



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE**

---

**Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura**  
**Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale**

**TESI DI LAUREA TRIENNALE**

**Analisi FMEA per la valutazione del sistema frenante  
di un veicolo da competizione Formula Student**

**Relatore**

Prof. Marco Sartor

**Laureando**

Enrico Dal Bò

---

Anno Accademico 2022/23



# Sommario

La Formula Student è una competizione internazionale dove ogni anno diversi team provenienti da atenei di tutto il mondo si sfidano con le loro monoposto in prove statiche e dinamiche. Dall'ottobre del 2021 anche l'ateneo di Udine ha deciso di prendere parte a queste competizioni progettando e realizzando un veicolo elettrico che ha debuttato in pista nel luglio 2023.

Nel veicolo si trovano diversi sistemi che ne permettono il controllo ed è fondamentale che questi siano affidabili, sicuri e performanti al fine di poter superare le ispezioni tecniche e poter competere contro gli altri atenei. In questa tesi il focus sarà sul sistema frenante e verrà effettuata una Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) mirata all'individuazione delle modalità di guasto che possono colpire l'apparato, stimarne una gravità e proporre delle azioni correttive che possano in qualche modo andare a ridurre il rischio che si verifichino e le eventuali conseguenze.

I risultati ottenuti evidenzieranno come l'adozione delle azioni correttive proposte sia fondamentale nell'aumento dell'affidabilità del sistema e come la loro adozione non influenzi notevolmente in termini economici e temporali la realizzazione del veicolo.

# Indice

1	Introduzione .....	7
1.1	Contesto.....	7
1.2	Obiettivi del Progetto .....	7
1.3	Struttura della Tesi .....	8
2	Analisi della Letteratura.....	9
2.1	L'Analisi FMEA.....	9
2.1.1	Il Risk Priority Number.....	10
2.1.2	Costruzione di una FMEA .....	12
2.2	Qualità nell'industria automobilistica .....	13
3	UNIUD E-Racing Team.....	15
3.1	La Formula Student .....	15
3.2	La squadra UNIUD .....	17
3.3	Il veicolo.....	19
4	Analisi FMEA .....	20
4.1	L'Analisi.....	20
4.1.1	Definizione del Processo.....	20
4.1.2	Identificazione dei potenziali guasti e dei loro effetti.....	21
4.1.3	Valutazione della gravità, della probabilità di occorrenza e della probabilità di rilevamento per ciascun guasto identificato e calcolo del RPN ..	25
4.1.4	Classificazione dei guasti in base alla priorità .....	27
4.2	Azioni correttive e miglioramenti .....	28
4.2.1	Proposta di azioni correttive per guasti con moderato rischio .....	28
4.2.2	Proposta di azioni correttive per guasti con alto rischio .....	29
4.2.3	Proposta di azioni correttive per guasti con rischio critico .....	31
4.2.4	Valutazione delle implicazioni economiche e temporali delle azioni correttive proposte.....	33
5	Conclusioni .....	37
	Bibliografia .....	38
	Sitografia.....	39

## **Indice delle Figure**

Figura 1 - Panoramica delle squadre coinvolte nella competizione tedesca 2023 .....	15
Figura 2 - Monoposto dell'Università di Udine che affronta il Brake Test.....	16
Figura 3 - Foto squadra UNIUD E-Racing Team alla competizione spagnola presso il Circuito di Catalunya .....	17
Figura 4 - Monoposto UNIUD E-Racing Team alla presentazione del 6 giugno 2023 .....	19
Figura 5 - Panoramica su disco e pinza impianto frenante monoposto UNIUD.....	20

## Indice delle Tabelle

Tabella 1 - Esempio di analisi degli effetti di un guasto (Chiarini e Vicenza, 2004)	10
Tabella 2 - Analisi probabilità di guasto (Chiarini e Vicenza, 2004)	11
Tabella 3 - Analisi della rilevabilità dei guasti (Chiarini e Vicenza, 2004)	11
Tabella 4 - FMEA worksheet	12
Tabella 5 - FMEA worksheet parziale dopo l'individuazione dei guasti e calcolo RPN	25
Tabella 6 - Classificazione dei guasti in base al livello di criticità	28
Tabella 7- Valutazione costi orari aggiuntivi dovuti all'implementazione delle azioni correttive	34
Tabella 8 - Valutazione costi materiali aggiuntivi dovuti all'implementazione delle azioni correttive	34
Tabella 9 - Valutazione dei costi aggiuntivi dovuti all'implementazione delle azioni correttive	35
Tabella 10 - FMEA Worksheet valutazione impianto frenante	36

## Introduzione

### 1.1 Contesto

Dall'ottobre del 2021 alcuni studenti dell'Università degli Studi di Udine hanno deciso di collaborare nella realizzazione di un veicolo da competizione Formula Student, ovvero una monoposto in stile formula a trazione elettrica. Il progetto ha visto una crescita costante, coinvolgendo attualmente circa 70 studenti.

Il primo veicolo realizzato da UNIUD E-Racing Team ha debuttato in pista nel luglio 2023 dopo un anno e mezzo di sviluppo dando molta soddisfazione al team in quanto è riuscito a superare le ispezioni tecniche.

Attualmente, il team è impegnato nella realizzazione del secondo veicolo, destinato alle competizioni del 2024. Il calendario prevede una gara ad agosto presso il circuito di Hockenheim in Germania, seguita da un'altra competizione a settembre nel circuito italiano di Varano De' Melegari. In questa fase cruciale di sviluppo, è fondamentale un'analisi approfondita dell'impianto frenante, volta a garantire la massima sicurezza e prestazioni ottimali durante le competizioni.

### 1.2 Obiettivi del Progetto

L'obiettivo di questa tesi è andare a realizzare un'analisi FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) sul sistema frenante del veicolo da competizione Formula Student.

L'apparato frenante ricopre un ruolo cruciale nel garantire la sicurezza del pilota e delle persone che si trovano lungo il tracciato in quanto garantisce la possibilità di arrestare in modo praticamente istantaneo la marcia del veicolo.

Oltre all'aspetto della sicurezza il funzionamento di tale sistema è fondamentale per permettere al veicolo di partecipare alle prove dinamiche delle competizioni in quanto nelle ispezioni tecniche è presente il brake test che mira a verificare la capacità del veicolo di arrestare la sua corsa all'interno di un'area delimitata. Se il veicolo non superasse questa prova non potrebbe prendere parte alla competizione in pista.

Con l'analisi FMEA descritta di seguito si vuole andare ad aumentare l'affidabilità e sicurezza del sistema analizzando i potenziali modo di guasto del sistema e classificarli in base alle potenziali conseguenze che questi potrebbero comportare.

Il progetto non si limita all'individuazione delle problematiche ma vuole proporre anche delle soluzioni, infatti, verranno proposte delle azioni correttive per quelle modalità di guasto che ricoprono aree a rischio moderato, alto e critico e le conseguenze economiche e temporali che queste comportano nella realizzazione del veicolo.

## 1.3 Struttura della Tesi

La tesi è essenzialmente divisa in tre parti:

- Capitolo 2 dove viene presentata la letteratura attuale sull'analisi FMEA e sulla sua corretta esecuzione, insieme alla descrizione dei principali aspetti. Inoltre, si esploreranno le pratiche di gestione della qualità nel settore automobilistico, caratterizzato da normative rigorose e specifiche in materia;
- Capitolo 3 dove verrà illustrata cos'è la Formula Student a livello globale, successivamente il focus si sposterà sulla squadra corse dell'Università degli Studi di Udine dalla sua creazione alle sue prime gare disputatesi durante l'estate del 2023 per poi parlare del primo veicolo realizzato.
- Capitolo 4 ovvero il fulcro di questa tesi dove viene messo sotto la lente d'ingrandimento l'impianto frenante della monoposto di Formula Student e vengono ricercate le sue possibili modalità di guasto per studiarle e proporre delle azioni correttive.

## Analisi della Letteratura

### 2.1 L'Analisi FMEA

La Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) è uno strumento utilizzato per identificare e prevenire problematiche di varia natura. Lo scopo principale della tecnica è aumentare il livello di servizio offerto al cliente, eliminare e ridurre i costi legati al malfunzionamento, aumento della sicurezza, rafforzare l'immagine aziendale attraverso un sistema di gestione e monitoraggio della qualità stabile e dettagliato.

La prima applicazione della tecnica risale al 1949 negli Stati Uniti quando in un progetto militare venne utilizzata per valutare gli effetti di possibili guasti. In questo primo progetto i modi di guasto sono stati identificati e ordinati considerando due aspetti: l'impatto sul successo della missione e la sicurezza delle persone coinvolte.

Alcuni anni più tardi l'industria automobilistica, grazie al contributo di Chrysler Corporation, Ford Motor Company e General Motors Corporation, ha offerto un contributo decisivo nel formalizzare le caratteristiche della FMEA come strumento per il miglioramento della qualità.

Oggi la tecnica viene utilizzata in molteplici settori ed è considerata uno strumento di prevenzione; infatti, molti clienti, come Ikea, la richiedono ai loro fornitori in modo da monitorarne il modus operandi ed avere così delle garanzie.

Per l'efficacia di questa soluzione si devono verificare alcune condizioni (Stamatis, 1995):

- 1) I problemi devono essere distinguibili al fine di poterne identificare le priorità;
- 2) È necessario conoscere il cliente: questo permette di identificare un progetto FMEA allineato alle proprie esigenze;
- 3) È essenziale conoscere le funzioni coinvolte e gli obiettivi del processo oggetto di analisi;
- 4) È necessario adottare un approccio dinamico: affinché lo strumento conservi la sua efficacia è indispensabile un aggiornamento continuo dei suoi driver.

Al fine di rispettare i principi sopra elencati un'analisi FMEA deve quindi:

- Identificare i modi di guasto;
- Identificare le cause e gli effetti delle "failure";
- Riuscire a dare una scala di rischio ai diversi tipi di eventi nocivi;
- Fornire gli strumenti per le azioni correttive/preventive e follow-up delle failure potenziali.

Essendo questo uno strumento di prevenzione di potenziali danni è opportuno che essa venga predisposta a tempo debito, in particolare è opportuno avviare un progetto FMEA non appena nuovi sistemi, progetti, prodotti e processi vengono ideati, subiscono variazioni o quando per essi si trovano nuove applicazioni.

## 2.1.1 Il Risk Priority Number

Il Risk Priority Number, anche noto con l'acronimo RPN, è un indicatore che rappresenta quanto un possibile evento possa essere pericoloso. Secondo quanto previsto dal RPN vi sono tre componenti che aiutano a definire la priorità, e quindi la pericolosità, di un evento nocivo:

- Severity (S), rappresenta la gravità del danno;
- Occurrence (O), rappresenta la probabilità di accadimento;
- Detection (D), rappresenta la rilevabilità.

Il Risk Priority Number è dato dalla relazione (Stamatis, 1995):

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

ad ogni parametro è attribuito un valore da 1 a 10 di conseguenza l'indice RPN può assumere valori da 1 (nessun rischio) a 1000 (evento catastrofico).

Analizziamo ora ciascuna delle variabili che determinano il Risk Priority Number.

Severity è un indicatore che rappresenta quanto grave possa essere la conseguenza potenziale di un evento. Tanto più una "failure" è imprevedibile ed è capace di bloccare il sistema o ad alterare la produzione, tanto maggiore sarà il punteggio ad esso associato. (Tabella 1)

EFFETTO DEL GUASTO	GRAVITA'	INDICE
Gravissimo senza preavviso	Blocco del sistema senza preavviso	10
Gravissimo con preavviso	Blocco del sistema ma viene dato il tempo utile all'utilizzatore per reagire	9
Molto grave	Sistema funzionante con perdita delle funzioni principali	8
Grave	Sistema funzionante ma con riduzione notevole delle funzioni principali	7
Moderato	Sistema funzionante ma con riduzione minore delle funzioni principali. I clienti non sono soddisfatti	6
Basso	Sistema funzionante ma con riduzione minore delle funzioni principali. I clienti rimangono non soddisfatti	5
Molto Basso	Guasti minori che non intaccano le funzioni principali. Il difetto viene percepito dalla maggior parte dei clienti	4
Minore	Guasti minori che non intaccano le funzioni principali. Il difetto viene percepito dal cliente medio	3
Insignificante	Guasti minori che non intaccano le funzioni principali. Il difetto viene percepito dai clienti più attenti	2
Nessuno	Assenza di guasti o altri difetti	1

Tabella 1 - Esempio di analisi degli effetti di un guasto (Chiarini e Vicenza, 2004)

Occurrence è un indicatore che stima quanto frequentemente la causa di un guasto possa accadere determinando un problema (Rhee, 2003). La Tabella 2 ci aiuta a

comprendere come viene attribuito un valore di occurrence in relazione a specifici tassi di guasto.

PROBABILITA' DI GUASTO	TASSO DI GUASTO	INDICE
Molto alta: il tasso è praticamente inevitabile	$\geq 1$ su 2 1 su 3	10 9
Alta: guasti ripetitivi	1 su 8 1 su 20	8 7
Moderata: guasti occasionali	1 su 80 1 su 400 1 su 2000	6 5 4
Bassa: progetti precedenti hanno dato luogo ad un basso numero di errori	1 su 15000 1 su 150000	3 2
Remota: probabilità di guasto pressochè nulla	$< 1$ su 150000	1

Tabella 2 - Analisi probabilità di guasto (Chiarini e Vicenza, 2004)

Detection è un indicatore per il quale esistono due chiavi di lettura:

- Misura la capacità di identificare un potenziale errore progettuale prima che il componente o il sistema sia rilasciato per la produzione, Tabella 3;
- Stima della possibilità che il cliente si accorga del problema.

Nel nostro caso andremo ad utilizzare la prima chiave di lettura in quanto prima di produrre un pezzo per la monoposto è sempre stata realizzata una verifica al CAD.

RILEVABILITA'	GRAVITA'	INDICE
Impossibile	Le cause dei guasti non sono rilevabili o mancano i controlli di progettazione	10
Molto remota	Capacità molto remota dei controlli di progetto di rilevare le cause di guasto	9
Remota	Capacità remota dei controlli di progetto di rilevare le cause di guasto	8
Molto Bassa	Capacità molto bassa dei controlli di progetto di rilevare le cause di guasto	7
Bassa	Capacità bassa dei controlli di progetto di rilevare le cause di guasto	6
Media	Media capacità dei controlli di progetto di rilevare le cause di guasto	5
Abbastanza alta	Capacità abbastanza alta dei controlli di progetto di rilevare le cause di guasto	4
Alta	Alta capacità molto remota dei controlli di guasto di rilevare le cause di guasto	3
Molto alta	Capacità molto alta dei controlli di progetto di rilevare le cause di guasto	2
Certa	I controlli di progettazione sicuramente rileveranno le cause di guasto	1

Tabella 3 - Analisi della rilevabilità dei guasti (Chiarini e Vicenza, 2004)

Dopo che il RPN è stato determinato andranno individuate quattro aree: rischio minore, moderato, alto e critico. Nella zona di rischio minore non vengono previste azioni correttive, nella zona di rischio moderato vengono prese azioni limitate, nella zona ad alto rischio si definiscono delle azioni correttive mentre nelle zone a rischio critico è necessario definire un piano d'azione e grandi cambiamenti nel sistema. Nel caso di guasti con il medesimo RPN, tipicamente, prima ci si occupa di quelli con maggior severity, per poi passare alla detection ed infine all'occurance.

## 2.1.2 Costruzione di una FMEA

L'intero processo di una FMEA deve essere documentato e registrato nel FMEA worksheet (Tabella 4). Questo foglio ha un duplice fine: serve a raccogliere tutti i dati del processo ed è un utile strumento di comunicazione nei confronti di portatori d'interesse interni ed esterni. Il formato di seguito proposto è un FMEA worksheet personalizzato che sarà quello che poi verrà utilizzato per valutare il sistema frenante di una monoposto di Formula Student.

FAILURE	SEVERITY - S	OCCURRANCE - O	DETECTION - D	RISK PRIORITY NUMBER - RPN	AZIONI CORRETTIVE	NUOVO SEVERITY - S'	NUOVO OCCURRANCE - O'	NUOVO DETECTION - D'	NUOVO RISK PRIORITY NUMBER - RPN'

Tabella 4 - FMEA worksheet

Il processo di realizzazione di un'analisi FMEA può essere diviso in dieci fasi (McDermott, 1996):

- 1) Definizione del Processo, viene analizzato il contesto in modo da poter comprendere meglio come svolgere l'analisi;
- 2) Brainstorming sui potenziali modi di guasto, vengono raccolte tutte le possibili modalità di guasto che vengono in mente al singolo o al gruppo che si occuperà dell'analisi, successivamente queste vengono inserite all'interno della colonna Failure del FMEA worksheet;
- 3) Elenco dei potenziali effetti di ogni modalità di guasto, cosa può provocare ogni possibile modalità di guasto;
- 4) Assegnare un punteggio di Severity ai potenziali effetti, viene assegnato un punteggio da 1 a 10 ad ogni possibile guasto basandosi sulla Tabella 2.1;
- 5) Assegnare un punteggio di Occurrence ai potenziali effetti, viene assegnato un punteggio da 1 a 10 ad ogni possibile guasto basandosi sulla Tabella 2.2;

- 6) Assegnare un punteggio di Detection ai potenziali effetti, viene assegnato un punteggio da 10 a 1 ad ogni possibile guasto basandosi sulla Tabella 2.3;
- 7) Viene calcolato l'indice RPN;
- 8) Riordinare i modi di guasto in base alla priorità, si parte da quelli con RPN maggiore e si scende man mano. In questo punto è necessario fissare un limite di punteggio per escludere dall'analisi i potenziali guasti di basso interesse.
- 9) Ricerca di soluzioni per ridurre e/o eliminare i guasti, una volta individuate le possibili soluzioni vanno riassegnati i punteggi di Severity, Occurrence e Detection. Solitamente la riduzione della gravità del danno è difficile da modificare quindi si cerca di agire più su tasso di guasto e possibilità che il cliente si accorga del danno;
- 10) Calcolo del nuovo Risk Priority Number dopo aver preso le azioni correttive.

## 2.2 Qualità nell'industria automobilistica

Prima del 1999, ogni casa automobilistica adottava un proprio schema di certificazione per i propri fornitori. In Francia, ad esempio, si utilizzava l'EAQF 1994, in Germania la guida VDA 6.1, in Italia la guida ANFIA AVSQ 1994, e negli Stati Uniti la QS 9000.

A partire dalla metà degli anni '90, i costruttori europei si resero conto della necessità di uniformare i sistemi di valutazione e certificazione lungo la catena di approvvigionamento. Era diventato problematico possedere due certificazioni diverse per soddisfare le richieste europee e statunitensi, specialmente con l'internazionalizzazione di fornitori e fonti di approvvigionamento. Il mantenere entrambe le certificazioni comportava un dispendio di energie e risorse nel tentativo di conformarsi a due modelli diversi.

L'adozione della ISO 9001 non era sufficiente, poiché, anche con la versione del 1994, risultava troppo flessibile e basilare, senza collegamenti specifici con il settore automobilistico che, nel frattempo, aveva sviluppato metodi applicativi specifici.

Nel marzo del 1999 è stata introdotta la ISO/TS 16949, uno standard definito per l'industria automobilistica. Questa specifica tecnica è stata sviluppata dalla IATF (International Automotive Task Force) con il contributo del comitato tecnico ISO 176. La sua creazione mirava a consentire e favorire il global sourcing, oltre a migliorare la qualità dei prodotti e dei processi, adottando un approccio orientato al cliente e al miglioramento continuo. La struttura dei documenti si basa sulla ISO 9001, richiedendo quindi il possesso di tale certificazione per ottenere la ISO/TS 16949.

La norma ha subito modifiche nel corso degli anni, con nuove edizioni pubblicate. Nel 2002, sono state introdotte tre metodologie fondamentali: FMEA, SPC (Statistical Process Control) e MSA (Measurement System Analysis). Nel 2009 è stata rilasciata una terza versione, mentre l'ultima edizione è del 2016, quando la norma è stata rinominata da ISO 16949 a IATF 16949, con significativi aumenti dei requisiti nelle fasi di progettazione e produzione.

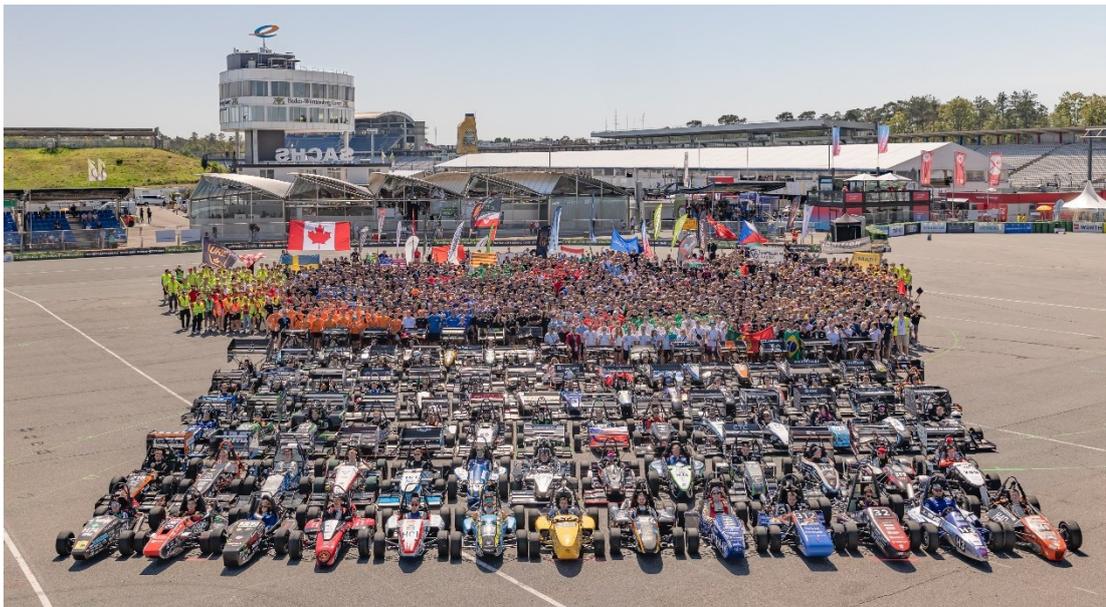
La IATF 16949, basandosi sulla ISO 9001:2015, ha introdotto un forte orientamento nella gestione del rischio, con l'obiettivo di sensibilizzare le aziende a valutare attentamente le condizioni del contesto in cui operano.

Secondo i dati ANFIA (Associazione Nazionale Filiera Industria Automobilistica), la IATF 16949 è il terzo schema di certificazione più utilizzato nel mondo, seguono l'ISO 9001 e l'ISO 14001.

## UNIUD E-Racing Team

### 3.1 La Formula Student

La Formula Student è una competizione internazionale che coinvolge studenti universitari di ingegneria da tutto il mondo nella progettazione, costruzione e realizzazione di prototipi di veicoli a combustione ed elettrici in stile formula. In questa competizione gli studenti possono mettere in pratica le conoscenze teoriche acquisite durante il percorso accademico in un contesto pratico ed altamente competitivo tenendo in considerazione vari aspetti della progettazione inclusi l'ingegneria, l'estetica, la sicurezza e l'efficienza del veicolo.



*Figura 1 - Panoramica delle squadre coinvolte nella competizione tedesca 2023*

La prima competizione di Formula Student si è tenuta nel 1981 ad Austin, in Texas, negli Stati Uniti dove era stata chiamata “SAE Mini Indy” organizzata dalla Society of Automotive Engineers (SAE). Nel corso degli anni, la competizione è cresciuta e si è evoluta, diffondendosi in tutto il mondo e coinvolgendo università da diverse nazioni. In Europa la prima competizione si è svolta nel Regno Unito nel 1998. Organizzata da Institution of Mechanical Engineers (IMechE), questa competizione è stata ispirata alla formula SAE degli Stati Uniti ed è stata denominata “Formula Student UK”. Il successo della competizione ha portato ad una rapida espansione tra gli altri paesi europei e nel resto del mondo, ogni paese ha sviluppato la propria versione della competizione adattando regole e requisiti per soddisfare le esigenze e le risorse locali.

La competizione è strutturata in varie prove, ognuna delle quali mette alla prova diverse abilità degli studenti. Possiamo distinguere due tipologie di prove: quelle statiche e quelle dinamiche. Le prove statiche possono essere divise in tre eventi:

- Design Event, la squadra deve illustrare, ad una commissione di giudici, come sono state prese le decisioni progettuali che hanno guidato la realizzazione della monoposto;
- Business Plan, si tratta della presentazione, sempre a dei giudici, di un'idea imprenditoriale relativa alla monoposto e in generale al settore dell'automotive. Gli studenti devono realizzare un business plan in cui includere analisi di mercato e della coerenza, piani organizzativi e studi sulla fattibilità economico-finanziaria;
- Cost Event, consiste in un report, inviato prima della competizione, che documenta ogni componente costituente la monoposto con il relativo costo. Questo evento permette di valutare il costo del prototipo e l'abilità del team nel produrre una stima accurata dei costi di progettazione e produzione.

Prima di passare alle prove dinamiche il veicolo deve superare le ispezioni tecniche ovvero il team dovrà dimostrare che dal punto di vista meccanico ed elettrico il veicolo è sicuro e quindi può competere con gli altri.



*Figura 2 - Monoposto dell'Università di Udine che affronta il Brake Test*

Le prove dinamiche prevedono diversi eventi dove il punteggio viene attribuito in base al tempo che il veicolo impiega a completare ognuna di esse:

- Acceleration: prova lungo un percorso rettilineo di 75 metri;
- Skid Pad: prova su un circuito a forma di "otto" dove veicolo e pilota vengono sottoposti a forti accelerazioni laterali;
- Autocross: sprint in un circuito composto da brevi rettilinei, curve, slalom e chicanes, il risultato ottenuto in questa prova, oltre ad attribuire punti,

determina anche l'ordine di partenza dell'endurance, chi impiega più tempo partirà per primo e poi si va a scalare;

- Endurance, prova conclusiva che chiude l'evento dove due piloti del team si alternano nella guida del veicolo su un tracciato di 22 chilometri, circa, molto simile al tracciato dell'autocross.

Al termine dell'endurance il veicolo sarà sottoposto al “parco chiuso” ovvero nessuno può toccarlo fino a quando i giudici non verificheranno l'integrità della monoposto e valuteranno l'efficienza del veicolo misurandone la carica della batteria e le correnti generate durante la gara. Queste ispezioni attribuiranno un ulteriore punteggio alla squadra sotto la voce di Efficiency.

Questo tipo di competizione offre agli studenti l'opportunità di fare networking con professionisti dell'industria automobilistica e di interagire con aziende sponsor, questi contatti possono portare opportunità di stage, lavoro e collaborazioni future.

Oltre alle competenze tecniche e pratiche gli studenti sviluppano un'attitudine imprenditoriale, imparano a lavorare come squadra e si preparano per una carriera nell'industria automobilistica.

### 3.2 La squadra UNIUD

Il team dell'Università di Udine è nato nell'ottobre 2021 da un gruppo di studenti provenienti da diversi dipartimenti dell'Università degli studi di Udine con il fine di progettare, costruire e mettere in pista una monoposto da competizione in stile formula, spinti dalla passione per la tecnologia, l'ingegneria e la sostenibilità.



Figura 3 - Foto squadra UNIUD E-Racing Team alla competizione spagnola presso il Circuito di Catalunya

Ad oggi il team conta circa 70 membri che sono divisi in vari reparti organizzati per la realizzazione del veicolo. I reparti presenti nel team ad oggi sono:

- Management, serve per mettere in comunicazione tutti i reparti in modo da raggiungere gli obiettivi prefissati, ne fanno parte i faculty advisor, il team leader e i direttori tecnici;
- Aerodinamica, si occupa della progettazione e realizzazione delle appendici aerodinamiche, della carena e dei sistemi di raffreddamento della vettura
- Business, si occupa della realizzazione del Business Plan e del Cost Report che costituiscono due delle tre prove statiche;
- Dinamica del Veicolo, ha l'obiettivo di progettare e realizzare di tutti i componenti che influiscono direttamente sul comportamento della vettura in pista ma anche della distribuzione dei pesi e configurazione del veicolo seguendo i feedback dei piloti;
- Elettronica, realizza il cablaggio, lo sviluppo firmware delle schede destinate all'acquisizione dati di telemetria e scelta dei sensori. Tutti i dati serviranno poi per apportare al sistema veicolo le opportune modifiche per migliorare le prestazioni e ottenere anche un riscontro sui miglioramenti ricercati;
- Powertrain, ha il compito di dimensionare al meglio l'elettronica di potenza e ottimizzare al meglio il sistema di movimentazione del veicolo;
- Telaio, segue la progettazione del telaio e delle interfacce del pilota con la monoposto, come ad esempio pedaliera e volante, prestando la massima attenzione sulla resistenza strutturale e sicurezza
- Marketing, si occupa dalla gestione dei profili social del team e dei rapporti con gli sponsor.

Il team fa sede nel laboratorio LINEA all'interno dell'Uniud Lab Village spazio dell'università di Udine dove il mondo accademico ed il mondo dell'industria possono collaborare e condividere strutture, strumenti e risorse per lo sviluppo.

Durante l'anno accademico 2022/23 la squadra ha preso parte a due competizioni, una in Italia nel circuito di Varano de Melegari e una in Spagna nel Circuito di Catalunya.

La competizione italiana è stata la prima in assoluto per il Team che ha dimostrato di essere all'altezza delle altre squadre passando fin dal primo anno le ispezioni tecniche che gli hanno permesso di prendere parte alle prove dinamiche. Nel complessivo la squadra si è classificata al ventesimo posto su un totale di trenta squadre che hanno gareggiato nella categoria elettrica della competizione italiana e al dodicesimo su un totale di diciannove squadre nella competizione spagnola.

Al termine della competizione italiana la squadra ha ricevuto un riconoscimento dal gruppo teoresi per il miglior sviluppo di processo elettronico.

### 3.3 Il veicolo

Il 6 giugno 2023 il team dell'Università di Udine ha presentato al pubblico il suo primo prototipo denominato Serena I.



Figura 4 - Monoposto UNIUD E-Racing Team alla presentazione del 6 giugno 2023

Ci sono voluti circa due anni di lavoro prima di raggiungere questo traguardo e il sostegno di diverse aziende oltre che a quello dell'Università.

La monoposto misura 3,02 metri di lunghezza e 1,45 metri di larghezza, raggiunge un'altezza massima di 1,45 metri. Il motore, di natura elettrica, ha una potenza di 80 chilowatt e raggiunge i 120 chilometri orari.

L'investimento complessivo nel progetto è stato di circa 120mila euro coperto in parte dall'ateneo ma grazie anche al sostegno di altre 15 aziende tra le quali spiccano Tesla e Fondazione Pittini come principali sponsor, dopo l'università.

## Analisi FMEA

### 4.1 L'Analisi

#### 4.1.1 Definizione del Processo



*Figura 5 - Panoramica su disco e pinna impianto frenante monoposto UNIUD*

Il sistema frenante riveste un ruolo essenziale nel contesto del veicolo in quanto rappresenta l'unico modo per il pilota di arrestare immediatamente il moto del veicolo. Un' alternativa consisterebbe nell'utilizzo del sistema rigenerativo, il quale sfrutta l'inerzia del veicolo per ricaricare le batterie, tuttavia, va considerato che questa modalità non offre un arresto istantaneo come quello ottenuto agendo sul pedale del freno. È pertanto essenziale condurre un'analisi FMEA approfondita sul sistema frenante per garantire innanzitutto la sicurezza del pilota e delle persone lungo il tracciato inoltre, è cruciale per prevenire danni al veicolo in caso di potenziale impatto con gli elementi presenti nel percorso.

Qualsiasi disfunzione nel sistema frenante comporterebbe la squalifica immediata del veicolo dalla gara o dalla prova. Nel corso del Brake Test, il veicolo viene escluso dalla competizione se non è in grado di fermarsi all'interno di un'area delimitata, bloccando tutte e quattro le ruote dopo aver eseguito un'accelerazione di circa trenta metri. Questa prova può essere ripetuta, ma deve essere superata prima delle prove

dinamiche. Allo stesso modo, il veicolo rischia la squalifica durante le prove dinamiche se i giudici rilevano qualsiasi perdita di liquido dal sistema frenante, anche se minima.

In conclusione, il sistema frenante assume una fondamentale importanza per garantire la sicurezza delle persone, minimizzare i costi derivanti da eventuali incidenti e assicurare una partecipazione efficace alle competizioni.

#### **4.1.2 Identificazione dei potenziali guasti e dei loro effetti**

Il confronto con il reparto Dinamica della squadra corse dell'Università di Udine ha permesso di individuare diverse modalità di guasto che comprometterebbero il funzionamento del sistema frenante:

- 1) Bolle d'aria nel sistema, la loro presenza influenza molto le prestazioni del sistema per vari motivi, quali:
  - a. comprimibilità del gas, a differenza del liquido freni l'aria è un liquido comprimibile il che renderebbe il sistema più suscettibile alla compressione traducendosi in una risposta del freno meno diretta;
  - b. cavitazione, la variazione di pressione che le bolle subiscono quando si agisce sul pedale del freno potrebbe causarne l'implosione che può danneggiare le superfici interne dei componenti del sistema compromettendone l'integrità e causando perdite;
  - c. perdita di sensibilità della pedaliera, la risposta del pedale del freno sarebbe molto più morbida e questo influirebbe sulla capacità del pilota di modulare con precisione la forza frenante.
  
- 2) Calibro freno bloccato, ovvero il meccanismo che permette alle pastiglie di agire sul disco ed in questo modo arrestare il moto del veicolo, i possibili effetti sono:
  - a. mancato funzionamento del freno, il bloccaggio impedisce alle pastiglie del freno di aderire correttamente al disco compromettendo l'efficacia del freno;
  - b. perdita di controllo del veicolo, data la non corretta modulazione della forza frenante può verificarsi una perdita di controllo del veicolo durante la fase di frenata, causandone un possibile scontro con le strutture della pista.
  
- 3) Usura pastiglie freno, una mancata manutenzione delle pastiglie comporterebbe perdite ed esporrebbe il veicolo a diversi rischi:
  - a. perdita nelle prestazioni, consumandosi le pastiglie riducono il loro spessore e la loro capacità di generare attrito traducendosi in prestazioni frenanti ridotte a partire da un maggior spazio di arresto della marcia;
  - b. surriscaldamento, l'usura eccessiva può ridurre la capacità delle pastiglie di gestire il calore portando al surriscaldamento del sistema frenante compromettendo l'efficacia e, in alcuni casi, causare danni permanenti al sistema;
  - c. deterioramento disco freno, pastiglie troppo consumate possono danneggiare la superficie del disco freno causandone scanalature che

determinerebbero la necessità di sostituire pastiglie ma anche dischi del sistema aumentandone in modo significativo i costi.

- 4) Le ruote non bloccano durante la frenata d'emergenza, questo tipo di guasto porterebbe alla squalifica del veicolo dalla competizione in quanto è uno dei requisiti per superare il brake test.
- 5) Perdita liquido dalla linea, le conseguenze della perdita di olio sono potenzialmente pericolose in quanto comporterebbero:
  - a. perdita di efficienza frenante, la diminuzione del livello di liquido nel sistema può comprometterne l'efficienza riducendo la capacità di arrestare il veicolo in modo tempestivo e sicuro;
  - b. aumento della distanza d'arresto, la perdita di pressione dovuta alla fuoriuscita di parte del liquido comporta un aumento dello spazio necessario ad arrestare il veicolo;
  - c. squalifica dalla competizione, qualsiasi perdita lungo il sistema frenante comporta la squalifica del veicolo dalla prova;
  - d. pericolo incidenti, una perdita significativa può portare ad un completo fallimento del sistema aumentando il rischio di incidenti e danni sia al veicolo che alle persone coinvolte.
- 6) Collasso della Linea, questo comporterebbe gravi conseguenze rappresentando un significativo rischio per la sicurezza delle persone coinvolte e del veicolo. Alcuni possibili effetti sono:
  - a. perdita di controllo, la perdita di pressione dell'impianto frenante comprometterebbe la capacità del pilota di controllare il veicolo durante le manovre frenanti;
  - b. in situazioni estreme il collasso potrebbe aumentare significativamente il rischio di incidenti.
- 7) Surriscaldamento dei componenti, dovuto all'attrito tra disco e pastiglie principalmente ma anche da un uso prolungato del freno che comporterebbe un flusso continuo del liquido all'interno della linea, possibili conseguenze:
  - a. degrado delle prestazioni di frenata, diminuzione dell'efficienza che influiscono sulla capacità di arrestare il veicolo in modo rapido ed efficace;
  - b. deterioramento dei materiali, i componenti possono risentire delle elevate temperature che ne causerebbero una riduzione della vita utile;
  - c. vaporizzazione liquido freni con conseguente formazione di bolle d'aria;
  - d. rischio d'incendio, in situazioni estreme può provocare l'incendio del sistema soprattutto nella zona di contatto tra disco e pastiglie, come spesso accade durante i pit stop di Formula 1.
- 8) Fallimento BPOS, ovvero il Brake Pedal Over-travel Switch, è un interruttore elettronico di sicurezza situato dietro il pedale del freno e serve per interrompere l'alimentazione elettrica al motore in modo da arrestare il veicolo. Viene azionato in caso di collasso del sistema a viene attivato in modo autonomo dal pedale del freno quando arriva a fine corsa, se questo interruttore

non funziona il veicolo viene squalificato dalla prova dinamica a cui si sta sottoponendo.

- 9) Malfunzionamento pompaggio olio nella linea, il sistema frenante utilizza un fluido, olio per freni, per trasmettere la pressione generata dalla pedalata del freno alle pinze dei freni responsabili dell'azione frenante sulle ruote, alcune conseguenze potrebbero essere:
- perdita di pressione frenante che comporterebbe una risposta inefficace o ritardata quando il pilota agisce sul pedale del freno;
  - aumento della distanza di frenata, una riduzione della pressione potrebbe aumentare la distanza di frenata;
  - squalifica dalla competizione, un malfunzionamento potrebbe portare il veicolo a non superare prove come il Brake Test.
- 10) Rottura del pedale del freno, è il mezzo con cui il pilota può agire sul sistema frenante azionandolo, una sua rottura avrebbe diversi effetti:
- perdita di controllo, il conducente non sarebbe più in grado di modulare la forza frenante in modo adeguato;
  - aumento del tempo di risposta, la mancanza del pedale aumenta il tempo di risposta del pilota riducendo la capacità di evitare collisioni;
  - sistema di frenata inefficiente, con la perdita del pedale verrà compromessa l'efficacia complessiva del sistema frenante, il che mette a rischio la sicurezza del pilota e delle altre persone presenti nel circuito.
- Per fortuna le analisi al computer permettono di simulare il pedale e, in questo modo, ridurre notevolmente i rischi di rottura.
- 11) Usura disco freno, provocata dall'uso prolungato dello stesso disco senza sostituzione o utilizzo di pastiglie usurate, un disco usurato può avere diversi effetti negativi sul sistema frenante:
- aumento del rischio di surriscaldamento, l'usura ridurrebbe la capacità del sistema di dissipare calore generato dalla frenata;
  - usura irregolare delle pastiglie del freno, l'usura del disco del freno influirà negativamente anche sull'usura delle pastiglie del freno;
  - aumento dei rischi di guasto, un disco gravemente usurato potrebbe essere più soggetto a crepe o rotture, aumentando così il rischio di guasti meccanici del sistema frenante;
  - costi di manutenzione, un disco usurato aumenta i costi perché comporterà la sostituzione anche delle pastiglie del freno.
- 12) Pedale del freno scivoloso, dovuto all'uso di un materiale lucido come lo può essere l'alluminio o l'acciaio potrebbe creare delle difficoltà ad usare il freno in modo uniforme. I possibili effetti di un pedale scivoloso possono essere:
- difficoltà di controllo, per il pilota sarebbe difficile mantenere il controllo sulla pressione applicata al freno;
  - rischio di bloccaggio delle ruote, un pedale scivoloso aumenta il rischio di bloccaggio delle ruote, soprattutto in condizioni di frenata intensa. Il

- bloccaggio delle ruote potrebbe provocare la perdita di controllo del veicolo;
- c. difficoltà nelle manovre d'emergenza, durante una frenata brusca per evitare una collisione il pedale scivolo potrebbe complicare le manovre d'emergenza.
- 13) Bilanciamento errato, ovvero come la pressione del fluido viene distribuita tra i freni anteriori e posteriori, un errato bilanciamento può avere diverse conseguenze negative, influenzando le prestazioni complessive e la sicurezza del veicolo. Gli effetti sarebbero:
- a. distanza di frenata ineguale, la distribuzione non uniforme della forza frenante tra le ruote causerebbe una distanza d'arresto ineguale per ogni ruota;
  - b. instabilità durante la frenata, un errato bilanciamento comporterebbe una tendenza del veicolo a scivolare lateralmente durante la frenata;
  - c. usura irregolare dei componenti, pastiglie e dischi potrebbero essere soggetti ad un'usura accelerata e un aumento del calore nei componenti.
- 14) Guasto al sistema di monitoraggio elettronico, la trasmissione non corretta dei dati al server renderebbe difficile andare ad agire sul sistema frenante ad esempio modificandone il bilanciamento.
- 15) Mancanza fluidità pedale, ovvero il pedale non sempre si muove in modo costante tra una frenata e la successiva, questo comporta:
- a. difficoltà nel modulare la forza frenante, il pilota ha difficoltà a modulare con precisione la forza frenante;
  - b. perdita d'efficienza frenante, maggiore distanza d'arresto e minor capacità di arrestare il veicolo in condizioni d'emergenza.
  - c. rischio collisioni, la mancanza di controllo potrebbe aumentare il rischio di andare a sbattere con il veicolo contro oggetti o persone che si trovano attorno ad esso.
- 16) Errato dimensionamento del sistema, può comportare diverse problematiche dal punto di vista della sicurezza del veicolo:
- a. mancanza di efficienza nella riduzione della velocità, se sottodimensionato l'impianto potrebbe non essere in grado di arrestare il moto del veicolo;
  - b. aumento della distanza d'arresto
- Altre problematiche legate all'errato dimensionamento sono l'usura prematura dei componenti come pastiglie e dischi freni, la riduzione delle prestazioni delle prestazioni dovute al modo che un impianto frenante mal dimensionato comporta nell'affrontare le curve della pista. Un impianto non in grado di arrestare il veicolo può comportare anche la squalifica del veicolo dalla gara. Per fortuna oggi tutti questi errori possono essere evitati grazie alle simulazioni al computer del sistema e così poter prendere delle scelte alternative nel caso in cui quelle già prese non soddisfino i requisiti.

- 17) Guasto luce posteriore, è un danno non influisce sulle prestazioni del sistema frenante ma è importante per la sicurezza di tutti e del veicolo in quanto segnala al veicolo che segue che il nostro sta frenando. Non va sottovalutato in quanto il mancato funzionamento di questa luce significa la squalifica del veicolo dalla prova che deve o sta affrontando.

Questi 17 sono i guasti che con l'aiuto del reparto Dinamica siamo riusciti ad individuare nel nostro sistema frenante, nelle fasi successive andremo ad analizzare quali tra questi sono i più critici e che necessitano di una maggior attenzione rispetto agli altri.

#### 4.1.3 Valutazione della gravità, della probabilità di occorrenza e della probabilità di rilevamento per ciascun guasto identificato e calcolo del RPN

Per la valutazione della Gravità, Probabilità d'occorrenza e Probabilità di rilevamento andremo ad utilizzare rispettivamente la Tabella 2.1, la Tabella 2.2 e la Tabella 2.3 introdotte nel capitolo 2 in particolare nel sottocapitolo 2.1.1 dove si parla appunto del calcolo del Risk Priority Number.

Andiamo ad inserire le varie modalità di guasto all'interno della Tabella 2.4 di cui inizialmente considereremo solo le prime cinque colonne per poi completarla nelle fasi successive dell'analisi quando considereremo anche le azioni correttive per i guasti di moderato, alto e critico livello.

N	FAILURE	SEVERITY - S	OCCURRENCE - O	DETECTION - D	RISK PRIORITY NUMBER - RPN
1	Bolle d'aria nel sistema	8	6	9	432
2	Calibro freno bloccato	10	4	6	240
3	Usura pastiglie freno	8	7	4	224
4	Le ruote non bloccano durante la frenata d'emergenza	5	7	6	210
5	Perdita liquido dalla linea	10	5	4	200
6	Collasso della linea	10	4	5	200
7	Surriscaldamento dei componenti	9	5	4	180
8	Fallimento BPOS	10	3	5	150
9	Malfunzionamento pompaggio	7	3	7	147
10	Rottura del pedale del freno	10	3	4	120
11	Usura disco del freno	7	3	5	105
12	Pedale del freno scivoloso	6	4	4	96
13	Bilanciamento errato	6	5	3	90
14	Guasto al sistema di monitoraggio elettronico	4	5	4	80
15	Mancanza fluidità del pedale	7	3	3	63
16	Errato dimensionamento del sistema	9	2	3	54
17	Guasto luce posteriore	4	2	4	32

Tabella 5 - FMEA worksheet parziale dopo l'individuazione dei guasti e calcolo RPN

Analizziamo due guasti per vedere come sono stati attribuiti i valori di severity, occurrence e detection:

2) Calibro freno bloccato:

- a. Severity, se la pinza del freno si blocca rende impossibile utilizzare l'impianto perché il veicolo sarebbe instabile in frenata e non è per niente sicuro per le persone che si trovano sul circuito, il bloccaggio non avviene con un preavviso, non c'è nulla che possa metterci in allerta che sta per succedere per questo viene attribuito un valore di severity pari a 10 ovvero "blocco del sistema senza preavviso";
- b. Occurrence, questo tipo di guasto non è ripetitivo nel tempo, se il lavoro è accurato, però il fatto che la pinza si trova nei pressi della ruota dove possiamo trovare vari detriti dati dal materiale sollevato dalla pista da parte della gomma e dalle scorie prodotte ad ogni frenata dall'adesione delle pastiglie sul disco freno il "guasto occasionale" può capitare quindi viene attribuito un valore di occurrence pari a 4.
- c. Detection, quando si progetta l'impianto è difficile andare ad anticipare ed evitare il bloccaggio perché, appunto, come detto prima, la pinza si trova in una zona "sporca" ed il bloccaggio è dato da un qualche corpo che ostruisce il rientro del pistone, viene attribuito un valore detection di 6 ovvero "capacità bassa dei controlli di progetto di rilevare le cause di guasto".

16) Errato dimensionamento del sistema:

- a. Severity, ci si accorge subito se il sistema frenante non è adeguato perché fin dai primi metri i piloti provano come va il sistema sterzante e il sistema frenante, ovvero i due sistemi principali nella conduzione del veicolo. Un sistema sottodimensionato comporterebbe un'inutilizzo del freno perché sarebbe come non averlo in quanto la forza esercitata sul disco è troppo bassa per poter avere un'azione frenante. Al contrario un impianto sovradimensionato comporterebbe che ad ogni frenata le ruote si blocchino rendendo in questo modo instabile e pericoloso il veicolo ogni qual volta viene azionato il freno per affrontare una curva. Per queste ragioni viene attribuito un valore di severity pari a 9 ovvero "blocco del sistema ma viene dato il tempo utile per reagire";
- b. Occurrence, avere un sistema sottodimensionato o sovradimensionato al giorno d'oggi risulta difficile in quanto i software di progettazione permettono di andare a simulare il sistema in qualsiasi condizione di lavoro alla quale può trovarsi sottoposto, anche quelle più estreme. È chiaro che l'errore può sempre esserci ma è molto raro per cui viene attribuito un valore di occurrence pari a 2 ovvero "Bassa: progetti precedenti hanno dato luogo ad un basso numero di errori";
- c. Detection, il fatto di poter simulare il sistema ci permette di rilevare un eventuale guasto, viene quindi assegnato un valore pari a 3 ovvero "alta capacità molto remota dei controlli di progetto di rilevare le cause di guasto".

#### 4.1.4 Classificazione dei guasti in base alla priorità

Nel mondo automobilistico, soprattutto quando ci immergiamo nel mondo ad alta tensione come quello delle competizioni automobilistiche, la sicurezza ed affidabilità dei veicoli sono di primaria importanza. Proprio per questo per semplificare e rendere più operativa la gestione dei possibili guasti andremo ad utilizzare una classificazione dei valori RPN in quattro categorie:

- 1) Rischio Minore,  $0 < RPN \leq 100$ , in questa categoria non sono previste azioni correttive in quanto i valori del RPN indicano che il rischio associato ad un particolare guasto è considerato accettabile, con conseguenze, probabilità di occorrenza e capacità di rilevamento che non richiedono azioni correttive immediate. Questo non significa che si può abbassare la guardia, ma bisognerà continuare a monitorare attentamente le possibilità di guasto per mantenere degli standard di sicurezza alti;
- 2) Rischio Moderato,  $100 < RPN \leq 150$ , in quest'area di rischio andremo ad attuare delle azioni correttive limitate, ovvero mirate a mitigare il rischio. Per farlo si possono andare ad effettuare modifiche nelle specifiche o miglioramenti nella progettazione, nei processi di produzione o nei protocolli di manutenzione;
- 3) Rischio Alto,  $150 < RPN \leq 200$ , questa categoria prevede delle azioni correttive necessarie, in particolare è richiesta un'attenzione immediata. Verranno implementate azioni correttive significative per affrontare i potenziali guasti o eventi indesiderati, assicurando che la sicurezza e l'affidabilità rimangano prioritarie.
- 4) Rischio Critico,  $RPN > 200$ , verrà adottata una strategia ancora più intensiva in quanto questi casi richiedono l'elaborazione di un piano d'azione dettagliato e cambiamenti sostanziali per ridurre il rischio a livelli accettabili.

Facendo questa distinzione delle categorie la classificazione dei valori RPN diventa uno strumento guida per garantire che le azioni correttive siano proporzionate al livello di rischio, assicurando al contempo che la sicurezza ed affidabilità rimangano al centro delle nostre preoccupazioni.

La classificazione nel nostro caso sarà quindi:

LIVELLO DI RISCHIO	GUASTI
Critico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bolle d'aria nel sistema</li> <li>- Calibro freno bloccato</li> <li>- Usura pastiglie freno</li> <li>- Le ruote non bloccano durante la frenata d'emergenza</li> </ul>
Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perdita liquido dalla linea</li> <li>- Collasso della linea</li> <li>- Surriscaldamento dei componenti</li> </ul>
Moderato	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fallimento BPOS</li> <li>- Malfunzionamento pompaggio</li> <li>- Rottura del pedale del freno</li> <li>- Usura disco del freno</li> </ul>
Basso	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pedale del freno scivoloso</li> <li>- Bilanciamento errato</li> <li>- Guasto al sistema di monitoraggio elettronico</li> <li>- Mancanza fluidità del pedale</li> <li>- Errato dimensionamento del sistema</li> <li>- Guasto luce posteriore</li> </ul>

Tabella 6 - Classificazione dei guasti in base al livello di criticità

## 4.2 Azioni correttive e miglioramenti

### 4.2.1 Proposta di azioni correttive per guasti con moderato rischio

Di seguito andremo ad analizzare le azioni correttive che attueremo nel caso di rischi moderati. Le azioni che implementeremo saranno limitate mirate a mitigare il rischio. Andiamo ad analizzare quali azioni possiamo attuare per ogni rischio:

- 8) Fallimento BPOS, la gravità del danno provocato da questo guasto non può migliorare in quanto determinerebbe la squalifica immediata del veicolo dalla competizione. Una strategia per mitigare questa situazione potrebbe consistere nella riduzione della probabilità di rilevare il danno, ad esempio testando il sensore nel box prima della gara e avendo a disposizione un nuovo interruttore nel carrello del team. Questa azione potrebbe ridurre la probabilità di rilevare il danno da 5 a 3, indicando una "alta capacità molto remota dei controlli di guasto nel rilevare le cause di guasto". Di conseguenza, il nuovo RPN (Risk Priority Number) sarebbe calcolato come  $RPN' = 10 \times 3 \times 3 = 90$ .
- 9) Malfunzionamento pompaggio nella linea, può essere principalmente causato da un difetto in una delle due pompe posizionate dietro il pedale del freno. Queste pompe vengono attivate attraverso la pressione esercitata sul pedale. Una manutenzione periodica, che includa la sostituzione delle guarnizioni e la verifica dell'integrità dei pistoni, può contribuire positivamente a ridurre il

rischio di guasti. Inoltre, avere almeno una pompa di ricambio nel carrello del team può limitare la gravità del danno, consentendo una sostituzione immediata in caso di guasto. Ciò renderebbe il veicolo disponibile per la successiva prova entro circa trenta minuti, considerando che sarà necessario spurgare il sistema per eliminare le eventuali bolle d'aria. In sintesi, l'adozione di tali misure ridurrebbe la gravità dei danni, passando da un livello 7 a un 4, indicando "guasti minori che non compromettono le funzioni principali". Questo è possibile poiché tra una prova e l'altra c'è il tempo sufficiente per la sostituzione. La manutenzione periodica non solo ridurrebbe la gravità, ma anche la frequenza dei guasti, passando da un livello 3 a un 2. I controlli avrebbero anche un impatto sulla probabilità di rilevare guasti, riducendo il terzo indicatore Detection da un 7 a un 5, ovvero "media capacità dei controlli di progetto di individuare le cause di guasto". Di conseguenza, il nuovo RPN sarebbe  $RPN' = 4 \times 2 \times 5 = 40$

10) Rottura del pedale del freno, costituisce un elevato rischio per la sicurezza del conducente, delle persone lungo il percorso e del veicolo. Per prevenire questo malfunzionamento, è possibile condurre delle analisi simulando l'applicazione del carico in diversi punti del pedale, eseguire studi con diversi materiali e determinarne il migliore in termini di peso e resistenza. La severità del guasto è difficilmente riducibile, pertanto, l'attenzione dovrebbe concentrarsi sulla prevenzione mediante l'utilizzo dei software di simulazione. Questo approccio consentirebbe una riduzione da 4 a 2 dell'indice ovvero "capacità molto alta dei controlli di progetto nel rilevare le cause del guasto". Il nuovo RPN, di conseguenza, sarà  $RPN' = 10 \times 3 \times 2 = 60$ .

11) Usura del disco del freno, con un costante monitoraggio delle condizioni si può prevenire danni successivi causati da un disco usurato. Inoltre, poiché questa è una componente facilmente sostituibile nel veicolo, potrebbe essere vantaggioso avere un paio di dischi nuovi disponibili nel carrello del team. Questo consentirebbe di sostituire la parte durante la gara o i test prima che possa causare ulteriori danni. Grazie al monitoraggio continuo si aumenta la probabilità che eventuali guasti vengano rilevati durante i controlli. Di conseguenza, la valutazione del rischio (RPN) diminuisce da 5 a 3, indicando una "alta capacità molto remota dei controlli di progetto nel rilevare le cause di guasto". Il nuovo valore di RPN sarà quindi  $RPN' = 7 \times 3 \times 2 = 42$ .

#### **4.2.2 Proposta di azioni correttive per guasti con alto rischio**

Nel caso di guasti con livello di rischio alto andremmo a ricercare delle soluzioni che possano andare a ridurre in modo tempestivo il rischio di guasto, proponendo anche eventuali alternative e modifiche di progetto.

5) Perdita liquido dalla linea, per evitare perdite di liquido dal sistema frenante, è possibile adottare alcune precauzioni. Un approccio consiste nell'applicare del nastro per idraulica in teflon sulle filettature delle giunzioni, riducendo così il rischio di fuoriuscite. Durante l'unione di due giunzioni l'uso di una chiave

dinamometrica permetterebbe di applicare la coppia di serraggio corretta. Altre precauzioni sono eseguire regolarmente una manutenzione della linea, specialmente al termine di test in pista o competizioni, e condurre controlli visivi dopo ogni prova dinamica. Adottando tali accorgimenti, è possibile influenzare positivamente l'indice di frequenza del danno, mantenendosi entro guasti occasionali, passando da un valore di 5 a 4. Controlli visivi e manutenzione aumentano le probabilità di individuare danni prima che il veicolo torni in pista, contribuendo anche a migliorare l'indice di rilevabilità del danno da 4 a 3, indicando un'“alta capacità molto remota dei controlli di guasto di rilevare le cause”.

Il nuovo valore del RPN sarà quindi  $RPN' = 10 \times 4 \times 3 = 120$ ;

- 6) Collasso della linea, per prevenire il collasso della linea dell'impianto frenante, è essenziale condurre studi e simulazioni attraverso appositi software per assicurarsi che i componenti che intendiamo installare siano in grado di resistere alle pressioni generate durante la fase frenante. Inoltre, l'utilizzo di attrezzature che garantiscono la corretta coppia di serraggio delle giunzioni, insieme a un programma di manutenzione regolare, è fondamentale per prevenire il verificarsi di collapsi. Un controllo visivo del sistema dovrebbe essere effettuato ogni volta che se ne presenta l'occasione. Queste precauzioni influenzano positivamente sulla prevenzione del guasto, infatti, le simulazioni permettono di ridurre la probabilità di accadimento riducendo l'indice da 4 a 3. I controlli sulla linea consentono di rilevare eventuali perdite che porterebbero al collasso della linea, migliorando anche l'indice di rilevabilità del guasto da 5 a 3, indicando un'alta probabilità di individuare le cause di guasto. A questo punto, è possibile calcolare il nuovo indice RPN, che sarà  $RPN' = 10 \times 3 \times 3 = 90$ .
- 7) Surriscaldamento dei componenti, la progettazione svolge un ruolo cruciale nella prevenzione del surriscaldamento dei componenti, pertanto è fondamentale selezionare dischi e pastiglie dei freni progettati per ottimizzare la dissipazione del calore. Nella scelta, è importante evitare sistemi sottodimensionati, poiché potrebbero causare surriscaldamenti ricorrenti. Dopo la selezione iniziale, è essenziale simulare l'impianto attraverso appositi software per verificarne l'efficienza e prevenire potenziali problemi. Qualora la simulazione evidenzia un rischio di surriscaldamento, si potrebbe valutare l'adozione di un sistema di raffreddamento aggiuntivo formato da deviatori che deviano l'aria verso disco e pinza freno, aumentando così la dissipazione del calore. Inoltre, si potrebbe valutare l'installazione di un radiatore supplementare per raffreddare l'olio che trasmette la pressione alle pinze. L'introduzione di sensori per monitorare le temperature dell'impianto offre un mezzo preventivo per rilevare eventuali guasti imminenti. Questi sensori consentono al pilota di essere consapevole delle condizioni dell'auto durante la gara o, alternativamente, il team può comunicare tempestivamente eventuali anomalie attraverso la comunicazione radio. Tutte queste misure impattano sulla probabilità di guasto, contribuendo a migliorare leggermente l'indice di rischio, che passa da 5 a 4. L'utilizzo di sensori e simulazioni consente di prevenire il surriscaldamento con un'alta probabilità di rilevamento del guasto,

riducendo ulteriormente l'indice di rischio a 3. Il nuovo Risk Priority Number (RPN) sarà quindi calcolato come  $RPN' = 9 \times 4 \times 3 = 108$ .

### 4.2.3 Proposta di azioni correttive per guasti con rischio critico

Andremo alla ricerca di soluzioni che permettano di ridurre il livello di rischio ad un livello accettabile, queste possono prevedere cambi sostanziali nella progettazione e creazione dei componenti:

- 1) Bolle d'aria nel sistema, per prevenire questo guasto è fondamentale concentrarsi nella fase di installazione dell'impianto frenante, prestare molta attenzione in tutte le fasi di unione delle varie parti. Altrettanto importante è utilizzare un opportuno liquido per l'impianto in quanto un liquido freni di bassa qualità può favorire la formazione di bolle d'aria potrebbe avere un punto di ebollizione più basso che, con l'aumento della temperatura, comporterebbe l'ebollizione e formazione di bolle. Alla fine, quando si è installato l'impianto e riempite parzialmente le linee, è importante eseguire un'adeguata operazione di spurgo che elimini le eventuali bolle rimaste nei punti critici. Per favorire tutte queste attività è necessario che il team abbia a disposizione gli strumenti adeguati come chiavi dinamometriche che permettono di garantire la giusta coppia di serraggio delle varie connessioni. In fase di progettazione bisogna prestare attenzione a scegliere degli opportuni serbatoi per il liquido e posizionarli in modo da garantire il flusso verso e dalle pompe. La loro posizione deve facilitare la verifica del livello del liquido in quanto se fosse troppo basso potrebbe favorire l'ingresso d'aria all'interno. Anche la manutenzione svolge un ruolo significativo. In questa fase, è essenziale monitorare lo stato dei tubi, raccordi e guarnizioni per individuare eventuali perdite o danni che potrebbero compromettere la tenuta del sistema. La sostituzione del liquido può influire sulla formazione di bolle nel tempo poiché potrebbe assorbire umidità compromettendo, in questo modo, il punto di ebollizione. Prese tutte queste precauzioni possiamo influire sul livello di rischio, in particolare nella rilevabilità del guasto passando da una remota possibilità di rilevare il guasto ad una media grazie appunto al processo di manutenzione periodica che porta il team a monitorare lo stato dei componenti. Il nuovo indicatore detection sarà 5 ovvero "media capacità dei controlli di progetto di rilevare le cause di guasto". Anche la probabilità di guasto viene influita da questi accorgimenti con un leggero miglioramento rimanendo comunque all'interno della fascia di moderata possibilità di rilevare il guasto, nuovo indice = 5. A questo punto possiamo andare a calcolare il nuovo indice RPN che sarà  $RPN' = 8 \times 5 \times 5 = 200$ .
- 2) Calibro freno bloccato, questo guasto potrebbe essere provocato dall'interno del sistema frenante o dall'esterno. Se il guasto arriva dall'interno abbiamo che un qualche corpo estraneo sta ostruendo il suo rientro, quindi, è fondamentale concentrare l'attenzione, anche in questo caso, nella fase di montaggio in particolare essere certi che residui e scorie di lavorazione non finiscano all'interno della linea. Per prevenirlo è consigliato pulire ogni parte con aria

compressa prima di andare ad assemblarla con le altre e prestare sempre molta attenzione ad utilizzare strumenti puliti che non possano contaminare il sistema. Un bloccaggio interno potrebbe essere provocato anche da un pompante sovradimensionato rispetto alle pinze e che quindi mantiene una pressione interna del sistema che impedisce il rientro del calibro. Per evitare questo problema bisogna prestare molta attenzione alle specifiche della pinza freno adottata e scegliere di conseguenza la pompa adeguata. Se il bloccaggio proviene dall'esterno il problema è dovuto all'intromissione di un corpo esterno tra la superficie del calibro e superficie della pinza, questo potrebbe essere un residuo che le ruote, o un veicolo che precede, hanno sollevato dalla pista oppure possono essere residui delle pastiglie determinati da una frenata prolungata. Possiamo influenzare questo fenomeno prestando particolare attenzione all'usura delle pastiglie e sostituirle quando notiamo che si stanno degradando velocemente, per quanto riguarda i corpi estranei provenienti dalla pista è difficile prevedere ed influenzarne l'impatto che possono avere. Prestando queste attenzioni possiamo influire sulla probabilità di accadimento del guasto passando da una moderata ad una bassa probabilità d'accadimento, il nuovo indicatore per l'occorrenza sarà 3. Per quanto riguarda rilevabilità e severità del guasto è difficile prendere decisioni che influiscano nel miglioramento di questo guasto. Il nuovo indice RPN sarà  $RPN' = 10 \times 3 \times 6 = 180$ .

- 3) Usura pastiglie freno, dovuto principalmente dall'uso prolungato del freno nella fase di rallentamento del veicolo, il calore generato incrementa l'usura del componente. Per contrastare questo fenomeno è opportuno scegliere delle pastiglie ad alte prestazioni in fase di progettazione dell'impianto e verificare che queste siano ben rivestite da un flusso d'aria che ne aumenti la dissipazione del calore. Anche le caratteristiche dei dischi dei freni influiscono sul consumo del componente in quanto anche questi si surriscaldano in fase di frenata e nell'azione successiva andrebbero a corrodere le pastiglie, quindi, devono essere scelti di conseguenza optando sempre per componenti ad alte prestazioni. Oltre alle scelte in fase di progettazione, per evitare il guasto bisogna monitorare lo stato d'usura delle pastiglie costantemente e in caso si noti uno spessore ridotto della superficie provvedere alla sostituzione dei componenti. Per essere pronti e reattivi in gara è opportuno avere sempre un set di pastiglie nuove nel caso si renda necessario procedere con la sostituzione. Presi questi accorgimenti possiamo riscontrare un miglioramento nell'occorrenza del fenomeno, grazie alla scelta di componenti ad alte prestazioni, ora possiamo considerare la probabilità di guasto moderata e il nuovo indicatore sarà 5, questo indice non lo possiamo considerare con bassa o remota probabilità in quanto il componente è molto sollecitato durante le competizioni e prove. La manutenzione e controllo influiscono sul monitoraggio dello stato delle pastiglie in questo modo abbiamo un'alta capacità dei controlli di rilevare le cause di guasto, il nuovo indice per la detection sarà 3. Possiamo a questo punto procedere con il calcolo del nuovo indicatore RPN che sarà  $RPN' = 8 \times 5 \times 3 = 120$ .

- 4) Le ruote non bloccano durante la frenata d'emergenza, requisito necessario per passare le ispezioni tecniche, per far sì che questo accada si agisce sul bilanciamento dei freni aumentando o meno la pressione esercitata sulle pinze. Per essere sicuri che questo fenomeno si verifichi è opportuno eseguire la prova durante le prove in pista e agire sulla barra di bilanciamento fino a quando non si trova la giusta configurazione che garantisca al veicolo di superare i test. Trovata la posizione conviene misurare la distanza dello stantuffo delle pompe dalla fine del filetto ed annotarla in modo che, se vengono fatte modifiche per le varie prove in pista quando sarà necessario fare il brake test basta ripristinare le condizioni testate nella barra di bilanciamento per eseguire il brake test. Presa questa accortezza possiamo affermare che l'indicatore di probabilità di guasto non sarà più con alta ricorrenza ma addirittura possiamo considerarlo come bassa quindi assegnare un valore di 3 all'indice. La rilevabilità aumenta in quanto con le misure annotate possiamo verificare in modo rapido se il sistema frenante è settato per eseguire il brake test quindi abbiamo un'alta probabilità di dei controlli di rilevare il guasto, il nuovo indicatore sarà 4. A questo punto possiamo calcolare il nuovo indice RPN ovvero  $RPN' = 5 \times 3 \times 4 = 60$ .

#### **4.2.4 Valutazione delle implicazioni economiche e temporali delle azioni correttive proposte**

Adottando queste azioni correttive si genereranno delle implicazioni economiche dovute all'acquisto di componenti e/o materiale. Volendo fare una stima il più dettagliata possibile verrà considerato anche il costo orario della manodopera aggiuntiva necessaria per eseguire le azioni correttive proposte. In particolare, nel documento del Cost Explanation File presentato dal team durante il Cost Event delle competizioni del 2023 possiamo leggere che è stato stimato un costo di 19,23 €/h (0,3205 €/min) considerando quaranta ore settimanali e cinquantadue settimane l'anno, questo dato è stato ricavato dal Decreto Legislativo del Ministero Italiano del Lavoro e delle Politiche Sociali n°37 del 23 agosto del 2022.

Analisi dei tempi per le azioni correttive e influenza sul costo finale del veicolo:

Operazione	Tempo	Costo
Spurgo impianto prima di ogni competizione (2 competizioni nel 2023)	2 x 60 min = 120 min	38,46 €
Pulizia delle parti con aria compressa prima dell'assemblaggio	30 min	9,62 €
Controllo visivo organi frenanti dopo ogni prova e test. (1 brake test + 1 collaudo + 4 prove dinamiche)	6 x 10 min = 60 min	19,23 €
Controllo visivo linea frenante dopo ogni prova e test. (1 brake test + 1 collaudo + 4 prove dinamiche)	6 x 10 min = 60 min	19,23 €
Misura della posizione balance bar	10 min	3,21 €
Sostituzione liquido frenante prima di ogni competizione (2 competizioni nel 2023)	2 x 30 min = 60 min	19,23 €
Simulazioni impianto e componenti mediante opportuni software	10 h = 600 min	192,30 €
<b>TOTALE COSTI ORARI AGGIUNTIVI:</b>		<b>301,28 €</b>

Tabella 7- Valutazione costi orari aggiuntivi dovuti all'implementazione delle azioni correttive

I tempi considerati sono una stima fatta osservando e cronometrando le operazioni durante le fasi di assemblaggio del veicolo del 2023, questi dati servono per elaborare la DBOM (Detailed Bill of Material) ovvero la distinta base del veicolo con i costi delle varie parti e operazioni. I tempi possono variare a seconda della più o meno esperienza dell'addetto all'operazione.

Altri costi aggiuntivi, adottando le azioni correttive proposte, possono essere ricondotti all'acquisto di componenti aggiuntivi:

Componente	Costo	
Liquido impianto frenante, 1.5 litri ogni cambio. (2 cambi)	2 x 40,50 €	81,00 €
Pastiglie freni anteriori di ricambio		241,08 €
Pastiglie freni posteriori di ricambio		113,52 €
BPOS di riserva		6,99 €
Pompa freno di ricambio		274,94 €
Coppia dischi di ricambio		123,24 €
Luce led freno		1,60 €
<b>TOTALE COSTI MATERIALI AGGIUNTIVI:</b>		<b>842,37 €</b>

Tabella 8 - Valutazione costi materiali aggiuntivi dovuti all'implementazione delle azioni correttive

Il costo di questi componenti è stato ricavato dal file CBOM (Cost Bill of Material) presentato dal team in gara dove sono indicati tutti i costi dei componenti che costituiscono il veicolo.

Analizzando tutti i costi si può notare che le implicazioni economiche dovute all'implementazione di quest'analisi FMEA sarebbero:

COSTI MANODOPERA:	301,28 €
COSTI MATERIALI:	842,37 €
<b>COSTI TOTALI:</b>	<b>1143,65 €</b>

*Tabella 9 - Valutazione dei costi aggiuntivi dovuti all'implementazione delle azioni correttive*

Dal punto di vista delle implicazioni temporali l'adozione delle azioni correttive proposte non influirebbe molto sui tempi di realizzazione in quanto la maggior parte prevedono di prestare più attenzione durante le fasi di progettazione e assemblaggio, solo la manutenzione straordinaria di cambio olio e spurgo prima delle competizioni risultano essere quelle più onerose. Quindi queste azioni correttive non avrebbero un'influenza negativa sui tempi di realizzazione della monoposto.

	FAILURE	S	O	D	RPN	AZIONI CORRETTIVE	S'	O'	D'	RPN'
1)	Bolle d'aria nel sistema	8	6	9	432	- uso di liquido freni opportuno - manutenzione e sostituzioni periodiche - pulizia delle parti	8	5	5	200
2)	Calibro freno bloccato	10	4	6	240	- verifica dimensionamento delle parti - controllo visivo usura pastiglie e dischi - componenti ad alte prestazioni	10	3	6	180
3)	Usura pastiglie freno	8	7	4	224	- verifica raffreddamento componenti - manutenzione e controllo visivo	8	5	3	120
4)	Le ruote non bloccano durante la frenata d'emergenza	5	7	6	210	- simulazione frenata d'emergenza nei test - annotazione delle posizioni balance bar - nastro per idraulica in teflon	5	3	4	60
5)	Perdita liquido dalla linea	10	5	4	200	- chiusura a coppia delle giunzioni - manutenzione e controlli visivi - simulazioni mediante opportuni software	10	4	3	120
6)	Collasso della linea	10	4	5	200	- uso di materiale ad alte prestazioni - manutenzione e controlli visivi	10	3	3	90
7)	Surriscaldamento dei componenti	9	5	4	180	- pastiglie e dischi freno ad alte prestazioni - utilizzo di sensori - sistemi di raffreddamento supplementari	9	4	3	108
8)	Fallimento BPOS	10	3	5	150	- testare l'interruttore nel box - interruttore di ricambio	10	3	3	90
9)	Malfunzionamento pompaggio	7	3	7	147	- manutenzione periodica pompe - pompa di ricambio	4	2	5	40
10)	Rottura del pedale del freno	10	3	4	120	- analisi statiche	10	3	2	60
11)	Usura disco del freno	7	3	5	105	- monitoraggio delle condizioni - dischi sostitutivi	7	3	2	42
12)	Pedale del freno scivoloso	6	4	4	96	---	-	-	-	-
13)	Bilanciamento errato	6	5	3	90	---	-	-	-	-
14)	Guasto al sistema di monitoraggio elettronico	4	5	4	80	---	-	-	-	-
15)	Mancanza fluidità del pedale	7	3	3	63	---	-	-	-	-
16)	Errato dimensionamento del sistema	9	2	3	54	---	-	-	-	-
17)	Guasto luce posteriore	4	2	4	32	---	-	-	-	-

Tabella 10 - FMEA Worksheet valutazione impianto frenante

## Conclusioni

L'analisi FMEA svolta sul sistema frenante del veicolo da competizione formula student dell'Università degli studi di Udine ha fornito risultati fondamentali per migliorare la sicurezza e l'affidabilità del sistema. Dopo aver analizzato l'apparato frenante sono stati individuati 17 diversi guasti potenziali a cui sono stati assegnati dei valori in base alla gravità dei possibili effetti, della probabilità di guasto e della capacità di rilevare il guasto prima che accada. Sono quindi stati divisi in quattro categorie individuandone quattro con rischio critico, tre con rischio alto, quattro con rischio moderato e sei con basso rischio.

Tuttavia, l'analisi non si è limitata all'identificazione dei guasti ma ha voluto trovare e analizzare delle azioni correttive che potessero andare ad aumentare l'affidabilità e sicurezza del sistema. L'adozione di queste azioni correttive ha dimostrato di essere fondamentale nel mitigare i rischi associati ai guasti identificati, riuscendo ad eliminare completamente i guasti critici e a ridurre significativamente sia il numero di guasti ad alto rischio che quelli a rischio moderato.

L'implementazione delle azioni correttive ha evidenziato un aumento dei costi per la realizzazione del veicolo seguendo l'analisi FMEA pari a circa 1144 €. Considerando che senza queste scelte il sistema è costato circa 3990 € al team abbiamo un aumento dei costi del 28,7 %, un aumento significativo. Se confrontiamo l'aumento con il costo della realizzazione dell'intero veicolo, costato circa 120.000 €, abbiamo che l'aumento sarebbe del 1%. Inoltre, le azioni correttive proposte non hanno evidenziato nessun impatto negativo sui tempi di realizzazione del veicolo, il che è fondamentale per rispettare gli obiettivi di produzione e di gara.

Questo equilibrio tra miglioramenti significativi e minimo impatto sulle risorse economiche e temporali sottolinea l'efficacia delle strategie adottate nel processo decisionale.

In conclusione, l'analisi FMEA del sistema frenante del veicolo ha dimostrato di essere uno strumento prezioso per identificare e mitigare i rischi associati ai guasti potenziali. In questo modo l'affidabilità e la sicurezza del sistema sono state migliorate significativamente con un minimo impatto sui costi.

## Bibliografia

CHIARINI A. e VICENZA M., 2004, “*Strumenti statistici avanzati per la gestione della qualità, affidabilità, FMEA, FTA, SPC, DOE*”, Franco Angeli, Milano

McDERMOTT E., MIKULAK J., BEAUREGARD R. 1996, “*The Basic of FMEA*”, Productivity Press, New York

SARTOR M. e ORZES G., 2020, “*La Gestione della Qualità*”, McGraw-Hill

RHEE S., ESHII K., 2003, “*Using cost based FMEA to enhance reliability and serviceability*”, Advance Engineering Informatics, Vol.17, pp179-188

STAMATIS D. H., 1995, “*Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from theory to execution*”, ASQC Quality Press, Milwaukee

# Sitografia

<https://www.fsaeonline.com/>

<https://formulasae.uniud.it/>