta di un nuovo progetto di manutenzione preventiva.

4.2 Status “as is” della manutenzione in LMA

4.2.1 Descrizione della gestione della manutenzione macchine

In LMA, il processo di manutenzione è gestito da un database dedicato. Ogni macchina ha una maschera apposita, caratterizzata da una zona superiore in cui è presente l'anagrafica della stessa e contenente le informazioni principali: il codice identificativo della macchina, la descrizione, la tipologia (secondo i gradi di libertà che la definiscono), il modello e la matricola sono i più significativi.



The screenshot displays the 'GESTIONE MANUTENZIONI MACCHINE' interface. On the left, a vertical list of fields is shown: CodMac, Descrizione, Tipologia, Alias, Modello, Matricola, Costruttore, ControlloCN, Dismissa, and Note. The corresponding values are: CodMac (empty), Descrizione (MCM ITANK 1300), Tipologia (5 ASSI), Alias (empty), Modello (ITANK 1300), Matricola (empty), Costruttore (MCM SPA), ControlloCN (empty), Dismissa (checkbox), and Note (empty). On the right side, there are buttons for 'Esci', 'Collega Manuale', and 'Apri Manuale'.

Figura 4-2 Maschera di gestione manutenzione macchina – anagrafica

Nella parte inferiore della maschera, invece, vengono riportati gli interventi di manutenzione per guasti accidentali eseguiti da aziende esterne, di cui si riportano le seguenti informazioni:

- tipo di intervento (con possibile scelta tra meccanico, idraulico, elettrico o altro);
- descrizione dell'intervento effettuato;
- data e ora di segnalazione del guasto;
- percentuale di funzionamento macchina dal momento di segnalazione del guasto;

- data e ora di inizio e fine dell'intervento manutentivo;
- conferma di completamento dell'intervento;
- ditta esecutrice dell'intervento correttivo;
- costo dell'intervento;
- rapporto tecnico dell'intervento eseguito.

Infine, vi sono collegamenti alle schede di manutenzione preventiva, suddivise in:

- *servicing*, con cui si intendono tutte quelle operazioni di routine, con cadenza che può andare dal giornaliero al mensile, che possono essere eseguite dall'operatore macchina. Sulle schede ad essa dedicata, sono riportate superiormente le informazioni principali di identificazione della macchina, mentre nel corpo centrale vengono riportate l'area di intervento su cui va eseguita l'attività manutentiva, la descrizione di quest'ultima, l'eventuale riferimento al manuale della macchina su cui è indicato come eseguire l'operazione e la frequenza con cui deve essere eseguita. Infine, l'operatore può riportare le anomalie di funzionamento della macchina eventualmente notate in una sezione dedicata;

LMA S.r.l.		SCHEDA MANUTENZIONE ORDINARIA MACCHINA		
Macchina	FIDIA C20	Tipo	5 assi	Id
Manutenzione	SERVICING	Anno		Matricola
		Mese		Esecuzione OPERATORE MACCHINA
Area intervento	Descrizione intervento	Rif. Man.	Frequenza	
Mandrino	Pulizia e controllo dell'interno del cono		Giornaliera	
Globale	Compilazione checklist 5S			
Olio Emulsivo TRIM 585 XT	Controllo percentuale		1 settimana	
Sistema lubrificazione minimale aria-olio utensili	Verifica quantità olio nel serbatoio			
Sensori di livello vasca alta pressione	Controllo e pulizia			
Trasportatore automatico di trucioli	Controllo visivo e pulizia generale			2 settimane
Superfici trasparenti ripari antinfortunistici	Pulizia delle superfici in policarbonato			

Figura 4-3 Esempio di scheda di *servicing*

- manutenzione preventiva ciclica, con cui si indicano tutte le azioni di manutenzione prestabilite, con intervalli di tempo variabili dai tre mesi ai due anni. Queste attività possono essere eseguite o dal personale LMA addetto a tali compiti o da aziende esterne. Le schede ad essa dedicate sono suddivise in base alla frequenza dell'intervento, che

viene riportata superiormente, insieme alle informazioni principali della macchina e al tempo standard previsto per l'esecuzione della manutenzione stessa; quindi, la parte centrale della scheda riporta la checklist delle attività da eseguire,

LMA S.r.l.		SCHEDA MANUTENZIONE ORDINARIA MACCHINA						
Macchina		FIDIA C20		Tipo	5 assi	Id	Matricola	
Manutenzione		C1	Frequenza	6 MESI	Tempo standard	3 h	Esecuzione	INTERNA

Area intervento	Descrizione intervento	Rif. Man.	Esito (OK, NO)	Azioni eseguite	Note, problemi non risolti, azioni da fare	Firma Operatore
Centralina lubrificazione aria-olio cuscinetti mandrino	Controllo livello olio e manometro pressione aria					
Centralina comando sbloccaggio utensile	Controllo livello olio					
Centralina comando blocc-sblocc assi A e C	Controllo livello olio					
Mandrino	Ingrassaggio della pinza di bloccaggio del portautensili					
Trasportatore automatico di trucioli	Ingrassaggio e verifica del dispositivo di arresto					

Figura 4-4 Esempio di scheda di manutenzione preventiva ciclica

L'attività di gestione della manutenzione è eseguita dal Responsabile della manutenzione macchine, il quale provvede a:

- redigere le schede di manutenzione delle macchine;
- contattare i fornitori per l'acquisto dei materiali necessari;
- contattare le aziende esterne per interventi di manutenzione correttiva;
- aggiornare le informazioni contenute nel database dedicato alla manutenzione;
- controllare i KPI manutentivi che è possibile osservare con gli strumenti a disposizione;
- realizzazione e controllo del budget di manutenzione.

4.2.2 Valutazione della gestione della manutenzione e analisi delle prestazioni

Avendo esposto le modalità di gestione della manutenzione, si procede ora con una valutazione generale della stessa e con l'analisi delle prestazioni, tramite calcolo dei KPI.

Si sottolinea che questo step è mirato alla successiva realizzazione di una nuova politica manutentiva di carattere preventivo per la macchina in esame; quindi, le osservazioni si riferiscono alla realizzazione di tale obiettivo, mentre il lavoro di Tesi esula dalla trattazione di ulteriori valutazioni.

Innanzitutto, si sottolinea la presenza del *servicing*, fase della manutenzione preventiva che consente l'attuazione pratica dell'automanutenzione, uno degli elementi fondanti la TPM; inoltre, viene messa in risalto anche all'applicazione della tecnica 5S, già attuata in azienda, come presentato in precedenza.

Tuttavia, le schede di manutenzione elaborate si basano su un'integrazione delle indicazioni fornite dall'azienda costruttrice della macchina nel manuale [19], ma la loro realizzazione non è preceduta da un'analisi di carattere affidabilistico del sistema effettuata in azienda (ma eseguita certamente in fase di progettazione dalle aziende produttrici), al fine di individuare criticità presenti nel contesto aziendale.

Per questo motivo, l'introduzione della FMECA risulta necessaria per dare una visione critica della politica di manutenzione adottata.

Dapprima viene, però, effettuata una stima delle performance della manutenzione, utilizzando i dati estrapolabili dal database inerenti alla macchina in esame, presentati in Appendice A, e prendendo in considerazione il periodo tra il 2016 e il 2019: elaborando queste informazioni secondo le definizioni riportate nei capitoli precedenti (in Appendice B) vengono riportati i risultati intermedi), si sono ottenuti i KPI della manutenzione secondo calendario operativo, riferiti alla macchina analizzata (Tabella 4-6). Inoltre, ulteriori dati necessari alla valutazione delle performance manutentive vengono riportati nella Tabella 4-4 sottostante.

<i>Informazioni sulla manutenzione preventiva ciclica</i>		
Tipologia	Tempo stimato [h]	N° esecuzioni l'anno
<i>Semestrale</i>	3	2
<i>Annuale</i>	5	1
<i>Servicing totale</i>	50	
<i>Parametri aggiuntivi assegnati per la valutazione del OEE</i>		
<i>Performance factor P</i>		0.940
<i>Quality Factor Q</i>		0.995
<i>Ore giornaliere di lavoro</i>		
<i>Giorni feriali [h]</i>	20 (di cui 4 non presidiate)	
<i>Sabati lavorativi [h]</i>	4	

Tabella 4-4 Dati aggiuntivi necessari alla valutazione dei KPI

	2016	2017	2018	2019	TOT (16/19)
<i>Numeri interventi manutenzione correttiva</i>	6	8	11	16	41

Tabella 4-5 Numero di interventi di manutenzione per guasti avvenuti nel periodo 2016-2019

KPI	2016	2017	2018	2019	TOT (16/19)
<i>MTTRg [h] x2</i>	80.92	50.75	40.55	12.53	37.51
<i>MTTRg+p [h] x2</i>	58.17	38.91	33.43	11.71	35.45
<i>MTBF(MTTF) [h] /10</i>	71.60	78.47	52.25	38.40	55.60
<i>MDT [h]</i>	32.64	23.09	25.29	14.49	26.00
<i>MTBM [h] /10</i>	80.87	76.97	54.84	37.26	56.64
<i>PMP [%]</i>	20.08	23.11	21.48	37.83	24.09
<i>AI [%]</i>	94.65	96.87	96.26	98.39	96.74
<i>AA [%]</i>	96.53	97.53	97.04	98.45	96.97
<i>AO [%]</i>	96.12	97.09	95.59	96.26	95.61
<i>OEE</i>	89.90	90.81	89.41	90.03	89.43

Tabella 4-6 Stima dei KPI manutentivi valutati nel periodo 2016-2019

I risultati, opportunamente scalati per questioni grafiche, sono anche riportati in forma di *radar diagram* in Figura 4-5, rappresentazione indicata dalla normativa UNI EN 15341:2019.

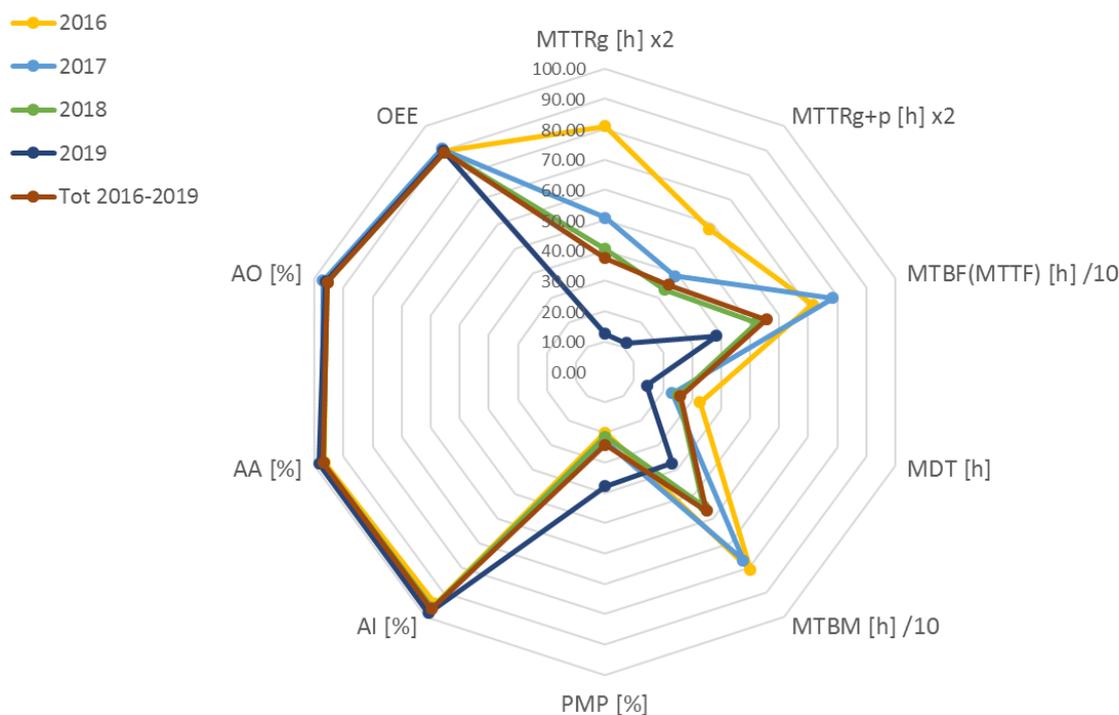


Figura 4-5 Radar diagram dei KPI della manutenzione per la Fidia K411, secondo UNI EN 15341:2019

I calcoli sono stati effettuati considerando l'intervento correttivo nell'anno in cui lo stesso si è attuato, non quando c'è stata la segnalazione; per quanto riguarda la manutenzione preventiva ciclica adottata in azienda, è stata effettuata ipotizzandola in simultanea ad uno degli interventi a guasto di cui sopra. Inoltre, non si è fatta distinzione tra elementi riparabili e non; perciò, si è ricavato un unico KPI di MTBF (MTTF).

Dalle stime riportate precedentemente, si può notare la grande variabilità su base annua dei parametri osservati; in generale, si osserva che nel tempo il MTTR si è ridotto, così come il MTBF, ossia si sono verificati sempre più un maggior numero di interventi (cfr. Tabella 4-5), ma di minor impatto di fermo macchina; ciò è confermato anche dalla riduzione del MDT nel corso degli anni. Il peso degli interventi a guasto è comunque molto più rilevante delle ore di manutenzione eseguite preventivamente: la Percentuale di Manutenzione Preventiva, PMP, è infatti nettamente minore al 50%. Ciò si riversa anche sulla disponibilità, in quanto viene leggermente intaccata la disponibilità intrinseca del sistema, sebbene i livelli di disponibilità ottenuta, operativa e OEE permangano elevati.

4.3 Applicazione del *Systems Engineering*

4.3.1 Motivazioni e modalità di implementazione del SE

Riprendendo la definizione del SE riportata nel Paragrafo 2.1, esso indica un approccio adottato fin dall'inizio della progettazione di un sistema, al fine di avere una visione completa dello sviluppo dello stesso. In questo lavoro di Tesi, tuttavia, gli strumenti del SE vengono adottati per una macchina a controllo numerico già realizzata. Si è deciso di effettuare ciò per due ragioni principali:

- la prima ragione è che, in previsione di redigere un piano manutentivo dedicato una macchina a controllo numerico a valle di una FMECA, obiettivo principale della Tesi, una completa *functional analysis* è certamente di supporto per la compilazione delle schede ad essa dedicate, come spiegato nel Paragrafo 2.4.4;
- il secondo motivo è dato dai possibili sviluppi futuri che possono esserci adottando gli strumenti tipici del SE.

Come già detto, la macchina a controllo numerico studiata è stata già realizzata e operativa. Per tale ragione, come primo step si è eseguita una scomposizione logica del sistema, avendo a disposizione il manuale fornito dal costruttore [19]; quindi, si è provveduto alla realizzazione dell'analisi funzionale, con l'allocazione delle funzioni sulle componenti logiche.

Il risultato finale è stato l'ottenimento delle architetture funzionali e logiche, in cui sono evidenziate le connessioni tra i vari livelli di scomposizione.

Facendo riferimento al Paragrafo 3.7.1, nel caso in esame si è preferito adottare una scomposizione del sistema considerando il supporto logistico della manutenzione, giungendo così al livello più basso di elementi sostituibili o monitorabili.

Un ulteriore chiarimento è dato sull'analisi di tipo logico del sistema: come visto nel Paragrafo 2.4.2, gli output dati da questa analisi sono possibili soluzioni tecnologiche che riescono a soddisfare le funzioni a cui si riferiscono; tuttavia, nel caso in esame, la soluzione tecnologica adottata è nota in quanto la macchina è stata già costruita. Si può, quindi, affermare che il risultato dell'analisi logica condotta sia praticamente prossimo ad una possibile analisi fisica del sistema.

4.3.2 Livelli di scomposizione e ipotesi effettuate

Per eseguire una dettagliata scomposizione degli elementi, ovvero quella logica, ma cercando di non eseguire un lavoro dispersivo, si è deciso di scomporre la macchina in quattro livelli:

- livello I, sistema;
- livello II, eventuale sottosistema;
- livello III, eventuale sotto-assieme;
- Livello IV, componenti.

Data la complessità del sistema analizzato, è stato necessario introdurre alcune ipotesi semplificative del problema:

- tra i componenti elettrici sono stati considerati solo gli azionamenti degli assi e dell'elettromandrino, le lampade di illuminazione e il gruppo di continuità (*Uninterruptible Power Supply*, UPS);
- non sono stati considerati né elementi di connessione elettrica, né elementi di trasporto dei fluidi.

Da una prima analisi, sono stati individuati circa 300 elementi della Fidia K411, riportati nei manuali. Per tale ragione, si è deciso di raggruppare componenti simili, sebbene con funzioni differenti, al fine di rendere di più immediata lettura questa prima analisi e di considerare gli elementi più rappresentativi del sistema.

4.3.3 *Product Breakdown of System* e architettura logica

Il risultato della scomposizione logica del sistema è il PBS, riportato in Appendice C, in cui si è anche assegnato un opportuno codice identificativo ai singoli elementi.

Sfruttando il MBSE, si è, inoltre, ricavata l'architettura logica del sistema di cui sono state riportate in Appendice E le parti ritenute più rappresentative, utilizzando il software *IBM Rational Rhapsody*[®].

Si nota già la possibilità di avere un quadro completo del problema, con, inoltre, la possibilità di raccogliere molti dati inerenti ad un singolo componente grazie al MBSE.

4.3.4 Functional Breakdown of System e architettura funzionale

Parimenti, si ottiene il FBS, riportato Appendice D; la rappresentazione di alcune parti significative dell'architettura funzionale, invece, è riportata in Appendice E.

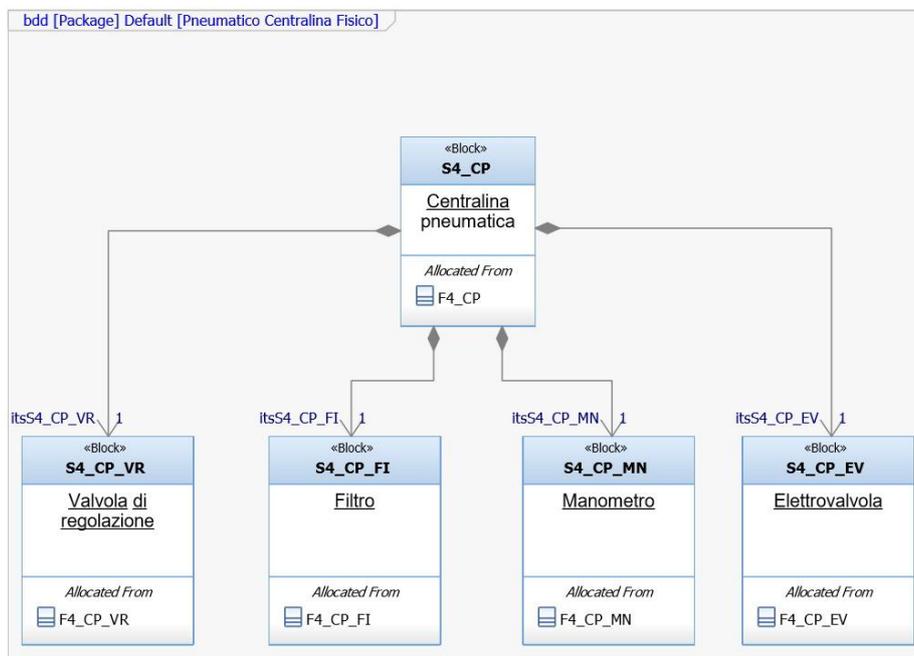


Figura 4-6 Esempio di BDD di scomposizione logica, caso della centralina pneumatica

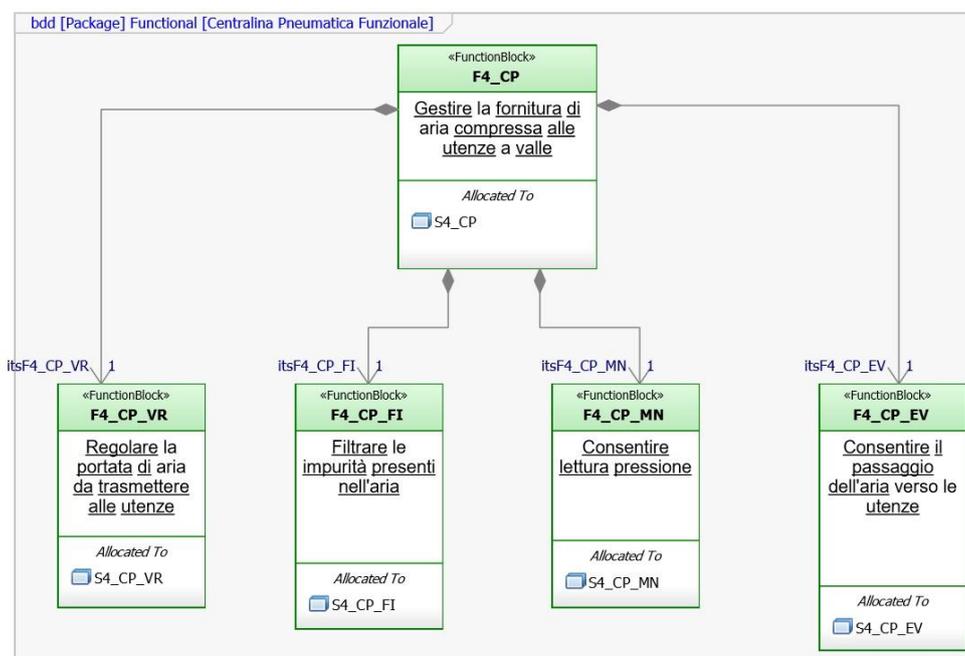


Figura 4-7 Esempio di BDD di scomposizione funzionale, caso della centralina pneumatica

In Figura 4-6 e Figura 4-7 sono riportati alcuni esempi di BDD, riferiti alla scomposizione di un determinato sotto-sistema della macchina utensile studiata; si nota come vi sia possibilità ora di eseguire l'allocazione, ossia assegnare ad ogni funzione individuata l'elemento logico che la soddisfa.

L'individuazione delle funzioni eseguite risulta di fondamentale importanza per lo step successivo, ossia la realizzazione della FMECA.

4.4 FMECA

Seguendo i criteri riportati nel Paragrafo 3.7, viene eseguita la FMECA. Tuttavia, alcune precisazioni ed ipotesi vanno esplicitate sull'analisi effettuata:

- vi sono tutti i campi visti nel Paragrafo 4.4, eccezion fatta per i campi di meccanismo di guasto e sintomo di guasto; informazioni inerenti a quest'ultimo argomento sono riportati in fase di "azione";
- i tassi di guasto utilizzati sono estrapolati dai database ([15] e [16]), come già specificato, essendo questa una prima analisi e data la mancanza di rilevanti dati storici. Inoltre, i tassi di guasto adottati sono quelli base degli elementi, con unità di misura pari a $\left[\frac{\text{guasti}}{\text{mln ore}} \right]$;
- per uniformare il più possibile alla normativa UNI tutto il lavoro, il modo di guasto viene fatto corrispondere a come è stato definito nel Paragrafo 3.4, sebbene sui manuali siano riportate l'effettivo modo di manifestarsi del guasto stesso. In aggiunta, come modi di guasto sono stati considerati i più comuni;
- alcuni elementi, sebbene presenti nell'analisi logica e funzionale, come ad esempio soffietti, hardware e software, non sono riportati nell'analisi FMECA poiché non sono disponibili abbastanza informazioni. Tuttavia, avendoli individuati nello step precedente, si può provvedere ad un loro inserimento nei piani di manutenzione;
- si è cercato di specificare al meglio gli elementi analizzati, ove è stato possibile;
- il tempo richiesto di utilizzo, necessario per la valutazione dell'*Occurrence*, è 1 anno.

In Appendice F viene riportata la FMECA effettuata, prima compilata nel “campo di analisi” e, successivamente, nella “zona di azione”. Il codice iniziale è rappresentativo dell’elemento soggetto ad analisi, seguito dall’*n*-esimo modo di guasto a cui si fa riferimento.

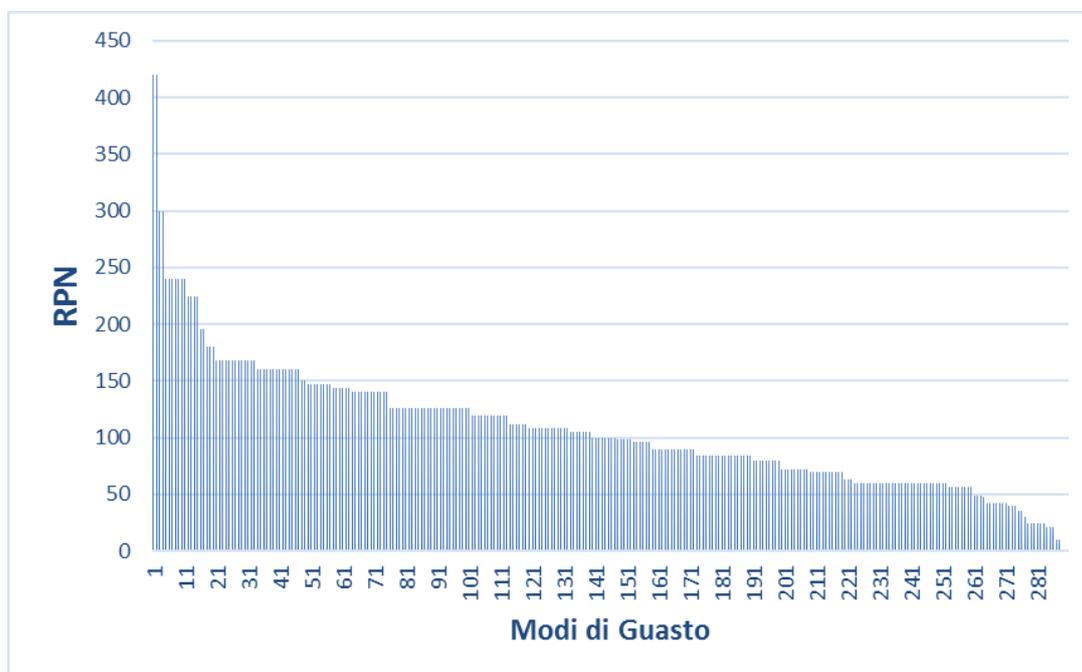


Figura 4-8 Diagramma degli RPN associati ai guasti con manutenzione "as is"

4.5 Status “to be” della manutenzione

4.5.1 Definizione dei nuovi piani di manutenzione

Dall’analisi dei dati ricavati dalla FMECA e dall’osservazione del diagramma riportato in Figura 4-8, si sono riscontrati 288 modi di guasto differenti, con RPN variabile da 10 a 244. Si è deciso di intervenire con l’obiettivo di ridurre l’RPN dei 20 casi con indice di criticità più elevato, superiore o uguale a 180, riportati in Tabella 4-7.

Codifica Guasto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S2_X_EM_CI_2	6	7	10	420	Controllo tensionamento ed eventuale sostituzione cinghia (6 mesi)	6	5	7	210
S2_Z_EM_CI_2	6	7	10	420	Controllo tensionamento ed eventuale sostituzione cinghia (6 mesi)	6	5	7	210
S2_X_EM_CI_1	6	5	10	300	Controllo tensionamento ed eventuale sostituzione cinghia (6 mesi)	6	5	7	210
S2_Z_EM_CI_1	6	5	10	300	Controllo tensionamento ed eventuale sostituzione cinghia (6 mesi)	6	5	7	210
S10_CP_3	4	6	10	240	Verifica funzionamento (3 mesi)	4	5	7	140
S10_CP_4	4	6	10	240	Verifica funzionamento (3 mesi)	4	5	7	140
S7_CR_2	4	6	10	240	Controllo e lubrificazione (3 mesi) Verifica integrità e corretto tensionamento (12 mesi)	4	5	7	140
S8_CP_3	4	6	10	240	Verifica funzionamento (3 mesi)	4	5	7	140
S8_CP_4	4	6	10	240	Verifica funzionamento (3 mesi)	4	5	7	140
S8_CR_2	4	6	10	240	Controllo e lubrificazione (3 mesi)	4	5	7	140
S8_PU_3	4	6	10	240	Ingrassaggio e controllo stato (6 mesi)	4	5	7	140
S1_EM_PS_3	4	7	8	224	Verifica funzionamento (3 mesi) Revisione mandrino (18 mesi)	4	5	7	140
S1_EM_PS_4	4	7	8	224	Verifica funzionamento (3 mesi) Revisione mandrino (18 mesi)	4	5	7	140
S2_A_EM_RD_3	4	8	7	224	Ingrassaggio e controllo stato (6 mesi)	4	5	7	140
S2_C_EM_RD_3	4	8	7	224	Ingrassaggio e controllo stato (6 mesi)	4	5	7	140
S2_A_EM_RD_1	4	7	7	196	Ingrassaggio e controllo stato (6 mesi)	4	5	7	140
S2_C_EM_RD_1	4	7	7	196	Ingrassaggio e controllo stato (6 mesi)	4	5	7	140
S8_CP_3	5	6	6	180	Revisione mandrino (18 mesi)	5	6	5	150
S8_CP_4	5	6	6	180	Revisione mandrino (18 mesi)	5	6	5	150
S5_GR_DI_2	3	6	10	180	Verifica visiva funzionamento (6 mesi)	3	6	6	108

Tabella 4-7 Guasti con RPN maggiori e azioni intraprese per la loro riduzione

Seguendo il diagramma di flusso riportato in Figura 3-3, per i singoli modi di guasto si è proceduto all'individuazione delle azioni manutentive attuabili, siano esse di prevenzione ciclica oppure *on-condition*. Adottando queste nuove misure manutentive, si procede alla stima del nuovo RPN, notando che i parametri su cui si va ad agire sono la *Severity* e la *Detectability*: controlli, ispezioni e pulizia favoriscono l'eventuale rilevazione di un'anomalia di

funzionamento, prima che si possa verificare un guasto, agendo così sulla riduzione del termine *D*. D'altro canto, l'inserimento di nuove azioni di manutenzione comporta l'adozione di attività di supporto ad essi dedicate, come, ad esempio, la gestione di materiale a magazzino; attività di questo tipo possono ridurre gli effetti del guasto, riducendo i tempi di *downtime* della macchina, ossia abbattendo l'indice *S*.

Si aggiunge che variano anche gli RPN associati ai modi di guasto dei medesimi elementi, ma che non risultavano superiori a 180; anche per essi, però, si è effettuata la valutazione del nuovo RPN.

I risultati delle nuove azioni intraprese, evidenziati Tabella 4-7, sono osservati nel diagramma riportato in Figura 4-9 sottostante.

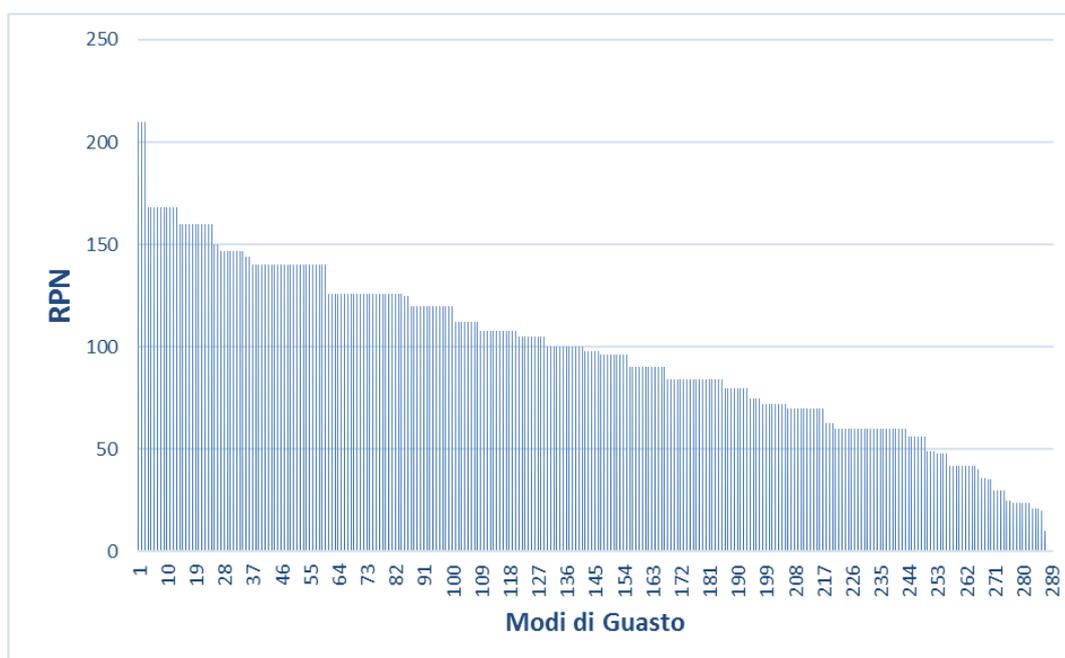


Figura 4-9 Diagramma degli RPN associati ai guasti con manutenzione "to be"

Si può notare come vi sia una sensibile diminuzione degli RPN massimi e come le nuove azioni ipotizzate possano risultare efficaci.

Primo risultato della FMECA è, quindi, la possibile definizione dei nuovi piani di manutenzione programmata da attuare per le macchine; infatti, tenendo conto della elaborazione della parte di "azione" della FMECA, si vanno a comporre le schede con nuove azioni da seguire, integrandole con quelle precedentemente già attuate e quelle proposte sui manuali delle macchine.

Come tipologia di manutenzione programmata è stata selezionata quella ciclica a data costante. Nella Tabella 4-8 sottostante si riportano i nuovi piani di manutenzione da attuare sulla macchina considerata, presentati come schede suddivise tra la parte di *servicing* e di manutenzione programmata ciclica. Sono evidenziati le nuove azioni di intervento stabilite, aggiunte a quelle già attuate.

SERVICING		
AREA DI INTERVENTO	DESCRIZIONE MANUTENZIONE	FREQ
Cono portautensile mandrino	Pulizia e controllo	giornaliera
Checklist 5S	Esecuzione delle azioni elencate e compilazione	giornaliera
Olio emulsivo di lubrorefrigerazione	Controllo percentuale	settimanale
Trasportatore trucioli	Pulizia e controllo funzionamento	settimanale
Contenitore raccolta olio impuro centralina lubrificazione aria-olio cuscinetti mandrino	Svuotamento	settimanale
Filtri condizionatore armadio elettrico	Pulizia	mensile
Olio centralina lubrificazione aria-olio cuscinetti mandrino	Controllo livello ed eventuale rabbocco	mensile
Liquido nella centralina di raffreddamento mandrini e assi	Controllo livello, eventuale rabbocco e verifica pulizia	mensile

MANUTENZIONE PROGRAMMATA CICLICA		
AREA DI INTERVENTO	DESCRIZIONE MANUTENZIONE	FREQ
Catena trasportatore trucioli	Lubrificazione	3 mesi
Filtro disoleatore impianto pneumatico	Controllo ed eventuale sostituzione	3 mesi
Guide e ripari a soffietto assi	Controllo ed eventuale pulizia	3 mesi
Filtro impianto pneumatico	Controllo ed eventuale sostituzione	6 mesi
Filtro impianto idraulico	Controllo ed eventuale sostituzione	6 mesi
Filtro impianto lubrorefrigerazione	Controllo, pulizia ed eventuale sostituzione	6 mesi
Manometro centralina lubrificazione aria-olio cuscinetti mandrino	Controllo pressione e funzionamento	6 mesi
Valvola regolatrice centralina lubrificazione aria-olio cuscinetti mandrino	Eventuale regolazione portata aria	6 mesi
Olio centralina idraulica	Controllo livello ed eventuale rabbocco	6 mesi
Ingranaggi trasmissione degli assi A e C	Ingrassaggio	6 mesi
Pinza di bloccaggio del portautensile mandrino	ingrassaggio	6 mesi
Cinghie di trasmissione assi X e Z	Controllo tensionamento ed eventuale sostituzione	6 mesi
Sistema di condizionamento attivo	Interventi dedicati	6 mesi
Trasportatore trucioli	Verifica integrità e corretto tensionamento	12 mesi
Grasso impianto lubrificazione	Controllo livello ed eventuale rabbocco	12 mesi
Vasca impianto lubrorefrigerazione	Pulizia	12 mesi
Olio centralina idraulica	Sostituzione	12 mesi
Sistema elettromandrino	Revisione	18 mesi

Tabella 4-8 Schede di manutenzione di *servicing* (sopra) e di manutenzione programmata ciclica (sotto)

Si osservi la presenza di alcuni elementi (soffietti e impianto di condizionamento attivo), inseriti nelle schede di manutenzione, la cui analisi FMECA non era possibile per mancanza di dati, ma la loro messa in evidenza con le metodologie del SE ha portato ad un loro inserimento tra i componenti da controllare. La valutazione che se ne ricava è qualitativa, ma consente di prendere in considerazione altri elementi per la manutenzione grazie agli strumenti del SE.

4.5.2 Valutazione delle prestazioni con attuazione del nuovo piano manutentivo

Per stimare l'effetto delle nuove attività di manutenzione da attuare, si può procedere ad una valutazione delle performance manutentive basandosi sullo storico dei dati.

I KPI vengono così valutati dapprima nel “*best case*”, ossia si stimano le prestazioni ipotizzando che la manutenzione preventiva ciclica abbia evitato il verificarsi dei guasti sugli elementi ora mantenuti e che la manutenzione preventiva *on-condition* abbia dato la possibilità di programmare l'intervento manutentivo da eseguire, evitando così il guasto dell'elemento.

In Appendice G e in Appendice H vengono riportati rispettivamente i dati inerenti al “*best case*”, con aggiunta degli interventi manutentivi programmati e l'eliminazione dei guasti secondo la modalità di cui sopra, e le elaborazioni di tali dati.

In seguito, si è considerato anche il caso “*worst case*”, ossia il caso in cui la manutenzione pianificata non abbia portato ad alcun tipo di riduzione degli interventi per guasto accidentale, avvenuti nel range di tempo considerato.

In Appendice I viene riportato l'elenco dei dati inerenti a questo caso, aggiungendo gli interventi programmati, mentre in Appendice J si riportano le elaborazioni di tali dati.

Si effettua quindi un confronto tra i KPI ricavati e riportati in Tabella 4-11, considerando il periodo 2016-2019 complessivamente.

Nella Tabella 4-9, invece, si riportano gli interventi a guasto e preventivi considerati nei due casi sopra esposti, mentre in Tabella 4-10 si riporta la nuova stima di ore necessarie alla manutenzione preventiva.

“Worst case”

	2016	2017	2018	2019	TOT (16/19)
<i>Numeri interventi manutenzione correttiva</i>	6	8	11	16	41
<i>Numeri interventi manutenzione preventiva</i>	4	4	4	4	16

“Best case”

	2016	2017	2018	2019	TOT (16/19)
<i>Numeri interventi manutenzione correttiva</i>	5	2	8	8	23
<i>Numeri interventi manutenzione preventiva</i>	4	4	7	4	19

Tabella 4-9 Numero di interventi per i casi considerati

Informazioni sulla manutenzione preventiva ciclica con nuova politica manutentiva		
Tipologia	Tempo stimato [h]	N° esecuzioni l'anno
<i>Trimestrale</i>	2	4
<i>Semestrale</i>	4	2
<i>Annuale</i>	7	1
<i>18 mesi</i>	12	Non tutti gli anni
<i>Servicing totale</i>	70	

Tabella 4-10 Tempi stimati per la nuova politica di manutenzione preventiva

KPI	Prestazioni Attuali	"Best Case"	"Worst Case"
<i>MTTRg [h] x2</i>	37.51	36.07	37.51
<i>MTTRg+p [h] x2</i>	35.45	40.32	34.07
<i>MTBF(MTTF) [h] /10</i>	55.60	77.51	55.60
<i>MDT [h]</i>	26.00	17.87	23.49
<i>MTBM [h] /10</i>	56.64	55.49	41.43
<i>PMP [%]</i>	24.09	48.84	33.99
<i>AI [%]</i>	96.74	97.73	96.74
<i>AA [%]</i>	96.97	96.49	96.05
<i>AO [%]</i>	95.61	96.88	94.63
<i>OEE</i>	89.43	90.61	88.51

Tabella 4-11 Confronto tra i KPI stimati nei differenti casi analizzati

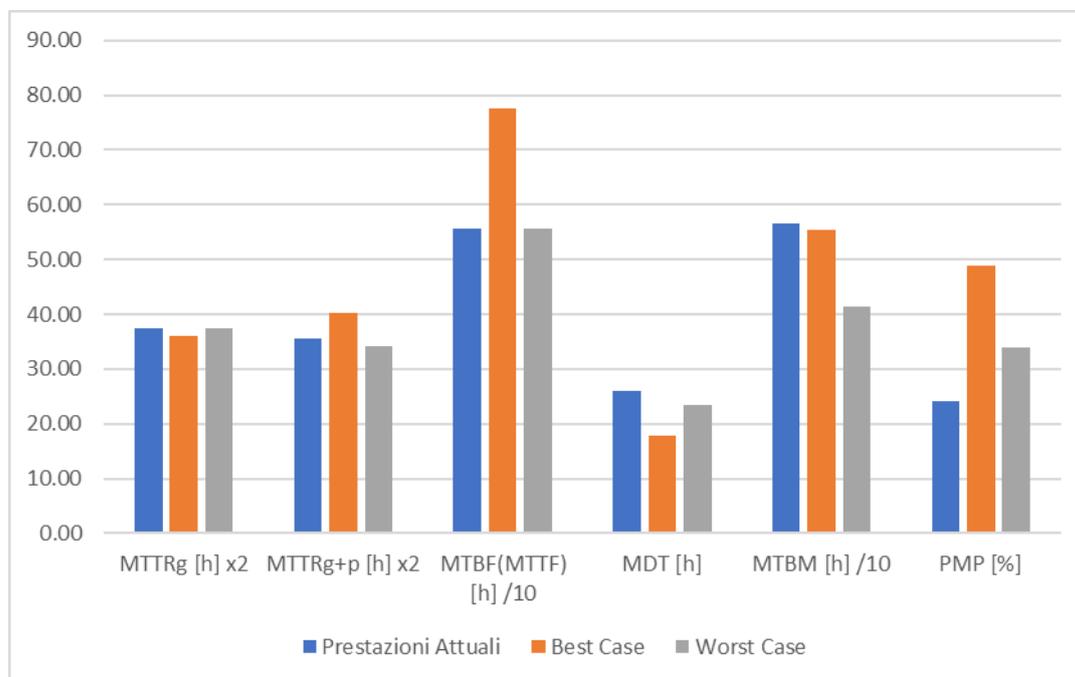


Figura 4-10 Confronto tra i KPI stimati nei casi analizzati (Parte I)

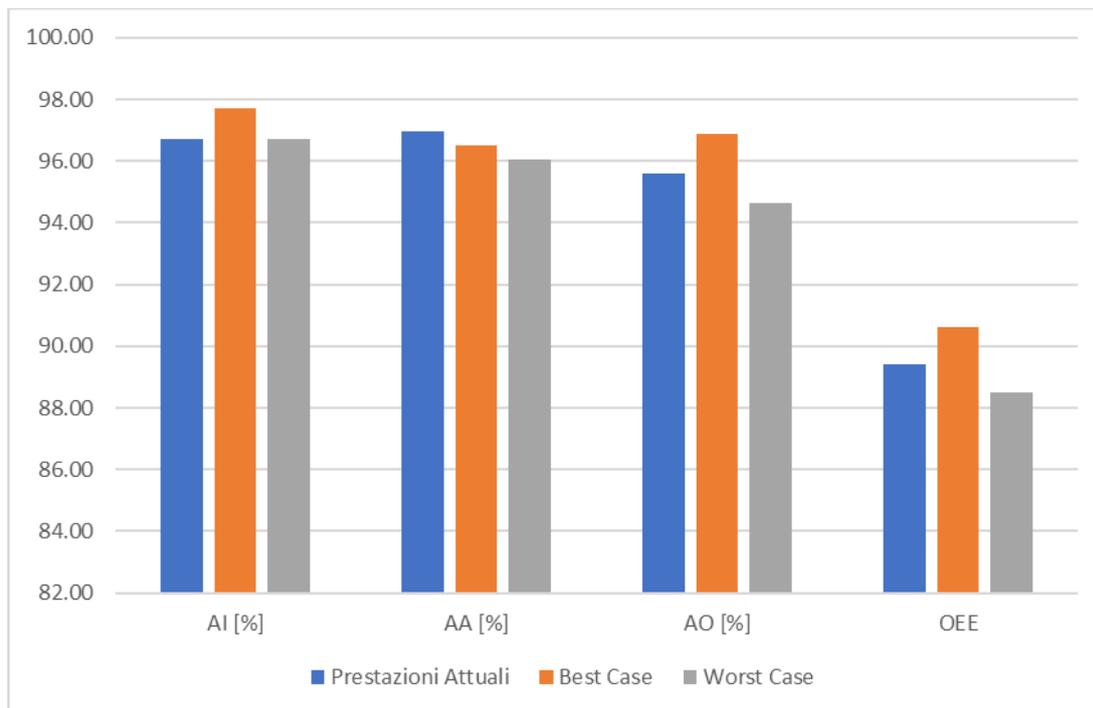


Figura 4-11 Confronto tra i KPI dei casi analizzati (Parte II)

Analizzando i risultati, rappresentati anche in Figura 4-10 e in Figura 4-11, si possono effettuare le seguenti osservazioni.

- Nel “*best case*” si nota una effettiva variazione positiva dei parametri, eccezion fatta per i MTTR per interventi sia a guasto che preventivi; infatti, il MTTR per i soli interventi a guasto si riduce, anche se di poco, mentre incrementa sensibilmente il valore del MTBF, grazie all’eliminazione di alcuni interventi dovuti a guasti. Inoltre, il MTBM rimane pressoché il medesimo, in quanto sono diminuiti gli interventi per guasto, ma si sono aggiunti interventi di manutenzione preventiva rispetto alla situazione attuale stimata, mentre il MDT è notevolmente calato, conseguenza di una più preponderante politica di manutenzione preventiva rispetto nella situazione “*as is*” (PMP pari al 48.84%).

Tutto ciò comporta un incremento della disponibilità operativa di circa 1.27 % e un OEE che giunge al 90.61 %.

- Nel “*worst case*”, avendo solo aggiunto interventi manutentivi in più rispetto ai precedenti a guasto già presenti nella situazione “*as is*”, si ha una riduzione di tutti i KPI principali, nonché una flessione dell’OEE all’88.51 %. Tuttavia, si nota che il MDT si è ridotto, avendo aumentato la percentuale di interventi preventivi: questo indica che, qualora ci fosse un buon supporto logistico per la manutenzione, il tempo medio di *downtime* si ridurrebbe (in percentuale) rispetto alla situazione corrente; inoltre, il supporto logistico implementato per le manutenzioni preventive potrebbe contribuire ad una riduzione del *downtime* nel caso di interventi a guasto per gli elementi su cui sono attuati i controlli preventivi. Vi potrebbe essere, quindi, un ipotetico vantaggio indiretto anche in questa situazione.

Concludendo l’analisi, visti i benefici diretti del “*best case*” e quelli possibili indiretti nel “*worst case*”, i nuovi interventi stabiliti porterebbero ad un giovamento nella gestione della manutenzione della macchina.

4.5.3 Sviluppi futuri

Applicando la nuova politica manutentiva e individuati i KPI da analizzare, si può attuare il ciclo di Deming, come riportato in [21].

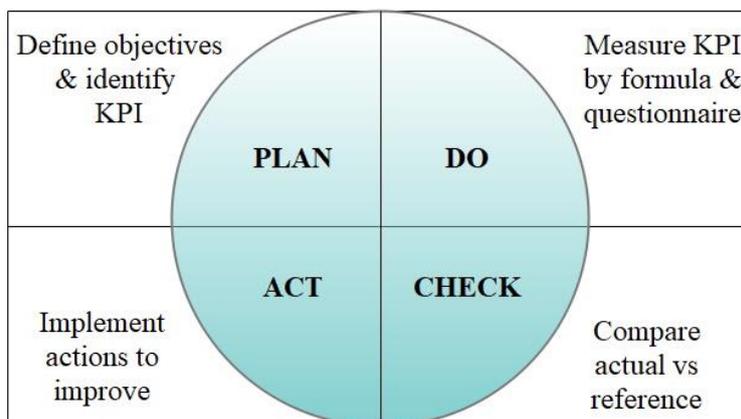


Figura 4-12 Ciclo di Deming

Questo ciclo da azioni da attuare è alla base dei metodi del TPM per l’analisi dei problemi [9], ed è costituito da quattro step, come riportato in Figura 4-12.

- Pianificare (*Plan*), fase in cui si definiscono gli obiettivi da perseguire, valutabili con i KPI, e si pianificano le azioni da intraprendere.
- Eseguire (*Do*), fase durante la quale si eseguono le azioni pianificate.
- Verificare (*Check*), riferito al periodo di controllo delle prestazioni a seguito degli interventi svolti.
- Agire (*Act*), fase durante la quale si definiscono azioni migliorative continue dello status attuale.

Questo illustrato potrebbe essere il primo passo per un miglioramento e l'effettiva valutazione delle azioni correttive intraprese; inoltre, lo studio di un adeguato supporto logistico permetterebbe di raggiungere le condizioni di operatività illustrate in precedenza, traendone i relativi benefici.

Ulteriori sviluppi futuri, però, riguardano anche gli altri argomenti trattati nello studio. Per quanto riguarda gli schemi SE sviluppati, questi possono essere riutilizzati per macchine simili, avendo così raggiunto uno degli obiettivi del SE (cfr. Paragrafo 2.1.1); inoltre, avendo ora a disposizione il modello del sistema, molte altre caratteristiche dello stesso possono essere considerate e successivamente analizzate, in modo tale da avere una più dettagliata descrizione della macchina, attuando anche una scomposizione più accurata della stessa.

In aggiunta, l'analisi funzionale realizzata copre certamente quota parte delle funzioni eseguite da altri centri di lavoro a cinque assi; quindi, può essere considerata un punto di partenza per successivi approfondimenti per altre macchine.

Passando alla FMECA K411 realizzata per la macchina Fidia matricola n°1, medesima analisi può essere valida per la Fidia K411 matricola n°2 presente in azienda, per cui si ricava un piano manutentivo analogo a quello esposto in precedenza. Tuttavia, essendo le due macchine comunque due sistemi differenti, una customizzazione della manutenzione risulta necessaria ed è attuabile con una opportuna RCA, sviluppabile prendendo come punto di partenza proprio la FMECA realizzata, come visto nel Paragrafo 3.7.8., ma agevolata anche dall'aver a disposizione il modello logico e funzionale del sistema.

Infine, un ulteriore sviluppo dell'attività manutentiva verrebbe data dall'introduzione della politica di manutenzione predittiva, ove fosse possibile. Per attuare questa modalità di manutenzione, tuttavia, è necessaria una conoscenza dei parametri caratteristici della macchina;

l'analisi SE può essere utile, come visto, per il passaggio all'analisi fisica del sistema, costituendo un'ottima base di partenza. L'adozione, quindi, di strumenti in grado di elaborare i dati ricavabili dalle macchine, come reti neurali o bayesiane ([9]), sarebbe in grado di abbassare notevolmente la *Detectability* dei modi di guasto potenzialmente prevedibili.

5 Conclusioni

In questo lavoro di Tesi si sono introdotti due argomenti principali: dapprima si è presentato il *Systems Engineering* con le sue peculiarità, quindi si sono evidenziate le caratteristiche della manutenzione, esponendo, per entrambi gli ambiti, lo stato dell'arte, nonché facendo un approfondimento sulla normativa UNI inerente alla manutenzione.

In seguito, si è proceduto alla loro integrazione non in previsione di un nuovo progetto, ma per un particolare sistema, ossia una macchina a controllo numerico a 5 assi, già realizzato ed in funzione. Il SE ha agito da supporto prezioso nella fase di realizzazione della *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* eseguita sul sistema precedentemente citato, un'analisi affidabilistica necessaria per la formulazione di un nuovo piano di manutenzione preventiva della macchina stessa.

Redatto, quindi, il nuovo piano di manutenzione, si è fatto il confronto tra una previsione delle prestazioni manutentive ottenute adottando questa nuova politica di manutenzione e la stima di quelle attuali, il cui risultato in termini di range di prestazioni possibili stimate conferma che è ragionevole, dal punto di vista tecnico, adottare la pianificazione presentata.

In conclusione, aver adottato l'approccio SE per sistemi già realizzati nella manutenzione può, in futuro, rendere più snelle molte delle attività da intraprendere, nonché essere la base di partenza per un'adesione sempre maggiore all'approccio *lean manufacturing* e in un'ottica di sviluppo dell'Industria 4.0, fungendo da elemento di *speed-up* dell'attività manutentiva, completandola e arricchendola con le sue caratteristiche peculiari.

Appendici

Appendice A. Dati dei guasti inerenti alla Fidia K411 matricola n°1

Codice Guasto	Data Richiesta Intervento	Descrizione Manutenzione	Data Inizio Intervento	Ora Inizio Intervento	Data Fine Intervento	Ora Fine Intervento	Funzionamento * [%]
-	11/12/2015	Sostituzione azionamento elettromandrino	14/12/2015	14.50	14/12/2015	17.75	0
G1	01/03/2016	Riparazione distributore rotante asse A	03/03/2016	8.50	07/03/2016	14.50	0
G2	02/05/2016	Sostituzione pompa per circuito lubrorefrigerazione	04/05/2016	11.00	04/05/2016	17.00	100
G3	26/05/2016	Sostituzione parti hardware PLC	27/05/2016	8.00	27/05/2016	10.75	100
G4	29/08/2016	Sostituzione cinghia asse Z	30/08/2016	9.00	30/08/2016	11.25	100
G5	12/09/2016	Sostituzione catenaria porte area lavoro	22/09/2016	10.50	26/09/2016	17.25	100
G6	09/11/2016	Sostituzione UPS	28/11/2016	8.00	06/12/2016	15.00	100
G7	20/12/2016	Regolazione porta area lavoro	10/01/2017	8.75	10/01/2017	16.75	100
G8	21/12/2016	Sostituzione soffietto asse y	18/01/2017	9.50	18/01/2017	11.50	100
G9	11/04/2017	Sostituzione lampade	19/04/2017	7.50	19/04/2017	12.00	100
G10	22/06/2017	Regolazione pinza elettromandrino	23/06/2017	14.75	03/07/2017	17.50	100
G11	23/06/2017	Sostituzione cavo encoder elettromandrino	26/06/2017	9.50	28/06/2017	12.75	100
G12	30/06/2017	Ripristino del magazzino utensili dopo bloccaggio carrello	04/07/2017	11.00	04/07/2017	16.50	100
G13	07/07/2017	Pulizia condensatore condizionatore	08/07/2017	8.00	08/07/2017	11.00	100
G14	18/12/2017	Sostituzione sensore bloccaggio utensile su mandrino	20/12/2017	10.50	20/12/2017	16.50	0
G15	23/04/2018	Sostituzione azionamenti asse X e Y	26/04/2018	14.25	26/04/2018	18.25	0
G16	02/05/2018	Sostituzione azionamento asse A	25/05/2018	8.75	25/05/2018	12.25	100
G17	01/06/2018	Sostituzione parti hardware PLC	04/06/2018	14.25	06/06/2018	14.75	100
G18	01/06/2018	Sostituzione cinghia asse X	05/06/2018	10.00	06/06/2018	14.75	100
G19	27/08/2018	Installazione nuovo PLC	27/08/2018	11.25	29/08/2018	12.50	100
G20	10/09/2018	Sostituzione elettromandrino	13/09/2018	13.00	15/09/2018	17.00	0
G21	10/09/2018	Sostituzione tubi flessibili asse A	13/09/2018	15.00	13/09/2018	17.50	100
G22	19/09/2018	Aggiornamento software per malfunzionamento PLC	20/09/2018	11.00	20/09/2018	16.50	100
G23	19/09/2018	Sostituzione condizionatore	03/10/2018	8.00	03/10/2018	17.00	100

Codice Guasto	Data Richiesta Intervento	Descrizione Manutenzione	Data Inizio Intervento	Ora Inizio Intervento	Data Fine Intervento	Ora Fine Intervento	Funzionamento * [%]
G24	22/10/2018	Sostituzione elettromandrino	23/10/2018	8.00	25/10/2018	15.00	0
G25	05/12/2018	Sostituzione tubi frigorifero	14/12/2018	9.00	14/12/2018	10.00	100
G26	17/01/2019	Regolazione pinza portautensile	24/01/2019	10.25	24/01/2019	11.75	0
G27	09/02/2019	Riparazione motoriduttore trasportatore trucioli	11/02/2019	8.50	11/02/2019	17.00	100
G28	20/05/2019	Pulizia condensatori frigo e condizionatore	22/05/2019	8.00	22/05/2019	17.00	100
G29	15/06/2019	Riparazione su quadro elettrico sistema lubrorefrigerazione	18/06/2019	8.75	18/06/2019	11.50	100
G30	13/07/2019	Sostituzione pompa per circuito lubrorefrigerazione	16/07/2019	7.00	16/07/2019	10.00	100
G31	22/07/2019	Perdita acqua condizionatore cabina	23/07/2019	8.00	23/07/2019	11.00	100
G32	22/07/2019	Sostituzione azionamento asse A	23/07/2019	8.75	23/07/2019	13.00	0
G33	17/09/2019	Sostituzione compressore condizionatore	18/09/2019	11.00	18/09/2019	18.00	100
G34	05/09/2019	Sostituzione motore pompa lubrorefrigerazione	19/09/2019	7.50	19/09/2019	12.00	100
G35	28/08/2019	Sostituzione sensore bloccaggio utensile su mandrino	01/10/2019	9.25	01/10/2019	14.00	100
G36	03/10/2019	Sostituzione motore pompa lubrorefrigerazione	04/10/2019	8.00	04/10/2019	14.00	100
G37	07/10/2019	Anomalie pinza elettromandrino	09/10/2019	11.00	10/10/2019	15.50	0
G38	25/10/2019	Riparazione perdita acqua circuito di raffreddamento	28/10/2019	15.50	28/10/2019	20.50	100
G39	25/10/2019	Smontaggio e sostituzione motoriduttore trasportatore trucioli	28/10/2019	8.00	28/10/2019	16.50	100
G40	15/11/2019	Aspirazione liquido lubrorefrigerante da vasca e pulizia della stessa	19/11/2019	13.00	19/11/2019	17.00	100
G41	16/12/2019	Pulizia filtro pompa lubrorefrigerazione	17/12/2019	10.00	17/12/2019	14.00	100

* Per "Funzionamento [%]" si intende la percentuale di funzionamento della macchina tra la segnalazione del guasto e l'inizio dell'intervento di riparazione

Appendice B. Elaborazione dei dati della macchina Fidia K411 matricola n°1

Codice Guasto	TTR a calendario solare [h]	TTR a calendario operativo [h]	TBF/TF a calendario solare [gg]	TBF/TF a calendario operativo [gg]	TBF/TF a calendario operativo [h]	Down Time prima dell'intervento a calendario solare [gg]	Down Time prima intervento a calendario operativo [h]	TBM a guasto a calendario solare [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [h]
-	3.25	3.25	-	-	-	-	-	-	-	-
G1	102	54	78	62	1080	2	40	80	64	1120
G2	6	6	56	45	788	0	0	58	47	828
G3	2.75	2.75	22	19	332	0	0	23	20	352
G4	2.25	2.25	94	73	1268	0	0	95	74	1288
G5	102.75	54.75	13	10	184	0	0	23	19	332
G6	199	135	44	37	644	0	0	63	53	932
G7	8	8	14	12	208	0	0	35	29	516
G8	2	2	0	0	0	0	0	8	7	124
G9	4.5	4.5	83	71	1244	0	0	91	78	1352
G10	242.75	138.75	64	52	912	0	0	65	53	932
G11	51.25	43.25	0	0	0	0	0	0	0	0
G12	5.5	5.5	2	2	40	0	0	6	5	100
G13	3	3	3	3	60	0	0	4	4	80
G14	6	6	163	129	2244	2	40	165	131	2284
G15	4	4	124	101	1764	3	40	127	103	1788
G16	3.5	3.5	6	4	80	0	0	29	24	416
G17	48.5	40.5	7	6	104	0	0	10	7	124
G18	28.75	24.75	0	0	0	0	0	0	0	0
G19	49.25	41.25	82	63	1100	0	0	82	63	1100
G20	52	44	12	10	184	3	60	15	12	208
G21	2.5	2.5	0	0	0	0	0	0	0	0
G22	5.5	5.5	6	5	100	0	0	7	6	104
G23	9	9	0	0	0	0	0	13	11	204
G24	55	47	19	16	288	1	20	20	17	308
G25	1	1	41	32	560	0	0	50	39	684

Codice Guasto	TTR a calendario solare [h]	TTR a calendario operativo [h]	TBF/TF a calendario solare [gg]	TBF/TF a calendario operativo [gg]	TBF/TF a calendario operativo [h]	Down Time prima dell'intervento a calendario solare [gg]	Down Time prima intervento a calendario operativo [h]	TBM a guasto a calendario solare [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [h]
G26	1.5	1.5	34	26	456	7	104	41	31	540
G27	8.5	8.5	16	11	204	0	0	18	15	268
G28	9	9	98	81	1412	0	0	100	83	1452
G29	2.75	2.75	24	20	352	0	0	27	22	392
G30	3	3	25	22	392	0	0	28	24	416
G31	3	3	6	5	100	0	0	7	6	104
G32	2	2	0	0	0	1	20	0	0	0
G33	7	7	56	40	704	0	0	57	41	724
G34	4.5	4.5	0	0	0	0	0	1	1	20
G35	4.75	4.75	0	0	0	0	0	12	10	184
G36	6	6	2	2	40	0	0	3	3	60
G37	28.5	24.5	3	2	40	2	40	5	3	60
G38	5	5	15	13	228	0	0	18	15	268
G39	8.5	8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
G40	4	4	18	15	268	0	0	22	18	312
G41	4	4	27	23	412	0	0	28	24	416

* Per "Funzionamento [%]" si intende la percentuale di funzionamento della macchina tra la segnalazione del guasto e l'inizio dell'intervento di riparazione

Appendice C. Product Breakdown of System

Codifica	Sistema	Codifica	Sottosistema	Codifica	Sotto-assiemi	Codifica	Componenti
S1	Sistema Elettromandrino						
		S1_S	Sensori				
						S1_S_S_VB	Accelerometro
						S1_S_EN	Encoder
						S1_S_PR	Sensore prossimit�
						S1_S_IU	Identificatore utensili
						S1_S_TU	Sensore tenuta utensile
		S1_EM	Elettromeccanico				
						S1_EM_AZ	Azionamento
						S1_EMMT	Motore elettrico trifase alternato
						S1_EM_FL	Flangia anteriore
						S1_EM_PS	Pistone idraulico sbloccaggio portautensile
						S1_EM_PZ	Pinza bloccaggio utensile
				S1_EM_DR	Distributore rotante		
						S1_EM_DR_CU	Cuscinetti
						S1_EM_DR_GR	Guarnizioni
S2	Sistema Controllo e Movimentazione Assi						
		S2_X	Sistema Asse X				
				S2_X_EM	Elettromeccanico		
						S2_X_EM_AZ	Azionamento
						S2_X_EM_MT	Motore elettrico trifase alternato
						S2_X_EM_CI	Cinghia
						S2_X_EM_VT	Vite a ricircolo di sfere
						S2_X_EM_CH	Chiocciola rotante
						S2_X_EM_GU	Guide lineari
						S2_X_EM_PT	Pattini a rulli

Codifica	Sistema	Codifica	Sottosistema	Codifica	Sotto-assiemi	Codifica	Componenti		
S2	Sistema Controllo e Movimentazione Assi	S2_X	Sistema Asse X	S2_X_S	Sensori	S2_X_S_RO	Riga ottica lineare		
						S2_X_S_MC	Micro di zero		
		S2_Y	Sistema Asse Y	S2_Y_EM	Elettromeccanico	S2_Y_S	Sensori	S2_Y_EM_AZ	Azionamento
								S2_Y_EM_MT	Motore elettrico trifase alternato
								S2_Y_EM_VT	Vite a ricircolo di sfere
								S2_Y_EM_GU	Guide lineari
								S2_Y_EM_PT	Pattini a rulli
								S2_Y_S_RO	Riga ottica lineare
								S2_Y_S_MC	Micro di zero
		S2_Z	Sistema Asse Z	S2_Z_EM	Elettromeccanico	S2_Z_S	Sensori	S2_Z_EM_AZ	Azionamento
								S2_Z_EM_MT	Motore elettrico trifase alternato
								S2_Z_EM_VT	Vite a ricircolo di sfere
								S2_Z_EM_CI	Cinghia
								S2_Z_EM_GU	Guide lineari
								S2_Z_EM_PT	Pattini a rulli
								S2_Z_S_RO	Riga ottica lineare
		S2_Z_S_MC	Micro di zero						

Codifica	Sistema	Codifica	Sottosistema	Codifica	Sotto-assiemi	Codifica	Componenti
S2	Sistema Controllo e Movimentazione Assi	S2_A	Sistema Asse A	S2_A_EM	Elettromeccanico	S2_A_EM_AZ	Azionamento
						S2_A_EM_MT	Motore elettrico trifase alternato
						S2_A_EM_RD	Ingranaggi di trasmissione moto
				S2_A_S	Sensori	S2_A_S_EN	Encoder
						S2_A_S_MC	Micro di zero
		S2_C	Sistema Asse C	S2_C_EM	Elettromeccanico	S2_C_EM_AZ	Azionamento
						S2_C_EM_MT	Motore elettrico trifase alternato
						S2_C_EM_RD	Ingranaggi di trasmissione moto
				S2_C_S	Sensori	S2_C_S_EN	Encoder
						S2_C_S_MC	Micro di zero
S3	Impianto Idraulico	S3_CI	Centralina idraulica			S3_CI_VA	Vasca
						S3_CI_LI	Indicatore di livello
						S3_CI_MT	Motore elettrico
						S3_CI_PM	Pompa
						S3_CI_FI	Filtro
						S3_CI_VM	Gruppo valvole
						S3_CI_ED	Gruppo elettrovalvole
						S3_CI_MN	Manometro

Codifica	Sistema	Codifica	Sottosistema	Codifica	Sotto-assiemi	Codifica	Componenti
S3	Impianto Idraulico						
		S3_PU	Impianto Idraulico Presa utensile			S3_PU_MN	Manometro
						S3_PU_PR	Pressostato
						S3_PU_EV	Gruppo elettrovalvole porta utensile
		S3_FA	Impianto Idraulico Freno asse A			S3_FA_MN	Manometro
						S3_FA_PR	Gruppo pressostati
						S3_FA_EV	Gruppo elettrovalvole freno asse A
		S3_FC	Impianto Idraulico Freno asse C			S3_FC_MN	Manometro
						S3_FC_PR	Gruppo pressostati
						S3_FC_EV	Gruppo elettrovalvole freno asse C
		S3_BZ	Impianto Idraulico Bilanciamento asse Z			S3_BZ_AC	Accumulatore
						S3_BZ_PR	Gruppo pressostati
						S3_BZ_MN	Manometro
						S3_BZ_VL	Gruppo valvole
S4	Impianto Pneumatico						
		S4_CP	Centralina pneumatica			S4_CP_VR	Valvola di regolazione
						S4_CP_FI	Filtro
						S4_CP_MN	Manometro
						S4_CP_EV	Elettrovalvola
		S4_LU	Impianto Pneumatico Lubrificazione utensile			S4_LU_MN	Manometro
						S4_LU_EV	Gruppo elettrovalvole

Codifica	Sistema	Codifica	Sottosistema	Codifica	Sotto-assiemi	Codifica	Componenti
S4	Impianto Pneumatico						
		S4_PM	Impianto Pressurizzazione mandrino			S4_PM_MN	Manometro
						S4_PM_EV	Elettrovalvola
						S4_PM_VR	Valvola di regolazione
		S4_PC	Impianto Pneumatico Pulizia cono			S4_PC_MN	Manometro
						S4_PC_EV	Elettrovalvola
						S4_PC_VR	Valvola di regolazione
		S4_CM	Impianto Pneumatico Cambio utensili			S4_CM_EV	Elettrovalvola
		S4_PO	Impianto Pneumatico Porte			S4_PO_EV	Elettrovalvole
S5	Impianto di Lubrificazione						
		S5_AO	Impianto lubrificazione Aria-Olio cuscinetti mandrino			S5_AO_CLUB	Centralina Lubrificazione Aria-Olio
						S5_AO_PM	Pompa a vuoto
						S5_AO_FD	Filtro disoleatore
						S5_AO_RO	Serbatoio recupero olio
						S5_AO_EV	Elettrovalvola
						S5_AO_MN	Manometro
		S5_GR	Impianto lubrificazione a Grasso			S5_GR_PL	Pompa Lubrificazione a grasso assi
						S5_GR_DI	Distributori
S6	Sistema di Condizionamento Attivo					S6_UC	Unità frigorifera

Codifica	Sistema	Codifica	Sottosistema	Codifica	Sotto-assiemi	Codifica	Componenti
S7	Impianto di Lubrorefrigerazione						
		S7_ML	Sistema Movimentazione Lubrorefrigerante			S7_ML_VS	Vasca
						S7_ML_LI	Indicatore di livello
						S7_ML_MT	Motore elettrico
						S7_ML_MP	Pompa
						S7_ML_FI	Filtro
						S7_ML_MN	Manometro
		S7_TT	Trasportatore trucioli			S7_TT_MT	Motore elettrico
						S7_TT_RI	Riduttore
						S7_TT_CT	Catena
						S7_TT_TN	Tenditore
						S7_TT_TP	Tappeto
S8	Sistema Magazzino Utensili					S8_MT	Motore elettrico
						S8_RI	Riduttore
						S8_CR	Carrello portapinze
						S8_CP	Cilindro pneumatico
						S8_PU	Pinze utensili (42)
						S8_SZ	Sensore di zero
						S8_SU	Sensore di presenza utensile fotoelettrico
						S8_EN	Encoder incrementale

Codifica	Sistema	Codifica	Sottosistema	Codifica	Sotto-assiemi	Codifica	Componenti
S9	Sistema Elettrico					S9_CN	Condizionatori armadi elettrici
						S9_LM	Lampade di illuminazione
						S9_UPS	UPS
S10	Copertura, protezione e portapezzo					S10_CP	Cilindri pneumatici apertura porte
						S10_TP	Tavola portapezzo
						S10_SX	Protezioni a soffietto asse X
						S10_SY	Protezione a soffietto asse Y
						S10_VT	Vetri di sicurezza
S11	PLC e Periferiche					S11_HW	Hardware
						S11_SW	Software
						S11_PL	Pulsantiere
						S11_SC	Schermo

Appendice D. *Functional Breakdown of System*

Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione Componente
F1	Fornire il moto di taglio desiderato all'utensile						
		F1_S	Monitorare il moto di rotazione di taglio dato all'utensile e lo status			F1_S_VB	Controllo vibrazioni
						F1_S_EN	Misurare velocità e posizione angolare mandrino
						F1_S_PR	Assicurare giusta posizione dell'utensile rispetto al pezzo
						F1_S_IU	Identificare l'utensile da posizionare sul mandrino
						F1_S_TU	Controllare bloccaggio utensile su mandrino
		F1_EM	Consentire la rotazione dell'utensile			F1_EM_AZ	Fornire la corretta potenza elettrica
						F1_EM_MT	Convertire energia elettrica in energia meccanica
						F1_EM_FL	Tenere in posizione gli elementi del mandrino
						F1_EM_PS	Sbloccare il portautensili
						F1_EM_PZ	Assicurare il bloccaggio dell'utensile
				F1_EM_DR	Consentire la rotazione dell'utensile con la giusta lubrificazione		
						F1_EM_DR_C	Supportare l'albero del mandrino
						F1_EM_DR_G	Evitare fuoriuscita liquidi lubrificanti

Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione Componente
F2	Muovere l'utensile nel modo desiderato rispetto ai suoi gradi di libertà						
		F2_X	Muovere nel modo desiderato l'utensile lungo l'asse X				
				F2_X_EM	Consentire il moto dell'utensile lungo l'asse X		
						F2_X_EM_AZ	Fornire la corretta potenza elettrica
						F2_X_EM_MT	Convertire energia elettrica in energia meccanica
						F2_X_EM_CI	Trasmettere il moto da un asse ad un altro
						F2_X_EM_VT	Convertire il moto rotatorio in lineare
						F2_X_EM_CH	Convertire il moto rotatorio in lineare
						F2_X_EM_GU	Guidare il moto di traslazione
						F2_X_EM_PT	Guidare il moto di traslazione
				F2_X_S	Monitorare il moto dell'utensile lungo l'asse X		
						F2_X_S_RO	Indicare la posizione relativa del mandrino lungo l'asse
						F2_X_S_MC	Indicare la posizione di riferimento assoluto del mandrino lungo l'asse

Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione Componente
F2	Muovere l'utensile nel modo desiderato rispetto ai suoi gradi di libertà	F2_Y	Muovere nel modo desiderato l'utensile lungo l'asse Y				
				F2_Y_EM	Consentire il moto dell'utensile lungo l'asse Y		
						F2_Y_EM_AZ	Fornire la corretta potenza elettrica
						F2_Y_EM_MT	Convertire energia elettrica in energia meccanica
						F2_Y_EM_VT	Convertire il moto rotatorio in lineare
						F2_Y_EM_GU	Guidare il moto di traslazione
						F2_Y_EM_PT	Guidare il moto di traslazione
				F2_Y_S	Monitorare il moto dell'utensile lungo l'asse Y		
						F2_Y_S_RO	Indicare la posizione relativa del mandrino lungo l'asse
						F2_Y_S_MC	Indicare la posizione di riferimento assoluto del mandrino lungo l'asse
		F2_Z	Muovere nel modo desiderato l'utensile lungo l'asse Z				
				F2_Z_EM	Consentire il moto dell'utensile lungo l'asse Z		
						F2_Z_EM_AZ	Fornire la corretta potenza elettrica
						F2_Z_EM_MT	Convertire energia elettrica in energia meccanica
						F2_Z_EM_VT	Convertire il moto rotatorio in lineare
						F2_Z_EM_CI	Trasmettere il moto da un asse ad un altro
						F2_Z_EM_GU	Guidare il moto di traslazione
						F2_Z_EM_PT	Guidare il moto di traslazione

Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione Componente
F2	Muovere l'utensile nel modo desiderato rispetto ai suoi gradi di libertà	F2_Z	Muovere nel modo desiderato l'utensile lungo l'asse Z	F2_Z_S	Monitorare il moto dell'utensile lungo l'asse Z	F2_Z_S_RO	Indicare la posizione relativa del mandrino lungo l'asse
		F2_Z_S_MC				F2_Z_S_MC	Indicare la posizione di riferimento assoluto del mandrino lungo l'asse
		F2_A	Muovere nel modo desiderato l'utensile attorno l'asse A	F2_A_EM	Consentire il moto dell'utensile attorno l'asse A	F2_A_EM_AZ	Fornire la corretta potenza elettrica
						F2_A_EM_MT	Convertire energia elettrica in energia meccanica
						F2_A_EM_RD	Trasmettere il moto
				F2_A_S	Monitorare il moto dell'utensile attorno all'asse A	F2_A_S_EN	Indicare la posizione angolare del mandrino rispetto all'asse di riferimento
						F2_A_S_MC	Indicare la posizione di riferimento assoluto del mandrino rispetto all'asse di riferimento
		F2_C	Muovere nel modo desiderato l'utensile attorno l'asse C	F2_C_EM	Consentire il moto dell'utensile attorno l'asse C	F2_C_EM_AZ	Fornire la corretta potenza elettrica
						F2_C_EM_MT	Convertire energia elettrica in energia meccanica
						F2_C_EM_RD	Trasmettere il moto

Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione Componente
F2_C	Muovere nel modo desiderato l'utensile attorno l'asse C	F2_C	Muovere nel modo desiderato l'utensile attorno l'asse C	F2_C_S	Monitorare il moto dell'utensile attorno all'asse C	F2_C_S_EN	Indicare la posizione angolare del mandrino rispetto all'asse di riferimento
						F2_C_S_MC	Indicare la posizione di riferimento assoluto del mandrino rispetto all'asse di riferimento
F3	Fornire liquido a pressione opportuna	F3_CI	Gestire la fornitura di liquido alle utenze a valle			F3_CI_VA	Contenere il fluido lubrificante
						F3_CI_LI	Indicare il livello di fluido nel contenitore
						F3_CI_MT	Convertire energia elettrica in energia meccanica
						F3_CI_PM	Aumentare la pressione del fluido
						F3_CI_FI	Filtrare le impurità presenti nel fluido
						F3_CI_VM	Consentire il passaggio, la regolazione del fluido
						F3_CI_ED	Consentire il passaggio, la regolazione del fluido
						F3_CI_MN	Consentire lettura pressione di mandata
		F3_PU	Fornire liquido alla presa utensile			F3_PU_MN	Consentire lettura pressione
						F3_PU_PR	Assicurare che vi sia la pressione opportuna
						F3_PU_EV	Consentire il passaggio del fluido per presa utensile
		F3_FA	Fornire liquido per frenare l'asse A			F3_FA_MN	Consentire lettura pressione
						F3_FA_PR	Assicurare che vi sia la pressione opportuna
						F3_FA_EV	Consentire il passaggio del fluido per frenare l'asse A

Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione Componente		
F3	Fornire liquido a pressione opportuna	F3_FC	Fornire liquido per frenare l'asse C			F3_FC_MN	Consentire lettura pressione		
						F3_FC_PR	Assicurare che vi sia la pressione opportuna		
						F3_FC_EV	Consentire il passaggio del fluido per frenare l'asse C		
				F3_BZ	Fornire liquido per bilanciare l'asse Z			F3_BZ_AC	Contenere fluido equilibrante
						F3_BZ_PR	Assicurare che vi sia la pressione opportuna		
						F3_BZ_MN	Verificare la pressione del fluido		
						F3_BZ_VL	Consentire il passaggio, la regolazione del fluido per equilibrare l'asse Z		
F4	Fornire aria compressa a pressione opportuna	F4_CP	Gestire la fornitura di aria compressa alle utenze a valle			F4_CP_VR	Regolare la portata di aria da trasmettere alle utenze		
						F4_CP_FI	Filtrare le impurità presenti nell'aria		
						F4_CP_MN	Consentire lettura pressione		
						F4_CP_EV	Consentire il passaggio dell'aria verso le utenze		
				F4_LU	Fornire aria compressa per la lubrificazione dell'utensile			F4_LU_MN	Consentire lettura pressione
						F4_LU_EV	Consentire il passaggio dell'aria verso l'utensile		

Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione Componente		
F4	Fornire aria compressa a pressione opportuna	F4_PM	Fornire aria compressa per la pressurizzazione del mandrino			F4_PM_MN	Consentire lettura pressione		
						F4_PM_EV	Consentire il passaggio dell'aria verso il mandrino		
						F4_PM_VR	Regolare la portata di aria diretta al mandrino		
				F4_PC	Fornire aria compressa per la pulizia del cono mandrino			F4_PC_MN	Consentire lettura pressione
						F4_PC_EV	Consentire il passaggio del aria verso il cono		
						F4_PC_VR	Regolare la portata di aria diretta al cono		
				F4_CM	Fornire aria compressa per apertura cambio utensili			F4_CM_EV	Consentire il passaggio dell'aria verso il pistone pneumatico del cambio utensili
				F4_PO	Fornire aria compressa per apertura porte			F4_PO_EV	Consentire il passaggio dell'aria fluido verso i pistoni pneumatici di apertura porte
F5	Garantire la lubrificazione corretta agli organi in movimento	F5_AO	Garantire la lubrificazione dei supporti del mandrino			F5_AO_CLUB	Gestire la fornitura di fluido aria-olio ai supporti del mandrino		
						F5_AO_PM	Aspirazione liquido lubrificante da distributore rotante		
						F5_AO_FD	Eliminare olio da aria		
						F5_AO_RO	Recuperare olio filtrato		
						F5_AO_EV	Consentire il passaggio di aria verso la centralina di lubrificazione		

Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione Componente		
F5	Garantire la lubrificazione corretta agli organi in movimento	F5_AO	Garantire la lubrificazione dei supporti del mandrino			F5_AO_MN	Consentire lettura pressione		
		F5_GR	Garantire la lubrificazione delle guide degli assi			F5_GR_PL	Aumentare la pressione del grasso		
						F5_GR_DI	Distribuire il grasso sulle guide assi		
F6	Raffreddare i componenti del sistema					F6_UC	Gestire il raffreddamento dei componenti		
F7	Garantire un'azione di refrigerazione e lubrificazione all'utensile e al pezzo durante il taglio	F7_ML	Garantire la fornitura del liquido lubrorefrigerante			F7_ML_VS	Contenere il liquido di lubrorefrigerazione		
						F7_ML_LI	Indicare il livello di fluido nel contenitore		
						F7_ML_MT	Convertire energia elettrica in energia meccanica		
						F7_ML_MP	Aumentare pressione liquido lubrorefrigerante		
						F7_ML_FI	Eliminare le impurità		
						F7_ML_MN	Consentire lettura pressione		
		F7_TT	Trasportare i trucioli asportati fuori dalla macchina					F7_TT_MT	Convertire energia elettrica in energia meccanica
								F7_TT_RI	Ridurre il numero di giri
								F7_TT_CT	Trasmettere il moto

Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione Componente
F7	Garantire un'azione di refrigerazione e lubrificazione all'utensile e al pezzo durante il taglio	F7_TT	Trasportare i trucioli asportati fuori dalla macchina			F7_TT_TN	Garantire la giusta tensione al tappeto trasportatore
						F7_TT_TP	Convogliare i trucioli nel compattatore
F8	Garantire la gestione degli utensili					F8_MT	Convertire energia elettrica in energia meccanica
						F8_RI	Trasmettere il moto
						F8_CR	Movimentare le pinze
						F8_CP	Aprire sportello cambio utensili
						F8_PU	Predisporre l'utensile all'immagazzinamento o all'installazione sul mandrino
						F8_SZ	Individuare l'origine del sistema di riferimento
						F8_SU	Assicurare la presenza dell'utensile sulla pinza
						F8_EN	Individuare il posizionamento relativo delle pinze
F9	Garantire la fornitura di corrente elettrica					F9_CN	Raffreddare gli armadi elettrici
						F9_LM	Illuminare la postazione mandrino
						F9_UPS	Alimentare il sistema in caso di perdita di sorgente elettrica esterna

Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione	Codifica	Funzione Componente
F10	Garantire la protezione dell'area lavoro e supportare il pezzo da lavorare					F10_CP	Aprire le porte della zona di lavoro
						F10_TP	Supportare il pezzo durante la fase di lavorazione
						F10_SX	Proteggere la zona di lavoro, le viti e le guide asse X
						F10_SY	Proteggere la zona di lavoro, le viti e le guide asse Y
						F10_VT	Proteggere il personale addetto
F11	Provvedere alla elaborazione e gestione dati per il funzionamento corretto della macchina					F11_HW	Permettere l'esecuzione dei calcoli
						F11_SW	Eseguire i calcoli
						F11_PL	Immettere dati nel PLC
						F11_SC	Ricevere dati dal PLC

Appendice E. BDD più caratteristici delle architetture logiche e funzionali della macchina in esame

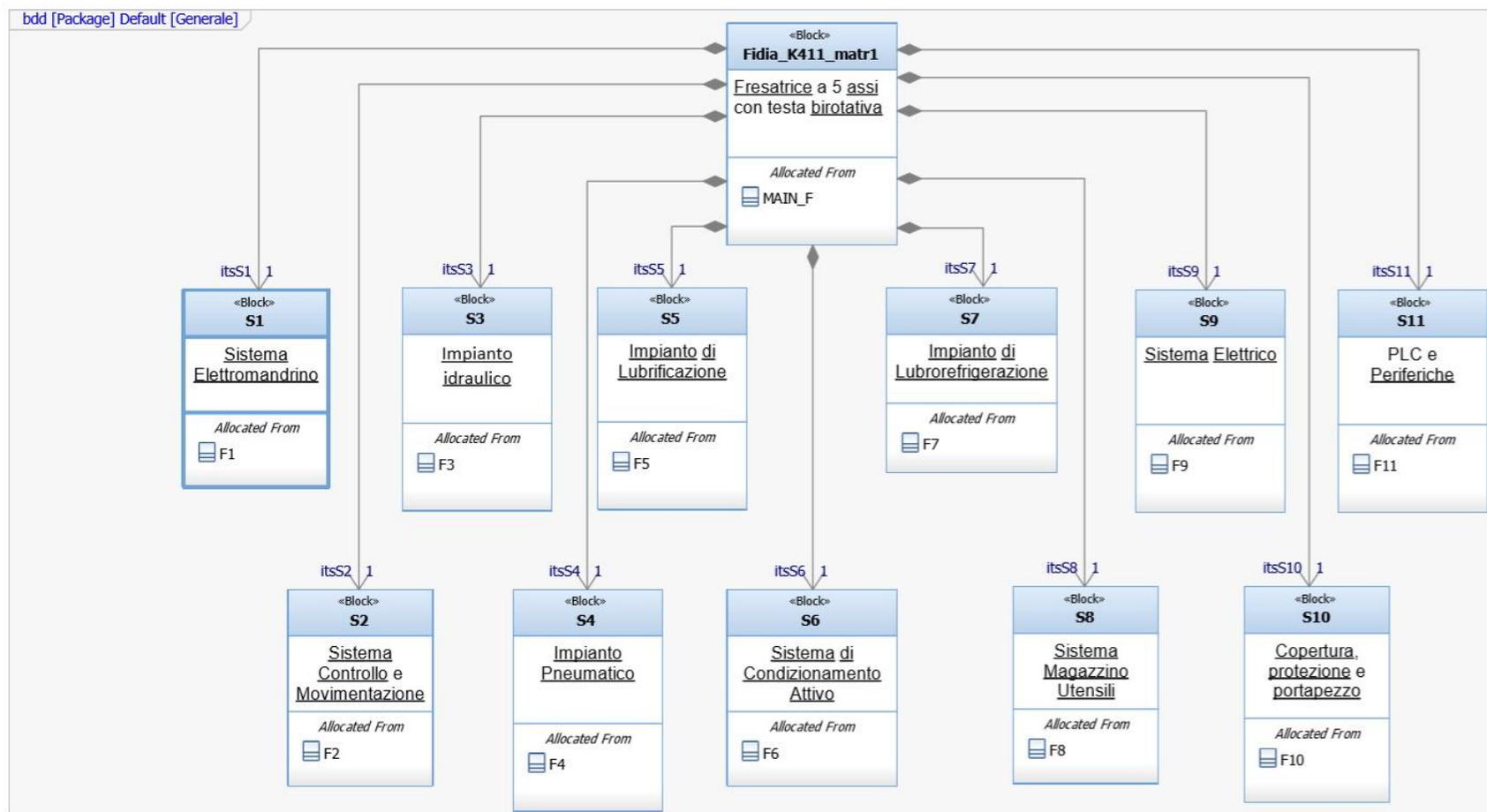


Figura E-1 Scomposizione logica al primo livello della Fidia K411

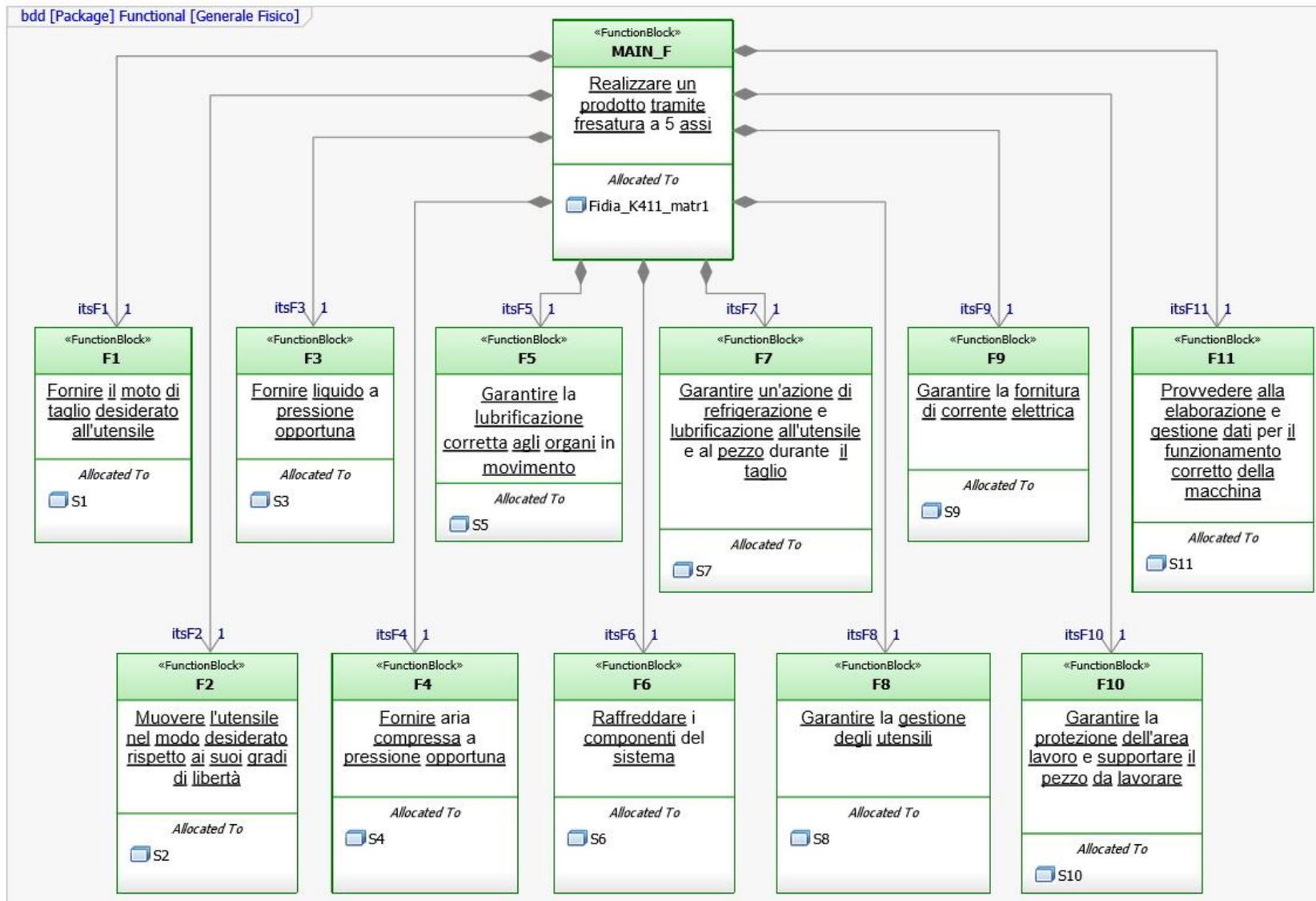


Figura E-2 Scomposizione funzionale al I livello della Fidia K411

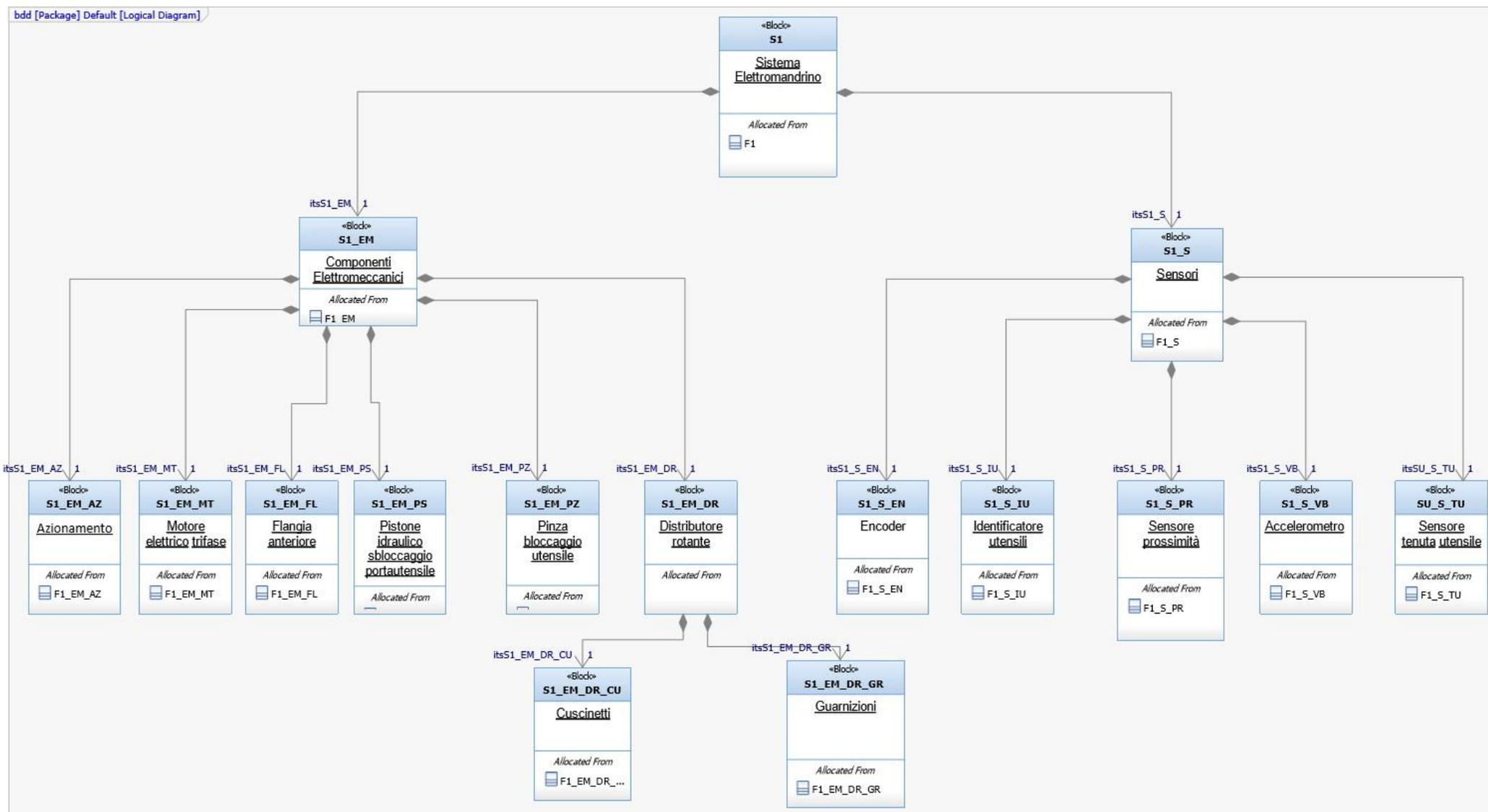


Figura E-3 Scomposizione logica del sistema elettromandrino

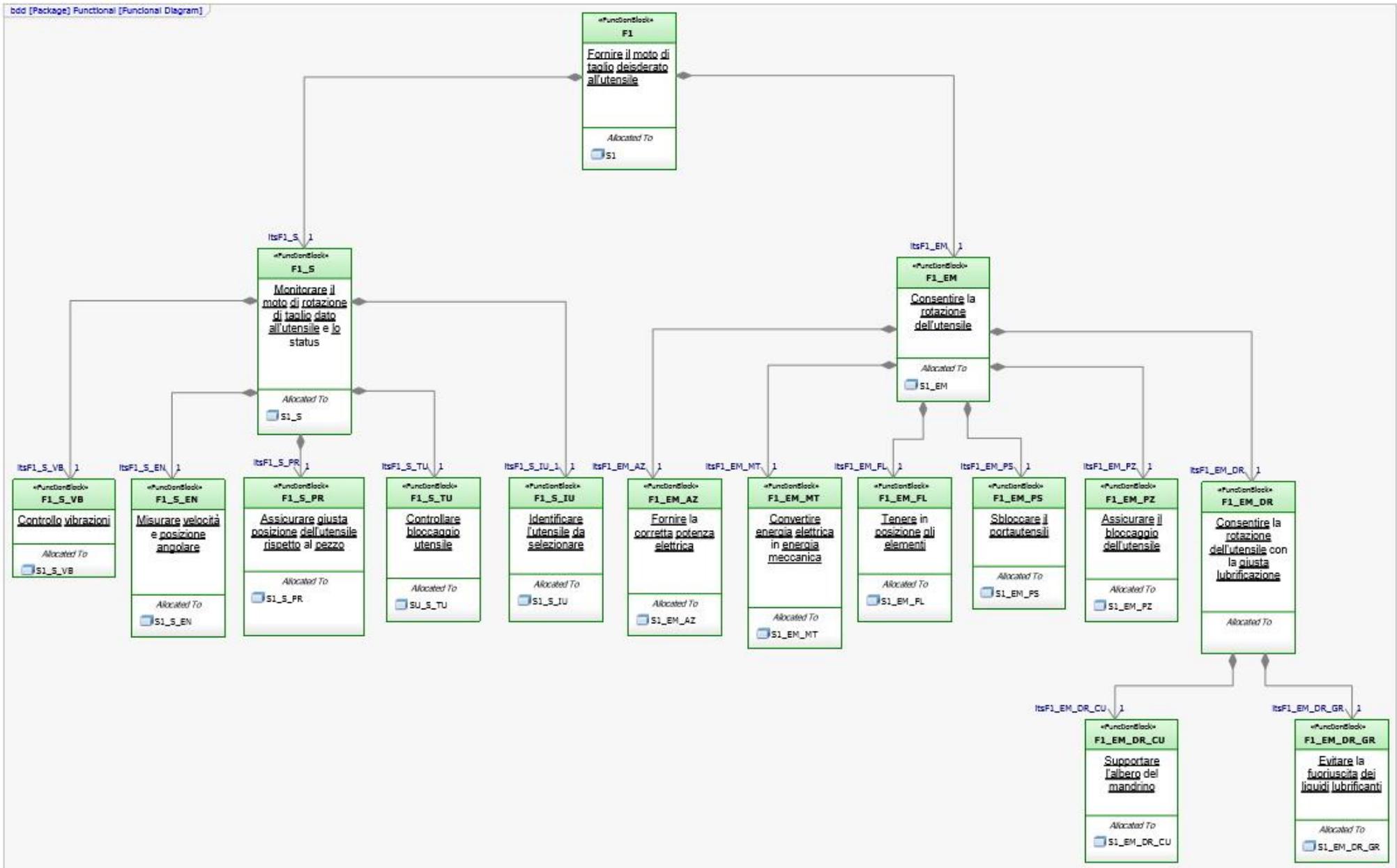


Figura E-4 Scomposizione funzionale del sistema elettromandrino

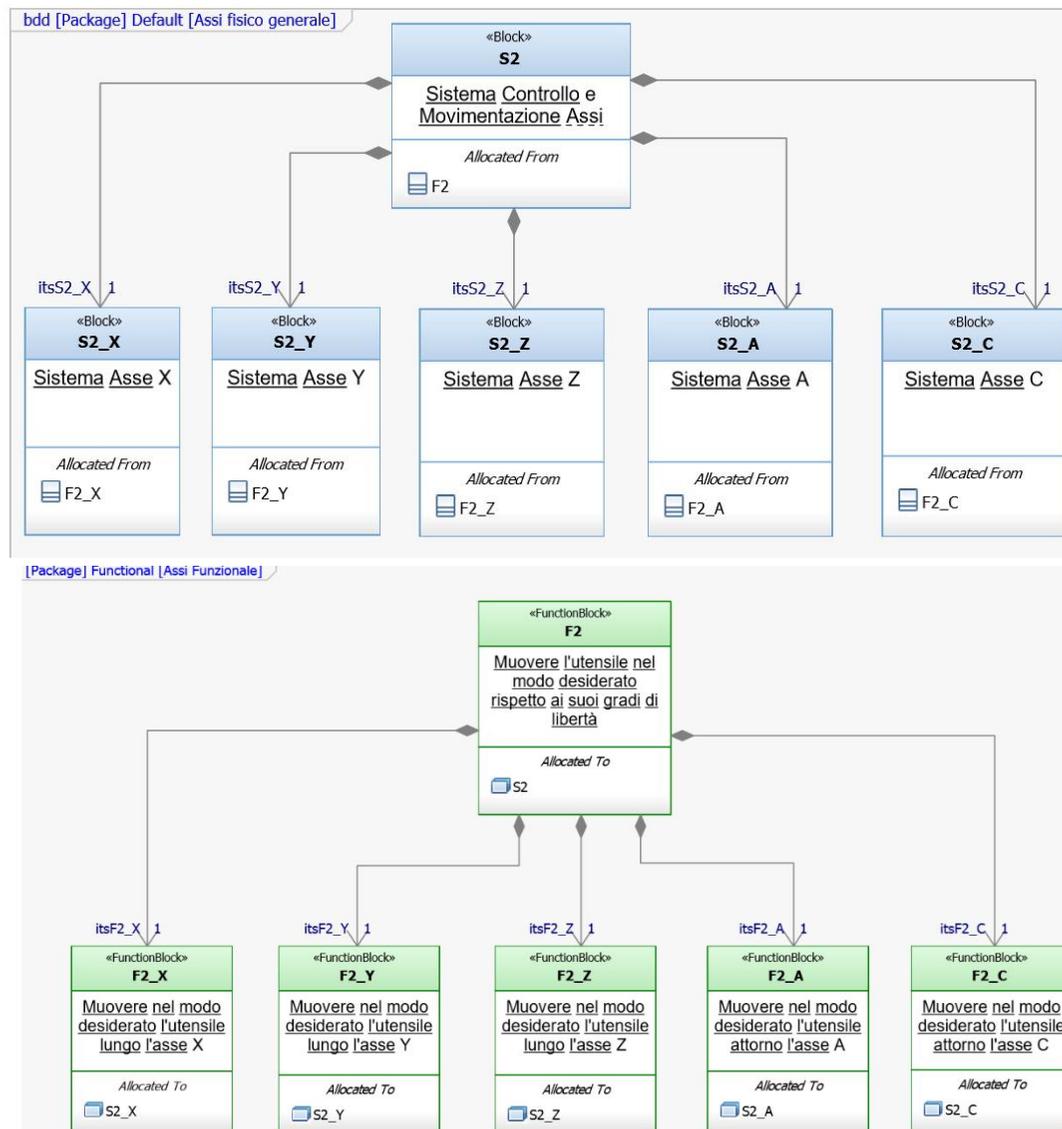


Figura E-5 Scomposizione logica e funzionale del sistema movimentazione e controllo assi al II livello

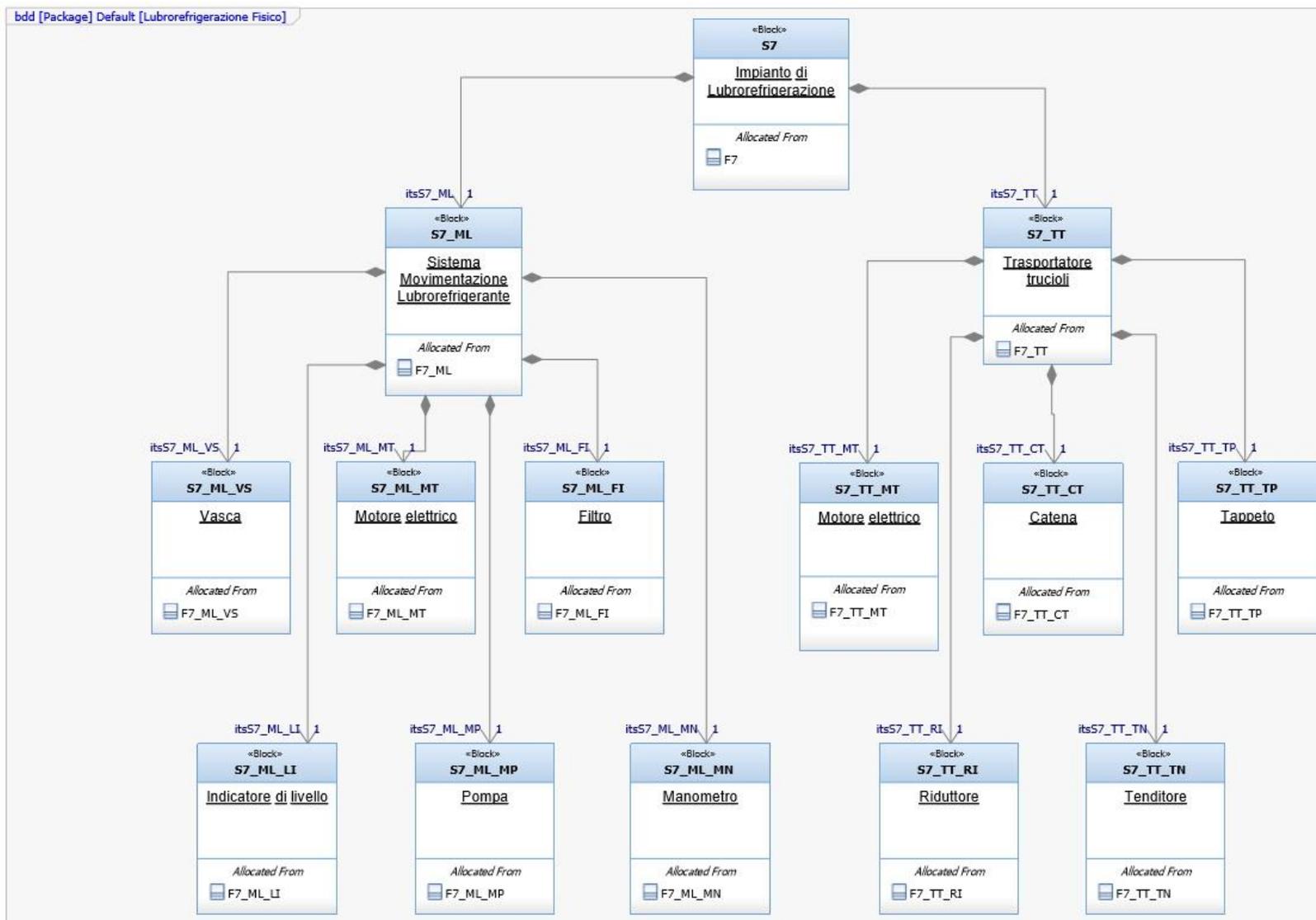


Figura E-6 Scomposizione logica del sistema di lubrorefrigerazione

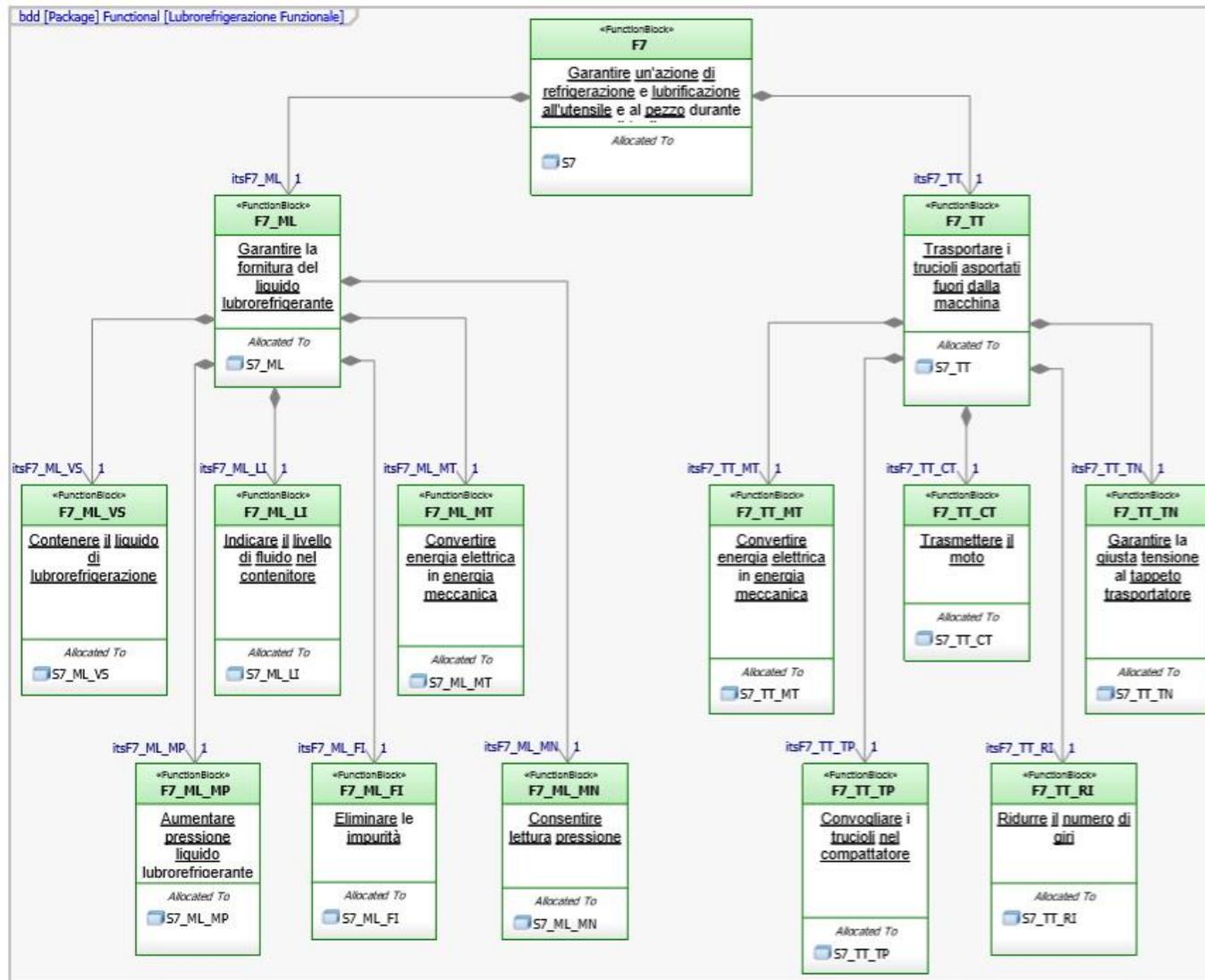


Figura E-7 Scomposizione funzionale dell'impianto di lubrorefrigerazione

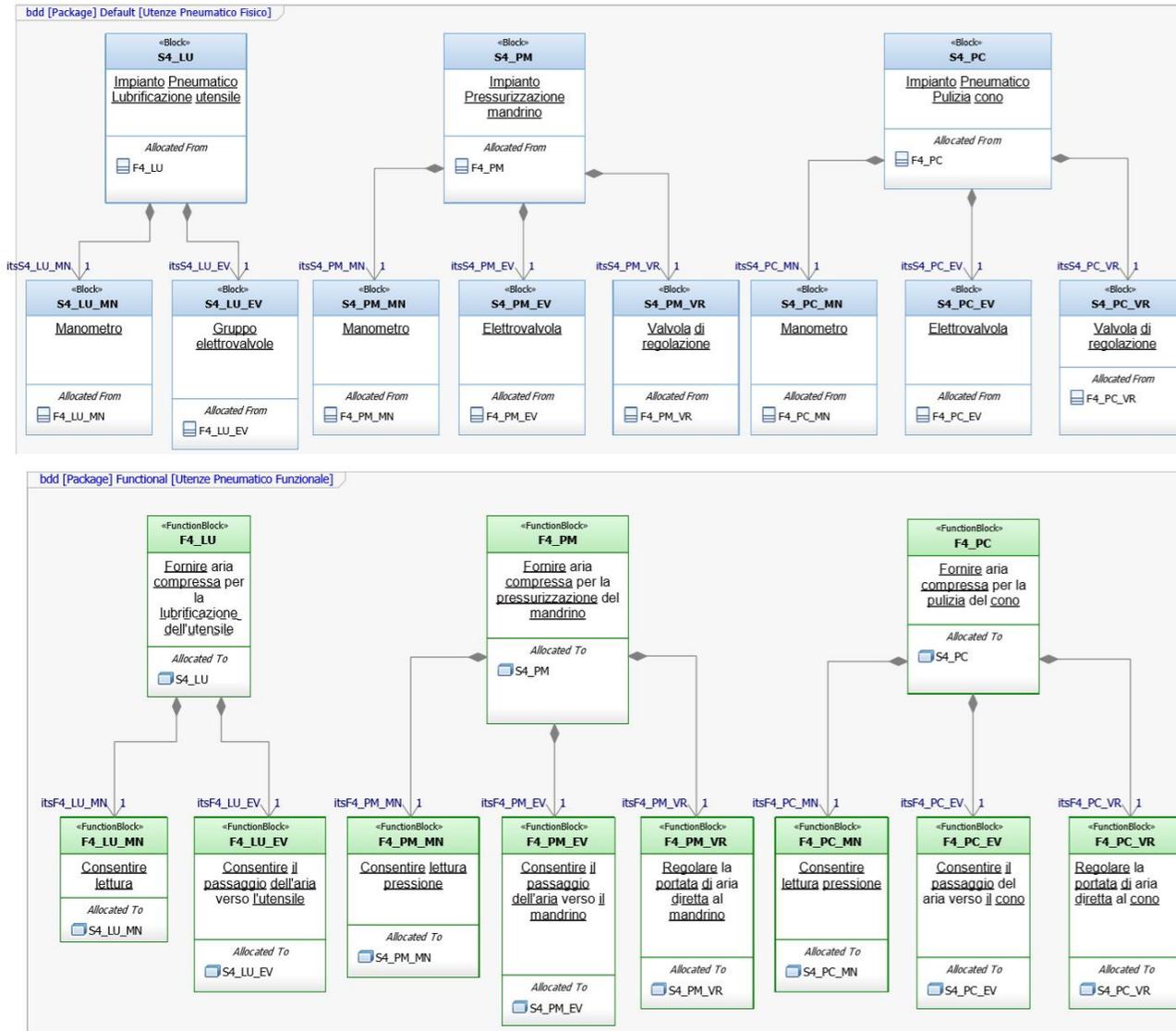


Figura E-8 Scomposizione logica e funzionale dell'impianto pneumatico verso le utenze

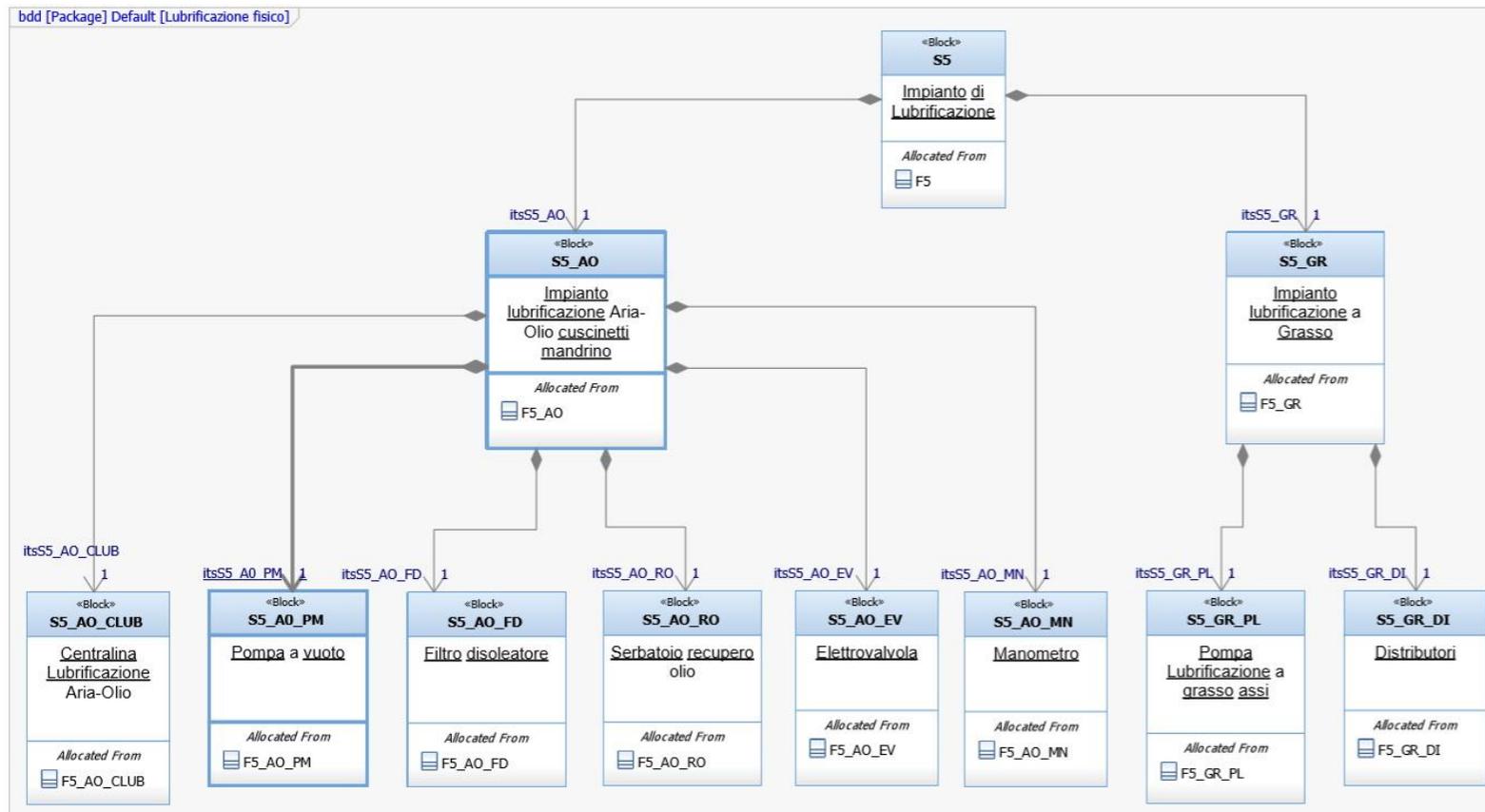


Figura E-9 Scomposizione logica dell'impianto di lubrificazione

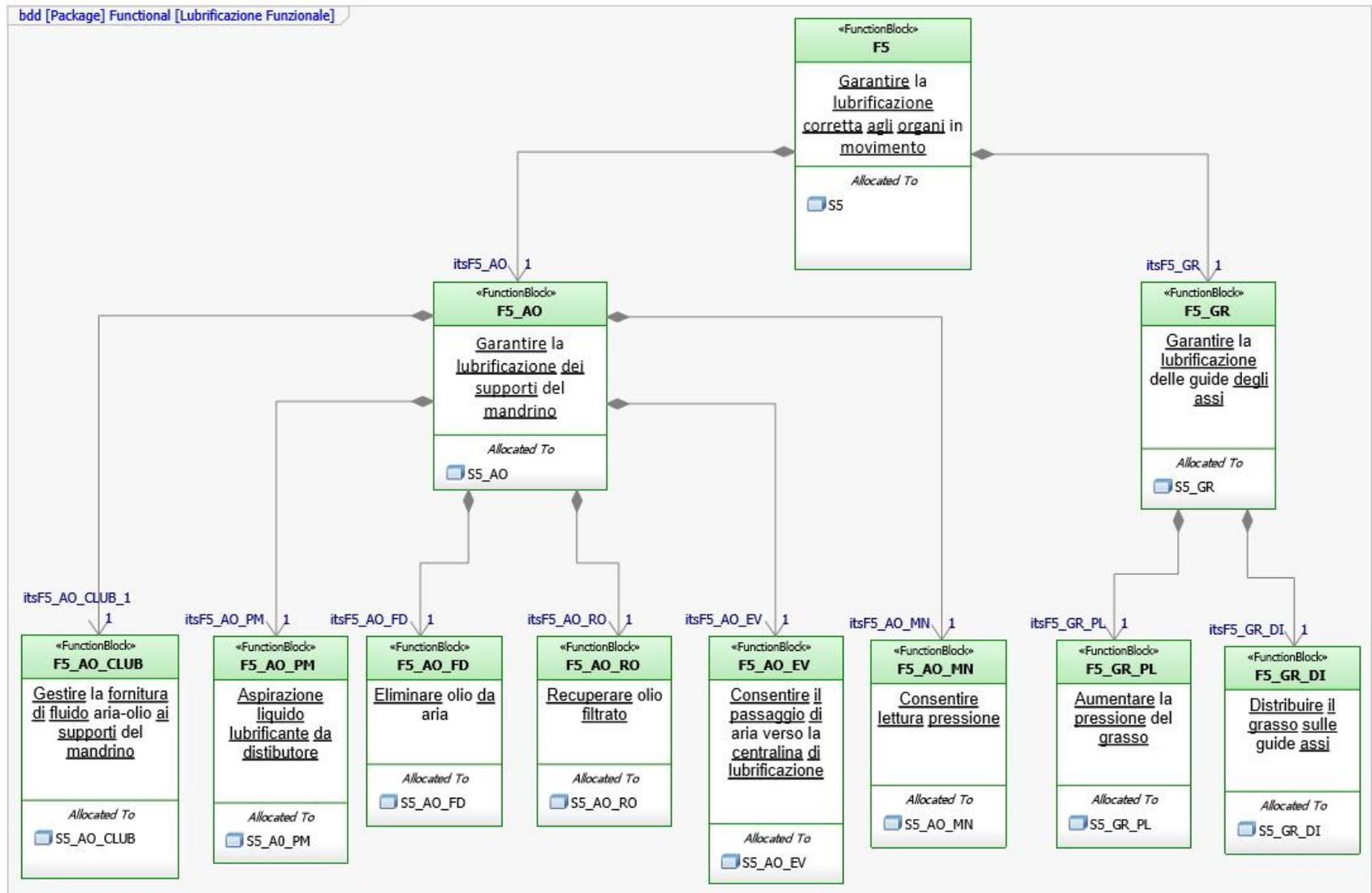


Figura E-10 Scomposizione funzionale dell'impianto di lubrificazione

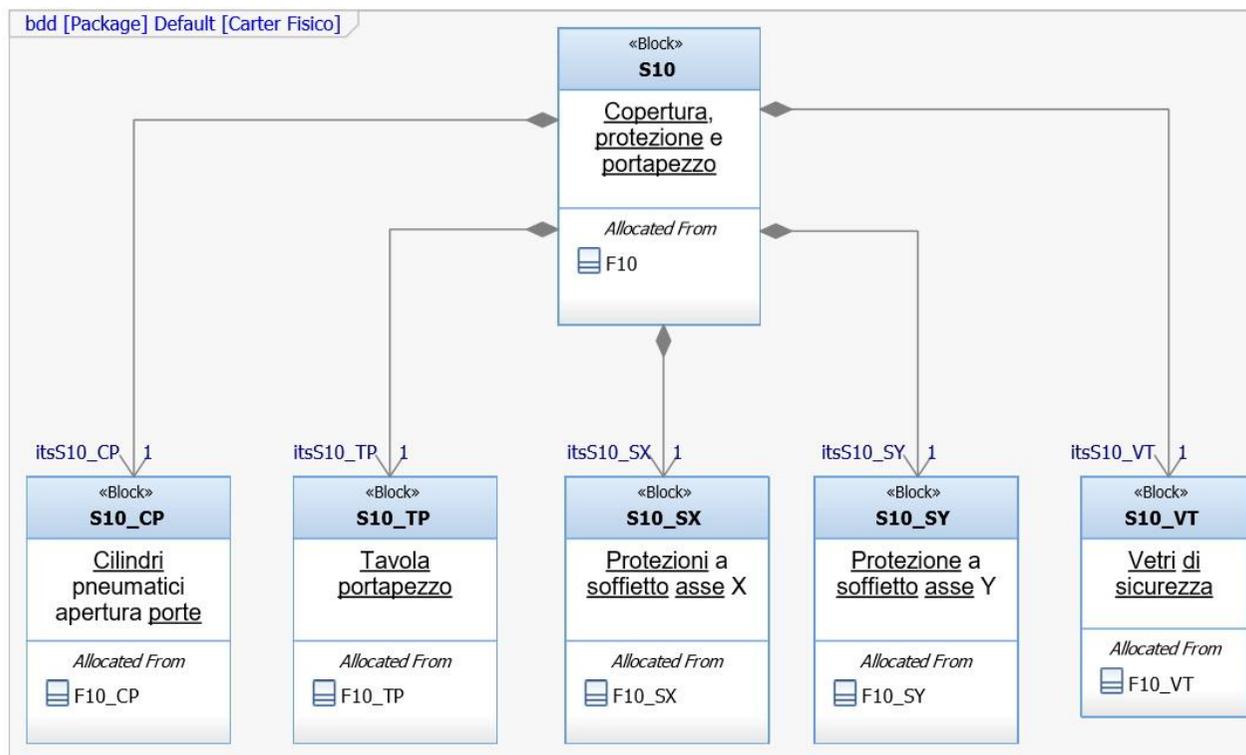


Figura E-11 Scomposizione logica dei sistemi di copertura, protezione e portapezzo

Appendice F. Analisi FMECA

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S1_A_S_EN_1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Asse non adeguatamente controllato	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	7.5	16	3	5	6	90	-	3	5	6	90
S1_A_S_EN_2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Asse non adeguatamente controllato	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	7.5	16	3	5	6	90	-	3	5	6	90
S1_A_S_EN_3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Asse non controllato	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	7.5	16	3	6	6	108	-	3	6	6	108
S1_A_S_EN_4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Asse non controllato	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	7.5	16	3	6	6	108	-	3	6	6	108
S1_C_S_EN_1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Asse non adeguatamente controllato	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	7.5	16	3	5	6	90	-	3	5	6	90
S1_C_S_EN_2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Asse non adeguatamente controllato	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	7.5	16	3	5	6	90	-	3	5	6	90
S1_C_S_EN_3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Asse non controllato	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	7.5	16	3	6	6	108	-	3	6	6	108
S1_C_S_EN_4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Asse non controllato	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	7.5	16	3	6	6	108	-	3	6	6	108
S1_EM_AZ_1	Parziale	Usura	Malfunzionamento scheda	Elettromandrino non impiegabile correttamente	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	3	39	2	6	6	72	Revisione mandrino (18 mesi)	2	6	5	60
S1_EM_AZ_2	Totale	Usura	Rottura scheda	Elettromandrino non impiegabile	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	3	39	2	7	6	84	Revisione mandrino (18 mesi)	2	7	5	70

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S1_EM_C O_PZ_1	Parziale	Usura	Movimento pinza non corretto	Utensile non correttamente in presa	Difettosità nel prodotto	Ingrassaggio (6 mesi)	Pulizia e controllo interno del cono portautensili (servicing)	14.3	8	4	5	5	100	Revisione mandrino (18 mesi)	4	5	5	100
S1_EM_C O_PZ_2	Intermittente	Usura	Movimento pinza non corretto	Utensile non correttamente in presa	Difettosità nel prodotto	Ingrassaggio (6 mesi)	Pulizia e controllo interno del cono portautensili (servicing)	14.3	8	4	5	5	100	Revisione mandrino (18 mesi)	4	5	5	100
S1_EM_C O_PZ_3	Totale	Usura	Impossibilità movimento pinza	Impossibilità presa utensile	Fermo Macchina 4h<t<8h	Ingrassaggio (6 mesi)	Pulizia e controllo interno del cono portautensili (servicing)	14.3	8	4	7	5	140	Revisione mandrino (18 mesi)	4	7	5	140
S1_EM_DR_CU_1	Parziale	Mancanza lubrificazione porta ad usura eccessiva	Funzionamento non corretto	Vibrazioni del mandrino	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo Controllo livello olio di lubrificazione e manometro di pressione dell'aria (6 mesi)	1.1	104	1	5	8	40	Revisione mandrino (18 mesi)	1	5	5	25
S1_EM_DR_CU_2	Totale	Mancanza lubrificazione porta ad usura eccessiva	Rottura cuscinetto	Vibrazioni notevoli del mandrino	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo Controllo livello olio di lubrificazione e manometro	1.1	104	1	7	8	56	Revisione mandrino (18 mesi)	1	7	5	35

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S1_EM_DR_CU_3	Parziale	Usura	Funzionamento non corretto	Vibrazioni del mandrino	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo Controllo livello olio di lubrificazione e manometro di pressione dell'aria (6 mesi)	1.1	104	1	5	8	40	Revisione mandrino (18 mesi)	1	5	5	25
S1_EM_DR_CU_4	Totale	Usura	Rottura cuscinetto	Vibrazioni notevoli del mandrino	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo Controllo livello olio di lubrificazione e manometro di pressione dell'aria (6 mesi)	1.1	104	1	7	8	56	Revisione mandrino (18 mesi)	1	7	5	35
S1_EM_DR_GR_1	Parziale	Usura	Trafilamento fluido	Trafilamento fluido dal distributore rotante	Non prodotte parti difettose, ma riduzione olio presente in sistema lubrificazione	-	-	2.4	48	2	2	10	40	Revisione mandrino (18 mesi)	2	2	5	20
S1_EM_DR_GR_2	Totale	Usura	Non tenuta	Perdita fluido dal distributore rotante	Non prodotte parti difettose, ma Incremento	-	-	2.4	48	2	3	10	60	Revisione mandrino (18 mesi)	2	3	5	30

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S1_EM_F L_1	Parziale	Serraggio non corretto	Collegamento non corretto	Elettromandrino non correttamente tenuto	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	-	1.3	88	1	6	10	60	Revisione mandrino (18 mesi)	1	6	5	30
S1_EM_F L_2	Parziale	Usura per vibrazioni	Collegamento non corretto	Elettromandrino non correttamente tenuto	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	-	1.3	88	1	6	10	60	Revisione mandrino (18 mesi)	1	6	5	30
S1_EM_F L_3	Totale	Usura	Mancanza di collegamento	Cedimento dell'elettromandrino	Fermo Macchina t>8h	-	-	1.3	88	1	8	10	80	Revisione mandrino (18 mesi)	1	8	5	40
S1_EM_MT_1	Totale	Usura	Blocco motore	Elettromandrino non impiegabile	Fermo Macchina t>8h	-	Controlli di processo	10.0	12	3	8	6	144	Revisione mandrino (18 mesi)	3	8	5	120
S1_EM_MT_2	Totale	Utilizzo scorretto	Blocco motore	Elettromandrino non impiegabile	Fermo Macchina t>8h	-	-	10.0	12	3	8	6	144	Revisione mandrino (18 mesi)	3	8	5	120
S1_EM_P S_1	Parziale	Usura	Movimento pistone non corretto	Presenza cono portautensile non corretta	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	14.3	8	4	5	8	160	Verifica funzionamento (3 mesi) Revisione mandrino (18 mesi)	4	4	7	112
S1_EM_P S_2	Intermittente	Usura	Movimento pistone non corretto	Presenza cono portautensile non corretta	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	14.3	8	4	5	8	160	Verifica funzionamento (3 mesi) Revisione mandrino (18 mesi)	4	4	7	112
S1_EM_P S_3	Totale	Usura	Impossibilità movimento pistone	Impossibilità presenza cono portautensile	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	14.3	8	4	7	8	224	Verifica funzionamento (3 mesi)	4	5	7	140

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Revisione mandrino (18 mesi)	O	S	D	RPN
S1_EM_P S_4	Totale	Utilizzo scorretto	Impossibilità movimento pistone	Impossibilità presa cono portautensile	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	14.3	8	4	7	8	224	Verifica funzionamento (3 mesi) Revisione mandrino (18 mesi)	4	5	7	140
S1_S_EN _1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Elettromandrino non adeguatamente controllato	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	8.0	15	3	5	6	90	Revisione mandrino (18 mesi)	3	5	5	75
S1_S_EN _2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Elettromandrino non adeguatamente controllato	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	8.0	15	3	5	6	90	Revisione mandrino (18 mesi)	3	5	5	75
S1_S_EN _3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Elettromandrino non controllato	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	8.0	15	3	6	6	108	Revisione mandrino (18 mesi)	3	6	5	90
S1_S_EN _4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Elettromandrino non controllato	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	8.0	15	3	6	6	108	Revisione mandrino (18 mesi)	3	6	5	90
S1_S_TU _1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Utensile non adeguatamente bloccato	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	8.5	14	3	5	6	90	Revisione mandrino (18 mesi)	3	5	5	75
S1_S_TU _2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Utensile non adeguatamente bloccato	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	8.5	14	3	5	6	90	Revisione mandrino (18 mesi)	3	5	5	75
S1_S_TU _3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Utensile non bloccato	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	8.5	14	3	7	6	126	Revisione mandrino (18 mesi)	3	7	5	105
S1_S_TU _4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Utensile non bloccato	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	8.5	14	3	7	6	126	Revisione mandrino (18 mesi)	3	7	5	105

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S10_CP_1	Parziale	Usura	Movimento pistone non corretto	Difficoltà apertura porta zona lavoro	Fermo Macchina 10min<t<30 min	-	-	14.3	8	4	3	10	120	-	4	3	10	120
S10_CP_2	Intermittente	Usura	Movimento pistone non corretto	Difficoltà apertura porta zona lavoro	Fermo Macchina 10min<t<30 min	-	-	14.3	8	4	3	10	120	-	4	3	10	120
S10_CP_3	Totale	Usura	Impossibilità movimento pistone	Porta zona lavoro non si apre	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	-	14.3	8	4	6	10	240	Verifica funzionamento (3 mesi)	4	5	7	140
S10_CP_4	Totale	Utilizzo scorretto	Impossibilità movimento pistone	Porta zona lavoro non si apre	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	-	14.3	8	4	6	10	240	Verifica funzionamento (3 mesi)	4	5	7	140
S2_A_EM_AZ_1	Parziale	Usura	Malfunzionamento scheda	Moto asse non corretto	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	3	39	2	6	6	72	-	2	6	6	72
S2_A_EM_AZ_2	Totale	Usura	Rottura scheda	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	3	39	2	7	6	84	-	2	7	6	84
S2_A_EM_MT_1	Totale	Usura	Blocco motore	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_A_EM_MT_2	Totale	Utilizzo scorretto	Blocco motore	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_A_EM_RD_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	15	8	4	7	7	196	Ingrassaggio e controllo stato (6 mesi)	4	5	7	140
S2_A_EM_RD_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	15	8	4	5	7	140	Ingrassaggio e controllo stato (6 mesi)	4	5	6	120

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S2_A_EM_RD_3	Totale	Usura	Rottura dente	Moto asse non corretto	Fermo Macchina $t > 8h$	-	Controlli di processo	15	8	4	8	7	224	Ingrassaggio e controllo stato (6 mesi)	4	5	7	140
S2_A_S_MC_1	Parziale	Usura	Stato cambiato erroneamente	Determinazione errata dello zero	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	15.4	8	4	5	6	120	-	4	5	6	120
S2_A_S_MC_2	Totale	Usura	Non cambiamento stato	Impossibile determinazione zero dell'asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	15.4	8	4	7	6	168	-	4	7	6	168
S2_C_EM_AZ_1	Parziale	Usura	Malfunzionamento scheda	Moto asse non corretto	Fermo Macchina $1h < t < 4h$	-	Controlli di processo	3	39	2	6	6	72	-	2	6	6	72
S2_C_EM_AZ_2	Totale	Usura	Rottura scheda	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	3	39	2	7	6	84	-	2	7	6	84
S2_C_EM_MT_1	Totale	Usura	Blocco motore	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_C_EM_MT_2	Totale	Utilizzo scorretto	Blocco motore	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	-	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_C_EM_RD_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	15	8	4	7	7	196	Ingrassaggio e controllo stato (6 mesi)	4	5	7	140
S2_C_EM_RD_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	15	8	4	5	7	140	Ingrassaggio e controllo stato (6 mesi)	4	5	6	120
S2_C_EM_RD_3	Totale	Usura	Rottura dente	Moto asse non corretto	Fermo Macchina $t > 8h$	-	Controlli di processo	15	8	4	8	7	224	Ingrassaggio e controllo stato (6 mesi)	4	5	7	140

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S2_C_S_MC_1	Parziale	Usura	Stato cambiato erroneamente	Determinazione errata dello zero	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	15.4	8	4	5	6	120	-	4	5	6	120
S2_C_S_MC_2	Totale	Usura	Non cambiamento stato	Impossibile determinazione zero dell'asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	15.4	8	4	7	6	168	-	4	7	6	168
S2_X_E_M_AZ_1	Parziale	Usura	Malfunzionamento scheda	Moto asse non corretto	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	3	39	2	6	6	72	-	2	6	6	72
S2_X_E_M_AZ_1	Parziale	Usura	Malfunzionamento scheda	Moto asse non corretto	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	3	39	2	6	6	72	-	2	6	6	72
S2_X_E_M_AZ_2	Totale	Usura	Rottura scheda	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	3	39	2	7	6	84	-	2	7	6	84
S2_X_E_M_AZ_2	Totale	Usura	Rottura scheda	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	3	39	2	7	6	84	-	2	7	6	84
S2_X_E_M_CH_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	5	23	2	7	7	98	-	2	7	7	98
S2_X_E_M_CH_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	5	23	2	5	7	70	-	2	5	7	70
S2_X_E_M_CH_3	Totale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Fermo Macchina t>8h	-	Controlli di processo	5	23	2	8	7	112	-	2	8	7	112
S2_X_E_M_CI_2	Totale	Usura	Rottura cinghia	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	40	3	6	7	10	420	Controllo tensionamento ed eventuale sostituzione	6	5	7	210

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
														<i>cinghia (6 mesi)</i>				
S2_X_E M_CI_1	Parziale	Tensionamento errato	Slittamento o aumento usura	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	-	40	3	6	5	10	300	<i>Controllo tensionamento ed eventuale sostituzione cinghia (6 mesi)</i>	6	5	7	210
S2_X_E M_GU_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	5	23	2	7	10	140	-	2	7	10	140
S2_X_E M_GU_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	-	5	23	2	5	10	100	-	2	5	10	100
S2_X_E M_GU_3	Totale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Fermo Macchina t>8h	-	-	5	23	2	8	10	160	-	2	8	10	160
S2_X_E M_MT_1	Totale	Usura	Blocco motore	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_X_E M_MT_2	Totale	Utilizzo scorretto	Blocco motore	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_X_E M_PT_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	5	23	2	7	10	140	-	2	7	10	140
S2_X_E M_PT_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	-	5	23	2	5	10	100	-	2	5	10	100

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S2_X_E M_PT_3	Totale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Fermo Macchina $t > 8h$	-	-	5	23	2	8	10	160	-	2	8	10	160
S2_X_E M_VT_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	6.7	18	3	7	7	147	-	3	7	7	147
S2_X_E M_VT_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	6.7	18	3	5	7	105	-	3	5	7	105
S2_X_E M_VT_3	Totale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Fermo Macchina $t > 8h$	-	Controlli di processo	6.7	18	3	8	7	168	-	3	8	7	168
S2_X_S MC_1	Parziale	Usura	Stato cambiato erroneamente	Determinazione errata dello zero	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	15.4	8	4	5	6	120	-	4	5	6	120
S2_X_S MC_2	Totale	Usura	Non cambiamento stato	Impossibile determinazione zero dell'asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	15.4	8	4	7	6	168	-	4	7	6	168
S2_X_S RO_1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	7.5	16	3	5	6	90	-	3	5	6	90
S2_X_S RO_2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	7.5	16	3	5	6	90	-	3	5	6	90
S2_X_S RO_3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	7.5	16	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_X_S RO_4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	7.5	16	3	7	6	126	-	3	7	6	126

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S2_Y_E M_GU_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	5	23	2	7	10	140	-	2	7	10	140
S2_Y_E M_GU_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	-	5	23	2	5	10	100	-	2	5	10	100
S2_Y_E M_GU_3	Totale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Fermo Macchina t>8h	-	-	5	23	2	8	10	160	-	2	8	10	160
S2_Y_E M_MT_1	Totale	Usura	Blocco motore	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_Y_E M_MT_2	Totale	Utilizzo scorretto	Blocco motore	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_Y_E M_PT_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	5	23	2	7	10	140	-	2	7	10	140
S2_Y_E M_PT_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	-	5	23	2	5	10	100	-	2	5	10	100
S2_Y_E M_PT_3	Totale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Fermo Macchina t>8h	-	-	5	23	2	8	10	160	-	2	8	10	160
S2_Y_E M_VT_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	6.7	18	3	7	7	147	-	3	7	7	147
S2_Y_E M_VT_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	6.7	18	3	5	7	105	-	3	5	7	105

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S2_Y_E M_VT_3	Totale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Fermo Macchina $t > 8h$	-	Controlli di processo	6.7	18	3	8	7	168	-	3	8	7	168
S2_Y_S_ MC_1	Parziale	Usura	Stato cambiato erroneamente	Determinazione errata dello zero	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	15.4	8	4	5	6	120	-	4	5	6	120
S2_Y_S_ MC_2	Totale	Usura	Non cambiamento stato	Impossibile determinazione zero dell'asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	15.4	8	4	7	6	168	-	4	7	6	168
S2_Y_S_ RO_1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	7.5	16	3	5	6	90	-	3	5	6	90
S2_Y_S_ RO_2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	7.5	16	3	5	6	90	-	3	5	6	90
S2_Y_S_ RO_3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	7.5	16	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_Y_S_ RO_4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	7.5	16	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_Z_EM _AZ_1	Parziale	Usura	Malfunzionamento scheda	Moto asse non corretto	Fermo Macchina $1h < t < 4h$	-	Controlli di processo	3	39	2	6	6	72	-	2	6	6	72
S2_Z_EM _AZ_2	Totale	Usura	Rottura scheda	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	3	39	2	7	6	84	-	2	7	6	84
S2_Z_EM _CI_2	Totale	Usura	Rottura cinghia	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	-	40	3	6	7	10	420	Controllo tensionamento ed eventuale sostituzione	6	5	7	210

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
														<i>cinghia (6 mesi)</i>				
S2_Z_EM_CI_1	Parziale	Tensionamento errato	Slittamento o aumento usura	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	-	40	3	6	5	10	300	<i>Controllo tensionamento o ed eventuale sostituzione cinghia (6 mesi)</i>	6	5	7	210
S2_Z_EM_GU_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	5	23	2	7	10	140	-	2	7	10	140
S2_Z_EM_GU_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	-	5	23	2	5	10	100	-	2	5	10	100
S2_Z_EM_GU_3	Totale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Fermo Macchina t>8h	-	-	5	23	2	8	10	160	-	2	8	10	160
S2_Z_EM_MT_1	Totale	Usura	Blocco motore	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_Z_EM_MT_2	Totale	Utilizzo scorretto	Blocco motore	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_Z_EM_PT_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Impossibile moto asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	5	23	2	7	10	140	-	2	7	10	140
S2_Z_EM_PT_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	-	5	23	2	5	10	100	-	2	5	10	100

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S2_Z_EM_PT_3	Totale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Fermo Macchina $t > 8h$	-	-	5	23	2	8	10	160	-	2	8	10	160
S2_Z_EM_VT_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	6.7	18	3	7	7	147	-	3	7	7	147
S2_Z_EM_VT_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	6.7	18	3	5	7	105	-	3	5	7	105
S2_Z_EM_VT_3	Totale	Usura	Gioco	Moto asse non corretto	Fermo Macchina $t > 8h$	-	Controlli di processo	6.7	18	3	8	7	168	-	3	8	7	168
S2_Z_S_MC_1	Parziale	Usura	Stato cambiato erroneamente	Determinazione errata dello zero	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	15.4	8	4	5	6	120	-	4	5	6	120
S2_Z_S_MC_2	Totale	Usura	Non cambiamento stato	Impossibile determinazione zero dell'asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	15.4	8	4	7	6	168	-	4	7	6	168
S2_Z_S_RO_1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	7.5	16	3	5	6	90	-	3	5	6	90
S2_Z_S_RO_2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Moto asse non corretto	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	7.5	16	3	5	6	90	-	3	5	6	90
S2_Z_S_RO_3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	7.5	16	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S2_Z_S_RO_4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Impossibile moto asse	Fermo Macchina $4h < t < 8h$	-	Controlli di processo	7.5	16	3	7	6	126	-	3	7	6	126

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S1_EM_P Z_1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Vibrazioni del mandrino	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	15.0	8	4	5	6	120	Revisione mandrino (18 mesi)	4	5	5	100
S1_EM_P Z_2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Vibrazioni del mandrino	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	15.0	8	4	5	6	120	Revisione mandrino (18 mesi)	4	5	5	100
S1_EM_P Z_3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Vibrazioni notevoli del mandrino	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	15.0	8	4	7	6	168	Revisione mandrino (18 mesi)	4	7	5	140
S1_EM_P Z_4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Vibrazioni notevoli del mandrino	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	15.0	8	4	7	6	168	Revisione mandrino (18 mesi)	4	7	5	140
S3_BZ_A C_1	Parziale	Usura	Perdita parziale fluido	Perdita parziale fluido dal circuito idraulico	Non prodotte parti difettose, ma rischio di perdere totalmente il fluido	-	Controlli di processo	1.6	72	1	3	7	21	-	1	3	7	21
S3_BZ_A C_2	Totale	Usura	Perdita totale fluido	Perdita fluido dal circuito idraulico	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	1.6	72	1	7	7	49	-	1	7	7	49
S3_BZ_M N_1	Totale	Usura	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte del sistema di bilanciamento asse Z	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S3_BZ_M N_2	Totale	Utilizzo scorretto	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte del sistema di bilanciamento asse Z	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60

S3_BZ_P R_1	Parziale	Taratura errata	Errato passaggio di fluido	Alimentazione della linea con pressione errata	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.6	44	2	5	8	80	-	2	5	8	80
Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S3_BZ_P R_2	Parziale	Usura	Errato passaggio di fluido	Alimentazione della linea con pressione errata	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.6	44	2	5	8	80	-	2	5	8	80
S3_BZ_P R_3	Totale	Usura	Rottura pressostato	Mancanza alimentazione linea	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	2.6	44	2	6	8	96	-	2	6	8	96
S3_BZ_V L_1	Parziale	Usura	Passaggio quantità fluido con corretta	Non corretto bilanciamento asse Z	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	9.3	13	3	5	7	105	-	3	5	7	105
S3_BZ_V L_2	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	non bilanciabile asse Z	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	9.3	13	3	6	7	126	-	3	6	7	126
S3_CI_E D_1	Parziale	Usura	Passaggio fluido limitato	Centralina idraulica non fornisce il fluido richiesto	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.4	48	2	5	7	70	-	2	5	7	70
S3_CI_E D_2	Intermittente	Usura	Passaggio fluido intermittente	Centralina idraulica fornisce fluido non costante agli elementi a valle	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.4	48	2	5	7	70	-	2	5	7	70
S3_CI_E D_3	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	Centralina idraulica non fornisce il fluido o fornisce sempre fluido	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	7	7	98	-	2	7	7	98
S3_CI_FI _1	Parziale	Usura	Passaggio di pochi detriti	Centralina idraulica fornisce fluido non totalmente filtrato	Non parti difettose, ma incrementa usura componenti a valle	-	-	2.53	46	2	3	10	60	Controllo stato ed eventuale sostituzione (6 mesi)	2	3	8	48

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S3_CI_FI_2	Totale	Usura	Passaggio incontrollato di detriti	Centralina idraulica fornisce fluido non filtrato	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	2.53	46	2	7	10	140	Controllo stato ed eventuale sostituzione (6 mesi)	2	7	8	112
S3_CI_LI_1	Totale	Settaggio / calibrazione errata	Livello indicato non corretto	Impossibile determinazione quantità fluido in centralina	Non prodotte parti difettose, ma rischio di avere meno fluido edl necessario	-	Controlli di processo	3.9	30	2	2	6	24	-	2	2	6	24
S3_CI_LI_2	Totale	Usura	Livello indicato non corretto o rottura	Impossibile determinazione quantità fluido in centralina	Non prodotte parti difettose, ma rischio di avere meno fluido edl necessario	-	Controlli di processo	3.9	30	2	2	6	24	-	2	2	6	24
S3_CI_M_N_1	Totale	Usura	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione di mandata della centralina	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S3_CI_M_N_2	Totale	Utilizzo scorretto	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione di mandata della centralina	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S3_CI_M_T_1	Totale	Usura	Blocco motore	Centralina idraulica non fornisce fluido in pressione	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S3_CI_M_T_2	Totale	Utilizzo scorretto	Blocco motore	Centralina idraulica non fornisce fluido in pressione	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S3_CI_P M_1	Intermittente	Cavitazione	Mandata portata non continua	Centralina idraulica non fornisce fluido a pressione continua	Fermo Macchina t<1h	-	Controlli di processo	6	20	3	4	7	84	-	3	4	7	84
S3_CI_P M_2	Totale	Cavitazione	Rottura pompa	Centralina idraulica non fornisce fluido in pressione	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	6	20	3	7	7	147	-	3	7	7	147
S3_CI_P M_3	Parziale	Usura	Pressione mandata ridotta	Centralina idraulica non fornisce fluido alla pressione desiderata	Fermo Macchina t<1h	-	Controlli di processo	6	20	3	4	7	84	-	3	4	7	84
S3_CI_P M_4	Totale	Usura	Rottura pompa	Centralina idraulica non fornisce fluido in pressione	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	6	20	3	7	7	147	-	3	7	7	147
S3_CI_V A_1	Parziale	Usura	Perdita parziale fluido	Perdita parziale fluido dal circuito idraulico	Non prodotte parti difettose, ma rischio perdere totalmente il fluido	-	Controllo con indicatore Controllo livello olio (6 mesi) Cambio olio (12 mesi)	1.6	72	1	3	7	21	-	1	3	7	21
S3_CI_V A_2	Totale	Usura	Perdita totale fluido	Perdita fluido dal circuito idraulico	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controllo con indicatore Controllo livello olio (6 mesi) Cambio olio (12 mesi)	1.6	72	1	7	7	49	-	1	7	7	49
S3_CI_V M_1	Parziale	Usura	Passaggio quantità fluido con corretta	Centralina idraulica non fornisce il fluido richiesto	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	9.3	13	3	5	7	105	-	3	5	7	105
S3_CI_V M_2	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	Centralina idraulica non fornisce il fluido o fornisce sempre fluido	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controllo di processo	9.3	13	3	7	7	147	-	3	7	7	147

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S3_FA_E V_1	Parziale	Usura	Passaggio fluido limitato	Non buona azione frenante asse	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.4	48	2	5	7	70	-	2	5	7	70
S3_FA_E V_2	Intermittente	Usura	Passaggio fluido intermittente	Non buona azione frenante asse	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.4	48	2	5	7	70	-	2	5	7	70
S3_FA_E V_3	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	Non azione frenante asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	7	7	98	-	2	7	7	98
S3_FA_M N_1	Totale	Usura	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte del sistema di freno	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S3_FA_M N_2	Totale	Utilizzo scorretto	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte del sistema di freno	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S3_FC_E V_1	Parziale	Usura	Passaggio fluido limitato	Non buona azione frenante asse	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.4	48	2	5	7	70	-	2	5	7	70
S3_FC_E V_2	Intermittente	Usura	Passaggio fluido intermittente	Non buona azione frenante asse	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.4	48	2	5	7	70	-	2	5	7	70
S3_FC_E V_3	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	Non azione frenante asse	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	7	7	98	-	2	7	7	98
S3_FC_M N_1	Totale	Usura	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte del sistema di freno	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S3_FC_M N_2	Totale	Utilizzo scorretto	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte del sistema di freno	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S3_FC_P R_1	Parziale	Taratura errata	Errato passaggio di fluido	Alimentazione della linea con pressione errata	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.6	44	2	5	8	80	-	2	5	8	80
S3_FC_P R_2	Parziale	Usura	Errato passaggio di fluido	Alimentazione della linea con pressione errata	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.6	44	2	5	8	80	-	2	5	8	80
S3_FC_P R_3	Totale	Usura	Rottura pressostato	Mancanza alimentazione linea	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	2.6	44	2	6	8	96	-	2	6	8	96
S3_PU_M N_1	Totale	Usura	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte del sistema di presa utensile	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S3_PU_M N_2	Totale	Utilizzo scorretto	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte del sistema di presa utensile	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S3_PU_P R_1	Parziale	Taratura errata	Errato passaggio di fluido	Alimentazione della linea con pressione errata	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.6	44	2	5	8	80	-	2	5	8	80
S3_PU_P R_1	Parziale	Taratura errata	Errato passaggio di fluido	Alimentazione della linea con pressione errata	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.6	44	2	5	8	80	-	2	5	8	80
S3_PU_P R_2	Parziale	Usura	Errato passaggio di fluido	Alimentazione della linea con pressione errata	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.6	44	2	5	8	80	-	2	5	8	80
S3_PU_P R_2	Parziale	Usura	Errato passaggio di fluido	Alimentazione della linea con pressione errata	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.6	44	2	5	8	80	-	2	5	8	80
S3_PU_P R_3	Totale	Usura	Rottura pressostato	Mancanza alimentazione linea	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	2.6	44	2	6	8	96	-	2	6	8	96

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S3_PU_P R_3	Totale	Usura	Rottura pressostato	Mancanza alimentazione linea	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	2.6	44	2	6	8	96	-	2	6	8	96
S3_PU_V L_1	Parziale	Usura	Passaggio fluido limitato	Non buon bloccaggio dell'utensile	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.4	48	2	5	7	70	-	2	5	7	70
S3_PU_V L_2	Intermittente	Usura	Passaggio fluido intermittente	Non buon bloccaggio dell'utensile	Difettosità nel prodotto	-	Controllo di processo	2.4	48	2	5	7	70	-	2	5	7	70
S3_PU_V L_3	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	Utensile non bloccato	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	7	7	98	-	2	7	7	98
S4_CM_E V_1	Parziale	Usura	Passaggio fluido limitato	Pistone cambio utensile riceve una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	3	7	42	-	2	3	7	42
S4_CM_E V_2	Intermittente	Usura	Passaggio fluido intermittente	Pistone cambio utensile riceve una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	3	7	42	-	2	3	7	42
S4_CM_E V_3	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	Pistone cambio utensile non riceve aria o la riceve sempre	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	6	7	84	-	2	6	7	84
S4_CP_E V_1	Parziale	Usura	Passaggio fluido limitato	Utensile a valle ricevono una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	3	7	42	-	2	3	7	42

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S4_CP_E_V_2	Intermittente	Usura	Passaggio fluido intermittente	UtENZE a valle ricevono una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	4	7	56	-	2	4	7	56
S4_CP_E_V_3	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	UtENZE a valle non ricevono aria o la ricevono sempre	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	6	7	84	-	2	6	7	84
S4_CP_FI_1	Parziale	Usura	Passaggio di pochi detriti	UtENZE a valle ricevono aria non pulita	Non parti difettose, ma incrementa usura componenti a valle	-	-	2.53	46	2	3	10	60	Controllo stato ed eventuale sostituzione (6 mesi)	2	3	8	48
S4_CP_FI_2	Totale	Usura	Passaggio incontrollato di detriti	Molte impurità presenti a valle	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	2.53	46	2	7	10	140	Controllo stato ed eventuale sostituzione (6 mesi)	2	7	8	112
S4_CP_M_N_1	Totale	Usura	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione dell'aria fornita dall'esterno	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S4_CP_M_N_2	Totale	Utilizzo scorretto	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione dell'aria fornita dall'esterno	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S4_CP_V_R_1	Parziale	Usura	Passaggio quantità fluido con corretta	UtENZE a valle ricevono una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	9.3	13	3	4	7	84	-	3	4	7	84
S4_CP_V_R_2	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o	UtENZE a valle non ricevono aria o la ricevono sempre	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	9.3	13	3	6	7	126	-	3	6	7	126

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S4_LU_E_V_1	Parziale	Usura	Passaggio fluido limitato	Utensile riceve una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	4	7	56	-	2	4	7	56
S4_LU_E_V_2	Intermittente	Usura	Passaggio fluido intermittente	Utensile riceve una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	4	7	56	-	2	4	7	56
S4_LU_E_V_3	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	Utensile non riceve aria o la riceve sempre	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	6	7	84	-	2	6	7	84
S4_LU_MN_1	Totale	Usura	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione dell'aria a monte dell'utensile	Fermo Macchina t<10 min	-	-	0	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S4_LU_MN_2	Totale	Utilizzo scorretto	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione dell'aria a monte dell'utensile	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S4_PC_E_V_1	Parziale	Usura	Passaggio fluido limitato	Cono riceve una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<10 min	-	Controllo di processo	2.4	48	2	3	7	42	-	2	3	7	42
S4_PC_E_V_2	Intermittente	Usura	Passaggio fluido intermittente	Cono riceve una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<10 min	-	Controllo di processo	2.4	48	2	3	7	42	-	2	3	7	42
S4_PC_E_V_3	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	Cono non riceve aria o la riceve sempre	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	4	7	56	-	2	4	7	56

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S4_PC_M N_1	Totale	Usura	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte del sistema di freno	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S4_PC_M N_2	Totale	Utilizzo scorretto	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte del sistema di freno	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S4_PC_V R_1	Parziale	Usura	Passaggio quantità fluido con corretta	Cono riceve una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<10 min	-	Controllo di processo	9.3	13	3	3	7	63	-	3	3	7	63
S4_PC_V R_2	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	Cono non riceve aria o la riceve sempre	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	9.3	13	3	4	7	84	-	3	4	7	84
S4_PM_E V_1	Parziale	Usura	Passaggio fluido limitato	Manrino riceve una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	4	7	56	-	2	4	7	56
S4_PM_E V_2	Intermittente	Usura	Passaggio fluido intermittente	Manrino riceve una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	4	7	56	-	2	4	7	56
S4_PM_E V_3	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	Mandrino non riceve aria o la riceve sempre	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	6	7	84	-	2	6	7	84
S4_PM_MN_1	Totale	Usura	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione del mandrino	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S4_PM_MN_2	Totale	Utilizzo scorretto	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione dell'aria a monte del mandrino	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S4_PM_V_R_1	Parziale	Usura	Passaggio quantità fluido con corretta	mandrino riceve una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	9.3	13	3	4	7	84	-	3	4	7	84
S4_PM_V_R_2	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	Mandrino non ricevono aria o la ricevono sempre	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	9.3	13	3	6	7	126	-	3	6	7	126
S4_PO_E_V_1	Parziale	Usura	Passaggio fluido limitato	Pistoni apertura porta ricevono una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	3	7	42	-	2	3	7	42
S4_PO_E_V_2	Intermittente	Usura	Passaggio fluido intermittente	Pistoni apertura porta ricevono una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	3	7	42	-	2	3	7	42
S4_PO_E_V_3	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido o fluido passa sempre	Pistoni apertura porta non ricevono aria o la ricevono sempre	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	6	7	84	-	2	6	7	84
S5_AO_E_V_1	Parziale	Usura	Passaggio aria limitata	Centralina lubrificazione riceve una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	5	7	70	-	2	5	7	70
S5_AO_E_V_2	Intermittente	Usura	Passaggio aria intermittente	Centralina lubrificazione riceve una quantità d'aria diversa da quella richiesta	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	5	7	70	-	2	5	7	70

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S5_AO_E_V_3	Totale	Usura	Mancanza passaggio aria o aria passa sempre	Centralina lubrificazione non riceve aria o la riceve sempre	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo di processo	2.4	48	2	6	7	84	-	2	6	7	84
S5_AO_F_D_1	Parziale	Usura	Poca efficienza di filtraggio	Non buona separazione tra olio e aria	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.53	46	2	3	10	60	Controllo ed eventuale sostituzione (3 mesi)	2	3	7	42
S5_AO_F_D_2	Totale	Usura	Mancanza di filtraggio	Mancanza di separazione tra olio e aria	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.53	46	2	3	10	60	Controllo ed eventuale sostituzione (3 mesi)	2	3	7	42
S5_AO_MN_1	Totale	Usura	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte delle utenze	Fermo Macchina t<10 min	-	Controllo pressione (6 mesi)	2.6	44	2	3	8	48	-	2	3	8	48
S5_AO_MN_2	Totale	Utilizzo scorretto	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte delle utenze	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S5_AO_P_M_1	Parziale	Usura	Pressione mandata ridotta	Aspirazione minore di aria-olio dal mandrino	Fermo Macchina t<10 min	-	Controlli di processo	6	20	3	3	7	63	-	3	3	7	63
S5_AO_P_M_2	Totale	Usura	Rottura compressore	Non aspirazione di aria-olio dal mandrino	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	6	20	3	3	7	63	-	3	3	7	63
S5_AO_R_O_1	Parziale	Usura	Perdita parziale fluido	Nessuno	Nessuno	-	-	1.6	72	1	1	10	10	Svuotamento (Servicing)	1	1	10	10
S5_AO_R_O_2	Totale	Usura	Perdita totale fluido	Nessuno	Nessuno	-	-	1.6	72	1	1	10	10	Svuotamento (Servicing)	1	1	10	10
S5_AO_V_R_1	Parziale	Usura	Passaggio quantità aria non corretta	cuscinetti ricevono una quantità d'aria	Fermo Macchina t<1h	Regolazione pressione (6 mesi)	Controllo (6 mesi)	9.3	13	3	4	6	72	-	3	4	6	72

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S5_AO_V R_2	Totale	Usura	Mancanza passaggio aria	cuscinetti non ricevono aria	Fermo Macchina 1h<t<4h	Regolazione pressione (6 mesi)	Controllo (6 mesi) Controllo di processo	9.3	13	3	6	6	108	-	3	6	6	108
S5_GR_D I_1	Parziale	Usura	Passaggio fluido limitato	Minor lubrificante alle guide	Fermo Macchina t<1h	-	-	9.3	13	3	4	10	120	-	3	4	10	120
S5_GR_D I_2	Totale	Usura	Mancanza passaggio fluido	Non giunge lubrificante alle guide	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	-	9.3	13	3	6	10	180	Verifica visiva funzionamento (6 mesi)	3	6	6	108
S5_GR_P L_1	Parziale	Usura	Pressione mandata ridotta	Minor lubrificante alle guide	Fermo Macchina t<1h	-	Controllo livello grasso (12 mesi)	6	20	3	4	7	84	-	3	4	7	84
S5_GR_P L_2	Totale	Usura	Rottura pompa	Non giunge lubrificante alle guide	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controllo livello grasso (12 mesi)	6	20	3	6	7	126	-	3	6	7	126
S6_UC_1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Utensile non distante adeguatamente dal pezzo	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	15.4	8	4	5	6	120	Revisione mandrino (18 mesi)	4	5	5	100
S6_UC_2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Utensile non distante adeguatamente dal pezzo	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	15.4	8	4	5	6	120	Revisione mandrino (18 mesi)	4	5	5	100
S6_UC_3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Utensile non distante adeguatamente dal pezzo e rischio collisione	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	15.4	8	4	6	6	144	Revisione mandrino (18 mesi)	4	6	5	120

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S6_UC_4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Utensile non distante adeguatamente dal pezzo e rischio collisione	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	15.4	8	4	6	6	144	Revisione mandrino (18 mesi)	4	6	5	120
S7_CR_1	Parziale	Usura	Catena meno tesa	Movimento errato tappeto	Fermo Macchina t<1h	-	-	15	8	4	4	10	160	Controllo e lubrificazione (3 mesi) Verifica integrità e corretto tensionamento (12 mesi)	4	3	7	84
S7_CR_2	Totale	Usura	Rottura catena	Moto tappeto non possibile	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	-	15	8	4	6	10	240	Controllo e lubrificazione (3 mesi) Verifica integrità e corretto tensionamento (12 mesi)	4	5	7	140
S7_ML_F I_1	Parziale	Usura	Passaggio di pochi detriti	Fluido non totalmente filtrato fornito alle utenze	Non parti difettose, ma incrementa usura componenti a valle	-	-	2.53	46	2	3	10	60	Controllo stato, lavaggio ed eventuale sostituzione (6 mesi)	2	3	8	48
S7_ML_F I_2	Totale	Usura	Passaggio incontrollato di detriti	Fluido non filtrato fornito alle utenze	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	-	2.53	46	2	7	10	140	Controllo stato, lavaggio ed eventuale sostituzione (6 mesi)	2	7	8	112

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S7_ML_L_I_1	Totale	Settaggio / calibrazione errata	Livello indicato non corretto	Impossibile determinazione quantità fluido in centralina	Non prodotte parti difettose, ma rischio di avere meno fluido ed necessario	Pulizia sensori di livello vasca (servicing)	Controlli di processo	3.9	30	2	2	6	24	-	2	2	6	24
S7_ML_L_I_2	Totale	Usura	Livello indicato non corretto o rottura	Impossibile determinazione quantità fluido in centralina	Non prodotte parti difettose, ma rischio di avere meno fluido ed necessario	Pulizia sensori di livello vasca (servicing)	Controlli di processo	3.9	30	2	2	6	24	-	2	2	6	24
S7_ML_MN_1	Totale	Usura	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte delle utenze	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S7_ML_MN_2	Totale	Utilizzo scorretto	Rottura manometro	Non è leggibile la pressione a monte delle utenze	Fermo Macchina t<10 min	-	-	2.6	44	2	3	10	60	-	2	3	10	60
S7_ML_MP_1	Intermittente	Cavitazione	Mandata portata non continua	Non fornito lubrorefrigerante a pressione continua	Fermo Macchina t<1h	-	Controlli di processo	6	20	3	5	7	105	-	3	5	7	105
S7_ML_MP_2	Totale	Cavitazione	Rottura pompa	Non fornito lubrorefrigerante alle utenze	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	6	20	3	7	7	147	-	3	7	7	147
S7_ML_MP_3	Parziale	Usura	Pressione mandata ridotta	Non fornito lubrorefrigerante alle utenze alla pressione necessaria	Fermo Macchina t<1h	-	Controlli di processo	6	20	3	5	7	105	-	3	5	7	105
S7_ML_MP_4	Totale	Usura	Rottura pompa	Non fornito lubrorefrigerante alle utenze	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	6	20	3	7	7	147	-	3	7	7	147

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S7_ML_MT_1	Totale	Usura	Blocco motore	Non fornito lubrorefrigerante alle utenze	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S7_ML_MT_2	Totale	Utilizzo scorretto	Blocco motore	Non fornito lubrorefrigerante alle utenze	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	10	12	3	7	6	126	-	3	7	6	126
S7_ML_VS_1	Parziale	Usura	Perdita parziale fluido	Svuotamento parziale vasca	Non prodotte parti difettose, ma rischio perdere totalmente il fluido	-	Controlli di processo	1.6	72	1	3	7	21	Pulizia vasca (12 mesi)	1	3	7	21
S7_ML_VS_2	Totale	Usura	Perdita totale fluido	Non fornito lubrorefrigerante alle utenze	Fermo Macchina 4h<t<8h	-	Controlli di processo	1.6	72	1	7	7	49	-	1	7	7	49
S7_TT_M_T_1	Totale	Usura	Blocco motore	Non movimentato tappeto trasportatore trucioli	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	10	12	3	6	6	108	-	3	6	6	108
S7_TT_M_T_2	Totale	Utilizzo scorretto	Blocco motore	Non movimentato tappeto trasportatore trucioli	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	10	12	3	6	6	108	-	3	6	6	108
S7_TT_R_I_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Moto tappeto non possibile	Fermo Macchina t<1h	-	Controlli di processo	15	8	4	4	7	112	Verifica integrità e corretto tensionamento (12 mesi)	4	4	6	96
S7_TT_R_I_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto tappeto corretto	Fermo Macchina t<1h	-	Controlli di processo	15	8	4	4	7	112	Verifica integrità e corretto tensionamento (12 mesi)	4	4	6	96

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S7_TT_R I_3	Totale	Usura	Rottura dente	Moto tappeto non possibile	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	15	8	4	6	7	168	Verifica integrità e corretto tensionamento (12 mesi)	4	5	7	140
S7_TT_T N_1	Parziale	Usura	Piccolo spostamento	Perdita tensione opportuna del tappeto	Fermo Macchina t<1h	-	Controlli di processo	15	8	4	4	7	112	Verifica integrità e corretto tensionamento (12 mesi)	4	4	6	96
S7_TT_T N_2	Totale	Usura	Perdita posizione	Tappeto non tensionato	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	15	8	4	6	7	168	Verifica integrità e corretto tensionamento (12 mesi)	4	5	7	140
S8_CP_1	Parziale	Usura	Movimento pistone non corretto	Difficoltà apertura sportello cambio utensili	Fermo Macchina 10min<t<30 min	-	-	14.3	8	4	4	10	160	-	4	4	10	160
S8_CP_2	Intermittente	Usura	Movimento pistone non corretto	Difficoltà apertura sportello cambio utensili	Fermo Macchina 10min<t<30 min	-	-	14.3	8	4	4	10	160	-	4	4	10	160
S8_CP_3	Totale	Usura	Impossibilità movimento pistone	Sportello portautensili non si apre	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	-	14.3	8	4	6	10	240	Verifica funzionamento (3 mesi)	4	5	7	140
S8_CP_4	Totale	Utilizzo scorretto	Impossibilità movimento pistone	Sportello portautensili non si apre	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	-	14.3	8	4	6	10	240	Verifica funzionamento (3 mesi)	4	5	7	140
S8_CR_1	Parziale	Usura	carrello meno teso	Movimento errato carrello	Fermo Macchina t<1h	-	-	15	8	4	4	10	160	-	4	4	10	160

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S8_CR_2	Totale	Usura	Rottura carrello	Movimento carrello non possibile	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	-	15	8	4	6	10	240	Controllo e lubrificazione (3 mesi)	4	5	7	140
S8_EN_1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Posizionamento pinze non corretto	Fermo Macchina 10min<t<30 min	-	Controlli di processo	8	15	3	4	6	72	-	3	4	6	72
S8_EN_2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Posizionamento pinze non corretto	Fermo Macchina 10min<t<30 min	-	Controlli di processo	8	15	3	4	6	72	-	3	4	6	72
S8_EN_3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Non possibile sostituzione utensile	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	8	15	3	6	6	108	-	3	6	6	108
S8_EN_4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Non possibile sostituzione utensile	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	8	15	3	6	6	108	-	3	6	6	108
S8_MT_1	Totale	Usura	Blocco motore	Non si muove il carrello portapinze	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	10	12	3	6	6	108	-	3	6	6	108
S8_MT_2	Totale	Utilizzo scorretto	Blocco motore	Non si muove il carrello portapinze	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	10	12	3	6	6	108	-	3	6	6	108
S8_PU_1	Parziale	Usura	Movimento pinza non corretto	Utensile non correttamente in presa	Fermo Macchina 10min<t<30 min	-	-	14.3	8	4	4	10	160	-	4	4	10	160
S8_PU_2	Intermittente	Usura	Movimento pinza non corretto	Utensile non correttamente in presa	Fermo Macchina 10min<t<30 min	-	-	14.3	8	4	4	10	160	-	4	4	10	160

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
S8_PU_3	Totale	Usura	Impossibilità movimento pinza	Impossibilità presa utensile	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	-	14.3	8	4	6	10	240	Ingrassaggio e controllo stato (6 mesi)	4	5	7	140
S8_RI_1	Parziale	Utilizzo scorretto	Bloccaggio	Non si muove il carrello portapinze	Fermo Macchina t<1h	-	Controlli di processo	15	8	4	4	7	112	-	4	4	7	112
S8_RI_2	Parziale	Usura	Gioco	Moto carrello non corretto	Fermo Macchina t<1h	-	Controlli di processo	15	8	4	4	7	112	-	4	4	7	112
S8_RI_3	Totale	Usura	Rottura dente	Non si muove il carrello portapinze	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	15	8	4	6	7	168	-	4	6	7	168
S8_SU_1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Problemi nel cambio utensile	Fermo Macchina 10min<t<30 min	-	Controlli di processo	0.65	176	1	4	6	24	-	1	4	6	24
S8_SU_2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Problemi nel cambio utensile	Fermo Macchina 10min<t<30 min	-	Controlli di processo	0.65	176	1	4	6	24	-	1	4	6	24
S8_SU_3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Non possibile sostituzione utensile	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	0.65	176	1	6	6	36	-	1	6	6	36
S8_SU_4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Non possibile sostituzione utensile	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	0.65	176	1	6	6	36	-	1	6	6	36
S8_SZ_1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Posizionamento pinze non corretto	Fermo Macchina 10min<t<30 min	-	Controlli di processo	15.4	8	4	4	6	96	-	4	4	6	96
S8_SZ_2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Posizionamento pinze non corretto	Fermo Macchina	-	Controlli di processo	15.4	8	4	4	6	96	-	4	4	6	96

Codifica Guasto	Modo di Guasto	Causa di Guasto	Effetto Locale	Effetto Superiore	Effetto Finale	Attuali Azioni di Prevenzione	Attuali Controlli di Rilevazione	λ	MTBF (MTTF) / tempo richiesto	O	S	D	RPN	Azioni Intraprese	O	S	D	RPN
					10min<t<30 min													
S8_SZ_3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Non possibile sostituzione utensile	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	15.4	8	4	6	6	144	-	4	6	6	144
S8_SZ_4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Non possibile sostituzione utensile	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	15.4	8	4	6	6	144	-	4	6	6	144
S1_EM_AZ_1	Parziale	Settaggio / calibrazione errata	Inviato segnale scorretto	Errore utensile selezionato	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	23.0	5	5	5	6	150	Revisione mandrino (18 mesi)	5	5	5	125
S1_EM_AZ_2	Parziale	Usura sensore	Inviato segnale scorretto	Errore utensile selezionato	Difettosità nel prodotto	-	Controlli di processo	23.0	5	5	5	6	150	Revisione mandrino (18 mesi)	5	5	5	125
S1_EM_AZ_3	Totale	Usura sensore	Perdita del segnale	Impossibilità cambiare utensile	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	23.0	5	5	6	6	180	Revisione mandrino (18 mesi)	5	6	5	150
S1_EM_AZ_4	Totale	Rottura collegamento	Perdita del segnale	Impossibilità cambiare utensile	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	Controlli di processo	23.0	5	5	6	6	180	Revisione mandrino (18 mesi)	5	6	5	150
S9_LM_1	Totale	Degrado	Non illumina	Non visibilità perfetta in zona lavoro	Non rilevante	-	-	0.49	233	1	3	10	30	-	1	3	10	30
S9_UPS_	Totale	Degrado	Non alimenta più in caso di mancanza energia dall'esterno	Mancanza di fonte di energia alternativa	Fermo Macchina 1h<t<4h	-	-	0.25	457	1	6	10	60	-	1	6	10	60

Appendice G. Elenco guasti nel “best case” con nuova manutenzione programmata ciclica

Codice Guasto	Data Richiesta Intervento	Descrizione Manutenzione	Data Inizio Intervento	Ora Inizio Intervento	Data Fine Intervento	Ora Fine Intervento	Funzionamento * [%]
	11/12/2015	Sostituzione azionamento elettromandrino	14/12/2015	14.50	14/12/2015	17.75	0
		Preventiva 3 mesi	01/03/2016	8.00	01/03/2016	10	
G1	01/03/2016	Riparazione distributore rotante asse A	03/03/2016	8.50	07/03/2016	14.50	0
G2	02/05/2016	Sostituzione pompa per circuito lubrorefrigerazione	04/05/2016	11.00	04/05/2016	17.00	100
G3	26/05/2016	Sostituzione parti hardware PLC	27/05/2016	8.00	27/05/2016	10.75	100
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi	01/06/2016	8.00	01/06/2016	14	
		Preventiva 3 mesi	01/09/2016	8.00	01/09/2016	10	
G5	12/09/2016	Sostituzione catenaria porte area lavoro	22/09/2016	10.50	26/09/2016	17.25	100
G6	09/11/2016	Sostituzione UPS	28/11/2016	8.00	06/12/2016	15.00	100
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi + 12 mesi	30/11/2016	8.00	01/12/2016	12.00	
G7	20/12/2016	Regolazione porta area lavoro	10/01/2017	8.75	10/01/2017	16.75	100
		Preventiva 3 mesi	01/03/2017	8.00	01/03/2017	10	
G9	11/04/2017	Sostituzione lampade	19/04/2017	7.50	19/04/2017	12.00	100
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi + 18 mesi	31/05/2017	8.00	01/06/2017	17	
		Preventiva 3 mesi	01/09/2017	8.00	01/09/2017	10	
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi + 12 mesi	30/11/2017	8.00	01/12/2017	12.00	
		Preventiva 3 mesi	01/03/2018	8.00	01/03/2018	10	
G15	23/04/2018	Sostituzione azionamenti asse X e Y	26/04/2018	14.25	26/04/2018	18.25	0
G16	02/05/2018	Sostituzione azionamento asse A	25/05/2018	8.75	25/05/2018	12.25	100
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi	01/06/2018	8.00	01/06/2018	14	
G17	01/06/2018	Sostituzione parti hardware PLC	04/06/2018	14.25	06/06/2018	14.75	100
G19	27/08/2018	Installazione nuovo PLC	27/08/2018	11.25	29/08/2018	12.50	100
		Preventiva 3 mesi	30/08/2018	8.00	30/08/2018	10	

Codice Guasto	Data Richiesta Intervento	Descrizione Manutenzione	Data Inizio Intervento	Ora Inizio Intervento	Data Fine Intervento	Ora Fine Intervento	Funzionamento * [%]
G21	10/09/2018	Sostituzione tubi flessibili asse A	13/09/2018	15.00	13/09/2018	17.50	100
G22	19/09/2018	Aggiornamento software per malfunzionamento PLC	20/09/2018	11.00	20/09/2018	16.50	100
G23	19/09/2018	Sostituzione condizionatore	03/10/2018	8.00	03/10/2018	17.00	100
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi + 12 mesi + 18 mesi	03/12/2018	8.00	05/12/2018	15	
	05/12/2018	Sostituzione tubi frigorifero	14/12/2018	9.00	14/12/2018	10.00	100
G27	09/02/2019	Riparazione motoriduttore trasportatore trucioli	11/02/2019	8.50	11/02/2019	17.00	100
		Preventiva 3 mesi	01/03/2019	8.00	01/03/2019	10	
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi	31/05/2019	8.00	31/05/2019	14	
G29	15/06/2019	Riparazione su quadro elettrico sistema lubrorefrigerazione	18/06/2019	8.75	18/06/2019	11.50	100
G30	13/07/2019	Sostituzione pompa per circuito lubrorefrigerazione	16/07/2019	7.00	16/07/2019	10.00	100
G32	22/07/2019	Sostituzione azionamento asse A	23/07/2019	8.75	23/07/2019	13.00	0
		Preventiva 3 mesi	02/09/2019	8.00	02/09/2019	10	
G34	05/09/2019	Sostituzione motore pompa lubrorefrigerazione	19/09/2019	7.50	19/09/2019	12.00	100
G36	03/10/2019	Sostituzione motore pompa lubrorefrigerazione	04/10/2019	8.00	04/10/2019	14.00	100
G38	25/10/2019	Riparazione perdita acqua circuito di raffreddamento	28/10/2019	15.50	28/10/2019	20.50	100
G39	25/10/2019	Smontaggio e sostituzione motoriduttore trasportatore trucioli	28/10/2019	8.00	28/10/2019	16.50	100
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi + 12 mesi	02/12/2019	8.00	03/12/2019	12.00	

* Per "Funzionamento [%]" si intende la percentuale di funzionamento della macchina tra la segnalazione del guasto e l'inizio dell'intervento di riparazione

Appendice H. Elaborazione dei dati della macchina Fidia K411 matricola n°1 nel “best case”

Codice Guasto	TTR [h] a calendario solare [h]	TTR a calendario operativo [h]	TBF/TTF a calendario solare [gg]	TBF/TTF a calendario operativo [gg]	TBF/TTF a calendario operativo [h]	Down Time prima dell'intervento a calendario solare [gg]	Down Time prima intervento a calendario operativo [h]	TBM a guasto a calendario solare [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [h]
	3.25	3.25	50	41	748	3	28	53	43	776
	2	2	NO	NO	NO	0	0	78	64	1120
G1	102	54	78	62	1080	2	40	2	2	40
G2	6	6	56	45	788	0	0	58	47	828
G3	2.75	2.75	22	19	332	0	0	23	20	352
	6	6	NO	NO	NO	0	0	5	5	100
	2	2	NO	NO	NO	0	0	92	71	1244
G5	102.75	54.75	108	90	1560	0	0	21	17	308
G6	199	135	44	37	644	0	0	63	53	932
	28	24	NO	NO	NO	0	0	0	0	0
G7	8	8	14	12	208	0	0	40	34	600
	2	2	NO	NO	NO	0	0	50	43	748
G9	4.5	4.5	91	77	1348	0	0	49	42	728
	33	29	NO	NO	NO	0	0	42	35	620
	2	2	NO	NO	NO	0	0	92	71	1244
	28	24	NO	NO	NO	0	0	90	76	1328
	2	2	NO	NO	NO	0	0	90	72	1248
G15	4	4	369	298	5176	3	40	56	47	828
G16	3.5	3.5	6	4	80	0	0	29	24	416
	6	6	NO	NO	NO	0	0	7	6	104
G17	48.5	40.5	7	6	104	0	0	3	1	20

Codice Guasto	TTR [h] a calendario solare [h]	TTR a calendario operativo [h]	TBF/TTF a calendario solare [gg]	TBF/TTF a calendario operativo [gg]	TBF/TTF a calendario operativo [h]	Down Time prima dell'intervento a calendario solare [gg]	Down Time prima intervento a calendario operativo [h]	TBM a guasto a calendario solare [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [h]
G19	49.25	41.25	82	63	1100	0	0	82	63	1100
	2	2	NO	NO	NO	0	0	1	1	20
G21	2.5	2.5	12	10	184	0	0	14	11	204
G22	5.5	5.5	6	5	100	0	0	7	6	104
G23	9	9	0	0	0	0	0	13	11	204
	55	47	NO	NO	NO	0	0	61	51	892
	1	1	63	54	936	0	0	9	7	124
G27	8.5	8.5	57	46	808	0	0	59	48	832
	2	2	NO	NO	NO	0	0	18	16	288
	6	6	NO	NO	NO	0	0	91	75	1308
G29	2.75	2.75	124	104	1808	0	0	18	15	268
G30	3	3	25	22	392	0	0	28	24	416
G32	4.25	4.25	6	5	100	1	20	7	6	104
	2	2	NO	NO	NO	0	0	41	28	496
G34	4.5	4.5	44	32	560	0	0	17	14	248
G36	6	6	14	12	208	0	0	15	13	228
G38	5	5	21	18	312	0	0	24	21	372
G39	8.5	8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
	28	24	NO	NO	NO	0	0	35	29	516

Appendice I. Elenco guasti nel “worst case” con nuova manutenzione programmata ciclica

Codice Guasto	Data Richiesta Intervento	Descrizione Manutenzione	Data Inizio Intervento	Ora Inizio Intervento	Data Fine Intervento	Ora Fine Intervento	Funzionamento * [%]
	11/12/2015	Sostituzione azionamento elettromandrino	14/12/2015	14.50	14/12/2015	17.75	0
		Preventiva 3 mesi	01/03/2016	8.00	01/03/2016	10	
G1	01/03/2016	Riparazione distributore rotante asse A	03/03/2016	8.50	07/03/2016	14.50	0
G2	02/05/2016	Sostituzione pompa per circuito lubrificazione	04/05/2016	11.00	04/05/2016	17.00	100
G3	26/05/2016	Sostituzione parti hardware PLC	27/05/2016	8.00	27/05/2016	10.75	100
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi	01/06/2016	8.00	01/06/2016	14	
G4	29/08/2016	Sostituzione cinghia asse Z	30/08/2016	9.00	30/08/2016	11.25	100
		Preventiva 3 mesi	01/09/2016	8.00	01/09/2016	10	
G5	12/09/2016	Sostituzione catenaria porte area lavoro	22/09/2016	10.50	26/09/2016	17.25	100
G6	09/11/2016	Sostituzione UPS	28/11/2016	8.00	06/12/2016	15.00	100
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi + 12 mesi	30/11/2016	8.00	01/12/2016	12.00	
G7	20/12/2016	Regolazione porta area lavoro	10/01/2017	8.75	10/01/2017	16.75	100
G8	21/12/2016	Sostituzione soffietto asse y	18/01/2017	9.50	18/01/2017	11.50	100
		Preventiva 3 mesi	01/03/2017	8.00	01/03/2017	10	
G9	11/04/2017	Sostituzione lampade	19/04/2017	7.50	19/04/2017	12.00	100
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi + 18 mesi	31/05/2017	8.00	01/06/2017	17	
G10	22/06/2017	Regolazione pinza elettromandrino	23/06/2017	14.75	03/07/2017	17.50	100
G11	23/06/2017	Sostituzione cavo encoder elettromandrino	26/06/2017	9.50	28/06/2017	12.75	100
G12	30/06/2017	Ripristino del magazzino utensili dopo bloccaggio carrello	04/07/2017	11.00	04/07/2017	16.50	100
G13	07/07/2017	Pulizia condensatore condizionatore	08/07/2017	8.00	08/07/2017	11.00	100
		Preventiva 3 mesi	01/09/2017	8.00	01/09/2017	10	
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi + 12 mesi	30/11/2017	8.00	01/12/2017	12.00	
G14	18/12/2017	Sostituzione sensore bloccaggio utensile su mandrino	20/12/2017	10.50	20/12/2017	16.50	0

Codice Guasto	Data Richiesta Intervento	Descrizione Manutenzione	Data Inizio Intervento	Ora Inizio Intervento	Data Fine Intervento	Ora Fine Intervento	Funzionamento * [%]
		Preventiva 3 mesi	01/03/2018	8.00	01/03/2018	10	
G15	23/04/2018	Sostituzione azionamenti asse X e Y	26/04/2018	14.25	26/04/2018	18.25	0
G16	02/05/2018	Sostituzione azionamento asse A	25/05/2018	8.75	25/05/2018	12.25	100
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi	01/06/2018	8.00	01/06/2018	14	
G17	01/06/2018	Sostituzione parti hardware PLC	04/06/2018	14.25	06/06/2018	14.75	100
G18	01/06/2018	Sostituzione cinghia asse X	05/06/2018	10.00	06/06/2018	14.75	100
G19	27/08/2018	Installazione nuovo PLC	27/08/2018	11.25	29/08/2018	12.50	100
		Preventiva 3 mesi	30/08/2018	8.00	30/08/2018	10	
G20	10/09/2018	Sostituzione elettromandrino	13/09/2018	13.00	15/09/2018	17.00	0
G21	10/09/2018	Sostituzione tubi flessibili asse A	13/09/2018	15.00	13/09/2018	17.50	100
G22	19/09/2018	Aggiornamento software per malfunzionamento PLC	20/09/2018	11.00	20/09/2018	16.50	100
G23	19/09/2018	Sostituzione condizionatore	03/10/2018	8.00	03/10/2018	17.00	100
G24	22/10/2018	Sostituzione elettromandrino	23/10/2018	8.00	25/10/2018	15.00	0
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi + 12 mesi + 18 mesi	03/12/2018	8.00	05/12/2018	15	
G25	05/12/2018	Sostituzione tubi frigorifero	14/12/2018	9.00	14/12/2018	10.00	100
G26	17/01/2019	Regolazione pinza portautensile	24/01/2019	10.25	24/01/2019	11.75	0
G27	09/02/2019	Riparazione motoriduttore trasportatore trucioli	11/02/2019	8.50	11/02/2019	17.00	100
		Preventiva 3 mesi	01/03/2019	8.00	01/03/2019	10	
G28	20/05/2019	Pulizia condensatori frigo e condizionatore	22/05/2019	8.00	22/05/2019	17.00	100
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi	31/05/2019	8.00	31/05/2019	14	
G29	15/06/2019	Riparazione su quadro elettrico sistema lubrorefrigerazione	18/06/2019	8.75	18/06/2019	11.50	100
G30	13/07/2019	Sostituzione pompa per circuito lubrorefrigerazione	16/07/2019	7.00	16/07/2019	10.00	100
G31	22/07/2019	Perdita acqua condizionatore cabina	23/07/2019	8.00	23/07/2019	11.00	100
G32	22/07/2019	Sostituzione azionamento asse A	23/07/2019	8.75	23/07/2019	13.00	0
		Preventiva 3 mesi	02/09/2019	8.00	02/09/2019	10	

Codice Guasto	Data Richiesta Intervento	Descrizione Manutenzione	Data Inizio Intervento	Ora Inizio Intervento	Data Fine Intervento	Ora Fine Intervento	Funzionamento * [%]
G33	17/09/2019	Sostituzione compressore condizionatore	18/09/2019	11.00	18/09/2019	18.00	100
G34	05/09/2019	Sostituzione motore pompa lubrorefrigerazione	19/09/2019	7.50	19/09/2019	12.00	100
G35	28/08/2019	Sostituzione sensore bloccaggio utensile su mandrino	01/10/2019	9.25	01/10/2019	14.00	100
G36	03/10/2019	Sostituzione motore pompa lubrorefrigerazione	04/10/2019	8.00	04/10/2019	14.00	100
G37	07/10/2019	Anomalie pinza elettromandrino	09/10/2019	11.00	10/10/2019	15.50	0
G38	25/10/2019	Riparazione perdita acqua circuito di raffreddamento	28/10/2019	15.50	28/10/2019	20.50	100
G39	25/10/2019	Smontaggio e sostituzione motoriduttore trasportatore trucioli	28/10/2019	8.00	28/10/2019	16.50	100
G41	15/11/2019	Aspirazione liquido lubrorefrigerante da vasca e pulizia della stessa	19/11/2019	13.00	19/11/2019	17.00	100
		Preventiva 3 mesi + 6 mesi + 12 mesi	02/12/2019	8.00	03/12/2019	12.00	
G42	16/12/2019	Pulizia filtro pompa lubrorefrigerazione	17/12/2019	10.00	17/12/2019	14.00	100

* Per "Funzionamento [%]" si intende la percentuale di funzionamento della macchina tra la segnalazione del guasto e l'inizio dell'intervento di riparazione

Appendice J. Elaborazione dei dati della macchina Fidia K411 matricola n°1 nel “worst case”

Codice Guasto	TTR [h] a calendario solare [h]	TTR a calendario operativo [h]	TBF/TTF a calendario solare [gg]	TBF/TTF a calendario operativo [gg]	TBF/TTF a calendario operativo [h]	Down Time prima dell'intervento a calendario solare [gg]	Down Time prima intervento a calendario operativo [h]	TBM a guasto a calendario solare [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [h]
	3.25	3.25	50	41	724	3	28	53	43	776
	2	2	NO	NO	NO	0	0	78	64	1120
G1	102	54	78	62	1080	2	40	2	2	40
G2	6	6	56	45	788	0	0	58	47	828
G3	2.75	2.75	22	19	332	0	0	23	20	352
	6	6	NO	NO	NO	0	0	5	5	100
G4	2.25	2.25	94	73	1268	0	0	90	69	1204
	2	2	NO	NO	NO	0	0	2	2	40
G5	102.75	54.75	13	10	184	0	0	21	17	308
G6	199	135	44	37	644	0	0	63	53	932
	28	24	NO	NO	NO	0	0	0	0	0
G7	8	8	14	12	208	0	0	40	34	600
G8	2	2	0	0	0	0	0	8	7	124
	2	2	NO	NO	NO	0	0	42	37	644
G9	4.5	4.5	83	71	1244	0	0	49	42	728
	33	29	NO	NO	NO	0	0	42	35	620
G10	242.75	138.75	64	52	912	0	0	22	19	332
G11	51.25	43.25	0	0	0	0	0	0	0	0
G12	5.5	5.5	2	2	40	0	0	6	5	100
G13	3	3	3	3	60	0	0	4	4	80
	2	2	NO	NO	NO	0	0	55	42	728

Codice Guasto	TTR [h] a calendario solare [h]	TTR a calendario operativo [h]	TBF/TF a calendario solare [gg]	TBF/TF a calendario operativo [gg]	TBF/TF a calendario operativo [h]	Down Time prima dell'intervento a calendario solare [gg]	Down Time prima intervento a calendario operativo [h]	TBM a guasto a calendario solare [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [h]
G14	28	24	NO	NO	NO	0	0	90	76	1328
	6	6	163	129	2244	2	40	19	16	288
	2	2	NO	NO	NO	0	0	71	58	1016
G15	4	4	124	101	1764	3	40	56	47	828
G16	3.5	3.5	6	4	80	0	0	29	24	416
	6	6	NO	NO	NO	0	0	7	6	104
G17	48.5	40.5	7	6	104	0	0	3	0	0
G18	28.75	24.75	0	0	0	0	0	0	0	0
G19	49.25	41.25	82	63	1100	0	0	82	63	1100
	2	2	NO	NO	NO	0	0	1	1	20
G20	52	44	12	10	184	3	60	14	11	204
G21	2.5	2.5	0	0	0	0	0	0	0	0
G22	5.5	5.5	6	5	100	0	0	7	6	104
G23	9	9	0	0	0	0	0	13	11	204
G24	55	47	19	16	288	1	20	20	17	308
	55	47	NO	NO	NO	0	0	39	32	560
G25	1	1	41	32	560	0	0	9	7	124
G26	1.5	1.5	34	26	456	7	108	41	31	540
G27	8.5	8.5	16	11	204	0	0	18	15	268
	2	2	NO	NO	NO	0	0	18	16	288
G28	9	9	98	81	1412	0	0	82	67	1164
	6	6	NO	NO	NO	0	0	9	8	144
G29	2.75	2.75	24	20	352	0	0	18	15	268

Codice Guasto	TTR [h] a calendario solare [h]	TTR a calendario operativo [h]	TBF/TF a calendario solare [gg]	TBF/TF a calendario operativo [gg]	TBF/TF a calendario operativo [h]	Down Time prima dell'intervento a calendario solare [gg]	Down Time prima intervento a calendario operativo [h]	TBM a guasto a calendario solare [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [gg]	TBM a guasto a calendario operativo [h]
G30	3	3	25	22	392	0	0	28	24	416
G31	3	3	6	5	100	0	0	7	6	104
G32	4.25	4.25	0	0	0	1	20	0	0	0
	2	2	NO	NO	NO	0	0	41	28	496
G33	7	7	56	40	704	0	0	16	13	228
G34	4.5	4.5	0	0	0	0	0	1	1	20
G35	4.75	4.75	0	0	0	0	0	12	10	184
G36	6	6	2	2	40	0	0	3	3	60
G37	28.5	24.5	3	2	40	2	40	5	3	60
G38	5	5	15	13	228	0	0	18	15	268
G39	8.5	8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
G40	4	4	18	15	268	0	0	22	18	312
	28	24	NO	NO	NO	0	0	13	11	204
G41	4	4	27	23	412	0	0	14	12	208

Indice delle figure

Figura 2-1 Schematizzazione della tracciabilità [1]	14
Figura 2-2 Andamento delle risorse impegnate (curva) e percentuale della spesa effettuata (istogramma) [1]	15
Figura 2-3 <i>Diagram Taxonomy</i> del SysML [2]	17
Figura 2-4 <i>Waterfall Diagram</i> [1]	19
Figura 2-5 <i>V-Diagram</i> [3]	20
Figura 2-6 <i>Spiral Diagram</i> [1]	21
Figura 2-7 Schematizzazione delle relazioni tra le fasi di progettazione e le valutazioni sulle caratteristiche manutentive [1]	26
Figura 2-8 Tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0 [6]	27
Figura 2-9 <i>Assembly System 4.0</i> [4]	29
Figura 3-1 Stati e tempi di un'entità [10]	41
Figura 3-2 Schema riassuntivo delle relazioni tra tempi e stati [7]	42
Figura 3-3 Diagramma di flusso per la definizione della politica di manutenzione secondo UNI 10366:2007 [13] (semplificato secondo [7])	44
Figura 3-4 Grafico densità di probabilità con distribuzione gaussiana	47
Figura 3-5 Probabilità cumulata $F(T)$ e affidabilità $R(T)$ (a sinistra); andamento del tasso di guasto λ nel tempo (a destra)	48
Figura 3-6 densità di probabilità, probabilità cumulata e affidabilità nel caso di guasti casuali	49
Figura 3-7 Diagramma a vasca da bagno, somma dei tassi di guasto a usura e casuali	49
Figura 3-8 Individuazione del TBF	51
Figura 3-9 Individuazione del TTF	51

Figura 3-10 Individuazione del TBM.....	52
Figura 3-11 Schema dei tempi caratteristici della manutenzione	54
Figura 3-12 Matrice di criticità secondo MIL-STD-1629(A) [14]	68
Figura 3-13 Tipologie dei costi di manutenzione.....	75
Figura 4-1 Fidia K411 (www.fidia.it)	80
Figura 4-2 Maschera di gestione manutenzione macchina – anagrafica.....	81
Figura 4-3 Esempio di scheda di <i>servicing</i>	82
Figura 4-4 Esempio di scheda di manutenzione preventiva ciclica	83
Figura 4-5 <i>Radar diagram</i> dei KPI della manutenzione per la Fidia K411, secondo UNI EN 15341:2019	86
Figura 4-6 Esempio di BDD di scomposizione logica, caso della centralina pneumatica.....	89
Figura 4-7 Esempio di BDD di scomposizione funzionale, caso della centralina pneumatica	89
Figura 4-8 Diagramma degli RPN associati ai guasti con manutenzione " <i>as is</i> "	91
Figura 4-9 Diagramma degli RPN associati ai guasti con manutenzione " <i>to be</i> "	93
Figura 4-10 Confronto tra i KPI stimati nei casi analizzati (Parte I)	97
Figura 4-11 Confronto tra i KPI dei casi analizzati (Parte II).....	98
Figura 4-12 Ciclo di Deming	99
Figura E-1 Scomposizione logica al primo livello della Fidia K411	128
Figura E-2 Scomposizione funzionale al I livello della Fidia K411	129
Figura E-3 Scomposizione logica del sistema elettromandrino	130
Figura E-4 Scomposizione funzionale del sistema elettromandrino	131
Figura E-5 Scomposizione logica e funzionale del sistema movimentazione e controllo assi al II livello	132
Figura E-6 Scomposizione logica del sistema di lubrorefrigerazione.....	133
Figura E-7 Scomposizione funzionale dell'impianto di lubrorefrigerazione.....	134
Figura E-8 Scomposizione logica e funzionale dell'impianto pneumatico verso le utenze...	135
Figura E-9 Scomposizione logica dell'impianto di lubrificazione	136
Figura E-10 Scomposizione funzionale dell'impianto di lubrificazione	137
Figura E-11 Scomposizione logica dei sistemi di copertura, protezione e portapezzo	138

Indice delle tabelle

Tabella 3-1 Normative relative alla terminologia della manutenzione	35
Tabella 3-2 Normative relative alla progettazione e alla gestione della manutenzione.....	36
Tabella 3-3 Normative relative alla contrattualistica nel campo manutentivo.....	37
Tabella 3-4 Fasi della metodologia FMECA	59
Tabella 3-5 Schema esempio di studio dei modi, meccanismi e cause di guasto	60
Tabella 3-6 Esempi di sintomi e metodi di rilevazione dei guasti	61
Tabella 3-7 Schema esempio di studio di cause, effetti, sintomi e rilevazione per un dato modo di guasto	62
Tabella 3-8 Tipologie di ranking di <i>O</i> secondo SAE J1739	64
Tabella 3-9 Ranking di <i>S</i> secondo SAE J1739.....	65
Tabella 3-10 Ranking di <i>D</i> secondo SAE J1739.....	66
Tabella 3-11 Ranking di <i>O</i> secondo MIL-STD-1629(A) [14].....	67
Tabella 3-12 Ranking di <i>S</i> secondo MIL-STD-1629(A) [14].....	68
Tabella 3-13 Esempio di una scheda FMECA	72
Tabella 3-14 Comparazione tra le tecniche di RCA [17].....	73
Tabella 4-1 Macchine utensili presenti in LMA	78
Tabella 4-2 Macchine di misura e forno presenti in LMA.....	79
Tabella 4-3 Dati tecnici della Fidia K411 (www.fidia.it)	80
Tabella 4-4 Dati aggiuntivi necessari alla valutazione dei KPI	85
Tabella 4-5 Numero di interventi di manutenzione per guasti avvenuti nel periodo 2016-2019	85
Tabella 4-6 Stima dei KPI manutentivi valutati nel periodo 2016-2019	85
Tabella 4-7 Guasti con RPN maggiori e azioni intraprese per la loro riduzione	92

Tabella 4-8 Schede di manutenzione di <i>servicing</i> (sopra) e di manutenzione programmata ciclica (sotto)	94
Tabella 4-9 Numero di interventi per i casi considerati	96
Tabella 4-10 Tempi stimati per la nuova politica di manutenzione preventiva	96
Tabella 4-11 Confronto tra i KPI stimati nei differenti casi analizzati	97

Bibliografia

- [1] Brusa E., Calà A., Ferretto D., *Systems Engineering and its application to industrial product development*, Springer International Publishing AG, 2018
- [2] OMG, *OMG Systems Modeling Language™ version 1.5*, OMG Systems Modeling Language™ Publication, Maggio 2017
- [3] Kossiakoff A., Sweet W. N., Seymour S. J., Biemer S. M., *Systems Engineering Principles and Practice – 2nd ed.*, John Wiley & Sons, Inc. Publication, Hoboken, New Jersey (USA), 2011
- [4] Bortolini M., Ferrari E., Gamberi M., Pilati F., Faccio M., *Assembly system design in the Industry 4.0 era: a general framework*, IFAC – PapersOnLine, v. 50, n. 8, pp. 5700-5705, 2017, DOI 10.1016/j.ifacol.2017.08.1121
- [5] Lasi H., Fettke P., Kemper H. *et al.*, *Industry 4.0*, Business & Information Systems Engineering, v. 6, pp. 239–242, 2014, DOI 10.1007/s12599-014-0334-4
- [6] Bortolini M., Galizia F. G., Mora C., *Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend*, Journal of Manufacturing Systems, v. 49, pp. 93-106, 2018, 10.1016/j.jmsy.2018.09.005
- [7] Furlanetto L., Garetti M., Macchi M., *Principi generali di gestione della manutenzione*, FrancoAngeli s.r.l., Milano, 2006
- [8] Sanders A., Elangeswaran C., Wulfsberg J., *Industry 4.0 implies lean manufacturing: research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing*, Journal of Industrial Engineering and Management, v. 9, n. 3, pp. 811-833, 2016, DOI 10.3926/jiem.1940
- [9] Furlanetto L., Garetti M., Macchi M., *Ingegneria della manutenzione – Strategie e metodi*, FrancoAngeli s.r.l., Milano, 2007

- [10] UNI EN 13306:2018, *Manutenzione - Terminologia di manutenzione*, 2018, Italia
- [11] UNI 9910:1991, *Terminologia sulla fidatezza e sulla qualità del servizio*, 1991, Italia
- [12] Chiesa S., *Affidabilità, sicurezza e manutenzione nel progetto dei sistemi*, C.L.U.T. Editrice, 2008, Torino
- [13] UNI 10366:2007, *Manutenzione - Criteri di progettazione della manutenzione*, 2007, Italia
- [14] MIL-STD-1629(A) - *Procedures for performing a Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis*, Department of Defense, Washington DC (USA), 1980
- [15] Beretta S., *Affidabilità delle costruzioni meccaniche – Strumenti e metodi per l'affidabilità di un progetto*, Springer-Verlag Italia, Milano, 2009
- [16] NSWC Carderock Division, *Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment*, West Bethesda, Maryland (USA), 2011
- [17] Medina-Oliva G., Iung B., Barberá L., Viveros P., Ruin T., *Root cause analysis to identify physical causes*, 11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference and The Annual European Safety and Reliability Conference, PSAM11 - ESREL 2012, pp. CDROM. hal-00748696, Helsinki, Finland, 2012
- [18] Furlanetto L., Garetti M., Macchi M., *Pianificazione, organizzazione e gestione tecnico – economica della manutenzione*, FrancoAngeli s.r.l., Milano, 2011
- [19] Fidia S.p.A., *Manuale di uso – installazione e manutenzione preventiva e allegati*, San Mauro Torinese (TO), Italia, 2006
- [20] UNI 10992:2002, *Previsione tecnica ed economica delle attività di manutenzione (budget di manutenzione) di aziende produttrici di beni e servizi - Criteri per la definizione, approvazione, gestione e controllo*, 2002, Italia
- [21] UNI EN 15341:2019, *Manutenzione - Indicatori di prestazione della manutenzione (KPI)*, 2019, Italia

Sitografia

www.incose.org
www.sae.org
www.lmasrl.com
www.fidia.it
www.oee.com