

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea

**Applicazione della FMEA per l'analisi di un processo di
assemblaggio di cuscinetti conici.**



Relatore:

Prof Fiorenzo Franceschini

Candidato:

Mauro Imbriaco

INDICE

ACRONIMI

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE.

1.1 PRESENTAZIONE DELL’AZIENDA E DEI PRODOTTI.	4
1.1.1 AZIENDA.....	4
1.1.2. PRODOTTO.....	5
1.1.3. PROCESSO PRODUTTIVO.....	9

CAPITOLO 2 - DESCRIZIONE DELLA FMEA

2.1. INTRODUZIONE.	12
2.2 DEFINIZIONI.....	13
2.3 PUNTI DI FORZA E DI DEBOLEZZA.....	45

CAPITOLO 3 - APPLICAZIONE DELLA FMEA

3.1 INTRODUZIONE AL LAVORO SVOLTO.	48
3.1.1 Descrizione Processo di Assemblaggio.....	48
3.1.2 Analisi processo.....	61
3.1.3 Confronto linea automatica, semiautomatica e manuale.....	71
3.1.4 Principali difetti di una TBU.....	79
3.2 PFD.....	87
3.2.1 Introduzione.....	87
3.2.2 Analisi delle operazioni.	91
3.3 FMEA.....	107

CAPITOLO 4 - CONCLUSIONI

4.1. PROBLEMI RICONTRATI.....	111
4.2. COMMENTI SULLE OPERAZIONI RISULTATE CRITICHE.....	112
4.3 SVILUPPI FUTURI E PROSSIME ATTIVITÀ.	126

CAPITOLO 5 - BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

5.1 BIBLIOGRAFIA.....	127
5.2 SITOGRAFIA.....	130

ACRONIMI

- TBU = Taper Bearing Unit
- PFD = Process Function Diagram
- FMEA = Failure Mode and Effect Analysis
- S = Severity
- = Occurrence
- D = Detection
- RPN = Risk Priority Number
- ME-MCDM = multi-expert multi-criteria decision making
- AHP = Analytic Hierarchy Process
- RPC = Risk Priority Code
- ANP = Analytic Network Process
- DEMATEL = Decision Making Trial and Evaluation Laboratory

CAPITOLO 1 – INTRODUZIONE.

1.1 PRESENTAZIONE DELL’AZIENDA E DEI PRODOTTI.

1.1.1 AZIENDA.

Nel 1906 fu fondata a Torino da Roberto Incerti e Giovanni Agnelli la RIV, un’azienda metalmeccanica, specializzata nella produzione di cuscinetti a sfera; per la realizzazione di questi prodotti l’azienda riusciva a produrre autonomamente gli anelli e le gabbie mentre per le sfere dipendeva da fornitori che provenivano dall’estero.

Nel 1907 fu creato lo stabilimento a Villar Perosa vicino alla residenza degli Agnelli che, in seguito liquidarono la partecipazione di Roberto Incerti e nel 1909 la società divenne totalmente indipendente, realizzando tutti i componenti e gli elementi necessari per la costruzione del cuscinetto comprese le sfere, la cui produzione raggiunse, nel 1910 le 200.000 unità annue.

L’espansione dei mercati, successiva alla conclusione della prima guerra mondiale, offrì nuove opportunità e aiutò l’apertura di nuovi stabilimenti, uno dei quali collocato a Chambéry, per soddisfare la domanda dell’industria automobilistica francese legata alla Fiat. La RIV, in quel periodo riuscì a produrre 50.000 cuscinetti al giorno, grazie alle sue affiliate riuscì a diventare uno fra i maggiori produttori a livello mondiale di cuscinetti a sfere e altri materiali di precisione.

Gli anni '30 e quelli successivi alla seconda guerra mondiale portarono a un ulteriore consolidamento dell’azienda; nel 1938 la RIV inaugurò un nuovo stabilimento a Massa, nel 1956 a Cassino, primo stabilimento nel Sud Italia mentre, nel 1959 è la volta dello stabilimento di Pinerolo.

Nel 1965 la RIV entrò a far parte del Gruppo SKF, maggior produttore mondiale di cuscinetti, e assunse la denominazione di “RIV-SKF Officine di Villar Perosa S.p.A.”, sempre nel corso di quell’anno fu avviato il processo di dismissione dell’ormai obsoleto stabilimento di Torino per sostituirlo con quello nuovo di Airasca.

Nel 1971 fu inaugurato lo stabilimento di Bari mentre, nel 1972 a Villar Perosa sorse una nuova unità produttiva per cuscinetti destinati all’aviazione; nel corso degli anni '80 l’azienda entra a far parte a tutti gli effetti del gruppo SKF assumendo la denominazione “SKF Industrie S. p. a.”. Attualmente, la produzione SKF Italia è articolata su cinque stabilimenti: Villar Perosa, Airasca, Massa, Cassino e Bari.

Lo stabilimento di Villar Perosa si suddivide in tre settori:

1) Super Precision Bearings:

Lo stabilimento Super Precision Bearings di Villar Perosa sviluppa e produce cuscinetti di alta precisione fabbricando oltre 400.000 pezzi l'anno destinati per la metà al

mercato europeo, per il 37% all'area asiatica e il restante alle Americhe ed al resto del mondo.

I cuscinetti di alta precisione trovano applicazione laddove le condizioni di impiego richiedono prestazioni di livello superiore: alta velocità di rotazione, bassa temperatura in funzionamento, accurate precisioni di lavorazione, elevata rigidità, notevole silenziosità e lunga durata di esercizio.

2) Aerospace:

Lo stabilimento Aerospace di Villar Perosa produce da decenni cuscinetti per applicazioni aeronautiche destinati a equipaggiare i più diffusi motori per aeroplani ed elicotteri.

L'esperienza maturata nel corso dei decenni nella progettazione e produzione dei cuscinetti per motori aeronautici, consente di continuare a operare anche nel campo elicotteristico.

Inoltre è in grado di produrre cuscinetti sia a sfere sia a rulli cilindrici o conici, con una gamma dimensionale che va dai 10 millimetri di diametro foro ai 480 millimetri di diametro esterno. Questo consente pertanto di offrire soluzioni per le applicazioni che richiedano precisione, forme e geometrie particolari e l'utilizzo di acciai speciali che consentano di operare in condizioni di funzionamento particolarmente critiche.

3) TBU & bearings:

L'unità produttiva TBU produce cuscinetti per applicazione ferroviaria, la cui funzione è la riduzione dell'attrito durante la marcia di treni, tram e metropolitane; questi vantaggi hanno consentito di poter sostituire la vecchia tecnologia rappresentata dalle bronzine.

Nell'ottica di una sempre maggiore attenzione alle esigenze di affidabilità e sicurezza del mercato ferroviario, si è sviluppato un cuscinetto con schermo integrato e sensorizzato; i clienti dello stabilimento sono i maggiori costruttori mondiali di treni o società che gestiscono il trasporto su rotaie per quanto riguarda la ricambistica.

1.1.2. PRODOTTO.

Nel settore ferroviario il prodotto più venduto è la TBU (figura 1), che è l'acronimo di Taper Bearing Unit ed è formato da: un anello esterno, un distanziale, del grasso che ricopre tutti gli elementi interni alla TBU, due schermi denominati seal e due roller-set, ossia dei rulli conici inseriti in una gabbia polimerica o di metallo, a seconda delle richieste dei clienti, assemblata con un anello interno, in aggiunta possono essere messi anche dei backing ring, lateral spacer ed end cap, che sono tutti dei componenti aggiuntivi che servono a proteggere la TBU da eventuali elementi esterni (figura 2).

Sono prodotti che possono essere subito montati sull'assile del treno e hanno già un gioco assiale predefinito; inoltre sono adatti a sopportare carichi combinati, che agiscono contemporaneamente in direzione radiale e assiale.



Figura 1 – Tapered bearing unit

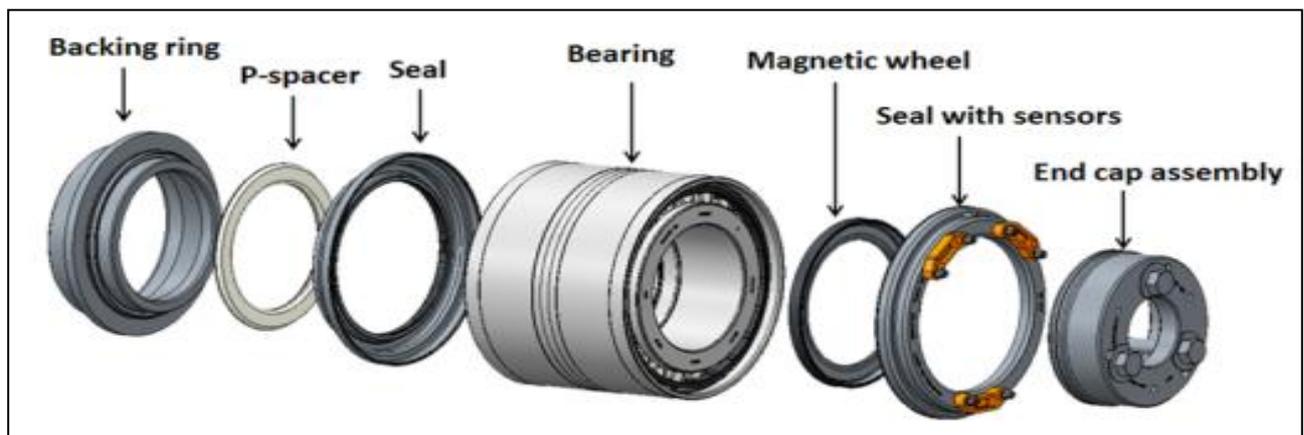


Figura 2 –Scomposizione di una TBU.

Caratteristiche tecniche dei cuscinetti:

- Basso coefficiente di attrito:

Le linee di proiezione delle piste degli anelli convergono in un unico punto sull'asse del cuscinetto (figura 3), per assicurare eccellenti proprietà di rotazione e, di conseguenza, bassi momenti di attrito in esercizio; la capacità di carico assiale dei cuscinetti a rulli conici aumenta con l'aumentare dell'angolo di contatto α , le dimensioni di tale angolo di norma è compreso tra 10° e 30° .

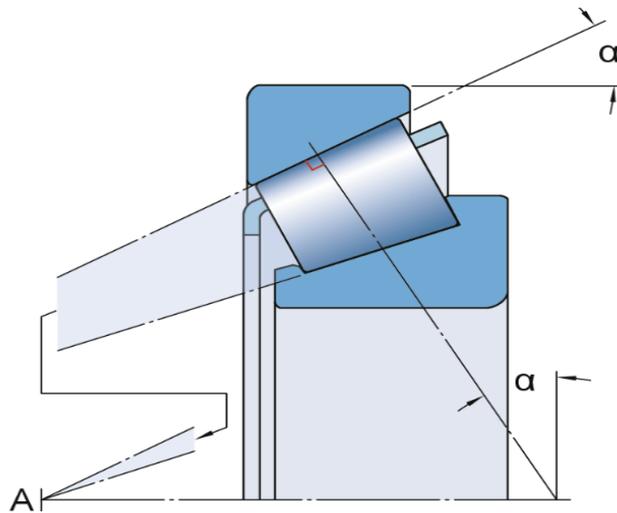


Figura 3 - Le linee di proiezione dell'angolo di contatto convergono sull'apice A sull'asse del cuscinetto

Il design delle estremità dei rulli e la finitura superficiale della flangia (figura 4) favorisce la formazione di un film di lubrificante che consente di ridurre l'attrito, in questo modo si riduce anche il calore generato dall'attrito e l'usura della flangia, inoltre i cuscinetti possono mantenere meglio il precarico e operare con livelli di rumorosità ridotti.

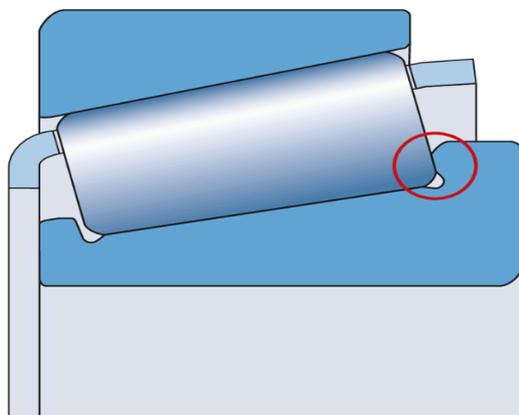


Figura 4 - area di contatto tra l'estremità dei rulli e la flangia

➤ Lunga durata di esercizio

Il profilo convesso della pista dei cuscinetti con design base e il profilo logaritmico della pista dei tipi della classe SKF Explorer (cuscinetti più prestazionali e con una durata maggiore) consente di ottimizzare la distribuzione del carico sulle superfici di contatto e di ridurre i picchi di sollecitazione sulle estremità dei rulli (figura 5) e la

sensibilità al disallineamento e alle deflessioni dell'albero, rispetto al tradizionale profilo pista dritto.

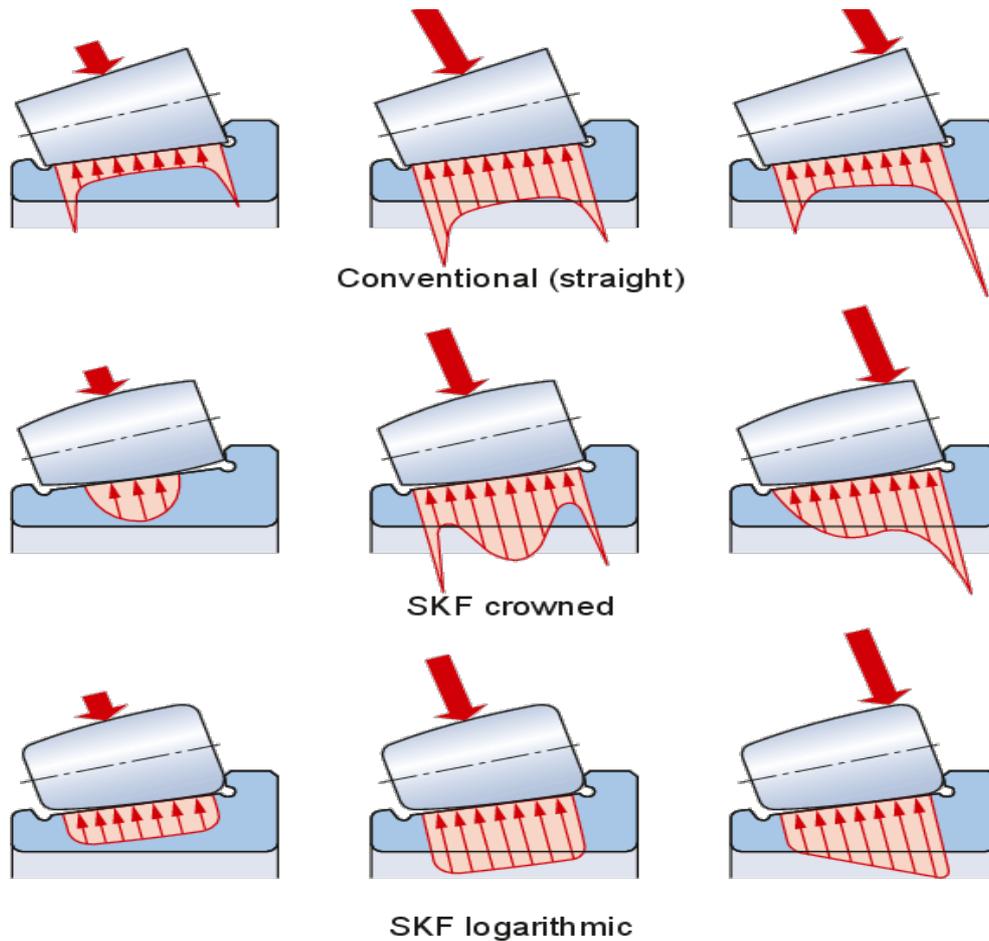


Figura 5 - Distribuzione del carico e riduzione delle sollecitazioni dal sito di SKF.

➤ Maggiore affidabilità operativa

La finitura ottimizzata delle superfici di contatto dei rulli e delle piste favorisce la formazione di un film di lubrificante idrodinamico, così da garantire una riduzione dell'attrito e dell'usura degli elementi.

➤ Concordanza tra profili e misure dei rulli

I rulli utilizzati per i cuscinetti a rulli conici sono prodotti secondo tolleranze dimensionali e geometriche così ristrette da renderli tutti identici, ciò consente una distribuzione ottimale del carico, una riduzione dei livelli di rumorosità e vibrazioni e di impostare il precarico in maniera più precisa.

➤ Periodo di rodaggio con picchi di temperatura ridotti

I cuscinetti a rulli conici, tipicamente, devono essere sottoposti a un periodo di

rodaggio, durante il quale sono esposti a elevati livelli di attrito, il quale provoca una grande usura delle piste e i primi effetti di tale fenomeno si manifestano sotto forma di picchi di temperatura.

I design dei cuscinetti a rulli conici consentono di ridurre notevolmente l'attrito, il calore e l'usura, se si ipotizza che i cuscinetti siano stati montati e lubrificati correttamente.

➤ Scomponibili e intercambiabili

L'anello interno con il gruppo rulli e gabbia, denominato anche cono oppure roller-set (figura 6), può essere montato separatamente dall'anello esterno, inoltre gli elementi sono separabili e intercambiabili, ciò semplifica le procedure di montaggio e smontaggio, di ispezione e manutenzione.

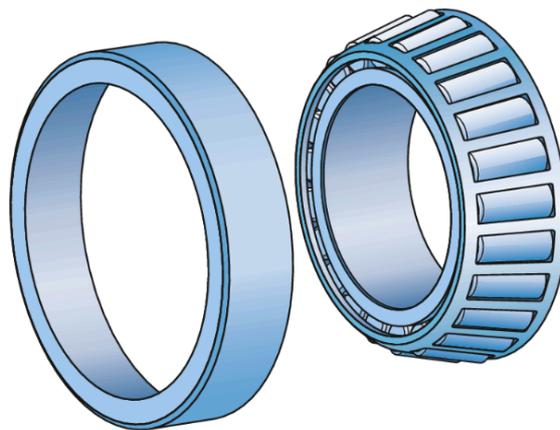


Figura 6 – Cuscinetto separabile dal sito di SKF

1.1.3. PROCESSO PRODUTTIVO.

Il processo produttivo dell'azienda può essere suddiviso in tre macro fasi (figura 7): rettifica, fosfatazione e assemblaggio.

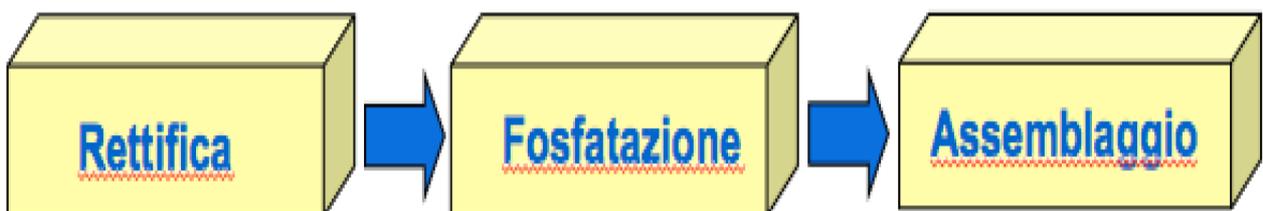


Figura 7. – processo produttivo.

1. Rettifica:

Gli anelli che arrivano in officina sono già temprati o cementati, questa scelta dipende dalle richieste del cliente, la prima operazione che viene svolta è la rettifica delle facce, della flangia, delle sedi di rotolamento e del foro questo succede sia per gli interni sia per gli esterni in due linee parallele.

Questa operazione serve per rifinire le superfici degli anelli eliminando, tramite asportazione di piccole quantità di metallo, gli effetti delle deformazioni provocate dal trattamento termico di tempera e per ottenere in modo economico superfici ben definite e dimensioni finali comprese entro limiti di tolleranza ristretti.

In seguito gli anelli sono smagnetizzati e lappati sulle sedi di rotolamento e sullo spallamento, questa lavorazione di finitura della superficie viene eseguita sempre dopo una rettifica con tolleranze molto ristrette, in quanto serve ad eliminare le creste che sono rimaste sul pezzo in modo tale da ridurre la rugosità a valori dell'ordine del decimo di millimetro e ottenere elevata planarità.

Finite queste operazioni i pezzi sono lavati e prima di passare alla fase successiva subiscono una serie di test per vedere se sono conformi oppure no a dei parametri prefissati durante la progettazione per quella tipologia di anello.

Questi test comprendono un controllo dell'espansione del foro dell'anello attraverso un test di spinatura, un'ispezione agli ultrasuoni per vedere se sono presenti delle microfratture e un controllo dimensionale dei pezzi.

2. Fosfatazione:

Gli anelli, dopo essere stati sgrassati e lavati, subiscono per prima cosa un attacco acido e in seguito vengo fosfatati; queste operazioni sono necessarie perché servono a proteggere gli anelli dalla corrosione e dalla ruggine sia durante il loro utilizzo sul treno sia durante il loro stoccaggio prima di essere assemblati o prima che la TBU venga montata sull'assile.

3. Assemblaggio:

L'assemblaggio della TBU è fatto su tre possibili linee un'automatica, una semi-automatica e una manuale; il procedimento è pressoché identico per tutti e tre: dopo aver fatto un controllo degli anelli e dei componenti, viene per prima cosa assemblato un roller-set poi viene formato il cuscinetto e si verifica il gioco assiale richiesto per la specifica tipologia di TBU e si inserisce il distanziale necessario per ottenere quel gioco.

In seguito il cuscinetto viene ingrassato sia nella parte centrale sia nei due roller-set e inseguito chiuso tramite degli schermi cosicché all'interno della TBU non possano finire degli agenti esterni che possano compromettere la durata e l'affidabilità durante l'uso, in modo tale da non contaminare il grasso o danneggiare le piste degli anelli e aumentando l'usura delle superfici e facendo operare il cuscinetto con alte temperature.

Per ultima cosa vengono montati gli ultimi componenti richiesti come Backing ring ed end cap, in seguito sono imballati all'interno di un box che verrà poi chiuso e inviato presso la sede di Airasca che o spedirà direttamente i box al cliente o se è richiesto eseguirà un ultimo controllo sulla conformità delle TBU presenti nel box, sulla presenza di tutti i documenti e del

CAPITOLO 2 – DESCRIZIONE DELLA FMEA

2.1. INTRODUZIONE.

FMEA è l'acronimo di Failure Mode and Effect Analysis e descrive un gruppo di attività mirate a:

- Individuare preventivamente i potential failure mode che possono verificarsi durante la produzione, la consegna e l'utilizzo del prodotto.
- Determinare le cause dei potential failure mode riferite sia al processo di progettazione che di produzione/consegna del prodotto.
- Valutare gli effetti dei potential failure mode in ottica di soddisfacimento dei bisogni del cliente.
- Quantificare gli indici di rischio e stabilire le priorità di intervento per eliminare alla radice le cause dei potential failure mode individuati e/o migliorare i sistemi di controllo.
- Identificare le opportune azioni correttive/preventive a livello di progetto, produzione, utilizzo del prodotto e valutarne l'impatto complessivo sugli indici di rischio.
- Disporre di una mappatura sempre aggiornata delle parti o elementi del prodotto e della loro criticità dal punto di vista della qualità nei confronti del cliente, dei relativi potential failure mode e delle fasi del processo dove intervenire per eliminare le cause dei potential failure mode o per migliorare i sistemi di controllo.
- Documentare e storicizzare i miglioramenti attuati contribuendo alla costruzione di un knowledge database.

La FMEA è un lavoro fatto da una squadra inter-funzionale che attraverso l'analisi del design del prodotto o del processo di produzione riesce a trovare e correggere le debolezze nel processo di sviluppo prodotto.

Questa tecnica analitica è usata per formalizzare, fin dalla progettazione, tutti i possibili failure mode, le cause ed effetti ad essi associati, che potrebbero verificarsi durante l'utilizzo del prodotto o durante il processo di produzione.

La FMEA dovrebbe essere una guida per lo sviluppo di una serie di azioni che ridurranno il rischio associato al sistema, al sottosistema, ai componenti o al processo produttivo o di assemblaggio ad un livello accettabile.

Ci sono tre tipi di FMEA:

1. FMEA di sistema:

È l'analisi di livello più alto di un intero sistema, composto da vari sottosistemi. L'attenzione si concentra sulle carenze, come ad esempio la sicurezza e l'integrazione del sistema, le interfacce o interazioni tra sottosistemi o altri sistemi, le interazioni con l'ambiente circostante o con l'uomo e altri problemi che potrebbero far sì che il sistema non funzioni come previsto.

Nella FMEA di sistema, l'attenzione si concentra su funzioni e relazioni che sono uniche per il sistema nel suo insieme, cioè non esistono a livelli più bassi; inoltre sono inclusi i failure mode associati alle interfacce e alle interazioni, oltre a considerare i guasti a punto singolo, in cui un problema a un solo componente può comportare il completo fallimento dell'intero sistema.

2. FMEA di design:

È un'analisi che si concentra sulla progettazione del prodotto, in genere a livello di sottosistema o componente.

L'attenzione si concentra sulle carenze relative alla progettazione, con particolare attenzione al suo miglioramento e alla garanzia che il prodotto funzioni in modo sicuro e affidabile durante il ciclo di vita dell'apparecchiatura.

La FMEA di design include il sottosistema o il componente stesso, nonché le interfacce tra componenti adiacenti, inoltre si presuppone che il prodotto sarà fabbricato secondo le specifiche.

3. FMEA di processo:

È l'analisi che si concentra sul processo di produzione o assemblaggio, evidenziando come la produzione può essere migliorata in modo tale da garantire che il prodotto sia costruito secondo i requisiti studiati in progettazione, in modo sicuro, con tempi di fermo, scarti e rilavorazioni minimi.

La FMEA di processo può comprendere le operazioni di produzione e assemblaggio, la spedizione, i componenti in entrata, il trasporto di materiali, lo stoccaggio, la manutenzione degli strumenti e l'etichettatura.

2.2 DEFINIZIONI.

Process Function Requirement	POTENTIAL FAILURE MODE	POTENTIAL EFFECT OF		Severity	Potential Cause / Mechanism of Failure	Occurrence	CURRENT PROCESS CONTROL		Detection	R P N	Recommended Action	Responsibility & Target Completion Date	ACTION RESULTS					
		Process	End Customer				Prevention	Detection					Actions Taken	S e v	O c c	D e t	R P N	

Tabella 1 – Tabella di lavoro per la FMEA

La tabella è composta da più colonne e ora verranno analizzate una ad una.

Process Function Requirement

Contiene una semplice descrizione della funzione associata all'oggetto in analisi, se assolve più funzioni, è buona norma considerarle separatamente e per ognuna di esse vanno indicate le prestazioni richieste.

Potential Failure mode

Rappresenta il modo in cui l'oggetto analizzato smette di assolvere la funzione ad esso richiesto, è quindi una descrizione della non conformità a svolgere quanto richiesto e può essere anche la causa di un failure mode di un livello più alto oppure l'effetto di uno più basso.

In questa sezione si dovrebbe fare una lista dei potenziali problemi che potrebbero accadere, ma non è detto che debbano necessariamente verificarsi, assumendo che la macchina stia funzionando correttamente, con i giusti componenti e che dalla installazione siano state seguite tutte le norme per il suo montaggio, calibrazione e manutenzione e che possa operare in tutte le condizioni immaginabili.

Possono essere molto utili come punti di partenza sia report dei problemi che si sono verificati nel passato sia riunirsi in gruppo provando, tramite la tecnica del brainstorming, di scovare tutti i possibili failure mode che possono verificarsi per una determinata operazione o oggetto, inoltre è importante considerare non solo le non conformità rispetto alle specifiche aziendali ma anche alle aspettative ed esigenze del cliente.

Potential effects of failure

Gli effetti del guasto vanno indicati per la specifica funzione analizzata e bisogna anche vedere in che modo si propagano sia nel processo sotto esame sia al cliente indicando chiaramente se ci possono essere ripercussioni sulla sicurezza per gli operatori o per gli utilizzatori.

Bisogna definire un effetto per ciascuna causa che può portare a un failure mode così che si possa analizzare più esaurientemente tutti i possibili problemi che possono insorgere e derivare da diversi eventi nella stessa operazione.

La definizione di questi effetti deriva dal lavoro di gruppo e dall'esperienza delle diverse persone all'interno del team, che fanno parte a funzioni aziendali diverse, cosicché si possa avere una visione più ampia.

Severity (S)

La severità è il grado associato all'effetto di ciascuna causa riferita al medesimo failure mode, il valore può appartenere all'intervallo (1-10) e per la sua attribuzione, nel settore automotive e ferroviario, si segue una scala suggerita dalla norma SAE.

La definizione di questo valore è fatta dal team di lavoro tramite una discussione e un confronto fra i membri, nonostante si abbia a disposizione una scala di riferimento il numero che si attribuisce all'effetto è soggettivo e dipende dall'esperienze pregresse e dal know-how di ogni componente del team.

La norma SAE propone la seguente scala riassunta nella tabella 2.

Effect	Criteria: severity of effect	Ranking
Hazardous – without warning	May endanger machine or assembly operator – Very high severity ranking when a potential failure mode affects safe vehicle operation and/or involves noncompliance with government regulation – failure will occur without warning	10
Hazardous – with warning	May endanger machine or assembly operator – Very high severity ranking when a potential failure mode affects safe vehicle operation and/or involves noncompliance with government regulation – failure will occur with warning	9
Very high	Major disruption to product line – 100% of product may have to be scrapped – vehicle/item inoperable, loss of primary function – customer very dissatisfied	8
High	Minor disruption to product line – Product may have to be sorted and a portion (less 100%)scrapped – vehicle/item operable, but a reduced level of performance – customer dissatisfied	7
Moderate	Minor disruption to product line – a portion less then 100% of the product may have to be scrapped (no sorting) – vehicle/item operable, but some comfort/convenience items inoperable – customer experiences discomfort	6
Low	Minor disruption to product line –100% of the product may have to be reworked – vehicle/item operable, but some comfort/convenience items operable at reduced level of performance – customer experiences dissatisfaction	5
Very low	Minor disruption to product line – the product may have to be	4

	sorted and a portion less than 100% reworked – fit & finish/squeak & rattle item does not conform – defect noticed by most customer	
Minor	Minor disruption to product line – a portion less than 100% of the product may have to be reworked on-line but out-of-station – fit & finish/squeak & rattle does not conform – defect noticed by average customers	3
Very minor	Minor disruption to product line – a portion less than 100% of the product may have to be reworked on-line but in-station – fit & finish/squeak & rattle does not conform – defect noticed by discriminating customers	2
None	No effect	1

Tabella 2 – ranking della severity derivata dalla norma SAE J 1739.

Potential cause/mechanism of failure

Le potenziali cause sono definite come il possibile verificarsi di un evento che porta a un fallimento o a un guasto, vengono identificate tramite un brainstorming del team di lavoro che ipotizza i vari e possibili problemi che possono accadere in tutte le condizioni immaginabili e che possono portare ad un failure mode.

Le potenziali cause di fallimento sono un'indicazione di debolezze del processo e le loro conseguenze portano a un failure mode, quindi per prima cosa si deve identificare le cause di primo livello che sono quelle che scaturiscono immediatamente i fallimenti delle operazioni.

Occurrence

E' un valore compreso tra 1 e 10, che esprime la probabilità che una determinata causa o meccanismo di guasto si verifichi, ovviamente per l'attribuzione di questo valore si fa ampio ricorso all'esperienza maturata negli anni di lavoro, al proprio know how e ai dati storici per vedere quale era la ricorrenza di un determinato guasto.

La norma SAE fornisce poi un supporto per l'assegnazione, sintetizzabile nella tabella 3.

I valori all'interno del ranking delle probabilità di accadimento hanno un valore relativo piuttosto che assoluto, perché non può riflettere la probabilità reale di accadimento in alcuni contesti più piccoli rispetto a quello considerato nella norma SAE.

Il valore dell'occurrence deve essere riferito a ogni causa legata a uno specifico failure mode; se non si riuscisse a trovare una probabilità per una determinata causa, è possibile determinare il tasso di guasto basandosi su dati storici che si possiede.

Probability of failure	Possible Failure rates	Cpk	Ranking
Very high: failure is almost inevitable	≥1 in 2	<0,33	10
	1 in 3	≥0,33	9
High: generally associated with	1 in 8	≥0,51	8

processes similar to previous process that have often failed	1 in 20	$\geq 0,67$	7
Moderate: generally associated with processes similar to previous process which have experienced occasional failures, but not in major proportions	1 in 80	$\geq 0,83$	6
	1 in 400	$\geq 1,00$	5
	1 in 2 000	$\geq 1,17$	4
Low: isolated failures associated with similar processes	1 in 15 000	$\geq 1,33$	3
Very low: inly isolated failure associated with almost identical processes	1 in 150 000	$\geq 1,50$	2
Remote: failure is unlikely; no failures ever associated with almost identical processes	1 in 1 500 000	$\geq 1,67$	1

Tabella 3. – ranking occurrence. derivata dalla norma SAE J 1739.

L'indice Cpk è un indice di capacità del processo che consente di verificare se un processo, caratterizzato da una certa variabilità naturale, sia in grado di soddisfare determinati limiti di specifica; in questo specifico caso mette in relazione la dispersione del processo rispetto ai limiti di specifica, tenendo conto della posizione media del processo.

Questo indice può essere definito come segue:

$$c_{pi} = \frac{(\mu - LSI)}{3 \cdot \sigma} \qquad c_{ps} = \frac{(LSS - \mu)}{3 \cdot \sigma}$$

$$c_{pk} = \text{Min}(c_{ps}, c_{pi})$$

I valori dei parametri μ e σ possono essere stimati attraverso i valori utilizzati per la costruzione delle carte di controllo del tipo X-R o X-S:

$$\hat{\mu} = \bar{\bar{x}} \quad ; \quad \hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

dove:

$\bar{\bar{x}}$ è la media di tutti i valori misurati per la costruzione della carta X-R.

R è la media dei range dei campioni utilizzati per la costruzione della carta X-R.

d_2 è un parametro reperibile sulle tabelle espresso in funzione della numerosità campionaria n.

L'interpretazione del parametro Cpk è:

- Cpk > 1 : processo più che capace per produrre entro le tolleranze specificate.
- Cpk = 1 : processo appena capace per produrre entro le tolleranze specificate.
- Cpk < 1 : processo non capace di produrre quasi la totalità dei prodotti entro le tolleranze specificate.

- $Cpk < 0$: la media del processo è all'esterno dei limiti di specifica.

Osservazioni:

- Per molte industrie americane e giapponesi un $Cpk = 1,33$ è il valore minimo accettabile.
- Non si può usare Cpk per mostrare che il processo è in controllo poiché il suo calcolo si basa sull'ipotesi che il processo sia in controllo.
- Per processi centrati, il calcolo degli scarti in base a Cpk non è robusto rispetto alla violazione dell'ipotesi di gaussianità.
- Per processi non centrati non esiste una relazione biunivoca tra Cpk e percentuale di scarti nemmeno nel caso gaussiano. Essendo basato su un minimo, Cpk tiene conto solo della distanza della media dal limite di specifica più vicino mentre anche l'altra distanza influenza la percentuale di scarti. Allora può accadere che ad un miglioramento di Cpk corrisponda un peggioramento degli scarti.
- Sono stati proposti numerosi indici alternativi, ma nessuno è privo di problemi.
- In generale non ci interessano solo gli scarti, ma anche la distanza della media dal target.

I valori di Cpk sono molto utili nell'analisi dell'occurrence, poiché posso dare una base quantitativa alla scelta del valore da dare al parametro.

Current process control

I correnti processi di controllo sono una descrizione dei controlli attuali che prevencono o che rilevano un possibile failure mode quando si verifica, possono essere di processo oppure statistici oppure valutazioni post-process.

Ci sono due tipi di controllo da considerare:

- Prevention: sono quei controlli o quelle azioni che servono a prevenire i failure mode, le loro cause oppure i loro effetti dal verificarsi o ridurre il loro tasso di occurrence.
- Detection: sono i controlli o le azioni esistenti che sono svolte per riscontrare subito i problemi quando si verificano.

Generalmente aumentare la qualità dei controlli o la frequenza delle ispezioni non è una corretta azione e dovrebbe essere utilizzata solo come misura temporanea; inoltre migliorare i controlli di detection sono costosi e inefficaci per incrementare la qualità.

Detection

Supponendo che si sia verificato un guasto, bisogna valutare la capacità di tutti i current process control di impedire la propagazione del failure mode, quindi si cerca di dare un valore, compreso tra 1 e 10, che esprime la probabilità che una determinato controllo rilevi in modo rapido una potenziale non conformità; ovviamente per l'attribuzione di questo valore si fa ampio ricorso all'esperienza maturata e ad una scala fornita dalla norma SAE, tabella 4.

Detection	Criteria: likelihood of detection by design control	Ranking
Almost impossible	Design or machinery controls cannot detect a potential cause and subsequent failure, or there are no design or machinery controls	10
Very remote	Very remote chance that design or machinery controls will detect a potential cause and subsequent failure mode	9
Remote	Remote chance that design or machinery controls will detect a potential cause and subsequent failure mode. Machinery control will provide indication of failure	8
Very low	Design or machinery controls do not prevent the failure from occurring. Machinery controls will isolate the cause and subsequent failure mode after the failure has occurred	7
Low	Low chance that design or machinery controls will detect a potential cause and subsequent failure mode. Machinery control will provide an indicator of imminent failure	6
Moderate	Medium chance design controls will detect a potential cause and subsequent failure mode. Machinery controls will prevent imminent failure	5
Moderately high	Moderately high chance design controls will detect a potential cause and subsequent failure mode. Machinery controls will prevent imminent failure	4
High	High chance design controls will detect a potential cause and subsequent failure mode. Machinery controls will prevent imminent failure and isolate the cause	3
Very high	Very high chance that design controls will detect a potential cause and subsequent failure mode. Machinery controls may not be required	2
Almost certain	Design controls almost certain to detect a potential cause and subsequent failure mode, machinery controls not required	1

Tabella 4 – ranking detection derivata dalla norma SAE J 1739.

RPN

RPN è l'acronimo di Risk Priority Number ed è il prodotto di Severity, Occurrence e Detection; può assumere un valore compreso tra 1 e 1000 e serve per ordinare e classificare i problemi che possono verificarsi in un processo.

Hu-Chen Liu nel 2013, dopo un'ampia ricerca bibliografica che prevedeva lo studio di articoli di riviste accademiche che sono stati pubblicati tra il 1992 e il 2012, ha proposto in un articolo una classificazione delle diverse metodologie utilizzate per il calcolo del RPN.

Nella ricerca non sono state considerate le pubblicazioni in lingue diverse dall'inglese e senza referenze; inoltre, sono stati inclusi solo articoli che descrivevano un metodo o una tecnica che mira specificamente a superare alcuni degli inconvenienti della FMEA tradizionale, ciò

implica che non sono stati inclusi articoli che descrivono semplicemente il processo o come si applica la FMEA tradizionale.

In questo articolo Hu-Chen Liu ha suddiviso i metodi utilizzati nella letteratura in cinque categorie principali, che sono multi-criteria decision making (MCDM), la programmazione matematica (MP), l'intelligenza artificiale (AI), gli approcci ibridi e altri.

1. Approcci multi-criteria decision making:

1.1 ME-MCDM:

- Franceschini e Galetto hanno presentato una tecnica multi-expert MCDM (ME-MCDM) per eseguire il calcolo del RPN nella FMEA, che è in grado di gestire le informazioni fornite dal team di progettazione, normalmente su scale qualitative, senza la necessità di una conversione numerica arbitraria e artificiale.

Nel loro metodo, i fattori di rischio sono stati interpretati come criteri di valutazione g_j , mentre i failure modes come alternative a_i da selezionare, inoltre si considerava ciascun criterio decisionale come un sottoinsieme fuzzy rispetto all'insieme di alternative da selezionare; il grado di appartenenza di un'alternativa a_i in g_j indica il livello in cui a_i soddisfa il criterio specificato.

Il metodo suggerisce una procedura a due step:

- a. Il raggruppamento delle valutazioni espresse su ogni criterio per una data alternativa (a_i)

$$RPC(a_i) = \text{Min}_j [\text{Max}\{\text{Neg}(I(g_j)), g_j(a_i)\}]$$

dove $RPC(a_i)$ è il Risk Priority Code per il failure mode a_i , $I(g_j)$ è l'importanza associata a ogni criterio g_j , $\text{Neg}(I(g_j))$ è la negazione delle importanze assegnate a ogni criterio di decision making.

La negazione di una scala ordinale composta da s punti viene calcolate come segue

$$\text{Neg}(L_i) = L_{s-i+1}$$

dove L_i è l' i -esimo livello di una scala.

- b. La determinazione del failure mode con il massimo RPC

$$RPC(a^*) = \text{Max}_{a_i \in A} \{RPC(a_i)\}$$

dove A è l'insieme dei failure modes , $RPC(a_i)$ è definito in una nuova scala ordinale di 10 punti.

Se due o più failure modes hanno lo stesso RPC si può ottenere una selezione più dettagliata considerando l'indicatore $T(a_i) = Dim A(a_i)$ dove l'operatore $Dim A(a_i)$ indica il numero di elementi contenuti nell'insieme $A(a_i)$ e $A(a_i) = \{g_j(a_i) | g_j(a_i) > RPC(a^*)\}$.

Questo termine rappresenta un'indagine di secondo livello per stabilire una misura della dispersione dei criteri, correlata a uno specifico failure mode, attorno all'indice RPC.

Questo approccio fornisce una stima di quanti criteri con valori elevati, in confronto all'RPC calcolato, sono presenti nella valutazione di ciascuna failure mode.

Si presume che l'importanza associata a ciascun criterio di valutazione sia definita su una scala ordinale a 10 punti e che lo stesso livello di pericolo corrisponda allo stesso numero ordinale sulle diverse scale.

I principali nuovi elementi che sono stati presentati con questo metodo sono:

- Non richiede nessun arbitrario o artificiale ridimensionamento delle informazioni raccolte.
- Riesce ad affrontare situazioni che hanno differenti livelli di importanza per i tre fattori di rischio.
- È in grado di aggregare le informazioni del team di progettazione, anche se sono espresse in scale qualitative ordinali.
- È facile da computerizzare.

1.2 Evidence Theory:

- K.S. Chin Y. W. nel 2009 ha proposto una FMEA con un metodo diverso per il calcolo dell'RPN in quanto ha usato l'approccio dell'Evidential Reasoning (ER) per riuscire a catturare la diversità, l'incompletezza e l'incertezza delle informazioni fornite dai membri del team della FMEA.

Con il metodo proposto Chin vuole affrontare e cercare di risolvere i problemi che affliggono la tradizionale FMEA:

- Insiemi diversi di valutazioni di S,O e D possono produrre esattamente lo stesso valore di RPN, ma le loro implicazioni sul rischio possono essere totalmente differenti, ciò potrebbe causare uno spreco di risorse e di tempo, o in alcuni casi, si potrebbe non considerare un evento ad alto rischio.
- L'importanza relativa tra S, O e D non è presa in considerazione, poiché si presume che i tre fattori abbiano la stessa importanza; questo

potrebbe non essere il caso quando si considera un'applicazione pratica della FMEA.

- La formula matematica per calcolare l'RPN è discutibile siccome non c'è alcun motivo per spiegare perché S, O e D dovrebbero essere moltiplicati per produrre l'RPN.
- La conversione dei punteggi è diversa per i tre fattori; ad esempio, per O viene utilizzata una conversione lineare, ma per la D viene impiegata una trasformazione non lineare.
- Gli RPN non sono continui ma hanno molti buchi e sono pesantemente distribuiti nella parte inferiore della scala da 1 a 1000, ciò causa dei problemi nell'interpretazione delle differenze tra diversi RPN. Ad esempio, la differenza tra gli RPN adiacenti di 1 e 2 è uguale o inferiore alla differenza tra 900 e 1000?
- L'RPN considera solo tre fattori principalmente in termini di sicurezza mentre altri fattori importanti come gli aspetti economici sono ignorati.
- Piccole variazioni in una valutazione possono portare a effetti molto diversi sull'RPN, in base ai valori degli altri fattori. Ad esempio, se O e D sono entrambi 10, allora una differenza di 1 punto nella valutazione della severity si traduce in una differenza di 100 punti nell'RPN; se O e D sono uguali a 1, allora la stessa differenza di 1 punto produce solo una differenza di 1 punto nell'RPN.
- I tre fattori sono difficili da determinare con precisione, molte informazioni nella FMEA possono essere espresse in un modo linguistico come probabile, importante o molto alto e così via.

Siccome per la realizzazione della FMEA è necessario creare un team composto da persone con esperienze e funzioni diverse, può succedere che i membri abbiano delle opinioni o conoscenze diverse l'uno dall'altro; questa diversità può produrre delle informazioni o valutazioni che possono essere considerate come complete o incomplete, precise o imprecise e conosciute o sconosciute a causa della natura interfunzionale e multidisciplinare del team.

Questa metodologia consente ai membri del gruppo della FMEA di valutare in modo indipendente i fattori di rischio ed esprimere le proprie opinioni individualmente inoltre consente di aggregare i fattori di rischio in modo rigoroso ma non lineare, piuttosto che semplice aggiunta o moltiplicazione.

L'uso dell'Evidential reasoning implica la valutazione dei fattori di rischio, ossia della Severity, Occurrence e Detection, usando delle strutture di fiducia, sintetizzando poi quelle individuali in quelle di gruppo, per poi a loro volta aggregarle in quelle generali convertendole infine nei valori di rischio attesi in modo tale da classificarli usando l'approccio del MinMax regret approach (MRA).

Rispetto al RPN tradizionale il metodo proposto ha i seguenti vantaggi:

- Vengono considerati i pesi di importanza relativa dei fattori di rischio e possono non essere solamente deterministici ma anche incerti.
 - I fattori di rischio sono aggregati in modo non lineare.
 - La diversità e l'incertezza delle informazioni sulla valutazione dei membri del team FMEA possono essere ben riflesse e modellate utilizzando le strutture di credenza.
 - I failure modes possono essere classificati e distinti l'uno dall'altro a meno che alcune di esse non siano considerate uguali.
 - Il punteggio di rischio atteso è un numero continuo da 1 a 10 senza buchi.
 - Più fattori di rischio possono essere inclusi se necessario.
 - Non è necessario costruire delle regole base che siano soggettive, diversi esperti possono esprimere giudizi distinti, portando delle regole diverse.
- Yang, Huang, He, Zhu, and Wen nel 2011 hanno proposto anche loro un approccio che usa l'evidence theory per aggregare le informazioni sulle valutazioni del rischio che provengono da più esperti.

Nella presentazione del loro modello si sono basati su un caso di studio sulle pale dei rotori nelle turbine degli aerei, esaminando otto possibili guasti e sono stati valutati da tre diversi gruppi di esperti e successivamente sono stati aggregati.

Per eseguire questo raggruppamento hanno presentato un metodo che modifica la evidence theory per riuscire a trattare le diverse opinioni del team della FMEA e i diversi failure modes

Hanno considerato i tre fattori di rischio come delle variabili casuali discrete e la loro unione per calcolare l'RPN fa sì che quest'ultimo sia una funzione di variabili discrete; il valore medio di questo indice è usato per classificare le priorità dei failure modes.

1.3 AHP:

- Braglia nel 2000 sviluppa una Multi-attribute failure model analysis (MAFMA) utilizzando l'Analytic Hierarchy Process (AHP) al fine di aiutare l'analista a classificare i failure modes in modo più efficiente ed efficace.

La scelta di usare l'AHP da parte dell'autore si basa sulle seguenti considerazioni:

- La necessità di integrare ai tre fattori di rischio della FMEA, ossia S, O e D, gli aspetti economici.
- La valutazione RPN basata su una semplice moltiplicazione dei punteggi dei fattori è un metodo discutibile.
- Non è facile quantificare i fattori di rischio, anche quando si adottano delle scale basate su giudizi linguistici.
- Analogamente alla metodologia FMEA, anche AHP è ben supportato da un potente ed efficiente software commerciale che consente al personale di manutenzione di eseguire indagini complesse ed estese.

Il modello proposto si basa sull'AHP che considera i quattro fattori (possibilità di fallimento, possibilità di non rilevamento, gravità e costo atteso) come criteri decisionali, le possibili cause di fallimento come alternative e infine la scelta del meccanismo del fallimento sono definite come obiettivo.

L'obiettivo, i criteri e le alternative formavano una gerarchia a tre livelli, successivamente una pair wise comparison matrix viene utilizzata per valutare i pesi dei criteri, dei sotto criteri e delle alternative in termini dell'attributo costo atteso.

I punteggi convenzionali per O, S e D sono stati normalizzati e successivamente viene utilizzata la weight composition technique nell'AHP per sintetizzare le priorità locali nella priorità globale.

L'utilizzo dell'AHP può fornire un modo efficace di quantificare e classificare i guasti critici in fase di progettazione e costituisce una base per un processo continuo di progettazione dell'affidabilità del prodotto o del processo poiché le gerarchie e le priorità degli elementi possono essere facilmente modificate e aggiornate.

- Carmignani nel 2009 facendo riferimento al lavoro fatto da Braglia nel 2000, ha proposto un documento dove presentava una priority-cost FMEA (PC-FMECA), ossia un nuovo metodo per superare alcuni limiti della tradizionale FMEA come: l'arbitrarietà dell'attribuzione dei tre parametri Severity, Occurrence e Detection, l'assenza di una gamma di valori omogeneamente distribuiti per l'RPN e la correlazione dell'RPN con aspetti economici.

Il metodo proposto è un approccio innovativo perché sfruttando la tecnica dell'AHP è riuscito ad inserire un nuovo parametro detto Profitability, che tiene conto del costo dell'azione correttiva, come fattore di rischio e grazie a ciò è riuscito ad ottenere una nuova interpretazione per il calcolo dell'RPN.

In particolare, la tecnica AHP è stata utilizzata per dare diversi pesi ai tradizionali fattori di rischio come Severity, Occurrence e Detection; inoltre considerando anche il parametro della profitability, la soluzione ottimale finale offre il mix più conveniente di guasti da risolvere in base al budget disponibile.

- Gabbrielli nel 2011 ha presentato una versione avanzata del FMEA, chiamata analytic network process (ANP) / RPN, che migliora le capacità del FMEA tradizionale in quanto prende in considerazione le possibili interazioni tra le principali cause di fallimento nella valutazione della criticità.

Secondo il modello ANP / RPN, O, S e D sono stati suddivisi in sottocriteri e disposti in una struttura decisionale ibrida (hierarchy/network) che, al livello più basso, contiene le cause dell'insuccesso; in seguito a partire da questa struttura decisionale, l'RPN è stato calcolato effettuando confronti a coppie.

1.4 Fuzzy TOPSIS:

- Braglia, Frosolini e Montanari nel 2003 hanno proposto un nuovo approccio per calcolare l'RPN che si basa sulla versione fuzzy della technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS).

Hanno adottato questo metodo per semplificare e migliorare le procedure di valutazione del rischio nella FMEA tradizionale, sfruttando l'idea di base della TOPSIS che consente di misurare la distanza euclidea di un'alternativa da un obiettivo ideale.

Questo metodo considera le cause di fallimento come alternative da classificare, mentre i fattori di rischio S, O e D, che sono riferiti ad un failure mode, come criteri; applicando questo procedimento i tre fattori di rischio e i corrispondenti pesi di importanza possono essere valutati utilizzando numeri fuzzy triangolari piuttosto che i precise crisp numbers, dando una classifica finale per le cause di fallimento che è facile da interpretare.

Inoltre, al fine di eliminare i possibili errori e incertezze che si possono avere nella valutazione crisp dei tre fattori di rischio; è stata sviluppata una versione a logica fuzzy di TOPSIS.

I benefici di questo approccio sono:

- Dare diversi gradi di importanza ai criteri.
- Rendere l'analisi più facile da eseguire, per la possibilità di utilizzare dati imprecisi sotto forma di numeri fuzzy.

1.5 Theory of grey:

- Chang, Wei e Lee nel 1999 hanno proposto un approccio per il calcolo del RPN usando una combinazione del Metodo Fuzzy e della theory of grey, infatti hanno usato la logica fuzzy per valutare i livelli dei fattori di rischio della FMEA, mentre per determinare la priorità del rischio delle cause dei fallimenti hanno utilizzato la grey relational analysis.

Questo metodo ha tre principali vantaggi:

- I termini linguistici come “high”, “low” e “moderate” possono essere usati per valutare il grado di occurrence, detection and severity al fine di accrescere l'applicabilità del FMEA.
 - L'analisi della teoria dei grigi è in grado di assegnare un peso relativo ai fattori decisionali; pertanto, la razionalità della FMEA può essere migliorata.
 - L'analisi della teoria dei grigi può dare una priorità ai potenziali rischi di guasto del prodotto o del processo senza alcuna funzione di utilità.
- Y. Geum nel 2011 ha proposto un approccio sistematico per l'identificazione e la valutazione dei potential service failure usando una service-specific failure mode and effect analysis (service-specific FMEA) e la grey relational analysis.

Questo approccio è diviso in due fasi principali: il primo consiste nel costruire la service-specific FMEA identificando i tre fattori di rischio: Severity, Occurrence e Detection.

Per ogni fattore di rischio, vengono identificati 19 elementi service-specific necessari per valutare il sistema di servizio; lo scopo di questa struttura è di avere una visione olistica del sistema di servizio e di fornire i criteri decisionali appropriati necessari per valutare le modalità di guasto.

La grey relational analysis viene usata per calcolare l'RPN finale per ogni errore e per poi classificarli in base alla priorità (figura 8).

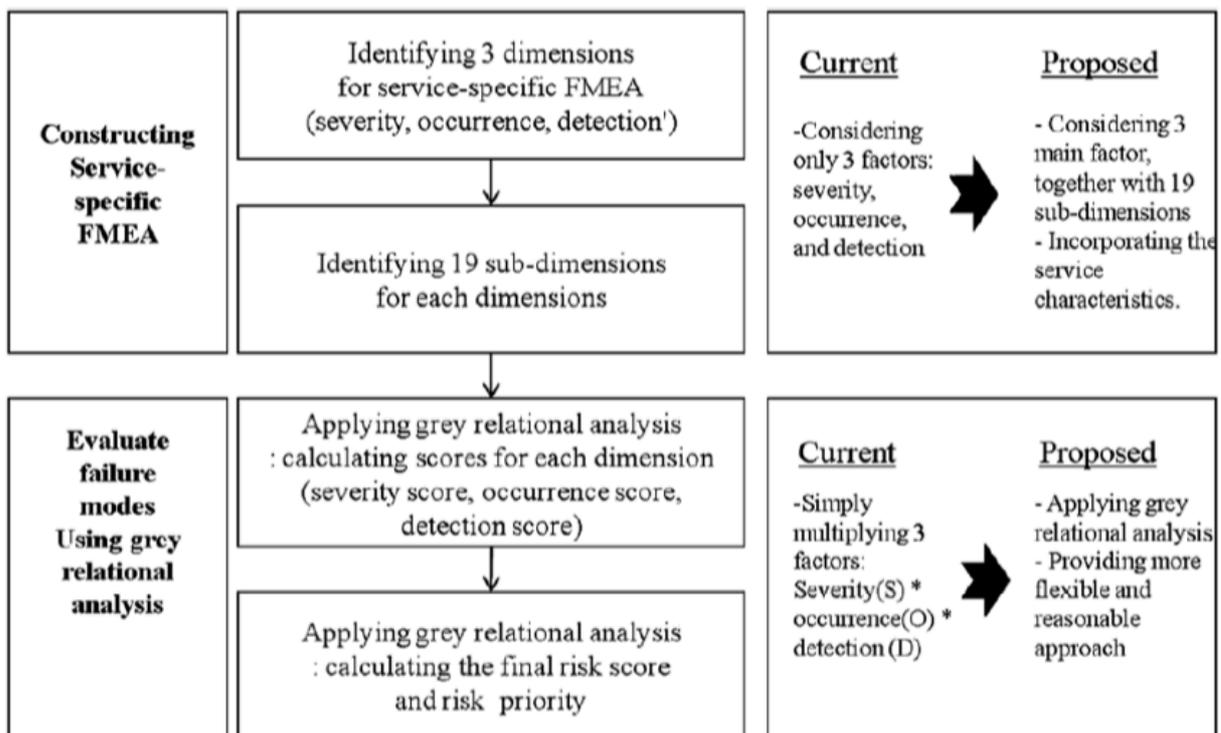


Figura 8 - service-specific FMEA e la grey relational analysis (Y.Geum, 2011)

- Wang nel 2003 ha proposto una metodologia per migliorare la FMEA convenzionale usando la Fuzzy Set theory e si basa sulla suddivisione in due fasi principali.

La prima fase utilizza la fuzzy rule base, senza i fattori di ponderazione delle variabili linguistiche, per eseguire il primo step del processo di formal safety assessment (FSA) determinando il livello di rischio dei guasti.

Nella seconda fase viene utilizzata la theory of grey, usando questa volta i fattori di ponderazione delle variabili linguistiche, per il secondo step del processo FSA, fornendo così un'analisi più dettagliata per ogni errore al fine di poterli classificare in base alle priorità.

1.6 DEMATEL:

- Seyed-Hosseini, Safaei e Asgharpour (2006) hanno proposto un metodo chiamato decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) per la ridefinizione delle modalità di guasto in un FMEA.

Nella metodologia proposta, le informazioni sui failure modes nella FMEA sono state descritte attraverso un diagramma pesato, in cui i nodi indicano i failure modes o le cause dei guasti e le connessioni dirette indicano l'insieme degli effetti dei guasti, inoltre, i pesi degli archi indicano il grado o la severità degli effetti da un'alternativa ad un'altra.

Una relazione indiretta è stata definita come una connessione che poteva muoversi solo in un percorso indiretto tra due alternative e significava che un failure mode poteva essere la causa di altri.

Il metodo presuppone che le alternative, che hanno più effetto su un altro, avessero una priorità più alta e si chiamassero dispatcher e coloro che ricevevano più influenza da un altro avessero una priorità più bassa e si chiamassero ricevitori; di conseguenza, la definizione delle priorità delle alternative può essere determinata in base al tipo di relazioni e alla gravità delle loro influenze.

Ci sono quattro vantaggi principali di questa tecnica:

- La considerazione delle relazioni indirette durante l'analisi.
- La capacità di raggruppare le alternative in sistemi di grandi dimensioni con molti failure modes.
- Assegnare il più possibile un unico numero di classifica a ciascuna alternativa.
- La capacità di determinare la relazione di gravità tra un'alternativa e l'altra.

1.7 VIKOR:

H.C. Liu nel 2012 ha proposto il metodo VIKOR, un approccio che è stato sviluppato per l'ottimizzazione multi-criterio di sistemi complessi, per trovare un compromesso per la classificazione delle priorità dei failure modes a seconda dei fattori di rischio della FMEA.

Nel metodo proposto vengono usate delle variabili linguistiche, espressi in numeri fuzzy trapezoidali o triangolari, per assegnare una valutazione e un peso per i fattori di rischio Severity, Occurrence e Detection.

1.8 Intuitionistic fuzzy set ranking technique:

K.H. Chang nel 2010 ha proposto un nuovo approccio per classificare i failure modes di una FMEA sulla base dell'intuitionistic fuzzy set ranking technique, l'obiettivo principale di questa tecnica è quello di ridurre i duplicati nei valori finali degli RPNs, per rendere il risultato finale più affidabile.

Questa tecnica è molto utile durante la fase di progettazione perché consente al progettista di identificare le aree ad alto rischio e raggiungere elevati livelli di sicurezza attraverso un approccio sistematico per l'identificazione e implementazione di azioni correttive per ridurre il verificarsi di guasti e l'entità delle rispettive conseguenze.

Questa tecnica è stata applicata in un caso di studio e si sono riscontrati i seguenti vantaggi:

- Riduzione dei duplicati dei valori degli RPNs.
- Informazioni su guasti più flessibili e realistici.
- Informazioni più accurate ed efficaci che supportano il processo decisionale.

2. Approcci di programmazione matematica.

2.1 Programmazione lineare:

- Wang, Chin, Poon, and Yang nel 2009 hanno proposto un nuovo approccio siccome la FMEA tradizionale ha delle difficoltà nell'acquisire informazioni precise sulla valutazione dei fattori di rischio quali Severity, Occurrence e Detection e la difficoltà di costruire una completa fuzzy if-then rule base.

Il nuovo metodo proposto è una fuzzy FMEA che consente ai fattori di rischio e ai loro pesi relativi di essere valutati in un modo linguistico piuttosto che in un modo preciso e di calcolare un fuzzy RPN piuttosto che un crisp RPN o di fuzzy if-then rules per definire le priorità dei failure modes.

Il fuzzy RPN o FRPN è definito come la media geometrica ponderata fuzzy dei fattori di rischio e può essere risolto utilizzando insiemi composti da α -livelli e

la fuzzy extension principle; gli insiemi composti da α -livelli di FRPN sono facili da generare risolvendo una serie di modelli di programmazione lineare.

Gli FRPN hanno offerto un nuovo modo per assegnare la priorità alle modalità di errore nella FMEA; rispetto al tradizionale RPN presenta i seguenti vantaggi:

- L'importanza relativa tra i fattori di rischio S, O e D viene presa in considerazione nel processo di classificazione delle modalità di fallimento, il che rende la fuzzy FMEA più realistica, più pratica e più flessibile.
 - I fattori di rischio e i relativi pesi di importanza relativa sono valutati in un modo linguistico piuttosto che in valori numerici precisi, ciò rende la valutazione più facile da eseguire.
 - Diverse combinazioni di S, O e D producono FRPN diversi a meno che i pesi relativi siano esattamente gli stessi, il che dà la massima priorità alle modalità di guasto e distinguerle l'una dall'altra.
 - Non è necessario costruire un'if-then rule base che risulti soggettiva, costosa e dispendiosa in termini di tempo.
 - Più fattori di rischio possono essere incorporati nelle FRPN, se necessario.
- Gargama e Chaturvedi nel 2011 hanno impiegato un benchmark adjustment search algorithm, invece di usare un approccio basato sulla programmazione lineare, per calcolare gli FRPN.

2.2 Fuzzy DEA:

- Garcia nel 2005 ha proposto un approccio chiamato Data Evolvement Analysis (DEA) per classificare i failure modes utilizzando un insieme fuzzy per modellare i fattori di rischio della FMEA.
- Chin, Wang, Poon e Yang nel 2009 hanno sostenuto che l'approccio di Garcia fosse molto complicato e incompleto e inoltre non riusciva a creare una classifica completa per i failure modes che venivano considerati.

Sulla base di queste critiche, hanno proposto un FMEA basata sulla DEA, questo metodo misura il rischio massimo e minimo di ogni failure mode e il valore finale veniva calcolato attraverso la media geometrica; in seguito questi valori vengono utilizzati per dare un ordine ai vari rischi.

Rispetto al tradizionale RPN e ai suoi vari miglioramenti come FMEA fuzzy, il metodo proposto presenta i seguenti vantaggi:

- I pesi di importanza relativa dei fattori di rischio sono determinati dai modelli DEA con una limitazione sul rapporto tra peso massimo e

minimo per evitare che l'importanza relativa di qualsiasi fattore di rischio sia sottovalutata o sovrastimata.

- I fattori di rischio sono aggregati in modo diverso dal tradizionale metodo dell'RPN.
- Le modalità di guasto possono essere meglio classificate e ben distinte l'una dall'altra.
- Possono essere considerate e gestite le informazioni derivate da valutazioni incomplete e imprecise.
- Più fattori di rischio possono essere inclusi se necessario.
- A differenza delle fuzzy FMEA, non è necessario creare fuzzy if-then rules che possono risultare estremamente soggettive e costose in quanto diversi esperti possono dare giudizi differenti che possono portare a regole diverse.
- I pesi calcolati da un'analisi DEA non sono fissi per ogni failure mode.

I modelli fuzzy DEA esistenti presentano alcuni inconvenienti perché quelli che derivano dalla fuzzificazione diretta di modelli DEA crisp ignorano il fatto che il fuzzy fractional program non può essere trasformato in un modello di programmazione lineare nel modo tradizionale.

I metodi Fuzzy DEA costruiti da insiemi composti da α -livelli richiedono la soluzione di una serie di modelli di programmazione lineare e quindi necessitano di notevoli sforzi computazionali.

3. Approcci con l'intelligenza artificiale.

3.1. Rule-base system:

Prabhu nel 2001 ha proposto una FMEA modificata in quanto veniva utilizzata una nuova tecnica che classifica i failure modes, questo approccio si basa sui RPR (Risk Priority Ranks), che vengono utilizzati per rappresentare le 1000 combinazioni possibili di severity-occurrence-detection attraverso un punteggio finale che sarà compreso tra 1 e 1000.

I failure modes con i valori più alti avranno una gravità maggiore e ciò che caratterizza questo metodo è che la classificazione si basa sulla conoscenza di alcuni esperti che dovranno elencare le 1000 possibili combinazioni in ordine crescente di rischio e con la regola dell'if-then rule.

3.2. Fuzzy rule-base system:

Peldez nel 1995 descrive una nuova tecnica, basata sulla logica fuzzy, per dare una priorità ai guasti al fine di trovare delle azioni correttive in una FMEA.

Questo nuovo approccio si basa su logica fuzzy per poter classificare i diversi fallimenti, per far ciò sono usate delle variabili linguistiche per poter descrivere i tre fattori di rischio, ossia Severity, Occurrence e Detection.

La relazione tra la rischiosità e S, O e D è caratterizzata da una fuzzy if-then rule base, che è stata sviluppata dalle conoscenze e dalle competenze di alcuni esperti.

I valori crisp di S, O e D sono fuzzificati per poter essere confrontati con ogni possibile if-then rule; in seguito quelli che hanno una corrispondenza con le regole imposte andranno defuzzificati attraverso la weighted mean of maximum method (WMoM) al fine di dare una priorità ai rischi.

Questo approccio risolve alcuni dei problemi dei metodi tradizionali e presenta diversi vantaggi rispetto ai metodi strettamente numerici:

- Consente all'analista di valutare il rischio legato ai failure modes utilizzando direttamente dei termini linguistici.
- Le informazioni ambigue, qualitative o imprecise, così come i dati quantitativi, possono essere utilizzati nella valutazione e vengono gestiti in modo coerente.
- Fornisce una struttura più flessibile per combinare i parametri di Severity, Occurrence e Detection.

Vengono presentati due approcci basati sulla logica fuzzy per la valutazione della criticità: il primo utilizza input crisp raccolti dall'utente o estratti da un'analisi di affidabilità per poter effettuare il tradizionale calcolo dell'RPN.

Il secondo metodo invece è stato pensato per le prime fasi del processo di progettazione quando ci sono informazioni scarse e poco dettagliate e si concentra sull'utilizzo di inputs fuzzy e spiega come vengono usate delle classifiche linguistiche per poter calcolare l'RPN.

Il processo generale viene descritto nella figura sottostante (figura 9).

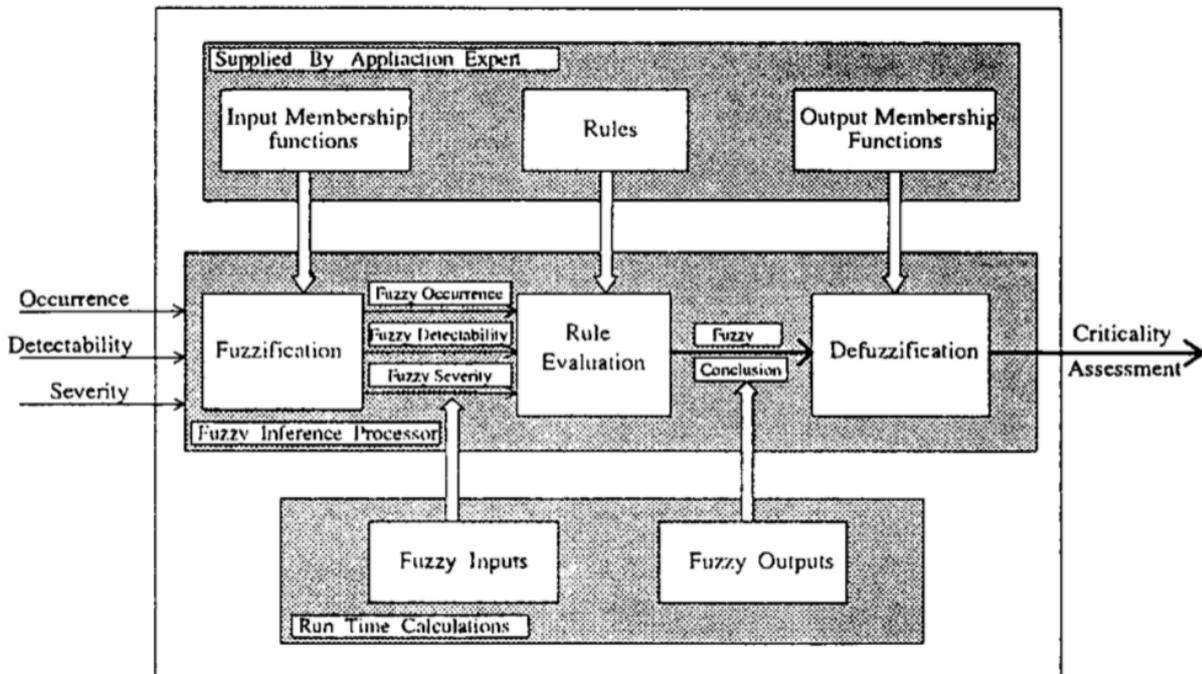


Figura 9 - Visione globale del sistema di valutazione della criticità

- Xie, Ho, and Zhu nel 2002 dopo aver dimostrato che è molto difficile riuscire a inserire nell'analisi dei failure di una FMEA le interdipendenze tra i diversi failure modes a causa delle incerte e imprecise informazioni, hanno proposto un metodo che si basa sulla logica fuzzy per risolvere questo problema (figura 10).

Il loro approccio si basa su una piattaforma per la valutazione fuzzy data da un gruppo di esperti per il sistema in analisi, in modo che si riesca a risolvere il problema di condividere senza difficoltà le informazioni di persone che provengono da discipline diverse.

Nel loro studio hanno applicato questo metodo per l'analisi di un motore meccanico diesel e sono giunti alla conclusione che applicando questo approccio si hanno due grossi vantaggi: le interdipendenze tra i diversi failure modes e i loro effetti possono essere studiati e siccome sono state usate delle variabili fuzzy per l'analisi dei failure nella FMEA, i risultati che ne scaturiscono rispecchiano in maniera più realistica e flessibile la reale situazione.

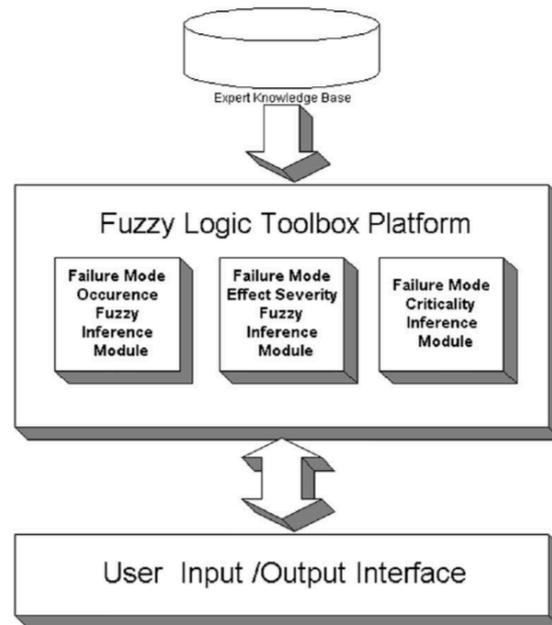


Figura 10 - Architettura del sistema di valutazione generale

- Puente, Pino, Priore e de la Fuente nel 2002 hanno presentato un approccio per la valutazione della criticità che si basa su regole qualitative che forniscono una classifica dei rischi di alcune potenziali cause di fallimento.

Con la metodologia proposta viene assegnata una classe di priorità di rischio a ciascuna causa di fallimento di una FMEA, a seconda dell'importanza attribuita ai tre fattori di rischio (Severity, Occurrence, Detection).

- Pillay e Wang nel 2003 hanno proposto un approccio che si basa sulla regola fuzzy che non richiede una funzione di utilità per definire la Severity, l'Occurrence e la Detection.

Ciò è stato ottenuto utilizzando le informazioni raccolte dagli esperti e integrandole in modo formale per rappresentare un metodo soggettivo di classificazione del rischio.

L'approccio proposto deve innanzitutto impostare le funzioni di appartenenza dei tre fattori di rischio S, O e D; a ciascun failure mode è stato quindi assegnata una variabile linguistica che rappresenta i tre fattori di rischio.

Utilizzando la rule base fuzzy, queste tre variabili sono state integrate per produrre variabili linguistiche che rappresentano la classificazione del rischio di tutte le modalità di errore.

- Yang, Bonsall e Wang nel 2008 hanno presentato un approccio fuzzy rule-based Bayesian reasoning (FuRBar) per poter classificare i failure modes di

una FMEA; la tecnica è stata specificamente sviluppata per affrontare alcuni degli inconvenienti relativi all'uso dei metodi convenzionali di logica fuzzy per la FMEA.

Nel loro approccio, i subjective belief degrees sono stati assegnati alla parte conseguente delle regole per modellare l'incompletezza incontrata nello stabilire la base della conoscenza.

È stato quindi utilizzato un Bayesian reasoning mechanism per aggregare tutte le norme pertinenti per la valutazione e la definizione delle priorità dei potenziali failure modes.

- Braglia e Bevilacqua nel 2000 hanno proposto l'uso di AHP per ottenere le regole per un particolare modello di valutazione della criticità fuzzy; in quanto il fuzzy RPN richiede in genere un gran numero di regole per la costruzione di una fuzzy if-then rule base.

Un'altra caratteristica di questo modello è stata l'uso di un approccio triangolare come input crisp nei modelli fuzzy per valutare le diverse opinioni del personale di manutenzione.

- Tay e Lim nel 2006 hanno sostenuto che non tutte le regole sono effettivamente richieste nel modello fuzzy RPN e hanno proposto un guided rules reduction system (GRRS) per fornire linee guida agli utenti spiegando quali regole possono essere usate e quali eliminate. Impiegando il GRRS, gli utenti non devono fornire tutte le regole, ma solo quelle importanti quando costruiscono una fuzzy if-then rule base.

3.3. Fuzzy ART algorithm

Özkan nel 2009 ha proposto un metodo che si basa su un network neurale e sulla fuzzy adaptive resonance theory (Fuzzy ART) per valutare l'RPN in una FMEA. In una tradizionale FMEA la severity, la detection e l'occurrence sono valutate separatamente per ogni input e successivamente, attraverso una moltiplicazione delle tre cifre, si andrà a formare il numero finale dell'RPN.

Sebbene alcuni RPNs possano avere un numero finale uguale tra di loro, nella FMEA sono stati valutati separatamente attraverso la severity, la detection e l'occurrence piuttosto che con un multiplo di questi parametri.

Perciò i valori dell'RPN compongono gli inputs e ogni input è a suo modo presentato al sistema come la composizione di tre dati S, O e D, che successivamente saranno raggruppati in diverse classi a seconda dei numeri che hanno i tre parametri.

In seguito per ogni classe viene calcolata la media aritmetica dei valori degli inputs al suo interno in modo tale da poterle poi ordinare in base al loro grado di priorità.

3.4. Fuzzy cognitive map:

Peláez and Bowles nel 1996 hanno applicato le fuzzy cognitive maps (FCMs) per modellare il comportamento di un sistema per la FMEA; l'FCM si basa su un diagramma che rappresenta la causalità dei guasti usando il nodo per gli errori e un connettore per la relazione causale.

Il connettore è stato descritto utilizzando variabili linguistiche come "alcuni, sempre, spesso" e inoltre sono state assegnate le relative scale per ogni termine utilizzato; in seguito il min-max inference approach è stato utilizzato per valutare l'effetto causale netto su un dato nodo e il weighted mean of maximum method è stato utilizzato come tecnica di defuzzificazione per estrarre i valori di confidenza risultanti su variabili linguistiche.

4. Approcci integrati.

- Zhang e Chu nel 2011 hanno introdotto un nuovo approccio fuzzy per il calcolo degli RPNs di una FMEA in condizioni di incertezza che si basa sull'integrazione di tre metodi: il primo è il fuzzy weighted least squares model (WLSM) e viene usato per evitare la soggettività nella determinazione delle funzioni di trasformazione aggregando le opinioni dei decisori in numeri linguistici a più granularità

Il secondo è il method of imprecision (MOI) che è stato integrato con un modello di programmazione non lineare per considerare pienamente il livello di compensazione tra la severity, l'occurrence e la detection e per eseguire i loro calcoli.

Infine per la classifica finale dei failure modes viene utilizzato un metodo di ordine parziale basato sulle relazioni di preferenza fuzzy al fine di migliorare la robustezza dei risultati finali.

- Fayek nel 2010 ha proposto un'applicazione della FMEA alla gestione del rischio nel settore delle costruzioni, usando la combinazione della Fuzzy Logic e del Fuzzy Analytical Hierarchy process (AHP) per costruire il suo modello.

Nello studio è stata indicata la severity (S) come impatto (I) che a sua volta viene suddiviso in tre dimensioni: impatto sui costi (CI), impatto sul tempo (TI) e portata / impatto sulla qualità (SI).

In seguito il Fuzzy AHP è stato eseguito per aggregare i parametri CI, TI e SI in un'unica variabile intitolata impatto aggregato (AI) e in base ai valori assegnati ai parametri O e D insieme all'AI calcolato, il fuzzy FMEA expert system, insieme alle fuzzy if-then rules, viene utilizzato per analizzare e stabilire la priorità dei diversi eventi di rischio; inoltre, è stato sviluppato un sistema software dal titolo "risk criticality analyzer" (RCA) per implementare il modello proposto.

- Liu, H. C., Liu, L., Bian, Q. H., Lin, Q. L., Dong, N., & Xu, P. C. nel 2011 hanno proposto un modello di priorità del rischio per la FMEA usando l'approccio fuzzy evidential reasoning (FER) e la grey theory.

In questo modello, l'approccio FER è stato utilizzato per catturare le diverse opinioni dei membri del team della FMEA con differenti tipi di incertezze e il metodo grey relational analysis è stato utilizzato per determinare le priorità di rischio dei failure modes che sono stati identificati.

- Chang nel 2009 hanno sostenuto che, quando ogni causa di fallimento è assegnato a un solo potenziale failure mode, si ottiene lo stesso ordinamento dei diversi rischi sia usando l'approccio DEMATEL (di Seyed-Hosseini del 2006) e quello del RPN convenzionale.

Chang ha anche analizzato che l'FMEA che utilizza l'RPN tradizionale non considera la condizione dei parametri, la relazione tra i componenti di un sistema e la gravità.

Pertanto, hanno utilizzato una nuova metodologia RPN basata sulla combinazione dell'Ordered Weighted Geometric Averaging(OWGA) e dell'approccio DEMATEL per la classificare le priorità dei guasti in una FMEA.

- Kuei-Hu Chang and Ching-Hsue Cheng nel 2010 hanno proposto una tecnica che combina l'Intuitionistic Fuzzy Set (IFS) e l'approccio DEMATEL per valutare il rischio di un fallimento e questo metodo riesce a fornire una maggior flessibilità per la combinazione dei parametri Severity, Occurrence e Detection.
- Cheng nel 2011 ha proposto un algoritmo per riuscire a definire un ordine per i vari failure modes, il metodo utilizzato può usufruire dell' fuzzy Ordered Weighted Averaging (OWA) e dell'approccio DEMATEL per classificare il rischio di un fallimento.

Questa tecnica fornisce una combinazione più flessibile dei tre parametri di rischio della FMEA, ossia Severity, Occurrence e Detection; inoltre è più conveniente per differenziare i failure modes che hanno lo stesso RPN e risulta più affidabile per aiutare i responsabili delle decisioni a individuare le cause più critiche e a scegliere dove impiegare le risorse.

- Kutlu nel 2012 ha proposto un nuovo approccio dove si integra la fuzzy TOPSIS con la fuzzy AHP, al fine di consentire agli esperti di utilizzare variabili linguistiche per determinare la Severity, l'Occurrence e la Detection della FMEA.

La fuzzy AHP è stata utilizzata per determinare il vettore dei pesi dei tre fattori di rischio, in seguito la fuzzy TOPSIS è stata utilizzata per classificare i vari failure modes in base alle loro priorità.

- Chen nel 2007 ha evidenziato l'importanza di considerare le azioni correttive insieme alla valutazione dei rischi durante l'esecuzione di una FMEA; infatti ha dimostrato che le azioni correttive potrebbero essere interdipendenti.

L'autore pertanto ha presentato una nuova metodologia per migliorare l'ordinamento finale dei failure modes, in base alle loro priorità, al fine di valutare la struttura della gerarchia e l'interdipendenza delle azioni correttive attraverso Interpretive Structural Model (ISM) e di calcolare il peso di un'azione correttiva attraverso analytic network process (ANP).

5. Altri approci.

5.1. Cost based.

- Gilchrist nel 1993 ha proposto un metodo diverso per la valutazione delle criticità di una FMEA che si basa sul modello del costo atteso, infatti, l'autore dello studio, si è domandato se fosse corretto moltiplicare i tre fattori di rischio per ricavarsi l'RPN.

Il modello proposto da Gilchrist evidenzia che l'occurrence e la detection si riferiscono alla probabilità in una forma non lineare e assomiglia di più a 10^0 e 10^D e se così fosse il loro prodotto sarebbe $10^0 \times 10^D = 10^{0+D}$.

Inoltre l'autore rileva che i costi che derivano da un fallimento, che si riversa sul cliente, si ripercuotono sull'azienda in due differenti modi: il compratore rileva il difetto alla consegna del prodotto e lo restituisce in garanzia (costo W), oppure non rileva il difetto ma durante l'utilizzo può verificarsi un incidente e in quel caso fa una causa all'azienda (costo A).

Quindi Gilchrist propone il seguente approccio per calcolare un RPN orientato ai costi:

$$C = p_s W + p_m A$$

Dove:

C è il costo del fallimento

P_s è la probabilità che il cliente rilevi il difetto alla consegna.

P_m è la probabilità che il cliente non rilevi il difetto.

Successivamente moltiplicando il valore di C per la quantità prodotta annualmente (n), la probabilità di fallimento (P_f) e la probabilità di non rilevare il fallimento (P_d) si ricava il valore dei costi attesi (EC) e questo indice serve per la valutazione delle criticità.

$$EC = C \times n \times P_f \times P_d.$$

- Raouf nel 2006 in un articolo da lui pubblicato criticava il modello proposto da Gilchrist nel 1993 in quanto il suo metodo non considerava la severity, non rilevava che la probabilità di fallimento (P_f) e la probabilità di non rilevare il fallimento (P_d) non sono sempre indipendenti e inoltre ignorava che la stima di queste probabilità è molto difficile.

Pertanto Raouf propose un modello migliorato della FMEA che superava le

critiche mosse da Gilchrist e che si combinava con il metodo dei costi attesi in modo tale da fornire uno schema di miglioramento della qualità per le fasi di produzione di un prodotto o servizio.

- Ahsen nel 2008 a causa delle decisioni errate che si possono prendere usando la FMEA tradizionale, propose un approccio cost oriented della FMEA.

Infatti, Ahsen sosteneva che anche i problemi o non conformità rilevate internamente all'azienda possono portare a elevati costi e sono del tutto ignorati nell'approccio tradizionale della FMEA e in quello proposto da Gilchrist.

Per affrontare questo problema, ha proposto una FMEA orientata ai costi, che non solo include i costi dei guasti esterni, ma anche di quelli interni e di quelli che possono derivare da dei falsi positivi durante un'ispezione di un potenziale problema.

Con questo metodo si calcola il valore dell'RPN considerando sia i costi di un guasto rilevato internamente sia esternamente all'azienda e in più si cerca di valutare quali possano essere le possibili conseguenze o reazioni dei clienti quando riscontrano un problema.

Il valore dell'RPN sarà calcolato con questa formula:

$$RPN_c = P(O) \cdot \{P(\bar{D}|O) \cdot E[C^e] + P(D|O) \cdot E[C^i]\} + P(\bar{O}) \cdot (D|\bar{O}) \cdot E(C^c)$$

Dove

$$E[C^e] = \sum_r^1 \sum_s^1 P_{rs} \cdot C_{rs}^e$$

$$\sum_{r=1}^n P_{rs} \quad \forall s, \text{ con } s = 1, \dots, m$$

dove :

Ce = costi esterni dovuti a un guasto

Crs = costi dovuti alla reazione r del cliente s

r = reazione di un cliente a causa di un guasto

s = clienti

Prs = probabilità di una reazione r da parte del cliente s

P(D|O) = probabilità condizionata di non rilevare un problema prima della consegna

Ci = costi interni dovuti a un guasto

C^c = costi totali dovuti a un guasto

- Chensong Dong nel 2007 ha proposto un metodo per superare gli svantaggi di una tradizionale FMEA perché i tre indici utilizzati per il calcolo RPN sono variabili che hanno scala ordinale e il prodotto di questi tre numeri non può definire il costo effettivo dovuto al fallimento.

Il metodo presentato si basa su una fuzzy utility Theory FMEA (FUT-FMEA) che utilizza la utility theory e la fuzzy membership functions per la valutazione della Severity, dell'Occurrence e della Detection.

Il costo atteso $E(C)$ causato da un failure mode può essere espresso come:

$$E(C) = C_{fm}P_{fm} (1 - P_d)$$

Dove:

C_{fm} è il costo dovuto a un failure mode

P_{fm} è la probabilità che si verifichi il failure mode

P_d è la probabilità che questo errore venga rilevato.

Questo approccio considera la severity, l'occurrence e la detection di un failure mode come un cost drivers nell'utility theory dal momento che determinano il costo dell'errore.

La fuzzy utility theory è usata per rappresentare la relazione non lineare tra il costo di un fallimento e la scala ordinale, mentre l'applicazione della fuzzy membership function serve per rappresentare meglio le opinioni del team e infine il Risk Priority Index viene sviluppato per poter dare un ordine ai failure modes.

Nell'articolo vengo presentati due casi di studio che dimostrano come questo metodo può tenere conto del costo effettivo dovuto a un guasto e fornire un migliore ordinamento dei failure modes.

Pertanto, questo approccio fornisce uno strumento conveniente ed economico per l'analisi dei guasti perché migliora le prestazioni della FMEA nell'analisi dei rischi e dei guasti.

5.2. Simulazione Monte Carlo.

Bevilacqua, Braglia, and Gabrielli nel 2000 hanno proposto un metodo che si basa sull'unione tra la FMEA modificata e la simulazione Monte Carlo come approccio per verificare i pesi assegnati alle misure degli RPNs.

L'RPN modificato è composto da una somma pesata di sei parametri (sicurezza, importanza della macchina nel processo, costi di manutenzione, frequenza dei guasti, fermi macchina e condizioni operative) moltiplicati per un settimo fattore (la difficoltà di accedere alla macchina), dove l'importanza dei sei attributi è stimata con l'uso della Pairwise comparisons.

In seguito viene eseguita una simulazione Monte Carlo per ottenere simultaneamente i cambiamenti dei pesi e generare la classifica finale degli RPNs, che potranno poi essere facilmente analizzati statisticamente.

5.3. Minimum Set Cut theory.

Xiao, Huang, Li, He e Jin nel 2011 hanno sviluppato un metodo per la FMEA in modo tale da poter combinare più failure modes in una singola voce, considerando l'importanza dei guasti e valutando il loro impatto sull'affidabilità del sistema.

Il metodo proposto è stato stabilito sulla Minimum Set Cut theory (MCS), che è stata incorporata nel tradizionale FMEA per valutare l'affidabilità del sistema in presenza di più failure modes.

Inoltre, hanno esteso la definizione di RPN moltiplicandola con un parametro di peso, che caratterizza l'importanza delle cause di insuccesso all'interno del sistema.

Questo metodo proposto però ha uno svantaggio in quanto non considera il fatto che i tre fattori di rischio (severity, occurrence e detection) possono avere dei valori dei pesi diversi tra di loro, ad esempio S e O hanno un peso maggiore rispetto a D per i sistemi non riparabili.

5.4. Boolean representation method (BRM)

Wang, Ruxton e Labrie nel 1995 hanno proposto un metodo che combina la FMEA con il Boolean representation method (BRM) usando un approccio induttivo bottom-up per l'identificazione e la valutazione del rischio.

Questa metodologia può essere utilizzata per identificare tutti i possibili eventi di errore del sistema e le cause associate e per valutare le loro probabilità di occurrences, in particolare in quei casi in cui sono coinvolte più variabili.

5.5. Digraph and matrix approach.

Gandhi e V.P.Agrawal nel 1992 hanno proposto un metodo per la FMEA dei sistemi meccanici e idraulici che si basa sul Digraph and matrix approach.

Questo approccio prende in considerazione le interazioni strutturali e funzionali di un sistema, in quanto i guasti o le non conformità che si vengono a creare non sono indipendenti.

Per prima cosa viene usato un diagramma per modellare i failure modes di un sistema e i suoi effetti, in seguito vengono create delle matrici per rappresentare il diagramma in modo che si possa avere un'efficiente elaborazione informatica.

Dalle matrici si ottiene una funzione caratteristica dei failure modes e dei suoi effetti sul sistema, che aiuta a identificare in modo dettagliato i vari componenti strutturali e un indice per ogni failure modes e i suoi effetti.

5.6. Modello di Kano.

Arash Shahin nel 2004 ha proposto un nuovo approccio per superare uno dei principali difetti della FMEA tradizionale, ossia che i valori assegnati alla severity sono determinati solo da un punto di vista dell'azienda e non dei propri clienti.

Per risolvere questo difetto viene utilizzato il modello di Kano come tecnica di valutazione per la soddisfazione o insoddisfazione del cliente ed inoltre viene integrato con la FMEA per renderla orientata al cliente e per poter migliorare l'analisi che viene svolta.

Il modello proposto da Arash Shahin classificava le severity e gli RPNs secondo le percezioni dei clienti, considerava la relazione non lineare tra la frequenza e la gravità dell'errore e presentava un nuovo indice chiamato "correction ratio" (Cr) per la valutazione delle azioni correttive in una FMEA.

Inoltre ha evidenziato il divario presente tra i managers e i clienti nel dare una priorità a una serie di guasti e la differenza nel dare delle priorità ai RPN e Cr a causa della frequenza di un determinato guasto.

Questo approccio consente ai managers e ai progettisti di prevedere i guasti già nelle prime fasi della progettazione; inoltre ha un altro vantaggio in quanto il modello di Kano è un metodo dinamico che si evolve nel tempo come la FMEA che è un documento vivo che viene continuamente modificato.

5.7. Quality functional deployment (QFD)

Braglia, Fantoni e Frosolini, nel 2007 hanno sviluppato un nuovo metodo per eseguire un'analisi build-in reliability (BIR) durante il ciclo di sviluppo di un nuovo prodotto.

La metodologia proposta è un'estensione dei concetti del Quality Functional Deployment o anche detto House of Quality (QFD o HoQ) per poterli usare nella FMEA.

Infatti, con questo approccio si riesce a tradurre i bisogni del cliente in quelli funzionali per un determinato prodotto o servizio e inoltre consente di costruire un nuovo strumento operativo, chiamato House of Reliability (HoR), che consente di migliorare la tradizionale analisi FMEA in quanto riesce a considerare le correlazioni presenti tra i failure modes.

Inoltre usando i risultati provenienti dall'HoR si riesce a fare un'analisi dei costi, rendendo così possibile l'analisi e la valutazione delle conseguenze economiche di un fallimento.

Questo metodo consente anche agli users di analizzare i failure modes suddividendo la severity in base alla tipologia di prodotto e l'importanza di ciascun criterio a seconda delle leggi e degli standards internazionali; in aggiunta consente di considerare l'effetto domino e così di stimare l'impatto della correlazione tra le cause dei fallimenti.

5.8. Probability theory

Sant'Anna nel 2012 ha proposto un metodo per derivare dalle valutazioni numeriche sui criteri di severity, occurrence e detection di una FMEA, una misura di priorità probabilistica dei potenziali fallimenti.

Il modello proposto si basa sul trattamento delle misurazioni numeriche iniziali come stime degli indici di posizione di una distribuzione di probabilità, che consente di considerare obiettivamente l'incertezza che riguarda tali misurazioni e di calcolare le probabilità di ogni potenziale guasto come il più importante secondo ciascun criterio.

Queste probabilità sono quindi combinate in una misura di qualità globale, che può essere interpretata come una probabilità congiunta di potenziale fallimento.

Hu-Chen Liu nel suo articolo del 2013 dopo aver esposto le cinque macro categorie esistenti per il calcolo dell'RPN, ha anche analizzato quali sono gli approcci più utilizzati (Grafico 1) e il risultato è stato che con il 40% dei casi viene usato l'intelligenza artificiale.

Al secondo posto si piazza l'MCDM con il 22,5%, al terzo gli altri approcci con il 17,5% , al quarto posto gli approcci integrati con l'11,25% e all'ultimo posto con l'8,75% la programmazione matematica

L'approccio più popolare è il sistema basato sulle regole fuzzy, seguito dalla theory of grey, modello basato sui costi, AHP/ANP e programmazione lineare; l'ampia applicazione dei sistemi a base fuzzy e gli approcci basati sulle conoscenze hanno grossi vantaggi.

Infatti, se confrontato con il metodo tradizionale della FMEA, il fuzzy expert system offre molti vantaggi:

- Le informazioni ambigue, qualitative o imprecise, in aggiunta ai dati quantitativi possono essere utilizzati nella valutazione delle criticità o del rischio e vengono gestiti in modo consistente.
- Permette di unire la severity, occurrence e detetion dei failure modes in modo più flessibile e realistico.
- Consente di personalizzare la funzione di valutazione del rischio di un guasto in base al processo o al prodotto.
- Il fuzzy knowledge-based system può incorporare pienamente le conoscenze e le competenze degli ingegneri nell'analisi FMEA e si possono così realizzare notevoli risparmi sui costi.

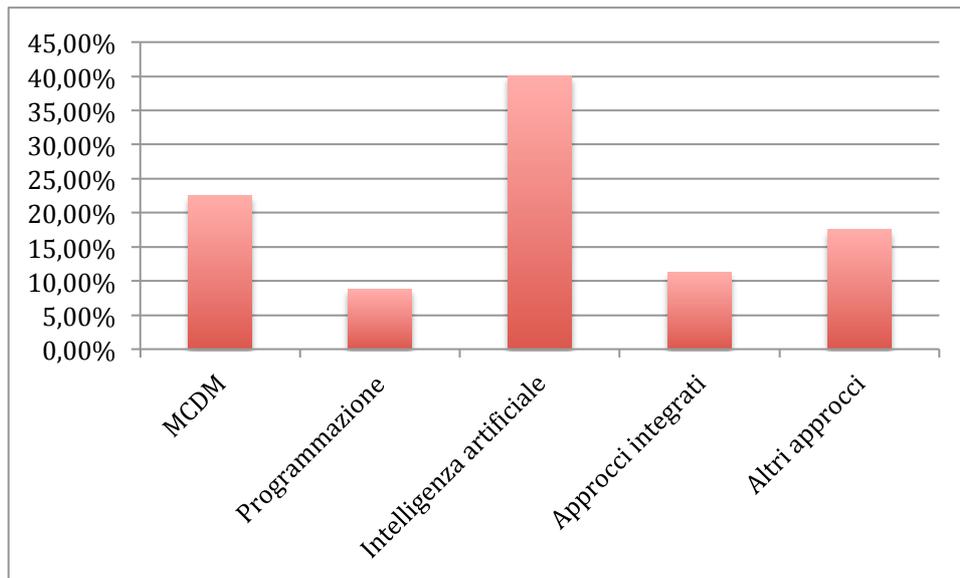


Grafico 1 – Distribuzione degli approcci più utilizzati (Hu-Chen Liu del 2013).

Inoltre nell'ultima parte dell'articolo di Hu-Chen Liu del 2013 ha analizzato criticamente gli approcci identificati e di cercare di individuare i possibili inconvenienti; la sua ricerca invece di verificare ogni singolo approccio, si concentra nell'esaminare i fuzzy rule-base system, che è l'approccio più popolare.

Qualsiasi fuzzy expert system è composto da tre fasi che sono chiamate fuzzificazione, deduzione fuzzy e defuzzificazione e inoltre per la realizzazione di questo approccio in una FMEA fuzzy i fattori di rischio severity, occurrence e detection, sono fuzzificati usando delle appropriate funzioni di proprietà per determinare il grado di appartenenza in ogni classe di input.

I fuzzy inputs risultanti sono valutati in un fuzzy inference engine che utilizza la regola if-then e le operazioni logiche fuzzy per determinare il livello di rischio di un errore; infine le conclusioni vengono defuzzificate per ottenere il numero di priorità di ogni fallimento.

Sebbene la tecnica dell'inferenza fuzzy sia stata ampiamente utilizzata per migliorare la metodologia FMEA, presenta ancora numerosi limiti:

- È difficile definire le funzioni di appartenenza appropriate per i fattori di rischio e il loro livello di priorità.
- Soffre del problema del combinatorial rule explosion, il che fa sì che il modello fuzzy dell'RPN abbia spesso un gran numero di regole e più ce ne sono e migliore è la precisione della previsione.
- La costruzione di una regola fuzzy if-then non è un compito facile poiché richiede agli esperti di formulare molti giudizi e ciò sarà molto costoso e dispendioso in termini di tempo.
- Le regole fuzzy if-then che hanno la stessa conseguenza ma diverse cause non possono essere distinte l'una dall'altra e quindi i failure modes che sono caratterizzati da queste regole fuzzy if-then non potranno essere classificate.

- È difficile trattare calcoli complessi per produrre risultati precisi senza perdere troppe informazioni nel processo di inferenza fuzzy.
- È difficile progettare pacchetti software appropriati per realizzare la comunicazione istantanea tra input e output del rischio e per classificare delle priorità dei guasti.

I metodi che si basano sulla fuzzy rule base, proposti nella letteratura della FMEA, migliorano la precisione dell'analisi delle criticità dei fallimenti tramite un compromesso tra la facilità e la trasparenza del metodo convenzionale.

Ma rimangono alcuni dubbi riguardo a un'effettiva applicabilità in circostanze reali del fuzzy rule-base system, a causa delle difficoltà che sorgono durante la progettazione del modello fuzzy, ossia nella definizione delle numerose regole e delle funzioni di appartenenza richieste da questa metodologia.

Per evitare di costruire una grande if-then rule base, alcuni approcci fuzzy della FMEA ne utilizzano una ridotta; tuttavia, questo causa alcuni problemi:

- Se due if-then rules con cause diverse possono essere combinate o ridotte, allora le conseguenze devono essere le stesse, ciò dimostra che l'esperto non riesce a differenziare i due diversi failure modes l'uno dall'altro.
- Diversi esperti possono avere conoscenze e giudizi differenti e quando le loro valutazioni sono incoerenti, è quasi impossibile combinare o ridurre le regole.
- Se si dovesse eseguire una riduzione delle regole da un'if-then rule base incompleta quelle che dovrebbero rimanere, sarebbero imperfette poiché una qualsiasi deduzione da una rule base non completa sarà distorta o addirittura errata.
- Se è possibile costruire un'if-then rule base completa utilizzando la conoscenza degli esperti, allora i failure modes dovrebbero essere classificati in diverse categorie piuttosto che in un ordinamento solo.

Recommended action

La progettazione di azioni corretti dovrebbe essere diretta in primo luogo per i failure mode e le cause con il più alto valore di Severity e di RPN, con lo scopo di ridurre il valore associato a questi due indicatori.

Generalmente quando la Severity assume un valore pari a 9 o 10 bisogna intervenire, indipendentemente dal valore assunto dal RPN finale, e bisogna porre una particolare attenzione verso la progettazione di controlli o azioni correttive, in quanto un numero così alto può creare problemi per la sicurezza dei clienti finali.

In tutti i casi dove un effetto di un potenziale failure mode può nuocere al personale di produzione o di assemblaggio o al cliente finale, bisogna intraprendere delle azioni correttive in modo tale che si possa evitare il verificarsi di questo problema.

Dovrebbero essere considerate le seguenti azioni da intraprendere:

- Per ridurre la probabilità dell'occurrence è richiesto una revisione del processo e/o della progettazione.
- Solo una revisione del design e/o del processo può portare a una riduzione del livello di Severity.
- Per aumentare la probabilità di Detection, è necessario una revisione del processo e del design; generalmente incrementando i controlli è costoso e non porta ad un'efficace miglioramento della qualità.

Responsibility & target completion date

Viene indicata la funzione aziendale, la persona responsabile dell'azione correttiva e i tempi previsti per il completamento dell'azione intrapresa per ridurre il valore di RPN.

Action taken

Dopo che un'azione è stata implementata, si deve scrivere una breve descrizione di ciò che è stato fatto e la data di realizzazione dell'azione prevista.

Revised ratings

Dopo che le azioni correttive e preventive sono state implementate, ricalcolare l'indice RPN. Con il consueto focus sul miglioramento continuo, questo nuovo valore sarà la base per un'analisi futura.

2.3 PUNTI DI FORZA E DI DEBOLEZZA.

Punti di forza:

- **Contenimento delle spese:**
Se i failure mode e le loro cause vengono individuati antecedentemente alla realizzazione ed assemblaggio di un prototipo, si possono risparmiare i tempi per la produzione ed inoltre si evitano grossi esborsi per test e nuove prototipazioni.
- **Riduzione di riparazioni in garanzia e richiami:**
Questo aspetto contribuisce ulteriormente a diminuire spese perlopiù difficilmente preventivabili e dall'esito critico come la perdita o insoddisfazione del cliente.
- **Dinamicità del documento attraverso le successive fasi di revisione, l'evoluzione tecnica del prodotto/progetto.**
- **Aumento della conoscenza del prodotto:**

Nella stesura del prospetto vengono coinvolti un folto numero di esperti multidisciplinari che esaminano il prodotto da ogni punto di vista e condividono i propri pareri.

- Capacità di “congelare” in un documento schematico e di semplice lettura l’enorme bagaglio di conoscenze tecnologiche sviluppate dall’azienda: in tal modo il know how di progetto e processo diventa sempre più di dominio dell’azienda, non rimanendo quindi una prerogativa di quei tecnici esperti la cui professionalità può anche improvvisamente venire a mancare, complice la sempre crescente flessibilità del mercato del lavoro.
- Possibilità di essere sfruttata a posteriori come database storico, per estrarre informazioni riguardanti la qualità ed efficienza degli interventi intrapresi, anche a fronte dei costi e delle risorse impegnate, e come punto di partenza per i successivi sviluppi della qualità del prodotto.

Punti di debolezza:

- La soggettività insita nell’attribuzione dei valori ai tre indici di Severity, Occurrence e Detection e il fatto che l’RPN non è una misura in quanto i sottoindicatori S,O,D non sono oggettivi e perché nell’aggregazione attraverso l’RPN si violano le proprietà di scala dei sottoindicatori, promuovendole da proprietà di ordinamento a rapporto.
- L’incapacità di valutare il differente peso con cui Severity, Occurrence e Detection possono gravare sulla criticità della singola tipologia di guasto: la FMEA livella in modo semplicistico il loro contributo, uguagliandolo, perché l’indicatore RPN gode della proprietà di compensazione.
- La ripetitività con cui si presentano all’interno del proprio range i RPNs prodotti da tutte le distinte terne di valori di Severity, Occurrence e Detection.
- La difficoltà di valutare nella sua complessità l’intero scenario di guasto nelle mutue interazioni fra i componenti coinvolti.
- La mancanza di un supporto decisionale capace di produrre una Criticality Item List che tenga conto non solo della gravità di una failure, bensì anche dell’efficienza economica degli interventi correttivi da adottare, che non deducibili da confronti tra valori del RPN.
- La grande semplificazione introdotta nella FMEA che riduce il comportamento di un sistema complesso a due soli possibili stati binari: “success” e “failure”.
- La mancanza di espliciti riferimenti relativi al deterioramento del prodotto spesso utili al cliente.
- Il lungo tempo e gli sforzi necessari a livello aziendale (lunghi brainstorming, spese di training per il personale, ecc.) per sviluppare e gestire la FMEA che la rende un’analisi proibitiva, soprattutto per aziende di medio-piccole dimensioni, a fronte di risultati troppo spesso inconsistenti ed incompleti.

- Le differenti combinazioni di Severity, Occurrence e Detection possono dare lo stesso esatto valore di RPN, ma le implicazioni dei rischi possono essere totalmente diverse.
- I fattori di rischio sono difficili da valutare.
- L'uso della formula matematica per il calcolo dell'RPN è discutibile e contestabile.
- L'RPN non può essere usata per misurare l'efficacia delle azione correttive.
- Gli RPNs non sono continui ma hanno tanti buchi in quanto tutti i valori primi non possono derivare da una moltiplicazione.
- La forma matematica adottata per calcolare l'RPN è fortemente sensibile alle variazioni nelle valutazioni dei fattori di rischio.

CAPITOLO 3 – APPLICAZIONE DELLA FMEA

3.1 INTRODUZIONE AL LAVORO SVOLTO.

3.1.1 Descrizione Processo di Assemblaggio.

Una volta conclusa la DFMEA dell'intero canale TBU, l'azienda era intenzionata a realizzare la PFMEA dell'assemblaggio automatico poiché rispetto a quello manuale aveva più problemi; per eseguire questo progetto allora si è cercato di costituire un team composto da sei o sette elementi con funzioni aziendali tutte diverse.

Infatti, il team che si è formato era composto da persone che si occupavano della qualità, del processo, della progettazione, dell'ufficio tecnico e delle vendite, inoltre si è cercato sempre di avere un parere da parte degli addetti alla macchina e si è scelto un project manager che si occupasse di organizzare gli incontri e compilare la tabella.

Per svolgere quest'analisi si è pensato di suddividere il lavoro in due macro fasi cosicché il progetto possa esaminare in profondità il processo di assemblaggio, i potenziali problemi e le non conformità che si possano generare.

Queste due macro fasi sono: la realizzazione del PFD e la stesura della FMEA.

- La prima consiste in un'analisi del processo definendo i vari input, output e le possibili fonti di rumore che possono verificarsi e far sì che non si ottenga l'output desiderato per ogni operazione e una rappresentazione grafica del processo.
- La seconda invece è uno studio delle cause, degli effetti di un fallimento del processo e di una stima della severità, della ripetibilità e della detection di una possibile failure mode in modo tale da poter classificare i problemi che si sono riscontrati e intraprendere delle azioni correttive.

La prima operazione svolta è stata lo studio del processo di assemblaggio e la decisione su come scomporre il sistema, si è scelto di suddividere le operazioni in base alle stazioni presenti dentro la macchina e alle operazioni che svolge il personale nella parte finale prima di chiudere il box.

Inoltre si è deciso che quando si considerava una stazione, presente dentro la macchina, quest'ultima veniva ancora suddivisa in base alle varie operazioni che il prodotto subisce, in quanto studiare solo la stazione e considerarla come un'entità sola non portava ad un'analisi approfondita dei problemi che si possano verificare e che possono portare a una non conformità.

L'assemblaggio della TBU è quasi del tutto compiuto da una macchina tranne alcune fasi finali dove ci sono delle operazioni da eseguire che sono del tutto manuali e necessitano la presenza e il lavoro di uno o due operatori.

Prima di poter dare inizio all'assemblaggio gli operatori devono controllare tutti i box, i pallet dei componenti e gli elementi necessari all'assemblaggio della TBU posizionati vicino alla macchina; la verifica si concentra sia sul numero seriale dei box, che deve corrispondere a quello presente sulla scheda tecnica, sia sulla conformità e sullo stato dei componenti all'interno di ogni singolo pallet.

Il controllo dello stato dei pezzi all'interno dei pallet viene svolto ogni volta che il componente deve essere inserito all'interno della macchina, questa operazione è molto importante perché la macchina non riesce a rilevare le ammaccature e i danneggiamenti.

In aggiunta durante questa fase si esamina anche l'attrezzatura che bisogna montare sulla macchina affinché la TBU possa essere assemblata poiché ogni tipologia richiede uno strumento specifico su una o più stazioni della macchina.

Il magazziniere quindi prepara un carrello con tutte le attrezzature necessarie all'assemblaggio controllando che i seriali di ogni pezzo coincidano con quelli presenti sulla scheda tecnica della TBU che si dovrà montare.

L'addetto alla macchina per esaminare tutti i seriali dei pallet e delle attrezzature presenti nel carrello si servirà di una scheda tecnica che scaricherà dal server aziendale; su questa scheda sono presenti i disegni tecnici della tipologia della TBU che si dovrà assemblare, il seriale di ogni componente o attrezzatura necessaria al montaggio e come deve essere imballato il prodotto finale.

L'operatore dopo aver prelevato il carrello e verificato la corrispondenza tra la scheda tecnica e l'attrezzatura, monterà tutti i pezzi nella macchina controllando di installarli nel modo corretto affinché non creino problemi durante la lavorazione.

La seconda operazione preliminare necessaria da fare è il settaggio della macchina con i parametri richiesti dalla tipologia della TBU che sarà assemblata, perché ogni tipo avrà componenti o misure, come ad esempio il gioco assiale, che possono variare l'uno dall'altro.

Per il settaggio l'operatore ha a sua disposizione un database con le ricette usate in precedenza per le tipologie che sono state già assemblate cosicché non si debba sempre scrivere una nuova ricetta per ogni versione della TBU.

Durante questa operazione bisogna sempre controllare che la ricetta sia stata scritta correttamente e vedere se i settaggi predisposti per la macchina siano corretti, perché a volte può capitare che i parametri fissati precedentemente per la stessa tipologia non siano corretti a causa o di cambiamenti delle specifiche in progettazione o per una deriva della macchina o per un'errata scrittura della ricetta durante il precedente utilizzo o perché un operatore ha cambiato qualche misura durante il turno.

Questi parametri possono essere aggiornati o modificati durante l'assemblaggio delle TBU, questo avviene se si nota che la macchina non colloca o preleva correttamente un qualsiasi elemento o componente oppure un'operazione non si svolge in maniera esatta.

A volte queste modifiche però possono creare dei problemi perché può capitare che per un turno di lavoro, con certi operatori, la ricetta caricata sulla macchina risulti corretta, mentre

per il turno successivo non lo sia e quindi ogni addetto esegue delle modifiche secondo i propri criteri e le condizioni di lavoro che si trovano in quel momento.

La macchina di assemblaggio automatico è stata scomposta in tre aree diverse, nella rappresentazione schematica sottostante (figura 10) si illustra come è suddivisa ogni area, le stazioni presenti all'interno della macchina e le postazioni di fuoriuscita degli elementi di scarto o del prodotto finito.

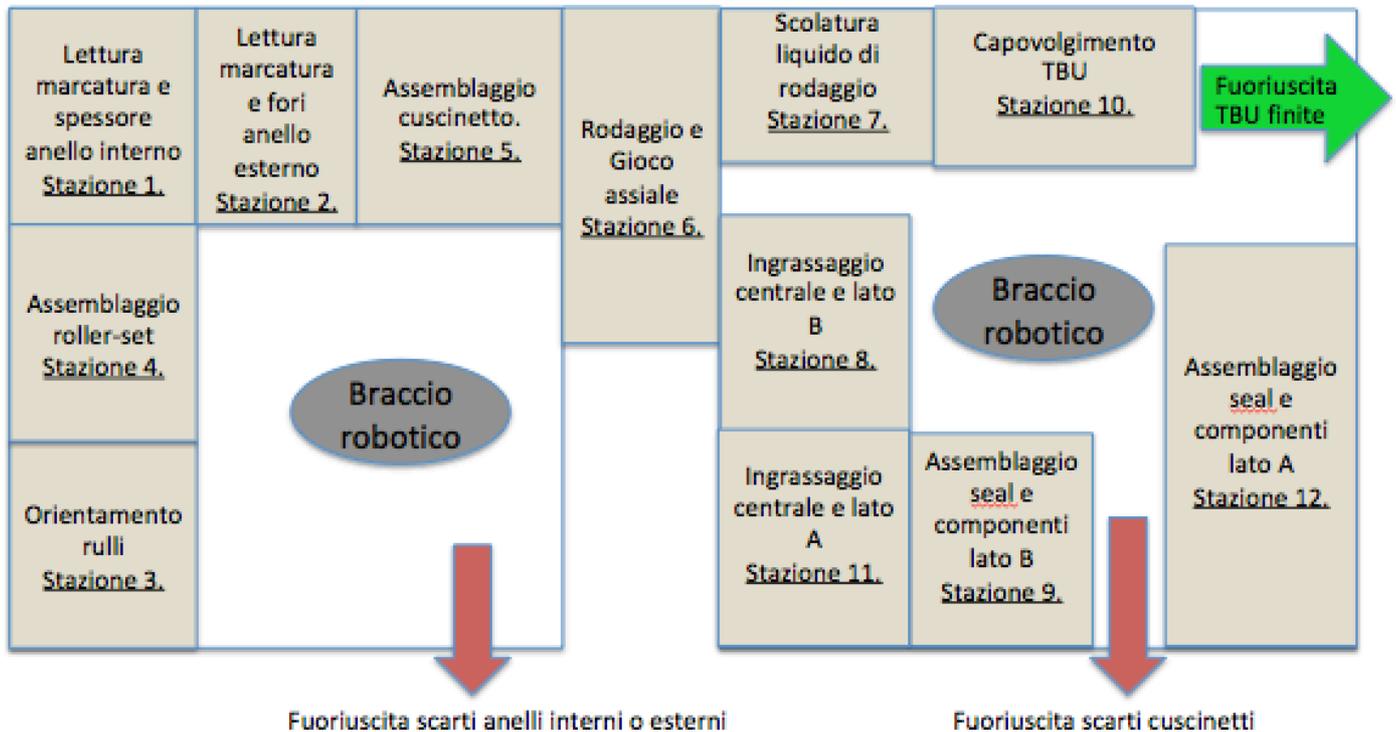


Figura 10 - rappresentazione dello schema della macchina di assemblaggio automatico, ogni rettangolo rappresenta una stazione presente dentro il processo, gli ovali rappresentano il braccio robotico che serve a movimentare i pezzi e infine le frecce rosse rappresentano le postazioni di fuoriuscita degli elementi non conformi e la freccia verde rappresenta la postazione di fuoriuscita della TBU finita.

1. La prima area è dedicata all'assemblaggio dei cuscinetti: è a forma d'isola con un braccio robotico al centro, con delle pinze all'estremità per prelevare, spostare e depositare gli anelli interni, esterni, le gabbie e il cuscinetto da una stazione all'altra.

Si è notato che questo braccio robotico avendo tante operazioni da svolgere e molti spostamenti da fare, si usura maggiormente rispetto a quello posizionato nella terza area nonostante il peso del cuscinetto e dei componenti nella prima area sia minore.

In questa prima area ci sono cinque operazioni principali:

- Una volta che l'operatore ha caricato l'anello interno sulla canalina per alimentare la macchina le prime operazioni che vengono svolte sono il controllo della marcatura e dello spessore (figura 11).

L'anello quando arriva in stabilimento è già stato marcato dal fornitore, che scrive il lotto e il numero seriale su ogni pezzo; il riconoscimento di tali marcature viene

fatto da una telecamera che legge i vari caratteri numerici presenti sulla superficie dell'anello.

La macchina per riconoscere i caratteri fa affidamento a un database di più fotografie di ogni numero in modo tale da avere un range più ampio per il confronto con i caratteri che vengono rilevati; questa operazione viene svolta all'inizio dell'assemblaggio durante il controllo del giusto settaggio della macchina.

Per la creazione del database si fanno passare più pezzi con numeri diversi e si memorizzano più fotografie possibili per ogni carattere per cercare di avere almeno quattro foto diverse per ogni numero.

Se la telecamera per la lettura delle marcature per qualche motivo è inutilizzabile per un problema della macchina o dei pezzi, che sono stati marcati in modo errato o sono troppo unti per consentire il riconoscimento dei numeri, l'operatore dovrà inserirli manualmente sia il seriale sia il lotto di ogni anello sul software di tracciabilità da un piccolo pannello presente vicino alla canalina di alimentazione.

Sempre nella stessa stazione, dopo la lettura della marcatura dell'anello, viene controllato il suo spessore e si calcola se la quota rilevata è conforme alle specifiche di quel particolare tipo di anello.

Quest'operazione è svolta tramite un piattello che scende in verticale fino a toccare la faccia superiore dell'anello e una volta a contatto, una riga ottica misura lo spessore e lo confronta con la misura che è stata fissata durante il settaggio della macchina.

Per motivi di maggior controllo e sicurezza si è imposto che la macchina ogni 25 pezzi si tari nuovamente prendendo automaticamente un anello, definito master perché la sua quota è certificata e non dovrebbe subire variazioni, che è posizionato vicino alla stazione.

Se per caso la macchina non riuscisse a leggere la marcatura o lo spessore è fuori dalle tolleranze, l'anello viene scartato e tolto dalla macchina mettendolo in una zona di recupero dove l'operatore successivamente lo preleverà e lo esaminerà prima di buttarlo o rilavorarlo.



Figura 11 – Stazione per la misurazione dello spessore anello interno e lettura marcatura.

- Dopo che l'operatore ha caricato l'anello esterno sulla canalina, il braccio robotico lo preleva e lo pone su una tavola rotante dove una telecamera fotografa i vari caratteri presenti, come nell'operazione precedentemente descritta, viene formato così un database dei vari numeri cosicché si possa confrontare il numero letto con un più ampio range di foto.

In seguito sempre nella stessa operazione vengono controllati i numeri di fori presenti solo in alcune tipologie; essi servono per poter reinserire o aggiungere del grasso all'interno della TBU quando viene montata dal cliente o durante la manutenzione.

La verifica dei fori viene anch'essa fatta tramite una telecamera che rileva i fori presenti sull'anello mentre questo ruota sulla tavola, il riconoscimento viene fatto fissando un punto di riferimento da cui la macchina inizia il controllo.

Se la macchina dovesse avere problemi nella lettura dei caratteri o nella verifica dei fori, l'anello viene scartato e messo fuori dal processo mentre se durante l'operazione si dovesse verificare un qualsiasi altro problema, la macchina si blocca e dà un segnale di errore.

- L'operatore dopo aver controllato il seriale del pallet dei rulli, verifica che tutte le scatole al suo interno siano integre e sigillate e successivamente controlla che il lotto e la sfumatura, che sono scritti sull'etichetta presente sia all'esterno che all'interno della scatola corrispondano con quanto previsto dalla tipologia che si deve assemblare .

Dopo aver eseguito tutti i controlli necessari, si svuota in modo delicato il contenuto delle scatole in un cassone, evitando che durante l'alimentazione i rulli si possano bollare o graffiare cadendo gli uni sugli altri o taccando il convogliatore.

All'interno di questo cassone c'è un convogliatore che tramite la vibrazione sposta i rulli verso una canalina dove in seguito saranno orientati, ciò avviene sfruttando la forma conica dei rulli perché una volta giunti sulla canalina, che è vuota all'interno, poiché è formata solo da due tubi laterali, si orientano facendo cadere il lato più piccolo in basso e lasciando quello più grosso in alto.

Il rullo prima di finire sulla canalina per essere orientato, esce dal cassone e in prossimità dell'uscita è stata inserita una lastra di plexiglass nella parte superiore con lo scopo di far uscire solo un rullo alla volta perché a volte è capitato che ne escano due contemporaneamente e invece di orientarsi entrambi, uno scivola sopra quelli orientati e va a finire all'interno della gabbia ma non nella corretta posizione creando dei problemi per l'assemblaggio del roller-set.

Una volta orientati i rulli si dispongono uno in fila all'altro nella canalina, che è inclinata e posizionata vicino alla stazione di assemblaggio roller-set in modo tale che la pinza robot poi possa prenderli e inserirli dentro la gabbia.

- Dopo aver controllato che la gabbia non presenti graffi, rotture o deformazioni visibili a occhio nudo, viene caricata su una rulliera, dove il braccio robotico la preleva e la orienta (figura 12).

L'orientamento viene effettuato usando un raggio laser che rileva i tenoni presenti nella gabbia, in modo tale da riuscire a identificare quali sono le feritoie, per rendere possibile questa lettura il braccio robotico, dopo aver prelevato il pezzo, si posiziona a una corretta distanza e inclinazione dal puntatore laser e inizia a ruotare lentamente finché non viene rilevata la feritoia.

Una volta che la macchina è riuscita a orientare la gabbia, la deposita sulla pedana rotante posta nella stazione successiva; se la macchina non dovesse riuscire a orientare il pezzo, lo scarta e dà un segnale di allarme.

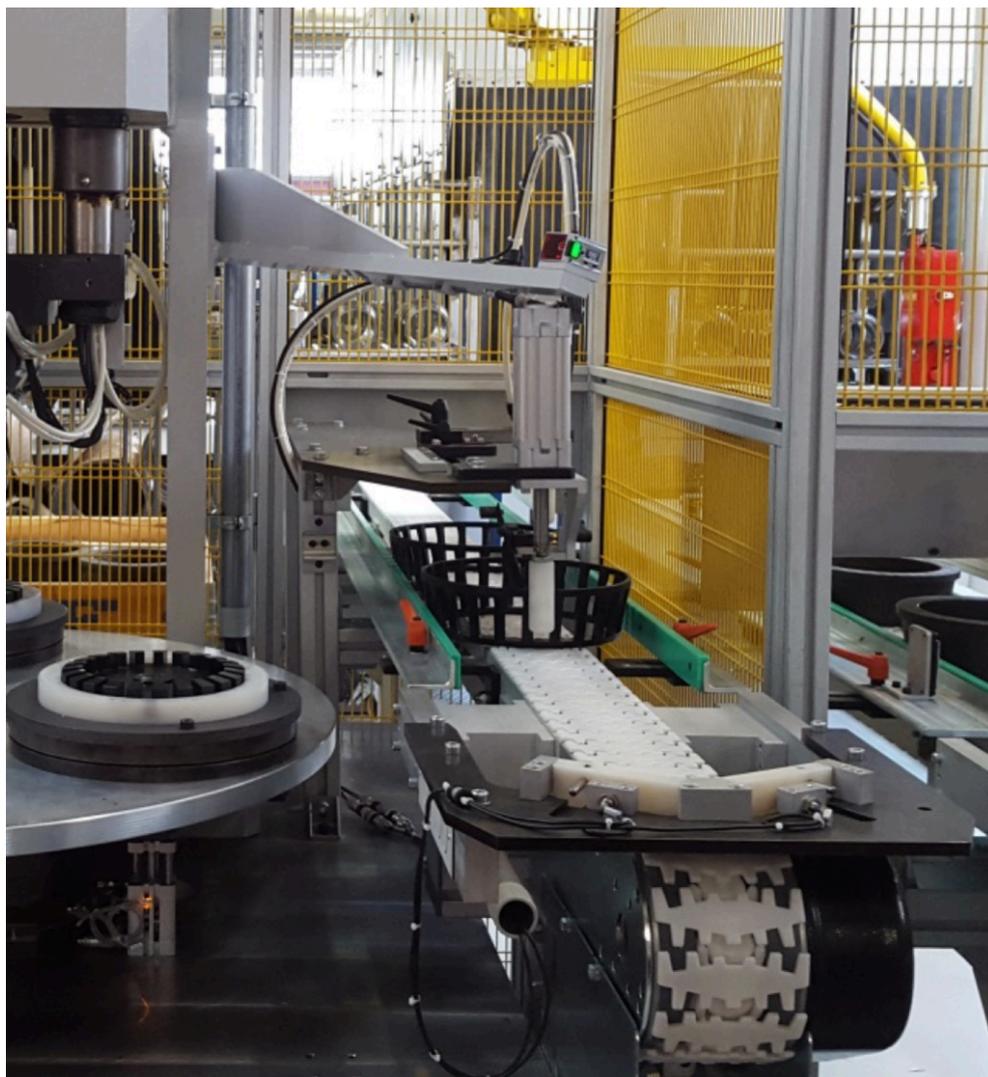


Figura 12 – stazione del prelevamento della gabbia e del suo orientamento.

- La stazione di assemblaggio roller-set è composta da una pedana rotante formata da tre piattelli diversi (figura 13); il braccio robotico posiziona una gabbia orientata alla volta e in seguito una pinza preleva i rulli dalla canalina e li inserisce uno alla volta nella gabbia, cercando di posizzarli correttamente dentro la feritoia, in modo tale che non fuoriescano dalla loro sede perché se dovesse succedere potrebbe rompere la gabbia, rigare o bollare l'anello interno durante l'assemblaggio del roller-set.

Una volta inseriti tutti i rulli, il braccio robotico preleva l'anello interno dalla stazione della misura dello spessore e lo inserisce dentro la gabbia e successivamente la pedana ruota per posizionarsi sotto una pressa dove l'anello interno viene pressato per poter assemblare il roller-set.

Una volta assemblato il roller-set, la pedana ruota e il braccio robotico preleva il roller-set e lo posiziona nella stazione successiva dove verrà montata il cuscinetto.



Figura 13 – 1 posizione dove viene depositata la gabbia orientata, 2 posizione dove una pinza robot inserisce i rulli nella gabbia e successivamente l'anello interno infine nella posizione 3 viene assemblato il roller-set grazie a una pressa.

- L'ultima stazione presente nella prima area è quella dove viene assemblato il cuscinetto, inizialmente il braccio robotico prende un roller-set e lo posiziona sulla rulliera e durante questa movimentazione il pezzo viene anche capovolto.

In seguito il braccio robotico prende l'anello esterno e lo inserisce sopra il primo roller-set, se durante quest'operazione si dovesse verificare un qualsiasi problema la macchina si arresta e da un segnale di allarme.

Per ultima cosa la pinza robot prende il secondo roller-set e lo inserisce all'interno dell'anello esterno e una volta conclusa questa operazione una laser rileva l'altezza del cuscinetto per controllare se l'assemblaggio è avvenuto correttamente e quindi il cuscinetto può essere mandato all'operazione successiva.

2. La seconda area è dedicata alla verifica del gioco assiale ed è formata da una sola stazione con una macchina (figura 14), che si dedica per prima cosa al rodaggio del cuscinetto, successivamente all'inserimento del distanziale e per concludere con la verifica del gioco assiale, che deve rispettare i parametri fissati durante il settaggio della macchina.



Figura 14 – stazione del rodaggio e gioco assiale.

Questa stazione è il collo di bottiglia di tutto il processo di assemblaggio ed è una delle operazioni più importanti e critiche perché il valore del gioco assiale deve rientrare nelle tolleranze fissate in progettazione, poiché se il gioco non è corretto, si incorre in gravi problemi durante l'utilizzo della TBU.

Il rodaggio viene effettuato da una macchina che, per prima cosa inserisce una quantità prefissata di liquido di rodaggio tramite un tubicino all'interno del cuscinetto, più precisamente nella zona dove i rulli sono a contatto con la pista dell'anello esterno ed interno.

Nel frattempo un piattello, collegato a un pistone, scende fino a incastrarsi all'interno del foro del cuscinetto e inizia ruotare facendo girare anche l'anello interno, durante questa operazione viene anche aggiunta una certa pressione in modo tale da assestare l'anello interno e i rulli nella gabbia.

Quest'operazione è molto importante perché facendo girare i rulli si riesce anche a pulire la pista da eventuali eccessi di strati di fosfatazione e si testa in modo preliminare se la TBU riesce a ruotare nel modo corretto.

Durante il rodaggio viene anche misurato lo spessore del distanziale da dover inserire, per raggiungere la quota di gioco assiale prevista in progettazione per ogni determinata tipologia di TBU.

Lo spessore viene calcolato dalla macchina sottraendo il valore del gioco assiale richiesto dalla misura della distanza presente tra i due anelli interni all'interno del cuscinetto.

Dopo aver calcolato lo spessore, la macchina attraverso un pinza robot preleva il distanziale prescelto dalle varie canaline presenti vicino alla stazione; per quest'operazione è necessario che l'operatore, prima di caricare i vari distanziali, misuri lo spessore e controlli lo stato di ogni pezzo, per non inserire dei componenti che non sono conformi.

Dopo aver superato il controllo, il distanziale deve essere inserito in una delle venti canaline, presenti all'esterno della macchina; ognuna di esse è predisposta per un determinato range di spessore in modo tale che la pinza robot, sapendo qual è la misura del distanziale da inserire, riesce a prelevarlo dalla giusta canalina.

Una volta inserito il distanziale dentro il cuscinetto, la macchina misura di nuovo il gioco assiale e se è dentro le tolleranze il pezzo sarà portato all'operazione successiva, mentre se non è corretto la macchina toglie il distanziale presente e ne inserisce un altro con una dimensione diversa da quello precedente; se la misura del gioco assiale è per due volte di fila errata la macchina segnala il problema e scarta il cuscinetto.

Hanno deciso di dare alla macchina due tentativi per verificare il gioco assiale perché molte volte lo spessore di un distanziale si trova in una classe intermedia e quindi viene inserito o in quella più alta o in quella più bassa, oppure un altro motivo è che la fornitura dei distanziali è insufficiente a soddisfare le esigenze della produzione e quindi se finisce una classe, la macchina cerca di ovviare al problema prendendo i distanziali dalle classi adiacenti.

3. La terza area è a forma d'isola con al centro un braccio robotico che sposta il cuscinetto da una stazione all'altra ed è dedicata all'assemblaggio degli schermi, dei componenti finali e all'ingrassaggio del cuscinetto.

In questa area ci sono sei stazioni:

- Verificato il gioco assiale, sia i cuscinetti conformi sia quelle da scartare dovranno passare per la stazione di scolatura del liquido di rodaggio.

In questa operazione il cuscinetto viene inclinato con un angolo predeterminato, affinché il liquido di rodaggio in eccesso, venga eliminato, in quanto dopo studi approfonditi si è visto che poteva contaminare il grasso presente nella TBU, se era

in eccesso, e quindi potrebbe portare a grossi problemi durante il funzionamento, come ad esempio il surriscaldamento e il danneggiamento delle piste.

Per espellere il liquido in eccesso la TBU quindi viene posta su una pedana che si inclina rispetto all'orizzontale di una certa angolazione e questa movimentazione è ripetuta per tre volte consecutive.

Il liquido di rodaggio in eccesso in questo modo fuoriesce dal cuscinetto e viene convogliato verso una condotta di scarico, che è collegata a un macchinario addetto alla pulizia del liquido per poi poterlo riutilizzare.

- Una volta tolto il liquido di rodaggio in eccesso, il cuscinetto, se ha il gioco assiale corretto, viene portato alla stazione successiva dove verrà per prima cosa pesato.

Quest'operazione preliminare è molto importante perché serve sia per verificare quanto grasso dover inserire sia per controllare se nelle operazioni precedenti siano stati inseriti tutti gli elementi.

Se durante la verifica del peso il cuscinetto fosse non conforme, la macchina segnala l'errore e scarta il pezzo; è un controllo aggiuntivo che è stato inserito nella macchina per verificare se tutti i rulli siano stati inseriti.

Una volta pesato il cuscinetto viene ingrassato tramite una campana che scende fino ad andare in contatto con la facciata della TBU (figura 15) e a quel punto, mentre viene fatto ruotare l'anello interno, viene inserito il grasso tra i rulli nel modo più uniforme possibile, in modo tale che si spalmi su tutta la pista dell'anello interno ed esterno.



Figura 15 – Ingrassaggio Cuscinetto.

Dopo essere stato ingrassato nella parte superiore il cuscinetto viene ripesato per verificare quanto grasso è stato inserito; se è stato inserito una quantità insufficiente viene re-ingrassato cercando di inserire la differenza, mentre se è in eccesso la macchina cerca di compensare inserendo meno grasso nelle operazioni successive di ingrassaggio centrale e del lato A.

Se invece il cuscinetto fosse ingrassato con una quantità troppo elevata, verrà scarta e in quel caso l'operatore cercherà di togliere il grasso in eccesso e una volta fatto re-inserirà il cuscinetto all'interno della macchina.

- Una volta pesato e ingrassato, il cuscinetto verrà posizionato nella stazione successiva dove verranno assemblati i componenti richiesti in base alla tipologia che si sta assemblando.

Prima di inserire i componenti nella macchina, l'operatore dovrà controllare la loro conformità, ossia se sono quelli richiesti per l'assemblaggio e se presentano qualche difetto come graffi, bolli o rotture.

In questa fase è anche importante timbrare il seal, perché quando la TBU verrà montata sul fusello questo lato e quella che rimane visibile all'esterno e per questo motivo devono essere presenti delle marcature che fanno sì che si possano riconoscere il seriale, il lotto dell'anello esterno.

Una volta caricati tutti i componenti, la macchina inizierà ad appoggiarli sulla facciata del cuscinetto, alcune volte se la tipologia lo richiede si dovrà orientare il seal in base alla presenza e alla posizione dei fori sull'anello esterno.

Questa operazione di orientamento è necessaria perché i seal potrebbero presentare delle viti o dei sensori che rischierebbero di rompersi durante l'assemblaggio sulla facciata del cuscinetto.

L'orientamento dei seal viene effettuato da un software che tramite le immagini di una telecamera cerca un punto di riferimento, fissato durante il settaggio della macchina, mentre il pezzo ruota su una pedana; se il software non dovesse riuscire a identificare il punto di riferimento la macchina si blocca ed emette un segnale di errore.

L'assemblaggio di questi componenti non è molto facile, perché risulta complicato riuscire a posizzarli nel modo corretto e con il giusto orientamento e per risolvere questo problema si è progettato di far inserire alla macchina un tool di centraggio che aiuta il seal e gli altri componenti ad essere correttamente posizionati rispetto al foro del cuscinetto.

Una volta posizionati, questi componenti verranno assemblati da una campana che scende fino ad entrare inizialmente in contatto con i componenti per poi spingere con una forza prefissata fino a toccare l'anello esterno.

La macchina durante questa operazione ha dei controlli che fanno sì che non si rovini la campana e il cuscinetto, in quanto se la forza usata è superiore a quella prefissata si blocca e dà errore, ma lo fa anche se non riesce ad entrare in contatto con il seal quando la campana scende.

Però la macchina non esegue nessun controllo su come viene depositato il seal sul cuscinetto, questo può portare a deformazioni o la formazione di trucioli, in quanto la campana scende e pressa comunque il componente indipendentemente da come è poggiato.

- Dopo aver assemblato i componenti sul lato B del cuscinetto il braccio robotico lo preleva e lo capovolge posizionandolo su una pedana.
- Una volta capovolto il cuscinetto viene nuovamente ingrassato come nell'operazione precedentemente descritta con una sola differenza, in questa stazione viene anche ingrassato la parte centrale del cuscinetto.

Per prima cosa il cuscinetto viene pesato, per ricavare quanto grasso è stato inserito nel roller-set lato B, dopodiché una pinza robot toglie il roller-set lato A e la macchina ingrassa la parte centrale dove c'è il distanziale.

Il computer sapendo quanto grasso è già stato inserito e quanto ce ne deve essere in totale, inizia a ingrassare tramite un tubicino la parte centrale, cercando di farlo nel modo più uniforme possibile e ruotando attorno al distanziale così da ricoprire tutta la zona interessata.

Dopo aver finito questa operazione, la pinza robot reinserisce il roller-set lato A all'interno del cuscinetto e successivamente viene nuovamente pesato per calcolare quanto grasso è stato inserito nella parte centrale in modo tale da ricavare quanto ne deve essere inserito nel roller-set lato A.

Una volta che la macchina ha ricavato la quantità mancante per raggiungere il totale prestabilito, ingrassa il roller-set lato A nello stesso modo in cui è stato ingrassato il lato B.

Per ultima cosa il cuscinetto viene pesato per l'ultima volta per verificare se è stata inserita la quantità corretta e nel caso in cui è stato inserito del grasso in eccesso la macchina scarta il pezzo se non rientra nelle tolleranze, se invece ne è stata inserita in quantità inferiore la macchina inserisce la differenza ingrassando il roller-set lato A.

- Finita l'operazione di ingrassaggio il cuscinetto verrà posizionato dal braccio robotico nell'ultima stazione presente dentro la macchina; qui verranno assemblati i componenti sul lato A nello stesso modo del lato B con l'unica differenza che in questa stazione non è necessario timbrare il seal e orientarlo, in quanto questa parte della TBU non risulta visibile all'esterno una volta montato sul fusello.

Ma l'assemblaggio della TBU non è ancora terminato in quanto una volta che il seal sono stati assemblati e il cuscinetto ingrassato, il braccio robotico preleva la TBU e la posiziona su una rulliera in modo tale da farla uscire dalla macchina per poi farla procedere verso la stazione

successiva dove sono presenti uno o due operatori che hanno il compito di effettuare dei controlli visivi e di pulire la TBU.

Se la TBU dovesse risultare non conforme a causa di un problema durante l'assemblaggio dei seal o dei componenti, come ad esempio la presenza di trucioli, la rottura delle viti dei seals o se un componente risulta bollato, graffiato o rotto, viene scartata e posizionata in una zona di recupero dove poi il supervisore deciderà se smontare o buttare la TBU.

Dopo aver concluso i controlli visivi, l'operatore inserisce, sul software di tracciabilità dei dati, il seriale e il lotto e il numero del box della TBU, e successivamente inserirà il cartoncino trattenitore all'interno del foro e monterà gli ultimi due componenti: l'anello di protezione e il backing ring.

Assemblati quest'ultimi componenti, la TBU viene regettata dall'operatore e verrà inserita dentro il box per la spedizione; il numero di prodotti finiti e come devono essere impacchettati dipende dalla tipologia che si sta assemblando e dalle richieste del cliente.

Infatti, alcune tipologie di TBU richiedono documenti o impacchettamenti aggiuntivi che l'operatore dovrà fare prima di spedire il box in quanto sono essenziali per il cliente.

3.1.2 Analisi processo.

Nel processo di assemblaggio sono stati inseriti due possibili azioni correttive che consentono di raggiungere le specifiche richieste per la tipologia di TBU che si sta assemblando prima di scartarlo o espellerlo dalla macchina; queste operazioni riguardano il gioco assiale e l'ingrassaggio del cuscinetto.

La stazione del gioco assiale è composta da molteplici operazioni per riuscire ad ottenere il gioco assiale prefissato; la macchina ha la possibilità di tentare due volte di riuscire ad avere una quota che rientri all'interno delle tolleranze se non dovesse riuscirci, il cuscinetto verrà espulso dalla macchina e l'operatore manualmente realizzerà il corretto gioco assiale.

Nel grafico a torta sottostante (grafico 2) sono espressi i risultati di un'analisi sulla stazione del gioco assiale, condotta esaminando l'assemblaggio di due mesi consecutivi di TBUs; lo studio si è concentrato nell'osservare quante volte è stato necessario eseguire più tentativi per raggiungere la quota di gioco assiale previsto per la specifica TBU.

Dal grafico si può vedere come su un totale di 4672 TBU assemblate, nel 77,78% dei casi il gioco assiale è corretto al primo tentativo, nel 20,18% c'è stato bisogno di un secondo tentativo per avere una quota dentro le tolleranze infine nel 2% il cuscinetto è stato espulso dalla macchina per raggiungere il gioco assiale manualmente attraverso l'uso di un torchio senza aver eseguito il secondo tentativo.

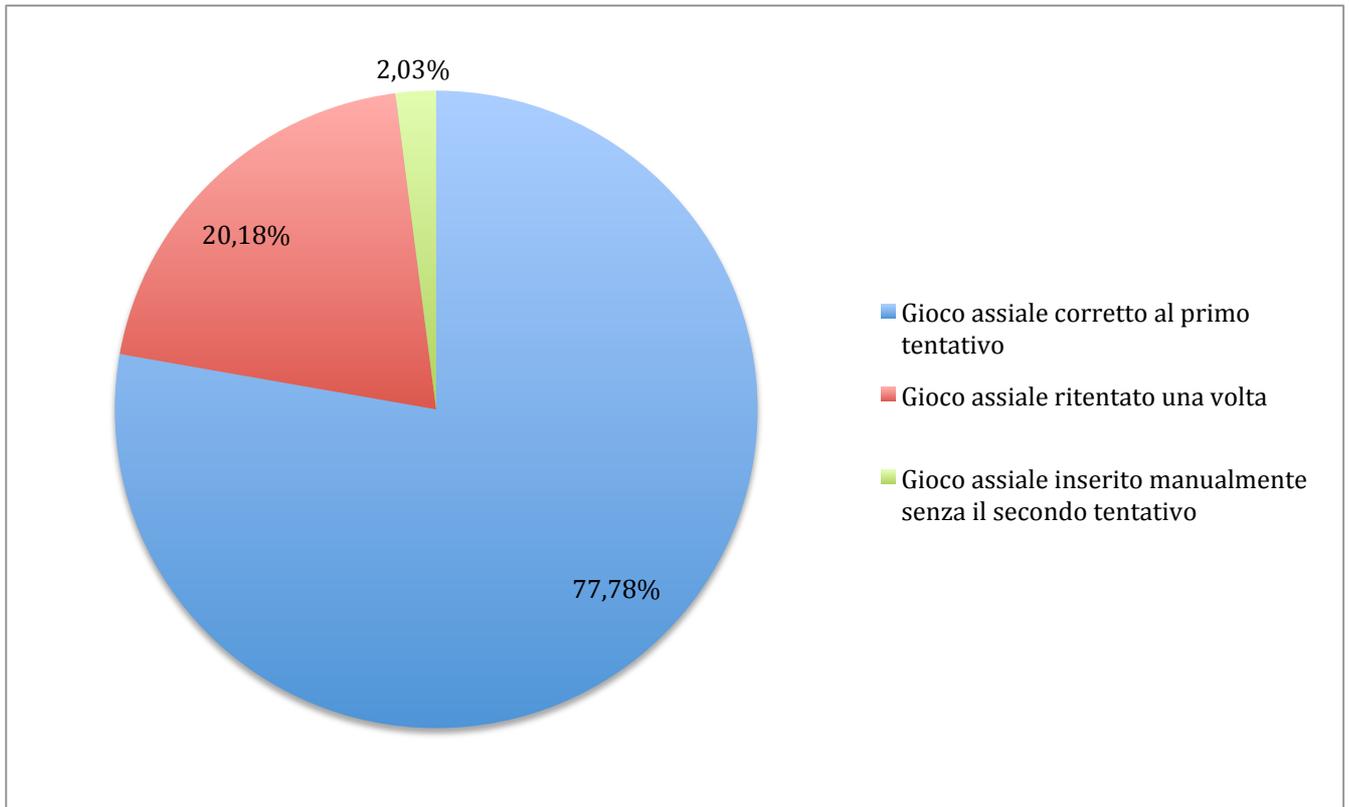


Grafico 2 – Grafico a torta che rappresenta la percentuale di giochi assiali corretti al primo tentativo, al secondo e che hanno richiesto l’esecuzione sul torchio esterno alla macchina.

Inoltre si è riuscito a vedere che nel 25,34% dei casi in cui la macchina esegua il secondo tentativo per avere un gioco assiale nelle tolleranze, il cuscinetto è stato espulso dalla macchina per eseguire l’operazione manualmente sul torchio vicino la linea.

E’ anche importante dire che i cuscinetti che vengono espulsi perché il gioco assiale non è nelle tolleranze, non sono considerati tutti scarti dal sistema, perché l’operatore dopo aver raggiunto una quota dentro le tolleranze sul torchio, inserirà nuovamente il cuscinetto nel processo, affinché finisca di essere assemblato.

Ogniqualvolta l’operatore inserirà nuovamente il cuscinetto all’interno della macchina segnerà il numero seriale del pezzo e il nuovo valore del gioco assiale, in modo tale che il software di tracciabilità dei dati riesca a prenderlo nuovamente in memoria.

Nell’istogramma sottostante (grafico 3) è stato confrontato l’andamento della stazione del gioco assiale nei due mesi consecutivi e si è notato come il numero di TBU assemblate è simile, ma è variato il valore di cuscinetti corretti al primo tentativo, al secondo e quelli inseriti manualmente.

Questa differenza si può spiegare con un problema legato ai distanziali, perché può essere che lo spessore richiesto, per raggiungere la quota di gioco assiale prevista, sia tra due classi adiacenti e quindi la macchina esegue dei tentativi prendendo prima un distanziale di una classe e verificando il gioco assiale e se non andasse bene, ne preleverà uno dalla classe adiacente.

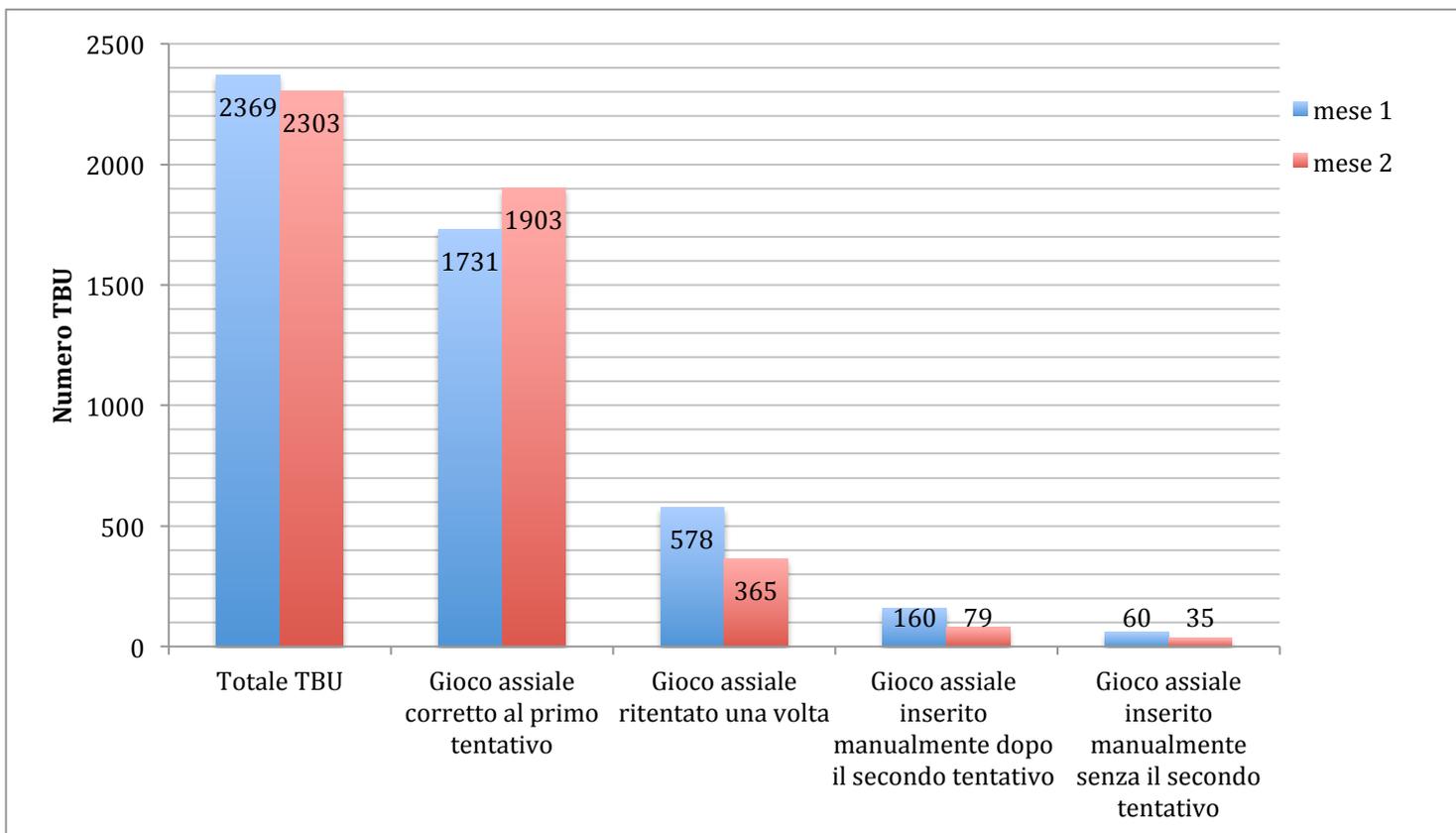


Grafico 3- Andamento stazione gioco assiale in due mesi.

Nel grafico a torta sottostante (Grafico 4) sono espressi i risultati di un'analisi sulle stazioni di ingrassaggio, condotta esaminando l'assemblaggio di due mesi consecutivi di TBUs; lo studio si è concentrato nell'osservare quante volte è stato necessario eseguire un'operazione di reingrassaggio per raggiungere la quota di grasso prefissata per quella specifica TBU.

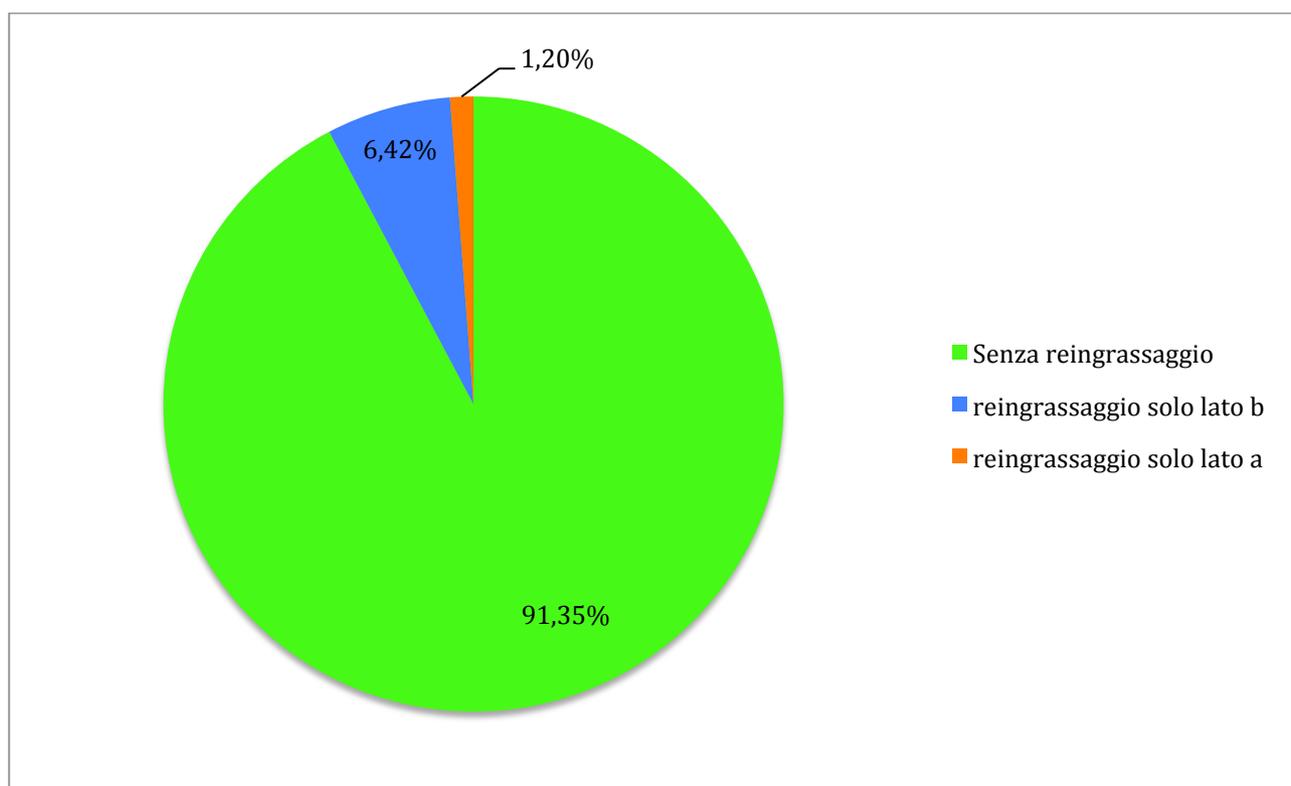


Grafico 4 –Grafico a torta che rappresenta la percentuale di volte che non è stato necessario reingrassare entrambi i lati, solo il lato B e solo il lato A.

Dal grafico si può vedere come su un totale di 4672 TBU assemblate, nel 91,35% dei casi non è stato necessario eseguire un’operazione di reingrassaggio in nessuno dei due lati, perché la quantità di lubrificante inserito al primo tentativo era corretta e dentro le tolleranze richieste, mentre nel 6,42% dei casi è stato necessario eseguire un reingrassaggio nel lato B, nel 1,2% nel lato A e nel 0,06% in entrambi i lati.

Queste operazioni di reingrassaggio sono svolte automaticamente all’interno della macchina senza che il cuscinetto venga espulso dal processo e possa essere considerato uno scarto, se invece nemmeno con queste operazioni correttive si riesce a raggiungere una quota dentro le tolleranze, il cuscinetto viene espulso dalla macchina.

Il cuscinetto espulso può essere rilavorato affinché si riesca a raggiungere la quota corretta e una volta raggiunto quel valore, l’operatore potrà reinserirlo all’interno della macchina, caricando sul sistema di tracciabilità il seriale della TBU e il nuovo valore finale di grasso.

Inoltre durante questo studio si è riuscito a vedere che sul 4672 TBU assemblate, un totale di 45 pezzi, ossia lo 0,96%, sono state scartate ed espulse dal sistema, prima che il cuscinetto possa essere ingrassato.

Nell’istogramma sottostante (Grafico 5) è stato confrontato l’andamento delle stazioni di ingrassaggio in due mesi consecutivi e si è notato che il valore di TBU assemblate in un mese è simile, come anche quelle che non hanno avuto bisogno di essere reingrassate.

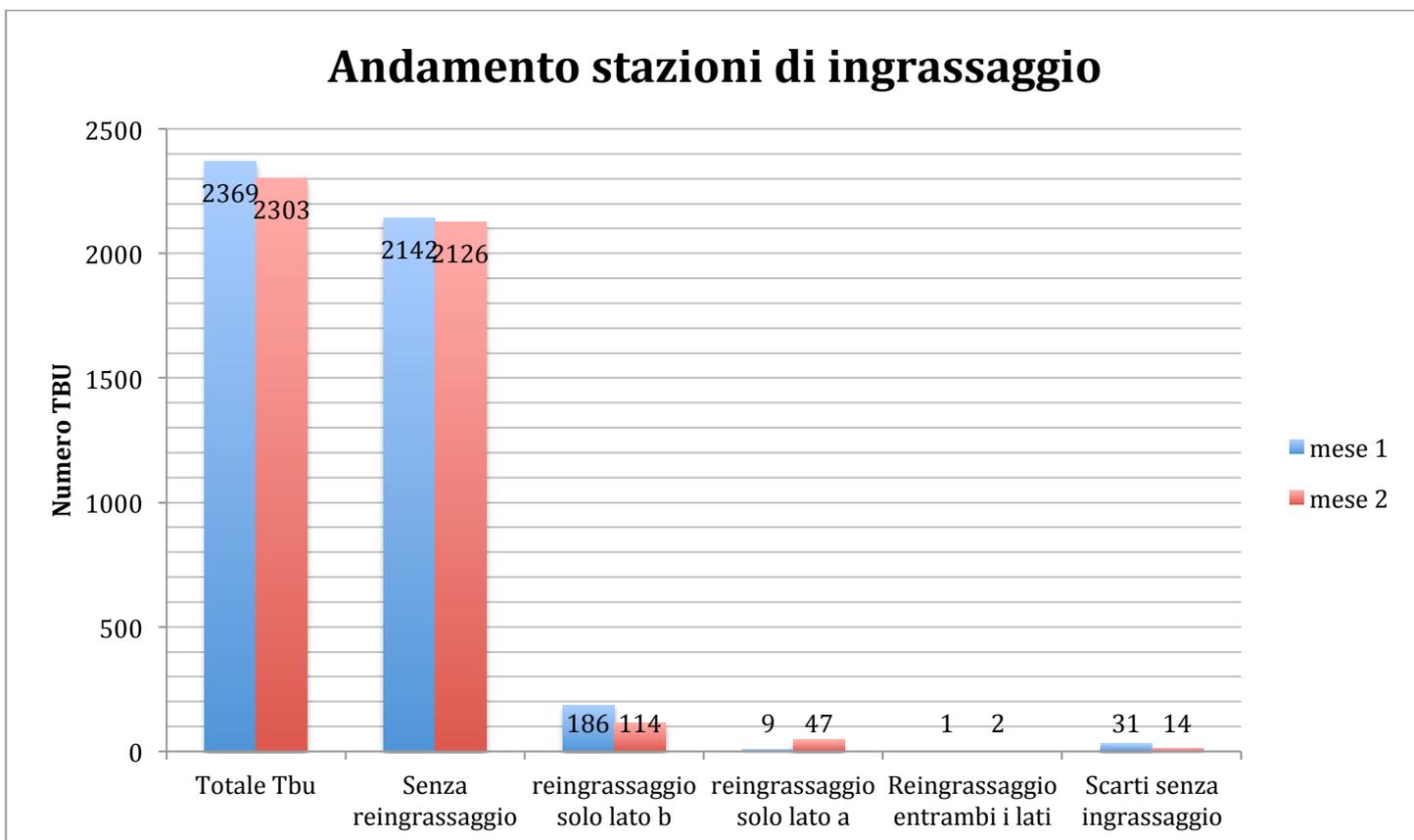


Grafico 5 – andamento delle stazioni di ingrassaggio in due mesi consecutivi.

L'unica differenza che si può rilevare nel confronto tra i due mesi è il numero di TBUs che hanno subito le operazioni di reingrassaggio, perché nel primo mese è maggiore la quantità di cuscinetti che hanno subito il reingrassaggio nel lato B rispetto al lato A mentre nel secondo mese la distribuzione è invertita.

Per vedere l'efficienza della linea di assemblaggio automatica si è calcolato l'OEE, che è un indice molto sintetico e quantitativo, costituito da un solo numero, che è in grado di contenere al suo interno molte informazioni che riguardano il processo produttivo.

L'OEE è una misura molto apprezzata dai manager per la sua sinteticità ed aggregazione ed inoltre è molto utilizzato poiché può aiutare a capire dove migliorare e quale è l'impatto di questi miglioramenti.

La possibilità di capire dove si può migliorare è garantita dalla particolare composizione dell'OEE, infatti essendo composto da tre sottoindicatori: disponibilità, efficienza delle performance e qualità.

Questa particolare configurazione permette di capire quale tra le tre voci penalizza maggiormente l'OEE e di conseguenza permette di fare delle valutazioni su dove indirizzare le operazioni di miglioramento.

I tre sottoindicatori fondamentali sono:

- **Disponibilità:** esprime una percentuale dell'effettivo tempo di attività rispetto a quello disponibile.
- **Efficienza delle performance:** esprime la percentuale di tempo di produzione effettivo rispetto al tempo in cui l'impianto è effettivamente disponibile al lavoro.
- **Qualità:** indica la percentuale, di quanti prodotti conformi sono stati realizzati rispetto al totale della produzione.

Prima di iniziare ad applicare l'OEE, è necessario considerare lo schema delle "Sei Maggiori Perdite" (Six Major Losses) perché fornisce un buon punto di partenza per lo studio delle inefficienze legate al processo e che hanno un impatto sul calcolo dell'OEE.

Queste sei perdite si suddividono in:

1. Guasti delle macchine che possono determinare della perdita di tempo, una riduzione della produttività e la perdita di prodotti perché sono difettosi e ciò conduce a dei costi di mancata produzione e una riduzione dell'efficienza.
2. Setup e regolazioni delle macchine: sono i tempi persi che si vengono a creare tra la fine della produzione di una determinata tipologia e l'inizio di quella nuova; in questa fase sono previste varie regolazioni per adattare i macchinari alle caratteristiche del nuovo prodotto.
3. Tempi d'attesa e microfermate che si verificano quando la produzione viene interrotta o rallentata da un malfunzionamento temporaneo di una macchina o quando un'attrezzatura è in attesa di un prodotto.

4. Riduzioni di velocità che risultano dalla differenza tra la velocità teorica, che è stata progettata per la macchina, e l'attuale velocità operativa; questi tempi persi non determinano un fermo impianto ma un rallentamento della produzione e quindi una produzione inferiore.
5. Scarti per difetti e rilavorazioni sono perdite di qualità causate da attrezzature malfunzionanti che determinano dei prodotti non conformi alle specifiche aziendali.
6. Scarti per avviamento possono essere: le perdite che si verificano durante le prime fasi di produzione, dallo start-up della macchina fino alla sua stabilizzazione a condizioni operative standard e questi sono scarti che vanno ad influire sulla qualità; oppure gli avviamenti dopo una riparazione periodica e dopo un lungo periodo di fermo che invece sono definiti come tempi persi nel calcolo della disponibilità; oppure gli avviamenti dopo le pause pranzo o dopo i giorni di chiusura dell'impianto che sono classificate come perdite di velocità che vanno ad influire sull'efficienza delle prestazioni.

Per calcolare l'indice OEE ci si è basato su una raccolta dati di quattro mesi consecutivi di assemblaggio di TBUs (tabella 5), queste informazioni sono state raccolte dal software della macchina automatica che registra in tempo reale il tempo ciclo e lo confronta con quello ideale.

I valori di scheduled hours sono valutati durante la fase di pianificazione e vengono segnati manualmente dall'operatore sul software della macchina; mentre i valori di manutenzione programmata sono misurati dall'addetto alla linea che calcola il tempo che si impiega ad eseguire la manutenzione della macchina e lo inserisce all'interno del software.

I tempi che invece fanno riferimento alle fermate non programmate sono quelle dove la macchina ha un guasto e sono sempre misurati dall'operatore che segna su un foglio per quanto tempo l'assemblaggio si è bloccato e quale è stata la causa di questa fermata; successivamente inserirà queste informazioni sul software della macchina.

Per calcolare il tempo di set up invece l'operatore inserisce sul software della macchina il tempo che ha impiegato per eseguire il resetting, il cambio del grasso e lo spurgo, l'attesa del materiale per poter iniziare l'assemblaggio, l'attesa del colludo, ossia il tempo che si impiega a collaudare la macchina con i nuovi set-up, e infine il tempo perso per la mancanza dell'operatore.

Invece per quanto riguarda i valori che sono riferiti alle regolazioni e alle deviazioni del tempo ciclo l'operatore segna ora per ora il numero di pezzi assemblati sul software della macchina che in automatico calcolerà il tempo perso rispetto alla produzione ideale.

Successivamente dopo che è stato calcolato il tempo perso gli operatori segneranno quanto è dovuto alle regolazioni che sono state eseguite sulla macchina, ossia se tutte le volte che gli operatori sono costretti a cambiare i valori di alcune quote in certe stazioni come ad esempio quella del calcolo del gioco assiale o la misurazione dello spessore degli anelli interni.

Il tempo che non è stato assegnato alle regolazioni, viene considerato deviazione tempo ciclo ossia tutte le volte che la macchina non riesce a rispettare il tempo ciclo ideale e ci impiega di

più ad assemblare un cuscinetto; quando viene derivato questo valore l'operatore dovrà anche spiegare perché una delle stazioni presenti nella macchina ha impiegato più tempo ad eseguire le proprie operazioni.

Infine i valori di prodotti buoni e scarti sono segnati dall'operatore sul software della macchina, dove indicherà il numero di cuscinetti che sono stati assemblati e quali sono stati scartati perché non conforme; inoltre le TBUs che devono essere rilavorate se si riescono a raggiungere la conformità richiesta verranno considerate come pezzi buoni altrimenti sono considerati come scarti.

MESE	SCHEDULED HOURS	Manutenzione programmata (h)	Fermata non programmata (h)	Resetting (h)	Cambio grasso e spurgo (h)	Attesa materiale (h)	Attesa collaudo (h)	Mancanza Operatore (h)	Availability Hours	Availability Rate	Regolazioni (h)	Deviazione tempo ciclo (h)	Performance equivalent Hours	Prodotti buoni	Scarti	Performance Rate	Quality Rate	OEE
1	237,3	4,3	8,8	21,0	2,3	8,0	3,1	34,9	159,23	68,34%	4,5	73,8	80,97	2268	1	50,89%	99,96%	34,77%
2	318,7	15,8	17,8	31,4	2,5	20,7	5,2	62,6	178,42	58,92%	11,3	82,7	84,44	2354	10	47,32%	99,58%	27,76%
3	326,5	3,5	15,7	36,0	1,1	20,1	4,0	37,7	211,94	64,91%	26,2	95,5	90,32	2528	1	42,62%	99,96%	27,65%
4	284,8	6,7	8,0	31,8	1,5	17,2	0,7	38,4	187,14	65,70%	11,0	72,0	104,23	2919	0	55,71%	100,00%	36,60%

Tabella 5 – tabella per il calcolo dell'OEE.

L'indice OEE è stato calcolato in questo modo per quattro mesi consecutivi:

Per prima cosa si è calcolato il valore dell'availability rate, basandosi sulla formula sviluppata da Nakajima nel 1988, dove si fa il rapporto tra il tempo operativo attuale e il tempo operativo pianificato, ciò che distingue questo metodo dagli altri è che il tempi dedicati alla manutenzione preventiva o programmata, non sono considerati come tempi persi.

$$A = \frac{\text{Tempo operativo attuale}}{\text{Tempo operativo pianificato}} = \frac{\text{Tempo operativo pianificato} - \text{Guasti} - \text{Setup}}{\text{Tempo totale pianificato} - \text{Fermate pianificate}}$$

I tempi di gusto sono rappresentati dalla fermata non programmata mentre quelli di set up sono suddivisi in resetting, cambio grasso e spurgo, attesa materiale, attesa collaudo e la mancanza dell'operatore.

MESE	SCHEDULED HOURS	Manutenzione programmata (h)	Fermata non programmata (h)	Resetting (h)	Cambio grasso e spurgo (h)	Attesa materiale (h)	Attesa collaudo (h)	Mancanza Operatore (h)	Availability Hours	Availability Rate
1	237,33	4,34	8,819	20,99	2,311	8,024	3,07	34,885	159,23	68,34%
2	318,66	15,84	17,76	31,441	2,5	20,724	5,2	62,613	178,42	58,92%
3	326,5	3,5	15,714	36,03	1,08	20,06	4	37,679	211,94	64,91%
4	284,83	6,67	8,039	31,81	1,49	17,209	0,704	38,439	187,14	65,70%

Tabella 6 – calcolo dell’availability rate.

La tabella sovrastante (tabella 6) presenta come viene calcolato il valore dell’availability rate basandosi sui dati di quattro mesi consecutivi.

Successivamente si calcolato il secondo sottoindicatore il performance rate che è il rapporto tra il tempo realmente assegnato alla produzione e il tempo realmente disponibile per la produzione ed è possibile calcolarlo in termini di tempi persi.

$$P = \frac{\text{Performance hours}}{\text{Availability hours}}$$

Il valore della performance hours viene calcolato invece :

$$\text{Performance hours} = \text{Availability hours} - \text{regolazioni} - \text{deviezioni tempo ciclo}$$

Nella tabella sottostante (tabella 7) viene mostrato come viene calcolato il valore del performance rate

Availability Hours	Regolazioni (h)	Deviazione tempo ciclo (h)	Performance Hours	Performance Rate
159,23	4,5	73,765	80,97	50,89%
178,42	11,261	82,726	84,44	47,32%
211,94	26,15	95,47	90,32	42,62%
187,14	10,951	71,961	104,23	55,71%

Tabella 7 – calcolo del performance rate.

Poi si è calcolato il valore del Quality rate che è definito come il rapporto tra la produzione totale conforme alle specifiche e la produzione totale.

$$\text{Quality rate} = \frac{\text{Prodotti buoni}}{\text{Prodotti totali}}$$

Nella tabella sottostante (tabella 8) viene presentato, il valore del quality rate in quattro mesi consecutivi.

Prodotti buoni	Scarti	Quality Rate
2268	1	99,96%
2354	10	99,58%
2528	1	99,96%
2919	0	100,00%

Tabella 8 – calcolo del quality rate.

Infine dopo aver calcolato i tre sottoindicatori, viene calcolato il valore dell'OEE come il rapporto dei tre indici (tabella 9).

$$OEE = Availability\ rate * Performance\ rate * Quality\ rate$$

Availability Rate	Performance Rate	Quality Rate	OEE
68,34%	50,85%	99,96%	34,74%
58,92%	47,32%	99,58%	27,76%
65,62%	42,62%	99,96%	27,95%
67,28%	55,69%	100,00%	37,47%

Tabella 9 – Calcolo dell'OEE.

Come si può vedere dalla tabella 9 il valore dell'OEE è fortemente penalizzato del performance rate che è il sottoindicatore con la percentuale più bassa, ma anche l'availability rate non è molto alto.

Analizzando l'availability rate possiamo vedere come mediamente le fermate programmate incidano del 6,2% sul totale delle fermate della macchina, mentre quelle non programmate sono influenzate da diversi fattori mostrati nella tabella sottostante (Grafico 6).

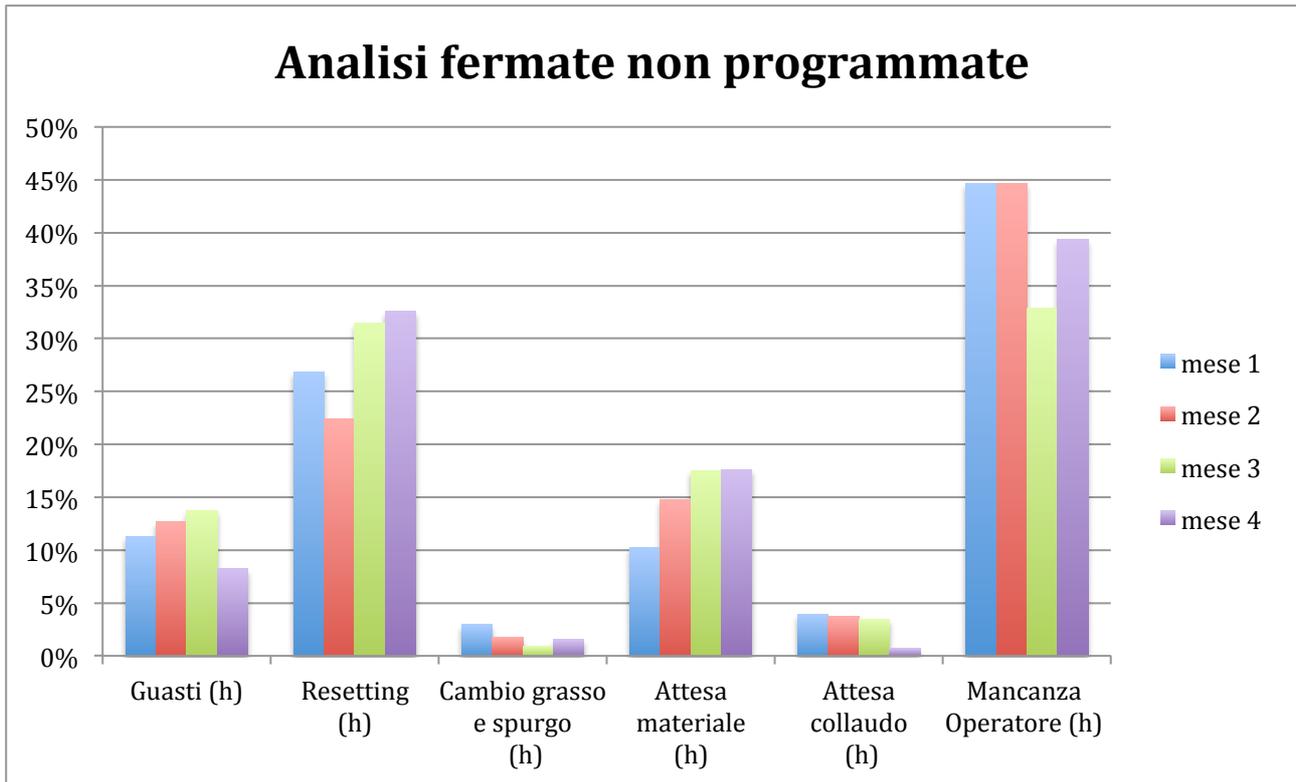


Grafico 6 – analisi delle fermate non programmate.

Si può facilmente vedere che la causa principale delle fermate non programmate sia la mancanza dell'operatore, seguita dal resetting della macchina, mentre l'attesa materiale e guasti hanno un'incidenza simile, infine cambio grasso, spurgo e attesa collaudo hanno una bassa influenza.

Analizzando invece il performance rate si è notato che complessivamente la macchina ha una performance complessivamente del 49%, la perdita è causata principalmente dalle deviazioni dal tempo ciclo (86%) e in minor parte dalle regolazioni (14%) come si può evidenziare dal grafico a torta sottostante (grafico 7).

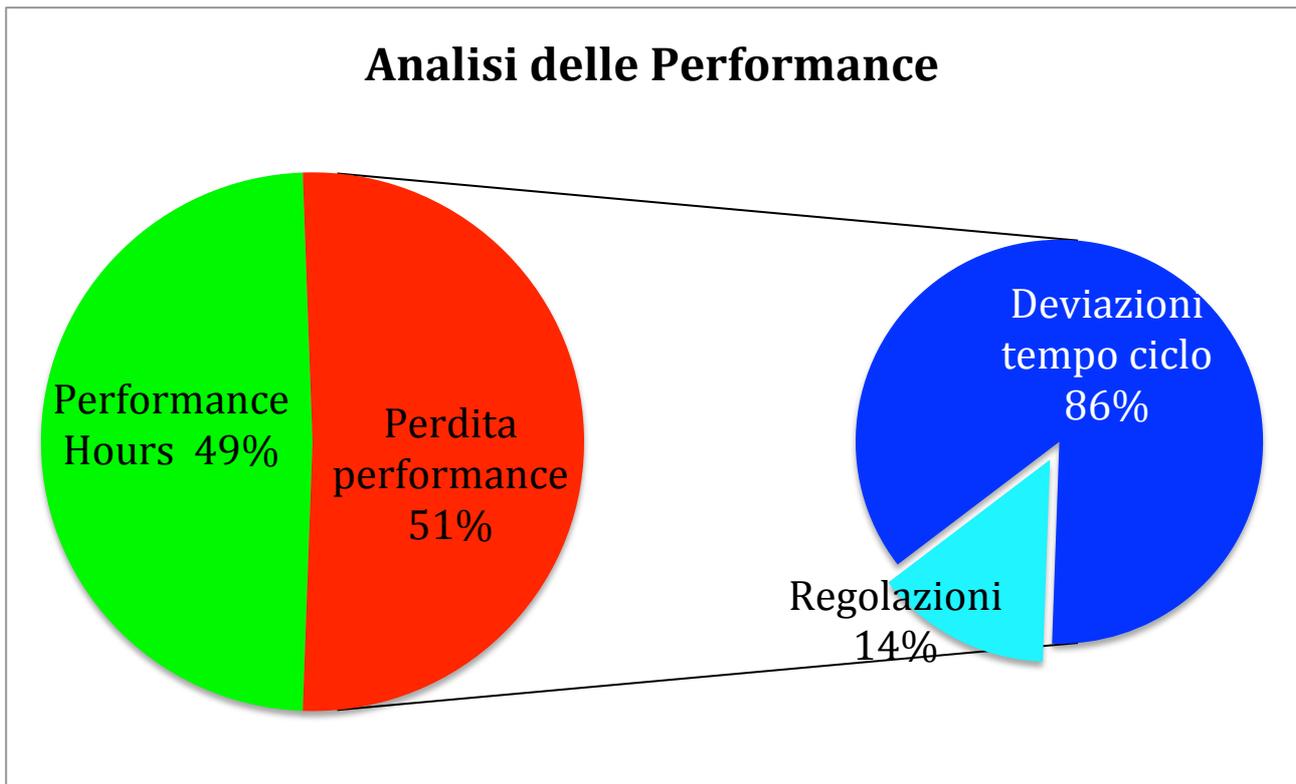


Grafico 7 – analisi delle performance.

3.1.3 Confronto linea automatica, semiautomatica e manuale.

Il processo di assemblaggio delle TBUs avviene in tre linee differenti: automatica, semiautomatica e manuale a seconda delle necessità, della disponibilità dei componenti presenti in azienda e della schedulazione fatta per rispettare le date di consegna al cliente.

Non tutte le tipologie possono essere assemblate su tutte e tre le linee, infatti sulla manuale viene montata prevalentemente la TBU destinata ai treni per l'alta velocità, poiché richiedono una maggiore attenzione durante l'assemblaggio a causa delle condizioni a cui sarà sottoposto il cuscinetto durante il servizio.

La linea semiautomatica, invece, è la linea più versatile perché la maggioranza delle tipologie possono essere montate ed è quella più vecchia delle tre, mentre l'automatica è la più recente di tutte e per far sì che ci sia una produzione più lineare si è deciso di far passare solo delle tipologie.

La linea manuale di assemblaggio ha le diverse stazioni messe una in fila all'altra e di solito ci lavorano uno o massimo due operatori alla volta e le operazioni sono tutte manuali perché sono gli operatori a svolgere tutte le operazioni.

Nella prima parte della linea (figura 17) gli operatori prendono i pallet e i box dei componenti che devono essere assemblati e li mettono vicino alle stazioni, soltanto dopo aver controllato che i seriali corrispondano a quelli necessari all'assemblaggio di quella specifica TBU.



Figura 17 – prima parte della linea manuale.

Dopo aver eseguito il primo controllo visivo dei box e dei pallet, l'operatore preleverà una gabbia alla volta e inserirà a mano ogni rullo nella feritoia fino a quando non saranno inseriti tutti nella corretta posizione, successivamente prenderà l'anello interno ed effettuerà un controllo visivo sul pezzo per verificare la presenza di difetti oppure per vedere se è conforme e può essere inserito all'interno della gabbia.

In seguito l'operatore assemblerà il roller-set spingendo con moderata forza l'anello interno dentro la gabbia e lo ruoterà per assestarlo, dopo di che inserirà i seriali degli anelli interni sul software di tracciabilità dei dati.

Una volta montati due roller-set, verrà preso l'anello esterno dal pallet vicino alla stazione e verrà eseguito un controllo visivo per verificare la presenza di difetti e giudicare la sua conformità con le aspettative, se il pezzo è conforme verranno inseriti i seriali sul software di tracciabilità dei dati e in seguito l'operatore assemblerà manualmente il cuscinetto inserendo i due roller-set all'interno dell'anello esterno.

L'operazione successiva è quella del gioco assiale, in questa stazione l'operatore inserirà il cuscinetto in un macchinario che per prima cosa eseguirà un rodaggio del pezzo, dove una campana scende fino ad entrare in contatto con il cuscinetto e inizia a far ruotare l'anello interno e mentre lo fa inserisce una certa quantità predeterminata di liquido di rodaggio.

Questa operazione è necessaria perché serve a pulire le piste da eventuali eccessi di fosfatazioni e per il controllo visivo successivo dove si ispezionano le sedi di rotolamento per

verificare la presenza dei bolli, graffi o segni di sfregamento e se durante l'ispezione viene rilevata una non conformità il pezzo viene scartato.

Dopo aver effettuato il rodaggio, la macchina misurerà il distanziale necessario da dover inserire all'interno del cuscinetto grazie a una campana che entrando in contatto con il cuscinetto riuscirà a rilevare la distanza presente tra i due anelli interni e da questa misura toglie il valore del gioco assiale previsto in progettazione per quella specifica TBU, così da derivare lo spessore del distanziale necessario per raggiungere la quota progettata.

Derivato il valore dello spessore del distanziale, l'operatore lo preleva dal pallet e esegue delle ispezioni visive e dimensionali per controllare se il pezzo è conforme e dopo aver eseguito questi controlli lo inserisce all'interno del cuscinetto, che sarà in seguito riposizionato all'interno del macchinario che verificherà se la quota del gioco assiale è nelle tolleranze previste in progettazione per quella specifica TBU.

Se il valore del gioco assiale non è nelle tolleranze, l'operatore toglierà il cuscinetto dal macchinario e preleverà il distanziale all'interno, siccome il suo spessore è errato, e lo cambierà con un altro che ha un'altezza diversa da quello precedente e in seguito verificherà nuovamente il gioco assiale per controllare se è nelle tolleranze.

Se il cuscinetto ha il gioco assiale nelle tolleranze, il pezzo può passare alla fase successiva dove l'operatore inserirà manualmente, attraverso un tubicino, il grasso all'interno della TBU (figura 18); questa operazione si suddivide in tre parti.



Figura 18 – stazione di ingrassaggio della TBU.

La prima parte consiste nel ingrassare i due roller-set, per fare questa operazione l'operatore toglierà il cono dal cuscinetto e inserirà il grasso sulle piste dell'anello esterno e tra i rulli presenti nel roller-set, durante questa operazione si cercherà di mettere il grasso in modo più uniforme possibile su ogni superficie e inoltre verrà cosparso anche sul distanziale.

Questa operazione viene svolta su entrambi i roller-set e le sedi di rotolamento dell'anello esterno, dopo aver ingrassato il cuscinetto l'operatore ruoterà l'anello interno in modo tale da cospargere il grasso su tutta la TBU.

Dopo aver ingrassato la TBU quest'ultima verrà pesata su una bilancia e se il peso è conforme alle tolleranze il pezzo potrà passare alle stazioni successive dove l'operatore assemblerà gli ultimi componenti ossia i seal e i backing ring.

Nell'ultima parte della linea (figura 19) l'operatore dopo aver controllato la conformità e che non presentino dei danneggiamenti inserirà il seal sopra il cuscinetto in seguito posizionerà la TBU sotto una campana, dove l'addetto, attraverso una manopola, la farà scendere fino a farla entrare in contatto con il seal e imprimerà una certa pressione affinché possa incastrarsi dentro il cuscinetto.



Figura 19 – ultima parte della linea manuale dove sono presenti le campane per assemblare il seal.

Una volta assemblato il seal su un lato della TBU verrà svolta la stessa operazione sull'altro lato; successivamente l'operatore concluderà l'assemblaggio montando gli ultimi componenti previsti da quella tipologia di TBU, come ad esempio il backing ring e l'end cap, e inoltre inserirà un cartoncino all'interno del cuscinetto e lo regetterà prima di inserirlo dentro il box.

Una volta inserito il numero corretto di TBU nel box, l'operatore caricherà sul software di tracciabilità il numero del box che sta per chiudere e dopodiché inserirà, se la tipologia lo richiede, dei documenti aggiuntivi dove sono scritti i dati del peso o del gioco assiale di ogni TBU e infine spedirà il box.

La linea semiautomatica ha anche lei le stazioni una in fila all'altra ma ci sono quattro o cinque operatori che lavorano sulla linea contemporaneamente e come nella linea automatica e manuale le prime operazioni che devono essere svolte sono il set up della macchina per la tipologia di TBU che si dovrà montare e la verifica dei seriali dei pallet e box di componenti che servono per l'assemblaggio.

Questa linea ha molte operazioni che sono simili a quella automatica in quanto l'operatore, dopo aver eseguito un'ispezione visiva sulla conformità dei componenti, si occuperà di alimentare la linea nella prima parte inserendo le gabbie, gli anelli esterni ed interni e i rulli dentro la macchina (figura 20 e 21).

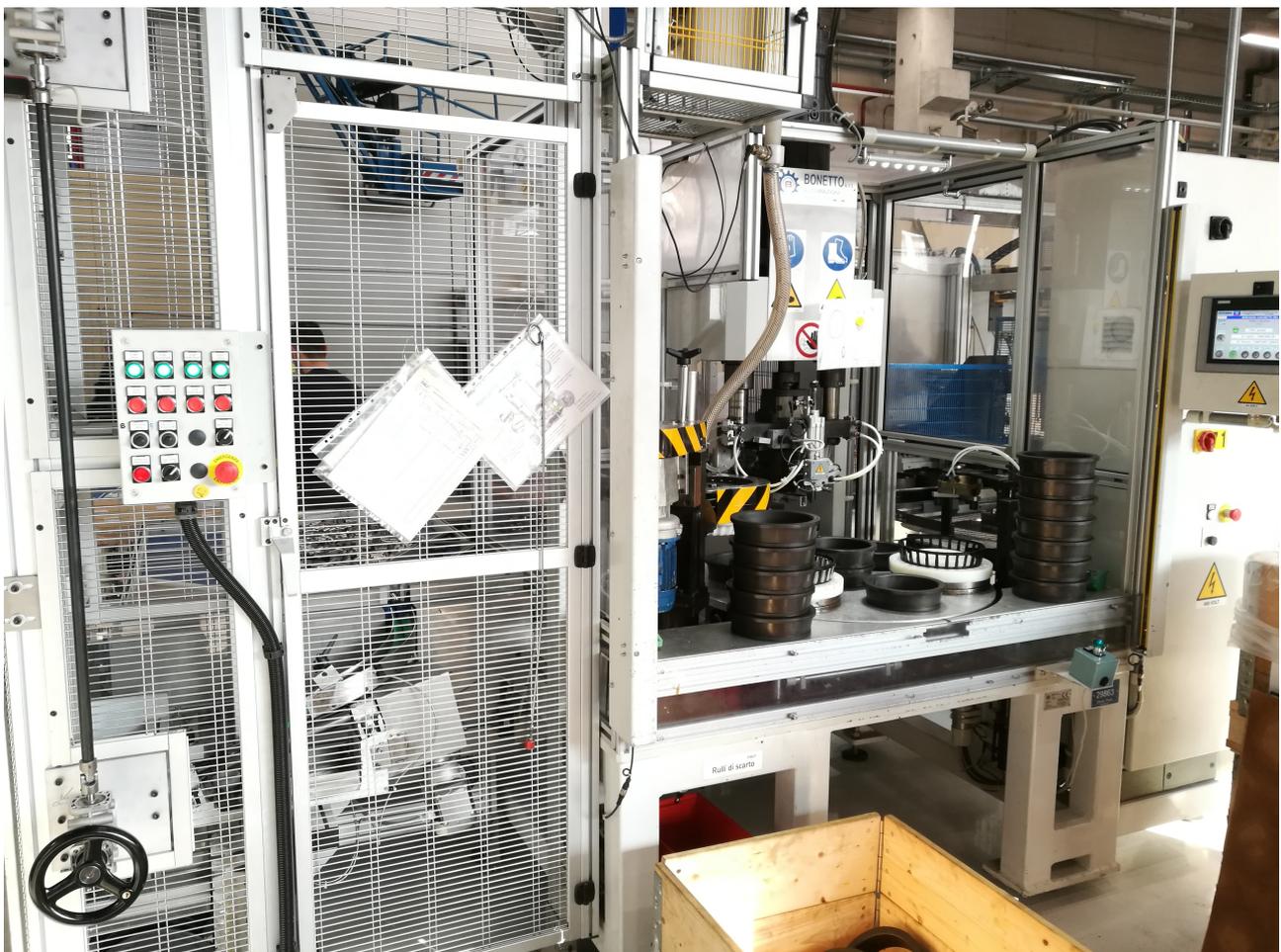


Figura 20 – postazione dove viene assemblato il roller-set.

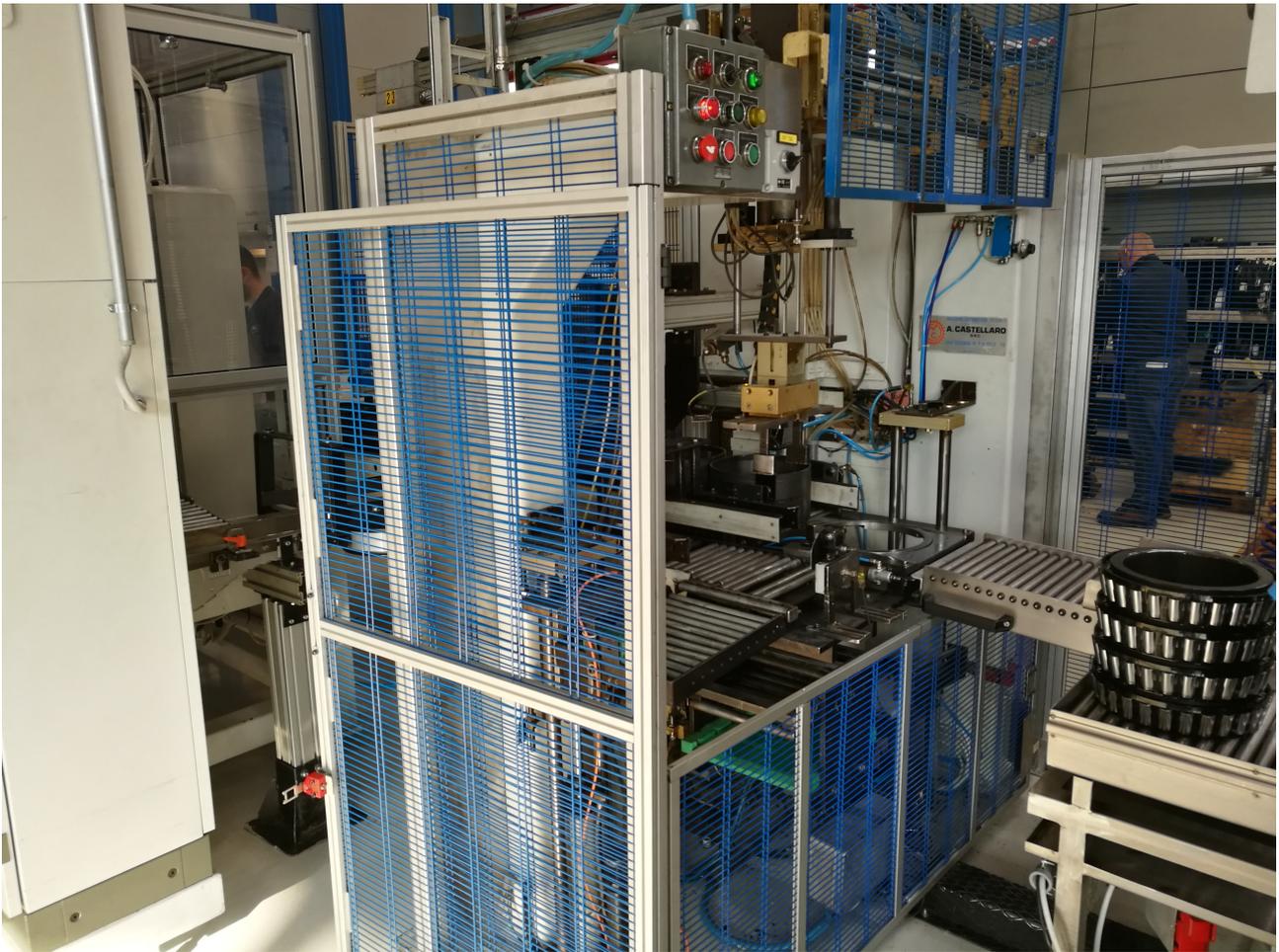


Figura 21 – stazione di assemblaggio del cuscinetto.

Dopo aver alimentato la macchina, una pinza robot inserirà i rulli all'interno della gabbia, finita questa operazione la pedana ruoterà e un braccio robotico inserirà gli anelli interni nella gabbia e infine verrà assemblato il roller-set grazie a una campana che scenderà automaticamente fino a pressare l'anello interno dentro la gabbia.

Una volta assemblato il roller-set, quest'ultimo andrà su una rulliera che porterà il pezzo vicino all'anello esterno e una volta in postazione una pinza robot lo inserirà dentro il cuscinetto sul lato superiore, mentre per il lato inferiore dopo aver capovolto il roller-set sarà inserito all'interno del cuscinetto.

Una volta assemblato il cuscinetto, sarà posizionato su una rulliera che porterà il pezzo nella stazione del gioco assiale (figura 22), dove come nelle altre linee, per prima cosa si eseguirà il rodaggio del pezzo.

Questa operazione viene effettuata tramite una campana che scende fino ad entrare in contatto con l'anello interno e inizia a farlo ruotare e nel frattempo viene inserito del liquido all'interno del cuscinetto (figura 23).



Figura 22 – stazione del gioco assiale della linea semiautomatica.



Figura 23- stazione del gioco assiale

Durante il rodaggio viene anche misurato lo spessore del distanziale necessario da inserire per poter raggiungere la quota prevista per il gioco assiale di quella specifica TBU; successivamente l'operatore preleva il distanziale, da una delle canaline presenti vicino alla linea, con la misura corretta e lo inserisce all'interno del cuscinetto.

L'operatore dopo aver inserito il distanziale nel cuscinetto, attiverà di nuovo la macchina che farà scendere la campana fino ad entrare in contatto con il cuscinetto e misurerà il gioco assiale e se la quota è in tolleranza allora potrà procedere alla stazione successiva altrimenti l'operatore dovrà cambiare il distanziale con un altro con uno spessore diverso.

Dopo la stazione del gioco assiale il cuscinetto viene posizionato su una rulliera che lo porta nell'ultima parte della linea dove ci sono quattro stazioni in cui il cuscinetto verrà ingrassato e poi saranno assemblati i seal prima su un lato poi sull'altro (figura 24).

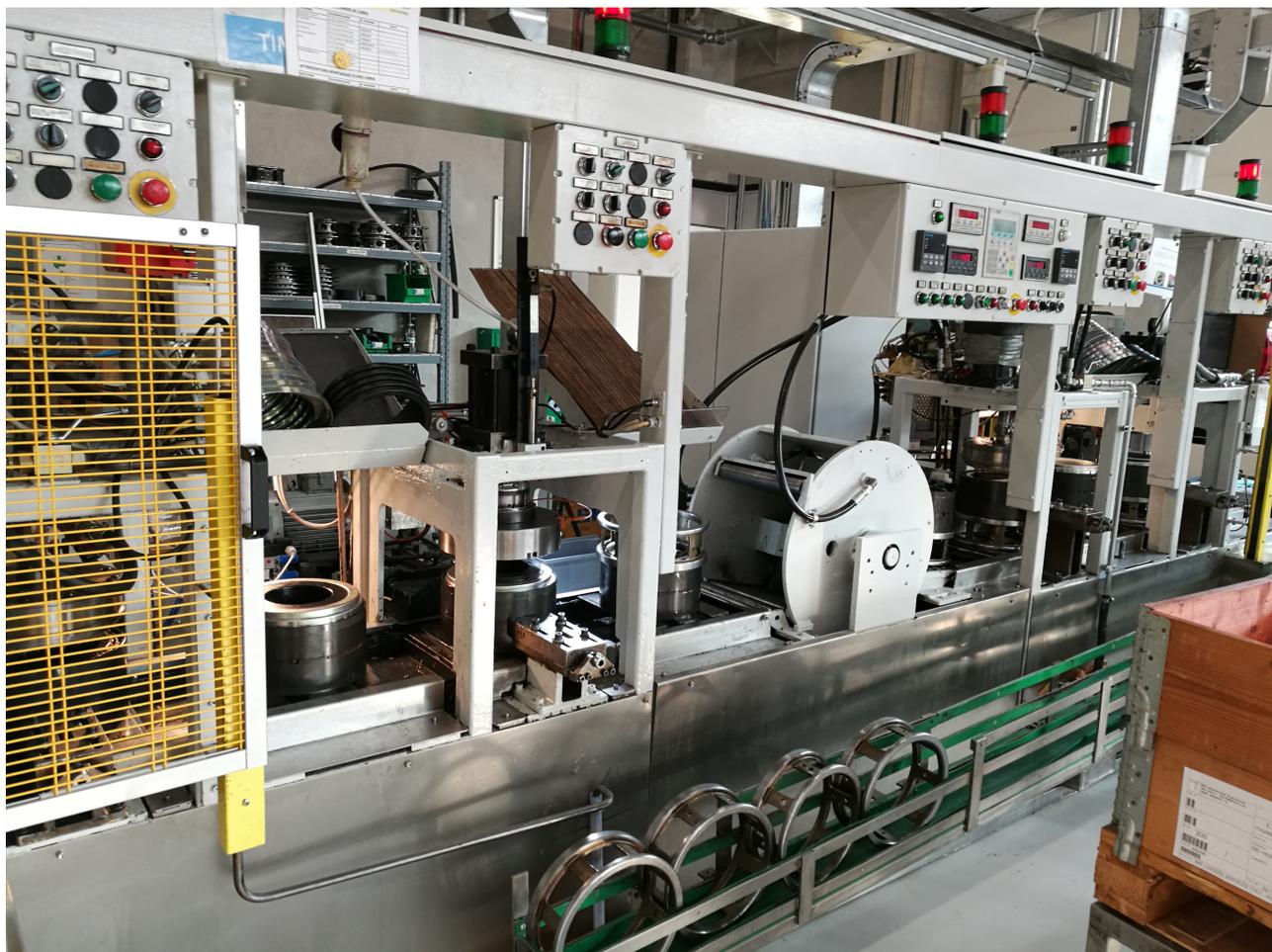


Figura 24 – stazione dove viene assemblato il seal sul cuscinetto.

Questa parte della linea è diversa dalle altre perché l'operatore deve schiacciare un pulsante per far azionare la macchina che contemporaneamente svolgerà le operazioni di ingrassaggio e di assemblaggio su entrambi i lati e capovolgerà il cuscinetto.

Infatti, l'operatore prima di azionare la macchina posizionerà i seal sopra il cuscinetto in entrambe le stazioni prima della pressa e inserirà anche il cartoncino e un piedistallo nella postazione precedente a quella del capovolgimento della TBU.

Le operazioni di ingrassaggio sono simili a quella della linea automatica in quanto prima una pinza robot toglie il roller-set in modo che un tubicino possa ingrassare il centro della TBU, in seguito viene reinserito il cono per poterlo ingrassare tramite una campana che scende fino ad entrare in contatto con il cuscinetto.

Le operazioni di pressaggio funzionano nello stesso modo della linea automatica con l'unica differenza che l'orientamento dei seal, se è necessario, viene fatto dall'operatore che deve essere molto attento a come posiziona i componenti sopra il cuscinetto per evitare che durante la pressa non si vengano a creare dei trucioli.

Nella parte finale dell'assemblaggio del cuscinetto le operazioni che l'addetto deve svolgere sono identiche a quelle delle altre linee, infatti bisognerà montare manualmente il backing-ring e l'end cap sulla TBU, in seguito verrà regettata e inserita dentro il box per poterlo poi chiudere e spedire, solo dopo aver caricato sul software di tracciabilità i seriali dell'esterno o dopo aver allegato nel box i documenti richiesti dalla specifica tipologia.

La linea automatica è quella più recente e secondo le aspettative aziendale dovrebbe avere una produttività pari o superiore a quella semiautomatica, ma nella realtà ha una produzione di 28 pezzi l'ora in confronto ai 45 pezzi dell'altra linea.

Questa differenza può essere causata dai grossi problemi che ha dato il riconoscimento dei caratteri presenti sugli anelli esterni ed interni, sull'orientamento del seal e infine nella stazione del gioco assiale quando si esaurisce una classe di distanziali.

Quest'ultimo problema è molto rilevante ed è quello che realmente distingue la linea automatica da quella semiautomatica, perché la macchina non avendo il distanziale con il corretto spessore o si blocca e non manda avanti il pezzo, mentre se dovesse succedere su quella semiautomatica gli addetti macchina possono provare i distanziali delle classi adiacenti per raggiungere il corretto gioco assiale.

Inoltre nella linea semiautomatica se un cuscinetto non riesce ad avere il corretto gioco assiale per l'assenza di una determinata classe di distanziali, si può mettere da parte quel cuscinetto e si può andare avanti nell'assemblaggio delle altre TBU, aspettando che arrivino i nuovi distanziali, cosa che con la linea automatica non si può fare.

La linea manuale è quella con la produttività più bassa con 4 pezzi l'ora e questo è facilmente spiegabile dal fatto che è l'operatore a dover effettuare la maggior parte delle operazioni ed inoltre in questa linea si eseguono maggiori controlli visivi sui pezzi e dove solitamente i clienti eseguono delle ispezioni.

I problemi che possono avere le TBUs assemblate sono molto simili tra la linea automatica e semiautomatica, anche se quest'ultima è quella che riscontra più difficoltà nel riconoscimento delle non conformità.

Questa differenza tra le due linee è anche spiegabile dal fatto che in quella automatica molti delle verifiche sono svolte dalla macchina e riesce ad avere un'affidabilità maggiore dei controlli che possono svolgere gli operatori; inoltre bisogna tenere in considerazione che i controlli finali che vengono svolti dagli operatori sulle due linee sono pressoché identici.

3.1.4 Principali difetti di una TBU.

Se viene montato sull'assile del treno un cuscinetto danneggiato o non conforme, durante l'esercizio i primi segnali che si manifestano è il surriscaldamento, un aumento del rumore e

delle vibrazioni della TBU e se non si dovesse intervenire per sostituire o revisionare il pezzo si potrebbe avere un bloccaggio del cuscinetto e un suo possibile cedimento oppure la rottura dell'assile e ciò potrebbe causare il deragliamento del treno.

I principali difetti che si possono riscontrare su una TBU sono:

- Usura.

È il fenomeno che avviene quando due superfici striscianti sono a contatto e si verifica un'asportazione di materiale con conseguente diminuzione delle dimensioni delle parti usurate la cui superficie appare abrasa, ciò è più evidente nei componenti di minore durezza (figura 25).

La causa principale è la presenza di particelle abrasive che possono essere già presenti nel cuscinetto o che sono state introdotte nella fase di montaggio o a causa dell'utilizzo di un grasso contaminato oppure dal cattivo assemblaggio dei seal, che dovrebbero evitare che agenti esterni entrino nel cuscinetto, in aggiunta a queste possibili cause bisogna anche considerare le particelle di usura che si vengono a creare.

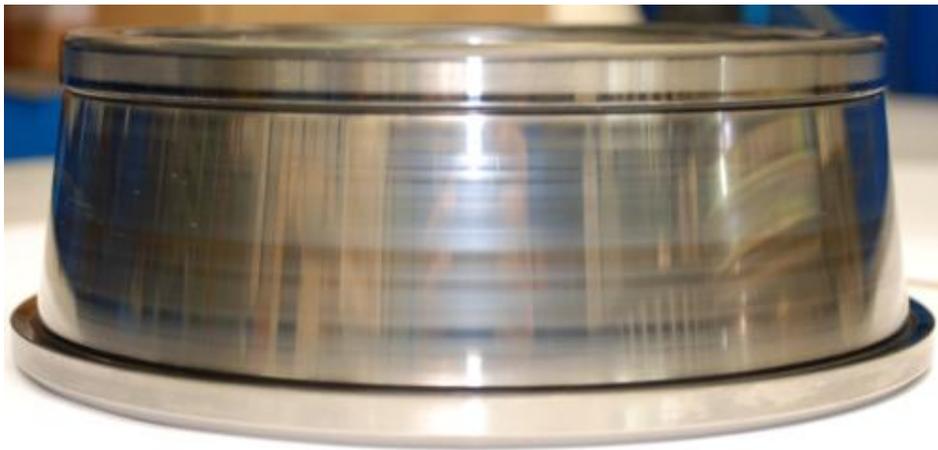


Figura 25 – usura sulle sedi di rotolamento di un anello interno.

- Corrosione.

È il risultato dell'aggressione chimica di fattori ambientali come ad esempio acqua, ossigeno e aria o di fluidi corrosivi che sono penetrati nel cuscinetto a causa di seals danneggiati, usurati o inadeguati; la superficie aggredita da questi agenti presenta segni di usura, ossidazione e ruggine (figura 26).



Figura 26 – corrosione della sede di rotolamento dell’anello interno causato dalla presenza di acqua nel lubrificante.

- Flaking.

È il distacco di frammenti di metallo dalla superficie delle sedi di rotolamento e dei corpi volventi ed è un fenomeno che si verifica quando il cuscinetto comincia a presentare segni di deterioramento per fatica (figura 27 - 28).

Ogni punto delle superfici di contatto, piste e corpi volventi, è soggetto, ciclicamente, a deformazione per compressione: queste sollecitazioni intermittenti causano col tempo, nel metallo immediatamente al di sotto della superficie, specie in presenza di imperfezioni metallurgiche, delle piccole incrinature che, gradualmente, si estendono fino a raggiungere la superficie.

Il successivo passaggio dei corpi volventi può causare il distacco di frammenti di materiale e creare una sfaldatura che si allarga, fino a rendere inservibile il cuscinetto; questo processo di deterioramento si manifesta con rumorosità e vibrazioni di intensità via via crescente.

Può però anche insorgere precocemente a causa di :

- Una cattiva lubrificazione.
- L’ingresso di corpi estranei nel cuscinetto.
- Detriti.
- Giochi interni insufficienti, conseguenti ad accoppiamento troppo forzato.
- Inserimento errato in una sede conica
- Una differenza di temperatura elevata tra anello interno ed esterno.
- Un fusello ovalizzato.
- Un montaggio errato che genera carico assiale eccessivo.
- Cuscinetto bloccato sul fusello.
- Gioco assiale insufficiente a compensare la dilatazione termica.



Figura 27 – Flaking sulla sede di rotolamento di un anello interno a causa di un carico assiale eccessivo.



Figura 28 – Flaking sulla sede di rotolamento di un anello interno a causa di un cattivo montaggio del roller-set.

- Peeling.

La spellatura (peeling) è un raggruppamento di piccole scalfiture o scheggiature, dell'ordine dei 5/10 μm di profondità, sulle piste o sui corpi volventi, con il tempo può trasformarsi in sfaldatura (figura 29).

Le maggiori cause della creazione di questo fenomeno sono: una superficie dell'altro corpo in contatto eccessivamente rugosa, una lubrificazione carente, la presenza di particelle estranee, ruggine, piccoli detriti.



Figura 29 – Peeling sulle superfici delle sedi di rotolamento di un anello interno.

- Spalling.

La scheggiatura (spalling) è il distacco di schegge di metallo dalla superficie delle piste e dei corpi volventi, è simile alla sfaldatura, con cui spesso viene confusa ma quest'ultima però parte dall'interno, mentre lo spalling parte dalla superficie (figura 30).

Può trattarsi di:

- a. scalfitura in senso assiale in fase di montaggio.
- b. scheggiature sulla flangia e sulle teste dei rulli.
- c. abrasioni sulle piste e sulle superfici dei corpi volventi, nella direzione del moto.

Le cause possono essere: montaggio non corretto, grippaggio a causa di una scarsa lubrificazione sulla superficie di contatto, a seguito di carico o pre-carico eccessivo, o di ingresso di corpi estranei e detriti.



Figura 30 – spalling sul rullo a causa di un errato montaggio.

- Fretting.

L'usura da sfregamento (fretting) si presenta sulle superfici di contatto tra due metalli, fortemente compresse l'una contro l'altra, soggette a scorrimenti alternativi dell'ordine dei μm ; è tipica delle superfici di contatto cuscinetto e fusello, dove si presenta in forma di solcature (figura 31).

I detriti restano nella zona di contatto, accelerando il processo di usura e questo fenomeno può essere innescato da ruggine o aggravato dalla ossidazione dei detriti, in questo caso si parla di corrosione da sfregamento.

Le cause di questo fenomeno sono: interferenza di calettamento insufficiente, sede del cuscinetto o del fusello irregolare, per cattiva lavorazione o per corrosione, micro-movimenti causati da vibrazioni o dalle piccole deformazioni elastiche degli anelli prodotte dal passaggio dei corpi volventi.



Figura 31 – fretting causato dal calettamento sul fusello.

- Denting

La dentellatura o indentatura (denting o indentation) si presenta con delle tacche o incisioni sulle superfici di rotolamento e possono essere di diverso tipo a seconda delle cause che le generano (figura 32).

Se ci sono delle piccole incisioni sulle superfici di rotolamento le cause possono essere ricondotte all'ingresso di particelle solide come ad esempio schegge e piccoli detriti che sono entrate nel cuscinetto durante l'assemblaggio; mentre se ci sono piccoli crateri o cavità sui corpi volventi e sulle piste le cause sono: una contaminazione del lubrificante, granelli di ruggine oppure cattiva lubrificazione.

Se ci sono delle impronte sulle piste di forma ellittica, dovute all'usura, a distanza pari a quella dei corpi volventi o più fitte per sovrapposizione di impronte in tempi successivi, denominato falso brinelling, le cause di questo fenomeno sono dei piccoli strisciamenti dei corpi volventi sulle piste generati da vibrazioni provenienti dall'esterno quando il cuscinetto è fermo, cioè quando non si può creare una pellicola di lubrificante; successivamente durante il funzionamento del cuscinetto le rende più profonde.



Figura 32 – indentatura da particelle contenute nel lubrificante.

- Grippaggio.

Il grippaggio è, spesso, la conseguenza estrema di altri modi di guasto come ad esempio la saldatura tra superfici in movimento relativo è così estesa da bloccarle del tutto, in quanto il surriscaldamento delle parti del cuscinetto le ha rammollite, deformate e fuse, causandone anche il cambiamento di colore (figura 33).

Le cause di questo fenomeno sono: il surriscaldamento dovuto ad una lubrificazione inadeguata, il carico eccessivo, la velocità di rotazione troppo elevata, i giochi interni insufficienti, l'entrata di acqua e detriti, una forte flessione o dei difetti sul fusello.



Figura 33 – grippaggio per mancanza di lubrificazione.

- Cricche o rotture.

Le cricche sono fessurazioni o crepe sugli anelli interni o esterni o sui corpi volventi senza distacco di parti; mentre quando si ha questo distacco, solitamente si parla di rottura del componente (figura 34).

Le principali cause sono: l'eccessiva interferenza, un carico eccessivo o intermittente, uno shock termico da riscaldamento per sfregamento o strisciamento, una geometria della sede di calettamento errata, degli urti in fase di installazione o smontaggio sul fusello, le crepe conseguenti a sfaldatura, l'usura, la smerigliatura, la corrosione da sfregamento o l'indentatura.

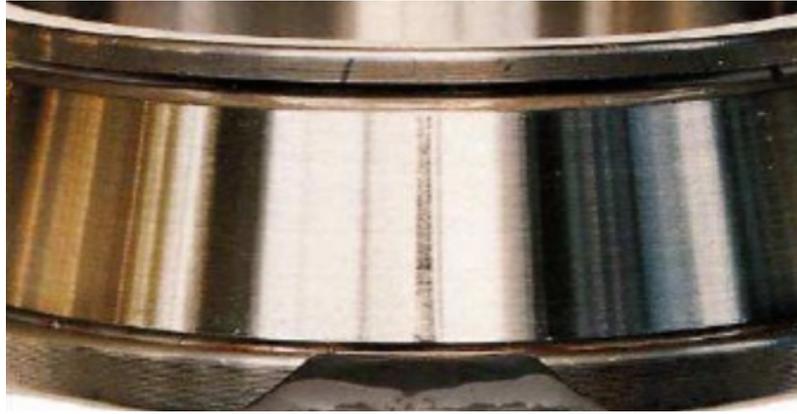


Figura 34 – rottura dell'anello interno a causa di un urto violento in fase di montaggio.

- Danni elettrici.

È il fenomeno che deriva dal passaggio di corrente elettrica attraverso gli elementi del cuscinetto, in particolare tra le piste e i corpi volventi causando nei punti di contatto delle scariche, una bruciatura della pellicola di lubrificante che farà fondere il metallo, creando piccoli crateri (figura 35).

Con correnti tra 0,01 e 0,1 A l'aspetto delle piste, a occhio nudo, è quello della normale fatica, ma la vita del cuscinetto si riduce del 20/80%; correnti dell'ordine dei 0,5 A generano per corrosione elettrica delle ondulazioni o scanalature sulle piste.

La causa principale di questo difetto è la differenza di potenziale elettrico tra i due anelli, è sufficiente una tensione superiore a 0,3 V per cuscinetti a sfere, 0,5 V per quelli a rulli; inoltre una tensione di alta frequenza indotta da strumenti o dispositivi usati vicino al cuscinetto può causare questo difetto.



Figura 35 – scanalature per corrosione elettrica.

- Danni gabbia.

I danni che può subire una gabbia sono (figura 36):

- Deformazioni causate da un errato montaggio, un cattivo stoccaggio della gabbia o per urti che si sono verificati durante il trasporto.
- Rottura della corona o dei tenoni dovuti un montaggio erroneo, un disallineamento, vibrazioni o velocità eccessive, calettamento troppo forzato, grippaggio, usura o la presenza di un corpo estraneo che si è inserito tra gabbia e corpo volvente.

- Usura della gabbia perché è un materiale meno duro rispetto ai corpi volventi ed è causata da una cattiva lubrificazione, dalla presenza di particelle abrasive, dal sovraccarico assiale, forti accelerazioni o decelerazioni.



Figura 36 – rottura dei tenoni della gabbia polimerica.

3.2 PFD

3.2.1 Introduzione.

Il PFD è un utile strumento per l'identificazione degli input, degli output, degli strumenti di controllo, dei possibili stati di errore e dei fattori che creano problemi in un sistema; è anche uno step facoltativo e impegnativo nella realizzazione di un FMEA, ma è molto utile quando l'oggetto sotto analisi è un complesso sistema con molteplici interazioni.

Il team potrà beneficiare di vedere questi elementi visivamente in un modulo scritto, in modo tale da poter comprendere e controllare il sistema in maniera più approfondita e identificare tutti i possibili inputs e sorgenti di variazione che saranno utili successivamente per la stesura dell'FMEA.

Il PFD è una tabella (tabella 6) composta di sei colonne ognuna con un ruolo specifico, dove è analizzato e schematizzato il processo in esame:

Process Step	Process Function Requirement	Product Characteristics (OUTPUT)	Graphical Flow of Operations	Process Characteristic (INPUT)	Sources of Variation

Tabella 6 – PFD

1. Nella prima colonna denominata Process step vengono numerate in modo sequenziale tutte le operazioni presenti nel processo in modo tale da riuscire a capire quali sono le operazioni che vengono prima e dopo e come si scompongono al loro interno.
2. Nella seconda colonna denominata process function requirement sono descritte brevemente le varie operazioni che stiamo analizzando.
3. Nella terza colonna denominata product characteristics sono analizzati gli output dei vari process function requirement, ossia una breve descrizione di ciò che dovrebbe succedere se l'operazione definita nella seconda colonna dovesse verificarsi senza nessun problema o errore.
4. Nella quarta colonna denominata Graphical Flow of Operations è descritto in modo grafico il processo in analisi; sono utilizzati dei disegni specifici per ogni tipologia di operazione (figura 37).



figura 37 – disegni utilizzati nel graphical flow of operations

La prima immagine rappresenta l'inizio o la fine del processo, la seconda uno step del processo, la terza una movimentazione del prodotto da un'operazione all'altra, la quarta una fase di decisione, la quinta un'operazione che subisce il prodotto che può essere sia di assemblaggio che di produzione, la sesta l'input/output di pezzi o componenti e l'ultima invece la documentazione necessaria al prodotto, l'ultima rappresenta un fork/join.

5. Nella quinta colonna denominata process characteristic sono descritti tutti gli input necessari per lo svolgimento e il completamento dell'operazione.
6. Nell'ultima colonna denominata source of variation vengono elencate per ogni input quali possono essere i possibili problemi o errori che possono verificarsi che fanno sì che l'output desiderato non si realizzi in modo corretto e quindi ci sia un fallimento del process function requirement.

Questa tabella è molto importante perché rappresenta la base per la realizzazione del FMEA in quanto molte delle descrizioni e dell'analisi svolte in questa fase preliminare saranno riprese successivamente.

Per compilare la tabella (allegato 1) è necessario inizialmente studiare il processo e riuscire a scrivere un flow diagram, in modo tale da avere un supporto visivo per l'analisi che si deve svolgere.

Durante la stesura del flow diagram, si è deciso di far iniziare il processo con il controllo dell'attrezzatura da inserire nella macchina, mentre le operazioni di verifica dei box o dei pallet dei componenti, che nella realtà sono svolte contemporaneamente, sono state messe prima del caricamento dei pezzi nella macchina e dopo aver esaminato l'attrezzatura.

Questa scelta è stata presa perché il diagramma di processo era più lineare e chiaro e poteva rispecchiare ciò che avviene durante la lavorazione poiché se uno dei box dovesse rimanere vuoto, l'operatore per prima cosa controllerà il seriale dei nuovi pallet che saranno portati vicino alla macchina e successivamente li aprirà per poter prelevare i pezzi e caricarli sulla rulliera.

Un'altra assunzione presa dal team è di considerare le operazioni di verifica peso, spessore, gioco assiale, lettura marcatura e la corretta pressatura dei componenti e seal come decisioni, invece che semplici operazioni.

Questa decisione è stata presa perché in quelle stazioni la macchina controlla determinati parametri in tempo reale e se dovessero rientrare nelle tolleranze prefissate durante il settaggio, il pezzo potrà passare all'operazione successiva, in caso contrario sarà rilavorato o scartato.

Inoltre nella stesura del diagramma di flusso si è deciso di scrivere tutte le operazioni in modo sequenziale anche se nella realtà alcune misurazioni o rilevamenti sono svolti in parallelo, ad esempio le operazioni svolte sull'anello interno, esterno e l'orientamento della gabbia e dei rulli vengono tutte svolte in parallelo dalla macchina mentre il team ha deciso di considerarle in successione.

Anche in questo caso si è scelto di procedere in questo modo per poter rappresentare in modo più lineare e semplice il processo e perché durante la lavorazione si è riscontrato che le operazioni di caricamento degli anelli interni, delle gabbie, dei rulli e degli anelli esterni avvengono maggiormente in questo ordine.

Ci sono inoltre delle operazioni che sono state inserite all'interno del flow chart, anche se sono svolte soltanto all'inizio dell'assemblaggio come ad esempio la realizzazione della ricetta

da caricare sul software, lo spurgo dei tubi dal grasso utilizzato precedentemente e il controllo delle attrezzature da montare sulle stazioni.

Ma ci sono anche certe operazioni come ad esempio l'inserimento del fusto del grasso nella macchina e il caricamento del suo lotto sul software che vengono svolte solamente in due casi o all'inizio dell'assemblaggio o quando il barile del grasso termina e bisogna cambiarlo.

Infatti queste operazioni sono state inserite anche se svolte solo all'inizio o quando si rende necessario cambiare o sostituire uno degli elementi necessari all'assemblaggio, infatti anche il controllo dei box o pallet dei componenti viene fatto solo nella fase iniziale del settaggio oppure quando bisogna sostituire quelli che sono vuoti con quelli pieni.

Dopo aver scritto il diagramma di flusso del processo, si è iniziato con l'analisi di ogni singola stazione e operazione presente nel processo, cercando di denominare ogni singola operazione, specificare quale siano gli input e gli elementi e spiegare quale fosse il corretto esito di ciascuna operazione.

Quando sono state prese in considerazione gli input di ogni operazione si è deciso di elencare gli elementi che potevano maggiormente influenzare l'esito, questa scelta è stata presa perché alcuni fattori erano già stati analizzati in un progetto precedente o perché si scendeva ad un livello di dettaglio troppo elevato.

Solamente dopo aver precisato quale fosse l'output desiderato di ogni operazione, si è pensato alla descrizione delle sources of variation, elencando per ogni input precedentemente individuato quali possono essere dei possibili eventi o cause che fanno sì che l'operazione non dia l'output desiderato.

Per l'individuazione di questi fattori è stato importante anche in questo caso il lavoro in team siccome le persone con esperienze, know how e con funzioni aziendali diverse riscontrano diversi tipi di errori o problemi.

È stato anche molto utile poter interagire con gli operatori che lavorano su quella macchina poiché lavorandoci tutti i giorni e per molto tempo possono vedere o conoscere dei problemi che si sono verificati poche volte oppure come si siano evoluti nel tempo i guasti e inoltre sono i primi che riescono ad identificare una deriva della macchina.

La loro esperienza deriva dal fatto che gli operatori devono fissare i parametri di ogni stazione, alimentare la macchina controllando tutti i componenti, intraprendere le operazioni necessarie ad effettuare il cambio tipo, la manutenzione, risolvere i problemi che potrebbero avvenire durante il normale esercizio e sono l'ultimo controllo sulla conformità del prodotto finito.

Cercando di considerare il parere degli operatori si è deciso che prima della riunione si facessero delle interviste a tutti coloro che hanno lavorato alla macchina, chiedendo di esprimere quello che per loro poteva creare un problema o ciò che è successo in passato.

Alcune voci di sources of variation di certi input non sono stati inseriti nel PFD perché il team non aveva trovato dei potenziali problemi oppure alcuni erano a un livello di dettaglio troppo elevato che non sono stati presi in considerazione, oppure perché durante il processo di assemblaggio alcune variazioni erano già stati analizzate e risolte.

Si è anche notato che in questa fase di scelta delle sources of variation alcune voci sono molto simili per tutte le operazioni presenti in una singola stazione e si è deciso pertanto di ripetere quella voce anche se con un controllo eseguito dall'operatore o dalla macchina, durante il caricamento o il settaggio iniziale, potrebbe risolvere il problema nell'intera stazione.

3.2.2 Analisi delle operazioni.

OP10 Controllo attrezzatura da parte dell'operatore:

Gli operatori controllano che il seriale di ogni attrezzatura, situata sul carrello dal magazziniere, sia quella scritta sulla scheda cambio tipo presente sul server aziendale; su questa scheda è presente una lista di attrezzature da dover montare sulla macchina per poter procedere all'assemblaggio di una determinata tipologia di TBU.

In questa operazione ogni addetto effettua la verifica e se non ci sono discordanze tra i seriali procede al montaggio di questi pezzi sulla macchina; se invece ci dovesse essere una divergenza l'addetto si recherà in magazzino per cambiare la attrezzature.

OP20 Impostazione ricetta sul software della macchina:

L'addetto macchina esegue il set up di tutte le stazioni, scrivendo una nuova ricetta sul software della macchina se la tipologia non è mai stata assemblata sulla linea, mentre se è già stata montata nel passato ci sarà un controllo di quella già esistente, perché bisogna verificare se in progettazione non è stata effettuata alcuna modifica.

In seguito, mentre si fa passare il primo pezzo, gli addetti controlleranno se la ricetta caricata sul software è quella corretta, verificando che l'assemblaggio della TBU avvenga secondo le aspettative e le specifiche, se si riscontrasse qualche non conformità l'operatore modificherà la ricetta.

Questa operazione è molto importante perché una ricetta errata può creare grossi problemi durante l'assemblaggio perché potrebbe danneggiare i componenti o la TBU o la macchina.

OP30.1 Controllo box anello interno da parte dell'operatore:

L'operatore esamina i seriali presenti sull'etichetta affissa all'esterno del box confrontandoli con quelli presenti sulla scheda tecnica, precedentemente scaricata e stampata dal server aziendale.

Questa scheda è molto importante perché ci sono i disegni tecnici della TBU che verrà assemblata, la descrizione e la denominazione aziendale di ogni componente necessario al montaggio, inoltre viene presentato come deve essere impacchettata la TBU e quali documenti devono essere inviati al cliente.

OP30.2 Caricamento anello interno da parte dell'operatore:

Gli addetti macchina prelevano dal box accanto alla stazione un anello interno, lo esaminano verificando se ci sono bolli, graffi o non conformità; se il pezzo è conforme viene posto sulla

canalina che alimenta la stazione lasciando verso l'alto i seriali presenti sulla facciata, altrimenti viene scartato.

La canalina presente vicino alla stazione ha i bordi che sono regolabili a seconda delle dimensioni degli anelli, la regolazione viene svolta dall'operatore che posiziona il pezzo sul nastro e in seguito tramite una leva stringe i bordi fino a farli aderire all'anello interno.

OP30.3 Movimentazione automatica dell'anello interno:

Il braccio robotico preleva il pezzo dalla canalina e lo colloca nella stazione della lettura e misurazione dell'anello interno, questa operazione è svolta in modo autonomo dalla macchina che attraverso una pinza, che viene inserita all'interno del foro dell'anello, si allarga in modo tale da poter tenere saldamente il componente durante la movimentazione.

Questa operazione è molto semplice e raramente da dei problemi, poiché serve solo eseguire un corretto set up della macchina affinché ci sia la corretta presa e deposito dell'anello da una stazione all'altra.

OP30.4 Lettura marcatura:

Questa operazione è una delle più critiche del processo poiché una telecamera rileva i vari caratteri presenti sulla facciata dell'anello una volta che è in postazione; per far sì che la lettura delle marcature sia più facile possibile bisogna far sì che ci sia la corretta intensità e angolazione di luce, che la telecamera non subisca delle vibrazioni e soprattutto che l'anello non sia troppo unto.

Uno degli aspetti più importanti in questa operazione è che i fornitori usino gli stessi font, spaziature e profondità per la marcatura degli anelli altrimenti la macchina scarnerà gli anelli perché non riesce a leggere i vari caratteri.

OP30.5 Misurazione spessore dell'anello interno:

Per eseguire la misurazione dello spessore dell'anello interno viene usata una campana che scende fino ad entrare in contatto con la facciata del pezzo e successivamente una riga ottica misura l'altezza del componente e se è fuori dalle tolleranze per quella tipologia, l'anello verrà scartato.

Ogni 25 pezzi viene svolta una taratura della macchina rilevando lo spessore di un anello, definito master, perché ha le quote che sono certificate da un ente esterno; questo controllo è necessario poiché può succedere che durante il servizio, la riga ottica possa spostarsi e dare delle letture errate.

OP30.6 Fuoriuscita automatica dell'anello interno

Il braccio robotico preleva l'anello interno dalla stazione della misura dello spessore e lettura delle marcature e lo deposita su un nastro trasportatore che lo porta fuori dalla macchina dove l'operatore lo preleverà e lo scarnerà perché non è conforme alle specifiche.

Questa operazione è molto semplice e non da quasi mai problemi, l'unico inconveniente è che se il pezzo non viene tolto dal nastro il processo si ferma quando dovrà scartare un altro anello poiché la stazione è piena.

OP40.1 Controllo box gabbia da parte dell'operatore:

L'operatore esamina i seriali presenti sull'etichetta affissa all'esterno del box confrontandoli con quelli presenti sulla scheda tecnica, precedentemente scaricata e stampata dal server aziendale.

Questa scheda è molto importante perché ci sono i disegni tecnici della TBU che verrà assemblata, la descrizione e la denominazione aziendale di ogni componente necessario al montaggio, inoltre viene presentato come deve essere impacchettata la TBU e quali documenti devono essere inviati al cliente.

OP40.2 Caricamento gabbia da parte dell'operatore:

Gli addetti macchina prelevano dal box accanto alla stazione una gabbia, la esaminano verificando se ci sono graffi, rotture o non conformità; se il pezzo è conforme viene posto sulla canalina che alimenta la stazione posizionando la corona maggiore verso l'alto.

La canalina presente vicino alla stazione ha i bordi che sono regolabili a seconda delle dimensioni delle gabbie, la regolazione viene svolta dall'operatore che posiziona il pezzo sul nastro e in seguito tramite una leva stringe i bordi fino a farli aderire all'anello interno.

OP40.3 Movimentazione e orientamento automatico della gabbia:

Il braccio robotico preleva il pezzo dalla canalina e lo colloca sulla prima pedana nella stazione dell'assemblaggio del roller-set, questa operazione è svolta in modo autonomo dalla macchina che attraverso una pinza, che viene inserita all'interno del foro della gabbia, si allarga in modo tale da poter tenere saldamente il componente durante la movimentazione.

Dopo aver preso il componente, il braccio robotico ruoterà la gabbia per orientarla prima di posizionarla nella stazione successiva; l'orientamento avviene tramite una riga ottica che rileva la presenza di una feritoia, individuando la presenza di due tenoni consecutivi.

Questa operazione è molto delicata perché se non si riesce ad orientare il pezzo, la macchina si blocca e quindi anche il processo di assemblaggio nella prima area; per orientare esattamente il pezzo è necessario settare correttamente la macchina e cercare di non toccare la riga ottica durante il set-up o il resetting perché se no si può spostare e non riuscire più a rilevare correttamente i tenoni.

OP50.1 Controllo box e scatola rulli da parte dell'operatore:

L'operatore esamina i seriali presenti sull'etichetta affissa all'esterno del box, della scatola confrontandoli con quelli presenti sulla scheda tecnica, precedentemente scaricata e stampata dal server aziendale, inoltre si deve effettuare un'ispezione del contenuto del box verificando l'integrità di tutte le scatole.

I seriali sull'etichetta affissa all'esterno del box devono coincidere con tutti quelli presenti nelle scatole, se si dovesse riscontrare una scatola non integra o danneggiata o con un seriale diverso l'operatore deve scartare l'intera scatola perché può causare grossi danni assemblare due tipi di rulli diversi all'interno della gabbia.

OP50.2 Caricamento rulli da parte dell'operatore:

L'operatore svuota con cautela il contenuto della scatola all'interno del cassone per alimentare la macchina, nel caricamento è fondamentale non farlo bruscamente perché c'è il rischio che nella caduta i rulli possano bollarsi o danneggiarsi.

OP50.3 Caricamento lotto sul sistema software:

L'addetto alla macchina inserisce, attraverso il pannello vicino alla stazione, sul software di tracciabilità dei dati i seriali e la sfumatura di ogni lotto di rulli che vengono usati per l'assemblaggio, questa operazione è molto semplice ma anche importante per poter conoscere sempre quali componenti sono stati utilizzati durante l'assemblaggio.

OP50.4 Orientamento automatico rulli:

I rulli vengono orientati uno per volta prima di finire sulla canalina vicino alla stazione, per questa operazione è molto importante settare correttamente la macchina per evitare che i rulli non si posizionino nel corretto modo e che non scivolino all'interno della gabbia.

OP50.5 Inserimento automatico dei rulli nella gabbia:

Un pinza robot preleva un rullo alla volta e lo inserisce nella feritoia della gabbia cercando di posizionarlo in modo più aderente possibile ai tenoni, questa operazione a volte riscontra grosse difficoltà soprattutto quando si aumenta la velocità della movimentazione della pinza.

Infatti a volte la ripetibilità del movimento non è assicurata perché la pinza robot non posiziona in modo corretto il rullo in alcune feritoie della gabbia e questo può creare un grosso problema durante la fase di inserimento dell'anello interno.

OP60.1 Inserimento anello interno nella gabbia:

Il braccio robotico preleva l'anello interno dalla stazione della lettura delle marcature e dello spessore e lo inserisce all'interno della gabbia, per la corretta realizzazione della operazione è molto importante settare correttamente la macchina affinché il componente sia prelevato e depositato nel modo corretto senza far cadere i rulli dalla gabbia.

OP60.2 Assemblaggio roller set:

L'anello interno viene pressato dentro la gabbia in modo tale da formare il roller-set, per eseguire questa operazione una campana scende fino ad entrare in contatto con la facciata dell'anello interno e ruota per assestare correttamente l'anello interno dentro la gabbia

OP70.1 Controllo culla degli anelli esterni dell'operatore:

L'operatore esamina i seriali presenti sull'etichetta affissa sulla culla degli anelli esterni confrontandoli con quelli presenti sulla scheda tecnica, precedentemente scaricata e stampata dal server aziendale, se non ci dovesse essere il corretto riscontro la culla viene tolta e riposta in magazzino.

OP70.2 Caricamento anello esterno da parte dell'operatore:

L'operatore preleva un anello esterno alla volta lo esamina per vedere se ci sono delle non conformità, come ad esempio bolli e graffi, se il pezzo è conforme lo pulisce e lo inserisce sul nastro trasportatore che alimenta la macchina, lasciando il lato B verso l'alto.

La canalina presente vicino alla stazione ha i bordi che sono regolabili a seconda delle dimensioni degli anelli, la regolazione viene svolta dall'operatore che posiziona il pezzo sul nastro e in seguito tramite una leva stringe i bordi fino a farli aderire all'anello interno.

OP70.3 Lettura marcatura anello esterno:

Questa operazione è una delle più critiche del processo poiché una telecamera rileva i vari caratteri presenti sull'anello una volta che è posizionato su una pedana che ruota; per far sì che la lettura delle marcature sia più facile possibile bisogna far sì che ci sia la corretta intensità e angolazione di luce, che la pedana ruoti con la corretta velocità, che la telecamera non subisca delle vibrazioni e soprattutto che l'anello non sia troppo unto.

Uno degli aspetti più importanti in questa operazione è che i fornitori usino gli stessi font, spaziature e profondità per la marcatura degli anelli altrimenti la macchina scarterà gli anelli perché non riesce a leggere i vari caratteri.

Se la macchina non riesce a rilevare i vari caratteri presenti sull'anello, il pezzo verrà scartato e tolto dal processo di assemblaggio.

OP70.4 Verifica presenza fori:

L'anello posizionato sulla pedana inizia a ruotare e una telecamera rileva i fori presenti, affinché questa operazione possa avere successo è necessario che l'anello non sia troppo unto, che ci sia la corretta intensità e angolazione di luce e che la telecamera sia posizionata nel corretto posto e ci sia anche il giusto riferimento.

Se il numero di fori non corrisponde a quanto previsto dalla scheda tecnica e da quanto settato sulla macchina, il pezzo verrà scartato e tolto dal processo di assemblaggio.

OP70.5 Fuoriuscita Anello esterno:

Il braccio robotico preleva l'anello esterno dalla stazione della lettura delle marcature e della presenza dei fori e lo deposita su un nastro trasportatore che lo porta fuori dalla macchina dove l'operatore lo preleverà e lo scarterà perché non è conforme alle specifiche.

Questa operazione è molto semplice e non da quasi mai problemi, l'unico inconveniente è che se il pezzo non viene tolto dal nastro il processo si ferma quando dovrà scartare un altro anello poiché la stazione è piena.

OP80 Movimentazione automatica 1° roller set

Il braccio robotico preleva il pezzo dalla stazione dell'assemblaggio roller-set e lo colloca sul nastro trasportatore che conduce alla stazione del gioco assiale, questa operazione è svolta in modo autonomo dalla macchina che attraverso il braccio robotico inserisce la pinza all'interno del foro dell'anello interno e la apre in modo tale da poter tenere saldamente il componente durante la movimentazione.

Durante la movimentazione il braccio robotico capovolge il roller-set prima di collocarlo sul nastro trasportatore, questa operazione è molto semplice e raramente da dei problemi, poiché serve solo eseguire un corretto set up della macchina affinché ci sia la corretta presa e deposito dell'anello da una stazione all'altra.

OP90.1 Inserimento anello esterno sul 1° roller set

Il braccio robotico preleva l'anello esterno dalla stazione di lettura delle marcature e della presenza dei fori e lo inserisce sopra il roller-set, questa operazione è svolta in modo autonomo dalla macchina che attraverso il braccio robotico inserisce la pinza all'interno del foro dell'anello esterno e la apre in modo tale da poter tenere saldamente il componente durante la movimentazione.

OP90.2 Inserimento 2° roller set nell'anello esterno

Il braccio robotico preleva il secondo roller-set dalla stazione della lettura delle marcature e dello spessore e lo inserisce all'interno dell'anello esterno, per la corretta realizzazione della operazione è molto importante settare correttamente la macchina affinché il componente sia prelevato e depositato nel modo corretto.

OP100 Movimentazione automatica cuscinetto:

Una paletta trascina automaticamente il cuscinetto verso la stazione del gioco assiale, questa operazione è molto semplice e raramente da dei problemi.

OP110.1 Rodaggio Cuscinetto:

La campana della macchina della stazione del gioco assiale scende fino ad entrare in contatto con la facciata dell'anello interno del cuscinetto e inizia a farlo ruotare, inserendo tramite un tubicino un certa quantità di liquido di rodaggio; questa operazione è molto importante perché serve per vedere se il cuscinetto riesce a ruotare, per pulire le piste degli anelli da eventuali eccessi di fosfatazione e infine anche per assestare bene l'anello interno dentro la gabbia.

OP110.2 Calcolo del distanziale:

La campana della macchina della stazione del gioco assiale, dopo aver fatto il rodaggio, ferma la rotazione e misura attraverso una riga ottica la misura dello spessore del distanziale che è necessario inserire nel cuscinetto affinché si raggiunga la corretta quota del gioco assiale.

OP110.3 Caricamento distanziale da parte dell'operatore:

Vicino alla stazione del gioco assiale ci sono venti canaline a cui corrispondono venti range di spessore dei distanziali, che vengono anche chiamati classi; l'operatore quindi preleverà il componente dal box e lo inserirà nella classe corrispondente.

Durante la fase di set up l'operatore sistema la larghezza di ogni canalina e la sua inclinazione e questo serve per far avvicinare i distanziali alla stazione del gioco assiale.

OP110.4 Selezione automatica del distanziale:

La macchina preleva, tramite la pinza robot, il distanziale dalla canalina; per il corretto esito di questa operazione è necessario che ogni componente sia stato inserito nella giusta classe e che durante il settaggio della macchina siano stati esattamente definiti ogni range di spessore per i distanziali.

OP110.5 Movimentazione Distanziale:

La pinza robot sposta il distanziale dalla canalina e lo deposita su una pedana.

OP110.6 Movimentazione Roller set lato B:

La pinza robot, inserendosi all'interno del foro dell'anello interno, preleva il roller-set lato B e lo toglie dal cuscinetto e lo deposita sulla pedana, sopra il distanziale.

OP110.7 Presa roller set lato B e distanziale:

La pinza robot inserendosi all'interno del foro del roller-set e del distanziale, preleva tutte e due i componenti.

OP110.8 Movimentazione Roller set lato B e distanziale:

La pinza robot preleva sia il roller set e il distanziale dalla pedana e lo inserisce all'interno del cuscinetto, per il corretto esito di questa operazione è importante che ci sia stato un corretto settaggio della macchina.

OP110.9 Verifica gioco assiale:

La campana della macchina presente nella stazione del gioco assiale scende fino ad entrare in contatto con la facciata dell'anello interno ed esegue una certa pressione in modo tale che la riga ottica riesca a rilevare la quota del gioco assiale.

In seguito confronta la quota misurata con il valore fissato durante il settaggio e se la cifra rilevata è fuori dalle tolleranze ed è il primo tentativo la macchina selezionerà un altro distanziale, altrimenti scarnerà il cuscinetto.

OP120 Movimentazione automatica cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione del gioco assiale e lo colloca nella stazione della scolatura del liquido di rodaggio, questa operazione è svolta in modo autonomo dalla macchina che attraverso il braccio robotico inserisce la pinza all'interno del foro del

cuscinetto e la apre in modo tale da poter tenere saldamente il pezzo durante la movimentazione.

Questa operazione è molto semplice e raramente da dei problemi, poiché serve solo eseguire un corretto set up della macchina affinché ci sia la corretta presa e deposito del cuscinetto da una stazione all'altra.

OP130.1 Scolatura liquido di rodaggio:

Il cuscinetto viene inclinato fino ad una certa angolazione da una pedana e questa operazione viene svolta per tre volte consecutive in modo tale che il liquido in eccesso all'interno del cuscinetto fuoriesca e viene convogliato verso una condotta di scarico.

OP130.2 Fuoriuscita Cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione della scolatura del liquido di rodaggio e lo deposita nella postazione di scarto cuscinetto, che conduce il pezzo non conforme fuori dalla macchina dove l'operatore lo preleverà e lo scarcerà.

Questa operazione è molto semplice e non da quasi mai problemi, l'unico inconveniente è che se il pezzo non viene tolto dalla postazione il processo si ferma quando dovrà scartare un altro cuscinetto poiché la stazione è piena.

OP140 Movimentazione automatica cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione della scolatura del liquido di rodaggio e lo colloca nella stazione di ingrassaggio del lato B, questa operazione è svolta in modo autonomo dalla macchina che attraverso il braccio robotico inserisce la pinza all'interno del foro del cuscinetto e la apre in modo tale da poter tenere saldamente il pezzo durante la movimentazione.

Questa operazione è molto semplice e raramente da dei problemi, poiché serve solo eseguire un corretto set up della macchina affinché ci sia la corretta presa e deposito del cuscinetto da una stazione all'altra.

OP150.1 Pesatura Cuscinetto:

Il cuscinetto viene pesato e la quota che viene rilevata viene confrontata con il valore che è stato fissato durante il settaggio della macchina, se la cifra dovesse essere fuori le tolleranze il pezzo verrà scartato altrimenti potrà accedere all'operazione successiva.

Per il buon esito di questa operazione è necessario eseguire un corretto settaggio della macchina e una buona manutenzione della macchina per evitare che agenti esterni possano finire sopra la bilancia e alterare la misurazione.

OP150.2 Fuoriuscita cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione dell'ingrassaggio lato B e lo deposita nella postazione di scarto cuscinetto, che conduce il pezzo non conforme fuori dalla macchina dove l'operatore lo preleverà e lo scarcerà.

Questa operazione è molto semplice e non da quasi mai problemi, l'unico inconveniente è che se il pezzo non viene tolto dalla postazione il processo si ferma quando dovrà scartare un altro cuscinetto poiché la stazione è piena.

OP150.3 Caricamento fusto del grasso:

L'operatore prende il fusto di grasso che è stato portato dal magazziniere e lo inserisce all'interno della macchina, questa operazione viene svolta ogni volta che viene eseguito il resetting o quando il precedente fusto è finito e serve rimpiazzarlo con uno nuovo.

OP150.4 Spurgo grasso vecchio dai tubi:

Questa operazione viene eseguita soltanto durante il resetting della macchina, quando è necessario togliere il precedente tipo di grasso, presente nei tubi perché la nuova tipologia di TBU non è stata progettata per essere assemblata con quel specifico grasso.

L'operazione in certi casi è molto difficile da eseguire perché ci sono alcune tipologie di grasso che hanno lo stesso colore e non si riesce a vedere quando il vecchio tipo è totalmente fuoriuscito dai tubi, per ovviare a questo inconveniente si è deciso di eseguire un certo numero di pompate per espellere il grasso tramite le campane che sono posizionate nelle stazioni di ingrassaggio.

OP150.5 Caricamento lotto del grasso sul software:

L'operatore scriverà e caricherà sul sistema software di tracciabilità dei dati il lotto del fusto di grasso che viene utilizzato durante l'assemblaggio; questa operazione viene svolta solamente durante il resetting e quando il fusto caricato nella macchina si esaurisce durante l'assemblaggio e viene sostituito con uno nuovo.

OP150.6 Ingrassaggio lato B:

Il cuscinetto viene posizionato sotto la campana del grasso, che scende fino ad entrare in contatto con la facciata del roller-set e a quel punto inizia l'ingrassaggio con una certa quantità di lubrificante, che viene fissata durante il set up e durante questa operazione la campana farà anche ruotare l'anello interno, in modo tale che venga il grasso venga cosparso in modo uniforme su tutta la sede di rotolamento dei due anelli.

OP150.7 Pesatura Cuscinetto:

Il cuscinetto viene pesato e la quota che viene rilevata viene confrontata con il valore che è stato fissato durante il settaggio della macchina, se la cifra dovesse essere fuori le tolleranze il pezzo verrà scartato altrimenti potrà accedere all'operazione successiva.

Per il buon esito di questa operazione è necessario eseguire un corretto settaggio e una buona manutenzione della macchina per evitare che agenti esterni possano finire sopra la bilancia e alterare la misurazione.

OP150.8 Fuoriuscita cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione dell'ingrassaggio lato B e lo deposita nella postazione di scarto cuscinetto, che conduce il pezzo non conforme fuori dalla macchina dove l'operatore lo preleverà e lo scarterà.

Questa operazione è molto semplice e non da quasi mai problemi, l'unico inconveniente è che se il pezzo non viene tolto dalla postazione il processo si ferma quando dovrà scartare un altro cuscinetto poiché la stazione è piena.

OP160 Movimentazione automatica cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione di ingrassaggio lato B e lo colloca nella stazione di pressaggio seal e componenti sul lato B, questa operazione è svolta in modo autonomo dalla macchina che attraverso il braccio robotico inserisce la pinza all'interno del foro del cuscinetto e la apre in modo tale da poter tenere saldamente il pezzo durante la movimentazione.

Questa operazione è molto semplice e raramente da dei problemi, poiché serve solo eseguire un corretto set up della macchina affinché ci sia la corretta presa e deposito del cuscinetto da una stazione all'altra.

OP170.1 Caricamento componenti lato B da parte dell'operatore:

Gli addetti macchina prelevano dal box accanto alla stazione i componenti che devono essere assemblati sul lato B, li esaminano verificando se ci sono delle non conformità; se il pezzo è conforme viene posto sulla canalina che alimenta la stazione altrimenti viene scartato.

La canalina presente vicino alla stazione ha i bordi che sono regolabili a seconda delle dimensioni degli anelli, la regolazione viene svolta dall'operatore che posiziona il pezzo sul nastro e in seguito tramite una leva stringe i bordi fino a farli aderire all'anello interno.

OP170.2 Posizionamento componenti lato B sul cuscinetto e del tool di centraggio

La pinza robot preleva dal nastro trasportatore il componente e lo posiziona sopra il cuscinetto successivamente viene collocato anche il tool di centraggio, che è uno strumento molto utile per il buon esito di questa operazione perché permette il corretto centraggio del componente e del seal.

OP170.3 Timbratura seal:

L'operatore preleva il seal dal box vicino alla linea e attraverso la timbratrice marca la superficie del pezzo per segnare il seriale della TBU; questa operazione viene eseguita per agevolare il riconoscimento del cuscinetto, da parte degli ispettori, una volta che è stato montato sull'assile.

OP170.4 Caricamento seal da parte dell'operatore:

Gli addetti macchina prelevano i seals dalla timbratrice e li esamina verificando se ci sono delle non conformità; se il pezzo è conforme viene posto sulla canalina che alimenta la stazione altrimenti viene scartato.

La canalina presente vicino alla stazione ha i bordi che sono regolabili a seconda delle dimensioni degli anelli, la regolazione viene svolta dall'operatore che posiziona il pezzo sul nastro e in seguito tramite una leva stringe i bordi fino a farli aderire all'anello interno.

OP170.5 Orientamento seal:

Un piattello ruota finché il seal non è nella corretta posizione per essere prelevato dalla pinza robot; per questa operazione è necessario riuscire a fissare un punto di riferimento sul componente che sarà utilizzato per effettuare il corretto orientamento.

Inoltre è necessario che la telecamera sia posizionata con la giusta altezza e angolazione dal componente e che ci sia la corretta intensità di luce affinché il software riesca a riconoscere più facilmente il punto di riferimento definito durante il set-up della macchina.

OP170.6 Posizionamento seal sul lato B del cuscinetto:

La pinza robot preleva dalla pedana il seal orientato e lo posiziona sopra il cuscinetto; per il buon esito di questa operazione è necessario effettuare un corretto set-up della macchina poiché la pinza deve prelevare e tenere saldamente il componente durante la movimentazione e il deposito sul cuscinetto.

OP170.7 Pressaggio seal e componenti lato B:

Una campana scende fino ad entrare in contatto con i componenti posizionati sopra il cuscinetto e successivamente imprime una forza sui pezzi fino a quando i sensori sulla campana non rilevano il contatto con l'anello esterno.

Affinché l'operazione abbia successo, è fondamentale che i componenti siano posizionati nel modo corretto perché altrimenti si può danneggiare il seal causando uno scarto dell'intera TBU.

OP170.8 Movimentazione Tool di centraggio:

La pinza robot preleva il tool di centraggio e lo toglie dal cuscinetto posizionandolo in una zona temporanea vicino alla canalina dei componenti.

OP170.9 Fuoriuscita cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione del pressaggio seal e componenti lato B e lo deposita nella postazione di scarto cuscinetto, che conduce il pezzo non conforme fuori dalla macchina dove l'operatore lo preleverà e lo scarnerà.

Questa operazione è molto semplice e non da quasi mai problemi, l'unico inconveniente è che se il pezzo non viene tolto dalla postazione il processo si ferma quando dovrà scartare un altro cuscinetto poiché la stazione è piena.

OP180 Movimento e Rotazione Cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione di pressaggio seal e componenti lato B e lo colloca nella stazione di ingrassaggio sul lato A, questa operazione è svolta in modo

autonomo dalla macchina che attraverso il braccio robotico inserisce la pinza all'interno del foro del cuscinetto e la apre in modo tale da poter tenere saldamente il pezzo durante la movimentazione e il capovolgimento del cuscinetto.

Questa operazione è molto semplice e raramente da dei problemi, poiché serve solo eseguire un corretto set up della macchina affinché ci sia la corretta presa e deposito del cuscinetto da una stazione all'altra.

OP190.1 Movimentazione Roller set lato A:

La pinza robot preleva il roller-set dal lato del cuscinetto e lo tiene sospeso fino a quando non sarà concluso l'ingrassaggio centrale.

OP190.2 Pesatura cuscinetto:

Il cuscinetto viene pesato e la quota che viene rilevata viene confrontata con il valore che è stato fissato durante il settaggio della macchina, se la cifra dovesse essere fuori le tolleranze il pezzo verrà scartato altrimenti potrà accedere all'operazione successiva.

Per il buon esito di questa operazione è necessario eseguire un corretto settaggio e una buona manutenzione della macchina per evitare che agenti esterni possano finire sopra la bilancia e alterare la misurazione.

OP190.3 Fuoriuscita cuscinetto

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione dell'ingrassaggio lato A e lo deposita nella postazione di scarto cuscinetto, che conduce il pezzo non conforme fuori dalla macchina dove l'operatore lo preleverà e lo scarcerà.

Questa operazione è molto semplice e non da quasi mai problemi, l'unico inconveniente è che se il pezzo non viene tolto dalla postazione il processo si ferma quando dovrà scartare un altro cuscinetto poiché la stazione è piena.

OP190.4 Ingrassaggio centrale:

Un tubicino, ruotando ad una velocità costante e ad un'altezza fissa dal distanziale, ingrassa tutta la parte centrale del cuscinetto; la quantità di grasso da inserire è stata fissata durante il set-up della macchina.

OP190.5 Pesatura cuscinetto:

Il cuscinetto viene pesato e la quota che viene rilevata viene confrontata con il valore che è stato fissato durante il settaggio della macchina, se la cifra dovesse essere fuori le tolleranze il pezzo verrà scartato altrimenti potrà accedere all'operazione successiva.

Per il buon esito di questa operazione è necessario eseguire un corretto settaggio e una buona manutenzione della macchina per evitare che agenti esterni possano finire sopra la bilancia e alterare la misurazione.

OP190.6 Movimentazione Roller set lato A:

La pinza robot inserisce il roller-set lato A all'interno del cuscinetto.

OP190.7 Fuoriuscita cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione dell'ingrassaggio lato A e lo deposita nella postazione di scarto cuscinetto, che conduce il pezzo non conforme fuori dalla macchina dove l'operatore lo preleverà e lo scarcerà.

Questa operazione è molto semplice e non da quasi mai problemi, l'unico inconveniente è che se il pezzo non viene tolto dalla postazione il processo si ferma quando dovrà scartare un altro cuscinetto poiché la stazione è piena.

OP190.8 Pesatura cuscinetto:

Il cuscinetto viene pesato e la quota che viene rilevata viene confrontata con il valore che è stato fissato durante il settaggio della macchina, se la cifra dovesse essere fuori le tolleranze il pezzo verrà scartato altrimenti potrà accedere all'operazione successiva.

Per il buon esito di questa operazione è necessario eseguire un corretto settaggio e una buona manutenzione della macchina per evitare che agenti esterni possano finire sopra la bilancia e alterare la misurazione.

OP190.9 Fuoriuscita cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione dell'ingrassaggio lato A e lo deposita nella postazione di scarto cuscinetto, che conduce il pezzo non conforme fuori dalla macchina dove l'operatore lo preleverà e lo scarcerà.

Questa operazione è molto semplice e non da quasi mai problemi, l'unico inconveniente è che se il pezzo non viene tolto dalla postazione il processo si ferma quando dovrà scartare un altro cuscinetto poiché la stazione è piena.

OP190.10 Ingrassaggio lato A:

Il cuscinetto viene posizionato sotto la campana del grasso, che scende fino ad entrare in contatto con la facciata del roller-set e a quel punto inizia l'ingrassaggio con una certa quantità di lubrificante, che viene fissata durante il set up e durante questa operazione la campana farà anche ruotare l'anello interno, in modo tale che venga il grasso venga cosparso in modo uniforme su tutta la sede di rotolamento dei due anelli.

OP190.11 Pesatura cuscinetto:

Il cuscinetto viene pesato e la quota che viene rilevata viene confrontata con il valore che è stato fissato durante il settaggio della macchina, se la cifra dovesse essere fuori le tolleranze il pezzo verrà scartato altrimenti potrà accedere all'operazione successiva.

Per il buon esito di questa operazione è necessario eseguire un corretto settaggio una buona manutenzione della macchina per evitare che agenti esterni possano finire sopra la bilancia e alterare la misurazione.

OP190.12 Fuoriuscita cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione dell'ingrassaggio lato A e lo deposita nella postazione di scarto cuscinetto, che conduce il pezzo non conforme fuori dalla macchina dove l'operatore lo preleverà e lo scarterà.

Questa operazione è molto semplice e non da quasi mai problemi, l'unico inconveniente è che se il pezzo non viene tolto dalla postazione il processo si ferma quando dovrà scartare un altro cuscinetto poiché la stazione è piena.

OP200 Movimentazione automatica cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione di ingrassaggio lato A e lo colloca nella stazione di pressaggio seal e componenti sul lato A, questa operazione è svolta in modo autonomo dalla macchina che attraverso il braccio robotico inserisce la pinza all'interno del foro del cuscinetto e la apre in modo tale da poter tenere saldamente il pezzo durante la movimentazione.

Questa operazione è molto semplice e raramente da dei problemi, poiché serve solo eseguire un corretto set up della macchina affinché ci sia la corretta presa e deposito del cuscinetto da una stazione all'altra.

OP210.1 Caricamento componenti lato A da parte dell'operatore:

Gli addetti macchina prelevano dal box accanto alla stazione i componenti che devono essere assemblati sul lato A, li esaminano verificando se ci sono delle non conformità; se il pezzo è conforme viene posto sulla canalina che alimenta la stazione altrimenti viene scartato.

La canalina presente vicino alla stazione ha i bordi che sono regolabili a seconda delle dimensioni degli anelli, la regolazione viene svolta dall'operatore che posiziona il pezzo sul nastro e in seguito tramite una leva stringe i bordi fino a farli aderire all'anello interno.

OP210.2 Posizionamento componenti lato A sul cuscinetto:

La pinza robot preleva dal nastro trasportatore il componente e lo posiziona sopra il cuscinetto successivamente viene collocato anche il tool di centraggio, che è uno strumento molto utile per il buon esito di questa operazione perché permette il corretto centraggio del componente e del seal.

OP210.3 Caricamento seal da parte dell'operatore:

Gli addetti macchina prelevano i seals dal box e li esamina verificando se ci sono delle non conformità; se il pezzo è conforme viene posto sulla canalina che alimenta la stazione altrimenti viene scartato.

La canalina presente vicino alla stazione ha i bordi che sono regolabili a seconda delle dimensioni degli anelli, la regolazione viene svolta dall'operatore che posiziona il pezzo sul nastro e in seguito tramite una leva stringe i bordi fino a farli aderire all'anello interno.

OP210.4 Posizionamento seal sul lato A del cuscinetto:

La pinza robot preleva dalla pedana il seal e lo posiziona sopra il cuscinetto; per il buon esito di questa operazione è necessario effettuare un corretto set-up della macchina poiché la pinza deve prelevare e tenere saldamente il componente durante la movimentazione e il deposito sul cuscinetto.

OP210.5 Pressatura seal e componenti lato A:

Una campana scende fino ad entrare in contatto con i componenti posizionati sopra il cuscinetto e successivamente imprime una forza sui pezzi fino a quando i sensori sulla campana non rilevano il contatto con l'anello esterno.

Affinché l'operazione abbia successo, è fondamentale che i componenti siano posizionati nel modo corretto perché altrimenti si può danneggiare il seal causando uno scarto dell'intera TBU.

OP210.6 Movimentazione Tool di centraggio:

La pinza robot preleva il tool di centraggio e lo toglie dal cuscinetto posizionandolo in una zona temporanea vicino alla canalina dei componenti.

OP210.7 Fuoriuscita cuscinetto:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione del pressaggio seal e componenti lato A e lo deposita nella postazione di scarto cuscinetto, che conduce il pezzo non conforme fuori dalla macchina dove l'operatore lo preleverà e lo scarnerà.

Questa operazione è molto semplice e non da quasi mai problemi, l'unico inconveniente è che se il pezzo non viene tolto dalla postazione il processo si ferma quando dovrà scartare un altro cuscinetto poiché la stazione è piena.

OP220 Movimentazione TBU:

Il braccio robotico preleva il cuscinetto dalla stazione di pressaggio seal e componenti sul lato A e lo colloca sul nastro trasportatore che porta la TBU all'esterno della macchina, questa operazione è svolta in modo autonomo dalla macchina che attraverso il braccio robotico inserisce la pinza all'interno del foro del cuscinetto e la apre in modo tale da poter tenere saldamente il pezzo durante la movimentazione.

Questa operazione è molto semplice e raramente da dei problemi, poiché serve solo eseguire un corretto set up della macchina affinché ci sia la corretta presa e deposito del cuscinetto da una stazione all'altra.

OP230 Inserimento cartoncino trattenitore:

L'operatore inserisce il cartoncino trattenitore all'interno del foro della TBU e questa operazione è necessaria per evitare che il distanziale si sposti durante il trasporto e che il grasso fuoriesca dalla parte centrale del cuscinetto.

OP240 Assemblaggio Backing ring:

L'operatore, dopo aver ispezionato il backing ring per verificare l'assenza di non conformità, inserirà il componente sul cuscinetto e usando un martello di gomma assemblerà il pezzo facendolo incastrare con il foro della TBU.

OP250 Capovolgimento manuale TBU:

L'operatore capovolge la TBU per poter posizionare gli ultimi componenti sul lato B.

OP260 Assemblaggio anello di protezione lato B:

L'operatore, dopo aver ispezionato l'anello di protezione, lo inserisce sul lato B della TBU; questo componente è usato solamente per proteggere il cuscinetto durante il trasporto.

OP270 Capovolgimento manuale TBU:

L'operatore capovolge la TBU per poterle inserire all'interno del box.

OP280.1 Peso TBU finale:

Il cuscinetto viene pesato e la quota che viene rilevata viene confrontata con il valore che è stato fissato durante il settaggio della macchina, se la cifra dovesse essere fuori le tolleranze il pezzo verrà scartato altrimenti potrà accedere all'operazione successiva.

OP280.2 Scarto TBU:

L'operatore scarta la TBU togliendola dal processo.

OP290 Inserimento dati sul software di tracciabilità dei dati:

L'operatore inserisce sul software di tracciabilità dei dati il numero di box che si sta chiudendo e i seriali delle TBU che sono state inserite al suo interno.

OP300 TBU regettata:

L'operatore mette due o tre regette, a seconda della tipologia che si sta assemblando; questi nastri servono per tenere compatta la TBU e proteggerla durante il trasporto.

OP310 Inserimento TBU nel BOX:

L'operatore tramite un gancio preleva una TBU per volta e la inserisce all'interno del box; l'impacchettamento, la disposizione e il numero di prodotti finali dipende dalle richieste del cliente e dalla tipologia che si sta assemblando.

OP320 Inserimento documentazione :

L'operatore inserisce i documenti richiesti dal cliente o dalla tipologia che si è assemblata all'interno del box.

OP330 Chiusura box:

L'addetto all'assemblaggio chiude il box e lo invia nella postazione di spedizione prodotti finale.

3.3 FMEA.

Per la realizzazione della FMEA (allegato 2) ci siamo basati sull'analisi svolta nella fase precedente, prendendo la scomposizione in process step del processo e la definizione del process function requirement effettuata nel PFD in modo tale da poter approfondire le operazioni precedentemente descritte.

Per lo studio dei potential failure mode abbiamo deciso di definirli come negazione del process function requirement, perché un fallimento di un'operazione e la sua non realizzazione a causa di una non conformità.

Questa valutazione è stata presa perché così facendo è più facile poter poi definire le potenziali cause che hanno generato questo fallimento e anche poter analizzare più esaurientemente gli effetti che si possono scaturire da una non realizzazione di un'operazione.

Le potenziali cause o i meccanismi di fallimento sono state già analizzate in precedenza nella realizzazione del PFD, quando sono state descritte le sources of variation di ogni operazione presente nel processo, quindi noi abbiamo deciso di prendere come riferimento queste voci per l'analisi della FMEA, cercando di implementare o alcune volte omettere alcuni fattori descritti nel PFD.

L'omissione di alcune voci è stata presa in comune accordo con il resto del team perché alcuni fattori che sono stati analizzati nel PFD, nello studio della FMEA sono poco rilevanti oppure sono dei problemi che quasi mai si possono verificare o che sono stati già risolti.

Con alcune fonti di variazioni, invece, si è deciso di ampliare la descrizione, rispetto a quella presente nel PFD, in modo tale che si possano considerare come causa del fallimento dell'operazione anche quelle non conformità che si possono riscontrare solo con un controllo visivo o dimensionale prima dell'assemblaggio, come graffi, cricche o schegge che non influenzano la realizzazione di un'operazione, ma possono portare a un reclamo e all'insoddisfazione del cliente a causa di un prodotto non conforme.

Infatti nel PFD come sources of variation erano state elencate solo quelle cause che possono far fallire l'operazione analizzata e non si è considerato la possibilità che la lavorazione, misurazione o assemblaggio possa concludersi correttamente ma creando o non riconoscendo un difetto sul prodotto finale.

Lo studio degli effetti scaturiti da un potential failure mode è stato molto complicato, perché bisognava sia tenere in considerazione gli eventi passati sia ipotizzare delle situazioni che non sono mai accadute.

Inoltre, si è deciso di considerare negli effetti sul processo anche quei problemi che causano un fermo macchina, come ad esempio i problemi di alimentazione dovuti alla mancanza di componenti a causa di ritardi nelle consegne dai fornitori oppure alla non conformità di alcuni pezzi, che li rendono non adatti all'utilizzo, oppure per problemi che possono verificarsi sulla macchina durante l'assemblaggio.

Nell'ipotesi fatte per gli effetti che possono ripercuotersi sui clienti o sui consumatori finali, sono stati considerati non solo quelli che creano problemi durante il servizio della TBU ma anche tutti quelli che possono creare insoddisfazione al cliente dovuto ad esempio a una consegna mancata o in ritardo, ad un prodotto consegnato danneggiato o incompleto.

Come strumento utile per la ricerca degli effetti sono stati anche analizzati tutti i reclami dei clienti che si sono ricevuti in questi anni, in modo tale da riuscire a considerare anche le aspettative del cliente e quali sono stati i problemi che lui ha riscontrato.

Inoltre grazie allo studio dei reclami dei clienti si è riuscito a vedere l'evoluzione durante il tempo delle maggiori non conformità che sono giunti al cliente e quali sono i problemi che si stanno verificando più frequentemente e quali si sono ridotti.

Il team di lavoro inoltre ha deciso che per ogni un potential failure mode vengano elencati tutti gli effetti possibili che si possono verificare in quella operazione indipendentemente da quale sia stata la causa ad originarli; questa scelta è stata presa perché si voleva considerare il valore massimo di severity per ogni process step.

Per l'analisi degli attuali controlli del processo è stato importante poter interagire con il personale tecnico e con chi ha progettato la macchina, in modo tale da poter comprendere al meglio il funzionamento di tutti i controlli ora presenti, quali sono anche le loro debolezze e il motivo per cui sono stati inseriti in quel punto preciso del processo.

Inoltre è stato utile anche ascoltare il personale addetto alla macchina per vedere se i controlli presenti funzionano come sono stati progettati, se hanno dei difetti, se nella pratica funzionano senza riscontrare dei problemi o come si sono evoluti nel tempo.

Essendo il processo quasi del tutto automatizzato, la maggior parte dei controlli sono eseguiti dalla macchina in modo autonomo, verificando in tempo reale determinati parametri, ciò ha reso possibile il riconoscimento immediato di molte derive o guasti.

Grazie a questo controllo in tempo reale si riesce ad arginare immediatamente la diffusione di una non conformità in quanto, la macchina quando riscontra un malfunzionamento si blocca subito dando un segnale di allarme, cosicché l'operatore possa prontamente intervenire per risolvere il problema.

A volte però la macchina invece di bloccarsi, emette solo un segnale di allarme e questo avviene quando la stazione del gioco assiale richiede di essere tarata oppure quando la macchina scarta un componente o un cuscinetto perché un determinato valore non rientra nei parametri.

Anche il personale addetto alla macchina è molto importante per il controllo del processo e della conformità del prodotto finale perché durante l'alimentazione della macchina loro

hanno il compito di controllare che i componenti che si utilizzeranno siano senza difetti e non presentino dei graffi o dei bolli.

Questo controllo è molto importante perché può capitare che durante il trasporto o lo stoccaggio dei pallet, i componenti possano danneggiarsi a causa di urti, umidità o per la formazione di ruggine; inoltre, non essendo stati progettati dei controlli nella macchina per verificare lo stato dei componenti, risulta fondamentale la formazione e l'esperienza del personale a riscontrare immediatamente questi problemi.

Il personale presente nella macchina ha anche l'importante compito di verificare se l'assemblaggio della TBU sia avvenuto in modo corretto; infatti, alla fine del processo quando il prodotto finale esce dalla macchina, l'operatore presente nella stazione finale deve verificare che i seal sono stati assemblati in modo corretto e senza danni sul componente.

Nella colonna della prevenzione degli attuali controlli, il team ha deciso di inserire alcune procedure presenti dentro l'azienda, perché questi documenti spiegano il funzionamento di alcune operazioni, quali controlli eseguire e servono a formare il personale.

Questi documenti sono molto importanti perché sono posizionati vicino alla macchina, in modo tale che se un operatore avesse un dubbio su come effettuare un controllo o su come settare la macchina può prenderli e visionarli evitando che possano commettere degli errori.

Inoltre sono documenti in continuo aggiornamento e che servono a migliorare sempre il processo di assemblaggio, poiché se viene effettuato uno studio per eliminare o correggere delle pratiche errate o per risolvere dei problemi presenti nel processo, le azioni correttive, che sono state individuate, vengono scritte sulla procedura in modo tale che il personale possa essere formato e possa avere un documento su cui fare riferimento durante il lavoro.

Dopo aver calcolato tutti gli RPN, il team ha deciso che se il valore è compreso tra 80 e 100, bisogna progettare un'azione correttiva ma non è un problema di primaria importanza quanto piuttosto un warning da risolvere al più presto, mentre se il valore supera i 100 è necessario intervenire subito per provare a eliminare il problema in quanto è un fallimento già importante; inoltre si è anche deciso di intervenire se la severity ha un valore di 8 o superiore perché in questo caso potrebbe essere potenzialmente pericoloso l'uso della TBU o per la sicurezza degli operatori.

La scelta dei valori di severity è stato un lavoro difficile in quanto le persone all'interno del team avevano idee differenti sul numero da assegnare a ogni effetto sul sistema e sul cliente finale e molte volte non si riusciva a trovare un punto di incontro in quanto si confrontavano figure aziendali con esperienze e con anche know how diversi.

Inoltre per i valori di detection e occurrence si è cercato anche di interpretare le scale della SAE perché c'è una grossa differenza tra i valori presenti nella norma di riferimento con quelli della realtà, poiché la norma prevede livelli di produzione molto alti e, se ci si fosse basati solo su questa scala, i valori di occurrence sarebbero risultati troppo elevati per ogni operazione, quindi si è cercato di rapportare i livelli di produzione considerati nella norma con quelli reali dell'azienda.

Le azioni correttive sono state decise durante gli incontri con il team e inoltre prima di intraprendere queste correzioni, c'è stato un confronto con il personale addetto alla macchina

per cercare di capire se queste operazioni possono avere delle ripercussioni nel loro modo di lavorare o se possono andare in contrasto con la normale routine del lavoro.

Non sono stati assegnati dei valori alla severity, occurrence e detection delle azioni correttive perché bisognava vedere nel tempo se queste scelte possono avere un impatto positivo sul processo riducendo o la gravità del problema o la probabilità di accadimento.

Nell'immagine (figura 38) sottostante viene presentata un esempio di un applicazione della FMEA su un processo.

Potential Failure Mode	Potential Effects of Failure	Severity		Potential Causes of Failure	Occurrence	Detection Method	Detection	RPN	Recommended Action
Fails to Support Engine	Engine Falls out of Car	10	YC	Fatigue. Over stressed due to stress raiser, or insufficient section depth, or Incorrectly specified material or process	3	FE Analysis (D=3) Rig Test (D=2) Vehicle Endurance (D=1)	3	90	Redesign to ensure lower stresses. Introduce fail-Safe Feature
Amplifies Vibration	Customer feels increased vibration	5		Natural Frequency being excited	4	FE Analysis (D=3) Bracket Rig Test (D=2) Vehicle Modal Test (D=1)	3	60	Use CAE to check stiffness and natural frequencies of brkt and system. Modify design to alter frequency if necessary

Figura 38 – Esempio di applicazione FMEA.

CAPITOLO 4 – CONCLUSIONI.

4.1. PROBLEMI RICONTRATI.

Il primo problema riscontrato durante la realizzazione della FMEA è riuscire a trovare dei dati storici sui problemi e guasti riscontrati sulla macchina di assemblaggio da quando è stata montata all'interno dell'officina; all'inizio dell'analisi, infatti, la mancanza di un database contenente le non conformità che si sono riscontrate negli anni è stato un problema perché le persone del team dovevano far ricorso alla loro memoria per ricordare quali erano stati i problemi più critici o ricorrenti.

L'unica documentazione che si è trovata faceva riferimento a delle analisi o ricerche di operazioni correttive da intraprendere dopo i continui reclami di alcuni clienti importanti o per gravi problemi che hanno causato il ritiro dei prodotti o il blocco dei treni per questioni di sicurezza.

Inoltre la macchina di assemblaggio è relativamente nuova perché è stata montata solo da pochi anni e molti problemi che si riscontravano erano dovuti a un normale periodo di rodaggio e di apprendimento durante il quale l'assemblaggio delle TBU non riusciva a rispettare le aspettative aziendali e i ritmi pensati.

Per ovviare a questa mancanza di informazioni si è cercato di raccogliere ed analizzare i reclami dei clienti che sono arrivati da quando la macchina è stata inserita nel processo aziendale.

Si è cercato di ricavare quali sono stati o lo sono tuttora i problemi più ricorrenti che non si sono riusciti a identificare o eliminare durante l'assemblaggio della TBU e hanno creato un'insoddisfazione al cliente.

Un'altra operazione presa per reperire più informazioni possibili, è stata quella di parlare ed intervistare più persone possibili, non solo coloro che fanno parte del team, ma anche il personale addetto alla macchina o il personale tecnico, che durante gli anni ha potuto vedere quali sono stati i problemi più ricorrenti o più fastidiosi che si sono verificati.

Da queste interviste si è cercato di estrapolare delle macro informazioni o l'evoluzione dei problemi negli anni; però queste analisi non avevano un fondamento statistico perché questi ricordi non erano dettagliati e del tutto affidabili da poter spiegare quante volte si è verificato un problema e quali guasti si sono evoluti nel tempo.

Un altro problema che si è riscontrato, è stato quello di riuscire a far partecipare attivamente tutte le persone del team alle riunioni, perché alcuni membri potevano pensare di non dare un valore aggiunto al lavoro che si stava facendo, siccome non avevano mai fatto prima un lavoro di questo tipo, mentre altri potevano ritenere che quest'analisi fosse una perdita di tempo oppure non così prioritario rispetto alla normale routine lavorativa.

Infatti, alcuni membri del team non si sono presentati costantemente alle riunioni o per vari motivi è stato necessario rinviare l'appuntamento in altre date; per risolvere questo inconveniente si è cercato di interagire con il personale addetto alla macchina e

singolarmente con le persone del team che non hanno partecipato alla riunione, per sentire la loro opinione su certi temi a loro più vicini o per avere un'informazione più completa su certi aspetti, per poi riportare i loro pensieri al resto del team.

Questo inconveniente è emerso sempre di più con il passare del tempo perché dopo un inizio promettente, dove molte persone si presentavano e interagivano proattivamente; andando avanti nel lavoro del progetto l'interesse è andato scemando ed è stato difficile a volte riuscire ad avere un confronto proficuo per la definizione degli effetti dei failure mode o dei valori da dare alla severity, occurrence e detection.

Una delle più grosse difficoltà con cui il team si è scontrato nella realizzazione di questo progetto, è stata quella di capire che livello di dettaglio raggiungere e quali operazioni, cause ed effetti analizzare in profondità; infatti, alcune origini o conseguenze dei failure mode, non sono state prese in considerazione, perché o si scendeva a un livello di analisi troppo approfondito oppure erano già state considerate durante la realizzazione della macchina o nel periodo di rodaggio.

L'ultima complicazione che si è riscontrata è stata quello di pensare, in certe occasioni, più al numero finale del RPN che alla scelta dei reali valori della severity, occurrence e detection; questa scelta è stata presa in considerazione perché potevano risultare critiche delle operazioni che difficilmente lo potevano essere, secondo il pensiero di molte persone del team, come ad esempio la movimentazione dei cuscinetti.

Questa decisione contrasta il corretto svolgimento della FMEA perché in questo modo si falsifica il risultato finale poiché, se alcune operazioni potevano essere critiche così facendo non lo sono più, per questo motivo si è cercato di farlo pochissime volte.

4.2. COMMENTI SULLE OPERAZIONI RISULTATE CRITICHE.

Il risultato di questo progetto è stato quello di individuare e classificare quali sono le operazioni più critiche e in seguito trovare delle operazioni che possano ridurre questa criticità, in modo tale da poter migliorare il processo di assemblaggio.

Le operazioni che sono risultate più critiche, in parte sono quelle che molte persone all'interno del team si aspettavano e sapevano già che davano dei problemi, mentre alcune erano inaspettate o meglio non si pensava che fossero così problematiche da richiedere un intervento.

Le operazioni che richiedono un intervento immediato sono tutte quelle che hanno un valore di RPN ≥ 100 e sono:

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP20	Impostazione ricetta sul software della macchina	Non caricata la ricetta corretta per la TBU specifica	Ricetta TBU aggiornata	7	8	3	168

Questa operazione è risultata critica ed è stata una scoperta inattesa, poiché non si aspettava che si potesse avere un impatto del genere sul processo; infatti, andando a parlare con il personale addetto all'assemblaggio si è notato come questo aspetto sia diventato sempre più critico con il passare del tempo.

Un altro aspetto che ha contribuito a rendere questa operazione critica è che solo una persona per turno è capace di scrivere la ricetta sul software e alcune volte è necessario il manuale per ricordarsi tutti gli step da seguire e settare la macchina.

Inoltre il numero di tipologie di TBU è esploso negli ultimi anni e quindi ci sono sempre più ricette da fare o da aggiornare prima di poter iniziare l'assemblaggio e ciò ha causato più problemi per il personale poiché ci impiega più tempo nella scrittura della ricetta e per questo motivo il valore dell'occurrence è così alto.

Per risolvere questo problema si è proposto di provare a chiedere al fornitore del software un aggiornamento, in modo che si possa prendere i dati e i parametri da altre ricette, già precedentemente caricate, per gli stessi componenti.

In aggiunta per provare a migliorare questa fase dell'assemblaggio si è proposto di addestrare più persone per la scrittura delle ricette, poiché solo una persona per turno è capace o è stata formata per scriverle e caricarle nella macchina e inoltre si è anche visto che senza questi operatori le operazioni di settaggio macchina sono più complicate e richiedono molto più tempo.

L'alto valore di severity è causato dal fatto che un'errata ricetta può provocare grossi danni alla TBU e renderla inutilizzabile per il cliente poiché si potrebbero danneggiare le sedi di rotolamento o dei seal assemblati.

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP50.5	Inserimento automatico dei rulli nella gabbia	Erroneo inserimento dei rulli nella gabbia	Dimensione gabbia	7	4	4	112
OP50.5	Inserimento automatico dei rulli nella gabbia	Erroneo inserimento dei rulli nella gabbia	Dimensione feritoia standard e pocket inspection	7	4	4	112
OP50.5	Inserimento automatico dei rulli nella gabbia	Erroneo inserimento dei rulli nella gabbia	Mancata ripetibilità del posizionamento	7	5	4	140

La criticità di questa operazione era attesa perché si riscontravano dei problemi durante l'assemblaggio; l'alto valore di severity è dovuto al fatto che se la gabbia non è perfettamente conforme può causare grossi problemi durante il servizio della TBU e anche nell'assemblaggio.

Le possibili cause che provocano il fallimento dell'operazione dell'inserimento automatico dei rulli sono la dimensione della gabbia, la dimensione della feritoia e della pocket inspection (figura 39) e la mancata ripetibilità del posizionamento del rullo nella gabbia.

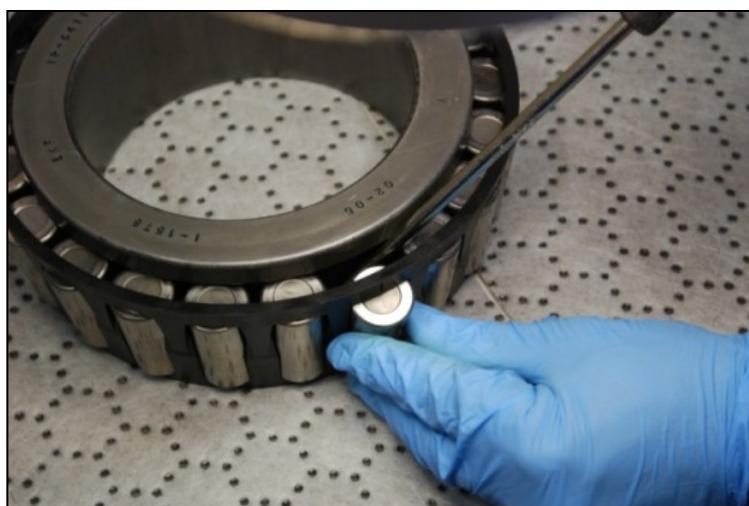


Figura -39 esempio di pocket inspection.

Il principale motivo che provoca questi problemi è il cattivo stoccaggio delle gabbie, perché se durante il trasporto o lo stoccaggio nel magazzino dovessero esserci delle infiltrazioni di umidità o se dovessero essere esposte a elevate temperature, la gabbia subirebbe delle variazioni che ne causano la non conformità.

Se le gabbie si sono deformate durante lo stoccaggio, l'operazione di orientamento risconterà dei problemi, che porteranno a un rallentamento del processo perché la macchina ha difficoltà a riconoscere quali sono le feritoie e quindi è possibile che alcune gabbie siano posizionate nella stazione successiva non nel corretto modo o che vengano scartate.

La gabbia deformata può portare delle complicazioni nelle operazioni successive all'orientamento, perché se non è stata posta nel modo corretto quando la pinza robot inserirà i rulli nelle feritoie li metterà o nel posto sbagliato o non perfettamente dentro la loro sede, ciò può causare, durante l'assemblaggio del roller-set, seri danni alle piste dell'anello interno.

Inoltre questo problema ha anche delle conseguenze nell'operazione dell'assemblaggio cuscinetto perché la gabbia ha una feritoia speciale chiamata pocket inspection che consente, una volta assemblato il roller-set, di togliere un rullo così da poter ispezionare l'interno e vedere lo stato del grasso o della pista dell'anello interno; se la gabbia è deformata questa speciale feritoia è troppo larga e il rullo può uscire dalla sua sede e sporgere all'infuori.

Se il rullo sporge quando viene inserito l'anello esterno sul roller-set o viceversa, la gabbia si può rompere per la pressione fatta dal braccio robotico oppure le piste possono bollarsi o graffiarsi (figura 40) in quanto il rullo entra in contatto con le sedi di rotolamento; questo problema può essere rilevato solamente alla fine dell'operazione di assemblaggio cuscinetto perché c'è una riga ottica che misura l'altezza del cuscinetto e se non è nelle tolleranze la macchina si blocca e dà un segnale di allarme.



Figura 40 – Bollatura anello

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP40.3	Movimentazione e orientamento automatico della gabbia	Non corretta movimentazione e orientamento della gabbia	Dimensione, peso e stato della gabbia	7	4	4	112
OP60.1	Inserimento anello interno nella gabbia	Non corretto inserimento dell'anello interno nella gabbia	Dimensione gabbia	7	4	4	112
OP60.1	Inserimento anello interno nella gabbia	Non corretto inserimento dell'anello interno nella gabbia	Posizione rulli non corretta	7	4	4	112

Il fallimento dell'operazione dell'inserimento anello interno è causato dalla dimensione della gabbia e dall'errata posizione dei rulli; queste cause sono scaturite dal problema che è stato descritto precedentemente per l'operazione dell'inserimento dei rulli nella gabbia.

Se la gabbia ha subito delle variazioni di dimensioni a causa del cattivo stoccaggio le ripercussioni non si verificano solo nell'operazione dell'inserimento dei rulli nella gabbia ma anche in quelle successive.

In questa operazione quando la pinza robot inserisce l'anello interno può capitare che se i rulli non sono inseriti nel modo corretto possano cadere dalla loro postazione o spostarsi e ciò può provocare dei danni alla gabbia o alle piste dell'anello interno quando verrà assemblato il roller-set.

Infatti, quando l'anello interno viene pressato per formare il roller-set, se il rullo non è nella posizione corretta, può entrare in contatto con la testa con le piste di rotolamento provocando dei graffi o dei bolli (figura 41), oppure può causare la rottura della gabbia in quanto la pressa continua ad imprimere una forza sull'anello interno finché non supera le tolleranze, fissate durante il set-up, causando un blocco della macchina e un rallentamento della produzione e uno scarto dei pezzi.

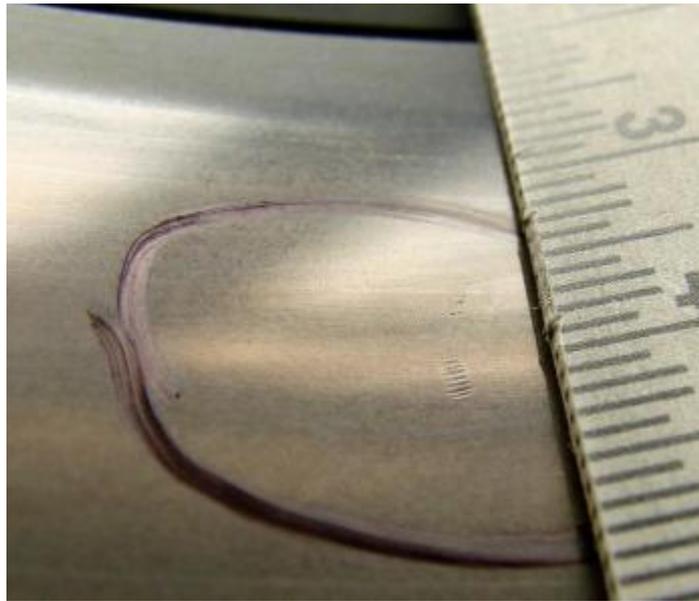


Figura 41 – bollatura anello interno.

Il valore di severity è alto perché se dovesse essere usata una TBU con dei difetti sulle piste potrebbe essere molto pericoloso in quanto si potrebbe andare incontro a problemi di spalling e fretting che possono portare alla rottura del cuscinetto.

Process Step	Process Function Requirement	POTENTIAL FAILURE MODE	Potential Cause / Mechanism of Failure	Severity	Occurrence	Detection	RPN
OP90.1	Inserimento anello esterno nel 1° roller set	Erroneo inserimento dell'OR nel roller-set	Dimensione e stato del roller set	7	4	4	112

La criticità di questa operazione è da collegare ai problemi che sono stati descritti precedentemente per l'inserimento dei rulli e dell'anello interno nella gabbia, solo che in questo specifico caso si fa riferimento al possibile rullo sporgente a causa di una pocket inspection che si è allargata per un cattivo stoccaggio della gabbia.

Quando il braccio robotico inserirà l'anello esterno sul roller-set, farà scendere il pezzo fino a che non sarà in postazione di rilascio ma se durante la movimentazione si dovesse verificare un contatto tra rullo e pista dell'anello esterno il braccio continuerà lo spostamento finché la forza che applica non supera le tolleranze fissate in progettazione.

Se la forza non supera mai le tolleranze, si può verificare la rottura della gabbia oppure la bollatura della pista dell'anello esterno (figura 42) e questo può causare problemi di fretting e di spalling durante il servizio e per questo motivo che si è dato un alto valore di severity in questa operazione.



Figura 42 – bollatura anello esterno.

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP110.9	Verifica gioco assiale	Non corretta verifica del gioco assiale	Taratura macchina	6	6	4	144

La criticità di questa operazione è causata dal fatto che quando la campana entra in contatto con il cuscinetto e la riga ottica va a misurare il gioco assiale e può capitare che dopo un certo numero di pezzi che vengono controllati la riga ottica si sposti ed esegui delle misure errate.

La severity ha un voto abbastanza alto perché un cuscinetto che ha un gioco assiale diverso da quello progettato può causare dei problemi durante il servizio che possono portare alla rottura del cuscinetto.

Anche il valore dell'occurrence è abbastanza alto perché con le molteplici vibrazioni e operazioni che svolge la stazione del gioco assiale può capitare che la riga ottica si sposti e non riesca più a misurare correttamente il gioco assiale e confrontarlo con quello fissato durante il set up.

Per risolvere questo problema si è deciso di inserire un'operazione aggiuntiva dove la macchina richiede, dopo il passaggio di trenta pezzi, di tarare i propri strumenti; il problema è che i sistemi di controllo presenti ora non sempre riescono a rilevare la deriva durante l'assemblaggio e quindi possono far passare per buoni dei pezzi che non lo sono.

Inoltre si è pensato di programmare di fare uno studio per vedere se riducendo il numero di pezzi richiesti per tarare gli strumenti, si può avere un maggior controllo sul processo oppure si è proposto di fare un'analisi per verificare se la macchina nelle stazioni successive riesce ad accorgersi della deriva e dare un segnale di allarme e scartare i pezzi.

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP170.6	Posizionamento seal sul lato B del cuscinetto	Errato posizionamento del seal sul cuscinetto	Mancata ripetibilità del posizionamento	7	5	4	140
OP210.4	Posizionamento seal sul lato A del cuscinetto	Errato posizionamento del seal sul cuscinetto	Mancata ripetibilità del posizionamento	7	5	4	140

La criticità di queste due operazioni era nota all'interno del team, poiché durante l'assemblaggio si riscontravano crescenti problematiche in queste due stazioni e inoltre gli addetti alla macchina avevano sempre più difficoltà a identificare i trucioli o i rigonfiamenti dei seal e di conseguenza sono anche aumentati i reclami dei clienti.

Grazie a questo progetto si è messo per iscritto un problema che era già noto e si è cercato di analizzare le cause per trovare un'azione correttiva definitiva, perché quelle che sono state prese in precedenza servivano maggiormente a tamponare o ridurre gli effetti di questo fallimento piuttosto che agire sulle cause che l'hanno generato.

Infatti, inizialmente si era cercato di aggiungere e creare dei controlli aggiuntivi o delle nuove procedure, che spiegavano in modo più dettagliato come ispezionare il prodotto finito piuttosto che agire sulle cause che hanno generato la non conformità.

Ma nonostante ciò, intervistando gli addetti alla macchina, si è riscontrato un aumento delle fermate durante il processo di assemblaggio per provare a settare in maniera diversa la pinza robot nelle due stazioni o per entrare nella macchina per togliere i componenti che cadevano durante il posizionamento.

Con questa analisi si è riuscito ad evidenziare una possibile causa del problema, infatti si è dedotto che un motivo poteva essere una botta che la pinza robot, che colloca il seal sul cuscinetto, aveva ricevuto durante la lavorazione; questo urto ha causato un disallineamento e un presa difettosa della pinza che con certi tipi di seal era più evidente di altri.

Dopo questo urto la pinza non riusciva più a tenere saldo il componente durante la movimentazione, infatti il pezzo cadeva o si inclinava mentre veniva posizionato sopra il cuscinetto e ciò poteva causare dei rigonfiamenti o dei trucioli del seal quando veniva pressato sulla TBU, se non era nella giusta posizione.

L'alto valore della severity è stato dato perché se il seal si danneggia o non è correttamente assemblato non riesce a proteggere la TBU dall'ingresso di possibili agenti esterni, che possono creare problemi di denting, corrosione e usura che possono portare alla rottura del cuscinetto.

Per risolvere questo problema si è pensato di inserire dei sensori che rilevino la corretta presa del seal, la sua tenuta durante tutta la movimentazione e l'esatto deposito sul cuscinetto, inoltre si è pensato di far bloccare la macchina o far emettere un segnale di allarme in caso di anomalie durante l'operazione.

Invece le operazioni che hanno un RPN che è compreso tra 80 e 100 sono dei warning che sono risultati dall'analisi della FMEA e richiedono un intervento ma non sono di primaria importanza come quelli descritti in precedenza che hanno valori superiori al 100.

Le operazioni che sono risultate critiche in questa fascia di valore sono:

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP20	Impostazione ricetta sul software della macchina	Non caricata la corretta ricetta per la TBU specifica	Tipo nuovo da assemblare	7	4	3	84

La criticità di questa operazione è stata una scoperta inattesa come quella descritta precedentemente; la differenza è dovuta al diverso meccanismo di fallimento o potenziale causa perché in questo caso, a differenza dell'altro, la ricetta deve essere scritta completamente e da zero.

Quindi la grossa differenza tra le due cause è il valore che si è dato all'occurrence perché è molto più probabile che una ricetta debba essere aggiornata piuttosto che scritta da capo, siccome non è così sovente che venga progettata una nuova versione della TBU.

L'alto valore di severity è uguale a quello assegnato all'altro meccanismo di fallimento perché un'errata ricetta può provocare grossi danni alla TBU e renderla inutilizzabile per il cliente poiché si potrebbero danneggiare le sedi di rotolamento o dei seal assemblati.

Le azioni che sono state precedentemente descritte per l'aggiornamento della ricetta sono valide anche in questa situazione perché le modalità di svolgimento dell'operazione e i problemi che l'affliggono sono gli stessi.

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP30.4	Lettura marcatura anello interno	Non corretta lettura della marcatura dell'anello interno	Spaziatura caratteri	4	7	3	84
OP70.3	Lettura marcatura anello esterno	Non corretta lettura della marcatura dell'anello esterno	Spaziatura caratteri	4	7	3	84

La criticità di queste due operazioni erano attese all'interno dei membri del team, siccome durante l'assemblaggio si riscontrano grossi problemi e perdite di tempo, perché la scritta è situata su una superficie cilindrica per gli esterni, mentre per gli interni non è dritta, ma a cerchio e ciò richiede: un particolare sistema software di riconoscimento, una telecamera che riesca a fare delle foto di ottima qualità e un luce che abbia un'angolazione e un'intensità da rendere i caratteri più riconoscibili.

Una delle maggiori cause di questo fallimento è lo stato degli anelli che vengono utilizzati per l'assemblaggio, perché questi componenti vengono prima fosfatati e questa operazione fa sì che gli elementi che saranno utilizzati, siano unti e ciò rende più difficile il riconoscimento dei caratteri.

Se il componente è unto la lettura è più difficile perché il riflesso delle gocce sulla superficie dell'anello fa sì che la telecamera non riesca a rilevare correttamente i caratteri, per risolvere il problema si sono prese delle azioni correttive per pulire e asciugare gli anelli con l'utilizzo di panni o di ugelli ad aria compressa.

Solo che queste azioni richiedono un'ingente perdita di tempo e di risorse, rispetto a ciò che era stato programmato, poiché i panni utilizzati si sporcano facilmente e non asciugano più dopo un certo numero di anelli e l'aria compressa richiede molto tempo perché anche se si asciuga la zona dove ci sono i caratteri, le gocce d'olio colano dalla zona sovrastante mentre l'anello esterno è dentro la macchina.

Però la causa più ricorrente che rende difficile la lettura dei caratteri è che i fornitori usano due spaziature dei caratteri diversi e questo rende arduo il riconoscimento quando gli anelli sono mischiati tra di loro e provoca grossi rallentamenti al processo di assemblaggio, poiché la macchina non riconoscendo i caratteri scarta i pezzi e l'operatore è costretto o a dividere gli anelli dei due fornitori, prima di inserirli nella macchina, o a caricare i seriali e il lotto sul software manualmente.

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP30.5	Misurazione spessore anello interno	Erronea misurazione dell'IR	Tolleranze geometriche di forma	7	3	4	84
OP30.5	Misurazione spessore anello interno	Erronea misurazione dell'IR	Macchina non Tarata	7	4	3	84

La criticità di questa operazione è causata da due potenziali cause diverse: le tolleranze geometriche di forma degli anelli interni e la macchina che non è tarata correttamente; i valori di severity sono alti e sono uguali perché se un anello con uno spessore errato è stato assemblato può causare dei problemi durante il servizio della TBU che può portare anche alla rottura del cuscinetto.

La potenziale causa delle tolleranze geometriche di forma errate è provocata dall'utilizzo di anelli che non hanno la faccia planare e questo può far sì che la misura rilevata dalla macchina non sia quella corretta e faccia passare per buono un pezzo che non lo è; il valore dato all'occorre è basso perché prima che il componente venga utilizzato per l'assemblaggio subisce molti controlli dimensionali che aiutano a rilevare la presenza di non conformità.

Mentre per l'altra potenziale causa la motivazione è molto simile a quella precedentemente analizzata per il gioco assiale; in quanto anche in questa operazione c'è una riga ottica che rileva lo spessore dell'anello interno e può capitare che durante il normale ciclo di lavoro si possa spostare e non eseguire più misure corrette.

Per risolvere questo problema si è aggiunta un'operazione che la macchina esegue autonomamente dove dopo il passaggio di 25 pezzi preleva un anello, definito master poiché ha un'altezza certificata, e lo usa per tarare la macchina in modo tale da ridurre il problema di rilevare tempestivamente la deriva della riga ottica.

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP90.2	Inserimento 2° roller-set all'interno dell'anello esterno	Erroneo inserimento 2° roller-set all'interno dell'anello esterno	Dimensione e stato roller set	7	4	3	84

Questa operazione soffre dei problemi che sono stati discussi precedentemente sull'inserimento dei rulli e dell'anello interno nella gabbia e dell'inserimento dell'esterno sul primo roller-set, ossia del cattivo stoccaggio delle gabbie che può causare una loro variazione dimensionale; ma l'unica differenza che c'è tra queste operazioni è il valore della detection.

La diversità del valore della detection è causata dal fatto che quando il cuscinetto è stato assemblato, c'è una paletta che sposta il pezzo verso la stazione del gioco assiale, ma prima di eseguire questa operazione c'è una riga ottica che rileva l'altezza del cuscinetto e se non è nelle tolleranze la macchina si blocca.

Inoltre contrariamente all'inserimento dell'anello esterno sul primo roller-set, che può causare la rottura della gabbia, in questo caso il braccio robotico non imprimerà mai una forza tale da romperla perché il roller-set sarà già in posizione di rilascio prima di raggiungere la tensione di rottura.

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP110.9	Verifica gioco assiale	Non corretta verifica del gioco assiale	Dimensione e stato del cuscinetto	7	4	3	84

La criticità di questa operazione è dovuto allo stato del cuscinetto, perché durante la verifica del gioco assiale può succedere che mentre la campana sta pressando il cuscinetto per rilevare la misura del gioco assiale, l'anello interno si assesti all'interno del roller-set, ciò può causare una valutazione errata della quota.

Il valore della severity è alto perché si possono bollare le piste durante l'assestamento dell'anello interno nel roller-set e ciò può portare a problemi di fretting e spalling che possono causare la rottura del cuscinetto.

Per risolvere questo problema si è pensato di inserire un'operazione aggiuntiva che aiuti ad assestare l'anello interno dentro il roller-set in modo tale che quando si va rilevare la quota del gioco assiale questo fenomeno non si verifichi.

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP170.2	Posizionamento componenti lato B	Errato posizionamento del componente sul lato B	Mancata ripetibilità del posizionamento	7	3	4	84
OP210.2	Posizionamento componenti lato A	Errato posizionamento del componente sul lato A	Mancata ripetibilità del posizionamento	7	3	4	84

La criticità di queste operazioni è collegata allo stesso problema, ossia che la pinza robot potrebbe inserire i componenti sopra il cuscinetto non nella posizione corretta, in un modo simile a quanto spiegato precedentemente per l'operazione di posizionamento dei seal.

La differenza con le operazioni di posizionamento seal è che il valore dell'occurrence è più basso perché la pinza robot preleva i componenti dal foro e in questo modo la presa è più salda rispetto a quando succede con il seal che è prelevato dal diametro esterno; per questo motivo è molto più probabile che il seal sia posizionato in modo errato rispetto ai componenti.

Per risolvere questo problema si è pensato di inserire dei sensori che rilevino la corretta presa del componente, la sua tenuta durante tutta la movimentazione e il corretto deposito sul cuscinetto, inoltre si è pensato di far bloccare la macchina o far emettere un segnale di allarme in caso di anomalie durante l'operazione.

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP30.6	Fuoriuscita automatica anello interno	Erronea fuoriuscita dell'IR	Intasamento del buffer	7	4	3	84
OP70.5	Fuoriuscita automatica anello esterno	Erronea fuoriuscita dell'anello esterno	Intasamento del buffer	7	4	3	84
OP130.2	Fuoriuscita del cuscinetto	Erronea fuoriuscita del cuscinetto	Intasamento del buffer	7	4	3	84
OP150.2	Fuoriuscita del cuscinetto	Erronea fuoriuscita del cuscinetto	Intasamento del buffer	7	4	3	84
OP150.8	Fuoriuscita del cuscinetto	Erronea fuoriuscita del cuscinetto	Intasamento del buffer	7	4	3	84
OP170.9	Fuoriuscita del cuscinetto	Erronea fuoriuscita del cuscinetto	Intasamento del buffer	7	4	3	84
OP190.3	Fuoriuscita del cuscinetto	Erronea fuoriuscita del cuscinetto	Intasamento del buffer	7	4	3	84
OP190.7	Fuoriuscita del cuscinetto	Erronea fuoriuscita del cuscinetto	Intasamento del buffer	7	4	3	84
OP190.9	Fuoriuscita del cuscinetto	Erronea fuoriuscita del cuscinetto	Intasamento del buffer	7	4	3	84
OP190.12	Fuoriuscita del cuscinetto	Erronea fuoriuscita del cuscinetto	Intasamento del buffer	7	4	3	84
OP210.7	Fuoriuscita del cuscinetto	Erronea fuoriuscita del cuscinetto	Intasamento del buffer	7	4	3	84

Gli alti valori di RPN riferiti alla fuoriuscita dell'anello interno, esterno e del cuscinetto, sono stati inattesi tra i membri del team perché non si pensava che fossero un reale problema, poiché si riteneva che le azioni e le procedure attuali fossero sufficienti a evitare l'insorgere di problemi o il rallentamento della produzione.

Facendo delle interviste al personale addetto all'assemblaggio si è notato come questo problema si sia presentato solo con il passare del tempo, perché non appena era stata inserita nel processo questa macchina dava molti problemi ed emetteva spesso il segnale di allarme e gli addetti inizialmente rispondevano prontamente per risolvere il problema, mentre ora con la routine e una maggiore conoscenza della macchina, non si reagisce più così velocemente.

Infatti, gli operatori si sono abituati al suono dell'allarme della macchina durante gli anni e ora non sempre riescono a distinguere il segnale dagli altri rumori presenti in officina e quindi non riescono a reagire prontamente per risolvere il problema.

Inoltre non si riesce a capire subito per quale motivo la macchina si blocca ed emette il suono di errore, perché si usa lo stesso segnale rumoroso per i problemi che causano un blocco della produzione, per richiedere l'intervento dell'operatore, per tarare la stazione della verifica del gioco oppure per segnalare che la stazione dove i pezzi scartati sono depositati è piena.

Per risolvere questo problema si è pensato di inserire segnali sonori diversi per avvisare gli addetti all'assemblaggio che è stato scartato un cuscinetto o un anello interno o esterno dalla macchina, in modo tale che sia più facile riconoscere questo problema da altri e che si possa intervenire più rapidamente per togliere il pezzo prima che il buffer sia pieno e il processo si blocchi.

<i>Process Step</i>	<i>Process Function Requirement</i>	<i>POTENTIAL FAILURE MODE</i>	<i>Potential Cause / Mechanism of Failure</i>	<i>Severity</i>	<i>Occurrence</i>	<i>Detection</i>	<i>RPN</i>
OP150.6	Ingrassaggio lato B	Il roller-set lato B ingrassato non correttamente	Errata densità grasso	7	4	3	84
OP190.10	Ingrassaggio lato A	Errato ingrassaggio roller-set lato A	Errata densità grasso	7	4	3	84
OP190.4	Ingrassaggio centrale	Errato ingrassaggio nella parte centrale del cuscinetto	Errata densità grasso	7	4	3	84

Le operazioni di ingrassaggio nella zona centrale, nel roller-set lato A e B sono risultate critiche anche se erano inattese perché si pensava che dopo aver scritto nella ricetta il tipo di grasso, che si andava a utilizzare, la macchina riuscisse a calcolare la giusta quantità da inserire all'interno della TBU; ma andando avanti nel tempo gli addetti alla macchina hanno notato come si è avuto un incremento dei problemi su queste stazioni perché non si riusciva a definire il peso specifico di ogni tipo di grasso utilizzato.

Quindi, per risolvere a questo problema si è cercato di inserire nella macchina, durante il settaggio e la scrittura della ricetta, il peso specifico di ogni grasso che si andava a utilizzare, affinché la macchina riuscisse a calcolare più precisamente la quantità da inserire.

4.3 SVILUPPI FUTURI E PROSSIME ATTIVITÀ.

Dopo aver terminato questo progetto, il passo successivo è quello di realizzare un control plan, ossia un documento che descrive le azioni, come misurazioni, ispezioni, controlli di qualità o monitoraggio dei parametri di processo, richiesti in ciascuna operazione per assicurare che gli outputs del processo siano conformi ai requisiti.

Questo documento fornisce all'addetto macchina e all'ispettore della qualità le informazioni necessarie per controllare correttamente il processo, definendo tutte le operazioni da svolgere sia durante il normale flusso di produzione oppure alla presenza di una non conformità.

Inoltre garantisce anche che il processo analizzato continui sempre a funzionare nel corretto modo e se si dovesse verificare un problema, questo sarà risolto o monitorato grazie ai controlli che sono stati pensati e realizzati per far sì che non ci siano interruzioni e che la non conformità non si espanda nelle operazioni successive.

Il control plan ha anche un'altra funzione quello di garantire che la qualità venga mantenuta in caso di turnover dei dipendenti, stabilendo uno standard per l'ispezione di qualità o per le operazioni da svolgere durante la produzione o il monitoraggio del processo.

Inoltre è un documento vivo perché dovrebbe essere periodicamente aggiornato poiché i metodi e i controlli per il processo possono sempre migliorare durante tutto il ciclo di vita del prodotto.

L'uso di un control plan aiuta a ridurre o eliminare gli sprechi in un processo e riesce a migliorare la qualità del prodotto identificando le fonti di variazione in un processo e stabilendo controlli per monitorarle.

Inoltre sono documenti che sono attualmente utilizzati per garantire la qualità del prodotto nel settore automobilistico, aerospaziale, attrezzature agricole, attrezzature pesanti e in molti altri settori in tutto il mondo, è spesso anche un requisito del Production Part Approval Process (PPAP) per i fornitori delle aziende in questi settori.

CAPITOLO 5 – BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

5.1 BIBLIOGRAFIA.

- Abdelgawad, M., & Fayek, A. R. (2010). Risk management in the construction industry using combined fuzzy FMEA and fuzzy AHP. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136, 1028–1036.
- Ben-Daya, M., & Raouf, A. (1996). A revised failure mode and effects analysis model. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 13, 43–47.
- Bevilacqua, M., Braglia, M., & Gabbrielli, R. (2000). Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant. *Quality and Reliability Engineering International*, 16, 313–324.
- Bowles, J. B., & Peláez, C. E. (1995). Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 50, 203–213.
- Braglia, M. (2000). MAFMA: multi-attribute failure mode analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 17, 1017–1033.
- Braglia, M., & Bevilacqua, M. (2000). Fuzzy modelling and analytical hierarchy processing as a means of quantifying risk levels associated with failure modes in production systems. *Technology, Law and Insurance*, 5, 125–134
- Braglia, M., Fantoni, G., & Frosolini, M. (2007). The house of reliability. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 24, 420–440.
- Braglia, M., Frosolini, M., & Montanari, R. (2003b). Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis. *Quality and Reliability Engineering International*, 19, 425–443.
- Chang, C. L., Wei, C. C., & Lee, Y. H. (1999). Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory. *Kybernetes*, 28, 1072–1080.
- Chin, K. S., Wang, Y. M., Poon, G. K. K., & Yang, J. B. (2009a). Failure mode and effects analysis by data envelopment analysis. *Decision Support Systems*, 48, 246–256.
- Chin, K. S., Wang, Y. M., Poon, G. K. K., & Yang, J. B. (2009b). Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach. *Computers & Operations Research*, 36, 1768–1779.
- Dong, C. (2007). Failure mode and effects analysis based on fuzzy utility cost estimation. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 24, 958–971.

- Failure mode and effects analysis, FMEA handbook, FORD DESIGN INSTITUTE.
- Franceschini, F., & Galetto, M. (2001). A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA. *International Journal of Production Research*, 39, 2991–3002.
- Gabbriellini, F. Z. (2011). ANP/RPN: A Multi Criteria Evaluation of the Risk Priority Number. *Quality and Reliability Engineering International*, 28(1), 85-104.
- Gandhi, O. P., & Agrawal, V. P. (1992). FMEA—A diagraph and matrix approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 35, 147–158.
- Garcia, P. A. A., Schirru, R., & Frutuoso Emelo, P. F. (2005). A fuzzy data envelopment analysis approach for FMEA. *Progress in Nuclear Energy*, 46, 359–373.
- Gargama, H., & Chaturvedi, S. K. (2011). Criticality assessment models for failure mode effects and criticality analysis using fuzzy logic. *IEEE Transactions on Reliability*, 60, 102–110.
- Gilchrist, W. (1993). Modelling failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 10, 16–23.
- H.C. Liu, L. L. (2012). Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. *Expert Systems with Applications*
- Hu-Chen Liu, L. L. (2013, February 1). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 828-838.
- Liu, H. C., Liu, L., Bian, Q. H., Lin, Q. L., Dong, N., & Xu, P. C. (2011). Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory. *Expert Systems with Applications*, 38, 4403–4415.
- J. Yang, H. H. (2011, December). Risk evaluation in failure mode and effects analysis of aircraft turbine rotor blades using Dempster–Shafer evidence theory under uncertainty. *Engineering Failure Analysis*, 18(8), 2084-2092.
- Keskin, G. A., & Özkan, C. (2009). An alternative evaluation of FMEA: Fuzzy ART algorithm. *Quality and Reliability Engineering International*, 25, 647–661.
- K.H. Chang, C. C. (2010). Reprioritization of failures in a silane supply system using an intuitionistic fuzzy set ranking technique.
- Nakajima S., 1988, *Introduction to Total Productive Maintenance (TPM)*, Productivity Press, Cambridge, MA.
- Norma SAE J 1739, Society of Automotive Engineers, Warrendale, U.S.A., 1999

- Pelaéz, C. E., & Bowles, J. B. (1996). Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure modes and effects analysis. *Information Sciences*, 88, 177–199.
- Pillay, A., & Wang, J. (2003). Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering & System Safety*, 79, 69–85.
- Puente, J., Pino, R., Priore, P., & de la Fuente, D. (2002). A decision support system for applying failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 19, 137–150.
- Sankar, N. R., & Prabhu, B. S. (2001). Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 18, 324–336.
- Sant'Anna, A. P. (2012). Probabilistic priority numbers for failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 29, 349–362.
- Seyed-Hosseini, S. M., Safaei, N., & Asgharpour, M. J. (2006). Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique. *Reliability Engineering & System Safety*, 91, 872–881.
- Shahin, A. (2004). Integration of FMEA and the Kano model: An exploratory examination. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 21, 731–746.
- Tay, K. M., & Lim, C. P. (2006a). Fuzzy FMEA with a guided rules reduction system for prioritization of failures. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 23, 1047–1066.
- von Ahsen, A. (2008). Cost-oriented failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25, 466–476.
- Wang, A. P. (2003). Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering and System Safety*, 69-85.
- Wang, J., Ruxton, T., & Labrie, C. R. (1995). Design for safety of engineering systems with multiple failure state variables. *Reliability Engineering & System Safety*, 50, 271–284.
- Wang, Y. M., Chin, K. S., Poon, G. K. K., & Yang, J. B. (2009b). Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert Systems with Applications*, 36, 1195–1207.
- Xiao, N. C., Huang, H. Z., Li, Y. F., He, L. P., & Jin, T. D. (2011). Multiple failure modes analysis and weighted risk priority number evaluation in FMEA. *Engineering Failure Analysis*, 18, 1162–1170.

- Xu, K., Tang, L. C., Xie, M., Ho, S. L., & Zhu, M. L. (2002). Fuzzy assessment of FMEA for engine systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 75, 17–29.
- Yang, Z., Bonsall, S., & Wang, J. (2008). Fuzzy rule-based Bayesian reasoning approach for prioritization of failures in FMEA. *IEEE Transactions on Reliability*, 57, 517–528.
- Y. Geum, Y. C. (2011, December). A systematic approach for diagnosing service failure: Service- specific FMEA and grey relational analysis approach. *Mathematical and Computer Modelling*, 54(11-12), 3126-3142.
- Zhang, Z. F., & Chu, X. N. (2011). Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 38, 206–214.

5.2 SITOGRAFIA.

www.skf.com

www.sixsigmaperformance.it

www.mitconsulting.it

www.quality-one.com