



UNIVERSITÀ DI PISA

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA DEI SISTEMI
DEL TERRITORIO E DELLE COSTRUZIONI**

**RELAZIONE PER IL CONSEGUIMENTO DELLA
LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE**

***Analisi delle performance di produzione campioni
iniettori XL5.1-50***

SINTESI

RELATORI

Prof. Gionata Carmignani
*Dipartimento di Ingegneria dell'Energia,
dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni*

Ing. Francesco Cogna
Azienda Vitesco Technologies

IL CANDIDATO

Francesco Dario Milieri
d.milieri@hotmail.com

Sessione di Laurea Magistrale del 16/02/2022

Analisi delle performance di produzione campioni iniettori XL5.1-50

Francesco Dario Milieri

Sommario

Questo lavoro di tesi è frutto di un'esperienza di nove mesi all'interno di Vitesco Technologies, società leader mondiale nella produzione di elettro iniettori per motori benzina. L'esperienza si è svolta nello stabilimento di S. Piero a Grado (Pisa) e l'elaborato tratta lo sviluppo del nuovo iniettore GDI XL5.1-50. Il lavoro si è incentrato principalmente su un sottocomponente dell'iniettore. Gli obiettivi del lavoro sono stati due. Il primo è stato verificare se le quote a disegno del sottocomponente fossero ancora ottimali rispetto al modello precedente. Il secondo obiettivo è stato stabilire i parametri macchina per il nuovo processo di piantaggio, da utilizzare sulla linea una volta messo in produzione il nuovo iniettore. Per poter raggiungere i due obiettivi, attraverso un lavoro di gruppo con il team di qualità, engineering e sviluppo processo, è stato ideato un test e realizzati dei componenti ad-hoc con i quali si è riusciti ad ottenere moltissimi dati ed informazioni, attraverso le quali abbiamo potuto comprendere il comportamento dei vari parametri in gioco. Una volta raccolti i dati, sono state eseguite diverse analisi statistiche, tra le quali il metodo Monte Carlo. Questo ha permesso di ottenere delle informazioni ancora più robuste e consentito di introdurre diverse migliorie che hanno aumentato le prestazioni dell'iniettore e del processo di piantaggio oggetto dell'analisi.

Abstract

This thesis work is the result of a nine-month experience within Vitesco Technologies, a world leader in the production of electro injectors for petrol engines. The experience took place in the S. Piero plant in Grado (Pisa) and the project deals with the development of the new GDI XL5.1-50 injector. The work focused mainly on a sub-component of the injector. The goals of the work were two. The first was to check if the dimensions of the sub-component were still optimal compared to the previous model. The second objective was to establish the machine parameters for the new planting process, to be used on the line once the new injector has been put into production. In order to achieve the two objectives, through teamwork with the quality, engineering and development team, a test has been devised and made of suitable components with which we have been able to obtain a lot of data and information, through which we could understand the behavior of the various

parameters in play. Once the data were collected, several statistical analyses were carried out, including the Monte Carlo method. This has allowed us to obtain even more robust information and to introduce several improvements that have increased the performance of the injector and of the planting process under analysis.

Vitesco Technologies

Vitesco Technologies, conosciuta come Continental Powertrain fino all'autunno 2019, è una società leader nella produzione di elettro iniettori per motori a benzina, con sede a Regensburg in Germania. Il 16 settembre 2021 l'azienda ha debuttato sul mercato azionario nella Borsa di Francoforte. Ad oggi dispone di oltre 50 stabilimenti di produzione e R&D in tutti i mercati e impiega oltre 42.000 persone in tutto il mondo. Possiede due stabilimenti in provincia di Pisa, a Fauglia e San Piero a Grado dove lavorano oltre 900 dipendenti.

1. Introduzione

L'iniettore è un elemento del motore e più precisamente è l'organo attraverso cui il combustibile spinto in pressione dalla pompa d'iniezione viene polverizzato nei cilindri.

L'elettro iniettore oggetto dello studio è stato il prototipo XL5.1-50 GDI di ultima generazione (*Figura 1*), per motori benzina che lavora a 500 bar, il cui sviluppo ha avuto inizio nel 2019 sempre nella sede di San Piero a Grado.

Sono entrato in Vitesco nel maggio del 2021 ed il mio ruolo è stato di supporto al PQM (Project Quality Management). La mia mansione principale è stata quella di studiare i processi chiave, relativi alla produzione dell'iniettore, i loro indicatori chiave, monitorarne le capability e verificare che il processo risultasse conforme alle aspettative o in caso contrario, comprenderne le cause e studiare possibili soluzioni. Le soluzioni venivano studiate attraverso un lavoro di gruppo con i team di qualità, engineering e sviluppo processo.

Per monitorare i processi chiave è stato realizzato un foglio Excel, nel quale sono stati riportati tutti i valori di capability che venivano calcolati mese per mese. Attraverso questa procedura si è riusciti a comprendere quali processi e quali parametri risultavano fuori target. Nel nostro caso, due parametri, Free Lift e Run Out Hydro Disk Damping, facenti parte dello stesso processo APB assembly, risultavano essere costantemente fuori capacità. Ciò è in linea

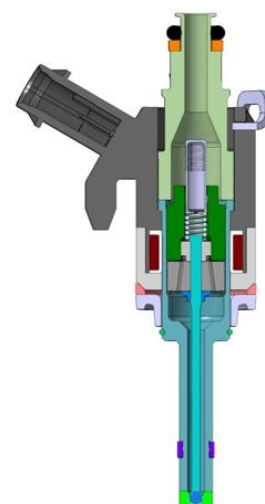


Figura 1 Iniettore XL5.1-50.

con le aspettative perché una delle innovazioni rispetto alla precedente generazione di iniettori prodotti, è stata la restrizione delle tolleranze di questi due parametri. Per tal motivo, si è optato per l'utilizzo di un nuovo processo produttivo, nello specifico un piantaggio, che sostituisce quello precedentemente utilizzato per i vecchi iniettori.

2. Componenti dell'iniettore, APB e parametri

I componenti dell'iniettore XL5.1-50 sono rappresentati in *Figura 2*.

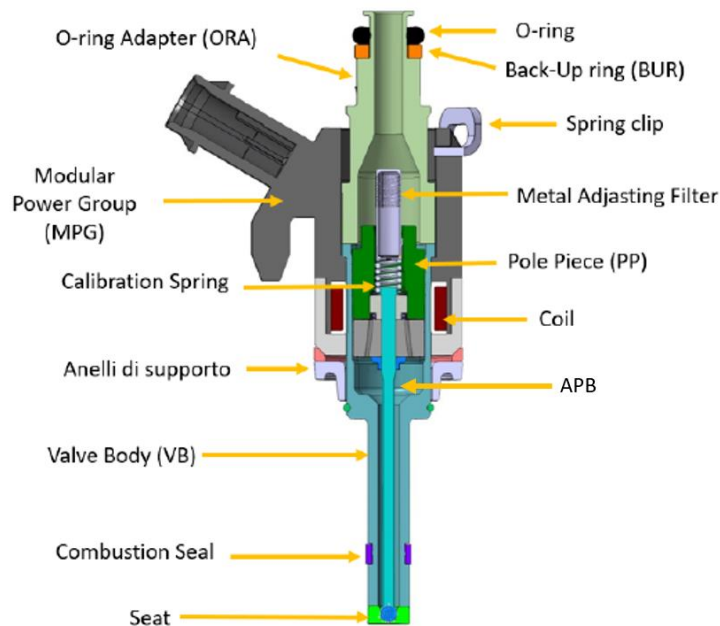
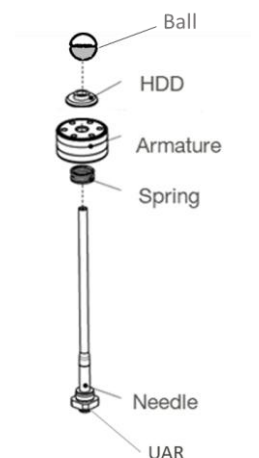


Figura 2 Componenti dell'iniettore XL5.1-50.

Come visto nel paragrafo 1, il processo di interesse e del quale ci siamo occupati è l' "APB assembly", ovvero l'assemblaggio dell'APB (Armature-Pin-Ball).

L'APB è un sottocomponente dell'iniettore formato a sua volta da sei componenti (*Figura 3*):

- *HDD (Hydro Disk Damping)*;
- *Armature*;
- *Spring*;
- *Needle/Pin*;
- *UAR (Upper Armature Retainer)*;
- *Ball*.



I due parametri di interesse sono: Free Lift e Run Out HDD (*Figura 4*).

Figura 3 Componenti APB.

La **Free Lift** (FL) è un parametro che indica la distanza che deve essere mantenuta tra due componenti, HDD e Armature dopo che è stato effettuato il piantaggio.

Il **Run Out HDD** (RO HDD) invece è un parametro che indica l'oscillazione massima che possiede il piano dell'HDD (dopo piantaggio e saldatura), realizzato attraverso la scansione dello stesso ad un determinato diametro \varnothing , durante la messa in rotazione dell'APB.

Per soddisfare i nuovi requisiti relativi ai due parametri è stato necessario realizzare un nuovo processo di piantaggio.

Il nuovo processo di piantaggio avviene tramite l'ausilio di uno spessore reale, proprio per questo viene definito "shim" (Figura 5). Lo spessore (o shim) viene inserito tra i due componenti, HDD (Hydro Disk Damping) e Armature e successivamente viene applicata una forza sul Needle che permette di realizzare il piantaggio. Lo Shim ci permette di garantire una tolleranza di $\pm X \mu\text{m}$ di FL, **campo di tolleranza** che è stato **ridotto del 50%** rispetto al precedente metodo.

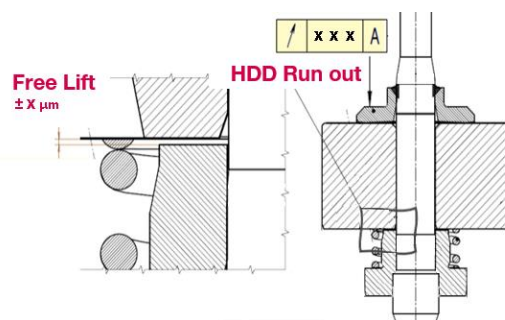


Figura 4 Free Lift e Run Out HDD.

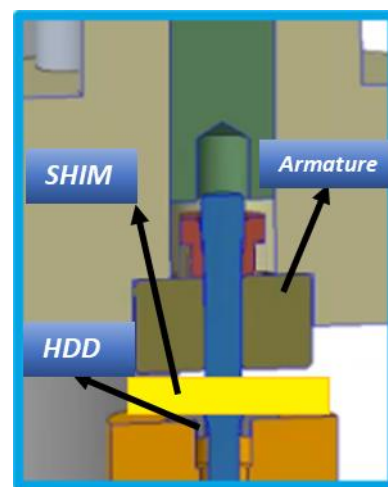


Figura 5 Rappresentazione del posizionamento dello shim.

3. Obiettivi della tesi

Lo scopo del progetto di tesi è quello di effettuare un'analisi del nuovo processo di piantaggio con gli obiettivi di:

- Stabilire l'intervallo di interferenza ottimale tra HDD-Needle;
- Stabilire i parametri macchina ottimali per il piantaggio.

Per raggiungere questi obiettivi è stato ideato un test che tenesse conto di tutte le variabili in gioco, ovvero:

- **Livelli di forza della macchina.** Sono stati stabiliti tre carichi: un MIN, carico minimo che garantisce l'impacchettamento dei componenti; un MAX, carico limite che permette di non compromettere le proprietà meccaniche del sottogruppo; un carico medio (MED), che fosse la via di mezzo tra MIN e MAX;
- **Interferenza accoppiamento Needle-HDD.** È stato ampliato l'intervallo di interferenza odierno verso interferenze più alte;

- **Numero minimo di componenti per gruppo e per livello di forza.** È stato stabilito di realizzare più gruppi, ognuno caratterizzato da interferenze diverse, che andassero ad esplorare l'intervallo di interferenza scelto, non in maniera uniforme ma bensì studiando gli intervalli più interessanti, ovvero gli estremi. Inoltre, per fornire una valenza statistica ad ogni gruppo è stata scelta una numerosità di 60 pz per ogni gruppo (20 pz per ogni livello di forza, MIN, MED e MAX). Sono stati creati sei gruppi, ognuno denominato con una lettera dell'alfabeto, si parte dal gruppo A con interferenza minima, aumentando progressivamente le interferenze, fino ad arrivare al gruppo F che rappresenta l'interferenza più elevata, il gruppo C rappresenta l'interferenza nominale a disegno (secondo il disegno attuale);
- **Spessore dello shim.** Come spessore dello shim è stato selezionato il valore nominale della FL;

4. Svolgimento del test

Il test è composto da diverse fasi, per praticità e per una migliore comprensione, nella *Figura 6* viene rappresentato il process flow tramite uno schema a blocchi.

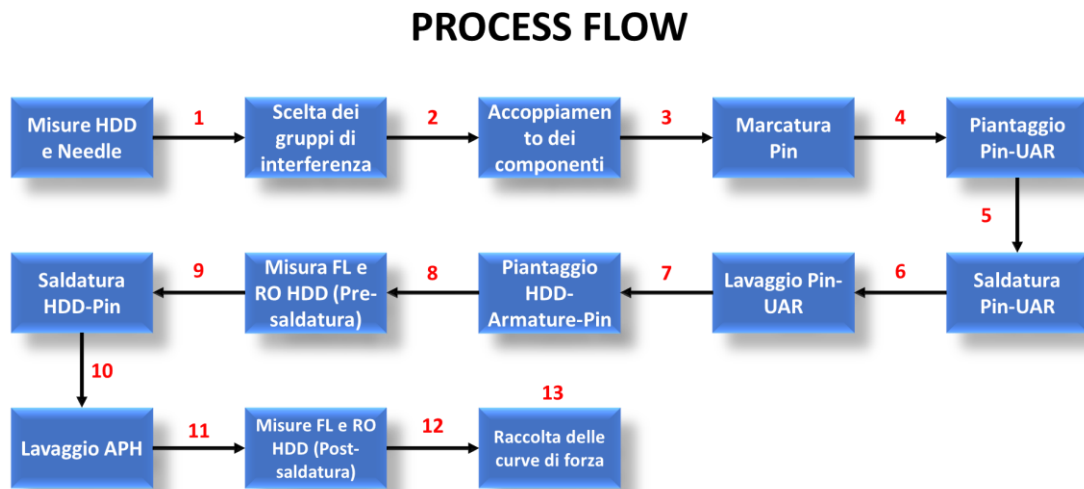


Figura 6 Process flow del test.

Il test prevede i seguenti passi:

- 1) **Misure HDD e Needle:** per caratterizzare tutti i componenti e poter successivamente eseguire gli accoppiamenti;
- 2) **Scelta dei gruppi di interferenza:** selezione dei livelli di interferenza da caratterizzare per ogni gruppo, scelti in base alle disponibilità dei componenti ed in base ai punti più critici

dell'intervallo, ovvero gli estremi dell'intervallo odierno e l'intervallo nuovo, ancora inesplorato;

- 3) **Accoppiamento dei componenti:** selezione dei componenti e divisione in gruppi;
- 4) **Marcatura pin:** necessaria per la tracciabilità dei componenti una volta assemblati;
- 5) **Piantaggio/saldatura e lavaggio Pin-UAR:** fase preparativa all'assemblaggio con shim;
- 8) **Piantaggio HDD-Armature-Pin:** parte più delicata del test dove è stato necessario prestare molta attenzione alla corretta esecuzione degli accoppiamenti dei componenti precedentemente stabiliti. Sono state estratte tutte le curve di forza dei piantaggi e analizzate singolarmente;
- 9) **Misura FL e RO HDD (Pre-saldatura):** sono stati misurati tutti i componenti per verificare il comportamento dei due parametri al variare dell'interferenza e del carico di forza utilizzato;
- 10) **Saldatura HDD-Pin:** operazione necessaria per bloccare in maniera permanente l'HDD sul needle, nella posizione stabilita durante il piantaggio;
- 11) **Lavaggio APH (Armature-Pin-HDD, ovvero APB senza Ball):** operazione necessaria per eliminare possibili contaminazioni;
- 12) **Misura FL e RO HDD (Post saldatura):** misura finale dei parametri oggetto di studio della tesi;
- 13) **Raccolta delle curve di forza:** analisi di ogni curva con studio delle componenti ed estrapolazione dei valori di ogni componente.

Ad ogni processo svolto è stata aggiornata la carta di raccolta dati.

5. Analisi dei dati raccolti

L'analisi dei dati è stata suddivisa in:

- **analisi dei dati (media, deviazione standard, capability rispetto alle specifiche):** è stato compreso che i componenti con interferenza bassa sono i più virtuosi per valori di RO HDD, ma risultano contemporaneamente i peggiori per valori di Free Lift. I gruppi che esploravano nuovi livelli di interferenza hanno fornito dei valori a limite sia per quanto riguarda la FL che per il RO HDD;
- **analisi delle forze:** è stato possibile suddividere la curva di forza in tutte le sue componenti, conoscere i carichi che agivano direttamente sull'APH, i carichi che invece si scaricavano sul basamento della macchina e, di conseguenza, sono state comprese le reali sollecitazioni che il componente subiva;

- *analisi delle correlazioni FL con interferenza e carico target*: dallo studio è stato riscontrato come la FL sia inversamente proporzionale al carico e all'interferenza. Inoltre, eseguendo una regressione lineare tra la FL ed il carico, è stato osservato come all'aumentare del carico di 100 N si registrasse un decremento di X μm di FL;
- *analisi delle correlazioni RO HDD con interferenza e carico target*: dallo studio è stato osservato come il RO HDD sia direttamente proporzionale all'interferenza ed inversamente proporzionale al carico;
- *analisi stabilità FL al variare del carico*: lo studio ha messo in relazione il delta FL (differenza tra la FL post saldatura e la FL pre-saldatura) ed il carico a picco, ovvero la forza necessaria per vincere l'interferenza dei due componenti, pin e HDD. Il grafico risultante dallo studio è rappresentato in [Figura 7](#).

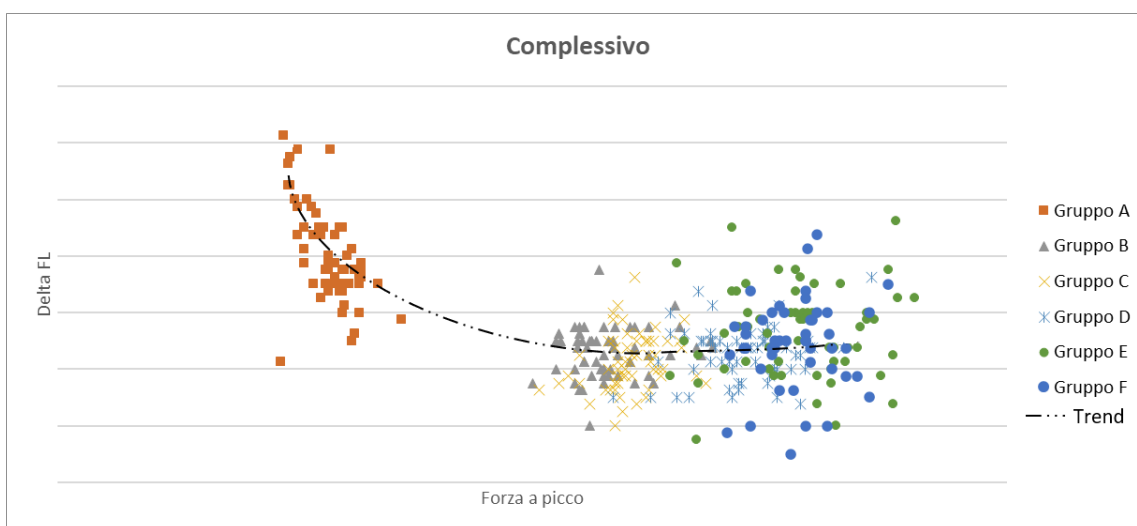


Figura 7 Analisi stabilità Free Lift al variare del carico.

Dal grafico si nota che i dati assumono un andamento simil parabolico. In particolare, si osserva come dal gruppo B in poi la media del delta FL risulti costante ad un valore X μm , mentre nel gruppo A il delta FL arriva a toccare anche 2X μm .

Il grafico di [Figura 7](#) dice che con l'interferenza del gruppo A non raggiungiamo una stabilità del delta FL, probabilmente perché il bloccaggio dell'HDD sul Pin con un'interferenza così bassa non è stabile e durante la saldatura il componente risulta essere molto più sensibile agli urti o all'handling in generale. Inoltre, dice che è presente una zona di buio tra il gruppo A ed il gruppo B, per cui è necessario esplorare nuovi livelli di interferenza a causa dell'incompletezza dell'informazione.

6. Creazione nuovo lotto e confronto con il primo

Dallo studio di *Figura 7* si è compresa la necessità di realizzare nuovi gruppi. È stato deciso di realizzare tre nuovi gruppi: uno a metà dei gruppi A e B, denominato “Gruppo A-B”, uno con interferenza nominale “Gruppo C” che faccia da paragone con i gruppi precedenti ed uno a metà dei gruppi D e E, denominato “Gruppo D-E”.

Per la realizzazione dei nuovi componenti si è eseguito lo stesso iter del primo lotto, rappresentato dal process flow di *Figura 6*. La differenza tra i due lotti sta nel fatto che per aumentare la variabilità delle misure degli HDD sono state utilizzati più lotti di HDD, in maniera da soddisfare i livelli di interferenza imposti ai nuovi gruppi creati. Inoltre, sono stati utilizzati solamente due livelli di forza, MIN e MAX.

I dati ottenuti sono mediamente peggiori, PPK(indici di capacità del processo) rappresentati nei grafici di *Figura 8* e *Figura 9*, rispetto a quelli ottenuti dai primi sei gruppi, questo è spiegabile da due fattori:

- Utilizzo di più lotti di HDD, che ha portato maggiore variabilità anche nei risultati;
- Utilizzo di soli due livelli di forza MIN e MAX che ha ulteriormente aumentato la variabilità dei risultati.

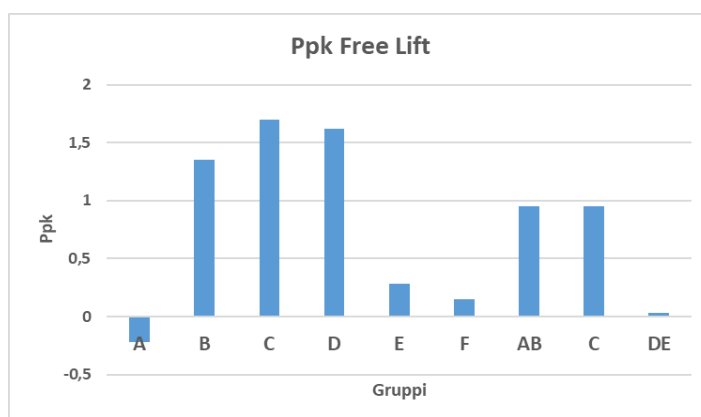


Figura 8 PPK Free Lift al variare dei gruppi.

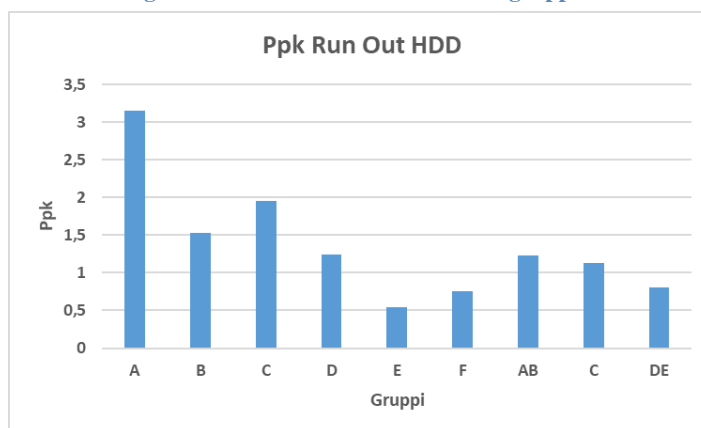


Figura 9 PPK Run Out HDD al variare dei gruppi.

Con i dati del secondo lotto è stato possibile completare lo studio (*Figura 10*) lasciato a metà precedentemente, stavolta anziché la forza si è utilizzato l'interferenza, dato che i valori sono direttamente proporzionali e l'interferenza è il parametro sul quale è possibile agire direttamente.

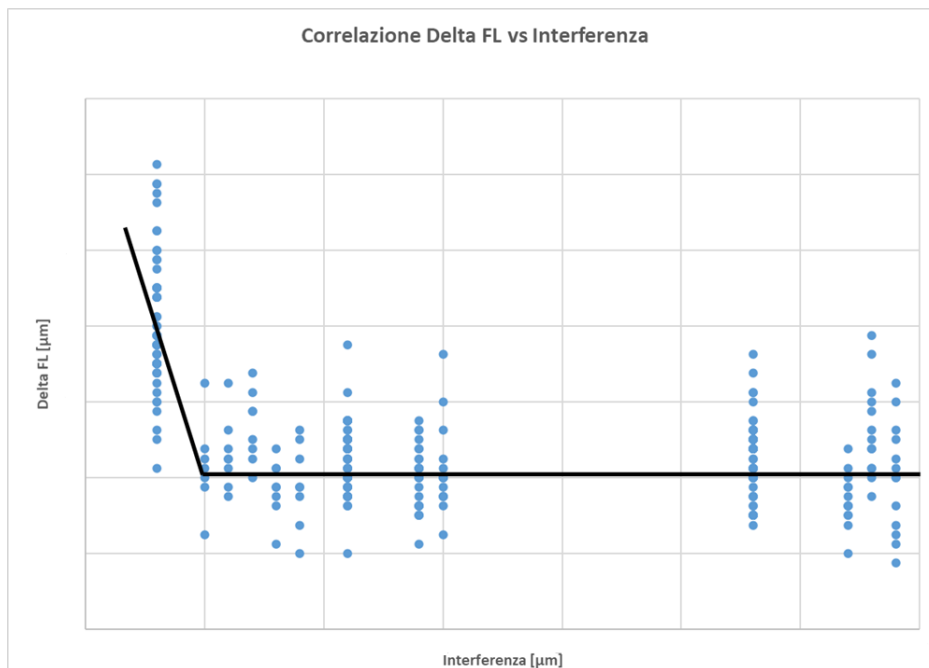


Figura 10 Correlazione delta Free Lift e interferenza.

Dal nuovo grafico di *Figura 10* si è riusciti a comprendere ed estrapolare il valore di interferenza X µm dal quale riusciamo a raggiungere la stabilità del delta FL.

7. Metodo Monte Carlo

Con tutti i dati raccolti nelle fasi precedenti è stato realizzato lo studio statistico conosciuto come “metodo Monte Carlo”, una tecnica che permette attraverso delle simulazioni di ottenere dei dati altrimenti molto dispendiosi da ottenere.

L'obiettivo dell'analisi è trovare un modello che rappresenti il comportamento del fenomeno studiato. Il primo passo eseguito è stato eliminare tutti i dati fuori dall'intervallo di interferenza odierno, poiché tali gruppi (gruppi E, D-E ed F) si sono dimostrati molto rumorosi e considerarli avrebbe creato un modello peggiore. Per comodità di calcolo e rappresentazione, si sono affrontate separatamente le simulazioni relative ai due parametri.

7.1 Metodo Monte Carlo: FL

Dalla rappresentazione dei dati raccolti (*Figura 11*) è stato notato che il parametro della FL ha due comportamenti differenti, un comportamento al di sotto della soglia $X \mu\text{m}$ ed uno quando l'interferenza tra HDD e Pin supera il valore soglia $X \mu\text{m}$.

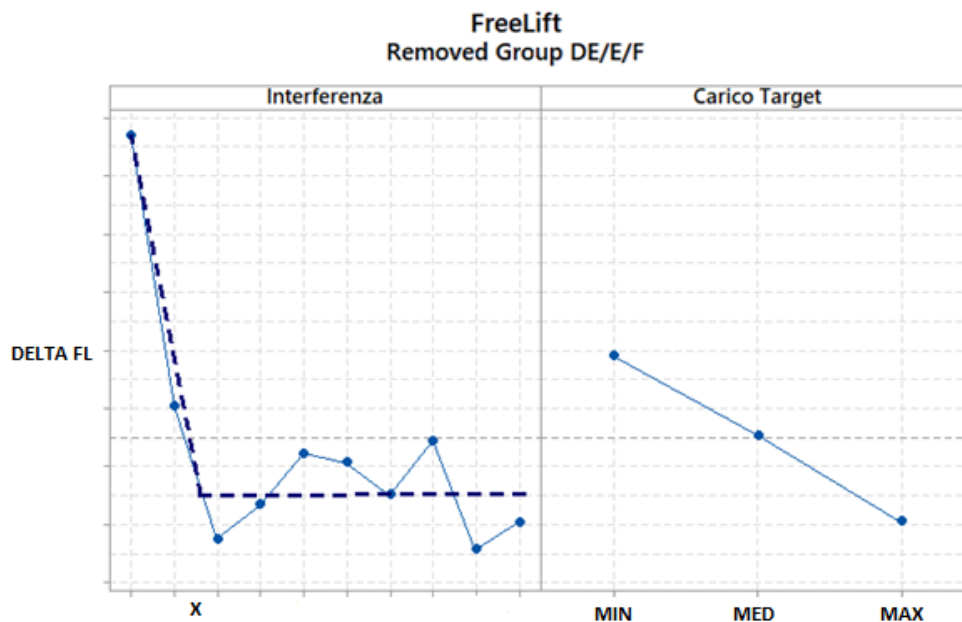


Figura 11 Scostamento Free Lift al variare di interferenza e carico.

Sono stati realizzati i vettori rappresentanti le distribuzioni dei diametri interni degli HDD e dei diametri esterni dei pin, seguendo una distribuzione normale e considerando due casistiche. La prima "ottimistica" dove la distribuzione del diametro interno dell'HDD è centrata sul valore nominale, la seconda "conservativa", dove la distribuzione è decentrata di $n \mu\text{m}$. Infine, si è realizzato il vettore rumore ed il vettore interferenza, ovvero il vettore risultante dalla sottrazione dei vettori "diametro esterno pin – diametro interno HDD".

Sono state eseguite le simulazioni con entrambi gli scenari e solamente lo scenario conservativo ha generato **uno scarto** su una simulazione di 120 000 componenti.

7.2 Metodo Monte Carlo: RO HDD

Per comprendere il modello del parametro RO HDD si è eseguita una regressione lineare dei dati di RO usando come fattori il carico di piantaggio e l'interferenza. Dall'esito della regressione è stato possibile estrapolare il modello che rappresentasse il comportamento del parametro ed i vari pesi dei fattori.

Anche in questo caso sono stati realizzati i vettori “diametro interno HDD”, “diametro pin”, “interferenza” e il vettore “rumore”. La lunghezza dei vettori utilizzata per questa simulazione è di 500 000 elementi.

Gli scenari utilizzati per le simulazioni relative al RO HDD sono stati tre, una per ogni livello di forza utilizzato. Dai risultati dei tre scenari si nota come la distribuzione, utilizzando il carico MIN, sia ampiamente insoddisfacente e che solamente dal carico MED in poi si ottengono dei risultati positivi.

8. Conclusioni

Riprendendo tutti i dati raccolti e tutte le analisi realizzate, comprese le simulazioni realizzate con il metodo Monte Carlo, è stato possibile giungere alla conclusione che la modifica dell’intervallo di interferenza dell’APB non porta vantaggi e che quindi si **mantiene l’intervallo di interferenza odierno**. Il parametro che traeva maggior giovamento dallo spostamento era la FL, che risultava essere già in partenza il parametro più robusto dato che avviene un controllo 100/100 su di esso, penalizzando il parametro RO HDD che invece risultava più debole, dato che su di esso viene realizzato un controllo a campione (con conseguente possibilità di trovare un eventuale scarto più bassa).

Inoltre, dalle analisi precedenti e prendendo in considerazione tutte le leve in gioco per ogni parametro, è stato possibile stabilire il carico macchina ottimale, con una piccola tolleranza che permette all’operatore in caso di scostamento della distribuzione (ovvero nei casi “conservativi” presi in considerazione nelle simulazioni) di ricentrare la distribuzione sfruttando le leve disponibili.