



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

CONTROLLO QUALITÀ NELL'INDUSTRIA 4.0:
MISURE DI GAP E FLUSH

QUALITY CONTROL IN INDUSTRY 4.0:
GAP AND FLUSH MEASUREMENTS

Relatore: Chiar.mo
Prof. **Nicola Paone**

Tesi di Laurea di:
Andrea Angelisanti

A.A. 2019 / 2020

“La mente non è un vaso da riempire ma un fuoco da accendere perché
s’infuochi il gusto della ricerca e l’amore della verità”

[Plutarco]

Indice

Introduzione	7
1 - Evoluzione dell'Industria nel tempo	
1.1 Prima Rivoluzione Industriale	9
1.2 Seconda Rivoluzione Industriale	13
1.3 Terza Rivoluzione Industriale	16
1.4 Industry 4.0	20
2 - Sensore laser di triangolazione portatile G3F	
2.1 Strumenti di misura	27
2.2 Sensori laser a triangolazione	33
2.3 G3F: struttura e funzionamento del sensore a triangolazione laser	35
2.4 Produttori internazionali di dispositivi per misure del Gap	40
3 - Incertezza di misura	
3.1 Concetto di misura	45
3.2 Processo di misurazione	45
3.3 Metodi per la valutazione dell'incertezza di misura	48
3.4 Incertezza di Tipo A per misure di Gap e Flush	49
4 – Sperimentazione	
4.1 Misure al servizio della qualità	55
4.2 Esperienza sperimentale	55
4.3 Analisi statistica e grafica con Excel	60
4.4 Riepilogo risultati	76
5- Analisi R&R	
5.1 Ripetibilità e riproducibilità	77
5.2 Minitab e carte di controllo	81
5.3 Analisi statistica e grafica delle carte di controllo	84

Conclusioni	97
Bibliografia	99
Elenco figure	101
Ringraziamenti	105

Introduzione

La parola *evoluzione* indica trasformazione, cambiamento, e ancora, sviluppo, progresso. Una trasformazione è un mutamento di qualità e caratteristiche. Un cambiamento avviene dopo un evento perturbatore che genera una crisi. Un progresso indica un insieme di eventi e attitudini che permettono di ottenere miglioramenti dell'esistenza umana. La parola *evoluzione*, come mostrato, racchiude svariati significati che però possono convergere in uno riassuntivo: processo che opera uno sviluppo.

Natura, uomo, ambiente, clima, tecnologie...sono in continuo sviluppo, immersi in un cambiamento inevitabile di caratteristiche e qualità. L'uomo nel corso dei secoli ha vissuto uno straordinario sviluppo delle capacità intellettive e cognitive; nei tempi più antichi, ad esempio, l'olfatto si rilevò un senso di rilevante importanza ai fini della sopravvivenza. Il centro olfattivo del cervello umano era costituito da neuroni semplici riuniti in una struttura finalizzata all'analisi degli odori. Alcune cellule specializzate recepiamo ciò che veniva odorato e lo classificavano nelle principali categorie: sessualmente disponibile, nemico o potenziale pasto, commestibile o tossico. Altre cellule invece, inviavano messaggi per informare l'organismo sul da farsi: avvicinarsi, fuggire, inseguire, mordere, sputare. Gli uomini di questi tempi avevano una vita mentale molto grossolana, caratterizzata da veri e propri istinti. Poi arrivò il momento di evolvere. Il cervello umano, evolvendo, si perfezionò e cominciò ad apprendere e memorizzare, provare emozioni e sentimenti, a scoprire e cercare. L'uomo fin dai tempi più antichi vive quindi, ogni giorno, delle evoluzioni, dei cambiamenti che lo pongono dinanzi ad una scelta; la scelta è preceduta da una crisi e il modo in cui l'uomo decide di affrontare tale crisi gli fa sviluppare e crescere delle nuove conoscenze e competenze.

L'uomo, nel momento in cui viveva delle crisi o delle mancanze, ha scoperto un'infinità di cose grazie ai talenti ricevuti e al coraggio: telefono cellulare, automobili sempre più sicure, dispositivi medici in grado di salvare vite, dispositivi in grado di prevedere catastrofi naturali e negli scorsi mesi il vaccino anti Covid-19.

Anche il lavoro, nel corso degli anni, è evoluto e sono sorte nuove figure professionali impiegate nell'industria. Ogni industria ha inevitabilmente vissuto un'evoluzione e tutt'oggi si è immersi in un continuo cambiamento e sviluppo dei settori industriali. L'evoluzione quindi è un processo che è necessario vivere e risulta fondamentale immergersi nel profondo per comprendere i vantaggi e i rischi. La tecnologia evolve

facendo passi da gigante, offre numerosi vantaggi che migliorano l'esistenza dell'uomo, ma si corre anche il rischio che l'esistenza venga dominata da ciò che l'uomo stesso ha creato. Un esempio riguarda l'evoluzione dell'industria, nominata *Industria 4.0*, che favorisce l'utilizzo massiccio di macchine computerizzate per ottimizzare i processi produttivi. Ci si chiede allora quale sarà il ruolo dell'uomo all'interno di tale evoluzione. Cosa certa è che l'uomo sarà sempre al centro del mondo, come lo è da quando abita la Terra; è fondamentale che sia l'uomo a gestire ogni evoluzione che accade, a comprenderne il significato e a scegliere la strada migliore per affrontarla. L'uomo è creatore delle tecnologie ed è auspicabile che sia sempre la sete della verità, della conoscenza e del rispetto per il prossimo ad essere messa al primo posto.

Tra i settori dell'industria, in cui le tecnologie intelligenti sono altamente impiegate, spicca quello automobilistico. È un settore di riferimento per le altre tipologie di aziende perché implementa macchinari automatizzati che permettono di realizzare con qualità e cura del dettaglio ogni lotto di produzione. I guadagni consistenti permettono di investire sulle tecnologie più avanzate per offrire qualità, comfort e prestazioni di alto livello. Questo settore, a proposito di evoluzione, ha mostrato una trasformazione radicale della tecnologia delle autovetture in circa venti anni. Sempre più sono inoltre le autovetture elettriche che popolano le strade.

Le prossime pagine parleranno dell'evoluzione dell'industria, dell'analisi sperimentale per la qualità del processo di assemblaggio nel settore automobilistico, passando per specifiche tecniche e teoriche su cui la sperimentazione si è basata.

1 – EVOLUZIONE DELL'INDUSTRIA NEL TEMPO

In questo primo capitolo si presenta l'evoluzione che l'industria ha vissuto nel corso degli anni con le rivoluzioni. Nel tempo alcune figure professionali sono scomparse ma ne sono sorte tante nuove grazie alle possibilità offerte dal nuovo sistema lavorativo.

L'impegno e il coraggio dell'uomo hanno permesso una crescita del settore industriale che, conseguentemente, ha influenzato arte, cultura e modo di vivere. L'industria da qualche anno sta vivendo una nuova evoluzione, si pone attenzione quindi alle nuove filosofie di produzione, alle tecnologie avanzate e all'organizzazione nella struttura aziendale.

1.1 Prima Rivoluzione Industriale

In generale ogni rivoluzione porta con sé dei cambiamenti. È la parola stessa che indica un cambiamento di stato, un'evoluzione. Nel XVIII secolo la parola “rivoluzione” rappresentava un processo violento perché le popolazioni, sentendosi non sufficientemente rappresentate dalle istituzioni, limitate nei diritti e nella distribuzione delle ricchezze, si ribellarono e riuscirono a stabilire un nuovo ordinamento.

Negli ultimi decenni del diciottesimo secolo e nella prima metà del diciannovesimo, numerose parole, che sono oggi di importanza fondamentale, entrarono per la prima volta nell'uso in Inghilterra, o, dove erano già adoperate comunemente, acquistarono significati nuovi e importanti.

La prima parola importante è *industria*, e il periodo in cui mutò significato fu proprio il periodo della *rivoluzione industriale*. Industria, prima di questo periodo, era il nome di un particolare attributo dell'uomo, nome che potrebbe essere tradotto con “abilità, assiduità, perseveranza, diligenza”. È chiaro che questo significato della parola industria sopravvive ancora, ma negli ultimi decenni del diciottesimo secolo, industria giunse a significare anche qualcos'altro; divenne un nome collettivo per le istituzioni manifatturiere e produttive e per le attività generali ad esse attinenti. L'Industria, con la maiuscola, si considera un'istituzione, un complesso di attività più che soltanto un attributo. Queste istituzioni creano un nuovo sistema, una serie di cambiamenti tecnici e trasformazioni nei metodi di produzione.

Una seconda parola importante è *democrazia*. I *democratici*, alla fine del diciottesimo e inizio diciannovesimo secolo, erano generalmente considerati pericolosi e sovversivi agitatori del popolo. Così come industria e le parole derivate ricordano la rivoluzione industriale, democrazia e democratico sono parole che registrano gli effetti in Inghilterra delle rivoluzioni americana e francese.

La terza parola, *classe*, risale ai tempi antecedenti alla rivoluzione industriale e veniva usata per indicare una divisione o un gruppo nelle scuole e nei collegi. Soltanto alla fine del diciottesimo secolo si comincia a far riferimento in senso sociale. Questo segna un mutamento nel carattere delle nuove divisioni e testimonia un cambiamento di atteggiamento nei loro confronti.

Un'altra parola è *arte*, simile a industria perché rappresenta un attributo dell'uomo, una "abilità". Questa parola prende un ulteriore significato, si pensi alle arti "della creazione" o "della fantasia" ma soprattutto al Romanticismo.

La quinta parola è *cultura* che venne a significare la condizione di sviluppo intellettuale. Quello che interessa maggiormente sottolineare è la nascita di cambiamenti che hanno portato l'uomo ad uno sviluppo culturale, professionale, intellettuale, sociale e spirituale e le cinque parole menzionate cercano di sintetizzare quanto accaduto nel periodo descritto. La rivoluzione industriale ha portato alla transizione dalla società agraria (lavoro manuale) alla società industriale (lavoro meccanico), ha influenzato non solo lo sviluppo della scienza e della tecnologia ma anche un cambiamento della struttura della società, l'urbanizzazione e la nascita di nuove specialità.

La rivoluzione industriale ebbe origine e si sviluppò in Gran Bretagna negli anni tra il 1770 e il 1830 diffondendosi solo in seguito negli altri paesi. Fu sostanzialmente e originariamente una rivoluzione tecnica, cioè un mutamento del carattere della produzione consistente nell'introduzione di macchine capaci di sostituire il lavoro umano e di essere azionate da forze motrici. In stretta successione al mutamento tecnico si ebbe però anche un mutamento nell'organizzazione della produzione, con il passaggio dal sistema domestico, cioè del lavoro eseguito a domicilio dall'artigiano, al sistema dell'industria.

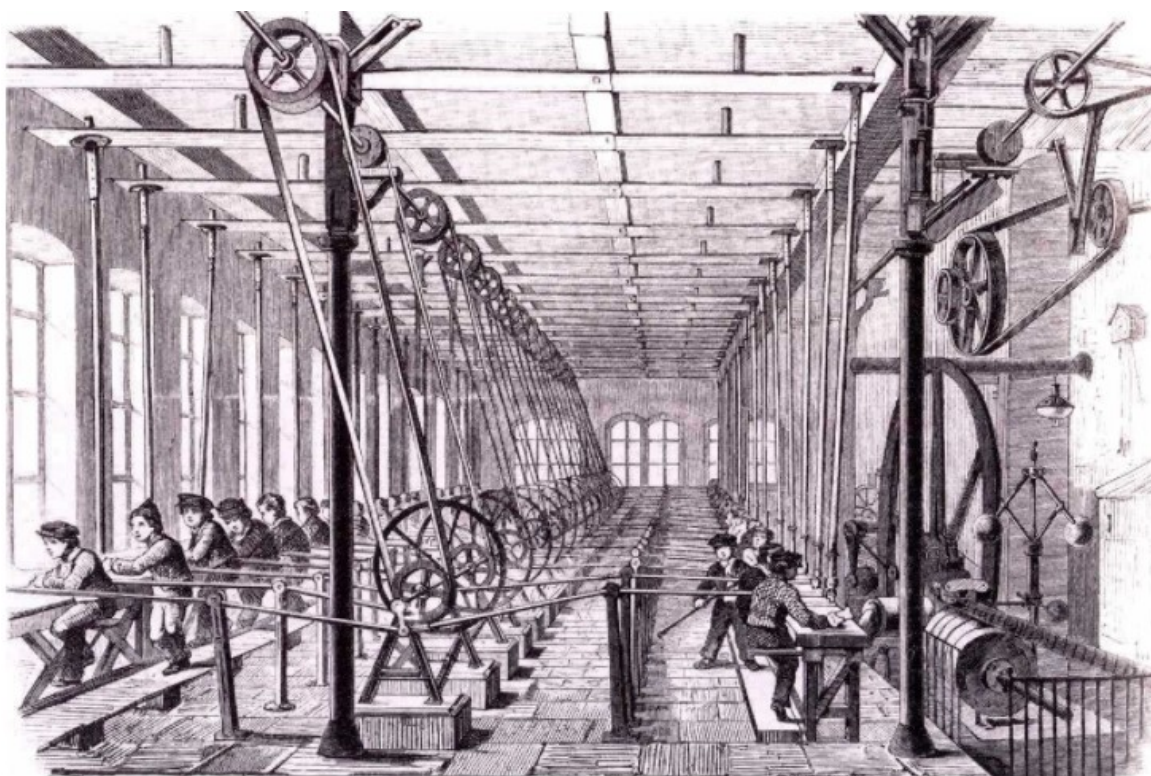


Figura 1.1: la rivoluzione industriale interessò prevalentemente il settore tessile-metallurgico con l'introduzione della spoletta volante (congegno per la tessitura) e della macchina a vapore nella seconda metà del '700

L'introduzione sistematica delle macchine, infatti, impose la concentrazione dei lavoratori in un unico luogo di lavoro e il controllo della produzione passò dal mercante-imprenditore al capitalista che, oltre ad essere il solo in grado di acquistare le attrezzature necessarie, assunse la funzione di organizzatore del lavoro. Si iniziò ad affermare in ambito economico un nuovo sistema conosciuto come *capitalismo*.

I motivi all'origine della trasformazione del sistema produttivo sono di diversa natura, ma ovviamente inerenti alla situazione economica e sociale della Gran Bretagna del diciottesimo secolo. Si parla infatti di un paese in pieno sviluppo demografico, già interessato da un certo grado di evoluzione industriale nonché da un'intensa attività commerciale, sufficientemente ricco di capitale e di materie prime grazie anche alle sue colonie. In ogni caso, diretti incentivi alla ricerca di metodi atti ad abbassare i costi di produzione e ad aumentare il rendimento del lavoro furono, da una parte, l'espansione effettiva e potenziale del mercato interno (dato l'aumento della popolazione, soprattutto urbana) ed estero e, dall'altra parte, sia la relativa scarsità della manodopera sia il suo relativamente alto costo.

Le innovazioni tecniche che usualmente si ricordano come caratterizzanti la rivoluzione industriale furono i filatoi meccanici e soprattutto la macchina a vapore ad opera di James Watt che permetteva l'ubicazione delle industrie in zone di consumo e vendita dei beni prodotti.

Come già detto la rivoluzione industriale non fu però solo una rivoluzione tecnica ma anche organizzativa. Determinando il sorgere dell'industria, cioè della concentrazione degli operai in unico stabilimento, rese infatti possibile la divisione del lavoro e la produzione di una sempre maggiore quantità di beni in condizioni di costo decrescente. L'allargarsi del sistema dell'industria accentuò quindi l'abisso che esisteva tra capitale e lavoro dilatando a proporzioni insolite il numero di salariati e mutando il carattere del processo produttivo da individuale a collettivo. D'altra parte, la massa degli operai salariati, reclutati per lo più tra i lavoratori a domicilio e i contadini, dovendo ora acquistare sul mercato quegli oggetti che prima si procurava direttamente con la produzione domestica, contribuì a incrementare la domanda di beni di consumo e quindi favorì l'ulteriore espansione della produzione e l'ulteriore sforzo ad aumentare la produttività del lavoro. La rivoluzione industriale fu un fattore determinante dell'eccezionale rapidità del progresso economico della Gran Bretagna, ma ebbe anche pesanti e dolorose conseguenze sociali e politiche a causa delle misere condizioni in cui viveva il proletariato. Le industrie, situate nella maggior parte dei casi in locali inadatti e malsani, sorsero nei centri urbani in cui la popolazione, moltiplicatasi in pochissimi anni, era costretta ad alloggiare in veri e propri tuguri. Veniva inoltre fatto un larghissimo impiego di donne e fanciulli, mentre gli orari di lavoro raggiungevano anche le 80 ore settimanali e i salari erano mantenuti a livello di pura sussistenza.

L'ampio uso delle macchine, favorendo il rapido aumento della produzione, portava frequentemente a un eccesso dell'offerta sulla domanda con conseguenti crisi e disoccupazione. Si verificavano così vere e proprie ribellioni degli operai contro le macchine che in esse vedevano la causa della propria miseria. Le prime manifestazioni furono violente e disorganizzate; gradatamente tuttavia, e in parallelo allo sviluppo della rivoluzione industriale, anche le organizzazioni di lavoro ottennero diritto di esistenza mentre venivano approvate leggi che regolavano il lavoro, soprattutto delle donne e dei fanciulli, e la sicurezza dei lavoratori nell'industrie.

La rivoluzione industriale, in conclusione, ha apportato un cambiamento nell'organizzazione della produzione, nella struttura sociale ed economica della società, ha influenzato la ricerca della scienza e delle nuove tecnologie. L'industria ha portato

cambiamenti importanti anche nel rapporto tra le classi sociali. I contadini si spostarono nelle città, gli artigiani non potevano competere con la manifattura per cui si subordinarono ai capitalisti. Crebbe il potere della borghesia e dei nobili e la Gran Bretagna divenne il primo paese ad esibirsi nel processo di industrializzazione. Negli anni successivi la transizione dall'artigianato alle industrie si estese agli altri paesi europei.

1.2 Seconda Rivoluzione Industriale

La crescita dell'efficienza del lavoro e i cambiamenti nell'approccio della gestione aziendale hanno preparato le condizioni per uno nuovo sviluppo in Europa. La società occidentale aveva fondato l'economia industriale su sistemi basati sulle nuove tecnologie che permettevano una dinamica crescita economica.

Le principali conseguenze dei cambiamenti tecnologici furono legate alla formazione di una società industrialmente più saggia che entrava nella fase monopolistica dello sviluppo. La società occidentale è stata invasa da una nuova rivoluzione tecnologica che è nota nella storia e nella letteratura come *seconda rivoluzione industriale*.

Le peculiarità della seconda rivoluzione industriale sono le seguenti:

- trasformazione qualitativa della base tecnica e tecnologica dell'industria: l'industria evolve in un sistema dotato di macchinari per grandi produzioni, la cosiddetta produzione di massa, in grado di cambiare il destino dell'economia del paese;
- rapida crescita del ruolo della tecnologia nella produzione: le invenzioni scientifiche nel campo dell'ingegneria elettrica, automobilistica, l'utilizzo del petrolio come nuova fonte di combustione, fanno diventare la produzione un'applicazione tecnologica della scienza;
- cambiamento della base energetica di produzione: avviene la transizione dal carbon coke all'elettricità e prodotti derivanti dal petrolio;
- cambiamenti nel sistema organizzativo: con il capitalismo si centralizza la produzione, si creano società per azioni e monopoli. Aumenta la collettivizzazione del lavoro;
- rapida crescita dell'efficienza del lavoro: aumenta di conseguenza il tenore di vita della popolazione;
- qualificazione della forza lavoro: nascono nuove figure professionali quali ingegneri, studiosi tecnici che vengono coinvolti nel processo produttivo. Questo permette di ridurre le spese e aumentare la qualità dei prodotti. Si realizza una nuova forma di produzione ovvero la catena di montaggio in grado di aumentare la produttività e in particolar modo fu H. Ford, nella sua industria automobilistica, a riorganizzare l'intero stabilimento

attorno alla catena di montaggio riducendo drasticamente i tempi e i costi unitari di produzione;

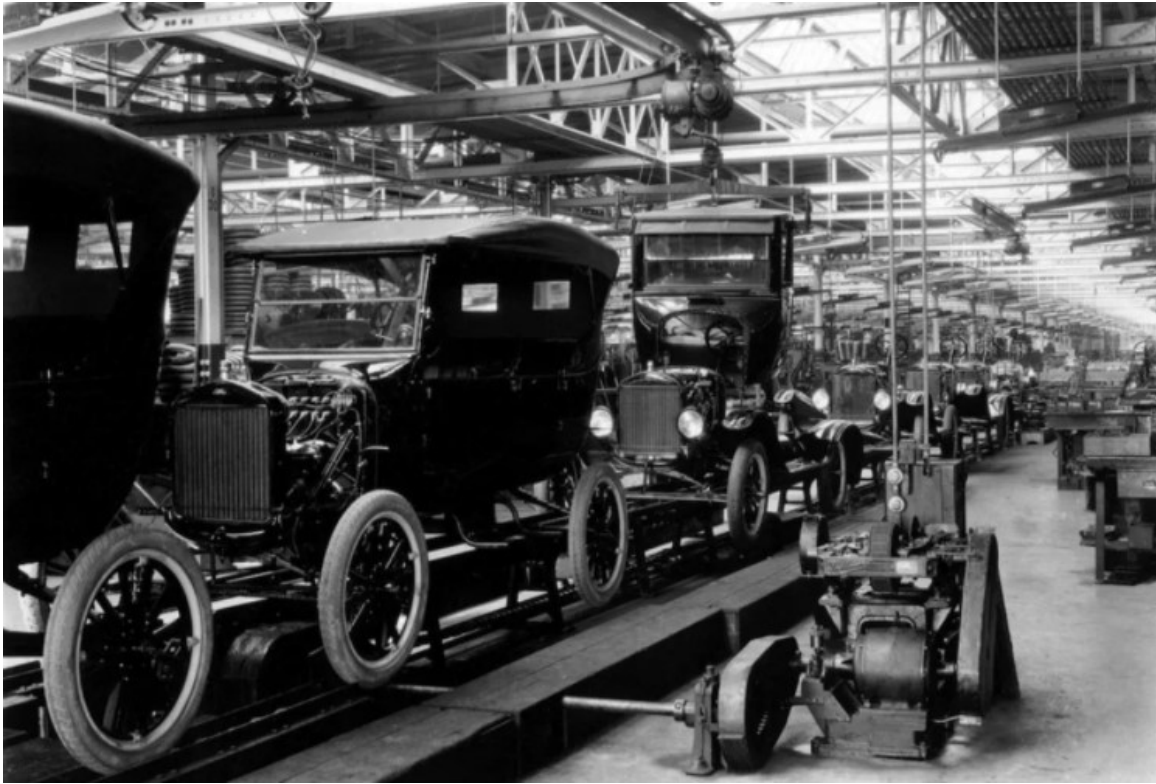


Figura 1.2: catena di montaggio nell'industria automobilistica di H. Ford

- contraddizioni sociali: con il sistema industriale le crisi economiche sono diventate più distruttive, i problemi sociali si aggravano e le nuove tecnologie sono impiegate anche nella creazione di armi e mezzi per l'annientamento degli esseri umani.

Il ruolo chiave nella seconda rivoluzione industriale apparteneva ai cambiamenti in ambito energetico: il vapore fu infatti sostituito dall'elettricità.

I cambiamenti rivoluzionari iniziarono con Siemens che inventò il primo generatore elettrico, la dinamo. Proseguirono con l'ostinato Edison, che prima di inventare la lampadina fece a quanto pare duemila prove. A Edison si attribuisce anche la partecipazione alla realizzazione della prima centrale idroelettrica, sul fiume Niagara.

Vennero costruite intere linee elettriche che consentivano il trasferimento di energia anche a distanze importanti. L'utilizzo dell'elettricità ha avviato una rivoluzione nell'economia globale, si pensi all'elettrificazione della produzione industriale e dei trasporti.

Successive sono le invenzioni delle linee telefoniche e del telegrafo di G. Marconi, ingegnere italiano. Queste e altre invenzioni sono state un impulso per lo sviluppo di mezzi di comunicazione di massa.

A partire dalla seconda metà del diciannovesimo secolo furono costruiti uffici pubblicitari professionali e la pubblicità divenne un mezzo necessario per vendere i prodotti. Coca Cola, Kodak, Levi's e Camel sono diventate i leader nel mercato nazionale e hanno sancito l'espansione economica delle industrie americane. Attraverso le linee di comunicazione e la pubblicità ogni parte del mondo era stato unificato in unico sistema economico globale.

Cinema, automobili, aeroplani, telefono, telegrafo, aspirapolvere, bicicletta e altre invenzioni presero parte nella vita di ogni persona, per non parlare della ricerca in ambito medico, con la secolare aspirina o la scoperta di cure per le malattie che prima di allora erano risultate mortali (tubercolosi, peste, malaria, ...).

Tutte queste grandi invenzioni trasformarono la popolazione in una società orientata ai valori materiali e al consumo, dove emergevano sempre più i fattori economici e lo status di classe.

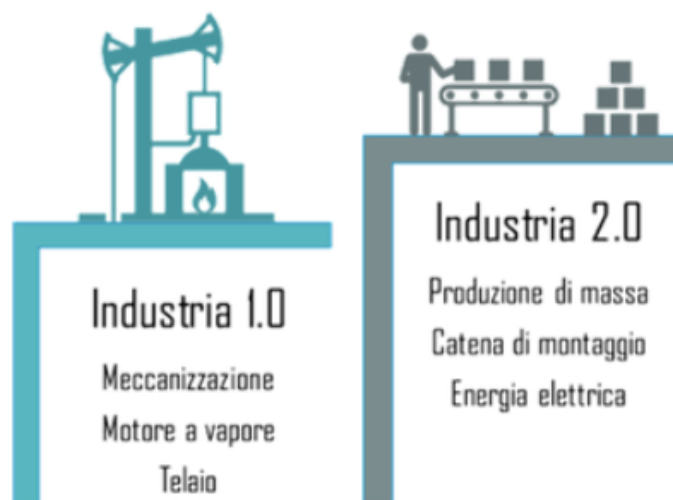


Figura 1.3: schema di sintesi della prima e della seconda rivoluzione industriale

1.3 Terza Rivoluzione Industriale

La prima e la seconda rivoluzione industriale stanno presentando il loro conto in termini di entropia: duecento anni di carbone, petrolio e gas naturale bruciati per promuovere e favorire uno stile di vita industriale hanno prodotto il rilascio di ingenti quantità di biossido di carbonio nell'atmosfera terrestre. Questa energia consumata, il saldo entropico, impedisce alla radiazione solare di sfuggire dal pianeta e minaccia un catastrofico cambiamento della temperatura della terra (il surriscaldamento globale), con conseguenze potenzialmente devastanti per il futuro della vita.

La seconda rivoluzione ha esaurito le principali fonti di produzione. L'energia da combustibili fossili su cui si è basata l'identità della seconda rivoluzione industriale diventa sempre più costosa, invecchia, e il prezzo sul mercato mondiale è estremamente volatile. Le tecnologie utilizzate per movimentare tali energie hanno esaurito il proprio potenziale produttivo, sono troppo costose per la società attuale. La società però necessita dell'utilizzo dei combustibili fossili, si pensi alle coltivazioni che utilizzano fertilizzante e pesticidi petrolchimici, il materiale da costruzione, il riscaldamento e l'illuminazione, i trasporti. Gli Stati membri dell'UE si sono assicurati che le riserve rimanenti dei combustibili fossili venissero utilizzate in modo più efficiente attraverso le tecnologie di energia pulita per limitare le emissioni di anidride carbonica. Queste misure prevedevano di ridurre le emissioni del 20% in venti anni. Ogni governo ha dovuto (e dovrà continuare a farlo) esplorare nuovi modelli energetici nell'intento di raggiungere l'obiettivo di far tendere allo zero le emissioni. Impegnandosi per un futuro di energia rinnovabile l'UE ha messo le fondamenta per un'era economica sostenibile e a emissioni zero.

C'è stato un cambiamento climatico che modifica e sconvolge il ciclo dell'acqua sulla Terra; questo spiega lo scioglimento dei ghiacciai, neviccate troppo abbondanti, alluvioni copiose in primavera, siccità estive più prolungate, tsunami e tifoni, innalzamento del livello del mare. L'ecosistema non può sostenere il cambiamento del ciclo dell'acqua. Ecco che il mondo allora si è adoperato per ridurre le emissioni di CO₂ e altre azioni per proteggere l'ambiente.

Quando avviene una crisi l'uomo studia come affrontarle. Fin dai tempi più antichi, nella storia del mondo, si sono verificati dei grandi momenti di svolta che hanno fatto evolvere l'uomo. Ad esempio, le prime società agricole irrigue della Mesopotamia, Egitto e India, hanno dovuto inventare la scrittura per poter gestire la complessità della coltivazione in immagazzinamento e della distribuzione delle sementi. Le eccedenze di semi

immagazzinate permisero la crescita della popolazione e l'alimentazione degli schiavi, che a sua volta fornì la "manodopera" per la gestione dell'economia. La convergenza fra la comunicazione scritta e l'accumulazione dell'energia, in termini di semi eccedenti, permisero la rivoluzione agricola e la nascita della civiltà.

Un'altra grande rivoluzione avvenne negli anni '90 nel mondo delle comunicazioni in quanto furono inventate varie tecnologie come personal computers, Internet, world wide web e dispositivi senza fili che permisero l'interconnessione di oltre un miliardo di persone sulla Terra. Tale rivoluzione è stata classificata come la *terza rivoluzione* della storia industriale ed ha avuto un impatto non solo in termini energetici, ma anche in tante altre interessanti applicazioni. Le innovazioni di questo periodo, come nel caso delle due precedenti esperienze, hanno cambiato in maniera sostanziale ogni aspetto del modo in cui si vive, lavora e comunica.

La tradizionale organizzazione verticistica della società, che ha caratterizzato gran parte della vita economica, sociale e politica delle rivoluzioni industriali basate sui combustibili fossili, sta cedendo il passo a relazioni distribuite e collaborative nell'emergente era industriale verde. La terza rivoluzione industriale si fonda su cinque principali pilastri ognuno dei quali può funzionare solo in relazione con tutti gli altri, e sono:

- il passaggio alle fonti di energia rinnovabile;
- la trasformazione del patrimonio immobiliare esistente in tutti i continenti negli impianti di microgenerazione per raccogliere in loco le energie rinnovabili;
- l'applicazione dell'idrogeno e di altre tecnologie di immagazzinamento dell'energia in ogni edificio e in tutta l'infrastruttura, per conservare l'energia intermittente;
- l'utilizzo delle tecnologie Internet per trasformare la rete elettrica di ogni continente in una inter-rete per la condivisione dell'energia che funzioni proprio come Internet (se milioni di edifici generano localmente sul luogo del consumo, piccole quantità di energia, possono vendere il surplus alla rete e condividere l'elettricità con i propri vicini in tutto il continente);
- la transizione della flotta dei veicoli di trasporto passeggeri e merci, pubblici e privati, in veicoli plug-in e con cella a combustibile che possano acquistare e vendere energia attraverso la rete elettrica continentale interattiva.

A livello energetico si possono definire tre parole chiave della terza rivoluzione industriale: energia rinnovabile, tecnologie di accumulazione e reti energetiche intelligenti.

Le forme di energia rinnovabili – solare, eolico, idroelettrico, geotermico, moto ondoso e biomasse – costituiscono un pilastro fondamentale di tale rivoluzione e sono utilizzate per produrre elettricità in modo sempre crescente. La diminuzione dei costi di realizzazione rendono tali tecnologie competitive e ne permettono una rapida evoluzione. I governi inoltre offrono degli incentivi, in accordo con l’obiettivo di ridurre le emissioni, e miliardi di euro di capitali pubblici e privati vengono utilizzati nella ricerca e nello sviluppo e nella penetrazione del mercato, mentre le imprese e le abitazioni mirano a ridurre la loro impronta carbonica e diventano sempre più efficienti energeticamente e indipendenti.

Per massimizzare l’energia rinnovabile e minimizzare i costi sono stati sviluppati metodi di accumulazione che permettono la conversione dell’energia al fine di avere un servizio affidabile e duraturo. Un esempio è rappresentato dalle batterie per impianti solari e dal ri-pompaggio dell’acqua nelle centrali idroelettriche.

L’idrogeno è un mezzo di accumulo completamente disponibile ed efficiente, che immagazzina tutte le forme di energia rinnovabile. L’idrogeno si trova dappertutto in natura ma raramente da solo, quindi deve essere estratto da altri elementi in modo tale da essere utilizzato come vettore e accumulatore di energia per tutte le fonti di energia rinnovabili. Questo è importante perché l’energia rinnovabile è intermittente: il sole non splende sempre, il vento non soffia sempre, l’acqua non scorre quando c’è siccità. Quando l’energia rinnovabile non è disponibile possono fermarsi le attività. Il Brasile ad esempio, nel 2001, fu colpito dalla siccità, le acque si abbassarono e la generazione di elettricità, legata alle centrali idroelettriche, rallentò causando interruzioni dei servizi in varie parti del paese. Quindi una infrastruttura ad idrogeno avrebbe permesso al Brasile di utilizzare l’eccedenza di elettricità, generata quando il flusso dell’acqua era alto, per non interrompere i servizi in caso di siccità.

Non solo i paesi in generale possono produrre energia; questa possibilità è stata concessa infatti anche alle imprese e alle utenze private. I governi permettono di produrre energia, accumularla e scambiarla. I contatori intelligenti infatti permettono ai produttori di energia di venderla in modo più vantaggioso alla rete principale e di prendere elettricità dalla rete rendendo il flusso elettrico bidirezionale. Le tecnologie di reti intelligenti sono composte di sensori e microchip disseminati in tutto il sistema di rete e collegati quindi ad ogni elettrodomestico. Il software permette a tutta la rete di conoscere la quantità di energia utilizzata in qualunque momento in qualsiasi posto della rete. Questa “interconnettività” può essere usata per reindirizzare i flussi energetici e perfino di approfittare delle variazioni di prezzo dell’elettricità.

Oltre alla rivoluzione in campo energetico-ambientale, si impone agli inizi del ventunesimo secolo, una nuova organizzazione nella produzione industriale, ideata in Giappone, che mira al miglioramento dell'efficienza delle aziende perché riduce la manodopera, le scorte e migliora la qualità di ogni prodotto. Tutte le migliorie sono consentite dalla graduale crescita delle conoscenze nel settore informatico ed elettronico. Le novità più straordinarie sono infatti da attribuire proprio allo sviluppo dell'informatica, del computer, dell'automazione nelle fabbriche, della meccanizzazione del settore primario e del settore terziario nel quale rientrano i servizi di qualsiasi genere. Lo sviluppo dei servizi ha fatto nascere nuove figure professionali, nuove competenze ed ha allargato gli orizzonti. L'utilizzo di macchinari innovativi nelle industrie ha fatto diminuire il numero di operai perché una parte del lavoro manuale è stato sostituito dai robot, macchinari e tecnologie programmabili.

Sicuramente queste innovazioni hanno risparmiato all'uomo di compiere lavori ripetitivi e noiosi. Un dispositivo elettronico, una volta programmato, può svolgere infatti ciclicamente i processi produttivi senza commettere errori. Un'azienda che adotta la strategia dell'automazione delle macchine genera una riduzione dei costi, un aumento della produzione, generalmente un rispetto dei tempi di lavorazione: tutte caratteristiche che permettono di programmare le attività produttive nel dettaglio, convergere ad una qualità elevata dei prodotti e controllare i processi produttivi.

La terza rivoluzione industriale è stata caratterizzata anche da altre numerose creazioni derivanti da aziende e privati; la tecnologia è fortunatamente in continua evoluzione e permette alle aziende di migliorare i propri processi produttivi per perseguire gli obiettivi strategici.



Figura 1.4: schema di sintesi della terza rivoluzione industriale

1.4 Industry 4.0

L'Industria 4.0 è un evento storico del mondo industriale, così come lo è stata qualsiasi delle tre precedenti rivoluzioni. È vero che l'automazione nelle aziende era già presente, ma questa quarta rivoluzione permette di avere uno sguardo ancora più aperto sulle potenzialità della tecnologia. Ovviamente i robot collaborativi, in grado di eseguire numerose attività che in passato erano esclusivamente svolte da operatori umani, possono minacciare i posti di lavoro di ogni dipendente. La visione più corretta da adottare è quella di guardare alle innovazioni offerte dalla rivoluzione come una potenzialità immensa nelle mani dell'uomo, suo creatore. Le tecnologie sono creature ideate, progettate, realizzate, testate, comprate esclusivamente dall'uomo e l'uomo, da essere educato e cosciente, deve essere in grado di dominarle per migliorare la qualità della vita degli operai e del resto degli individui. Si pensi a dei macchinari medici innovativi che permettono di tenere sotto controllo i battiti cardiaci o quelli che possono prevedere un possibile arresto cardiaco: sono invenzioni straordinarie al servizio dell'uomo, per migliorarne e allungargli la vita.

Un altro esempio riguarda i già menzionati robot collaborativi o le macchine a controllo numerico che attraverso un programma delle istruzioni possono svolgere i processi di produzione in continuo minimizzando gli errori. Se alcune attività fossero ripetitive l'operaio dopo alcune ore di lavoro potrebbe cominciare a stancarsi e non rendere al massimo delle sue potenzialità perché svolgere per molto tempo la stessa operazione li renderebbe pigri e poco motivati. Allora la funzionalità di tali macchine sta proprio nel migliorare la produzione e migliorare la vita di ogni lavoratore. L'introduzione nelle linee di processo delle macchine programmabili toglie chiaramente dei posti di lavoro ma certamente ne crea degli altri.

Il nome "Industria 4.0" richiama, come già detto, alla quarta rivoluzione industriale che è frutto di una nuova modalità di pensiero aziendale, una nuova organizzazione a livello strutturale dell'azienda e dell'organigramma. Come le tre precedenti rivoluzioni hanno mostrato il loro potenziale in diversi decenni, anche la quarta rivoluzione avrà bisogno di tempo per affermarsi in ogni settore ed essere efficace. Il tema sostanziale dell'Industria 4.0 è l'interconnessione del sistema produttivo e delle risorse (macchine, dipendenti, materie prime, prodotti finiti e consumatori). Si può quindi dire che la parola chiave di tale rivoluzione è *interconnessione* e non automazione. Attraverso infatti la rete ogni

risorsa riceve numerose informazioni, la produzione è altamente controllata, le macchine programmabili sono gestite da remoto, l'azienda vive una *Digital Transformation*.

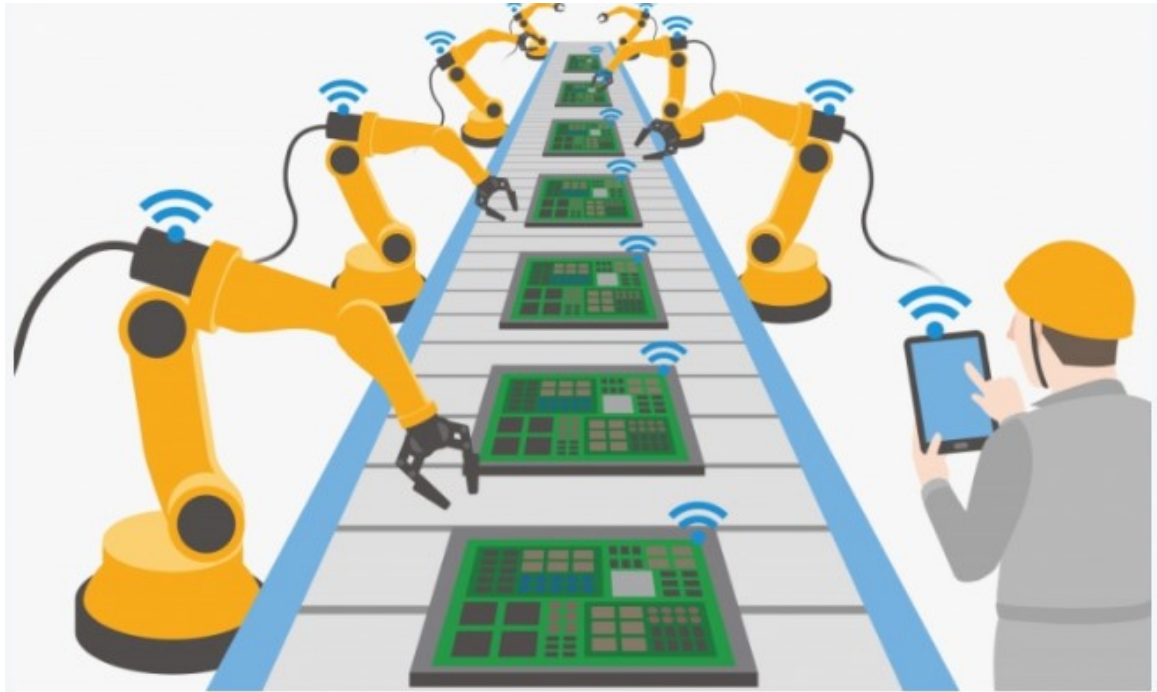


Figura 1.5: interconnessione delle risorse

Si parla quindi dell'interconnessione di tutti gli attori che creano valore all'interno dell'azienda. Si parla della *supply chain* ovvero del processo che coinvolge più figure professionali e numerosi processi come:

- flusso di materie prime
- fabbricazione del processo
- sviluppo e ricerca per nuovi progetti
- marketing in relazione con il consumatore
- distribuzione e commercializzazione dei prodotti
- logistica e trasporti della merce
- assistenza post-vendita.

Ovviamente ne sono stati elencati solo alcuni, ma di processi ne esistono moltissimi altri. L'idea dell'Industria 4.0 è quella di sintonizzare ogni attore con l'altro, di creare una catena produttiva nella quale esiste una sequenza ben definita e programmata dei processi e delle attività. L'interconnessione è permessa dall'evoluzione della tecnologia tra cui

spiccano i robot collaborativi e le interfacce uomo-macchina, che rendono l'interazione più efficace e rapida.

Un altro aspetto interessante della quarta rivoluzione riguarda la stampa tridimensionale anche nota come *manifattura additiva* che permette di realizzare i prodotti non per sottrazione di materiale ma per addizione. Tutte le tecnologie che arricchiscono questo periodo costituiscono l'*Internet delle cose* cioè tutti gli oggetti, i macchinari, il personale sono dotati di sensori capaci di identificare altri oggetti, di misurare parametri fondamentali di funzionamento, di trasferire informazioni in tempo reale e di operare azioni correttive immediatamente.

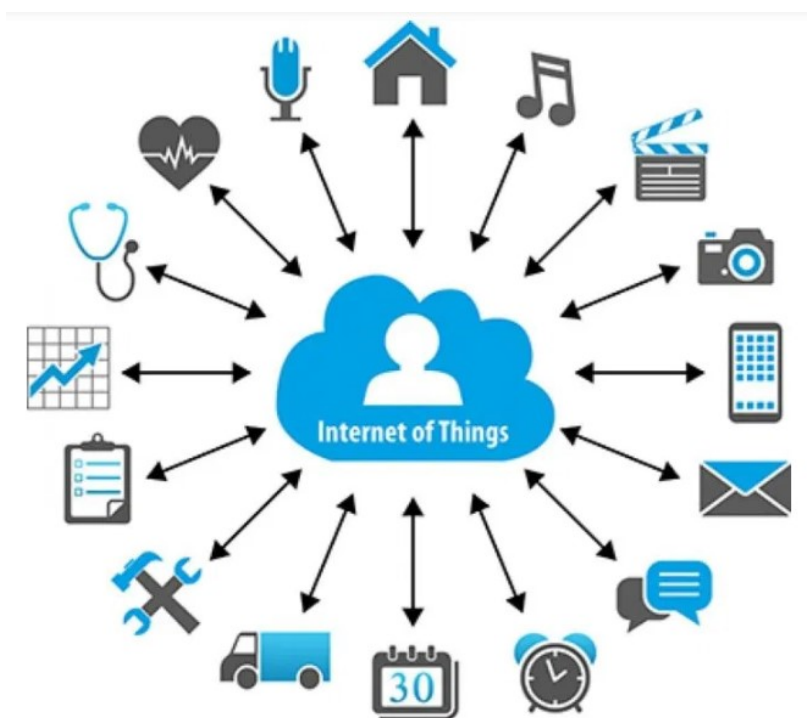


Figura 1.6: Internet delle cose

Tutta l'enorme mole di informazioni verrà trasferita nel *Big Data and Analytics* e verrà utilizzata in seguito per migliorare la produttività del sistema, l'efficienza dell'azienda, le prestazioni e la sicurezza dei processi e per dare continuità al funzionamento delle attività. Le potenzialità di questa rivoluzione sono molteplici perché questo insieme di tecnologie, applicate al sistema produttivo, può non solo migliorare la produttività del lavoro ma può sostituire alcune attività umane che sono insicure, pericolose per la vita dei lavoratori.

Per riassumere il concetto di Industria 4.0 si mostrano i nove pilastri che hanno segnato tale rivoluzione:

- Big Data and Analytics: raccolta e analisi di numerosi dati provenienti da diverse fonti a supporto dei processi decisionali;
- robot autonomi: la nuova generazione di robot avrà un costo più basso e maggiori capacità rispetto a quelli attualmente in uso; saranno in grado di interagire tra loro e con le persone e di apprendere da queste interazioni;
- simulazioni: già in uso nei processi di progettazione, l'utilizzo di sistemi simulativi verrà esteso a tutti i processi produttivi. Questi sistemi elaboreranno i dati raccolti in tempo reale in modelli simulativi virtuali al fine di testare e ottimizzare macchine, prodotti e processi e di anticipare problemi prima che questi avvengano nella realtà;
- integrazione orizzontale e verticale dei sistemi informativi: l'integrazione dei dati e dei sistemi lungo tutta la catena del valore farà in modo che tutti i reparti e le funzioni aziendali diventino parte di un unico sistema integrato;
- Internet of Things: si tratta di quell'insieme di tecnologie e sensori che permetteranno agli oggetti in fabbrica, sia dispositivi sia prodotti finiti, di comunicare e interagire tra loro e con le persone attraverso una connessione di rete;
- cybersecurity: con l'aumento della connettività tra dispositivi, aumenterà l'esigenza, anche in fabbrica, di proteggere i sistemi di produzione e la rete informatica da potenziali minacce;
- cloud: molte aziende già utilizzano applicazioni cloud-based ma nell'Industry 4.0 ci sarà l'esigenza di una maggiore condivisione di dati riguardanti anche la fabbrica e, di conseguenza, anche le applicazioni per il controllo e la gestione della produzione dovranno essere disponibili in cloud;
- additive manufacturing: la stampa 3D è attualmente utilizzata solo per la creazione di prototipi o per la produzione di specifici componenti. Nell'Industry 4.0 queste tecnologie di additive manufacturing verranno utilizzate in modo più ampio per produrre piccoli lotti di prodotti altamente customizzati, ed essendo realizzabili in più centri dislocati sul territorio, permetteranno di ridurre le distanze per il trasporto logistico dei prodotti finiti;
- augmented reality: si tratta di sistemi che, attraverso un dispositivo mobile, come uno smartphone, o dispositivi di visione (per es. occhiali a proiezione sulla retina), di ascolto (auricolari) e di manipolazione (guanti), aggiungono informazioni multimediali alla realtà già normalmente percepita dall'uomo.

La quarta rivoluzione industriale spinge ad immergersi in una nuova cultura dei sistemi produttivi e comprende anche la riorganizzazione della struttura decisionale. Le strategie produttive cambiano e per adottare le nuove tecnologie e le nuove teorie c'è la necessità di abbandonare le “vecchie” abitudini produttive adottate finora. È chiaro che per un'azienda non è immediato accettare di “lasciare la strada vecchia per quella nuova” ma l'Industria 4.0 offre dei vantaggi competitivi che non sono da sottovalutare. I nove pilastri sono solo un esempio che permettono di avere uno sguardo su quali sono realmente i vantaggi che le nuove tecnologie offrono.

Una nuova filosofia di produzione riguarda la *Lean Production* che si focalizza sui bisogni del cliente, sull'eliminazione degli sprechi e il miglioramento continuo delle attività. Il concetto di Lean Production è il figlio del modello di produzione Toyota che si basa sostanzialmente sulla focalizzazione sul valore percepito dal cliente e sull'eliminazione degli sprechi legati ad attività e risorse che non aggiungono valore al cliente.

Un'altra filosofia industriale è il *just in time* (abbreviato *JIT*) che vuol dire “appena in tempo” e che ha invertito il metodo di produzione più comune cioè quello che prevedeva di produrre a scorta. In altre parole, tale filosofia non predilige l'immagazzinamento dei prodotti finiti in attesa di essere venduti (logica di produzione definita *push*) ma suggerisce di produrre solo le quantità ordinate, inseguendo la domanda di mercato (logica di produzione definita *pull*). In questo modo l'azienda riesce a gestire meglio le scorte e ad abbassare i costi di magazzino cercando di ottimizzare non tanto la produzione quanto le fasi a monte, cioè alleggerire al massimo l'approvvigionamento dei materiali necessari.

Il settore industriale che è sempre un passo avanti è quello automobilistico. Infatti, le automobili, con il passare degli anni, possiedono delle tecnologie sempre più sofisticate che rendono sicuri gli spostamenti dei passeggeri. Numerosi sono i sensori installati che controllano l'automobile nel suo percorso. Si pensi al dispositivo GPS, ai sensori di frenata, ai sensori di parcheggio, ai sensori di rilevamento della corretta guida entro la carreggiata, ai sensori di rilevamento di un'automobile in sorpasso...

Uno sguardo interessante è quello che evidenzia un aspetto molto interessante di queste tecnologie in generale: nella storia dell'uomo la tecnologia ha sempre portato un potenziamento nelle capacità dell'uomo di conoscere e penetrare la realtà, un arricchimento del corpo e della mente dell'uomo.

Alcune recenti tecnologie rischiano però di mettere l'uomo in una gabbia di cristallo e quindi di separarlo dalla realtà, di togliergli il gusto, e anche la capacità, dell'esperienza della realtà. Un esempio curioso riguarda un odierno pilota di un aeroplano che, nel suo lavoro, è profondamente supportato da numerosi strumenti tecnologici che monitorano e gestiscono la guida dell'aeroplano. Sicuramente sarà meno "capace" di pilotare di quanto lo fosse un pilota degli anni antecedenti e viene il dubbio quindi che ad oggi, in caso di pericolo, sia opportuno cedergli i comandi. La stessa cosa può capitare con le automobili a guida autonoma; il rischio è appunto quello di perdere l'esperienza della guida, l'attenzione e, in caso di pericolo, avere difficoltà di gestione degli eventi. Queste tecnologie, seppur fantastiche e incantevoli, possono togliere il gusto dell'esperienza, allontanare dalla conoscenza delle cose. Cosa certa è che il lavoro e le figure professionali cambieranno nei prossimi anni ma è estremamente importante comprendere come impiegare le tecnologie in modo tale da far evolvere il lavoro.

Di seguito viene mostrata un'immagine con la quale è curioso osservare come con l'Industria 4.0 scompare la presenza dell'uomo nelle attività.

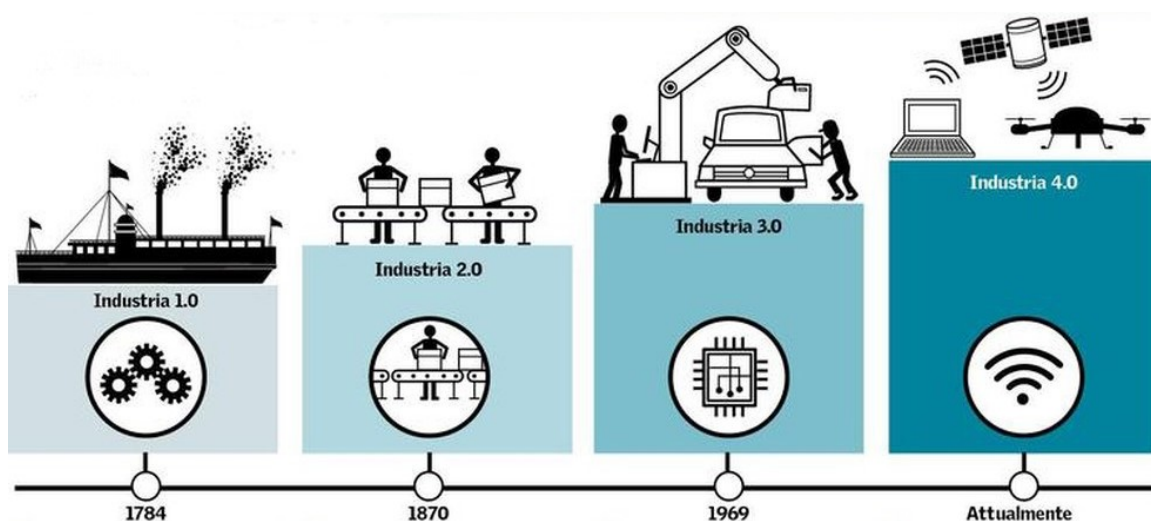


Figura 1.7: evoluzione dell'industria nel tempo

Anche Papa Francesco si è espresso sul tema dell'evoluzione delle tecnologie e dell'industria, dichiarando che c'è un progresso tecnologico importante al quale è necessario abbinare una sana e vera applicazione. Richiama infatti a porre sempre l'uomo al centro di questo cambiamento. C'è la necessità di utilizzare tali tecnologie per rendere

il lavoro arricchente e non per far perdere il desiderio agli uomini di lavorare, di essere responsabili e indipendenti.

2 - SENSORE LASER DI TRIANGOLAZIONE PORTATILE G3F

Il capitolo secondo di questo documento tratta i dispositivi di misura e si sofferma sugli strumenti laser a triangolazione. Il G3F fa parte di questa tipologia di dispositivi ed è stato utilizzato durante la sperimentazione per comprenderne il funzionamento e la qualità delle misure rilevate. Trova applicazione nelle linee di assemblaggio delle automobili con l'intento di migliorare la dinamica e l'estetica della carrozzeria.

2.1 Strumenti di misura

Il Sistema Internazionale, abbreviato SI, considera sette grandezze fondamentali e spiega una serie di regole per il loro corretto uso e per la loro giusta scrittura. Le grandezze fondamentali sono:

- tempo
- lunghezza
- massa
- temperatura
- quantità di sostanza
- intensità di corrente elettrica
- intensità luminosa.

Per misurare una grandezza è necessario avere a disposizione un appropriato strumento di misura che trasforma la grandezza in ingresso, detta *misurando*, in un'altra grandezza.

Uno strumento è un sistema costituito da vari componenti interconnessi che lavorano per fornire in output una misura fedele alla realtà. La risposta di ogni strumento però non si ripete perfettamente e identicamente ad ogni misurazione nemmeno in condizioni statiche.

Nel contesto industriale o in laboratorio vengono effettuate delle misure di parametri per esaminare macchinari e processi. Il valore in uscita dallo strumento di misura viene confrontato con il valore desiderato per quel parametro e se le due quantità differiscono, allora vengono eseguiti dei controlli su macchinari e processi fin quando non si ottiene la specifica desiderata. Per comprendere tale concetto si propone un esempio: esiste una moltitudine di sensori che fornisce al guidatore informazioni per monitorare il funzionamento sicuro ed efficiente dell'automobile. Un sensore mostra la velocità a cui si sta viaggiando, un altro il livello di carburante nel serbatoio tradotto spesso anche in

termini di autonomia dell'automobile, un altro la temperatura del motore per evitare il suo surriscaldamento. Un sensore che ultimamente è montato in quasi tutte le autovetture, ma una volta era soltanto un optional, è il sistema "Global positioning system" o meglio noto come GPS. È un sensore che sfrutta i satelliti per localizzare la posizione del veicolo e permette così al guidatore di raggiungere le mete desiderate. I sensori sono dispositivi al servizio dell'uomo perché ne possono migliorare la qualità della vita. Il sensore "sente" la grandezza in input ed effettua la trasformazione in un segnale di un'altra natura. Si desidera che lo strumento sia sensibile alla grandezza da rilevare e che non percepisca gli stimoli delle grandezze circostanti. L'idea schematica di un processo di misurazione è la seguente:

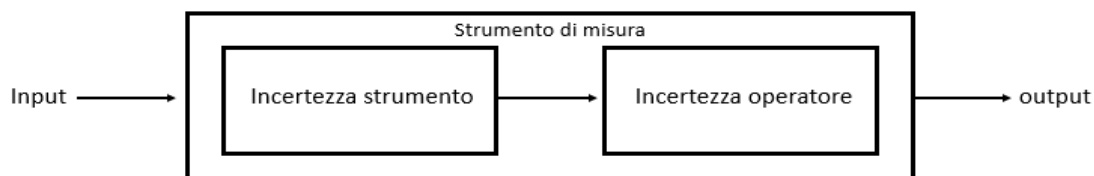


Figura 2.1: schema di un generico processo di misura

L'input o misurando viene rilevato e trasformato dallo strumento di misura in un altro segnale fornendo così importanti informazioni sul processo analizzato. Il concetto di incertezza di misura verrà discusso nel capitolo 3 e troverà applicazione nei capitoli 4 e 5 dove verranno presentate le analisi statistiche e grafiche. Intanto però è fondamentale dire che l'incertezza non è un dato negativo e non dequalifica la misurazione, ma rappresenta il grado di fiducia che si ripone sul risultato di una misurazione. Questo perché non esiste il dato certo, ma esiste il dato con una misura associata.

Osservando gli elementi interni di uno strumento di misura si converge verso una loro generalizzazione perché esistono aspetti simili riguardo alle loro funzioni. Di seguito viene presentato uno schema con le diverse funzioni operative che, se sono note, permettono di prevedere il comportamento dello strumento di misura e di prevedere le incertezze e gli errori.



Figura 2.2: schema a blocchi funzionali di uno strumento di misura

La figura 2.2 è uno schema a blocchi che rappresenta una possibile disposizione degli elementi funzionali considerati necessari per la descrizione di qualsiasi strumento. Da sinistra verso destra si ha:

- misurando: grandezza che si desidera misurare. È percepita in un ambiente in cui ne esistono anche altre. Si desidera estrarre pertanto una sola informazione che caratterizza l'ambiente;
- elemento sensibile primario: ha la funzione di essere *sensibile* al misurando; percepisce gli effetti prodotti dal misurando (e non dal resto) e produce un'uscita. È interessante aggiungere che uno strumento è intrusivo, cioè interagendo con il misurando sottrae energia al sistema oggetto delle misure. I buoni strumenti di misura sono progettati per minimizzare questo effetto di carico, che in qualche modo è sempre presente;
- elemento di conversione di variabile: il segnale di uscita dell'elemento sensibile primario è trasformato in una grandezza di altra natura. È questa una funzione sempre presente negli strumenti; se agiscono dei disturbi allora si genera incertezza di misura.
- elemento di manipolazione di variabile: ha la funzione di trasformare una grandezza in una funzione o in alcuni casi in un algoritmo.
- elemento di trasmissione dati: l'informazione elaborata nei passaggi precedenti può essere comunicata da un luogo ad un altro ad esempio per effettuare delle analisi o monitoraggio di processi.
- elemento di presentazione: ha la funzione di presentare le informazioni prodotte fino a quell'istante. Può essere ad esempio un display. Queste informazioni sono tradotte in un linguaggio comprensibile per l'osservatore che può essere umano o un dispositivo elettronico.
- elemento di memoria: le informazioni, prima di essere presentate all'osservatore, possono essere archiviate.

Lo schema presentato permette di chiarire i più banali dubbi sul funzionamento di uno strumento di misura. È possibile che uno strumento abbia anche altre funzioni e quindi sia caratterizzato da una maggiore complessità. In generale però le caratteristiche mostrate bastano per comprendere il comportamento di ogni strumento di misura.

Il segnale di uscita può essere un segnale analogico o digitale: analogico se l'uscita è rappresentata da una grandezza che segue con continuità le variazioni dell'ingresso (ad esempio un indice su una scala graduata); digitale se l'uscita è convertita in segnali sostanzialmente di natura binaria (on/off). Le grandezze e il tempo vengono discretizzate, quindi è possibile conoscere la storia di alcuni istanti precisi ma non di altri. Se non

agiscono disturbi il segnale di uscita è fedele al segnale di ingresso. Infatti se ad esempio ci fossero dei disturbi il digitale ha un range di valori attribuito a 0 e 1, per cui il disturbo farà sì variare il valore della grandezza ma sarà contenuto in tale range. Questo permette di avere delle informazioni più robuste.

Gli strumenti di misura hanno un ruolo molto importante all'interno delle aziende e dei laboratori. In base ai processi e alle attività vengono scelti gli strumenti più appropriati.

Fare misure permette di:

- mantenere il controllo della qualità della produzione
- rispettare leggi e regolamenti
- condurre attività di ricerca e sviluppo nei campi scientifici e ingegneristici.

Per valutare la qualità delle misurazioni ci si basa sulle caratteristiche intrinseche del sistema di misura. Esse permettono di valutare le performance degli strumenti e consentono agli utilizzatori di scegliere lo strumento più adatto per le loro attività. Le caratteristiche che vengono valutate al momento dell'acquisto riguardano:

- sensibilità: è il rapporto tra le variazioni della risposta in uscita e le variazioni del segnale d'ingresso. Uno strumento di misura caratterizzato da elevata sensibilità mostra ad una piccola variazione del segnale d'ingresso elevate variazioni del segnale d'uscita.

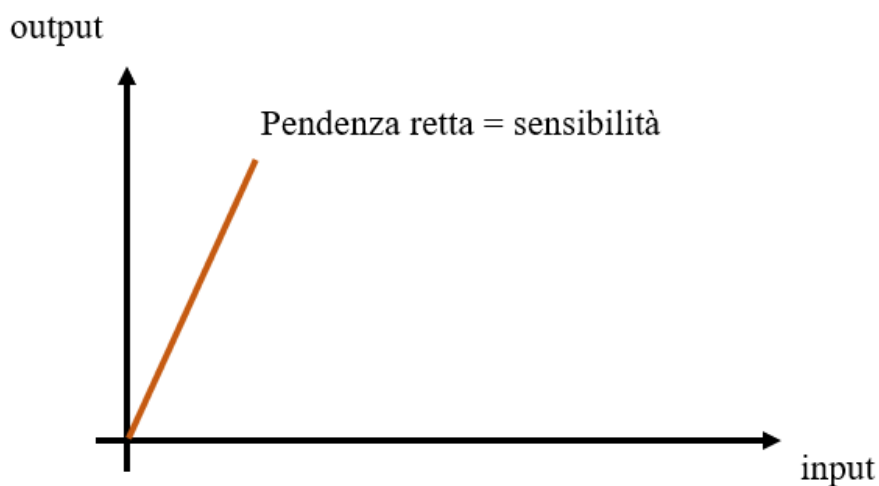


Figura 2.3: diagramma che rappresenta uno strumento molto sensibile. La sensibilità corrisponde alla pendenza della retta. La realtà può anche deviare dal modello, quindi si avrà una curva non lineare anziché una retta

- valore soglia: rappresenta il più piccolo valore d'ingresso che produce un segnale d'uscita. In altre parole se l'ingresso dello strumento viene gradualmente incrementato dallo zero, ci sarà un valore minimo al di sotto del quale non viene registrata alcuna variazione dell'uscita.



Figura 2.4: diagramma che rappresenta la soglia di uno strumento di misura

- risoluzione: è la più piccola variazione del segnale d'ingresso che risulta osservabile. Se l'ingresso viene lentamente incrementato partendo da un certo valore diverso da zero, l'uscita non varia finché non viene superato un determinato valore dell'ingresso. Tale incremento è detto risoluzione. I concetti di soglia e risoluzione appaiono simili ma la risoluzione definisce la più piccola variazione misurabile dell'ingresso mentre la soglia definisce il più piccolo ingresso misurabile.

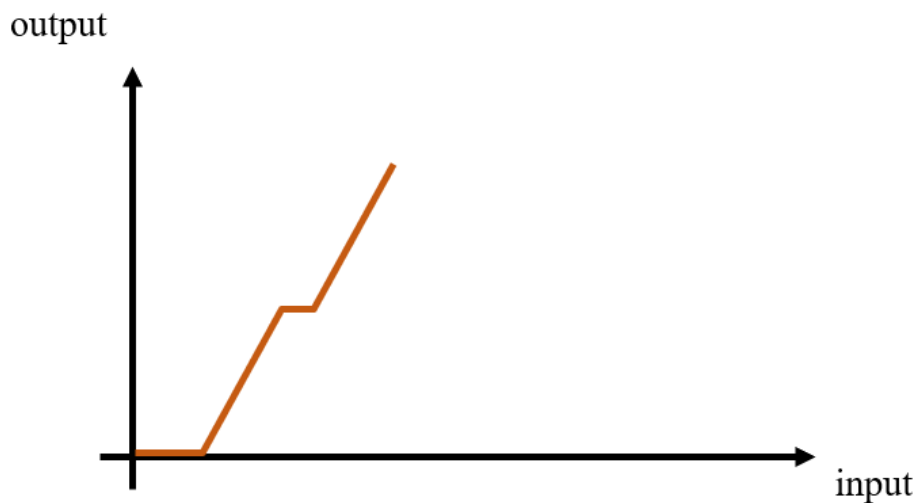


Figura 2.5: diagramma che rappresenta la risoluzione di uno strumento di misura

- isteresi: è la proprietà di uno strumento di esibire valori di output diversi in corrispondenza dello stesso misurando quando questo viene variare per valori crescenti e decrescenti. In altre parole, l'isteresi è la caratteristica di un sistema di reagire in ritardo alle sollecitazioni applicate.

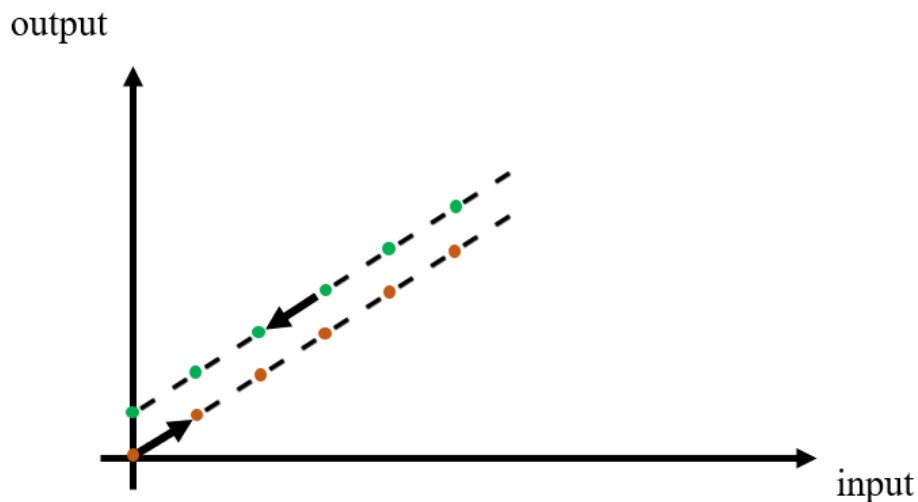


Figura 2.6: diagramma che rappresenta l'isteresi di uno strumento di misura. Si ha quando la curva di taratura ottenuta per valori crescenti dell'ingresso è diversa da quella ottenuta per valori decrescenti

- incertezza: come già spiegato nelle precedenti righe, è un grado di fiducia che si associa al risultato della misura. L'incertezza ha le radici nell'effetto dei disturbi che producono delle dispersioni della grandezza misurata. Per minimizzare la dispersione si effettuano delle osservazioni ripetute della grandezza per poi applicare, come nella maggior parte degli studi, le leggi della statistica. Si ricava dalla distribuzione dei dati la media e la deviazione standard (indice della dispersione dei dati). Tali concetti saranno approfonditi nei capitoli successivi.

- precisione: si presenta quando la grandezza non varia nel tempo ed è definibile quindi come il grado di accordo tra una serie di misure dello stesso misurando in condizioni statiche. È quindi legata al concetto di deviazione standard.

- accuratezza: è il grado di accordo tra il valore desiderato e i valori misurati. È pertanto legata al concetto di media.

Anche i concetti di precisione e accuratezza saranno discussi in modo più approfondito, in particolare si rimanda al capitolo 5 in cui tali caratteristiche giocano un ruolo fondamentale nell'analisi statistica presentata.

2.2 Sensori laser a triangolazione

Nel paragrafo precedente è stato volutamente proposto un esempio riguardante i sensori montati su un'automobile perché il dispositivo G3F, che sarà oggetto di studio del prossimo paragrafo, è uno strumento di triangolazione che si utilizza nella catena di assemblaggio del settore automobilistico. Durante la sperimentazione è stato utilizzato dai diversi operatori per valutarne le performance. È stato infatti eseguito un processo di misurazione, seguito da implementazione dei dati sui software Excel e Minitab che hanno permesso l'analisi statistica e grafica della distribuzione delle misure ottenute.

Prima di presentare il sistema G3F è fondamentale comprendere in quale categoria si colloca tra gli strumenti di misura. È un sensore laser che sfrutta la triangolazione per rilevare delle distanze. In questo paragrafo verranno discussi i sensori laser a triangolazione.

I sensori laser misurano spostamenti, distanze e posizioni, senza entrare in contatto con il target di misura. Il posizionamento a distanza garantisce la sicurezza per l'operatore umano quando è impiegato in ambienti pericolosi. Permette inoltre di fare misure evitando i problemi tipici dei sensori a contatto, cioè legati ai fenomeni di usura.

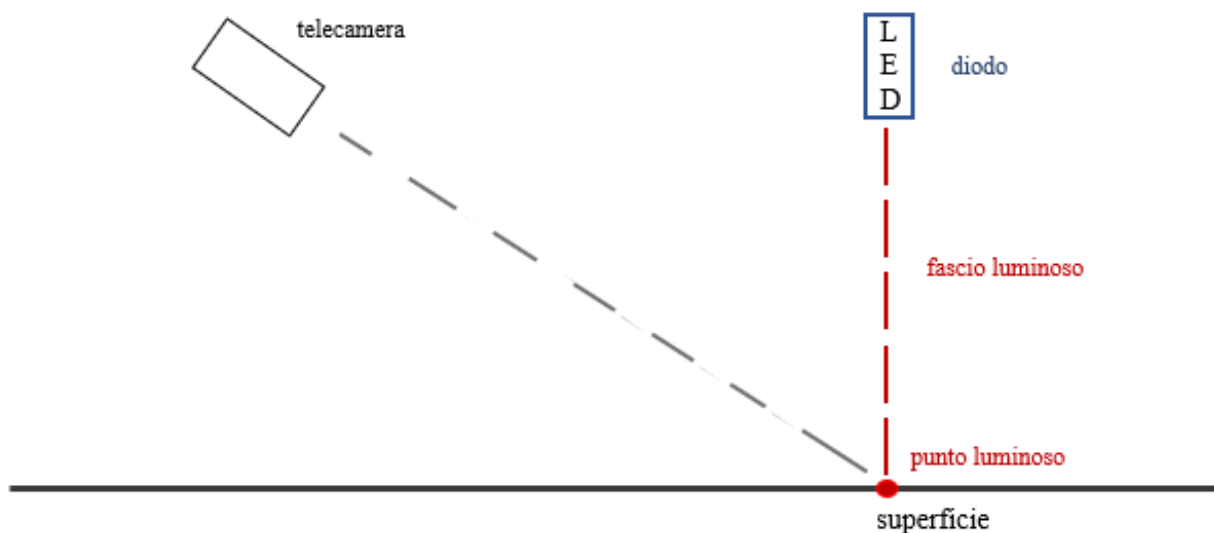


Figura 2.7: schematizzazione del funzionamento di un sensore laser a triangolazione

I sensori di triangolazione trovano applicazione nelle tecnologie di automazione, nell'elettronica, nel settore dell'automotive e nelle attività in cui c'è la necessità di monitorare la qualità delle superfici, rilevare il posizionamento preciso di parti durante l'attività di assemblaggio, rilevare la presenza di prodotti. Per ogni applicazione verrà scelta una tipologia di sensore le cui caratteristiche soddisfino le specifiche esigenze degli utilizzatori.

Il termine "triangolazione" si riferisce alla tecnica di rilevazione delle distanze che avviene attraverso l'utilizzo della trigonometria.

Nella figura 2.7 si può osservare schematicamente il funzionamento e quindi come avvengono le misure tramite i sensori di triangolazione. Una sorgente di luce, che può essere un led (emettitore di luce non coerente) o più spesso un laser (emettitore di luce coerente) proietta un fascio luminoso rettilineo sulla superficie da misurare. Su di essa si forma un punto luminoso. Ad un certo angolo rispetto al punto luminoso è posto l'osservatore del processo ovvero una telecamera. Al suo interno è presente una lente in grado di rilevare l'immagine del punto. La telecamera è costituita, in particolare, da una matrice di pixel sulla quale viene proiettata l'immagine del punto luminoso. La distanza della superficie dal sensore si rileva in base alla proiezione dell'immagine su tale matrice. Sulla base dell'angolo tra la direzione di emissione e quella di ricezione viene quindi calcolata la posizione dell'oggetto utilizzando appunto le tecniche di trigonometria.

La geometria del punto luminoso, generato dall'emissione di luce del sensore, varia in forma e dimensione a seconda della funzione di misurazione a cui è destinato il sensore. Di seguito viene proposta un'altra figura per comprendere il funzionamento di questi dispositivi:

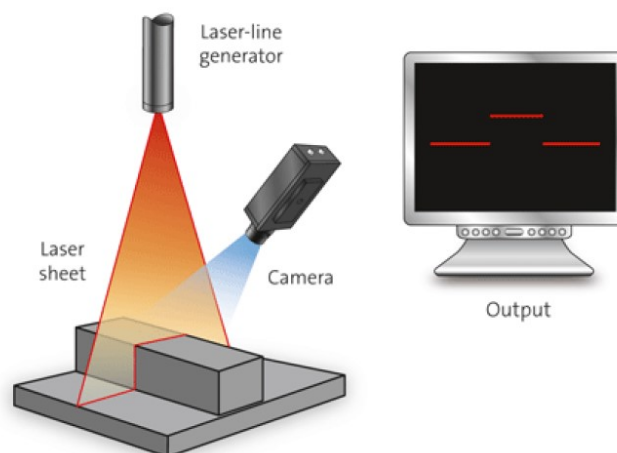


Figura 2.8: rilevamento delle superfici attraverso un sensore laser

È possibile che la superficie su cui si effettuano le misure sia ferma oppure in movimento. Nel primo caso il sensore è installato su un braccio robotico oppure su delle slitte lineari programmate che ne permettono la movimentazione attorno alla parte.

2.3 G3F: struttura e funzionamento del sensore a triangolazione laser

Nelle moderne industrie digitali l'attività di ispezione dei prodotti e del controllo della qualità è sempre più una strategia chiave per ridurre i difetti di produzione. Molto spesso un prodotto finito è costituito da numerosi componenti, basti pensare ad una bicicletta o ad un'automobile. La non conformità di un componente produrrebbe la non conformità del prodotto finito se non venissero effettuate delle attività di controllo. La non conformità è seguita dallo scarto del prodotto finito. Scartare un prodotto finito vuol dire avere delle perdite di denaro legate all'impiego delle differenti risorse quali ad esempio il costo per l'acquisto delle materie prime. Ma oltre a questo c'è da considerare anche il mancato ricavo derivante dalla vendita dello stesso prodotto finito. Non sono pertanto da sottovalutare i danni economici che possono ben presto trasformarsi in perdita d'immagine da parte dell'azienda. Allora, quando i componenti sono numerosi, si adottano delle strategie di controllo su più livelli della produzione valutando le performance di ogni singolo processo cercando di intercettare le eventuali difettosità o anomalie nelle attività. Individuare infatti le deviazioni dal reale consente non solo di prevenire difetti ma di evitarne la propagazione a valle del sistema produttivo. Sorge la necessità di avere informazioni attendibili e quindi di misure che presentino un elevato livello di accuratezza.

Le industrie del settore automobilistico rappresentano un esempio rilevante del controllo della qualità dei componenti al fine di far tendere a zero i difetti di una produzione. Il sistema G3F interviene in particolare nell'attività di assemblaggio per la verifica dei disallineamenti delle parti. È questa un'attività in cui vengono valutate estetica e prestazioni aerodinamiche dell'autovettura. Una non conformità oltre che ad essere esteticamente non accettabile potrebbe causare dei fruscii fastidiosi.

I disallineamenti valutati tramite il dispositivo di triangolazione laser riguardano il *Gap* e il *Flush*. Il Gap rappresenta lo spazio tra due superfici opposte, misurato lungo il piano tangente alla superficie in esame. Il Flush invece è la mancata corrispondenza tra due superfici adiacenti misurata in direzione ortogonale rispetto al piano tangente delle

superfici analizzate. Si osservi la figura sottostante per comprendere il concetto di Gap e Flush:

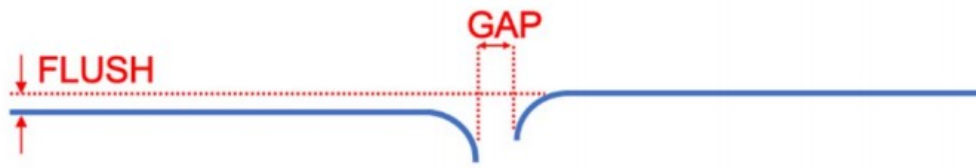


Figura 2.9: rappresentazione della definizione di Gap e Flush

Il G3F è quindi un dispositivo di triangolazione che misura il gap e il flush nelle catene di assemblaggio della carrozzeria di un'autovettura. A seconda del livello di automazione di questi processi le misurazioni possono essere effettuate automaticamente attraverso l'ausilio di robot o manualmente dagli operatori. È evidente che in quest'ultimo caso bisogna considerare il contributo di variabilità introdotto dall'operatore che va a sommarsi all'incertezza dello strumento di misura (dichiarato dai costruttori). A volte il primo contributo può essere anche superiore rispetto a quello introdotto dallo strumento per cui è necessario avere un dispositivo che faciliti l'operatore nell'acquisizione delle misure.

Il sistema G3F è montato su uno smartphone ed è dotato di vari sensori per l'acquisizione e elaborazione dati, per la minimizzazione dell'incertezza di misura e per la sicurezza dell'operatore.

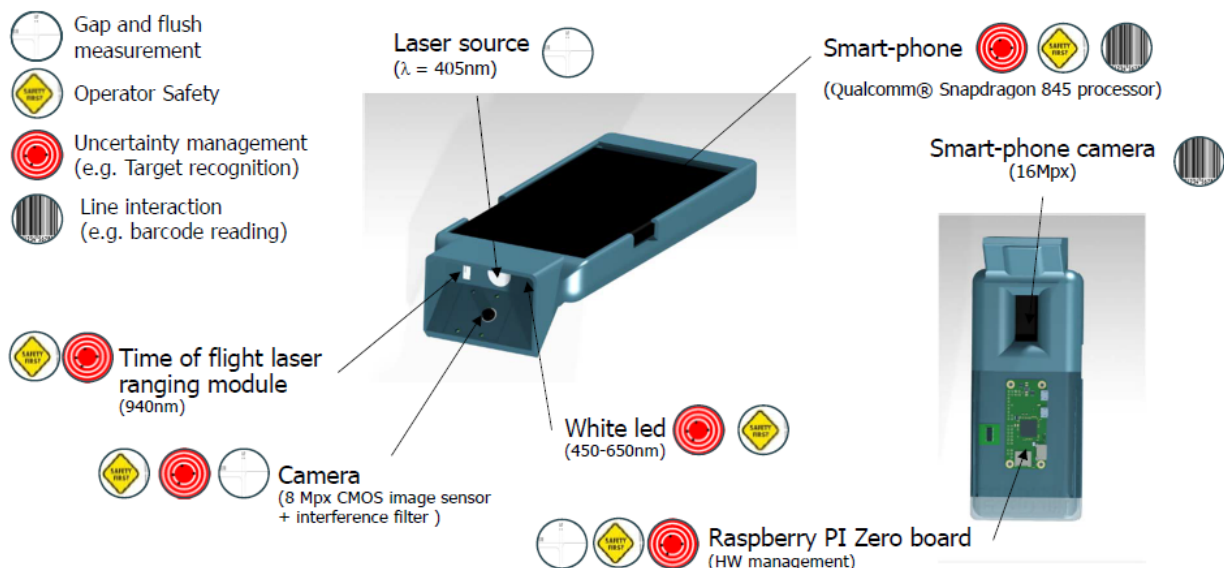


Figura 2.10: rappresentazione del sensore laser montato su uno smartphone per rilevare Gap e Flush

Il G3F è in grado di rilevare gap e flush per superfici che si comportano in modo diverso dal punto di vista ottico (per esempio metallo, plastica e superfici cromate). Il dispositivo infatti ha un sistema integrato che permette di selezionare il target della carrozzeria su cui avverranno in seguito le misurazioni.

Attraverso la figura 2.10 è possibile visualizzare nell'immediato le varie caratteristiche tecniche del G3F. Il dispositivo utilizza una sorgente laser di colore viola ($\lambda=405$ nm) poiché è stato dimostrato che fornisce migliori risultati sulle superfici coinvolte nell'assemblaggio della carrozzeria. La telecamera è stata scelta per incorporare un sensore che fornisce una sensibilità sufficientemente elevata in questa regione spettrale. È stata scelta una "Raspberry PiCam" con un risoluzione relativamente alta. Questa telecamera rende possibile l'impiego del sensore a brevi distanze dal target di misura; il dispositivo può infatti operare in modalità contatto e senza contatto, mantenendo in ugual modo una precisione elevata.

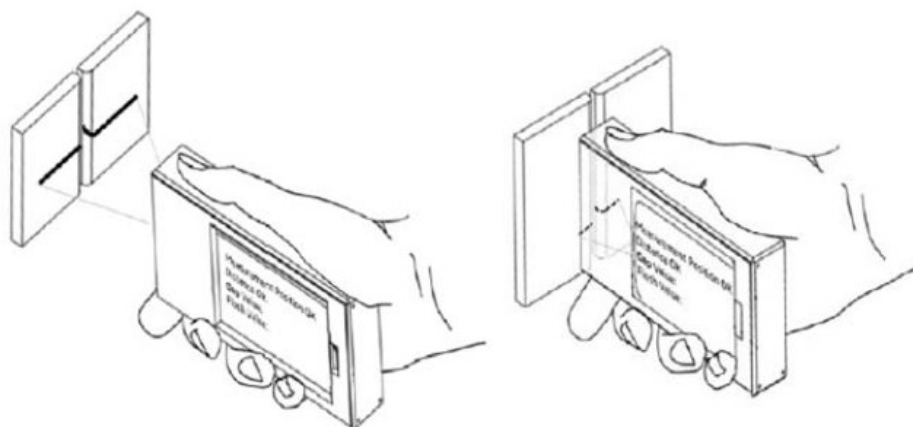


Figura 2.11: operatore rileva Gap e Flush attraverso delle misure a distanza e a contatto

È presente poi un modulo "Time of flight laser" che ha lo scopo di attivare e disattivare la sorgente laser quando la distanza del dispositivo dal target supera il raggio di funzionamento. È quindi un regolatore del tempo di esposizione della fotocamera e permette anche di evitare di procurare danni agli occhi degli operatori presenti. Un altro aspetto caratterizzante di questo modulo è la possibilità di evitare che l'operatore rilevi delle misure con un'incertezza elevata causata proprio dalla distanza dal target.

Laser e telecamera sono gestiti da un modello "Raspberry Pi Zero" collegato alla scheda dello smartphone che permette di eseguire i calcoli e trasferirli in un database.

I dati vengono acquisiti e memorizzati attraverso un'applicazione installata sullo smartphone.



Figura 2.12: l'operatore posiziona ortogonalmente il dispositivo per rilevare Gap e Flush del target di misura

Quando l'operatore si avvicina al target di misura si attiva il fascio luminoso che viene proiettato ortogonalmente sulle superfici e il dispositivo è pronto per effettuare le misure di Gap e Flush (figura 2.12).

Il fascio luminoso viene proiettato parallelamente al display dello smartphone sulla carrozzeria e viene osservato dalla telecamera montata all'interno della cover (figura 2.13).

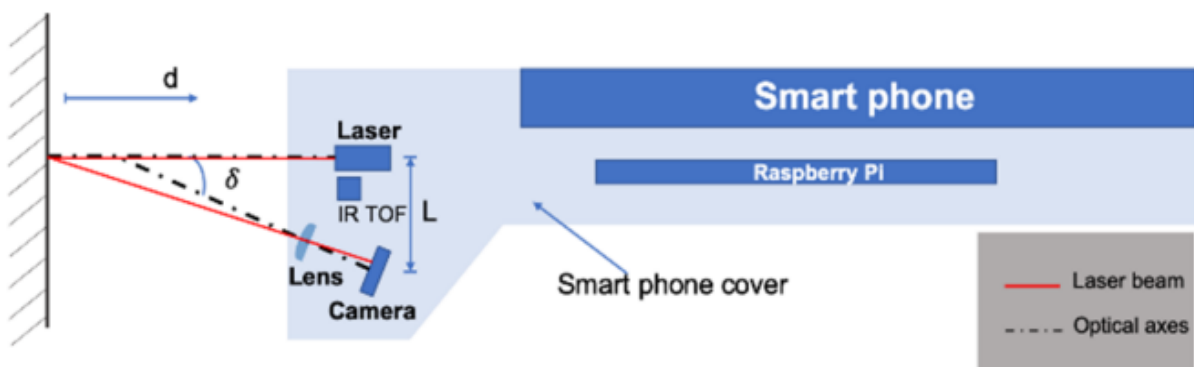


Figura 2.13: schema del sistema di triangolazione del G3F dove d è la distanza dal target di misura, δ è l'angolo tra il fascio luminoso e l'asse ottico della telecamera, L è la distanza tra il laser e la fotocamera.

In un sistema di triangolazione le superfici rappresentano un elemento cardine perché esse possono fungere da specchio e generare una luce diffusa che altera le misurazioni. Per questo motivo è stato scelto un laser viola, caratterizzato da una luce con lunghezza d'onda corta che permette di limitare la diffusione nell'ambiente circostante della luce. È possibile quindi effettuare le misure con uno strumento davvero prestante. Esse vengono inviate tramite un collegamento USB per la loro elaborazione su software tipo Excel e Minitab.

Essendo il G3F un dispositivo portatile utilizzabile da un operatore umano è stato necessario includere un'incertezza generale specifica per le misurazioni manuali.

Lo strumento ha alcune funzionalità incorporate che guidano l'operatore nelle misurazioni per limitare i potenziali errori: richiede ad esempio di selezionare in anticipo il colore e la parte dell'autovettura in modo tale da operare i giusti settaggi per minimizzare l'incertezza che si può introdurre effettuando le misure manualmente. Se l'immagine rilevata non corrisponde alla parte dell'autovettura selezionata le misurazioni non sono permesse. Tale funzione permette quindi di evitare l'assegnazione di misure di Gap e Flush errate.

Come si vedrà nell'analisi statistica e grafica dei capitoli 4 e 5 l'operatore rimane una grande fonte di incertezza perché il funzionamento del dispositivo è legato fortemente sulla capacità di posizionamento da parte dell'operatore. Sarà pertanto necessario che l'operatore prenda confidenza con lo strumento.

L'incertezza associata allo strumento di misura G3F è stata calcolata in laboratorio con metodi di Tipo A in accordo con quanto dichiara la *Guida GUM*.

I valori nominali sono stati rilevati attraverso un calibro con incertezza di 0,01 mm. Sono stati misurati Gap e Flush per 6 punti diversi per un totale di 42 misure utilizzando un livello di confidenza del 95% cioè con un fattore di copertura pari a 2.

GAP Uncertainty budget analysis (GUM type A)

Number of acquisitions	42
Standard uncertainty u_{G3F}	0,19 mm
Standard uncertainty of reference u_{pins}	0,003 mm
Combined uncertainty $u_{combined_G3F}$	0,19 mm
Expanded uncertainty U_{G3F} (95% confidence level)	0,38 mm

FLUSH Uncertainty budget analysis (GUM type A)

Number of acquisitions	42
Standard uncertainty u_{G3F}	0,16 mm
Standard uncertainty of reference $u_{dial\ gauge}$	0,003 mm
Combined uncertainty $u_{combined_G3F}$	0,16 mm
Expanded uncertainty U_{G3F} (95% confidence level)	0,33 mm

Tabella 2.1: tabella riassuntiva dell'incertezza di misura del G3F rilevata in laboratorio

2.4 Produttori internazionali di dispositivi per misure del Gap

Il settore automobilistico prevede che alcuni dei processi siano altamente automatizzati perché sono decine di milioni le autovetture vendute in un anno. Occorre ad esempio che alcuni processi siano eseguiti con dei tempi costanti affinché siano rispettate domanda di mercato e date di consegna. Questo avviene ovviamente anche in tanti altri settori industriali. Gli operatori umani però non riescono ad avere il ritmo delle macchine moderne ma possono eseguire delle lavorazioni tecniche che non possono essere sostituite dall'automazione o perché sarebbe troppo elevato l'investimento da operare o perché non è stato ancora progettato un sistema che soddisfi tali specifiche. Ci sono infatti delle attività che comportano un livello di automazione fortemente complesso affinché siano eseguite da una macchina.

Per le rilevazioni di Gap e Flush si possono utilizzare dei bracci robotici ma ci sono alcune parti della carrozzeria in cui l'ingresso fisico dell'uomo rispetto al robot è più agevole. Il sistema automatizzato risulterebbe molto complesso, quindi per alcune operazioni si preferisce avere degli operatori nel loop. L'attività di controllo delle performance estetiche e aerodinamiche è presente nel settore automobilistico da molti anni e sono previsti diversi dispositivi di misurazione. Rilevare il Gap e il Flush permette infatti di collaudare un assemblato e di poter permettere allo stesso di subire le altre lavorazioni per diventare un prodotto finito pronto per essere commercializzato.

In questo paragrafo verranno menzionati altri sistemi di misura simili al G3F e citati vari siti web internazionali in cui trovare informazioni a riguardo che possono incuriosire il lettore.

La “*Third Dimension*” è un’azienda con più di 20 anni di esperienza nel campo della progettazione di sistemi di misurazione di gap, flush, guarnizioni. Offre servizi di fornitura ai più grandi nomi dei settori aerospaziale, automobilistico ed energetico di tutto il mondo. Giusto per citare qualche cliente: Rolls-Royce, Volvo e Samsung. Il dispositivo di misurazione del profilo ottico senza contatto progettato dalla Third Dimension è chiamato “GapGun” e tra l’altro è stato commercializzato il nuovo modello nel 2020. Come si legge tra le righe del sito web tale dispositivo viene definito affidabile, intuitivo e preciso. Il nuovo sistema progettato è dotato di sensori con una risoluzione maggiore rispetto al precedente e quindi è in grado di effettuare rilevazioni più precise. Si legge inoltre che la “Toyota Lexus” ha integrato la GapGun nella linea di produzione perché è un dispositivo che garantisce velocità di rilevazione, portabilità, agilità e facilità d’uso. È chiaro che nei sistemi produttivi delle case automobilistiche i tempi di lavorazione sono altamente cadenzati ed è necessario che, viste le elevate richieste di mercato, i dispositivi utilizzati siano affidabili e prestanti. Rispetto al G3F la GapGun si presenta con un design differente:



Figura 2.14: GapGun della Third Dimension catturata dal web

Sul sito web il dispositivo viene presentato anche attraverso un video in cui si mostrano le svariate applicazioni che può avere.

Un altro sito web selezionato si chiama “Hexagon” che si presenta come fornitore innovativo di prodotti e servizi di produzione intelligente. Anche in questo caso i dispositivi proposti sono all’avanguardia e rendono più agevoli le varie attività del sistema produttivo. Il dispositivo che permette di effettuare le rilevazioni dei profili delle autovetture è detto “Calipri”. Nel sito si parla di diversi modelli uno dei quali è mostrato nella figura sottostante:



Figura 2.15: dispositivo Calipri della Hexagon per misurare i profili delle autovetture

Il dispositivo viene presentato come un sistema di misura manuale in grado di offrire risultati costantemente precisi e che richiede una formazione minima per imparare ad usarlo. Ovviamente l’innovazione oggi permette di raggiungere delle caratteristiche di base per ogni dispositivo. Ogni azienda in base a quanto deciderà di investire sulle tecnologie riuscirà ad avere dei dispositivi più o meno performanti rispetto alla concorrenza.

Volendo confrontare i vari dispositivi si presenta un altro sito web altrettanto importante in quanto l’azienda americana “Perceptron” si occupa di fornire ai clienti delle tecnologie avanzate per identificare e risolvere i loro problemi legati alle misure e alla qualità. Nel sito c’è una sezione dedicata alle misure di Gap e Flush. L’azienda si presenta come la soluzione migliore per garantire i più alti standard di adattamento e allineamento delle parti. Promuove una linea completamente automatizzata in cui vengono utilizzati dei robot collaborativi. Altri sistemi invece guidano il personale durante il processo produttivo. Nella figura che segue è interessante osservare il massiccio sistema di robot collaborativi. L’intervento dell’uomo nelle attività produttive è molto spesso determinante, soprattutto quando si parla di catene di assemblaggio. Nell’ispezione della

qualità delle parti l'uomo è più agile dei robot. Per far compiere infatti al robot i movimenti che l'operatore umano farebbe in poco tempo c'è la necessità di una programmazione di alto livello. Tutto questo comporta degli elevati investimenti e soprattutto l'acquisto di robot collaborativi con elevati gradi di libertà.



Figura 2.16: robot collaborativi che effettuano misure di Gap e Flush con sistemi Perceptron

Al di là degli investimenti, che soggettivamente ogni azienda sceglie di effettuare, è interessante sottolineare che il controllo della qualità è un'attività a cui si pone molta attenzione nelle industrie moderne perché permette di ridurre o, idealmente, eliminare tutte le fonti di errore. Si interviene ad esempio con un'ispezione della produzione sulle fasi più critiche così da evitare una perdita di denaro causata da scarti o rilavorazioni sulle parti. La catena di assemblaggio di un'autovettura è un'attività che si inserisce quasi alla fine dell'intero processo produttivo. Risulta pertanto fondamentale controllare lo stato dell'assemblato. In questo capitolo è stato appunto presentato il dispositivo G3F che permette di curare nel dettaglio ognuno degli assemblati effettuando delle misure sulla carrozzeria interna ed esterna. Il G3F, come gli altri dispositivi visti per le misure di Gap e Flush, forniranno informazioni rilevanti per il miglioramento continuo dei processi produttivi. I dispositivi visti sono confrontabili per caratteristiche fisiche e dinamiche e sono utilizzati nei più svariati campi. Si è visto come essi trovano applicazione soprattutto

nel settore automobilistico. Spesso sono utilizzati anche per il controllo della qualità dell'assemblaggio delle pale eoliche.

3 - INCERTEZZA DI MISURA

L'incertezza di misura viene utilizzata per valutare la bontà dei risultati di un processo di misura. In questo capitolo si affronta la teoria legata all'incertezza.

3.1 Concetto di misura

Il concetto di misura si riferisce alla possibilità di conoscere, descrivere, controllare quantitativamente una grandezza fisica e di prendere decisioni per modificarne il suo comportamento.

Già ai tempi degli antichi egizi misurare rappresentava un'esigenza dell'uomo perché così facendo si poteva comprendere un fenomeno ignoto o parzialmente noto. Ancora oggi, ad esempio, si fa riferimento alla spanna (utilizzata nell'antichità e rappresenta la distanza tra il pollice e il mignolo di una mano distesa) per effettuare una misura grossolana o approssimativa. Nel corso del tempo sono stati poi inventati sistemi sempre più avanzati che hanno garantito una più efficace prontezza di risposta e precisione durante le rilevazioni.

Le misure hanno assunto una significativa importanza nel mondo industriale poiché forniscono informazioni per le azioni di controllo delle attività produttive per il raggiungimento della qualità dei prodotti.

3.2 Processo di misurazione

La *misurazione* è l'insieme delle operazioni che hanno l'obiettivo di determinare il valore di una specifica quantità: sperimentalmente si ottengono uno o più valori che possono essere attribuiti alla grandezza misurata.

In un processo di misurazione, sono sostanzialmente coinvolti quattro attori:

- strumento di misura
- osservatore
- processo di misura
- analisi statistiche e funzioni matematiche.

Le misurazioni fisiche sono processi che permettono di ottenere sperimentalmente delle specifiche su una grandezza. Quando vengono determinate è impossibile rilevarle senza

commettere errori. Intrinsecamente infatti ogni misura è affetta da una sua incertezza che dipende dalla limitata precisione con cui si misura. La parola “errore” non ha il significato, in questo capitolo, di un comportamento negligente ma rappresenta la sovrapposizione di effetti che modificano il valore della grandezza che si sta misurando. Ne consegue che il risultato di un processo di misurazione è una stima del valore associato alla grandezza oggetto della misura, il *misurando*. Quindi per determinare la qualità della misura ottenuta e per rendere significativo il confronto della misurazione effettuata con altre misurazioni della stessa grandezza è necessario associare alla misura un valore detto *incertezza di misura*, che descrive il grado di accuratezza e precisione con cui la grandezza è nota. Non è da confondere il significato dei termini citati *errore* e *incertezza di misura* in quanto nella teoria della misura esprimono due concetti che, seppur connessi, sono ben distinti.

In generale gli strumenti di misura, anche quando vengono applicate appropriate condizioni di minimizzazione degli errori sistematici o casuali, possiedono un'incertezza, cioè un valore che rappresenta il dubbio su quanto il risultato di una misurazione corrisponde al *valor vero* (esso caratterizza la quantità perfettamente definita all'istante in cui è misurata; è qualcosa di non realizzabile) della grandezza misurata. La valutazione di tale incertezza è una parte fondamentale dell'attività sperimentale.

Durante una misurazione, inoltre, gli errori possono essere provocati dalle incertezze degli strumenti stessi, dalle condizioni ambientali che possono compromettere la lettura dello strumento, dall'errore commesso dall'osservatore nella lettura della misura dallo strumento e dagli errori dovuti al processo di misurazione.

È opportuno distinguere i tipi di errori che causano incertezza di misura:

- errori casuali: derivano da variazioni imprevedibili che influenzano il fenomeno che si sta osservando, perciò possono essere descritti dalle leggi della probabilità. Per ridurre l'effetto si effettuano un gran numero di misurazioni della stessa grandezza e nelle stesse condizioni.

Possono essere dovuti a condizioni ambientali non gestibili o non eliminabili, giudizio dell'osservatore e instabilità dello strumento di misura o qualsiasi altra causa di natura casuale.

- errori sistematici: nonostante le misure vengono effettuate nelle stesse condizioni e con la stessa attrezzatura questi errori rimangono costanti e non possono essere eliminati allargando il processo di misurazione. Bisogna conoscere la natura di tali errori per ridurre l'effetto. Questo tipo di errori infatti possono essere ridotti ma mai eliminati

completamente. Possono essere causati, ad esempio, dall'invecchiamento dello strumento di misura.

In sintesi, quando si effettua una misura non si potrà ottenere il valor vero del misurando, ma solo una sua approssimazione. Tutte le misure osservate si dispongono attorno al valor vero e tanto più piccola è la dispersione di tali misure e tanto migliore sarà la precisione, e quindi la qualità, della misura osservata. Ogni volta che si effettua una misura si ottiene una sottostima o una sovrastima del valore misurato ed eseguendo numerose misure gli effetti si compensano. Gli scostamenti dal valor vero identificano la dispersione che rappresenta la bontà della stima e di conseguenza è indice dell'incertezza di misura. Come esempio dei concetti specificati si considera la figura di seguito che riporta graficamente le misurazioni di una grandezza. L'ordinata rappresenta il valore della misura effettuata e l'ascissa rappresenta il numero progressivo della misurazione. La fluttuazione delle misure è variabile: alcune misure sono caratterizzate da una dispersione minore e altre con una maggiore.

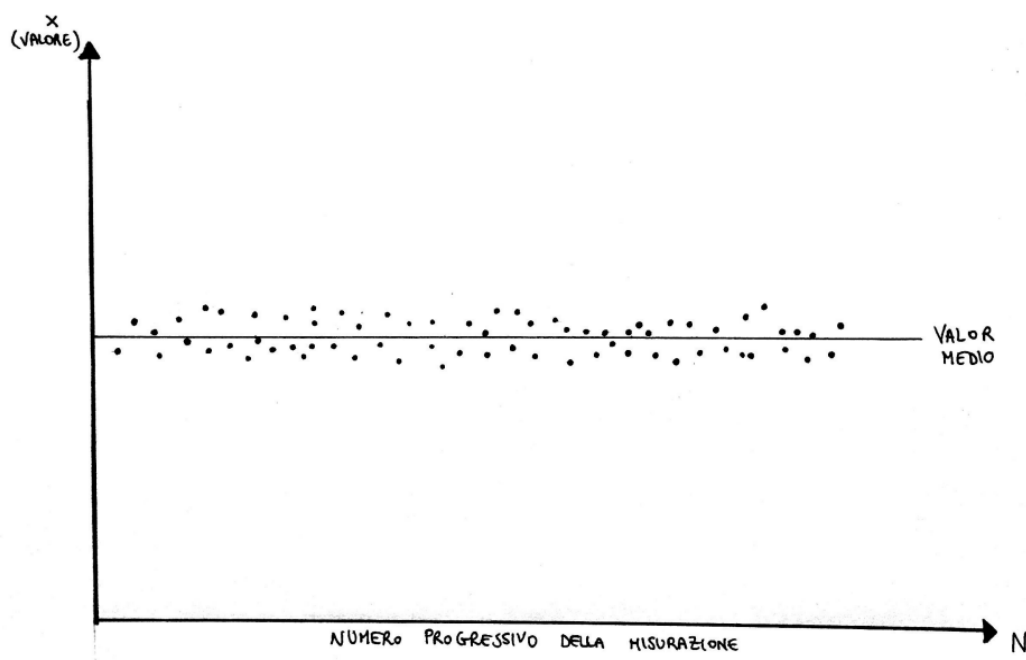


Figura 3.1: misurazioni di una grandezza

I motivi per cui una misura ripetuta fornisce risultati diversi sono molteplici; intervengono infatti fattori fisici che fungono da disturbi come ad esempio la temperatura, le vibrazioni, disturbi di tipo elettrico, fattori legati al processo di misura o all'osservazione dei risultati.

3.3 Metodi per la valutazione dell'incertezza di misura

La misura è definita da tre informazioni:

- valore: quantifica il misurando essendo il risultato del confronto tra il misurando e una grandezza di riferimento;
- unità di misura: deve essere riconosciuta dal Sistema Internazionale affinché il risultato possa essere comunicato e compreso;
- accuratezza di misura: è il livello di fiducia che si attribuisce alla misura ed è quindi indicativa della qualità della strumentazione di misura e della metodologia adottata. Il livello di fiducia è una misura del grado di affidabilità con cui un risultato è espresso.

Quando si effettua una misura, come già spiegato nel paragrafo precedente, l'individuazione di un singolo valore non è sufficiente perché intrinsecamente ogni valore è affetto da incertezza.

L'incertezza di misura, seguendo la formulazione fornita dalla *Guida GUM*, è il parametro, associato al risultato di una misurazione, che caratterizza la dispersione dei valori che possono essere attribuiti al misurando. Quindi, quando si fornisce una misura di qualsiasi grandezza, si dichiara che il valore può trovarsi in un determinato intervallo di fiducia (o confidenza) nel quale fluttuano i valori rilevati. Il valore stimato può essere leggermente inferiore o superiore rispetto al valor vero della stessa grandezza. Ogni volta allora che viene misurato il valore di una grandezza fisica, si determina in realtà solo la sua migliore stima ottenuta dai dati sperimentali.

La Guida GUM che sta per "*Guide to the expression of Uncertainty in Measurements*" ha l'obiettivo di definire le regole per valutare ed esprimere l'incertezza nelle misure. I principi di tale Guida riguardano molteplici applicazioni e sono sostanzialmente necessari per:

- mantenere il controllo della qualità nelle attività produttive
- rispettare leggi e regolamenti
- condurre attività di ricerca e sviluppo in ambito scientifico e ingegneristico.

L'incertezza deve essere classificata secondo il metodo con cui si stima. Seguendo tale indicazione sono stati individuati due tipi di incertezza:

- incertezza di Tipo A: si ottiene attraverso l'analisi statistica dei risultati provenienti da misurazioni ripetute. Il risultato di misura sarà costituito dalla media sperimentale di tutte le misure.

- incertezza di Tipo B: si ottiene tramite informazioni disponibili sulla misura senza effettuare misure ripetute. Tali informazioni possono essere, ad esempio, i dati acquisiti in misurazioni precedenti, esperienza dell'operatore, conoscenza del comportamento della strumentazione utilizzata, specifiche tecniche del costruttore. Il metodo Montecarlo è un esempio di tale metodo di valutazione.

3.4 Incertezza di Tipo A per misure di Gap e Flush

Durante la sperimentazione con il dispositivo G3F, presentato nel capitolo precedente, sono state effettuate osservazioni ripetute di Gap e Flush sulla carrozzeria dell'autovettura target di misura. Al fine di qualificare la bontà di tali osservazioni è stata effettuata un'analisi dell'incertezza con metodi di Tipo A.

La valutazione dell'incertezza di Tipo A si esegue attraverso formule fornite dal calcolo della probabilità e dalla statistica considerando una distribuzione normale o curva di Gauss e si applica quando sono state eseguite un numero adeguato di misurazioni indipendenti di una grandezza X sotto le stesse condizioni i cui valori sono diversi tra loro. Siano x_1, x_2, \dots, x_N gli N valori osservati.

La migliore stima del valore della grandezza X è data dalla *media aritmetica* μ delle osservazioni individuali cioè la somma di tutte le osservazioni diviso il numero delle osservazioni effettuate:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

Equazione 3.1: espressione della media aritmetica

Si dovrebbe scegliere un numero di osservazioni molto elevato, idealmente infinito, affinché la media si avvicini il più possibile al valore vero. Il valor vero è un concetto ideale, quindi non realizzabile, ottenibile con l'eliminazione di tutti i fattori che generano incertezza.

L'incertezza proveniente dalle misure è legata al fatto che, essendo N finito, è possibile conoscere solo una stima della media statistica (che rappresenta il valore atteso del

misurando) che migliora all'aumentare di N. La stima quantitativa della fluttuazione del valore della singola misura x_i attorno alla media aritmetica è data dalla seguente espressione:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N-1}}$$

Equazione 3.2: espressione della deviazione standard

La grandezza σ è detta *deviazione standard* e rappresenta la radice quadrata della media aritmetica degli scarti assoluti tra i valori di tale distribuzione $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ e il valor medio μ .

Il risultato di una misurazione è quindi considerato una variabile aleatoria con una funzione di distribuzione di probabilità di tipo gaussiana; tale distribuzione è centrata intorno al valor medio delle misurazioni (il massimo della distribuzione e quindi il valore più frequente e più probabile) e ha una dispersione simmetrica pari alla deviazione standard (è ugualmente probabile che un valore differisca dalla media della stessa quantità per difetto o per eccesso).

La deviazione standard se non ci sono altre cause di incertezza sulla x , rappresenta l'*incertezza tipo* $u(x)$ della x con un livello di fiducia del 68.4% (si ottiene calcolando l'area sottesa dalla curva normale in tale intervallo). Ciò significa che quando viene fornito, come risultato della misurazione, l'intervallo $x \pm u$ implicitamente si sta considerando che la probabilità che il misurando ricada in questo intervallo è del 68.4%. La probabilità che il misurando abbia un valore compreso nell'intervallo fornito è detto appunto livello di confidenza.

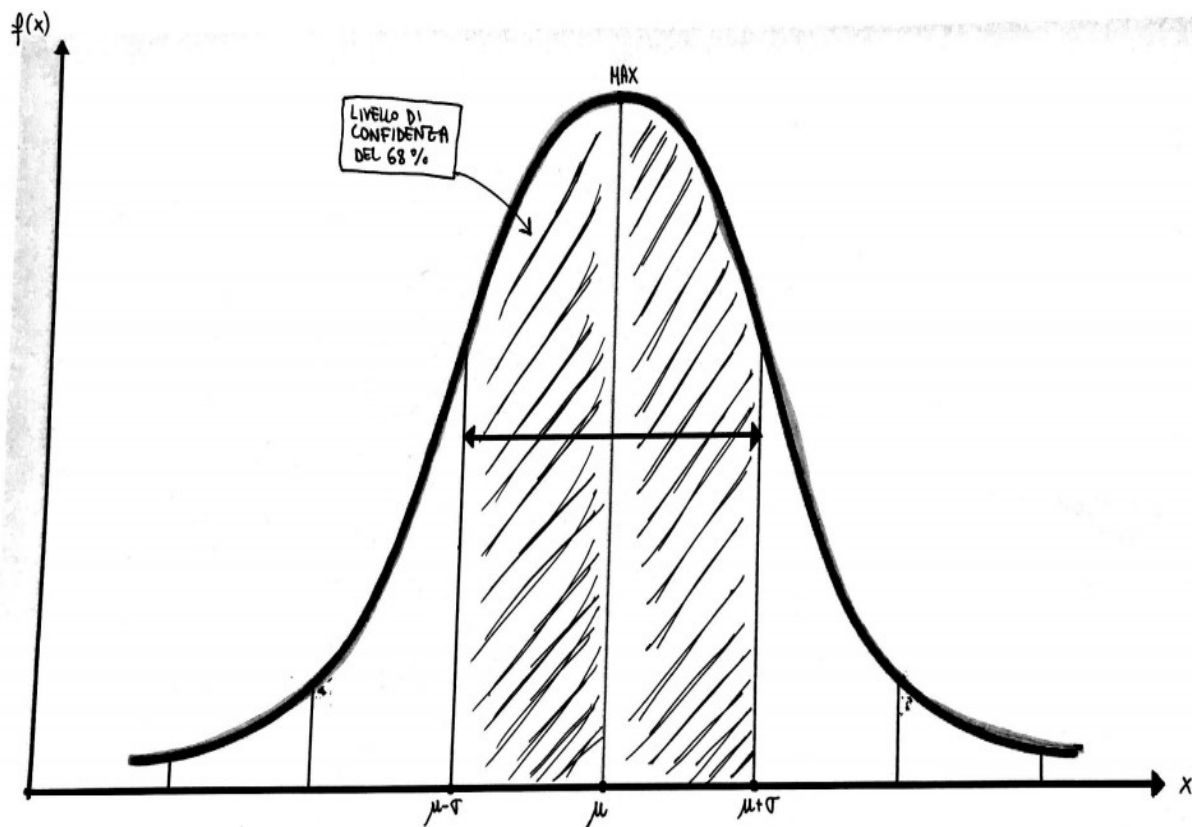


Figura 3.2 relativa al livello di confidenza definito per una deviazione standard

Come succede nella totalità dei casi si introduce un fattore di copertura k che viene scelto sulla base del livello di confidenza richiesto perché un livello del 68,4% può non bastare. Tale fattore soddisfa la richiesta di avere una misura di incertezza che definisca un intervallo, intorno del risultato della misura, che possa ragionevolmente contenere il valor vero del misurando.

La misura dell'incertezza utilizzata per soddisfare tale requisito è l'*incertezza espansa* indicata con $U(x)$ ottenuta moltiplicando $u(x)$ per il fattore di copertura k . In generale k ha un valore pari a 2 o 3. Quando è valida l'analisi statistica, ovvero la distribuzione di probabilità, e $u(x)$ è una stima accettabile della deviazione standard della misura osservata allora $U(x) = 2 u(x)$ con $k=2$ e l'intervallo corrispondente ha un livello di confidenza del 95,45%.

Di seguito è mostrato il grafico relativo alle due deviazioni standard:

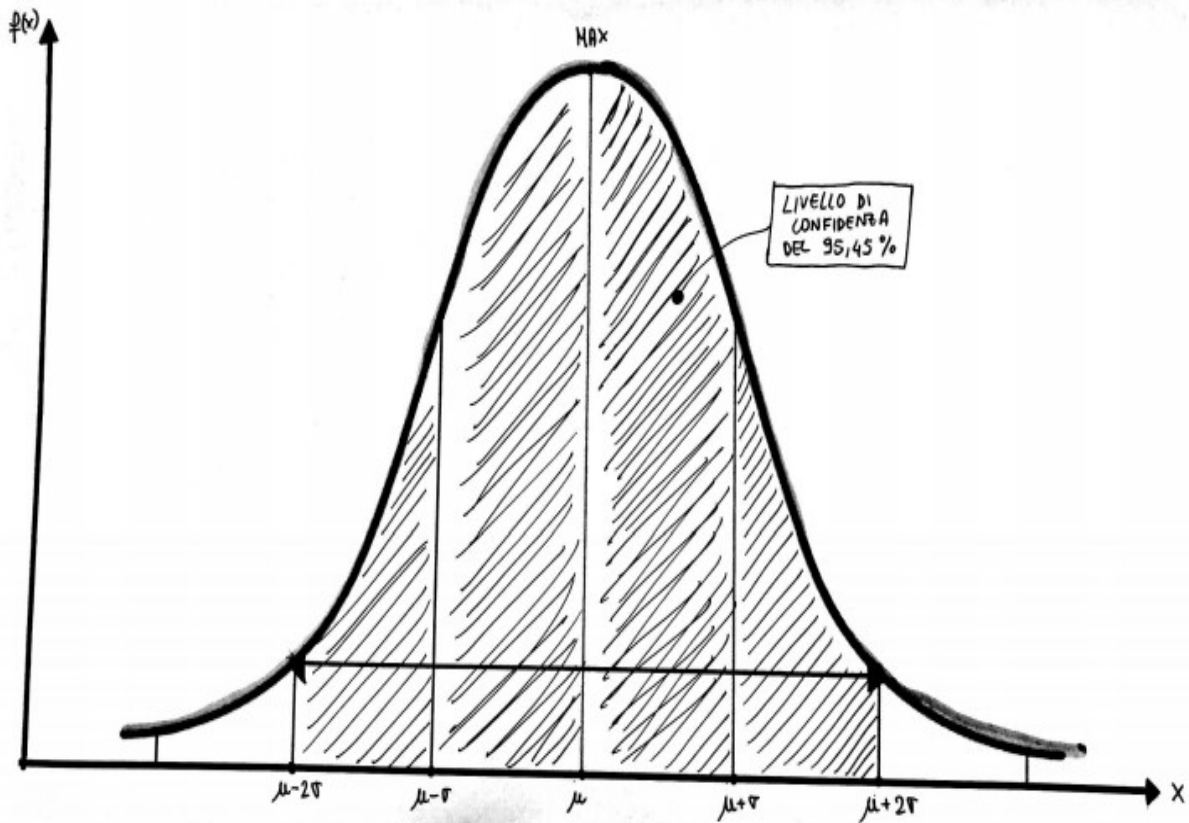


Figura 3.3 relativa al livello di confidenza definito per 2 deviazioni standard

Con $k=3$ si definisce un livello di confidenza del 99,7%.

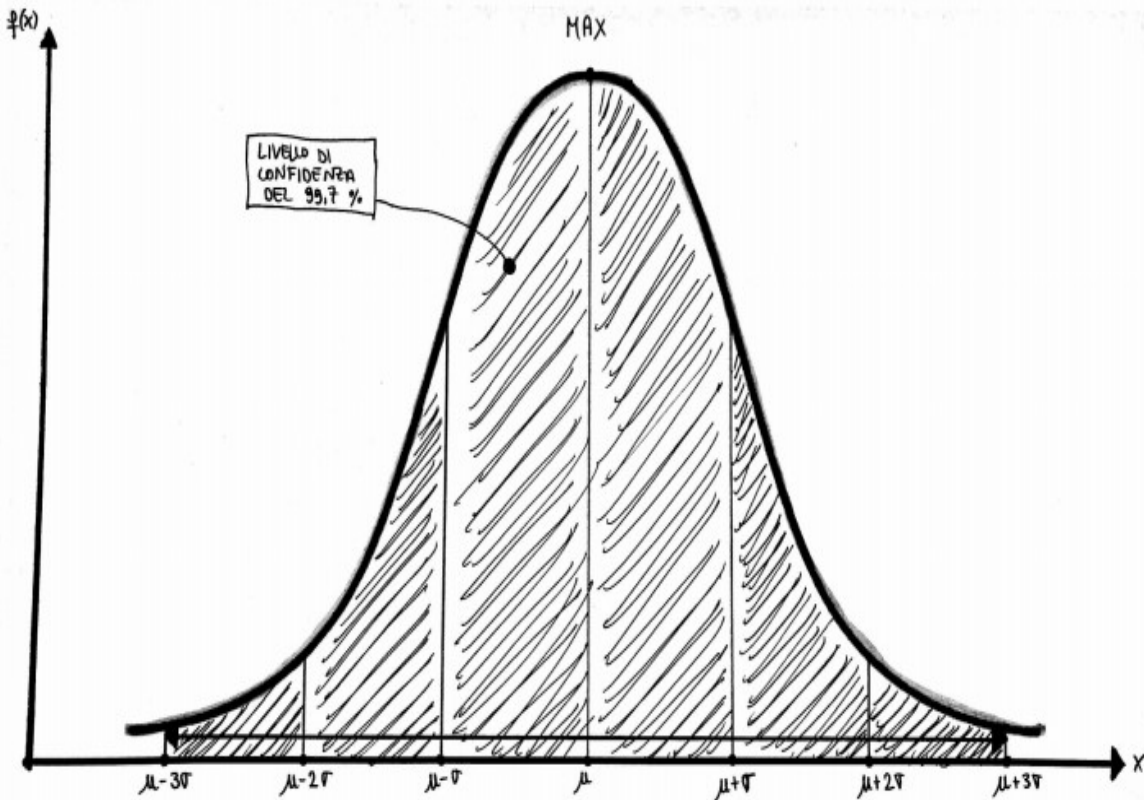


Figura 3.4 relativa al livello di confidenza definito per 3 deviazioni standard

Si può affermare che nel caso in cui le misure cadano in una zona di sicura conformità o di sicura non conformità non ci sono difficoltà nella valutazione dell'incertezza. Si pone pertanto il problema di quale comportamento adottare quando le misure si trovano in una zona di ambiguità ovvero quando il risultato è al di fuori dei limiti di specifica (valore soglia).

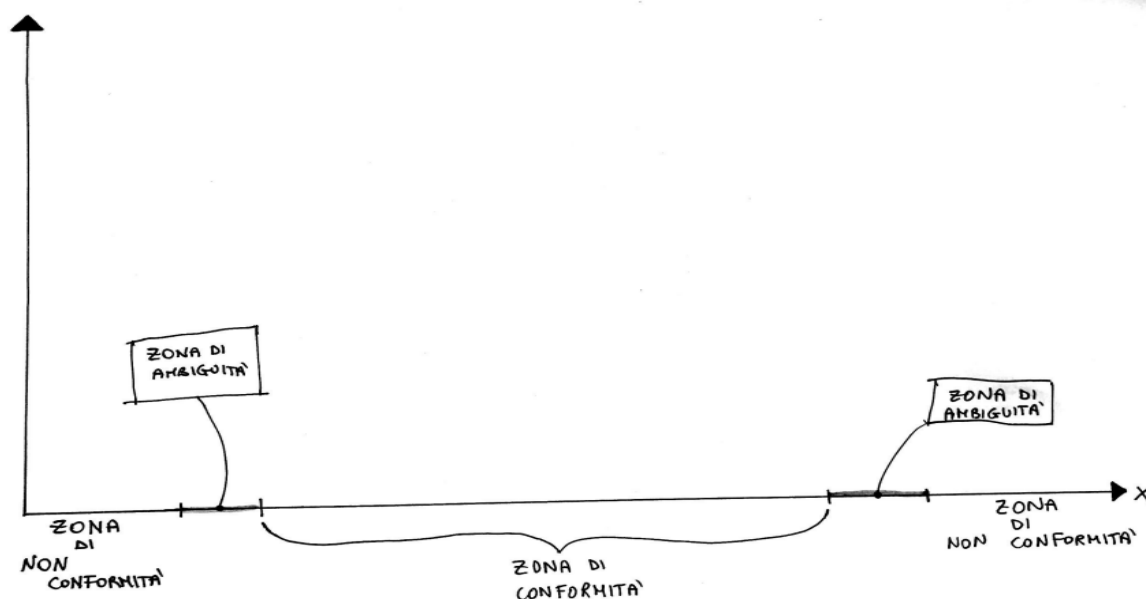


Figura 3.5: definizione delle diverse zone in cui possono distinguersi le misure

In tal caso è necessario individuare innanzitutto quale tra le misure è la più incerta così da poterla eliminare, conseguentemente si procede rivalutando la stima dell'incertezza di misura approfondendo lo studio. Si può agire, ad esempio, sul metodo, sulle condizioni di misura o sulla strumentazione utilizzata.

Lo strumento di misura utilizzato può essere inoltre fonte di incertezza; è estremamente importante, prima di iniziare un processo di misura, effettuare un'operazione di taratura cioè un'operazione di correzione e/o verifica delle caratteristiche metrologiche dello strumento. Altrimenti bisogna conoscere e valutare se è soddisfacente l'ultima taratura eseguita. Un dispositivo tarato è più prestante e consente di ottenere dei risultati più attendibili.

A causa dell'inevitabile incertezza che caratterizza ogni misurazione non si può parlare di relazione di uguaglianza tra misure. Infatti, in un processo in cui si ripete la misurazione di una grandezza, cambiando ad esempio operatore o strumento di misura, si perviene, in

generale, a differenti stime del misurando e a differenti intervalli di incertezza o tolleranza.

4 – SPERIMENTAZIONE

In questo capitolo verranno mostrati e analizzati i risultati dell'esperienza sperimentale rilevati con il G3F. Sono state effettuate infatti numerose misure su varie parti della carrozzeria di un'autovettura con l'intento di testare il dispositivo. Sarà un importante strumento perché, trovando applicazione all'interno delle linee di assemblaggio del settore automobilistico, verrà utilizzato per l'ispezione della conformità delle parti.

4.1 Misure al servizio della qualità

La qualità, estesa a tutti i settori dell'azienda, è un importante fattore di produttività e competitività perché permette di soddisfare le aspettative, i bisogni e le richieste del mercato e del cliente. Migliorare la qualità è un processo metodologico che incorpora innovazione, tecnologia, rete informativa, assemblaggio dei pezzi. All'epoca della produzione artigianale la qualità era legata alle doti personali; oggi invece con le nuove tecniche produttive, dettate dallo sviluppo tecnologico e industriale, si deve avere un'organizzazione e un controllo generale di tutta la varietà dei componenti. Basti pensare alla produzione delle case automobilistiche: ogni componente è fornito da industrie diverse, potenzialmente sparse in tutto il mondo, che utilizzano processi di qualifica dei propri prodotti e la qualità del prodotto finale dipende strettamente dalla qualità del singolo pezzo.

L'obiettivo di questo capitolo è quello di valutare come il sistema G3F opera sulla carrozzeria di un'autovettura in fase di assemblaggio attraverso le misurazioni di Gap & Flush. Le misurazioni saranno poi analizzate attraverso strumenti statistici.

Verrà testata la risposta dello strumento di misura affinché si conoscano le prestazioni e l'incertezza associata.

4.2 Esperienza sperimentale

I criteri su cui poggia la metodologia dell'analisi delle misurazioni possono essere divisi sostanzialmente in tre parti:

- acquisizione dati con il dispositivo G3F
- analisi statistica e grafica dei dati ottenuti

- osservazioni di sintesi sulla qualità dei dati.

Occorre delineare il metodo di acquisizione delle misure perché non basta semplicemente posizionarsi in corrispondenza della fessura della carrozzeria per fare le misure, poiché si potrebbe essere imprecisi, ma l'operatore deve adottare una postura educata e non improvvisare. Occorre inoltre porre attenzione all'angolo di rilevazione delle misure sulla superficie dell'autovettura per non comprometterne la qualità.

Durante la sperimentazione il primo passo è stato valutare l'interazione operatore-smartphone affinché le misure fossero il più possibile confrontabili e potessero generare dei risultati soddisfacenti. Le misure infatti saranno tanto più affette da incertezza quanto più l'operatore è non educato nei movimenti di rilevazione. Si adotta pertanto un approccio statistico con il quale si analizza la distribuzione delle misure ripetute e si stima l'incertezza. Il sistema G3F pertanto deve essere messo in grado di rilevare correttamente le misure e di fornire dati per un'accurata analisi.

Attraverso il dispositivo è stato effettuato un set di misure di prova su un'autovettura target per prendere dimestichezza con il sistema e quindi minimizzare gli errori e valutare l'incertezza di misura. Poi sono stati raccolti i primi dati; il sistema li ha archiviati automaticamente in un database preliminarmente nominato affinché le diverse misure delle parti della carrozzeria potessero essere distinte. Il sistema inoltre ha aggiornato il database ad ogni nuova misura. I dati ottenuti sono stati successivamente esportati in un PC sul quale poi sono stati elaborati e analizzati tramite il programma di calcolo Excel. L'analisi attraverso degli istogrammi sintetizzerà numerosi dati affinché possano essere comunicati in maniera immediata e facilitare la comprensione dell'esperienza.

Lo studio è stato scomposto e mirato all'analisi di ciascuna delle parti della carrozzeria dell'autovettura target, in particolare su:

- la parte sportello-sportello (abbreviata MM; figura 4.1)
- la parte sportello-montante posteriore (abbreviata MM1; figura 4.2)
- la parte spoiler (abbreviata MM2; figura 4.3)
- la parte spoiler centrale (abbreviata MM3; figura 4.4)
- la parte tappo del serbatoio (abbreviata MM4; figura 4.5).

Le abbreviazioni sono usate in riferimento al metallo delle differenti parti della carrozzeria.

Per comprendere meglio le parti della carrozzeria appena enunciate vengono proposte delle immagini.



Figura 4.1: parte sportello-sportello



Figura 4.2: parte sportello-montante posteriore



Figura 4.3: parte spoiler

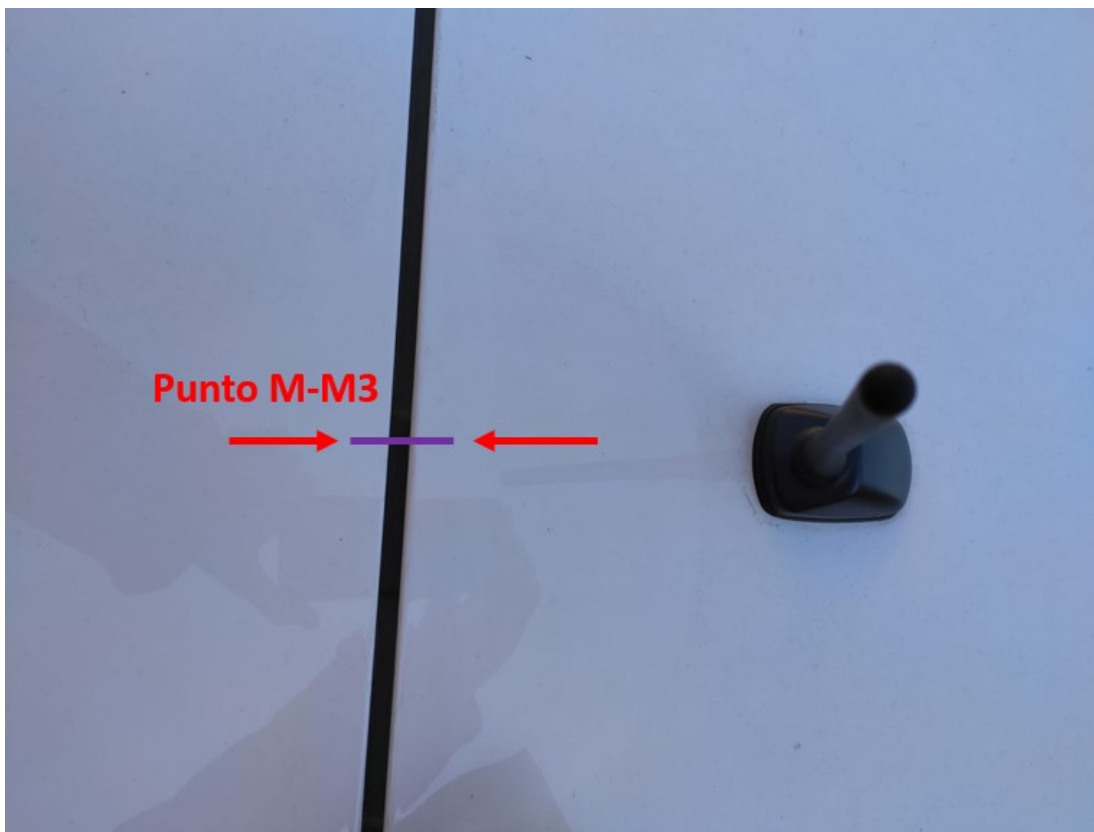


Figura 4.4: parte spoiler centrale

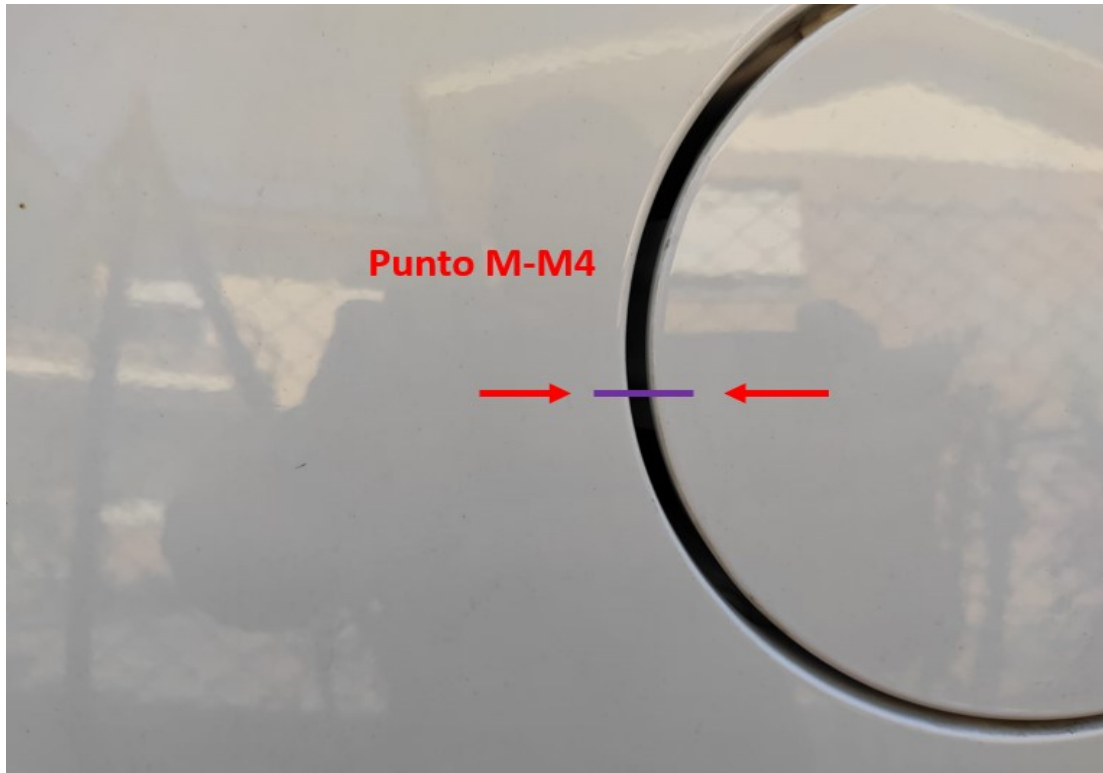


Figura 4.5: parte tappo del serbatoio

Le misurazioni sono effettuate da tre diversi operatori; questo ha permesso di analizzare la variabilità dei risultati legata alle loro diverse caratteristiche fisiche e caratteriali affinché l'incertezza attribuita allo strumento di misura G3F fosse il più possibile veritiera.

Questo è stato pensato per simulare i lavoratori nelle catene di assemblaggio del settore automobilistico in cui lo strumento sarà protagonista per il controllo qualità. Vari operatori avranno approcci diversi con il dispositivo che però non devono compromettere la qualità dei risultati e di conseguenza del prodotto.

Potrebbe accadere, ad esempio, che un operaio abbia una mano più ferma di un altro e per questo motivo l'entità dell'incertezza legata alla misura sarà più contenuta.

Nella fase di analisi è stato utilizzato il programma di calcolo Excel che permette di implementare svariate funzioni matematiche e di studiarle attraverso dei grafici. Per l'analisi grafica e statistica delle misure sono state scelte le funzioni di media aritmetica μ (verrà confrontata con il valor vero rilevato manualmente con il calibro) e di deviazione standard σ (indica il grado di precisione). La loro combinazione ha permesso di filtrare gli *outlier*, cioè quelle misure poco precise che risultano più grandi o più piccole dell'incertezza espansa definita come l'intervallo di confidenza dato dal prodotto dell'incertezza tipo e il fattore di copertura k .

L'analisi grafica delle misurazioni di Gap & Flush viene presentata attraverso l'istogramma cioè una tecnica di rappresentazione che associa ad ogni classe dell'intera popolazione di dati la relativa frequenza. Nell'asse orizzontale sono riportati i *bin* o classi di frequenza delle misure (subset ognuno con uguale ampiezza espressa in millimetri) e nell'asse verticale la frequenza (espressa in percentuale) relativa ad ogni classe. Il numero di bin può influenzare in modo rilevante l'aspetto di un istogramma, quindi va scelto caso per caso cercando di evitare la presenza di molti bin poco popolati e quindi rischiare di perdere l'informazione descrittiva dell'istogramma. In base ai principi della teoria statistica degli errori si dimostra che, quando il numero di misure diventa molto grande, il profilo delle distribuzioni tende ad assumere la stessa forma a campana (Gaussiana). Attraverso l'istogramma si possono fare considerazioni qualitative sulla dispersione, sull'andamento delle misure e la relativa incertezza.

Per ogni parte della carrozzeria è stato fatto un istogramma sia per il Gap che per il Flush. I grafici ottenuti sono poi corretti con l'ausilio dell'applicazione di un filtro che elimina gli *outlier* che giacciono al di fuori dell'intervallo definito per ± 3 deviazioni standard definita incertezza espansa.

4.3 Analisi statistica e grafica con Excel

In questo paragrafo si valuta la conformità delle misure facendo riferimento all'incertezza espansa enunciata nel capitolo precedente. Viene considerato un fattore di copertura k pari a 3 individuando un livello di confidenza del 99,7%. Si considera pertanto un intervallo pari a ± 3 deviazioni standard: al valore della media μ si aggiunge e si sottrae il prodotto del fattore k (appunto pari a 3) con la deviazione standard σ ottenendo l'incertezza espansa. In base a tale intervallo si possono identificare gli *outlier* e fare di conseguenza opportune considerazioni sulle cause che li hanno originati.

L'analisi statistica riguarda il calcolo della media e della deviazione standard della popolazione di dati ottenuta dalle misurazioni effettuate con il G3F sulle diverse parti della carrozzeria del target di misura. L'analisi grafica permette di visualizzare i risultati ottenuti dalle misurazioni.

Si procede ora entrando nel dettaglio: la prima parte esaminata nominata MM riguarda gli sportelli dell'autovettura; di seguito è riportato l'istogramma del Gap:

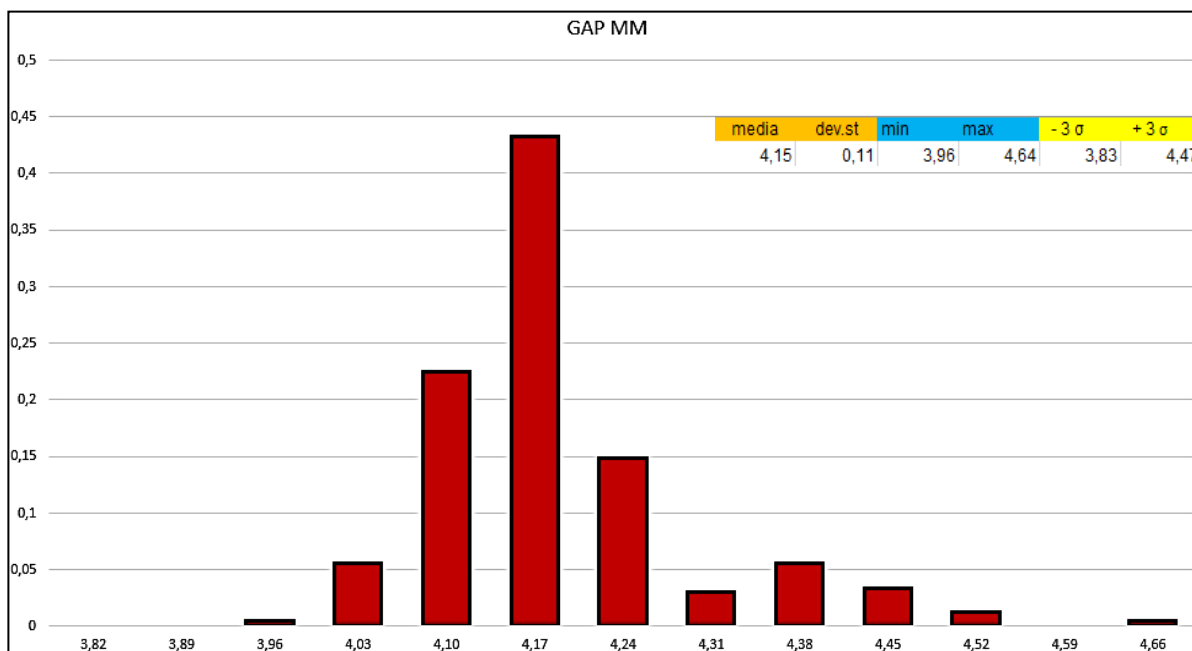


Grafico 4.1: GAP parte sportello-sportello

L'ampiezza del bin scelta è di 0.07 mm in modo tale da permettere la lettura delle informazioni fondamentali dall'istogramma. Si nota infatti una colonna di dati che prevale sulle altre in termini di frequenza: ciò è sinonimo di una corretta rilevazione delle misure che ha permesso di stimare bene la media. Confrontandola infatti con il valor vero si può affermare che le numerose misure effettuate dagli operatori hanno contribuito ad ottenere una media proprio pari al valore nominale rilevato con il calibro, 4.15 mm. Avendo eseguito numerose misure sulla parte MM della carrozzeria è stato possibile far tendere la media al valor vero e raggiungere così un risultato ideale.

Quanto più la deviazione standard tende allo zero tanto più le misure sono precise e la dispersione intorno al valor medio risulta contenuta. Le informazioni dell'analisi statistica forniscono infatti un valore di σ ragionevolmente basso. L'intervallo di confidenza, o come già definito nel capitolo precedente incertezza espansa, permette di verificare che solo alcune misure cadono al di fuori della zona di conformità. Per rendere visibilmente più chiaro tale concetto si possono fare altre considerazioni di tipo qualitativo sulla dispersione delle misure: osservando la tabella azzurra, associata al grafico 4.1, in cui sono riportati il valor minimo e il massimo della popolazione di dati si nota che essi sono

distanti poco più di 0.6 mm il che porta a confermare che, essendo la dispersione bassa, la maggior parte delle misure è contenuta nell'intervallo con fattore di copertura 3.

I risultati ottenuti sono soddisfacenti quindi il dispositivo è stato utilizzato correttamente e i disturbi esterni non hanno influenzato il processo di misurazione.

Alcune misure giacciono all'esterno dell'intervallo corrispondente a ± 3 deviazioni standard e vengono pertanto eliminate. Il risultato grafico che si ottiene è il seguente:

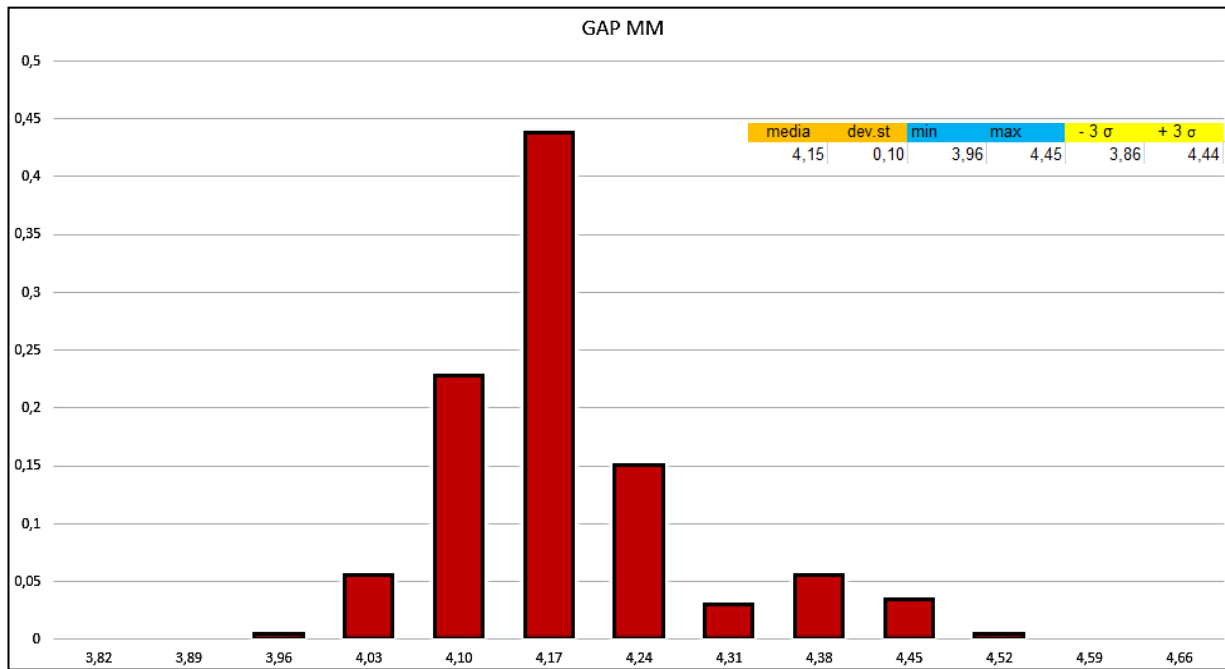


Grafico 4.2: eliminazione outlier GAP parte sportello-sportello

La colonna del bin nella parte alta della scala del grafico è scomparsa. Nonostante l'applicazione del filtro si nota però ancora una piccola percentuale di misure che si discosta dal valor medio e che non rispetta quindi il valore dell'incertezza espansa. Volendo si potrebbe continuare a filtrare ma il risultato interessante è che la deviazione standard, dopo l'eliminazione degli *outlier*, è diminuita ulteriormente e che la media continua a corrispondere al valor vero.

Si continua l'analisi statistica e grafica considerando il comportamento del Flush della medesima parte:

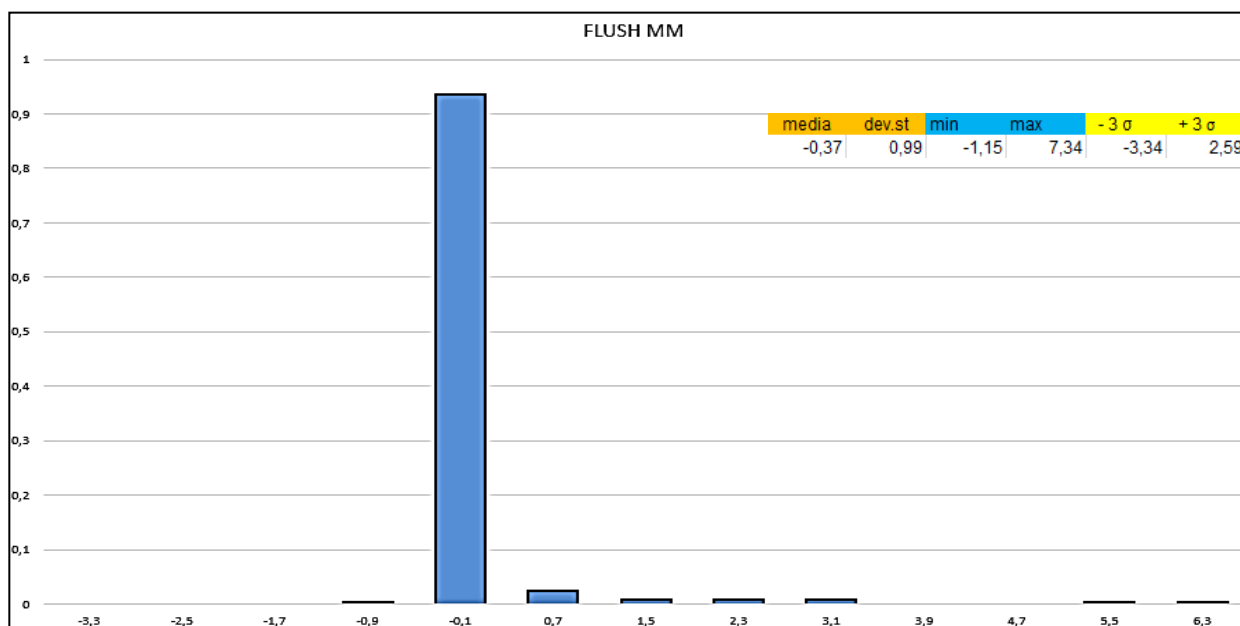


Grafico 4.3: FLUSH parte sportello-sportello

Dal grafico 4.3, riportato sopra, si può osservare che oltre il 90% delle misure popola il bin con estremi -0.9 e -0.1. Questo permette di ottenere una media ben stimata. Dall'analisi statistica invece emerge che il valore massimo della popolazione dei dati, pari a 7.34 mm, giace molto al di fuori dell'incertezza espansa definita da -3.34 mm a 2.59 mm. Tale osservazione è collegata al concetto di deviazione standard. Il valore di σ infatti fa percepire una dispersione non simmetrica dei dati attorno al valor medio. Può essere migliorata attraverso l'applicazione del filtro che elimina i valori *outlier* che non rispettano l'ipotesi di incertezza espansa e che compromettono la bontà della media.

Il filtro provoca una diminuzione della deviazione standard e quindi un addensamento delle misure intorno alla media: verranno eliminati i valori inferiori a -3.34 mm e superiori a 2.59 mm. Il risultato che si ottiene è il seguente:

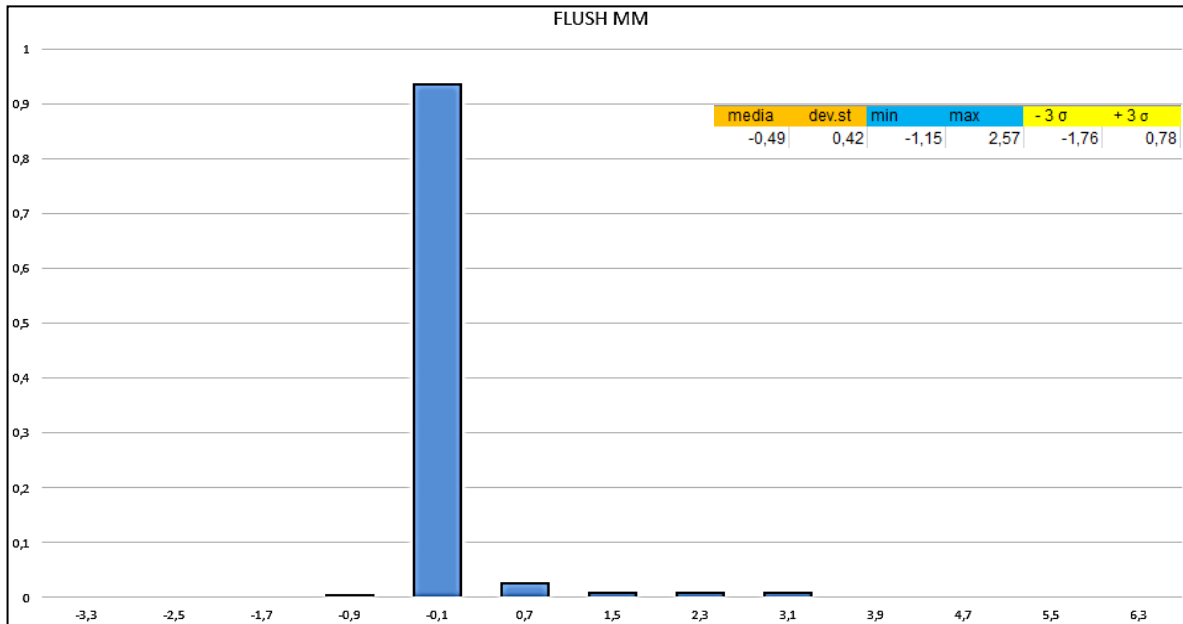


Grafico 4.4: eliminazione outlier FLUSH parte sportello-sportello

Sono stati eliminati quattro valori oltre la zona di conformità e la media ha subito una leggera variazione.

Un risultato soddisfacente è la variazione della deviazione standard. Dopo l'eliminazione degli *outlier* infatti è diminuita provocando un maggior addensamento dei valori attorno alla media.

La dispersione dei valori al di fuori dell'intervallo di $\pm 3\sigma$ è ancora presente e visibilmente osservabile dalla tabella azzurra associata al grafico 4.4; il valor minimo dell'attuale popolazione di dati rimane compreso, come avveniva prima dell'applicazione del filtro, all'interno dell'intervallo di confidenza ma il massimo continua a giacere all'esterno. Una possibile causa è attribuibile alla tendenza dello strumento di misura a sovrastimare le rilevazioni.

La prossima parte esaminata, MM1, è quella corrispondente allo sportello-montante posteriore, nel grafico 4.5.

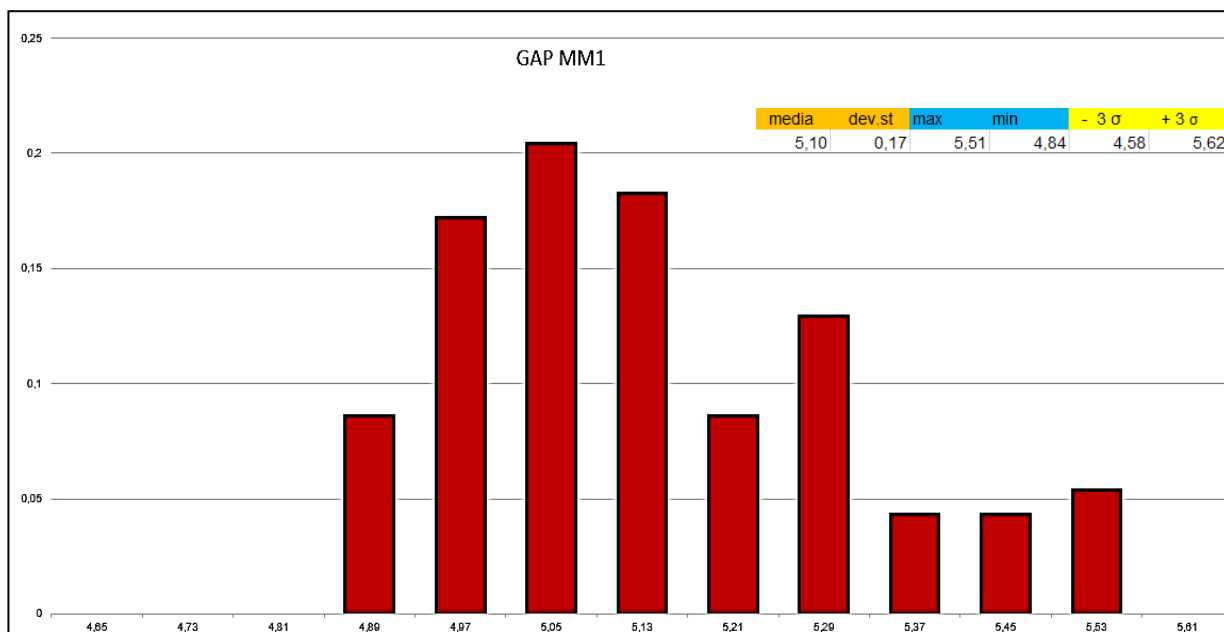


Grafico 4.5: GAP parte sportello-montante posteriore

Ciascuno dei bin, ampio 0.08 mm, risulta popolato con una frequenza confrontabile. La scelta di tale ampiezza permette di non far emergere una classe in particolare e le misure, distribuite nei vari bin, consentono di ottenere delle informazioni descrittive dal grafico 4.5.

Dall'analisi statistica si può notare che non c'è dispersione dei dati attorno alla media poiché sono tutti raccolti all'interno dell'intervallo di confidenza. Non ci sono allora *outlier*; sono invece presenti alcuni valori nella zona di ambiguità, cioè al confine dei 3σ , che provocano leggere variazioni della media.

Il valore vero rilevato dal calibro è pari a 5.00 mm e la media si discosta da tale valore probabilmente per il numero non sufficiente di rilevazioni effettuate. Si può affermare pertanto che il valore della media si avvicinerà al valore nominale man mano che il numero delle misure del Gap aumenterà. In questo modo si troveranno valori che popoleranno maggiormente una classe rispetto ad un'altra, la dispersione diminuisce, le misure saranno ancora più precise definendo una migliore stima della media.

Di seguito è mostrato il comportamento del Flush della parte MM1 attraverso l'analisi statistica e grafica:

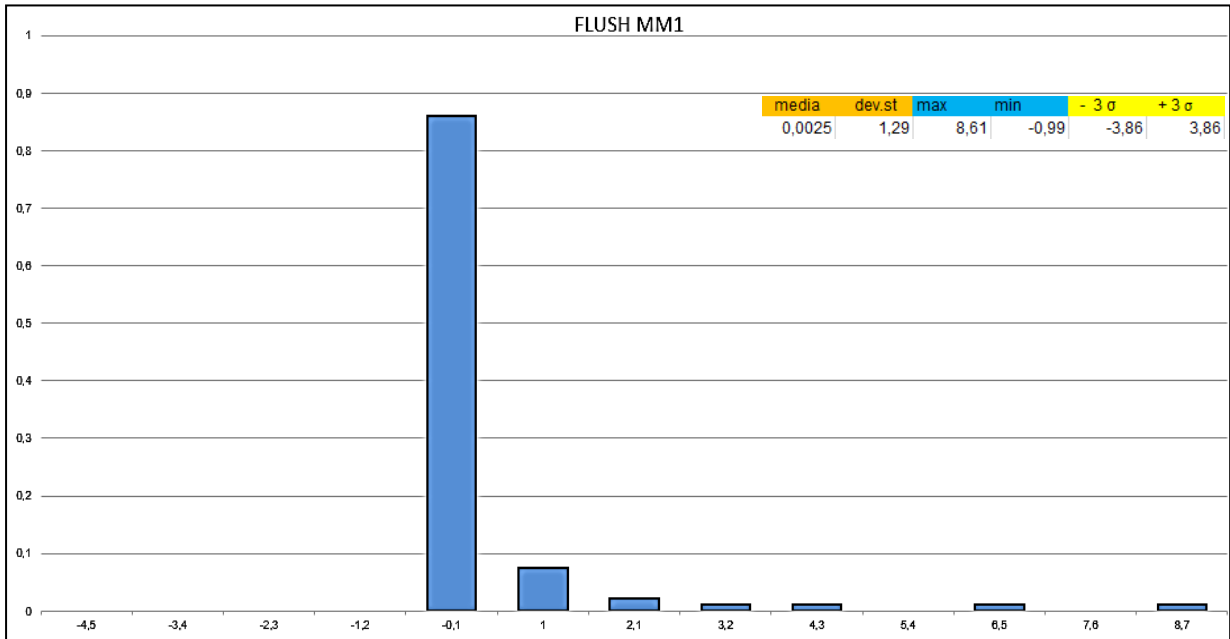


Grafico 4.6: FLUSH parte sportello-montante posteriore

Analizzando graficamente la distribuzione dei dati si può osservare che l'80% delle misure effettuate popola la classe con estremi -1.2 e -0.1. È un risultato che evidenzia una buona risposta del sistema durante il processo di misurazione. Dalla tabella statistica, associata al grafico 4.6, si osserva che il valore della media non è compreso nell'intervallo menzionato: la presenza di *outlier* infatti provoca delle variazioni e la sua stima è pertanto falsata da poche misure molto disperse. Il valore massimo della popolazione del Flush ne è un esempio: è pari a 8.61 mm ed è ben oltre l'incertezza espansa.

Quanto detto è osservabile anche dal valore elevato della deviazione standard che permette di affermare che c'è una elevata dispersione attorno al valor medio. Per tale situazione è stata prevista, come già svolto nelle precedenti analisi, l'applicazione di un filtro che elimina i valori che cadono al di fuori di 3σ .

Si osservano le variazioni nel grafico 4.7 seguente.

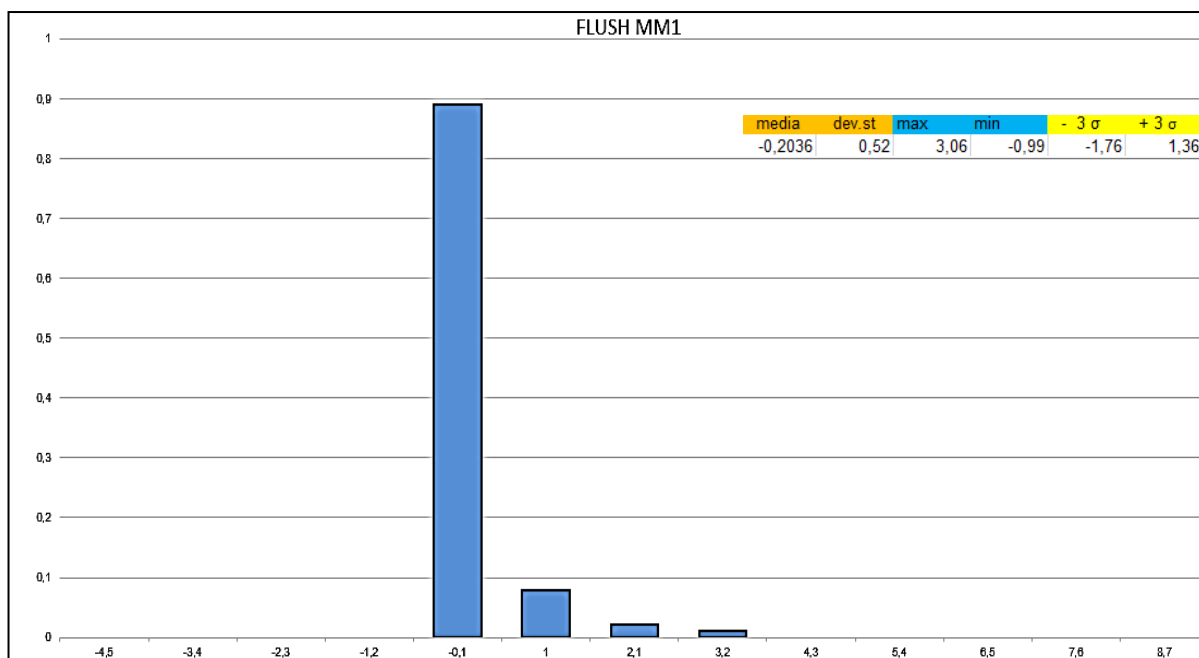


Grafico 4.7: eliminazione outlier FLUSH parte sportello-montante posteriore

Il risultato ottenuto è soddisfacente e soprattutto visibile sia dal punto di vista statistico che grafico. Si osserva infatti:

- la scomparsa dei valori nei bin nella parte alta della scala
- una crescita in termini percentuali della colonna del bin con estremi -1.2 e -0.1
- una diminuzione sia della media che della deviazione standard.

Quest'ultima informazione permette di affermare che i valori si sono ora addensati attorno alla media e di conseguenza la dispersione è sostanzialmente diminuita. Il nuovo valore massimo del set di dati però, nonostante l'eliminazione degli *outlier*, giace ancora oltre la nuova incertezza espansa. La presenza di misure molto distanti dalla media è frutto di fattori che hanno agito come disturbi durante le misurazioni come ad esempio la qualità delle immagini rilevate.

La media ha una migliore stima infatti il 90% delle misure popolano lo stesso bin.

La terza parte della carrozzeria su cui sono state rilevate le misure del Gap e del Flush è lo spoiler. Di seguito è riportato l'istogramma del Gap:

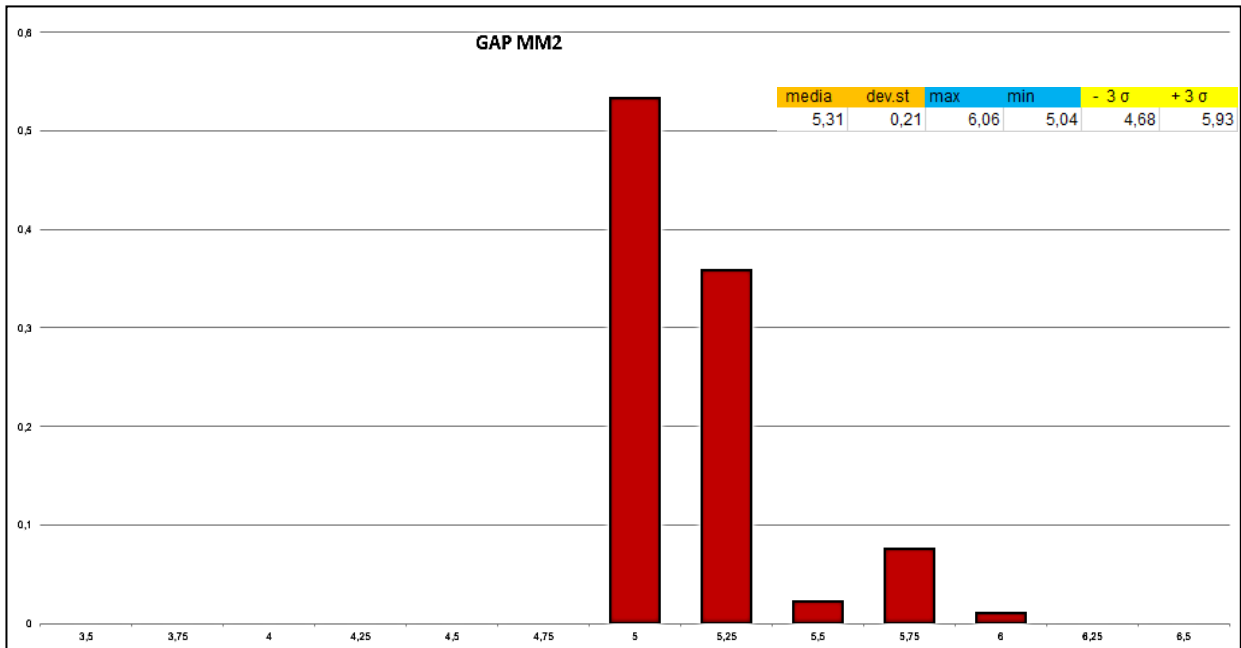


Grafico 4.8: GAP parte spoiler

L'analisi grafica della distribuzione dei dati evidenzia la presenza di due bin che insieme contengono il 90% dei dati. Il primo bin, con estremi 4.75 e 5, nonostante abbia una frequenza del 54% circa, non contiene il valore medio. Confrontando infatti il valore nominale rilevato con il calibro, pari a 5.4 mm, con la media, 5.31 mm, si osserva che il sistema tende a sottostimare. C'è un picco centrale di dati e poi una evanescenza ai lati; probabilmente il numero delle misure effettuate non basta per stimare una media ideale: bisognerebbe allora procedere incrementando il database con altre misure. L'incertezza espansa calcolata fa emergere un solo *outlier* che popola l'ultima classe ed è quindi nella zona di sicura non conformità.

Dopo l'applicazione del filtro di 3σ si ottiene un nuovo grafico che viene proposto di seguito:

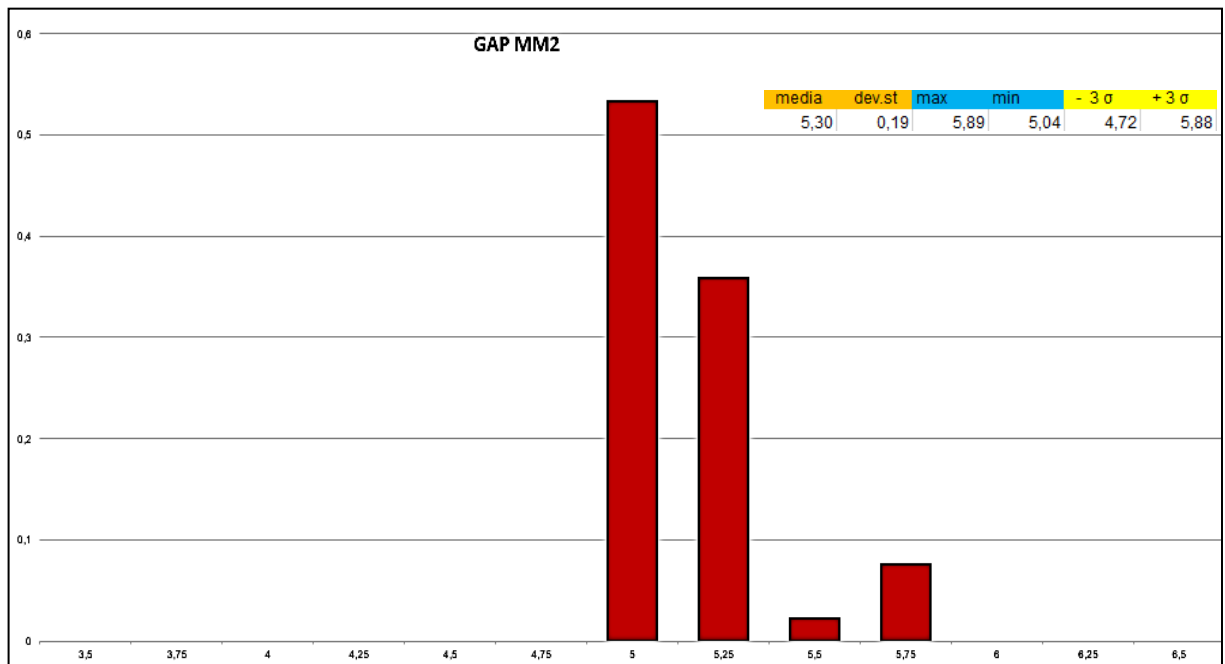


Grafico 4.9: eliminazione outlier GAP parte spoiler

Concludendo l'analisi del Gap della parte MM2 si può affermare che la media è sottostimata e le misure sono distribuite attorno ad essa con una dispersione accettabile. Il massimo del set di dati è appena oltre il confine definito dall'incertezza espansa. Effettuare più misure permetterebbe di avere sia una stima migliore della media che una diminuzione della dispersione.

Si analizza ora un caso interessante del comportamento del Flush:

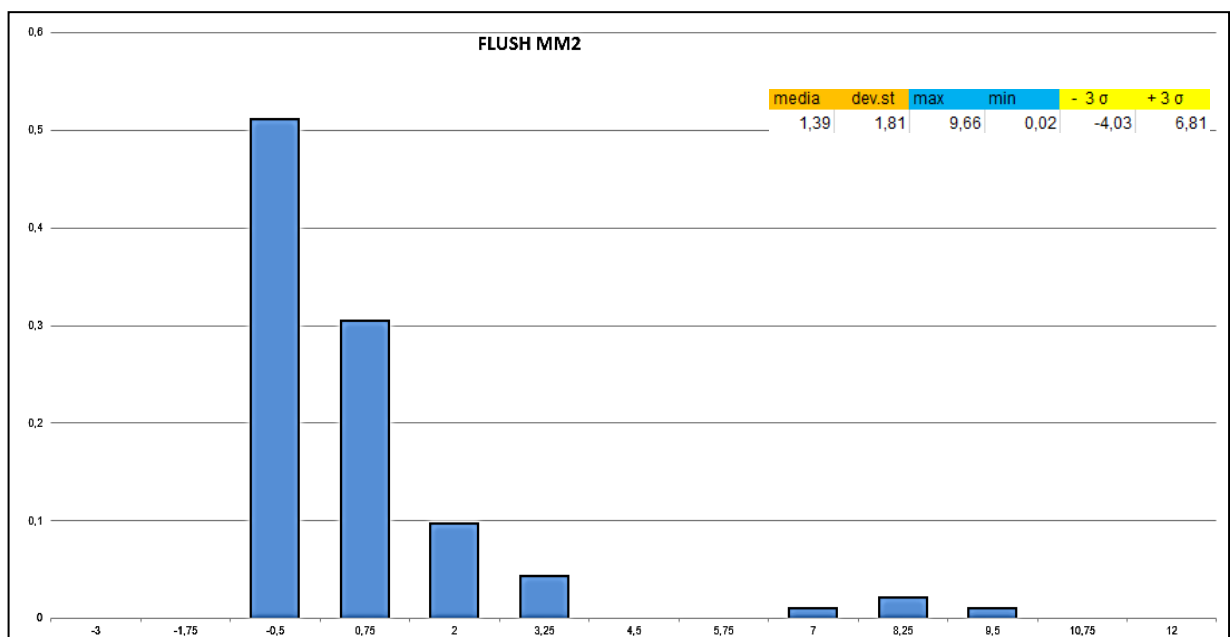


Grafico 4.10: FLUSH parte spoiler

L'ampiezza dei bin è stata scelta proprio per non perdere le informazioni descrittive dell'istogramma. L'analisi delle misure effettuate sulla parte MM2 suscita un forte interesse perché dall'analisi grafica si può osservare che la distribuzione delle misure, oltre ad essere asimmetrica, ha una elevata dispersione e dall'analisi statistica si può comprendere numericamente il comportamento del sistema durante le rilevazioni. I bin nella parte bassa della scala presentano una frequenza più elevata e concorrono perciò alla stima della media, mentre quelli nella parte alta sono popolati da misure *outlier* che alterano invece la stima della media. A titolo d'esempio si può osservare il valore del massimo della popolazione di dati: 9.66 mm. Essendo un valore che si discosta notevolmente dalla media, 1.39 mm, provoca delle significative variazioni. Approfondendo l'analisi si possono osservare le informazioni dalla tabella statistica riguardanti il valore della deviazione standard e dell'incertezza espansa. Il valore di σ sta ad indicare proprio la fluttuazione delle misure, alcune delle quali cadono al di fuori dell'incertezza espansa definita. Come già operato nelle precedenti analisi si applica il filtro che elimina i valori oltre i 3σ . Si ottiene:

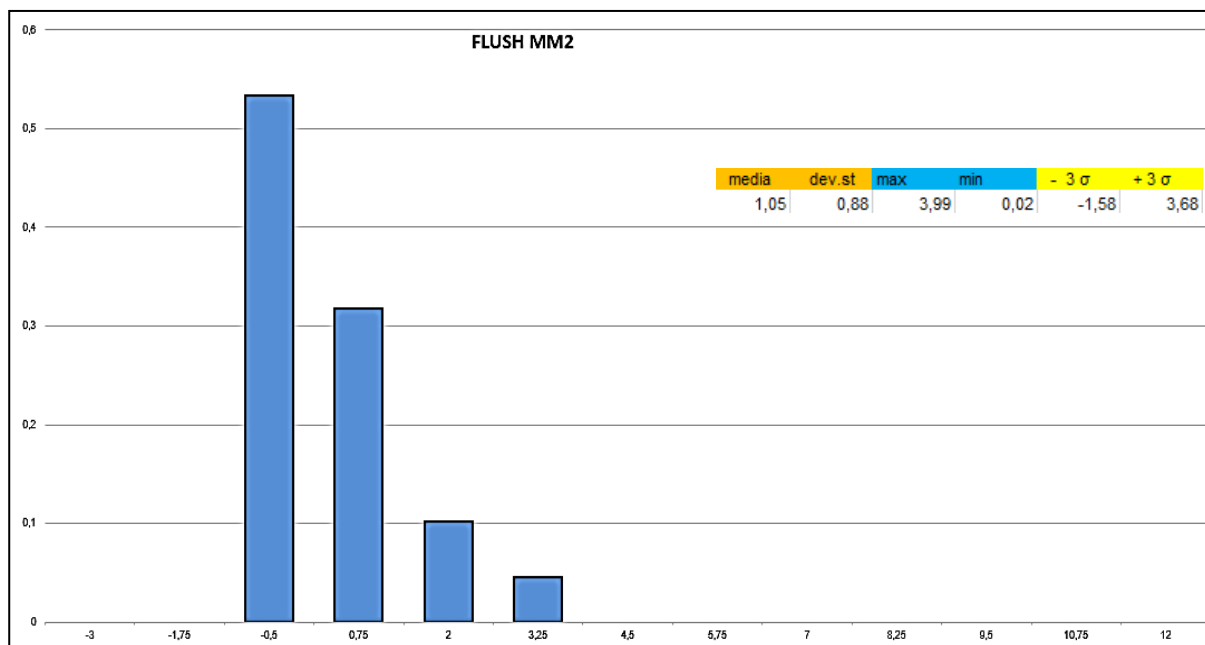


Grafico 4.11: eliminazione outlier FLUSH parte spoiler

Dopo l'applicazione del filtro si nota una diminuzione del valore della media: è questo un risultato che ci si aspettava perché, come detto nelle precedenti righe, gli *outlier* rendevano la media inattendibile. Si nota, inoltre, la presenza di una notevole dispersione attorno al valor medio, infatti σ è ancora elevato, per cui si potrebbe scegliere di filtrare

nuovamente i dati considerando l'intervallo di confidenza dei 3σ . Concludendo l'analisi della distribuzione dei dati si può affermare che la natura degli *outlier* è legata alla qualità delle immagini rilevate dal sistema: possono infatti esserci stati dei fattori esterni, ad esempio di tipo ambientale, che hanno agito come disturbo compromettendo la bontà delle misurazioni. Le misure pertanto sono risultate sovrastimate e hanno reso la stima della media poco precisa.

Si esamina ora il comportamento del Gap dello spoiler centrale:

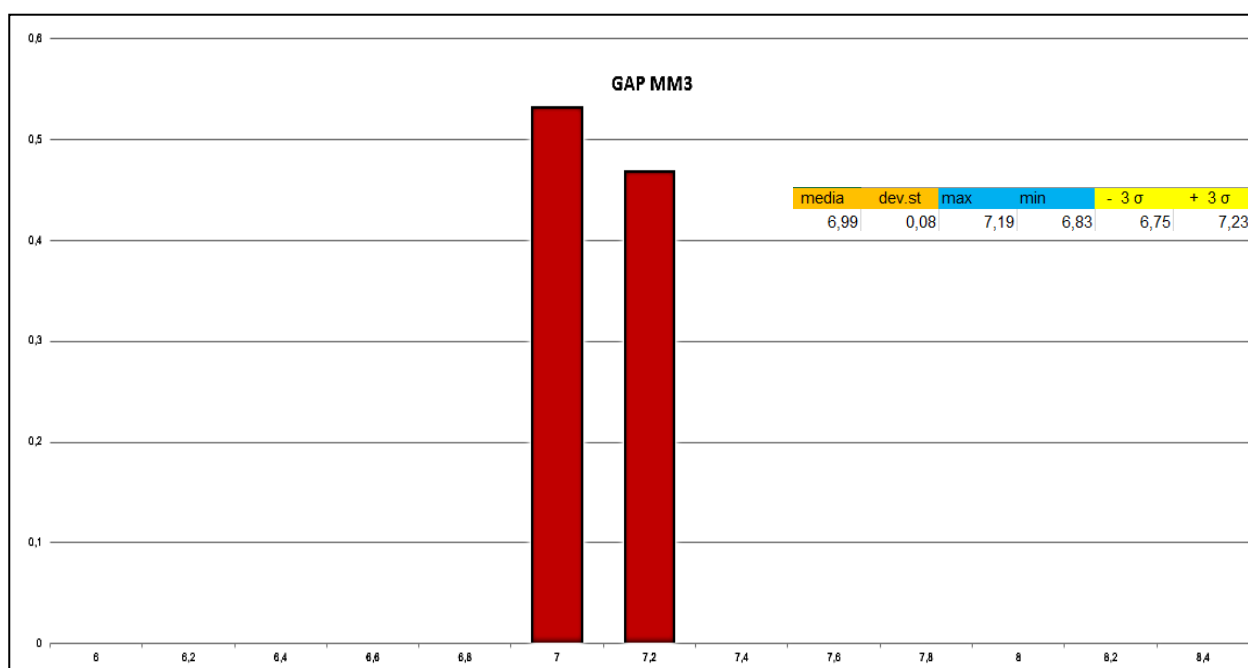


Grafico 4.12: GAP spoiler centrale

Dal grafico 4.12 si può osservare che l'ampiezza dei bin permette di ottenere una distribuzione dei dati concentrata su due intervalli, con estremi 6.8 mm e 7.2 mm, in cui è presente la totalità delle misure. L'incertezza espansa, definita da 6.75 mm a 7.23 mm, e il valore basso della deviazione standard permettono di affermare che c'è una bassa dispersione delle misure e che non ci sono *outlier*, infatti il valore minimo e massimo del set di dati sono contenuti nei 3σ . La media, 6.99 mm, confrontandola con il valor vero determinato con il calibro, pari a 7.10 mm, si legge leggermente sottostimata. Incrementando il database delle misurazioni si può operare un intervento migliorativo che la fa tendere a tale valore.

Il processo di misura è stato correttamente eseguito, infatti le misure sono sostanzialmente precise e contenute nei 3σ , e non ci sono stati rilevanti fattori di disturbo. Si può

concludere che il sistema di misura, nel caso analizzato, tende a sottostimare le misure e per questo motivo la media è leggermente inferiore del valore nominale.

Si analizza ora il Flush. Tra i risultati ottenuti dalle misurazioni sono riscontrati tre *outlier*:

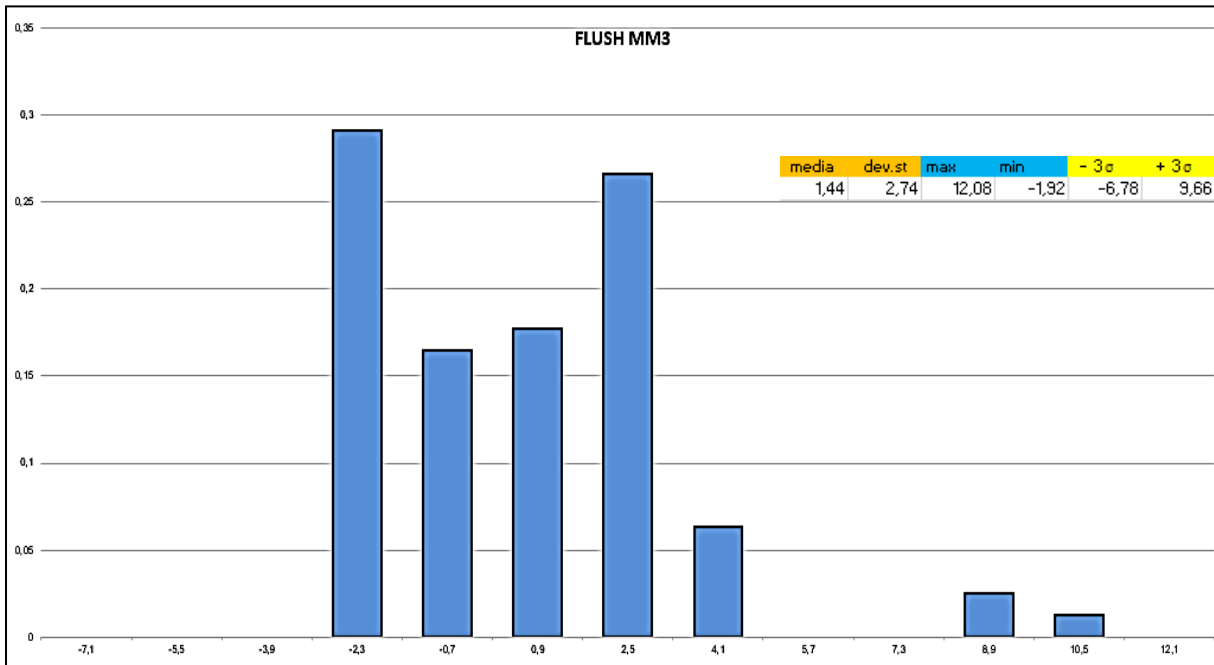


Grafico 4.13: FLUSH parte spoiler centrale

Dall'analisi grafica si nota che due coppie di bin hanno frequenza confrontabile e sono popolate da circa l'88% delle misurazioni eseguite dagli operatori.

Dall'analisi statistica, leggendo la tabella associata al grafico 4.13, emerge invece un valore elevato della deviazione standard generato da una sostanziale distanza tra il valore minimo e il valore massimo della popolazione di dati. Questo vuol dire che le misurazioni del Flush sono molto disperse e la media non è possibile stimarla correttamente. Sorge la necessità di filtrare le misure non conformi, come già eseguito nelle precedenti analisi. La definizione dell'incertezza espansa per 3σ permette appunto di identificare i valori che cadono al di fuori della zona di conformità. La presenza di tali misure fa giungere alla conclusione che o sono stati commessi degli errori durante le rilevazioni oppure la presenza di disturbi esterni, ad esempio di tipo ambientale, hanno compromesso la bontà della stima della media.

Applicando quindi il filtro vengono eliminati gli *outlier* ed effettuate le dovute considerazioni statistiche e grafiche. Il risultato ottenuto viene mostrato nel grafico che segue:

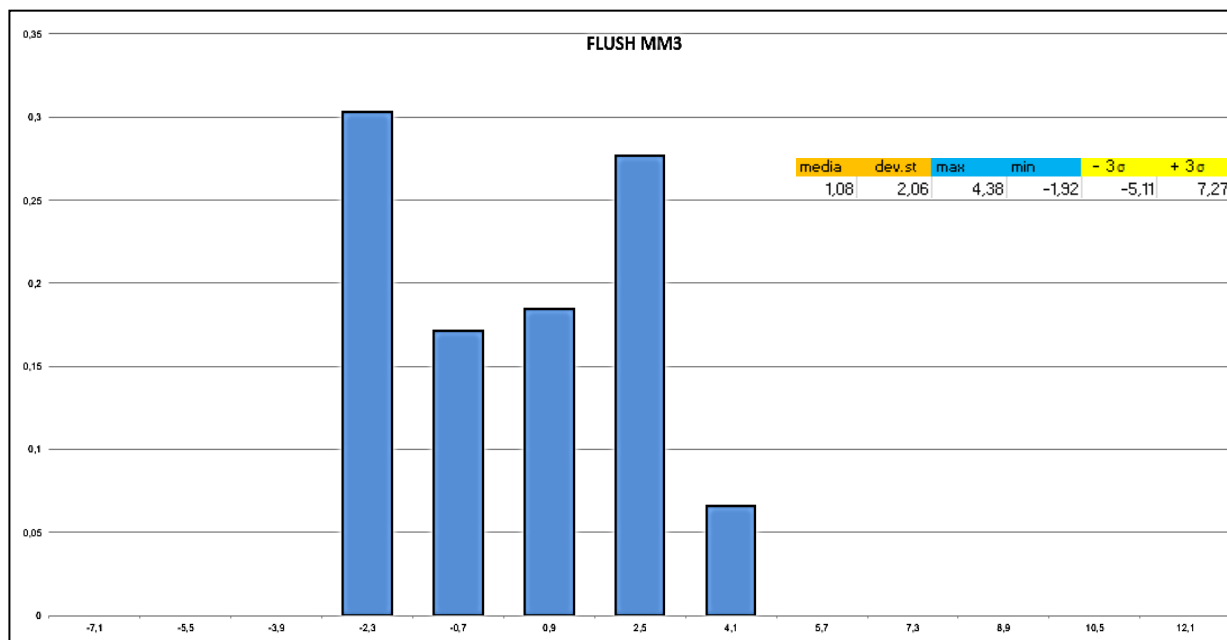


Grafico 4.14: eliminazione outlier FLUSH parte spoiler centrale

Nel grafico 4.14 ciò che attira l'attenzione è la scomparsa delle colonne nella parte alta della scala dovuta all'eliminazione dei valori non conformi. Si osserva anche una conseguente diminuzione della deviazione standard ma, nonostante ciò, le misure risultano ancora molto disperse e la stima della media non è accurata. Anziché applicare nuovamente il filtro si può pensare di incrementare il database delle misurazioni in modo da convergere ad una migliore stima della media e ridurre la dispersione.

La generazione degli *outlier* nel Flush è attribuibile ai disturbi esterni, come ad esempio la luce solare, o all'angolo di inclinazione del dispositivo.

L'ultima analisi grafica e statistica riguarda il tappo del serbatoio. Di seguito viene presentato l'istogramma relativo alle misure del Gap di tale parte e la relativa analisi statistica e grafica.

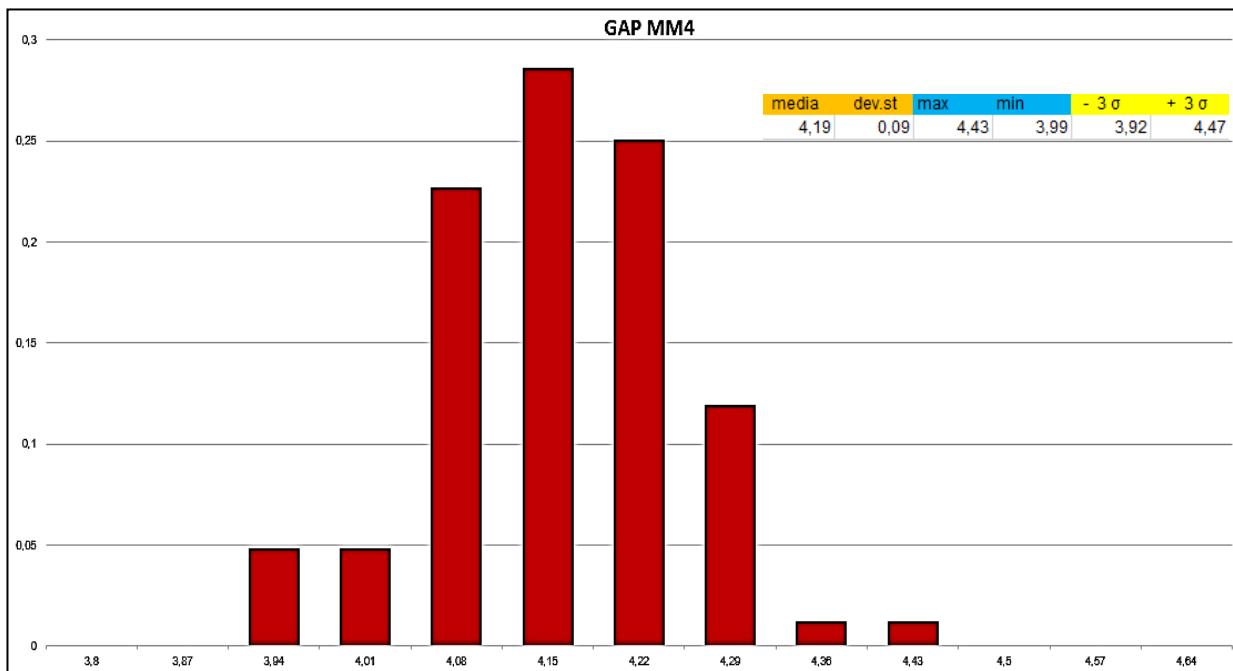


Grafico 4.15: GAP parte tappo del serbatoio

Dall'analisi grafica si può osservare che l'ampiezza dei bin scelta permette di visualizzare dei picchi centrali e una evanescenza di misure ai lati. In pochi decimi di millimetro è addensata la totalità delle misure che si distribuisce attorno al valor medio. Tale risultato evidenzia una bassa dispersione confermata dal valore della deviazione standard tendente a zero.

Si può inoltre affermare che, essendo il minimo e il massimo della popolazione di dati compresi nell'incertezza espansa, non ci sono *outlier*.

Dal confronto con il valore nominale rilevato con il calibro, pari a 4.3 mm, la media aritmetica, 4.19 mm, risulta sottostimata. Come già operato nelle precedenti analisi si può scegliere di effettuare altre misure per osservare la risposta del sistema e di conseguenza effettuare le opportune considerazioni.

Di seguito sarà presa in esame la popolazione di dati del Flush del tappo del carburante.

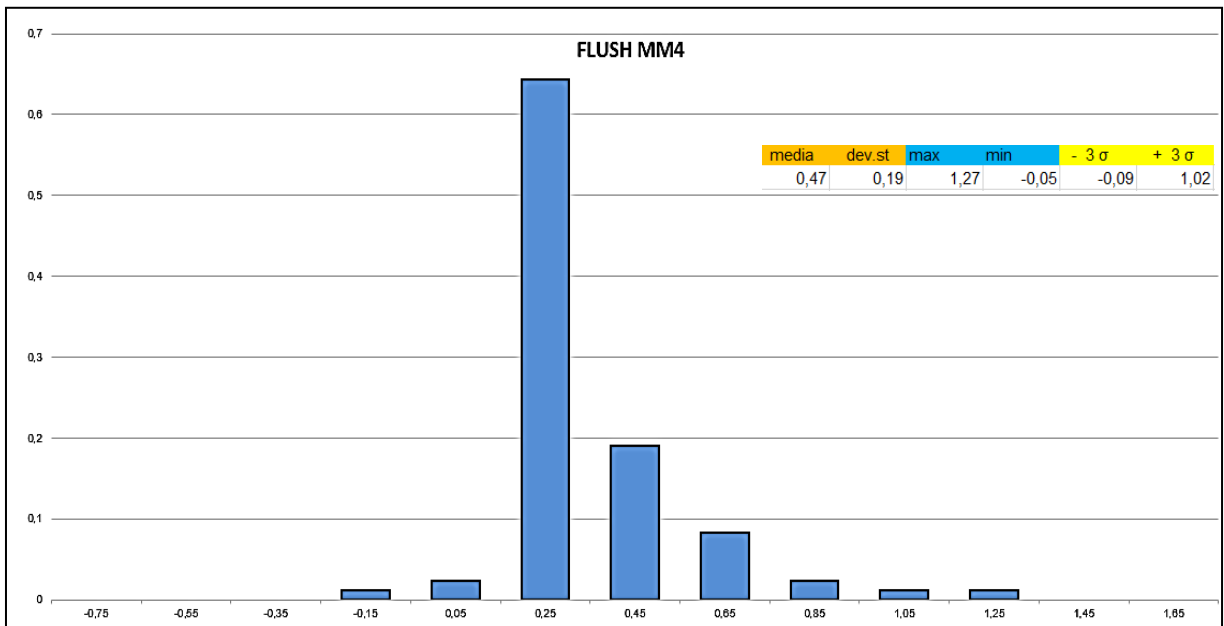


Grafico 4.16: FLUSH parte tappo del serbatoio

Analizzando la rappresentazione grafica del Flush emerge una colonna di dati con una frequenza più elevata che contiene il 65% circa delle misure. Ai lati di tale bin c'è una evanescenza delle misure. Dai parametri statistici si può identificare un valore basso della deviazione standard, che traduce l'addensamento delle misure nel bin più popolato, e un sicuro valore *outlier* che corrisponde al massimo del set di dati giacente all'esterno dell'incertezza espansa. Si può applicare il filtro dei 3σ per eliminare i valori non conformi e valutare la variazione statistica dei parametri. Il risultato ottenuto è riportato di seguito:

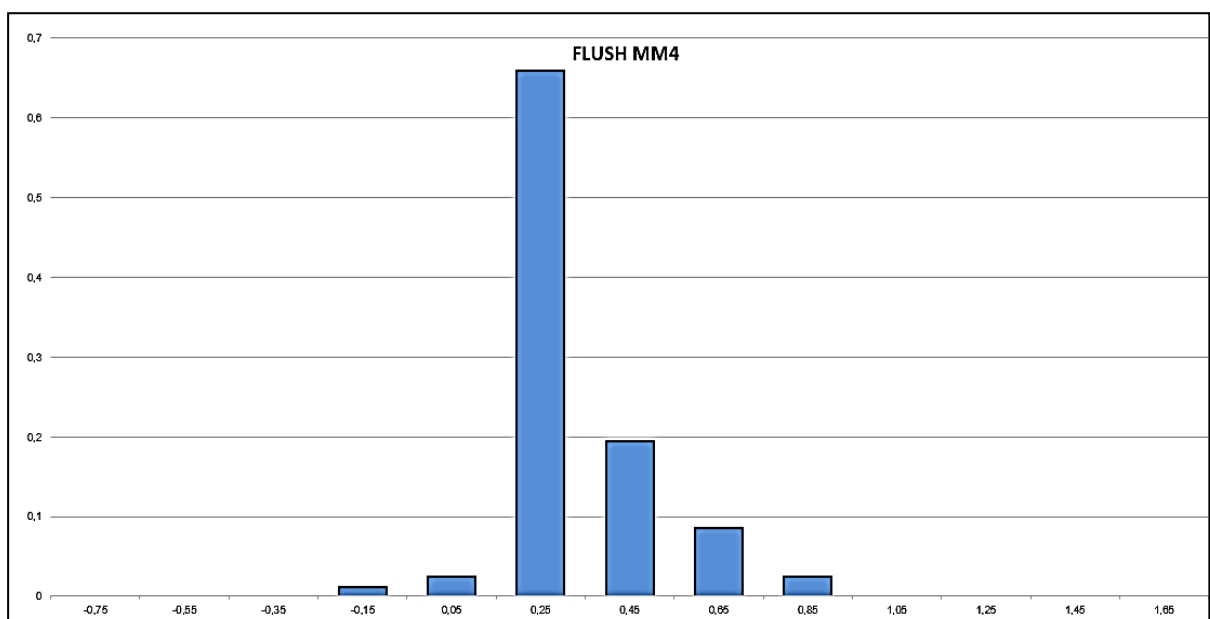


Grafico 4.17: eliminazione outlier FLUSH parte tappo del serbatoio

La media è ben stimata e in seguito all'eliminazione degli *outlier* identificati, che giacevano appena al di fuori della zona di conformità, ha subito una leggera variazione. Il filtraggio dei valori oltre l'intervallo di confidenza ha permesso di ridurre la dispersione delle misure attorno alla media. L'incertezza espansa calcolata non comprende il valore massimo della popolazione di dati per cui si deve ricorrere ad incrementare il database delle misure e/o filtrare nuovamente oltre i 3σ .

4.4 Riepilogo risultati

Nel paragrafo precedente è stata eseguita una analisi statistica e grafica della distribuzione delle misure. Esse sono state infatti rappresentate graficamente attraverso degli istogrammi e analizzate attraverso dei parametri statistici come media, deviazione standard e incertezza espansa. Ogni misura, come spiegato nel capitolo precedente, è affetta da incertezza e come conclusione dell'analisi è interessante analizzare la risposta del sistema analizzando gli errori commessi durante il processo di misura.

	<i>MM</i>	<i>MM1</i>	<i>MM2</i>	<i>MM3</i>	<i>MM4</i>
<i>GAP</i>	$e = 1.2\%$		$e = 1.1\%$		
<i>FLUSH</i>	$e = 1.7\%$	$e = 3\%$	$e = 4\%$	$e = 2.4\%$	$e = 1.5\%$

Tabella 4.1: mostra gli errori percentuali commessi durante il processo di misura

Gli errori percentuali sono stati calcolati come rapporto tra il numero di *outlier* di uno specifico set di dati e il numero totale delle misure effettuate dello stesso set. Ricordando che l'incertezza espansa scelta è caratterizzata da un errore dello 0.03%, i rapporti calcolati definiscono un processo di misura in cui sono stati commessi errori sostanzialmente più grandi. Essi però non devono destare preoccupazione perché questo processo di misura rappresenta la prima esperienza con il sistema G3F. Con l'applicazione e la dedizione si può infatti acquisire una maggiore confidenza con il dispositivo e ottenere delle rilevazioni più precise. È stato inoltre interessante cercare di individuare la possibile coincidenza tra gli *outlier* del Gap e gli *outlier* del Flush in modo tale da concludere che siano stati generati dalle medesime cause. I valori non conformi purtroppo non coincidono e si può concludere che gli errori sono stati causati soprattutto da disturbi ambientali e da fattori legati all'interazione dell'operatore con il dispositivo. La conoscenza dei disturbi permette di affrontarli e minimizzarli.

5 – ANALISI R&R

In questo capitolo verrà affrontata l'analisi di ripetibilità e riproducibilità sugli stessi risultati ottenuti nel processo di misura eseguito con il dispositivo G3F.

I dati sono stati analizzati attraverso il software Minitab che ha permesso di approfondire lo studio attraverso i grafici e la statistica che propone. È stato possibile quindi ampliare lo sguardo su quanto ottenuto così da poter qualificare le prestazioni del dispositivo di misura.

I paragrafi che precedono l'analisi di Minitab presentano la teoria su cui il processo si è basato.

5.1 Ripetibilità e riproducibilità

In un contesto industriale, così come in laboratorio, fare misurazioni permette di valutare le performance dei processi, certificare i risultati e prendere decisioni qualora non sia ottenuta la qualità desiderata. In tal caso se il sistema di misura risultasse inadeguato non sarebbe semplice monitorare, controllare, migliorare e gestire il processo. Verranno impiegati tempo e denaro alla ricerca di problemi inesistenti e non verrà raggiunta la qualità desiderata. Dopo un processo di misurazione infatti si osservano e analizzano le risposte fornite dagli strumenti di misura per valutarne la bontà e l'accuratezza. L'incertezza della misura può essere dovuta a fattori esterni, come quelli ambientali (ad esempio luce e temperatura), e al comportamento dello strumento di misura perché intrinsecamente possiede un'incertezza. A tal proposito quando si analizzano i dati si quantifica quanta parte di incertezza è generata dallo strumento di misura, il quale può essere caratterizzato definendo i concetti di *precisione* e *accuratezza*.

Di seguito è mostrata una analogia con una serie di frecce scagliate su un bersaglio per comprendere il significato di tali concetti.

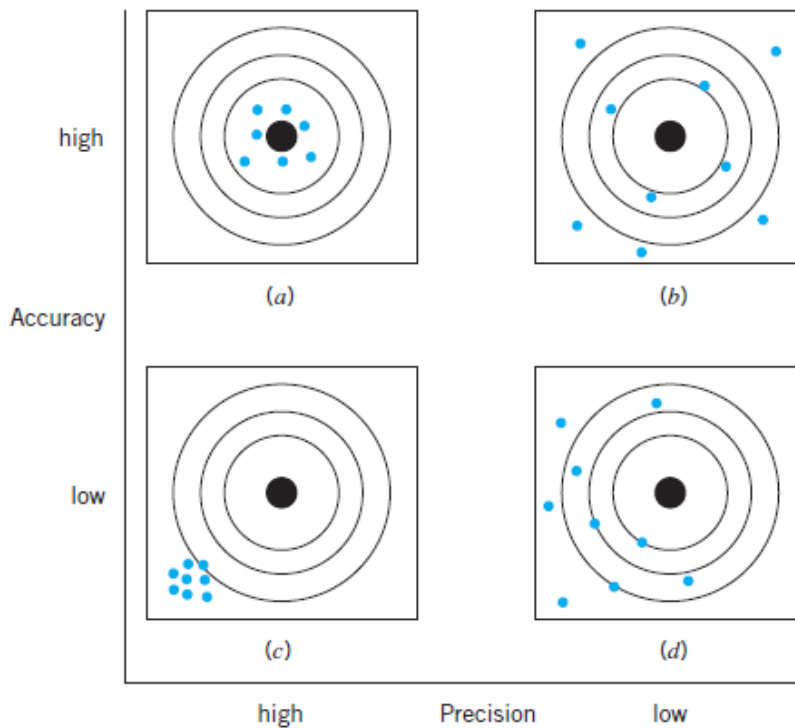


Figura 5.1: concetto di precisione e accuratezza. (a) Strumento accurato e preciso. (b) Strumento accurato ma non preciso. (c) Strumento preciso ma non accurato. (d) Strumento né accurato né preciso.

Il caso (c) mostra che le frecce giungono raggruppate sul bersaglio, pertanto la serie di tiri è precisa, ma sistematicamente il tiratore sbaglia perché non colpisce il centro, quindi non è accurato. L'accuratezza è legata alla capacità dello strumento di misura di generare valori che sono un intorno del valor vero, quindi più la serie di tiri tende a colpire il centro del bersaglio più questa si definisce accurata; il caso (b) ne è un esempio e mostra anche la presenza di una dispersione dei valori intorno al valore atteso. La dispersione generalmente però non incide sull'accuratezza ma è definibile come scarsa precisione. Nel caso (a) si può invece osservare una serie di tiri sia accurata che precisa; esattamente il contrario accade nel caso (d).

Uno strumento preciso, pertanto, dovrebbe essere allo stesso tempo anche accurato a patto di conoscere l'entità della dispersione. Essa può essere ridotta apportando le opportune correzioni ottenendo una fascia di incertezza in cui le misure sono addensate attorno alla media dei valori.

Proprio perché possono verificarsi variazioni dei risultati il processo di misura viene eseguito più volte e si affronta l'*analisi di ripetibilità e riproducibilità*.

La *ripetibilità* descrive la variabilità legata al sistema di misurazione utilizzato. Affinché sia stabilita bisogna mantenere inalterate le seguenti condizioni:

- posizione e procedura di misurazione: lo stesso operatore deve essere coerente nelle misure ripetute della stessa parte
- osservatore: corrisponde alla lettura della risposta del sistema
- strumento di misura: deve essere utilizzato nelle medesime condizioni.

Quindi la ripetibilità viene stimata effettuando una serie di misure, nei medesimi setup e nelle medesime condizioni ambientali e dallo stesso operatore che assume posizioni angolari fisse e note. Si effettua, come ultimo step, il calcolo della deviazione standard di tali misurazioni. Nella figura 5.1 si ha una buona ripetibilità dei risultati nel caso (c), dove la rosa dei tiri è molto ristretta.

La *riproducibilità* si riferisce invece al grado di accordo tra i risultati degli esperimenti condotti quando:

- il processo di misura è eseguito da diversi operatori
- le misure sono rilevate in luoghi e momenti temporali diversi
- gli strumenti di misura utilizzati sono gli stessi così da quantificare la variabilità da loro introdotta.

La riproducibilità in altre parole è la misura della capacità di replicare i risultati. Per comprendere meglio tale concetto si osservi l'immagine sottostante:

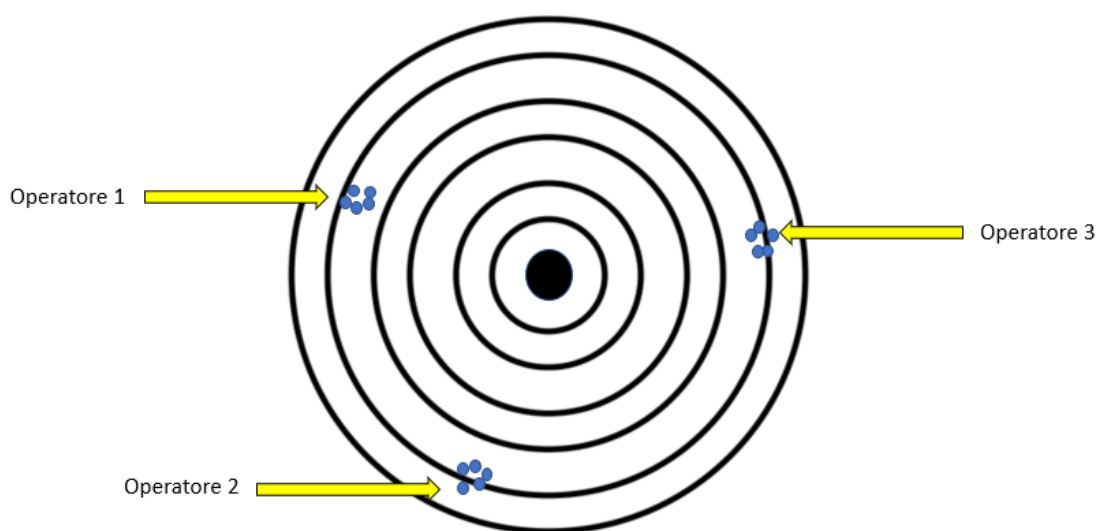


Figura 5.2: bersaglio che rappresenta la mancata riproducibilità delle prove eseguite dai 3 operatori

I tre operatori eseguono dei lanci ottenendo una buona ripetibilità ma i risultati non sono confrontabili tra loro. Essi hanno un metodo di mirare diverso l'uno dall'altro che

determina una scarsa riproducibilità dei risultati. Nonostante le modalità di misurazione per gli operatori sono le stesse non si possono quindi considerare tali risultati attendibili. La variabilità delle misurazioni permette di conoscere l'affidabilità delle stesse e verificare le prestazioni del sistema. Di seguito è mostrata la variabilità totale dello strumento, σ^2_{Gauge} , ottenuta dalla somma delle variabilità introdotte dalla ripetibilità e dalla riproducibilità:

$$\sigma^2_{\text{Measurement Error}} = \sigma^2_{\text{Gauge}} = \sigma^2_{\text{Repeatability}} + \sigma^2_{\text{Reproducibility}}$$

Equazione 5.1: nell'acquisizione dei dati l'operatore rimane una grande fonte di incertezza per cui la variabilità totale dei risultati è costituita dalla somma di due variabilità

Una sfida nella valutazione dell'incertezza di misura è determinare quali sono le fonti che la generano. L'esperienza e il giudizio dei professionisti del settore giocano spesso un ruolo importante in tali valutazioni.

Un metodo statistico per stabilire sia la ripetibilità che la riproducibilità è l'analisi "Gage R&R" che si concentra sul dispositivo anziché sul target di misura (gage vuol dire proprio strumento). È utilizzata per stimare quanta parte di variabilità totale osservata del processo è dovuta al sistema di misura impiegato. Tale analisi quindi permette di certificare il sistema di misura. Come concetto base c'è la metodologia del *Six sigma* ovvero un approccio gestionale che persegue l'eccellenza e il miglioramento continuo dei processi. In altri termini tale metodologia permette di ottenere una qualità molto elevata convertibile in non più di 3 o 4 difetti per milione di elementi. Sigma indica la deviazione standard e sei è il livello massimo di qualità raggiungibile utilizzando uno specifico strumento di misura. Più sigma ci sono e minore è la dispersione di un parametro rispetto alla media, come già visto nell'analisi delle pagine precedenti e come illustrato nel capitolo 3 con il concetto di incertezza espansa.

L'analisi Gage R&R permette di valutare la precisione del sistema di misura, ovvero la sua capacità di restituire sempre lo stesso valore effettuando misurazioni ripetute dello stesso pezzo, con lo stesso strumento.

È importante inoltre che l'operatore si comporti in modo casuale quando esegue le rilevazioni su un determinato pezzo e che non venga influenzato: infatti se conoscesse il valore desiderato della grandezza da rilevare potrebbe comportarsi tentando di ottenerlo, ripetendo le misure sul target. In questo modo però falsifica il processo di misura.

Il metodo statistico descritto è stato utilizzato per lo studio dei dati rilevati durante la sperimentazione. L'obiettivo è la qualifica della risposta del sistema G3F così da permettere agli utilizzatori all'interno della catena di assemblaggio del settore automobilistico di fornire dati per valutare la conformità delle parti della carrozzeria. L'elaborazione di queste informazioni permettere di avere un controllo sui processi produttivi a monte del reparto di assemblaggio.

L'operatore che utilizza il dispositivo G3F è molto spesso personale umano quindi è estremamente importante che ci sia una accurata analisi di certificazione del dispositivo di misurazione affinché vengano osservate le possibili evoluzioni del sistema prima di essere commercializzato.

5.2 Minitab e carte di controllo

È sempre necessario eseguire una verifica del sistema di misura con cui si andranno a misurare le prestazioni dei processi. Le considerazioni durante la fase progettuale di un'attività produttiva sono infatti fondate sui dati raccolti: se questi sono affidabili il processo non prevede discussioni, se sono opinabili si ricorre a miglioramenti per convergere alla conformità desiderata. Per validare i dati rilevati durante la sperimentazione è stata effettuata un'analisi statistica e grafica anche attraverso Minitab che verrà presentata in questo paragrafo. Lo studio delle risposte del sistema G3F attraverso due differenti software permette di avere uno sguardo più ampio sull'obiettivo e quindi di osservare le eventuali criticità e migliorarle al fine di certificare con successo lo strumento di misura. Minitab è un software statistico che permette di analizzare dati rilevati per trovare delle relazioni tra variabili, visualizzare interazioni e identificare fattori importanti. È utilizzato nei vari settori dell'industria perché permette di trovare soluzioni significative ai problemi aziendali e offre molti metodi per aiutare a valutare la qualità in modo oggettivo e quantitativo. Questi metodi comprendono carte di controllo, strumenti di pianificazione di qualità, analisi dei sistemi di misura (studi di Gage R&R), capacità di processo e analisi di affidabilità. Le carte di controllo vengono usate per rilevare la presenza di anomalie e per esaminare gli output al fine di valutare una caratteristica identificatrice della qualità. Le carte di controllo di Minitab visualizzano le statistiche del processo e mostrano una linea centrale e i limiti di controllo. La linea centrale è il valore medio della statistica (indicato con " μ ") che si sceglie di valutare. Se un processo è in controllo, i punti variano casualmente intorno alla linea centrale. I limiti

di controllo invece sono calcolati sulla base della deviazione standard (indicata con “ σ ”) attesa nel processo. Il limite di controllo superiore (UCL cioè “upper control limit”) è di tre deviazioni standard sopra la linea centrale. Il limite di controllo inferiore (LCL cioè “lower control limit”) è di tre deviazioni standard al di sotto della linea centrale (allo stesso modo era stata definita l’incertezza espansa nel capitolo 3, applicata concettualmente nell’analisi dei dati del capitolo 4):

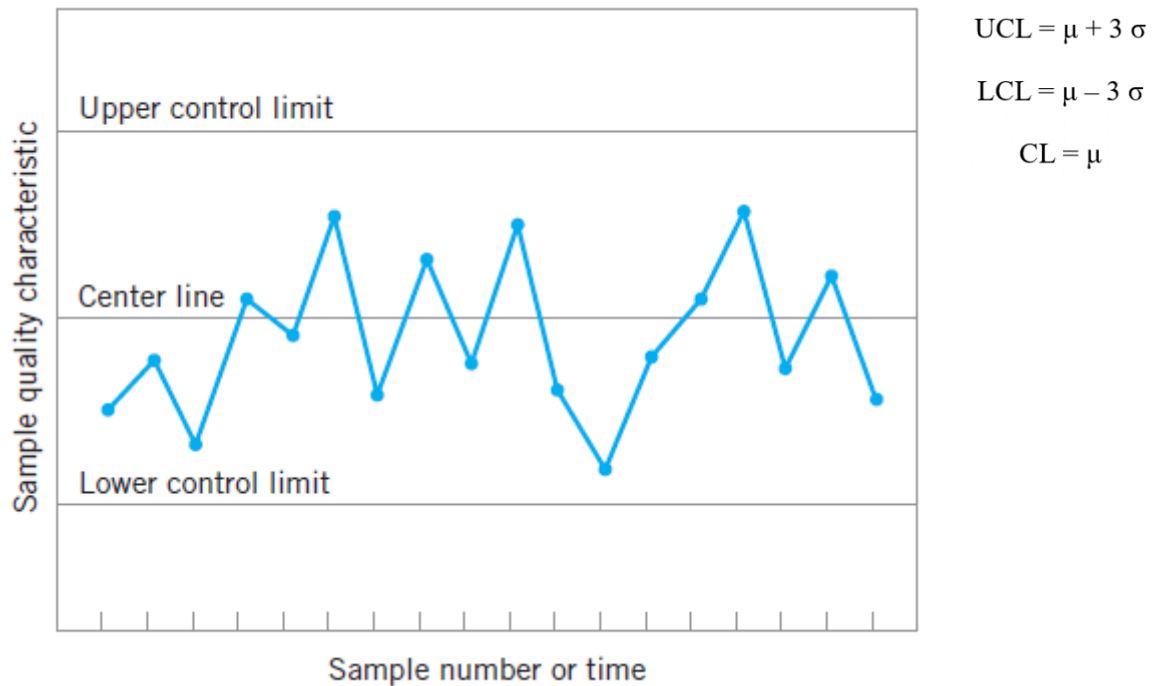


Grafico 5.1: vengono mostrati i limiti di controllo e la linea centrale. In alto a destra vengono riportate le formule analitiche di come si ricavano limiti e linea centrale.

Si assume quindi che la distribuzione è normale, in questo caso tracciata in verticale:

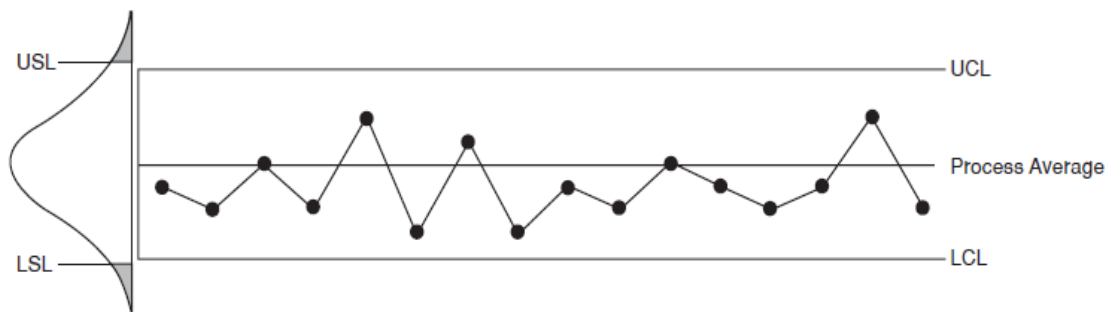


Grafico 5.2: USL indica “upper specified limit”, LSL “lower specified limit”. Rappresentano limiti ingegneristici per il controllo del processo ovvero il massimo e il minimo valore accettabile di una variabile. Tali limiti sono generalmente stabiliti dalle esigenze del cliente.

Se un processo è in controllo tutti i punti sono all'interno dei limiti di controllo superiore e inferiore. Un punto che risulta al di fuori dei due limiti viene interpretato come prova che il processo è fuori controllo; sono pertanto necessarie delle azioni correttive che permettono di individuare la causa responsabile di questo comportamento. Di seguito viene riportato un grafico per comprenderne il concetto:

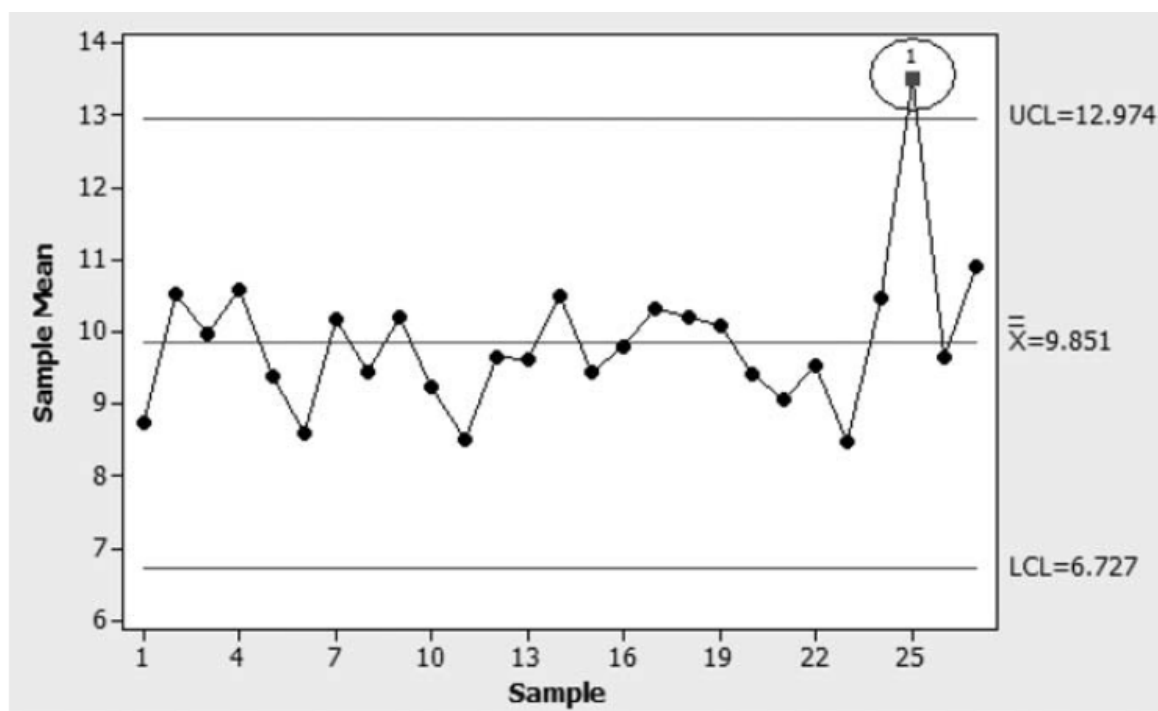


Grafico 5.3: esempio che mostra un valore fuori controllo perché al di là dei limiti di controllo definiti

Nel grafico 5.3 si osservano dei punti collegati da segmenti: questo permette di visualizzare le variabilità nel tempo.

I dati acquisiti e implementati su Minitab sono classificati in base all'operatore e alle parti. Sono stati scelti sei tipi di grafici per l'analisi:

- *Components of variation*: rappresenta un riepilogo grafico dei risultati dello studio Gage R&R con due barre colorate, espresse in percentuale, indicanti la %Contribution, valore della variabilità di ciascuna componente rispetto alla variabilità totale, e la %Study Variation che indica il valore della variabilità dello studio per ogni componente. Hanno lo scopo di indirizzare l'osservatore al parametro che contribuisce maggiormente alla variabilità così da ridurne l'effetto.
- *S-Chart*: è una carta di controllo che mostra la variabilità delle misurazioni legata ai diversi operatori, per ogni parte da loro misurata. È utilizzata per verificare la

coerenza di ogni operatore; in altre parole permette di visualizzare se la media di ognuno rientra nei limiti di controllo definiti. Il grafico S-Chart traccia per ogni operatore dei punti in modo tale da poter vedere quanto è coerente rispetto alla media.

- *Xbar-Chart*: mostra le misurazioni effettuate da ciascun operatore per ogni parte in relazione alla media complessiva. In questo modo si possono confrontare tra di loro gli operatori e mettere in relazione le medie ottenute. La linea centrale è la media totale di tutte le parti target. Si valuta pertanto la stabilità della media e la variazione di un processo.
- *Measurement by part*: mostra, per ogni parte, le misurazioni indicate con un box celeste e le medie indicate con un cerchio all'interno dei box. In questo modo osservando l'ampiezza dei box si può comprendere quanto le misure della stessa parte sono ravvicinate.
- *Measurement by operator*: mostra, per ogni operatore, le misurazioni effettuate. Analogamente al precedente le misure sono rappresentate tramite un box celeste e le medie con un cerchio. Permette di comparare le misurazioni medie degli operatori.
- *Part operator interaction*: mostra, per ogni parte, un confronto tra le medie di ogni operatore. È la sovrapposizione dei contributi di ciascun operatore; permette quindi di visualizzare quale deviazione introducono.

5.3 Analisi statistica e grafica delle carte di controllo

In questo paragrafo verranno analizzati e commentati i grafici output del software Minitab. Come già eseguito per l'analisi statistica e grafica con Excel, riportata nel precedente capitolo, si procede con l'identificazione delle parti dell'autovettura target analizzate. Sono state scelte, in particolare, le parti denominate *MM*, *MM1* e *MM2* che corrispondono rispettivamente alla parte sportello-sportello, sportello-montante posteriore e spoiler laterale (nel capitolo 4 sono proposte le immagini relative). Per ognuna di essa si valutano le misure del Gap e del Flush.

I grafici sopra concettualmente discussi verranno analizzati nella stessa sequenza in cui sono elencati. Essi forniscono un output visivo che permette un'immediata

interpretazione. In tal modo si può valutare in breve tempo come si comporta il sistema di misura. Il primo analizzato pertanto sarà il “*Components of variation*”.

Gli studi di ripetibilità e riproducibilità possono essere utilizzati per stimare le componenti della variazione complessiva nelle misurazioni effettuate. Si possono in tal modo identificare delle azioni correttive che migliorano il processo di misura. La variazione complessiva osservata nelle misurazioni è data dalla somma di una componente di variazione parte-parte e di una componente di variazione introdotta dal sistema di misura:

$$\sigma_{\text{Tot}}^2 = \sigma_{\text{Part}}^2 + \sigma_{\text{MS}}^2$$

Equazione 5.2: scomposizione della variabilità totale

Di seguito vengono riportati i grafici che riguardano le misure del Gap e del Flush rispettivamente:

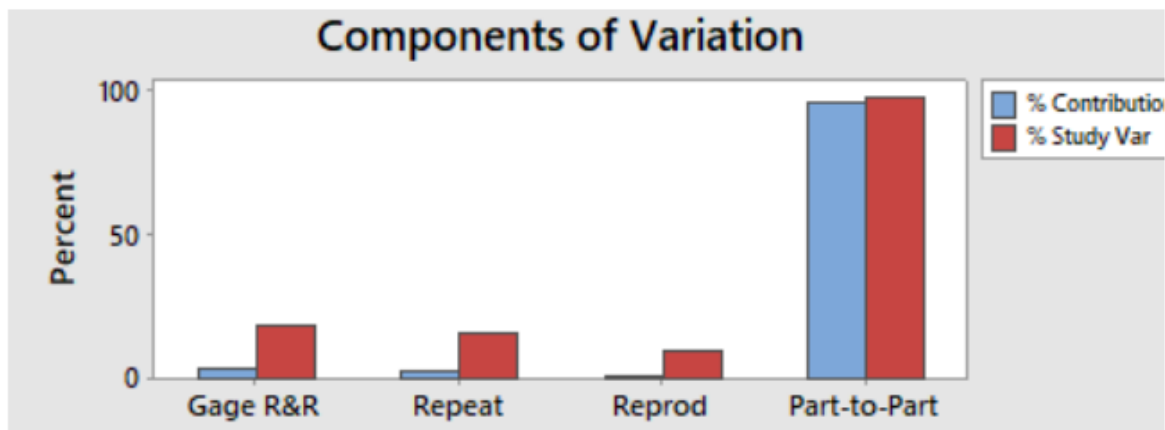


Grafico 5.4: Components of variation: misure del Gap

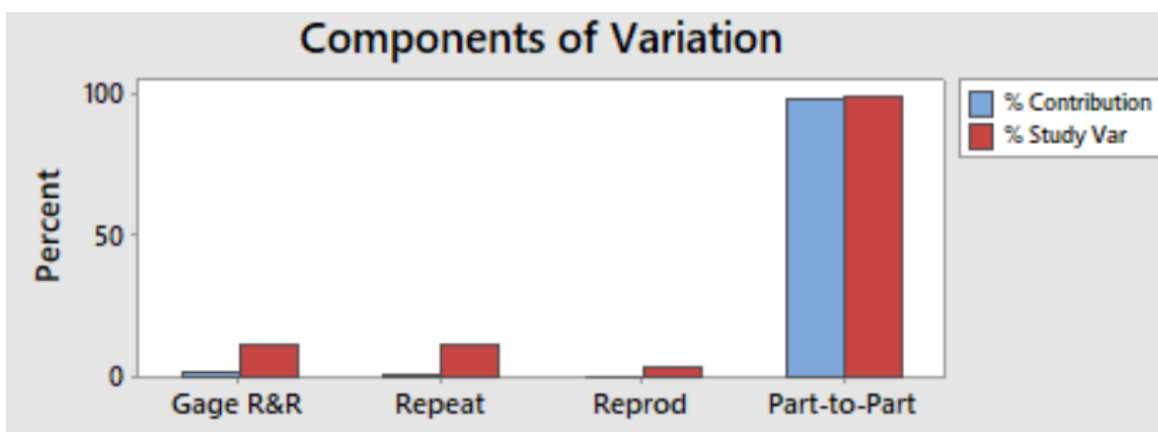


Grafico 5.5: Components of variation misure del Flush

La variabilità complessiva introdotta dallo strumento di misura, nei grafici nominata “Gage R&R” (concetto già mostrato nel paragrafo “Ripetibilità e Riproducibilità”), è pari alla somma dei contributi introdotti dalla ripetibilità e dalla riproducibilità, espressi in percentuale. È auspicabile avere una percentuale molto bassa della variabilità complessiva. Chiare sono le motivazioni: una variabilità elevata potrebbe significare che lo strumento di misura non è preciso o in generale non è adatto per l’utilizzo nel processo di misura, oppure che lo strumento potrebbe essere datato e quindi occorrerebbe una nuova taratura, oppure la presenza di disturbi esterni potrebbe aver compromesso la bontà delle misurazioni. Le cause che generano variabilità nello strumento di misura sono quindi molteplici; risulta importante però riconoscerle per ridurle o, idealmente, eliminarle al fine di migliorare il processo. Nei grafici si osserva che la variabilità predominante è quella introdotta dalle parti. Questo è un risultato ovvio, perché sono state effettuate le misure su tre diverse parti dell’autovettura.

Di seguito viene riportata una tabella per il Gap e una per il Flush che riassume le variabilità introdotte dalle varie sorgenti, in termini di deviazione standard (valutata con metodi di Tipo A, discussi nel capitolo 3). La variabilità della componente “Part to Part” permette di confermare la coerenza dell’operatore e di definire accettabile il comportamento del sistema di misura.

<u>Source</u>	<u>StdDev</u>
Total Gage R&R	0.09
-Repeatability	0.07
-Reproducibility	0.04
--Operator	0
--Operator*part	0.04
Part-To-Part	0.45
Total Variation	0.46

Tabella 5.1: risultati Gap dello studio Gage R&R che indicano le deviazioni standard per ogni sorgente

<u>Source</u>	<u>StdDev</u>
Total Gage R&R	0.07
-Repeatability	0.06
-Reproducibility	0.02
--Operator	0
--Operator*part	0.02
Part-To-Part	0.57
Total Variation	0.57

Tabella 5.2: risultati Flush dello studio Gage R&R che indicano le deviazioni standard per ogni sorgente

Il prossimo grafico da analizzare è il grafico “*S-Chart by operator*”:

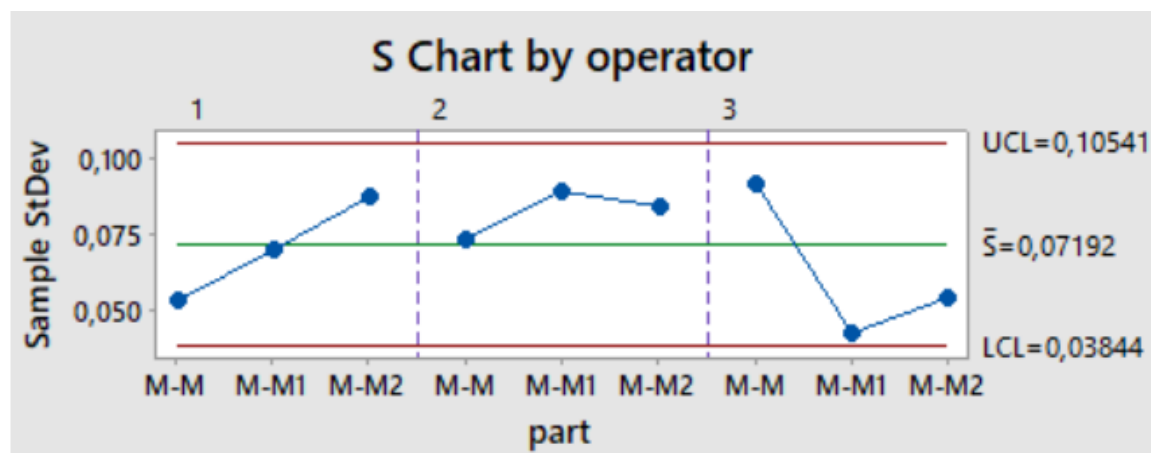


Grafico 5.6: *S-Chart delle misure del Gap*

Si esamina il grafico S-Chart per valutare se il processo è sotto controllo. Come già detto vengono definiti dei limiti di controllo che sono rappresentati con delle linee orizzontali rosse. Sono indicati con UCL il limite superiore e con LCL il limite inferiore e calcolati sulla base di un fattore di copertura pari a 2 (livello di confidenza del 95%). I punti fuori controllo, che hanno cioè valori maggiori di UCL e inferiori di LCL, possono impedire che i limiti rappresentino realmente il processo. In tal caso sarà necessario conoscere le fonti di errore che ne alterano il funzionamento.

Nel grafico sono tracciate le deviazioni standard di ogni operatore e la linea centrale verde, indicata con una *esse maiuscola barrata*, che rappresenta la media di tutte le deviazioni standard. Lo studio, diviso in base agli operatori e alle parti, permette di confrontare le deviazioni standard per valutare la riproducibilità delle misure effettuate. Si osserva che i valori delle deviazioni standard sono tra loro confrontabili, quindi le misure sono precise e l'analisi presentata confronta i centesimi di millimetro.

Analizzando la parte MM delle misure del Gap si nota infatti che l'operatore 2 ha eseguito le misure con una deviazione standard che coincide approssimativamente con la media delle deviazioni standard, pari a 0,07192 mm. Le deviazioni standard dell'operatore 1 e 3 sono rispettivamente approssimate a 0,05 mm e 0,085 mm. Tale risultato conferma la lieve variazione tra i valori. Sicuramente si può affermare che è l'operatore la fonte della variabilità delle misure.

Si potrebbe scegliere anche di approfondire ulteriormente lo studio analizzando la personalità del singolo operatore per verificare altre fonti di errori. In generale però i fattori più rilevanti che possono influenzare le misure sono:

- i disturbi esterni: tra essi si può considerare la luce che interferisce sulla corretta rilevazione del Gap o del Flush

- posizionamento del sistema di misura: non è da trascurare la possibilità che tra le misure dell'operatore 1 e 3, in riferimento al grafico 4, siano presenti dei valori outlier che fanno variare la deviazione standard.

Per avere la conferma di quale fattore abbia prodotto la maggiore incertezza si può procedere effettuando delle nuove misure ponendo ad esempio più attenzione nel posizionamento del sistema di misura oppure effettuando le misure in una zona in cui l'autovettura è esposta ad una luce meno invasiva. Nella catena di assemblaggio di un'industria automobilistica tali fattori saranno accuratamente tenuti in considerazione al fine di mantenere elevata la qualità degli assemblati.

Il grafico S-Chart delle misure del Flush, che verrà riportato in seguito, presenta l'interessante caso di un punto fuori controllo:

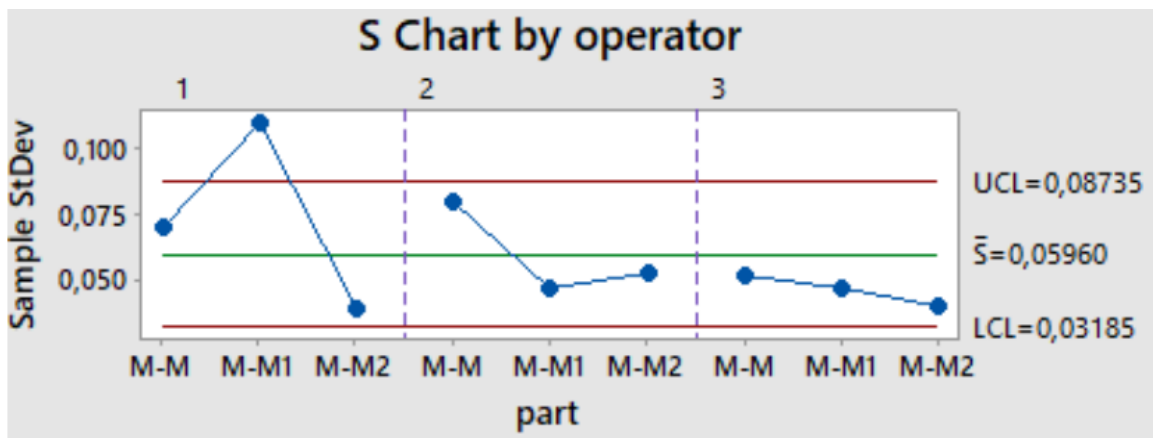


Grafico 5.7: S-Chart delle misure del Flush

Le misure effettuate dall'operatore 1 hanno una deviazione standard maggiore rispetto alla media. È possibile quindi che tra il set di misure effettuate qualcuna si discosta dalla media. Questo produce un aumento della deviazione standard. I fattori che determinano gli outlier sono stati precedentemente discussi.

Si passa ora all'analisi del grafico "Xbar-Chart" del Gap:

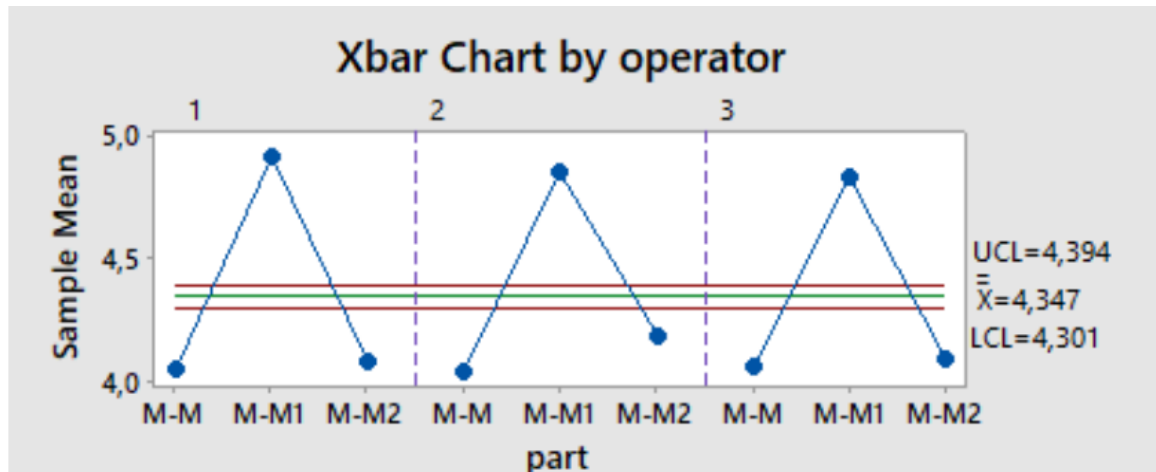


Grafico 5.8: analisi Gage R&R delle componenti di variazione delle misure del Gap

Il grafico Xbar traccia la media delle misurazioni effettuate dai diversi operatori, indicata dalla linea centrale verde. Le linee rosse all'esterno sono i limiti di controllo. L'impatto visivo del grafico permette di affermare immediatamente che si è in presenza di una situazione di processo fuori controllo. Questo è spiegabile per il motivo che per uno studio "Gage R&R" si scelgono delle parti rappresentative del target di misura e Minitab mostra idealmente una mancanza di controllo. Essendo i punti al di sopra o al di sotto dei limiti di controllo allora la variabilità da parte a parte è maggiore della variabilità introdotta dal sistema di misura.

Si può aggiungere però un ulteriore fattore che introduce variabilità nelle misure e che è da ricondurre in particolare alla parte MM2 ovvero lo spoiler dell'autovettura. Questa parte può mettere in difficoltà l'operatore durante l'esecuzione delle misure qualora la sua statura sia sotto la media. Durante le rilevazioni infatti dovrà sporgersi per il posizionamento dello strumento di misura e una piccola variazione dell'angolo di rilevazione compromette le misure e di conseguenza media e deviazione standard. È questo un fattore che porta a confermare quanto detto nell'analisi dei precedenti grafici, cioè l'operatore influenza le misurazioni.

Di seguito si riporta il grafico relativo alle misure del Flush che permette di visualizzare come tra le misure effettuate sulle parti dai diversi operatori esiste un parallelismo. Questo è un risultato importante perché osservando la forma dei segmenti si può definire il processo riproducibile.

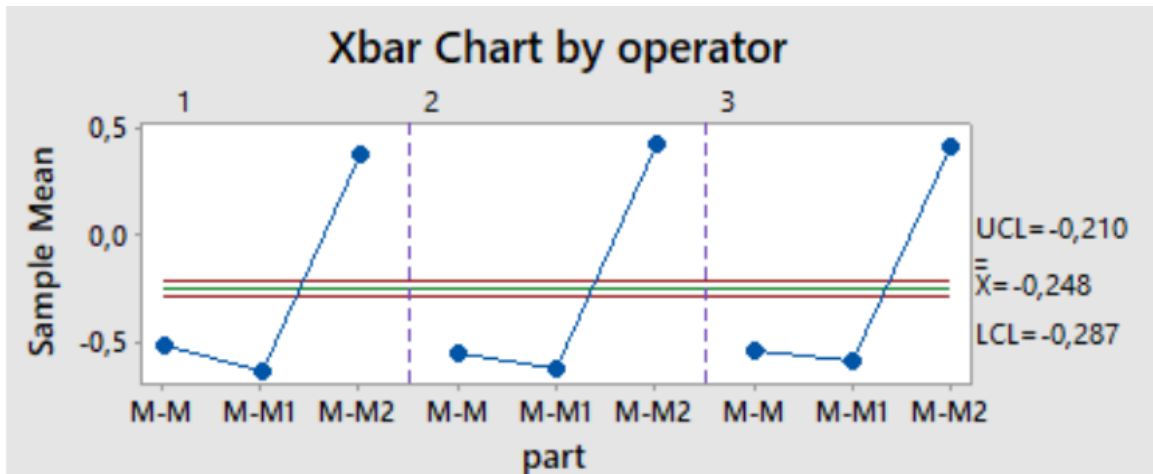


Grafico 5.9: analisi Gage R&R delle componenti di variazione delle misure del Flush

Procedendo con le analisi delle misure effettuate si analizza il grafico sottostante “Measurement by part” relativo al Gap. È caratterizzato da boxplot celesti:

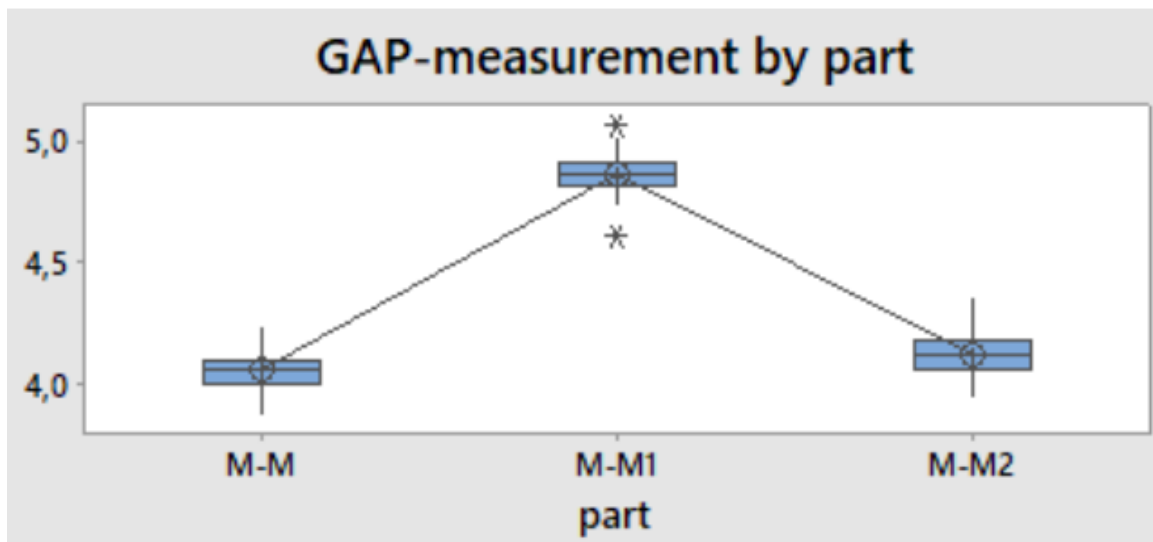


Grafico 5.10: Measurement by part con analisi Gage R&R delle misure del Gap

Il boxplot è un grafico statistico a “scatole” che fornisce, in modo sintetico ed evocativo, un riepilogo della distribuzione di ogni set di misure e il relativo grado di dispersione. È infatti utilizzato per capire se la distribuzione è simmetrica o asimmetrica e per confrontare la forma di più distribuzioni. Permette inoltre di identificare i valori fuori controllo (outlier).

I boxplot, insieme agli istogrammi, sono tra i grafici statistici più utilizzati e dal momento che forniscono informazioni differenti sono spesso utilizzati per un’analisi approfondita.

Un boxplot è costituito da:

- scatola celeste: rappresenta il range delle misure
- linea orizzontale: interna alla scatola e rappresenta la mediana delle misure
- asterischi: rappresentano le anomalie ovvero gli outlier
- linee verticali: anche detti “baffi”, indicano la dispersione dei dati
- cerchio: interno alla scatola e rappresenta la media del set di misure.

Quando la distribuzione è simmetrica la mediana si trova perfettamente al centro del box celeste, coincide cioè con la media. Il valore della mediana fornisce informazioni interessanti anche sulla dispersione. In particolare, all’aumentare del valore della mediana la dispersione tende a diminuire.

I baffi si estendono sui due estremi del box, ognuno dei quali comprende il 25% dei dati. Analizzando il grafico si può inoltre affermare che le distribuzioni delle varie parti sono confrontabili e sono caratterizzate da una bassa dispersione, visibile dall’ampiezza verticale dei box. Tra le misure della parte MM1 compare un valore outlier, indicato con un asterisco. Una situazione analoga si può osservare nel grafico che segue relativo alle misure del Flush:

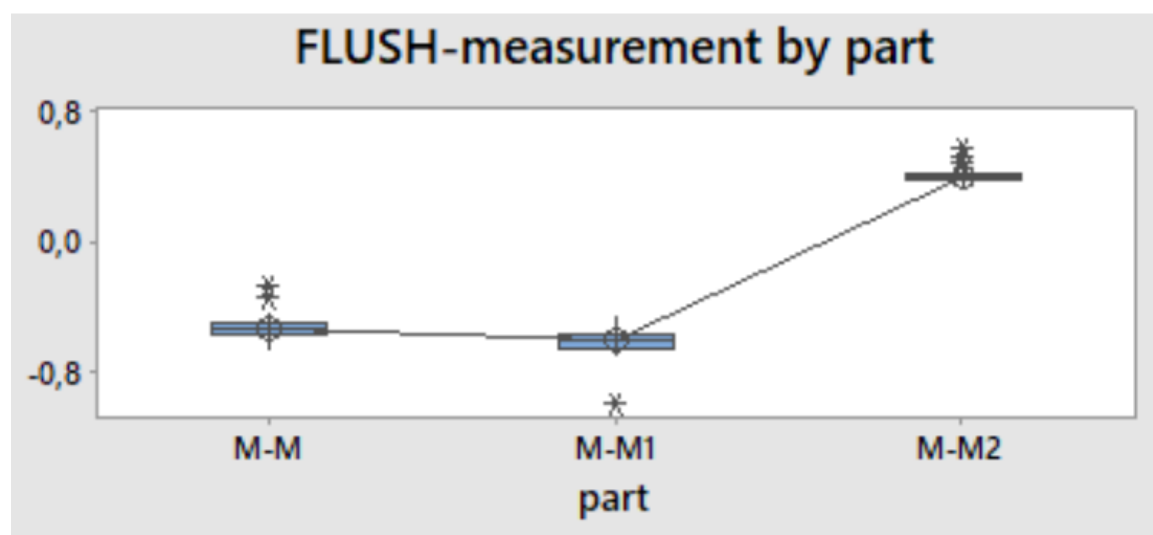


Grafico 5.11: Measurement by part con analisi Gage R&R delle misure del Flush

Anche per le misure del Flush la dispersione, valutata attraverso la lunghezza dei baffi, è molto bassa ma è da notare la presenza di anomalie su ogni parte. Ogni mediana è differente, essendo le parti analizzate differenti tra loro. Il risultato ottenuto da tale analisi è soddisfacente, infatti le misure, sia del Gap che del Flush, hanno una bassa variabilità. I valori outlier possono essere causati dai disturbi presentati nelle precedenti righe e come

già detto la loro conoscenza permetterà agli operatori di effettuare misurazioni più accurate.

Per scoprire e approfondire maggiormente il comportamento degli operatori si presentano altre due tipologie di grafici. Di seguito si analizza il “*Measurement by operator*” per il Gap:

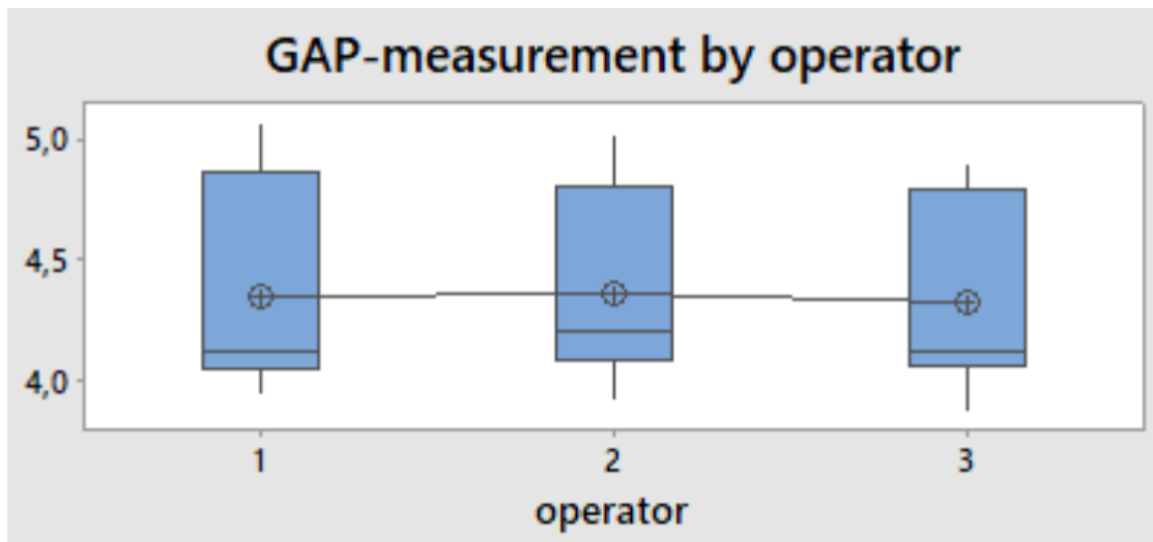


Grafico 5.12: Measurement by operator delle misure del Gap

Ciò che risalta è la tendenza dell'operatore 1 a sovrastimare le misure, infatti il box è spostato verso l'alto rispetto agli altri due. Per quanto riguarda la variabilità introdotta dagli operatori si osserva che l'operatore 1 ha una variabilità elevata essendo le linee verticali più lunghe; questo si traduce in misure meno precise. L'ampiezza verticale dei box dell'operatore 2 è più stretta in confronto alle altre due quindi ha introdotto meno variazioni nelle misure, è stato quindi più preciso. Le medie però hanno assunto dei valori tra loro confrontabili quindi dai risultati ottenuti si può affermare che il comportamento degli operatori nel processo di misura è accettabile. Alcuni dei valori sono fuori controllo ma il resto dei dati è conforme alle assunzioni fatte sulla variabilità. La bontà delle misurazioni è di nuovo influenzata dagli operatori. La variabilità è legata inoltre ai vari disturbi che possono originarsi durante il processo di misurazione. C'è da aggiungere che alcuni errori di misura sono causati dalla ridotta conoscenza dello strumento di misura quindi è necessario prendere confidenza; l'esperienza pertanto, permetterà agli operatori di effettuare misure più accurate.

Di seguito si riporta il “*Measurement by operator*” relativo alle misure del Flush. Le basi fondamentali con cui verrà valutato sono le stesse viste finora ma risulta interessante approfondire la variabilità che gli operatori introducono:

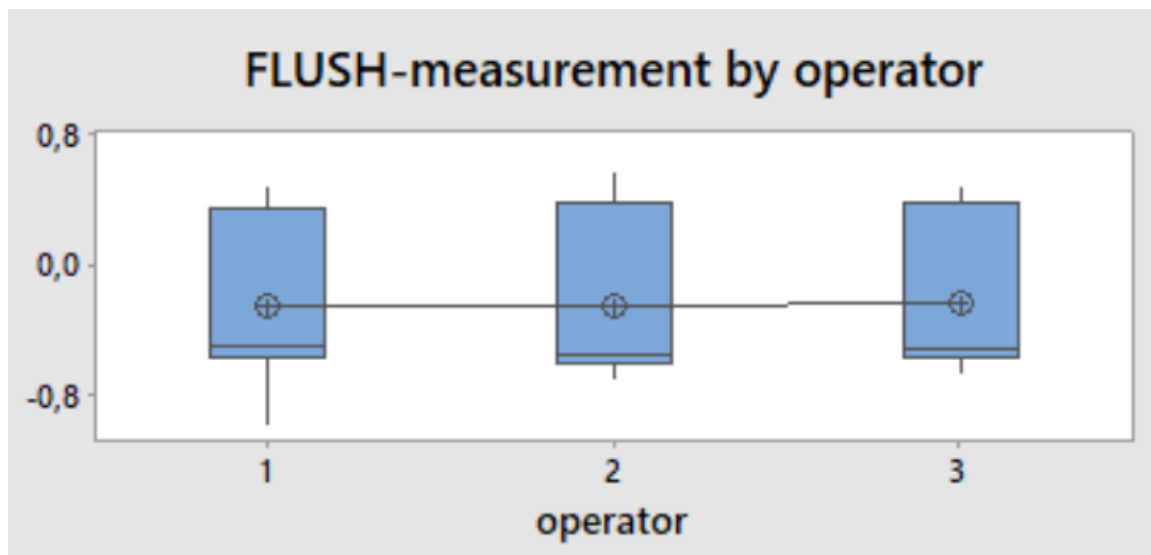


Grafico 5.13: *Measurement by operator* delle misure del Flush

La mediana dei tre box è sullo stesso livello ma ognuna è spostata verso il basso. Questo risultato provoca una distribuzione asimmetrica dei dati e quindi una loro dispersione verso l'alto (sono infatti distribuiti nella parte alta del box). La dispersione delle misure degli operatori 2 e 3 è leggermente più bassa in confronto a quella dell'operatore 1.

I box riassumono il comportamento di ciascun operatore sulle tre parti analizzate. Come è stato già detto, esse riguardano parti diverse del target di misura che per la sperimentazione ne sono state scelte tre per rappresentare tutta l'autovettura. Questo giustifica l'ampiezza pronunciata dei box. È stato interessante proporre tali grafici per valutare le variabilità introdotte da ogni operatore e confrontarle tra loro.

Come ultimo grafico, in conclusione dell'analisi statistica dei dati, viene presentato il grafico “*Part operator interaction*”:

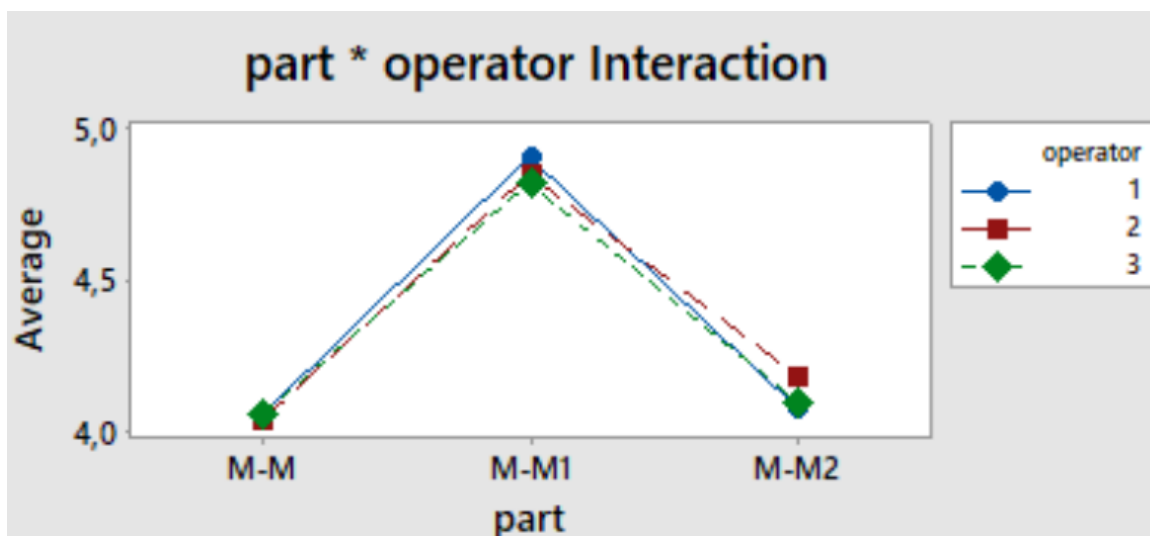


Grafico 5.14: Part-operator interaction delle misure del Gap

Questo grafico permette di confrontare, per ogni parte, le medie di ogni operatore. Quindi è possibile verificare nuovamente la variabilità introdotta da ciascuno. Analizzando la parte MM si osserva che gli operatori hanno rilevato delle misure con una media molto simile, visibile dalla sovrapposizione degli indicatori colorati. La parte MM1 è caratterizzata invece da una discordanza dei valori medi. Nella parte MM2, invece, c'è un aspetto interessante: l'operatore 2 infatti si discosta da quanto misurato dagli altri due operatori. Per questa parte si ricorda la possibile causa di variabilità delle misure legata alla difficoltà nelle rilevazioni. La parte riguarda il tetto dell'autovettura, in particolare lo spoiler. È una parte scomoda che potrebbe compromettere la corretta angolazione da scegliere. Non è pertanto da escludere che un operatore con una statura sotto la media abbia la necessità di sporgersi per effettuare le sue misure e questo comporta una deviazione dai risultati reali.

Nel Flush la discordanza tra le medie si presenta sostanzialmente nella parte MM1.

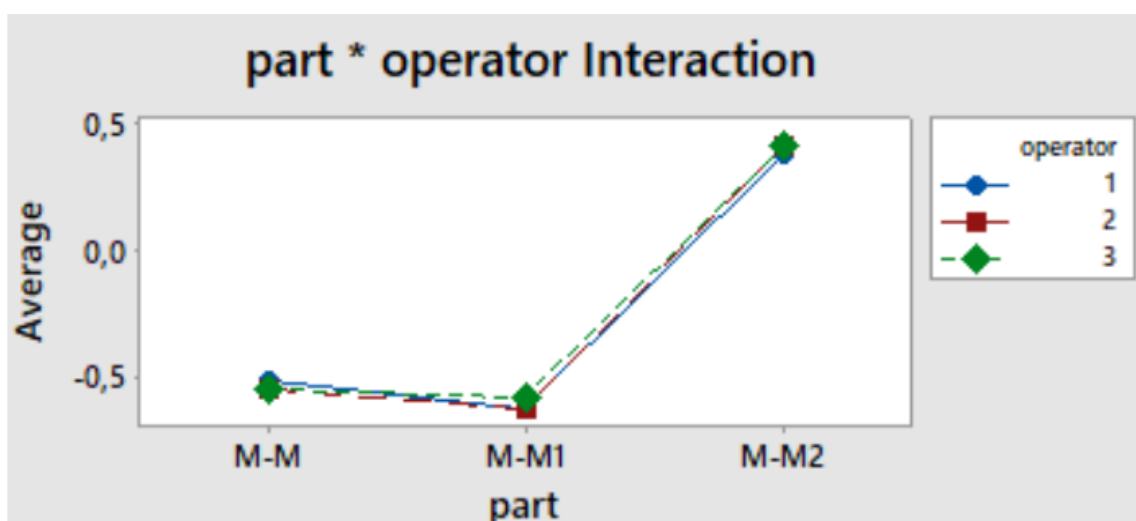


Grafico 5.15: Part-operator interaction delle misure del Flush

Concludendo si può affermare che per la parte MM le misure, sia del Gap che del Flush, sono state molto più precise, gli operatori infatti hanno una media confrontabile. Tale risultato è verificato dalla sovrapposizione degli indicatori.

Per la parte MM1 gli operatori hanno una media che è una sottostima o una sovrastima, in altre parole si discostano leggermente una dall'altra. La media del Flush della parte MM2 è molto simile per i tre operatori, non si può dire la stessa cosa per le misure del Gap.

Il comportamento degli operatori è un aspetto da tenere fortemente in considerazione quando si effettuano misure. È chiaro che anche utilizzando uno strumento caratterizzato da un'incertezza nulla le misure possono non rispecchiare il reale se il dispositivo non è utilizzato correttamente. È necessario allora prendere inizialmente confidenza con il dispositivo, effettuare delle prove e tenendo conto dell'incertezza dello strumento di misura, dichiarata dai produttori, bisogna fare le opportune valutazioni sulle misure ottenute. Gli strumenti di misura devono essere inoltre oggetto di taratura periodica altrimenti la risposta che forniscono è caratterizzata da una forte incertezza. I metodi statistici utilizzati hanno permesso di valutare visivamente e quasi nell'immediatezza i risultati ottenuti.

Conclusioni

L'evoluzione introdotta dall'Industria 4.0 riguarda l'interconnessione del sistema produttivo con tutte le tecnologie aziendali che supportano la produzione. Tale innovazione garantisce di avere un controllo in tempo reale di ciò che accade all'interno delle stazioni di lavoro; ciò è permesso anche dalla massiccia applicazione dei sensori che, funzionando come controllori dei processi, inviano segnali per monitorare le operazioni. Le informazioni vengono lette dal personale specializzato e di conseguenza vengono operate le opportune considerazioni.

Tenere sotto controllo un processo significa correggere le eventuali inefficienze, minimizzare gli errori e quindi qualificare ogni operazione della produzione.

Il settore industriale in cui il concetto di Industria 4.0 trova la maggior applicazione è quello automobilistico. Un'autovettura è composta da migliaia di componenti, ognuno dei quali viene prodotto con delle lavorazioni differenti attraverso un particolare sistema produttivo. Potenzialmente sono prodotti da industrie diverse e, una volta convogliati nella sede di assemblaggio, permettono di terminare la produzione ottenendo il prodotto finito. L'automazione utilizzata in tale settore è altamente sviluppata e fa uso di macchine intelligenti, tipo quelle a controllo numerico, di robot collaborativi...

L'attività di assemblaggio richiede particolare attenzione perché determina la qualità finale del prodotto. È quindi necessario un monitoraggio continuo che, generando delle informazioni che vengono poi confrontate con i parametri desiderati, permette di ottenere la qualità desiderata. Tra le attività di monitoraggio all'interno delle linee di assemblaggio c'è quella di ispezione dei profili esterni, cioè della carrozzeria, e quelli interni per verificare che siano rispettate le specifiche desiderate.

Il dispositivo G3F, utilizzato nell'attività sperimentale di tirocinio, trova applicazione proprio nella fase di assemblaggio dei componenti poiché attraverso un sistema di rilevazione laser genera dei risultati che vengono poi analizzati. Uno strumento di misura, per produrre dei risultati qualitativamente attendibili, deve garantire delle ottime prestazioni.

Durante la sperimentazione, che aveva come target di misura un'autovettura di colore bianco, è stato utilizzato il G3F per valutare la bontà delle rilevazioni. I dati ottenuti sono stati analizzati statisticamente, con media e deviazione standard, e graficamente, attraverso l'ausilio dei software Excel e Minitab. I risultati forniti dal sistema di misura

hanno evidenziato che la maggior parte degli errori commessi sono stati originati da disturbi di tipo ambientale, quale la luce alla quale era esposta l'autovettura. Le misure rilevate sono ovviamente influenzate anche dalla confidenza che l'operatore ha acquisito con il dispositivo. Il comportamento degli operatori infatti è un aspetto da tenere in considerazione quando si esegue un processo di misurazione.

Come già detto, gli strumenti di misura devono essere oggetto di taratura periodica così da essere prestanti ogni volta che vengono utilizzati altrimenti forniscono delle risposte non reali.

Gli errori introdotti dai fattori citati sono minimizzabili, se non eliminabili, attraverso opportuni accorgimenti con i quali si può raggiungere la qualità desiderata del prodotto. Ad esempio, si può pensare di incrementare il database effettuando ulteriori misure così da avere delle stime migliori.

Il soddisfacente risultato ottenuto permette di continuare con coraggio e ottimismo il processo di qualifica del dispositivo G3F.

Bibliografia

- [1] Raymond Williams – Cultura e rivoluzione industriale
- [2] Enciclopedia Rizzoli Larousse
- [3] Jeremy Rifkin – La terza rivoluzione industriale
- [4] <https://www.youtube.com/watch?v=UoV7D1FTIiw>
- [5] Ernest O. Doebelin – Strumenti e metodi di misura
- [6] Bucher, Jay L. – The Metrology Handbook
- [7] [https://go0dman.boc-group.eu/innovationshop/assets/Downloads/GOOD MAN GapFlushPortableDevice_MetroInd2019.pdf](https://go0dman.boc-group.eu/innovationshop/assets/Downloads/GOOD_MAN_GapFlushPortableDevice_MetroInd2019.pdf)
- [8] [https://go0dman.boc-group.eu/innovationshop/assets/Downloads/GOOD MAN GapFlushPortableDevice_InnovAgora2019.pdf](https://go0dman.boc-group.eu/innovationshop/assets/Downloads/GOOD_MAN_GapFlushPortableDevice_InnovAgora2019.pdf)
- [9] <http://go0dman-project.eu/wp-content/uploads/2016/10/GOOD-MAN-DeliverableD3.1.pdf>
- [10] <http://go0dman-project.eu/wp-content/uploads/2016/10/GOOD-MAN-Deliverable-D3.2.pdf>
- [11] <https://www.third.com/>
- [12] <https://www.hexagonmi.com/products/profile-and-surface-measurement/automotive-gap-and-flush-measurement>
- [13] <https://www.hexagonmi.com/products/profile-and-surface-measurement/calipri-c11-c15>
- [14] <https://perceptron.com/solutions/gap-and-flush/>
- [15] Guide to the expression of Uncertainty in Measurements (GUM)
- [16] S. V. Gupta – Measurement Uncertainties, Physical parameters and calibration of instruments
- [17] https://www.accredia.it/app/uploads/2018/10/Incertezza_di_misura-Pedone.pdf
- [18] https://www.accredia.it/app/uploads/2009/05/246_17025_5_4B.pdf
- [19] Douglas C. Montgomery – Statistical Quality Control
- [20] Lezioni di Misure per la gestione della qualità – Professor N. Paone – anno accademico 2019/2020

- [21] Lezioni di Logistica industriale – Professor M. Bevilacqua – anno accademico 2019/2020
- [22] A. Baleani, P. Castellini, P. Chiariotti, N. Paone, L. Violini - Analysis of reproducibility and repeatability of a hand-held laser scanner for gap&flush measurement in car-assembly line
- [23] <https://www.minitab.com/en-us/>
- [24] <https://www.minitab.com/en-us/support/documents/>
- [25] <https://www.minitab.com/en-us/support/>
- [26] G. Robin Henderson – Six Sigma Quality Improvement with Minitab
- [27] S. Kenett, S. Zach, D. Amberti – Modern Industrial Statistics

Elenco figure

Figura 1.1: la rivoluzione industriale interessò prevalentemente il settore tessile-metallurgico con l'introduzione della spoletta volante (congegno per la tessitura) e della macchina a vapore nella seconda metà del '700.

Figura 1.2: catena di montaggio nell'industria automobilistica di H. Ford

Figura 1.3: schema di sintesi della prima e della seconda rivoluzione industriale

Figura 1.4: schema di sintesi della terza rivoluzione industriale

Figura 1.5: interconnessione delle risorse

Figura 1.6: Internet delle cose

Figura 1.7: evoluzione dell'industria nel tempo

Figura 2.1: schema di un generico processo di misura

Figura 2.2: schema a blocchi funzionali di uno strumento di misura

Figura 2.3: diagramma che rappresenta uno strumento molto sensibile. La sensibilità corrisponde alla pendenza della retta. La realtà può anche deviare dal modello, quindi si avrà una curva non lineare anziché una retta

Figura 2.4: diagramma che rappresenta la soglia di uno strumento di misura

Figura 2.5: diagramma che rappresenta la risoluzione di uno strumento di misura

Figura 2.6: diagramma che rappresenta l'isteresi di uno strumento di misura. Si ha quando la curva di taratura ottenuta per valori crescenti dell'ingresso è diversa da quella ottenuta per valori decrescenti

Figura 2.7: schematizzazione del funzionamento di un sensore laser a triangolazione

Figura 2.8: rilevamento delle superfici attraverso un sensore laser

Figura 2.9: rappresentazione della definizione di Gap e Flush

Figura 2.10: rappresentazione del sensore laser montato su uno smartphone per rilevare Gap e Flush

Figura 2.11: operatore rileva Gap e Flush attraverso delle misure a distanza e a contatto

Figura 2.12: l'operatore posiziona ortogonalmente il dispositivo per rilevare Gap e Flush del target di misura

Figura 2.13: schema del sistema di triangolazione del G3F dove d è la distanza dal target di misura, δ è l'angolo tra il fascio luminoso e l'asse ottico della telecamera, L è la distanza tra il laser e la fotocamera.

Tabella 2.1: tabella riassuntiva dell'incertezza di misura del G3F rilevata in laboratorio

Figura 2.14: GapGun della Third Dimension catturata dal web

Figura 2.15: dispositivo Calipri della Hexagon per misurare i profili delle autovetture

Figura 2.16: robot collaborativi che effettuano misure di Gap e Flush con sistemi Perceptron

Figura 3.1: misurazioni di una grandezza

Equazione 3.1: espressione della media aritmetica

Equazione 3.2: espressione della deviazione standard

Figura 3.2 relativa al livello di confidenza definito per una deviazione standard

Figura 3.3 relativa al livello di confidenza definito per 2 deviazioni standard

Figura 3.4 relativa al livello di confidenza definito per 3 deviazioni standard

Figura 3.5: definizione delle diverse zone in cui possono distinguersi le misure

Figura 4.1: parte sportello-sportello

Figura 4.2: parte sportello-montante posteriore

Figura 4.3: parte spoiler

Figura 4.4: parte spoiler centrale

Figura 4.5: parte tappo del serbatoio

Grafico 4.1: GAP parte sportello-sportello

Grafico 4.2: eliminazione outlier GAP parte sportello-sportello

Grafico 4.3: FLUSH parte sportello-sportello

Grafico 4.4: eliminazione outlier FLUSH parte sportello-sportello

Grafico 4.5: GAP parte sportello-montante posteriore

Grafico 4.6: FLUSH parte sportello-montante posteriore

Grafico 4.7: eliminazione outlier FLUSH parte sportello-montante posteriore

Grafico 4.8: GAP parte spoiler

Grafico 4.9: eliminazione outlier GAP parte spoiler

Grafico 4.10: FLUSH parte spoiler

Grafico 4.11: eliminazione outlier FLUSH parte spoiler

Grafico 4.12: GAP spoiler centrale

Grafico 4.13: FLUSH parte spoiler centrale

Grafico 4.14: eliminazione outlier FLUSH parte spoiler centrale

Grafico 4.15: GAP parte tappo del serbatoio

Grafico 4.16: FLUSH parte tappo del serbatoio

Grafico 4.17: eliminazione outlier FLUSH parte tappo del serbatoio

Figura 5.1: concetto di precisione e accuratezza. (a) Strumento accurato e preciso. (b) Strumento accurato ma non preciso. (c) Strumento preciso ma non accurato. (d) Strumento né accurato né preciso.

Figura 5.2: bersaglio che rappresenta la mancata riproducibilità delle prove eseguite dai 3 operatori

Equazione 5.1: nell'acquisizione dei dati l'operatore rimane una grande fonte di incertezza per cui la variabilità totale dei risultati è costituita dalla somma di due variabilità

Grafico 5.1: vengono mostrati i limiti di controllo e la linea centrale. In alto a destra vengono riportate le formule analitiche di come si ricavano limiti e linea centrale.

Grafico 5.2: USL indica "upper specified limit", LSL "lower specified limit". Rappresentano limiti ingegneristici per il controllo del processo ovvero il massimo e il minimo valore accettabile di una variabile. Tali limiti sono generalmente stabiliti dalle esigenze del cliente.

Grafico 5.3: esempio che mostra un valore fuori controllo perché al di là dei limiti di controllo definiti

Equazione 5.2: scomposizione della variabilità totale

Grafico 5.4: Components of variation: misure del Gap

Grafico 5.5: Components of variation misure del Flush

Tabella 5.1: risultati Gap dello studio Gage R&R che indicano le deviazioni standard per ogni sorgente

Tabella 5.2: risultati Flush dello studio Gage R&R che indicano le deviazioni standard per ogni sorgente

Grafico 5.6: S-Chart delle misure del Gap

Grafico 5.7: S-Chart delle misure del Flush

Grafico 5.8: analisi Gage R&R delle componenti di variazione delle misure del Gap

Grafico 5.9: analisi Gage R&R delle componenti di variazione delle misure del Flush

Grafico 5.10: Measurement by part con analisi Gage R&R delle misure del Gap

Grafico 5.11: Measurement by part con analisi Gage R&R delle misure del Flush

Grafico 5.12: Measurement by operator delle misure del Gap

Grafico 5.13: Measurement by operator delle misure del Flush

Grafico 5.14: Part-operator interaction delle misure del Gap

Grafico 5.15: Part-operator interaction delle misure del Flush

Ringraziamenti

Desidero riassumere questo mio primo percorso universitario con tre citazioni:

- *il vero viaggio della scoperta non consiste nello scoprire nuove terre ma nell'aver nuovi occhi* (Marcel Proust, scrittore francese).

Impegnato nella carriera calcistica era lontana da me l'idea di poter frequentare l'università e addirittura conseguire una laurea. L'attrazione del calcio predominava e non lasciava spazio alle belle opportunità attorno a me. Per cui iniziare gli studi è stato un viaggio che mi ha donato occhi nuovi e ha allargato i miei orizzonti, ora più limpidi e colorati.

- *fai le cose difficili quando sono facili, inizia le grandi cose quando sono piccole. Un viaggio di mille miglia deve iniziare con un singolo passo* (Lao Tzu, filosofo e scrittore cinese).

Diventare ingegnere è per me motivo di grande soddisfazione che richiede professionalità, responsabilità e coraggio. La curiosità che fin da piccolo possiedo mi permetterà di mettere in discussione e quindi approfondire le mie conoscenze.

- *tutte le grandi realizzazioni nella vita richiedono tempo* (David Schwartz, scrittore e coach motivazionale americano).

Mattone dopo mattone, un passo alla volta...e così tante altre citazioni che hanno il medesimo significato. La chiave è fissare un obiettivo vero e sano, avere pazienza di conseguirlo ed essere concentrato su ciò che si fa.

Sono felice di ringraziare il Professor Nicola Paone per la sua preziosa professionalità, capace di trasmettere la passione per il lavoro e per ciò in cui crede.

Sono felice di ringraziare i miei genitori per il loro amorevole sostegno.

Sono felice di ringraziare mio fratello Alberto, mia cognata Cristina e i miei adorati nipotini Cristian e Anastasia.

Sono felice di ringraziare mia nonna Mina e i nonni che dall'alto hanno pregato per me, Mario, Alberto e Italia.

Sono felice di ringraziare i miei zii e i miei cugini che mi hanno mostrato sempre il loro calore.

Sono felice di ringraziare mio zio Alessandro, fra Roberto, fra Carlo e fra Lorenzo con i quali ho trascorso il periodo della pandemia e hanno reso speciale e fruttuoso ogni singolo giorno.

Sono felice di ringraziare gli amici e i compagni universitari.

Sono felice di ringraziare tutte le persone che conosco e che porto nel cuore.

Sono felice di ringraziare la mia fidanzata Veronica per il suo tenero affetto, per il suo sostegno e per la sua presenza nella mia vita.