

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Gestionale

Tesi di Laurea Magistrale

Sviluppo metodologie Advanced Product Quality Planning (APQP) e Product Part Approval Process (PPAP) in UmbraGroup S.p.A. operante nel settore aeronautico.



Relatore:
prof. Maurizio Galetto

Candidato:
Daniele Giammarrusti

Anno Accademico 2019/2020

Indice

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1: IL CONTESTO AZIENDALE	4
1.1. L'AZIENDA	4
1.1.1. LA STORIA	5
1.1.2. STRUTTURA AZIENDALE.....	8
1.1.3. MISSION	9
1.1.4. VALORI.....	10
1.2. I PRODOTTI UMBRAGROUP	11
1.2.1. SEGMENTO INDUSTRIALE.....	11
1.2.2. SEGMENTO ENERGIA.....	14
1.2.3. SEGMENTO AERONAUTICO	15
1.3. SERVIZI E PROCESSI	19
1.4. FILOSOFIA LEAN SIX SIGMA	20
CAPITOLO 2: NORMATIVE	21
2.1. IL SISTEMA DI GESTIONE DELLA QUALITA'	21
2.2. IAQG	23
2.2.1. AS/EN 9100	24
2.2.2. AS/EN 9102	25
CAPITOLO 3: MERCATO AERONAUTICO	26
3.1. PREVISIONI CRESCITA SETTORE AERONAUTICO	26
3.2. EFFETTO COVID-19 SULL'ANALISI	29
3.3. DALLA AS/EN 9102 ALLA AS/EN 9145	32
CAPITOLO 4: AS/EN 9145.....	34
4.1. INTRODUZIONE ALL'APQP	34
4.1.1. OBIETTIVI.....	35
4.1.2. VANTAGGI.....	36

4.2. PRODUCT PART APPROVAL PROCESS (PPAP).....	37
4.2.1. DOCUMENTI DI PROGETTAZIONE.....	38
4.2.2 ANALISI DEI RISCHI DI PROGETTAZIONE (DRA).....	38
4.2.3. DESIGN FAILURE MODE & EFFECT ANALYSIS (DFMEA)	39
4.2.4. DIAGRAMMA DI FLUSSO DEL PROCESSO	39
4.2.5. PROCESS FAILURE MODE & EFFECT ANALYSIS (PFMEA)	40
4.2.6. PIANO DI CONTROLLO	41
4.2.7. MEASUREMENT SYSTEM ANALYSIS (MSA).....	41
4.2.8. STUDIO INIZIALE DELLA CAPACITÀ DEL PROCESSO	42
4.2.9. APPROVAZIONE IMBALLAGGIO, CONSERVAZIONE ED IDENTIFICAZIONE	43
4.2.10. FIRST ARTICLE INSPECTION REPORT (FAIR).....	43
4.2.11. REQUISITI SPECIFICI DEL CLIENTE	44
4.2.12. PPAP APPROVAL FORM.....	44
4.3. ADVANCED PRODUCT QUALITY PLANNING (APQP)	46
4.3.1. I PILASTRI DELL'APQP	46
4.3.2. LE FASI DELL' APQP	48
4.3.3. ASPETTI SALIENTI E RIFLESSIONI SU APQP-PPAP	55
CAPITOLO 5: L'APQP IN UMBRAGROUP.....	57
5.1. CASO UMBRAGROUP S.p.A. "AS IS"	57
5.1.1. MODALITÀ DI SVOLGIMENTO	58
5.1.2. INCONVENIENTI CORONAVIRUS.....	59
5.2. CHECKLIST DELLE 5 FASI APQP	60
5.3. ASSESSMENT MATRIX	62
5.4. RISULTATI.....	63
CAPITOLO 6: ANALISI DEL SISTEMA DI MISURA (MSA)	64
6.1. INTRODUZIONE MSA.....	64

6.1.1. TERMINOLOGIA UTILIZZATA NELL'ANALISI DEL SISTEMA DI MISURA	66
6.2. SCOMPOSIZIONE DELLA VARIANZA	68
6.3. STUDIO GAGE R&R	69
6.3.1. PROGRAMMAZIONE DELL'ESPERIMENTO	70
6.3.2. MODELLO ANOVA (Analysis Of Variance).....	72
6.4. CASO STUDIO MSA IN UMBRAGROUP S.p.A	81
6.4.1. PROGRAMMAZIONE DEGLI ESPERIMENTI.....	81
6.4.2. ESECUZIONE DELL'ESPERIMENTO	84
6.5. RISULTATI.....	86
6.5.1. PIN TO PIN – RETRATTO.....	90
6.5.2. PIN TO PIN – ESTESO	94
6.5.3. GIOCO ANTIROTAZIONE.....	99
6.5.4. GIOCO RADIALE.....	104
CONCLUSIONI & SVILUPPI FUTURI	108
Bibliografia.....	111
Sitografia	111

INTRODUZIONE

Il concetto della qualità non è assoluto ed eterno. Nel corso degli anni ha infatti subito numerose modifiche dovute all'evoluzione del contesto sociale e legislativo, ma soprattutto al mutamento delle esigenze dei clienti, i quali rappresentano i destinatari dei prodotti o servizi forniti e, di conseguenza, i valutatori della qualità in base a come essi la percepiscono.

Una prima definizione concreta, seppur generale, fu emanata nel 1995 con la pubblicazione della norma ISO 8402 che recita: *“La qualità è l'insieme delle caratteristiche di un'entità che ne determinano la capacità di soddisfare esigenze espresse ed implicite”*¹. La seguente definizione, per quanto possa sembrare esaustiva, non considera la qualità come una grandezza oggettivamente misurabile. Essa fa riferimento a come la qualità viene percepita da tutti gli stakeholder, i cui benefici possono essere differenti e molto spesso contrapposti (si pensi agli enti per il rispetto dell'ambiente e agli azionisti), per cui assume un significato prettamente soggettivo.

Questo limite venne superato con l'emanazione della norma ISO 9000 del 2000, in cui la qualità viene definita come *“il GRADO in cui un insieme di caratteristiche intrinseche soddisfa i requisiti”*². Il termine *“grado”* sottolinea la necessità di quantificare la qualità attraverso una misurazione della stessa. Alle caratteristiche qualitative è dunque fondamentale attribuire dei pesi per poter esprimere una valutazione oggettiva del prodotto/servizio.

Da questa considerazione, l'International Organization for Standardization (ISO) ha sviluppato una serie di normative volte a guidare le organizzazioni nella mappatura dei vari processi aziendali al fine di raggiungere livelli qualitativi elevati.

Un'azienda che fornisce un prodotto o servizio di qualità certificata, si distingue dalla concorrenza. La differenziazione che ne scaturisce incide ed influenza la natura degli scambi, i quali saranno molto più concentrati per le aziende in possesso di certificazioni che attestano l'elevata qualità dei propri prodotti.

¹ UNI EN ISO 8402:1995, *Quality management and quality assurance – Vocabulary*, p. 5. Definizione revisionata della versione UNI EN ISO 8402:1988 in cui la parola “prodotto” è stata sostituita con “entità” per poter estendere il campo applicativo del termine.

² UNI EN ISO 9000:2000, *Quality management systems – Fundamentals and vocabulary*, p. 7. Definizione riproposta anche nella revisione aggiornata UNI EN ISO 9000:2005.

Partendo dalla normativa generale relativa al sistema di gestione della qualità (ISO 9001)³, gli attori operanti nei diversi settori hanno modellato requisiti e procedure in base alle loro esigenze.

Nel campo aeronautico, l'International Aerospace Quality Group (IAQG)⁴ ha elaborato uno standard in grado di guidare le organizzazioni che operano in questo settore nel processo di sviluppo di un nuovo prodotto/processo, permettendo alle stesse il raggiungimento di elevati standard qualitativi. La normativa di riferimento è la AS/EN 9145 la quale riprende la metodologia Advanced Product Quality Planning (APQP)⁵, ampiamente utilizzata e diffusa nel settore *automotive*, riadattandola al contesto aeronautico.

L'APQP è un insieme di procedure e strumenti che hanno lo scopo di supportare l'organizzazione nella gestione e monitoraggio delle attività da implementare durante le varie fasi che concorrono al processo di sviluppo di un nuovo prodotto/processo.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di esporre ed analizzare la normativa AS/EN 9145 adottata nel settore aeronautico e riferita al processo APQP. Inoltre, si è valutato il grado di implementazione del processo nel sistema di gestione della qualità dell'organizzazione e, con il coinvolgimento dei responsabili delle varie funzioni aziendali, sono stati individuati gli aspetti carenti che necessitano di ulteriori approfondimenti. L'attività di *assessment* ha evidenziato una lacuna relativa ad uno dei *deliverables* dell'APQP ovvero l'analisi del sistema di misura, per cui si è provveduto ad eseguire uno studio sperimentale sui banchi prova utilizzati per effettuare le misure delle caratteristiche degli attuatori. Lo studio è stato condotto con l'ausilio di MINITAB⁶, un potente software di analisi statistica, coinvolgendo gli addetti della sala prove, il reparto qualità e il responsabile del collaudo e montaggio degli attuatori. Questa ultima parte dell'elaborato si pone l'obiettivo di validare il sistema di misura e rendere ancora più robusto il processo APQP.

³ UNI EN ISO 9001:2015, *Quality management systems requirements*.

⁴ Link: <https://iaqg.org/>

⁵ AS/EN 9145:2016/2018 Aerospace Standard, *Requirements for Advanced Product Quality Planning and Production Part Approval Process*.

⁶ Link: <https://www.minitab.com/en-us/>

Il lavoro è stato svolto presso l'azienda UmbraGroup S.p.A.⁷ con sede a Foligno (PG) contestualmente ad un periodo di tirocinio della durata di 7 mesi, di cui gli ultimi 3 in smart-working a causa dell'emergenza Covid-19.

Nel primo capitolo viene presentata l'azienda UmbraGroup S.p.A. facendo riferimento alla sua storia, all'estensione del gruppo a livello mondiale, alla mission e ai valori condivisi da tutto il gruppo, nonché al parco prodotti fornito dall'organizzazione ai clienti operanti nei vari settori di competenza: industriale, aeronautico, energia.

Successivamente, nel secondo capitolo, viene accennato il sistema di gestione della qualità normato dalla ISO 9001 e vengono trattate le principali normative che l'IAQG ha sviluppato sulla base di questo standard.

Il terzo capitolo contiene l'analisi della previsione della domanda di velivoli per i prossimi 20 anni e come essa abbia influenzato l'intera filiera produttiva aeronautica.

La normativa AS/EN 9145 e dunque la metodologia APQP, viene spiegata nel dettaglio nel capitolo quattro. Oltre alle fasi in cui è scomposto l'intero processo APQP, vengono anche analizzati i singoli *deliverable* del processo. Molti di questi *deliverables* costituiscono il pacchetto Product Part Approval Process (PPAP)⁸ che rappresenta l'output del processo APQP tramite cui il cliente è in grado di effettuare le proprie considerazioni sul raggiungimento o meno degli obiettivi prefissati.

Nel quinto capitolo viene effettuata una valutazione sul grado di implementazione del processo APQP in azienda, relativo alla realizzazione di un tipo di attuatore elettromeccanico. Tale analisi è stata condotta coinvolgendo i responsabili dei vari reparti aziendali tra cui: Design, Manufacturing, Quality, Procurement, Operations. Durante i colloqui si è fatto riferimento ad una checklist appositamente studiata dall'IAQG, in modo tale da non trascurare alcun aspetto nell'analisi.

I risultati dei colloqui hanno evidenziato una particolare carenza del Measurement System Analysis (MSA)⁹ e dunque, nel sesto capitolo, viene affrontato lo studio MSA sui banchi di collaudo degli attuatori.

⁷ Link: <https://www.umbragroup.com/>

⁸ Per una panoramica degli elementi del PPAP si rimanda al seguente link: https://www.sae.org/iaqg/projects/9145_guidance.pdf

⁹ Analisi del sistema di misura utilizzato per rilevare le misure delle caratteristiche. Il risultato dell'analisi permette di quantificare l'incidenza della variabilità imputabile al sistema di misura, rispetto a quella scaturita dalle effettive differenze tra i componenti misurati.

CAPITOLO 1: IL CONTESTO AZIENDALE

1.1. L'AZIENDA

L'azienda UmbraGroup S.p.A., capofila del gruppo Umbra, è leader mondiale nella realizzazione di viti a ricircolo di sfere ed altre tecnologie per applicazioni aeronautiche ed industriali. Nel business aziendale rientra un sostanziale interesse sia al settore energetico, attraverso la fornitura di prodotti al mercato dell'energia, sia all'eco-sostenibilità, con l'impegno nel corso degli anni a dare il proprio contributo volto a ridurre l'impatto ambientale. Il gruppo è composto da 7 aziende situate in diverse parti del mondo, condizione strategica che gli ha permesso di interfacciarsi con un mercato globale. Durante la sua storia, non ha solo migliorato la propria catena di produzione, ma ha anche curato la formazione del personale e, attraverso investimenti sostanziali in Ricerca & Sviluppo, è riuscita negli anni ad accrescere la gamma di prodotti realizzati.

Fondata a Foligno (PG) nel 1972 per la produzione di cuscinetti ad alta precisione, nel 1978 l'azienda inizia la produzione di viti a ricircolo di sfere per applicazioni aeronautiche, che ben presto divennero il prodotto di punta su cui iniziò a ricadere la scelta del cliente.

Spinta da un forte desiderio di innovazione e dalla cultura aziendale orientata al *continuous improvement*, il gruppo è ad oggi leader mondiale nella realizzazione di viti a ricircolo di sfere ed è considerato molto all'avanguardia nel settore aeronautico.

1.1.1. LA STORIA

La storia di UmbraGroup S.p.A. ha radici molto lontane. Il tutto ebbe inizio con la nascita nel 1935 dell'Aeronautica Umbra S.A. di proprietà della Macchi. La Macchi aveva già acquisito esperienza nel settore aeronautico grazie alla Società Anonima Nieuport-Macchi la quale nel 1913 vinse un concorso per la fornitura di aerei militari indetto dal ministero della difesa. Durante il periodo della Seconda guerra mondiale furono costruiti su licenza numerosi aerei Trimotori tra cui molti dei quali presso lo stabilimento "Aeronautica Umbra S.A." di Foligno. Lo stabilimento di Foligno produsse i Savoia-Marchetti S.M.79, S.M.81, S.M.84 e sviluppò il primo caccia monomotore ad ala bassa (AUSA AUT 18) rimasto, però, allo stadio di prototipo.

L'Aeronautica Umbra S.A. crebbe molto fin dai primi anni della sua nascita, fino ad impiegare ben 2400 dipendenti allo scoppio della Seconda guerra mondiale.

Rappresentando un fattore strategico, l'azienda venne presa di mira e nel corso della guerra fu bombardata più volte. Cessato il conflitto fallirono i vari tentativi di rilanciare l'attività a causa degli ingenti danni riportati per i bombardamenti e la compagnia decise di interrompere definitivamente la produzione.

Molti dei macchinari, ex dipendenti e dirigenti dell'Aeronautica umbra, azienda ormai in liquidazione, furono rispettivamente acquistati e assunti dall' Officina Meccanica Aeronautica (O.M.A.) nel 1947 e, nel corso degli anni cinquanta, produsse alcuni aerei leggeri monoposto.

Il punto di svolta per l'attuale UmbraGroup S.p.A. si ha quando negli anni sessanta Muzio Macchi fallì nel tentativo di riaprire gli stabilimenti di Foligno e nel 1972 la GEPI (società italiana) e la FAG Kugelfischer Georg Schaffler GmbH (multinazionale tedesca) acquisirono la proprietà e ciò che restava dell'Aeronautica Umbra, fondando una nuova società chiamata Umbra Cuscinetti S.p.A., che inizialmente produceva solo cuscinetti speciali di dimensione medio-grandi per il gruppo FAG.

Nel 1978 la Umbra Cuscinetti, spinta dal desiderio di innovazione e crescita, grazie anche al 'Progetto Tornado', avvia un processo di diversificazione mediante la produzione di viti a ricircolo di sfere per applicazioni aeronautiche e nel 1982 iniziarono le attività di progettazione delle viti destinate sia al mercato aeronautico che a quello industriale.

Nel 1983 la FAG Kugelfischer Georg Schaffler GmbH acquisì il totale controllo della Umbra Cuscinetti, la quale si impegnò nello sviluppo del know how per svolgere autonomamente la progettazione delle viti ed incrementò sensibilmente il volume dell'attività legata direttamente al settore aeronautico, ricevendo fiducia e approvazione da parte dei principali attori del settore.

La FAG detenne il controllo della Umbra Cuscinetti fino al 1993 quando, tramite un'operazione di management buyout, venne acquisita da managers dell'azienda stessa, ovvero dall' Ing. Valter Baldaccini, padre fondatore di UmbraGroup, insieme all' Ing. Reno Ortolani, oggi Direttore di Stabilimento, supportati da un gruppo di imprenditori locali.

Da questo momento sono state effettuate una serie di acquisizioni per garantire innovazione, miglioramento, crescita ed ampliamento del portafoglio dei prodotti. Di seguito vengono elencati gli eventi incisivi:

- Nel 1996 Umbra Cuscinetti acquisisce l'azienda tedesca Kuhn GmbH, specializzata nella progettazione e produzione di viti a ricircolo di sfere per applicazioni industriali;
- Nel 1998 acquisisce il controllo di FM Elettromeccanica, originariamente con sede in provincia di Milano e successivamente trasferita nel nuovo sito di Umbra Cuscinetti a Foligno, specializzata nella progettazione e produzione di elettromandrini per applicazioni industriali;
- Nel 1999 acquisisce l'americana Northwest Gears Inc. di Seattle, operazione strategicamente importante data la prossimità dello stabilimento a quello della BOEING la quale rappresenta il principale cliente per la fornitura di scatole ad ingranaggi, settori e pignoni. Due anni dopo, nel 2001, cambia nome e diventa Umbra Cuscinetti Inc.;
- Nel 2003 per far fronte ad un significativo incremento della domanda di mercato e della propria quota, viene inaugurato il nuovo stabilimento produttivo situato nella zona industriale La Paciana di Foligno, consentendole di espandere la capacità produttiva;
- Avendo da sempre riposto una particolare attenzione anche allo sviluppo sociale, nel 2008 Valter Baldaccini realizza l'azionariato diffuso. Questa operazione ha permesso ai dipendenti con senso di attaccamento alla società e che negli anni

hanno dimostrato competenze tecniche e umane, di acquistare parte del capitale sociale condividendo il rischio di impresa;

- Nel 2009 Umbra Cuscinetti S.p.A. incorpora per fusione FM Elettromeccanica S.r.l.;
- Nel 2012 viene inaugurato il Centro di Ricerca di Albanella in provincia di Salerno per far fronte all'esigenza aziendale di supportare la linea degli attuatori elettromeccanici grazie ad un centro completamente funzionale;
- Nel 2013 venne inaugurato il nuovo stabilimento Umbra Cuscinetti Inc. ad Everett, Washington – USA;
- Nel 2014, a seguito della scomparsa del fondatore Valter Baldaccini, subentrò alla guida dell'azienda la seconda generazione con la nomina ad Amministratore Delegato del figlio Antonio Baldaccini;
- Nel 2015 ha inaugurato il nuovo stabilimento produttivo a Foligno interamente dedicato alla linea degli attuatori elettromeccanici;
- Nel 2017 è stata acquisita la società SERMS S.r.l., spin-off dell'Università degli Studi di Perugia consentendo lo scambio culturale tra il mondo accademico e quello industriale;
- A gennaio del 2018 Umbra Cuscinetti S.p.A. diventa UmbraGroup S.p.A e, nello stesso anno, viene acquisita la Thomson Aerospace & Defense appartenente a Linear Motion LLC (Saginaw, Michigan – USA).

1.1.2. STRUTTURA AZIENDALE

Come accennato nel precedente paragrafo, UmbraGroup S.p.A., capofila del gruppo, è composta da 7 aziende che operano a livello mondiale con sedi dislocate tra Italia, Germania e USA:

- UmbraGroup S.p.A, Foligno, Italia
- UmbraGroup S.p.A, Albanella, Italia
- Serms, Terni, Italia
- Kuhn GmbH, Freiberg, Germania
- PKE GmbH, Eltmann, Germania
- Umbra Cuscinetti Inc., Everett, USA
- Thomson Aerospace and Defence, Saginaw, USA

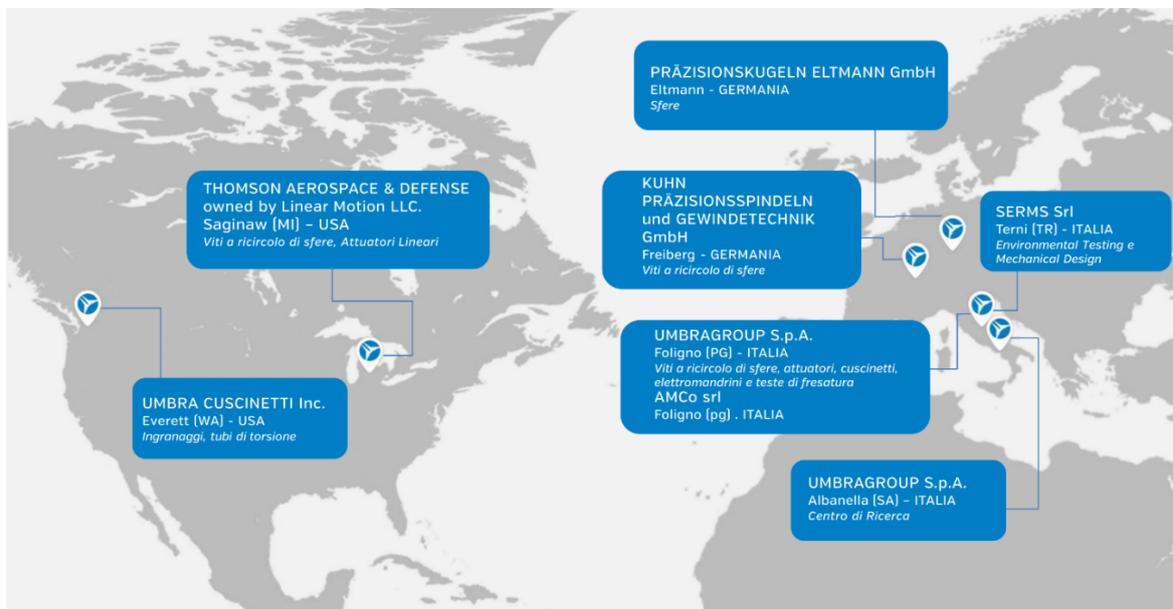


Figura 1.1. Struttura aziendale UmbraGroup (fonte: sito aziendale)

1.1.3. MISSION

La “mission” di UmbraGroup consiste nel perseguire l’innovazione tecnologica e la qualità supportando il miglioramento delle performance dei clienti ed offrendo agli stessi un servizio superiore.

“Affondando le sue radici nella continua tensione che ci contraddistingue verso l’eccellenza, l’obiettivo è quello di costruire la nostra offerta intorno alle reali esigenze dei nostri clienti ed essere realmente partner di un progetto comune.”¹⁰

“Essere per il Cliente IL fornitore di viti a sfere, cuscinetti, attuatori e componenti destinati a mercati ad alta tecnologia. Un servizio eccellente sarà alla base di ogni attività.”¹¹

¹⁰ Cit. Valter Baldaccini, Padre Fondatore di UmbraGroup S.p.A.

¹¹ Mission UmbraGroup S.p.A. , fonte: <https://www.umbragroup.com/azienda/881/mission>

1.1.4. VALORI

L'azienda si propone di creare un profitto sostenibile nel rispetto e nella valorizzazione delle persone. L'acronimo FIRST¹² racchiude i valori portanti dell'azienda:

- **FOCUS SUL CLIENTE:** Costruire con il cliente un rapporto di partnership, stima e serietà. Accompagnare il cliente nello scegliere la soluzione migliore ed economicamente sostenibile. Valorizzare ciascun cliente e lavorare per soddisfare le sue esigenze.
- **INNOVAZIONE:** Creare un ambiente favorevole all'innovazione. Considerare il cambiamento una forma di ricchezza e opportunità di crescita, accogliendo nuove idee e mettendole in atto con la massima flessibilità e rapidità.
- **RISPETTO:** Impegnarsi ad ascoltare e comprendere il cliente e tutti gli stakeholder. Essere coerenti con gli obiettivi concordati e rispettare le norme e le leggi vigenti
- **SVILUPPO SOCIALE:** Impegnarsi a realizzare attivamente il bene comune. Sostenere il benessere e lo sviluppo dei collaboratori dentro e fuori il contesto lavorativo. Garantire equità avendo a cuore le esigenze di tutti gli stakeholder.
- **TUTTI PER UN OBIETTIVO:** Operando come una squadra si possono ottenere risultati che da soli non si riuscirebbero a raggiungere.

¹² Valori condivisi dal gruppo Umbra, fonte: <https://www.umbragroup.com/azienda/877/i-valori>

1.2. I PRODOTTI UMBRAGROUP

Di seguito vengono elencati i prodotti offerti dall'azienda per il mercato industriale, quello dell'energia e con maggior focus al mercato aeronautico.

Il parco prodotti Umbra può essere suddiviso in tre macroaree in base al loro campo di applicazione:

- Industriale
- Energia
- Aeronautico

1.2.1. SEGMENTO INDUSTRIALE

L'ampia gamma di prodotti offerti dall'azienda, l'elevata affidabilità degli stessi e il soddisfacimento delle più svariate esigenze dei clienti, hanno permesso di affermare il brand Umbra nella maggior parte delle applicazioni industriali.

Tra i prodotti di maggior rilievo vengono considerati:

- Viti a ricircolo di sfere
- Cuscinetti
- Attuatori elettromeccanici (EMA)

VITI A RICICCOLO DI SFERE

Realizzate per far fronte a specifiche richieste applicative quali:

- Alta velocità lineare degli assi
- Alte accelerazioni
- Alti carichi di spinta
- Riduzione delle vibrazioni delle viti di elevata lunghezza



Figura 1.2. Vite a ricircolo di sfere industriale.

CUSCINETTI

Fin dalla sua fondazione l'azienda si è distinta nella produzione di cuscinetti di medie e grandi dimensioni, sviluppando e consolidando la capacità progettuale e realizzativa di cuscinetti a sfere, a rulli cilindrici, a rulli conici e a rulli a botte.



Figura 1.3. Alcune tipologie di cuscinetti fabbricati. Da sinistra a destra: a gola profonda, a doppia corona, combinati assiali/radiali, a rulli conici.

ATTUATORI ELETTROMECCANICI (EMA)

La politica di miglioramento continuo e l'incessante attività di ricerca e sviluppo per proporre soluzioni innovative e performanti, hanno portato alla produzione di sistemi integrati. L'unione di componenti meccaniche, quali le viti a sfera, con componenti elettronici aprono nuove sfide produttive e nuove opportunità di business per l'azienda. L'EMA è caratterizzato da magneti permanenti legati ad un dado a sfere in modo tale che lo stesso dado a sfere, magnetizzato, diventi il rotore di un motore. Il vantaggio di integrare verticalmente la catena cinematica ed eliminare i componenti di innesto e i dispositivi di trasmissione, riduce sensibilmente la frizione tra i componenti generando di conseguenza più forza, consumi ridotti e peso inferiore.



Figura 1.4. Attuatore elettromeccanico industriale.

1.2.2. SEGMENTO ENERGIA

L'attenzione nei confronti dell'ambiente rappresenta un fattore motivante del gruppo Umbra, infatti è leader globale nella produzione di tecnologie per la generazione di elettricità e movimento ad alta efficienza energetica. I prodotti fabbricati riducono il numero di componenti utilizzati, consumano meno energia, generano più forza ed eliminano l'utilizzo di fluidi pericolosi riducendo in questo modo sia l'impatto ambientale che l'incidenza sui costi operativi, questi ultimi dovuti al continuo aumento dei costi per l'energia. Tra questi prodotti rientrano gli EMA, soprattutto quelli impiegati nella produzione di energia "green" ricavata ad esempio tramite gas compresso o dal moto delle onde dell'oceano.



Figura 1.5. Attuatore ad alta velocità di commutazione (a sinistra), generatore di potenza (a destra).

1.2.3. SEGMENTO AERONAUTICO

I prodotti ad alte prestazioni realizzati in ambito aeronautico vantano di un'ottima reputazione grazie all'efficienza dei processi di lavorazione e ai materiali utilizzati, come ad esempio il "Cronidur 30"¹³. Attraverso l'esperienza acquisita nel settore è infatti riuscita ad eliminare la corrosione, ridurre notevolmente l'usura e allungare sensibilmente la durata di vita degli articoli. L'insieme di queste caratteristiche e l'affidabilità dei componenti critici per il volo hanno permesso all'azienda di supportare con i suoi prodotti molti costruttori di aerei tra cui: Boeing, Airbus, AVIC, Alenia-Aermacchi, Dassault, Eurofighter, Mitsubishi, Panavia, Pilatus, BAe, Bombardier, Cessna, Embraer, Fokker, Gulfstream, JDA, Learjet, Lockheed.

Tra i prodotti di maggior rilievo forniti, poiché fungono da cuore meccanico per le superfici di controllo di volo primarie, secondarie e di sollevamento di alta potenza, troviamo:

- Viti a ricircolo di sfere
- Viti acme dei velivoli
- Canne di sicurezza per velivoli
- Alberi e ingranaggi di precisione per aeromobili
- EMA

Una particolare importanza riveste l'attività di ricerca e sviluppo relativa ai componenti per l'industria aerospaziale, grazie alla quale i prodotti permangono entro le tolleranze di produzione originali, anche dopo oltre un decennio di servizio, riducendo in questo modo i costi di manutenzione e di conseguenza i costi relativi al ciclo di vita del prodotto.

VITI A RICIRCOLO DI SFERE

Utilizzate per applicazioni alquanto delicate, come ad esempio l'attuazione degli ipersostentatori dell'ala e dello stabilizzatore orizzontale, sistemi di frenatura delle ruote e inversori di spinta dei motori, le viti a ricircolo di sfere devono essere in grado di supportare forti stress di carico e durare a lungo. Per soddisfare questi requisiti, per la

¹³ Acciaio inossidabile ad alto contenuto di azoto.

loro realizzazione, è stato introdotto il materiale “Cronidur 30”, combinato all’utilizzo di sfere alternate nella chiocciola (sfera caricata in nitruro di silicio e sfera oziosa in acciaio). Come risultato, la corrosione e l’usura prematura delle viti è stata praticamente eliminata.



Figura 1.6. Vite a ricircolo di sfere aerospaziale.

VITI ACME

La tecnologia presente in Umbra, le permette di produrre viti ACME di alta qualità, infatti grazie ai trattamenti termici e galvanici adottati ed agli innovativi processi di produzione implementati, è in grado di creare un prodotto capace di sostenere carichi estremamente elevati e quindi adatto ad applicazioni di inversione di spinta del motore.



Figura 1.7. Vite ACME.

ALBERI DI TRASMISSIONE

Gli alberi di trasmissione prodotti dall’azienda sono di diversa tipologia e vengono suddivisi in base al volume di carico che devono supportare:

- Basso carico
- Carico medio
- Alto carico

Questa famiglia di prodotti comprende un'ampia gamma di materiali, processi e geometrie. Il loro impiego principale risiede nei sistemi di attuazione dei controlli di volo, del carrello di atterraggio e in applicazioni per porta cargo.



Figura 1.8. Albero di trasmissione.

ATTUATORI ELETTROMECCANICI AEROSPAZIALI

La gamma dei prodotti Umbra per il settore aerospaziale si estende anche agli attuatori elettromeccanici. Un esempio è l'attuatore a staffe per il freno dell'elica che, come tutti i prodotti, presenta caratteristiche qualitative elevate e risulta essere robusto, affidabile e ad alta efficienza. La principale funzione consiste nel ridurre dinamicamente la rotazione dell'elica a velocità costante e fermarsi totalmente dopo lo spegnimento del motore, anche in condizioni di forte vento.

Un'altra tipologia di attuatore elettromeccanico è quello a corsa lunga che sfrutta l'architettura in-line. Progettato e realizzato nel rispetto dei più severi requisiti di sicurezza, è in grado di soddisfare le esigenze più particolari dei clienti.



Figura 1.9. Attuatore a staffe (a sinistra) e attuatore a corsa lunga (a destra).

1.3. SERVIZI E PROCESSI

Per garantire l'efficienza delle proprie lavorazioni e prodotti eccellenti, UmbraGroup ha internalizzato una serie di trattamenti termici e galvanici complessi. Questa strategia ha permesso all'azienda di sviluppare competenze elevate per questo tipo di processi, diventando a sua volta fornitore di un'ampia gamma di trattamenti termici-termochimici e galvanici per aziende esterne. All'interno dello stabilimento è presente infatti un intero reparto adibito ai trattamenti termici ed uno all'esecuzione di processi elettrolitici e chimici di maggior interesse sia per il settore industriale che per quello aeronautico. La qualifica NADCAP¹⁴ conseguita rispettivamente nel 2006 e nel 2007 per le due tipologie di processo, fornisce un'ulteriore prova dell'elevato standard tecnico-qualitativo del servizio svolto.

Oltre ai processi sopracitati, UmbraGroup effettua anche prove non distruttive in modo tale da garantire un servizio qualificato di verifica sia delle proprietà meccaniche che delle difettosità strutturali dei particolari.

Infine, dal 1996, l'azienda fornisce il servizio Aftermarket attraverso cui è in grado di offrire al cliente un supporto tecnico eccezionale. La strategia organizzativa è incentrata sull'adozione di una divisione avente struttura indipendente e dedicata, con lo scopo di soddisfare i sempre più brevi tempi di turn-around, garantire prezzi competitivi, e fornire prodotti e servizi di alta qualità.

¹⁴ Programma di cooperazione delle imprese operanti nel settore aeronautico. La sua funzione consiste nello standardizzare le procedure ed i requisiti di accreditamento dei fornitori, riducendo audit ridondanti e promuovendo il miglioramento continuo. Link: <https://qualitiamo.com/articoli/nadcap.html>

1.4. FILOSOFIA LEAN SIX SIGMA

La voglia di migliorarsi sempre più, per fornire dei prodotti di qualità superiore rispetto alla concorrenza, ha spinto l'azienda a ricercare e successivamente implementare soluzioni innovative sia a livello organizzativo sia produttivo, come ad esempio la filosofia Lean Six Sigma.

"In un'azienda di livello internazionale e con un processo produttivo complesso come la UmbraGroup, il ruolo del miglioramento continuo è fondamentale al fine di permettere al Gruppo di mantenere il vantaggio competitivo nei mercati in cui opera".¹⁵

Tale filosofia trae beneficio da due metodologie. Questo approccio si basa sul concetto di "Lean Production" combinato e integrato con quello della "Six Sigma".

Sostanzialmente la Lean Production pone attenzione all'ottimizzazione delle risorse nei processi produttivi in modo tale da eliminare gli sprechi, incrementando di conseguenza la velocità e aumentando l'efficienza. La Six Sigma, invece, si focalizza sulla variabilità e sulla riduzione dei difetti del processo con lo scopo di raggiungere livelli qualitativi eccellenti. Questo risultato viene raggiunto mediante l'implementazione di un programma di gestione della qualità basato sul controllo dello scarto quadratico medio del processo e tutti gli strumenti di supporto.

Dunque, attraverso l'utilizzo della Lean Six Sigma i vantaggi che ne derivano sono:

- Riduzione dei costi
- Riduzione del lead time
- Eliminazione delle fasi prive di valore aggiunto
- Riduzione di scarti e rilavorazioni
- Riduzione della variabilità dei processi
- Miglioramento continuo:
 - Dei processi
 - Dell'apprendimento dell'organizzazione

¹⁵ Cit. Valter Baldaccini, Padre Fondatore di UmbraGroup S.p.A.

CAPITOLO 2: NORMATIVE

2.1. IL SISTEMA DI GESTIONE DELLA QUALITA'

Nel corso degli anni, le dinamiche che regolano il mercato concorrenziale hanno subito dei cambiamenti radicali, passando dalla competizione sui prezzi (che punta ad offrire lo stesso prodotto della concorrenza ad un prezzo più basso, anche se di qualità leggermente inferiore, in modo tale da aggiudicarsi la fetta maggiore del mercato) alla competizione sulla qualità. Il nuovo gioco a cui partecipano le aziende ha indotto un meccanismo di sensibilizzazione all'aspetto qualitativo per cui il prodotto che presenta una qualità elevata è sostanzialmente preferibile, anche se a prezzo maggiore (con il giusto trade-off). Questo aspetto influisce sia sul cliente finale - utilizzatore del prodotto/servizio – sia su tutta la filiera produttiva, dunque è molto importante controllare e monitorare opportunamente la qualità.

Per rendere le aziende sempre più attente alla qualità dei prodotti/servizi che forniscono, l'Organizzazione Internazionale della Standardizzazione (ISO) ha pubblicato un documento contenente i requisiti necessari per sviluppare un efficace Sistema di Gestione della Qualità (SGQ)¹⁶. Lo standard a cui fanno riferimento le aziende per implementare un buon SGQ è la ISO 9001. Questa normativa è divenuta talmente importante da vincolare la presenza sul mercato delle aziende e tale da selezionare l'intera filiera produttiva, poiché la valutazione qualitativa delle aziende viene effettuata da un organismo di certificazione esterno che ha le giuste competenze per attestare la conformità delle stesse agli standard qualitativi.

Per Sistema di Gestione della Qualità si intende una serie di processi, politiche, procedure e registrazioni attraverso cui si definiscono le modalità con cui l'azienda crea e successivamente fornisce il prodotto/servizio al cliente. La ISO 9001 definisce le linee guida per un corretto sviluppo del SGQ in modo tale da non trascurare nessun aspetto. Tuttavia, è compito dell'azienda interpretare la norma per costruire un SGQ su misura, tenendo in considerazione il proprio contesto organizzativo nonché la tipologia di prodotto che fornisce.

¹⁶ I requisiti di un buon Sistema di Gestione della Qualità sono applicabili ad ogni tipologia di impresa, operante in ogni settore. Il documento, per essere pubblicato e riconosciuto a livello internazionale, è stato sottoposto a verifica e approvazione dalla maggioranza degli stati membri.

I requisiti che vertono sul SGQ fanno riferimento a:

- Contesto organizzativo
- Leadership
- Pianificazione
- Supporto
- Funzionamento
- Valutazione delle prestazioni
- Miglioramento

2.2. IAQG

L'International Aerospace Quality Group (IAQG) è un'associazione cooperativa no profit, fondata nel 1998 dai maggiori produttori mondiali operanti nel settore aeronautico. L'obiettivo del gruppo è quello di instaurare e coltivare la cooperazione tra aziende per proporre iniziative incentrate sul miglioramento continuo della qualità e sulla riduzione dei costi.

Il focus principale ricade sui processi implementati nella filiera produttiva. Una corretta gestione dei processi permette di consegnare prodotti di alta qualità, riducendo le attività che non producono valore. L'IAQG è composta da circa 50 membri rappresentativi, suddivisi in tre macro aree: America (AAQG), Europa (EAQG), Asia/Pacifico (APAQG) e rappresenta l'ente di riferimento in ambito qualitativo preposto a stabilire, in collaborazione con agenzie governative, standard e requisiti a cui tutti devono attenersi per operare in questo settore.

Si incontra periodicamente per promuovere nuove iniziative o risolvere i problemi riscontrati. Il coinvolgimento dei leader del settore rappresenta un forte incentivo al miglioramento.

2.2.1. AS/EN 9100

La normativa che regola il sistema di gestione di qualità nel settore aerospaziale è la AS/EN 9100¹⁷, che acquisisce una determinata nomenclatura (AS o EN) in base al continente considerato, rispettivamente America o Europa. Essa si basa sui requisiti della ISO 9001, integrandoli ed adattandoli in riferimento alla specificità del settore. In particolare, è importante tenere in considerazione aspetti qualitativi più restrittivi nel settore aeronautico, in grado di garantire elevata sicurezza, affidabilità e manutenibilità, conformi alle specifiche civili e militari imposte.

La normativa standardizza il sistema di gestione della qualità nelle aziende aerospaziali mondiali. In tal modo, le organizzazioni vengono guidate nel perseguire e soddisfare i requisiti stabiliti dalle autorità di controllo, adottando metodologie approvate e riconosciute a livello internazionale. È importante sottolineare che lo strumento di sorveglianza è rivolto a tutta la catena di fornitura, in modo tale da garantire qualità e sicurezza in tutto il ciclo produttivo.

I benefici derivanti dall'adozione dello standard sono:

- Capacità di fornire costantemente prodotti, servizi e processi che soddisfino i requisiti legali e normativi applicabili
- Migliorare la soddisfazione del cliente
- Dimostrare la conformità ai requisiti specifici del sistema di gestione della qualità

¹⁷ AS/EN 9100:2016, *Quality Management Systems - Requirements for Aviation, Space and Defense Organizations*.

2.2.2. AS/EN 9102

La norma AS/EN 9102¹⁸ standardizza la documentazione relativa al First Article Inspection (FAI) per la verifica dei prodotti aeronautici, spaziali e della difesa. Una buona pianificazione ed esecuzione del FAI fornisce un'evidenza che il processo produttivo è in grado di produrre prodotti conformi ai requisiti ingegneristici e di progetto.

Il FAI rappresenta un processo di ispezione pianificata, completa, indipendente e documentata, finalizzata a garantire che i processi di produzione prescritti abbiano prodotto un articolo conforme alle specifiche tecniche.

Quindi il FAI deve:

- Garantire che i processi di realizzazione del prodotto siano in grado di produrre una parte conforme
- Dimostrare che i produttori abbiano compreso i requisiti richiesti
- Ridurre i potenziali rischi associati all'avvio della produzione e/o modifiche del processo
- Garantire la conformità del prodotto all'inizio della produzione e dopo le modifiche del processo produttivo delineate dalla AS/EN9102
- Ridurre i costi totali
- Garantire la sicurezza delle parti in volo
- Migliorare la qualità e la soddisfazione del cliente
- Ridurre i ritardi di produzione associati alle non conformità del prodotto
- Ridurre le non conformità di prodotto
- Identificare i processi che non sono in grado di produrre un prodotto conforme e avviare e/o convalidare azioni correttive

¹⁸ AS/EN 9102:2015, *Aerospace First Article Inspection Requirement*.

CAPITOLO 3: MERCATO AERONAUTICO

3.1. PREVISIONI CRESCITA SETTORE AERONAUTICO

Nel corso degli anni i produttori di velivoli, guidati da un'incessante globalizzazione e dalla necessità dell'essere umano di voler connettersi ed interfacciarsi sempre più con il mondo intero nella maniera più rapida possibile, hanno incrementato sensibilmente la produzione.

Esaminando gli ultimi 40 anni di storia dell'aviazione è possibile osservare che il traffico aereo risulta essere resiliente a shock economici e geopolitici.

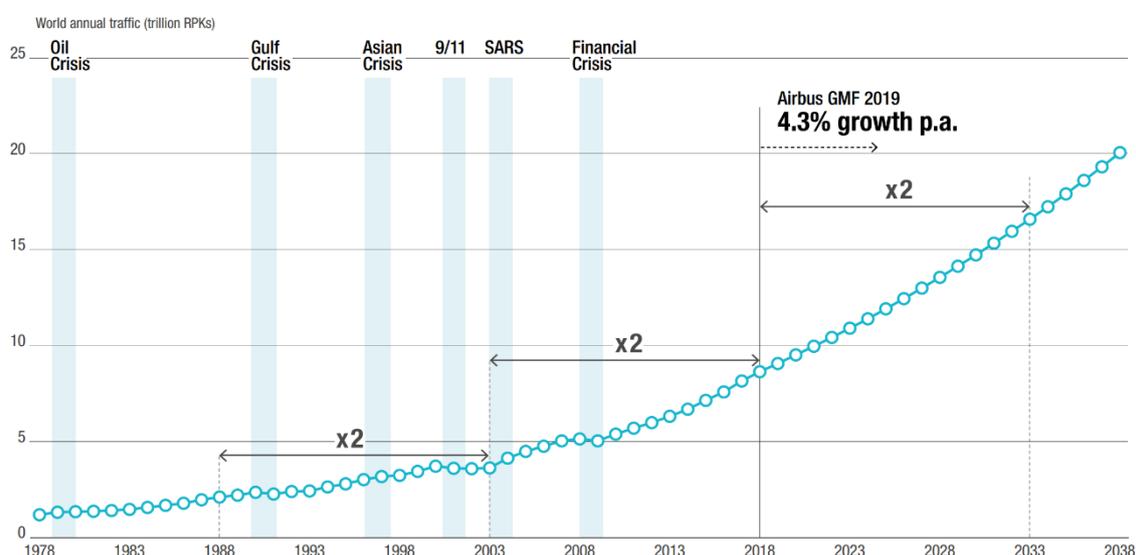


Figura 3.1. Trend traffico aereo (fonte: Airbus).

Come si evince dal grafico, il traffico aereo ha avuto un trend crescente, nonostante si siano verificati eventi che hanno minacciato l'equilibrio economico mondiale. In corrispondenza di questi eventi si ha solamente una stabilizzazione dell'intensità di traffico aereo che, nel lungo periodo, è comunque raddoppiato ogni 15 anni circa. I dati forniscono una previsione dei prossimi 20 anni più che favorevole per il settore, in cui si assisterà ad una continua crescita della domanda.

Questo effetto si rifletterà di conseguenza anche sulla produzione di velivoli.

Secondo recenti studi, infatti, nei prossimi venti anni è stato stimato un incremento del fabbisogno di velivoli per il trasporto aereo di passeggeri e di merci che passerà da

23000 a circa 48000 aeroplani. Le previsioni mostrano una panoramica di un mercato in forte espansione, con una crescita annua prevista del 4,3% nel settore¹⁹. Le cause di questo aumento di fabbisogno sono da ricercare nella continua crescita del turismo, nella disponibilità di nuove rotte, nei nuovi modelli di business sviluppati dalle compagnie aeree e nella liberalizzazione del settore. La crescente domanda di velivoli è condizionata non solo dai fattori appena citati, ma anche dalla necessità di ritirare gli aerei ormai obsoleti che hanno concluso il loro ciclo di vita. Un aereo è considerato obsoleto quando il costo sostenuto per mantenerlo in funzione eccede il profitto che potrebbe generare. Mediamente il ciclo di vita di un aereo varia tra i venti e i trenta anni. Inoltre, la continua innovazione tecnologica permette di sviluppare prodotti sempre più efficienti dal punto di vista dei consumi, della capacità di carico, nonché conformi alle restrittive politiche ambientali, cosa che gli aerei datati ma ancora in grado di esercitare non soddisfano.

Secondo le stime, circa il 40% dei nuovi aerei sarà necessario per rimpiazzare quelli “in pensionamento”.

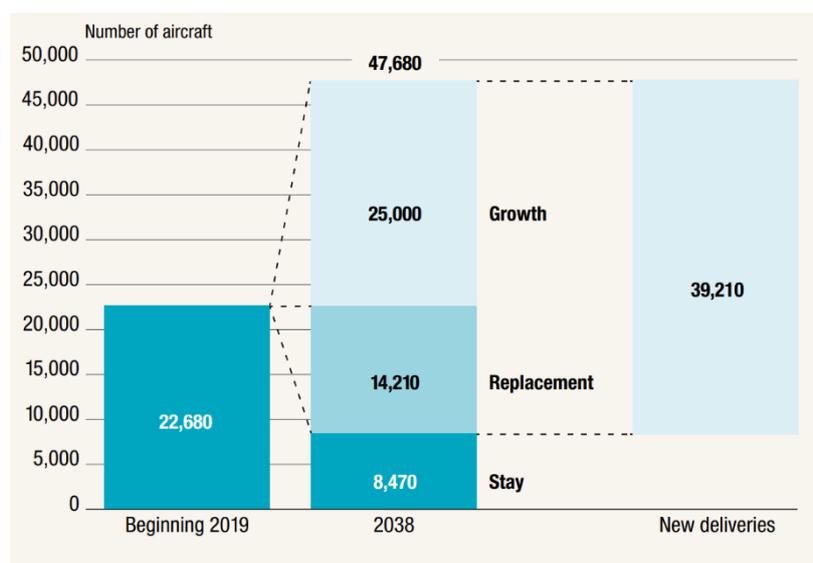


Figura 3.2. Previsione produzione di velivoli (fonte: Airbus).

Gli effetti descritti si manifesteranno con maggiore incidenza nella regione Asia-Pacifico, a cui è associato circa il 40% dei nuovi aeromobili (di cui il 19% solo per la Cina). Le dinamiche che guidano questa crescita di domanda sono intrinseche nello sviluppo economico del paese, infatti la regione Asia-Pacifico rappresenta una delle

¹⁹ Global Market Forecast, *Cities, Airports & Aircraft, 2019-2038*, Airbus.

principali economie in rapida crescita del mondo. La Cina, in particolare, ha avuto un tasso di crescita medio di oltre il 7% negli ultimi 10 anni, contribuendo ad estendere il ceto sociale medio e di conseguenza anche la propensione al consumo e agli spostamenti tramite mezzi di trasporto via aria.

Seguiranno Nord America ed Europa, entrambe con circa il 20% di nuovi velivoli, Medio Oriente (7%), America Latina (6,7%), Russia e Asia Centrale (3%) e Africa (2,6%).

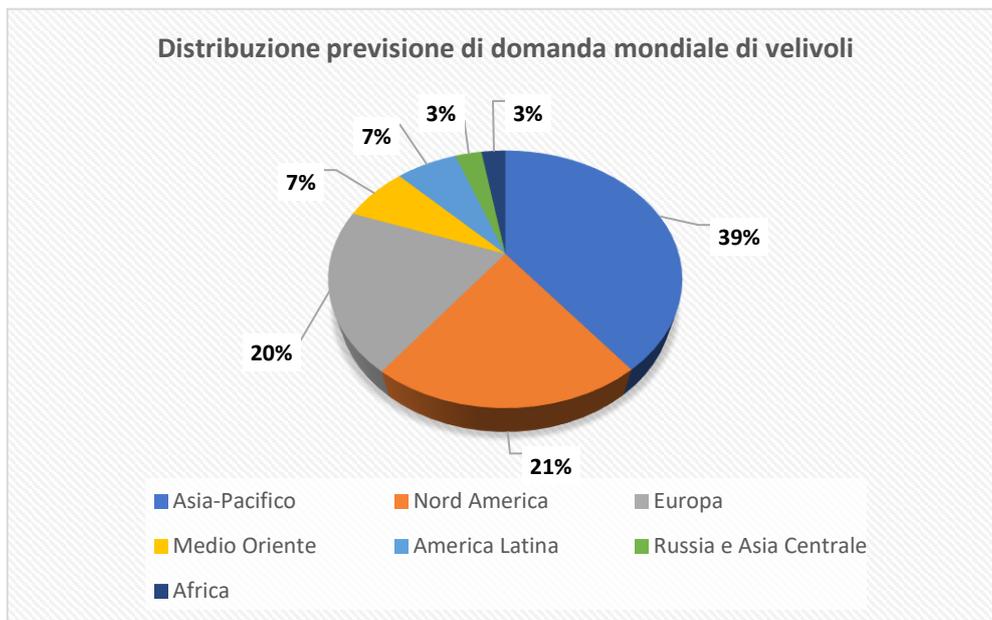


Figura 3.3. Previsione della distribuzione della domanda mondiale di nuovi velivoli (fonte: Airbus).

3.2. EFFETTO COVID-19 SULL'ANALISI

Purtroppo, ad oggi stiamo sperimentando sulla nostra pelle un evento drammatico, dalle ingenti conseguenze sociali ed economiche, che non è stato possibile prevedere nell'analisi e che sta condizionando in maniera aggressiva l'intero assetto economico mondiale. Durante lo svolgimento del presente lavoro di tesi, il mondo intero è entrato "in guerra" contro un nemico invisibile. L'emergenza globale dovuta alla comparsa del Covid-19 avrà un impatto significativo sul settore e si sta assistendo ad una netta diminuzione del traffico aereo a seguito delle disposizioni emanate dai governi mondiali. La limitazione delle tratte, la cancellazione dei voli e l'impossibilità di effettuare spostamenti sia a lungo che a corto raggio è sinonimo di una strategia indispensabile per evitare una propagazione inarrestabile del contagio. Non è possibile prevedere con esattezza quando si manifesterà un segnale di ripresa, ma dai dati storici pervenuti è possibile ipotizzare che nel lungo periodo ci sarà comunque un aumento della domanda. Tuttavia, è anche vero che una crisi generalizzata di questa entità non si è mai manifestata. Le epidemie infettive e virali che si sono diffuse nei recenti anni, sono state in linea di massima concentrate in determinate aree geografiche. Basti pensare alla SARS, che nei primi anni duemila si diffuse maggiormente nel sud est asiatico, colpendo solo in minima parte gli altri continenti i quali, con giuste misure preventive, riuscirono a debellare in pochissimo tempo il virus. Oppure alla diffusione dell'Ebola nel triennio tra il 2013 ed il 2016 circa, che ebbe una concentrazione predominante solo in alcuni stati dell'Africa occidentale. Il COVID-19 invece, anche se meno letale, ha una capacità di propagazione più elevata ed in poco tempo si è diffuso praticamente in tutto il globo. Le misure adottate per il contenimento del virus hanno un impatto enorme sull'attività economica mondiale, per cui è lecito aspettarsi una crisi generalizzata che graverà sulle Nazioni per un periodo di tempo più o meno lungo, ancora difficile da quantificare.

Alcuni studiosi hanno cercato di analizzare oggettivamente la situazione e dare un senso a tutto ciò che sta accadendo. Partendo dall'analisi del tasso di mortalità del virus, si stima che il numero di contagiati sia almeno 10 volte superiore rispetto ai dati ufficiali, i quali fanno riferimento solo alle persone sottoposte ai controlli con il tampone. Dunque, i numeri che vediamo rappresentano solo la punta dell'iceberg, per cui si stima che in realtà la letalità del virus sia dell'ordine dell'1% circa.

Le vere problematiche che ci trascineremo negli anni non saranno riferite alla mortalità del virus, ma riguarderanno la messa in crisi del settore sanitario e in particolar modo l'economia dei Paesi.

A livello economico, infatti, siamo entrati probabilmente nella recessione più grande degli ultimi 100 anni. Le cause di tale recessione sono dovute alla completa sospensione del sistema produttivo per cercare di limitare il contagio. Tale decisione ha portato alla perdita di posti di lavoro, che a sua volta ha ridotto la capacità economica delle famiglie le quali hanno una minore propensione al consumo. La minor capacità di spesa, insieme alla sensazione di incertezza, ha scoraggiato anche gli investimenti, per cui risulta ancora più difficoltoso far girare l'economia.

Per capire l'entità della recessione, gli studiosi hanno individuato 3 forme di recessione:

- *Forma a "V"*: dopo una caduta improvvisa della ricchezza vi è un'altrettanta improvvisa ripresa della crescita. Questo tipo di recessione ha caratterizzato gli ultimi 300 anni di storia
- *Forma a "U"*: dopo la caduta, si assiste ad una ripresa molto più lenta e la crescita non sarà la stessa di prima
- *Forma a "L"*: la caduta è continua e non sarà possibile riprendere la crescita. È l'esempio della Grecia

È importante considerare che ogni nazione potrebbe avere una forma di recessione diversa. La Cina, ad esempio, potrebbe avere una forma di recessione a "V" e quindi riprendersi abbastanza velocemente. Per quanto riguarda l'Italia, invece, gli esperti hanno ipotizzato un tipo di recessione a "U"²⁰. Questo perché si stima una sostanziale caduta del PIL ed un aumento del debito pubblico dovuto all'immissione di moneta nel sistema. Il debito pubblico impatta su tutta la popolazione che inevitabilmente avrà una minor capacità di spesa. Molte imprese che non saranno in grado di gestire la situazione subiranno danni strutturali significativi difficili da ripristinare e, nel peggiore dei casi, il fallimento sarà l'unica via percorribile.

Le aziende sono poste di fronte ad un cambiamento, per cui l'unica soluzione per sopravvivere è quella di comprendere come sono mutate le esigenze dei clienti e cercare di adattarsi. Questo evento ha trasformato completamente le abitudini delle persone:

²⁰ Il Sole 24 ore, *Che ripresa sarà quando il Covid-19 sarà un ricordo?*

vivere a distanza ha avuto un forte impatto nello sviluppo del digitale (ad esempio le piattaforme per lo smart-working). Dunque, alcuni settori potrebbero esplodere, mentre altri potrebbero andare in recessione profonda. È necessario re-inventarsi per non soccombere.

In conclusione, la ripresa economica ci sarà, ma molto probabilmente sarà lenta e ci vorrà del tempo per tornare ai livelli di prima poiché l'impatto è significativo.

3.3. DALLA AS/EN 9102 ALLA AS/EN 9145

Dalle considerazioni effettuate, molto probabilmente nei prossimi anni sarà possibile assistere al ritorno delle condizioni antecedenti la comparsa del virus, e le previsioni della domanda di velivoli si presume resteranno pressoché invariate, a meno di una dilatazione dei tempi.

Sotto tali condizioni, l'approccio attualmente adottato per lo sviluppo di nuovi prodotti nel settore aeronautico, ai livelli richiesti dal mercato, non risulta essere soddisfacente. In pratica, ciò che acquisirà un'importanza fondamentale sarà: la rapidità di risposta alle esigenze del cliente, il rispetto dei requisiti di sicurezza e di qualità imposti dalle autorità competenti e/o dal cliente, e una capacità produttiva in grado di soddisfare la continua crescita della domanda analizzata precedentemente. Il tutto deve essere effettuato minimizzando il più possibile gli scarti di produzione e le rilavorazioni, in quanto genererebbero:

- Slittamento dei tempi di consegna che potrebbero propagarsi lungo tutta la filiera produttiva
- Costi aggiuntivi

Inoltre, la complessità dei prodotti adottati nel settore aeronautico fa presumere che ci sia un'elevata probabilità di riscontrare fallimenti, soprattutto nello sviluppo di un nuovo prodotto innovativo.

Per far fronte alle esigenze appena citate, è stato analizzato il settore dell'*automotive* che da tempo sfrutta le metodologie APQP e PPAP, basate sui principi e delle tecniche strutturate in grado di permettere ai costruttori di sviluppare nuovi prodotti in tempi ristretti, rispettando il budget a disposizione e garantendo la soddisfazione del cliente.

Prendendo come riferimento l'*automotive*, il team dell'IAQG ha realizzato nel 2016 uno standard normativo chiamato AS 9145 in cui vengono ripresi i concetti dell'APQP e PPAP, adattandoli al settore aeronautico che è caratterizzato da:

- Bassi volumi
- Lunghi cicli di vita dei prodotti
- Alto grado di regolamentazione

Storicamente, per verificare la conformità di un prodotto aeronautico, si è fatto affidamento sul First Article Inspection (FAI). Con la metodologia APQP, il FAI viene incorporato nel pacchetto PPAP e viene esteso il concetto di conformità anche alla capacità produttiva. Questo risultato viene raggiunto grazie alla verifica del componente effettuata sulla produzione pianificata al tasso di domanda richiesto dal cliente.

CAPITOLO 4: AS/EN 9145

4.1. INTRODUZIONE ALL'APQP

Lo standard AS 9145 definisce i requisiti necessari per implementare un buon processo APQP²¹, applicabili a tutti i livelli della catena di fornitura.

L'APQP è un metodo strutturato finalizzato ad assicurare che il processo di sviluppo del prodotto, implementato dall'organizzazione, sia totalmente integrato. Vengono sincronizzati i processi che vanno dalla concezione del prodotto e la sua progettazione, fino alla produzione, all'utilizzo del prodotto, ai servizi post consegna e ai feedback del cliente.

Sostanzialmente guida nell'implementazione del piano di qualità necessario a garantire la soddisfazione del cliente e supporta l'identificazione precoce dei possibili cambiamenti, sia intenzionali che accidentali, relativi al nuovo prodotto o processo da sviluppare.

²¹ Altri dettagli possono essere reperiti su: *International Aerospace Quality Group, Supply Chain Management Handbook*. Link: www.sae.org/scmh

4.1.1. OBIETTIVI

Gli obiettivi alla base dell'implementazione del processo APQP sono:

- Assicurare un avvio di produzione affidabile rispettando:
 - Livelli qualitativi richiesti
 - Tasso di domanda richiesto dal cliente
- Utilizzare approccio di project management per una consegna puntuale del prodotto, monitorando le *key deliverables* del progetto
- Servirsi di un team cross-funzionale per una maggiore comunicazione
- Promuovere una mentalità proattiva
- Mantenere il processo sotto controllo
- Miglioramento continuo dei processi
- Riduzione dei costi attraverso:
 - Strumenti di prevenzione per la riduzione del rischio
 - Precoce raggiungimento della maturità del prodotto
 - Costruzione di basi solide per efficaci implementazioni di cambiamenti
 - Riduzione dei costi generali inerenti al ciclo di vita del prodotto

4.1.2. VANTAGGI

I principali vantaggi derivanti dall'applicazione della metodologia sono:

- Dirigere le risorse focalizzando l'attenzione su una selezione di elementi ritenuti vitali
- Incentivare l'identificazione precoce di cambiamenti intenzionali (utile per apportare maggior valore per il cliente) e accidentali
- Evitare cambiamenti tardivi anticipando e prevenendo le cause di fallimento garantendo poche modifiche di progetto e di processo durante lo sviluppo del processo produttivo
- Fornire un prodotto di qualità in tempo e ad un costo inferiore
- Possibilità di individuare diverse azioni per la riduzione dei rischi poiché analizzati anticipatamente
- Maggiore possibilità di validazione e approvazione di un cambiamento
- Migliore collaborazione tra progettazione del prodotto e processo da implementare
- Identificazione anticipata della soluzione che presenta il costo più basso
- Creazione ed utilizzo di lavori standard efficaci

Il processo APQP è composto da cinque fasi, ognuna delle quali è definita dagli elementi contenuti in essa. A loro volta ciascuno di questi elementi definisce attività da svolgere e *deliverables*, molti dei quali diventano un'evidenza nel pacchetto PPAP.

Per questo motivo il PPAP viene considerato un output dell'APQP e la sua funzione consiste nel dimostrare che il processo produttivo ha il potenziale di produrre componenti in grado di soddisfare a pieno i requisiti del cliente al tasso di produzione richiesto.

Lo scopo del PPAP è dunque quello di analizzare tutti i requisiti inerenti sia al prodotto che al progetto e determinare se il processo produttivo del fornitore è in grado di mantenere questi requisiti in una produzione di serie. È composto da una serie di documenti che fanno capo ad un unico modulo denominato "*PPAP Approval Form*" il quale viene consegnato dal fornitore al cliente insieme a tutta la documentazione e alla campionatura del prodotto. Il cliente, ricevuto il documento, fa tutte le verifiche necessarie per valutare il raggiungimento o meno degli obiettivi.

4.2. PRODUCT PART APPROVAL PROCESS (PPAP)

Di seguito vengono analizzati gli elementi che costituiscono il PPAP in modo da riuscire a comprendere meglio la loro collocazione all'interno del processo APQP.

Lo standard AS 9145 suddivide il PPAP in 11 punti chiave. Tuttavia, ciò non esclude che il cliente possa richiedere degli elementi aggiuntivi a seconda delle proprie esigenze.

Lo standard definisce:

1. Documenti di progettazione
2. Analisi dei rischi di progettazione (DRA)
3. Diagramma di flusso del processo
4. Process Failure Mode & Effect Analysis (PFMEA)
5. Piano di controllo
6. Measurement System Analysis (MSA)
7. Studio iniziale della capacità del processo
8. Approvazione imballaggio, conservazione ed identificazione
9. First Article Inspection Report (FAIR)
10. Requisiti specifici del cliente
11. PPAP approval form

È importante sottolineare che la responsabilità dello sviluppo degli elementi del PPAP ricade solo su quelli che fanno riferimento al business dell'organizzazione. Ad esempio, se l'azienda non ha alcuna autorità sulla progettazione, essa non sarà responsabile dell'analisi dei rischi di progettazione.

4.2.1. DOCUMENTI DI PROGETTAZIONE

La documentazione inerente alla progettazione deve essere redatta ogni qual volta venga progettato o riprogettato un prodotto. Lo scopo è quello di verificare che il fornitore abbia svolto la progettazione del componente e del processo come concordato con il cliente e nel rispetto dei requisiti imposti dall'organo governativo.

Essa deve contenere:

- Dati CAD/CAM
- Disegni del prodotto
- Specifiche
- Lista di tutti i requisiti e caratteristiche

4.2.2 ANALISI DEI RISCHI DI PROGETTAZIONE (DRA)

L'analisi viene effettuata dal responsabile alla progettazione il quale, attraverso tecniche analitiche, cerca di identificare i potenziali rischi legati alla performance del prodotto, alla sua durata, alla producibilità e ai costi associati. L'obiettivo di tale attività consiste nel documentare i rischi, indicando le attenuazioni necessarie, le azioni intraprese ed i risultati ottenuti. Inoltre, funge da supporto nell'identificazione dei *Critical Items* (CI's)²² e delle *Key Characteristics* (KC's)²³ del prodotto, rappresentando un input della DFMEA spiegata di seguito.

²² Elementi che hanno un significativo impatto sulla realizzazione del prodotto, sulla sicurezza dello stesso, e che richiedono azioni specifiche affinché vengano trattati adeguatamente.

²³ Caratteristiche del materiale o del prodotto la cui variazione deve essere opportunamente controllata, poiché una loro piccola variazione ha un'influenza significativa su performance, vita utile, realizzazione e adattamento del componente.

4.2.3. DESIGN FAILURE MODE & EFFECT ANALYSIS (DFMEA)

La DFMEA è uno strumento che utilizza un approccio strutturato al fine di identificare e successivamente stabilire l'ordine di priorità dei potenziali rischi che possono manifestarsi durante lo sviluppo di un nuovo prodotto o di un cambiamento ad esso associato. Attraverso questo metodo vengono determinate le possibili modalità di fallimento relative alla fase di progettazione, ne vengono imputati gli effetti, dopodiché viene assegnato un ordine di priorità alle azioni da intraprendere basandosi su:

- Frequenza di accadimento
- Impatto
- Facilità di individuazione

Il processo appena descritto non è fine a sé stesso, in quanto segue l'intero ciclo di vita del prodotto ed è opportuno aggiornare continuamente le informazioni contenute nella DFMEA, poiché saranno utili nel successivo ciclo di sviluppo del prodotto.

4.2.4. DIAGRAMMA DI FLUSSO DEL PROCESSO

Una volta rilasciata la versione preliminare del progetto, bisogna focalizzarsi sul processo che renderà possibile la realizzazione del prodotto. Il diagramma di flusso del processo è una rappresentazione grafica della sequenza di operazioni e attività inerenti al processo da sviluppare.

La sua funzione è quella di:

- Facilitare la visione complessiva del processo
- Mostrare i collegamenti tra le singole attività
- Evidenziare input e output di ogni fase del processo
- Individuare le attività non direttamente connesse al processo produttivo (misurazioni, ispezioni, movimentazioni)
- Distinguere le rilavorazioni pianificate da quelle non pianificate
- Fornire supporto nell'identificazione delle risorse necessarie

4.2.5. PROCESS FAILURE MODE & EFFECT ANALYSIS (PFMEA)

Come effettuato nella fase di progettazione del prodotto, in cui è stato stilato il documento DFMEA, anche per lo sviluppo del processo viene adottato un metodo strutturato per l'identificazione delle possibili modalità di fallimento e il loro impatto sul processo in esame. In particolare, facendo riferimento al processo produttivo, vengono analizzate e descritte le possibili non conformità ai requisiti del prodotto che potrebbero generarsi, cercando di determinare le cause radici e le conseguenze che ne scaturiscono.

È statisticamente impossibile cercare di individuare ed eliminare completamente tutte le modalità di fallimento, poiché richiederebbe un impiego illimitato di risorse, una conoscenza assoluta di ciò che potrebbe accadere (altamente improbabile), nonché risulterebbe economicamente insostenibile. Per questo motivo viene assegnato un ordine di priorità alle *failure mode* caratterizzandole in base a:

- Frequenza di accadimento
- Impatto
- Facilità di individuazione

In questo modo è possibile concentrarsi prima di tutto sugli elementi prioritari, cercando di individuarne le cause radici e implementando un piano di azione preventivo per eliminare o ridurre la manifestazione delle *failure mode* considerate.

La PFMEA rappresenta anche uno strumento incentivante per il miglioramento continuo, dato che può essere vista come un incubatore di esperienze grazie al quale è possibile imparare dagli errori commessi²⁴.

²⁴ Per sviluppare una PFMEA quanto più completa e robusta possibile è necessario il coinvolgimento di un team cross-funzionale.

4.2.6. PIANO DI CONTROLLO

Il piano di controllo lega le fasi del processo produttivo all'attività ispettiva e di controllo. L'intento è quello di controllare, attraverso metodi di misurazione, strumenti e procedure, il rispetto delle caratteristiche di progetto, nonché di valutare la variabilità del processo affinché venga assicurata la qualità richiesta del prodotto.

Attraverso il piano di controllo è possibile:

- Monitorare le *Key Characteristics* (KC's) ed i *Critical Items* (CI's) definiti sia dal cliente che dall'organizzazione
- Gestire al meglio il processo per ridurre la variabilità delle caratteristiche del prodotto in uscita
- Definire le azioni da intraprendere in situazioni di fuori controllo ed assicurare il mantenimento dei miglioramenti apportati durante l'intero ciclo di vita del prodotto

4.2.7. MEASUREMENT SYSTEM ANALYSIS (MSA)

L'analisi del sistema di misura viene utilizzata per comprendere il grado di precisione e accuratezza delle misure effettuate sui componenti a monte, a valle e in corrispondenza delle fasi di ispezione del processo produttivo. Essa viene eseguita utilizzando strumenti statistico-matematici finalizzati a quantificare la variabilità del processo di misurazione che, a sua volta, influenza anche la variabilità complessiva del processo di produzione.

I dati raccolti durante il processo di misurazione vengono utilizzati per prendere decisioni sul processo produttivo ed è fondamentale che siano quanto più accurati possibile. Un sistema di misura inefficiente e non calibrato alla perfezione conduce ad una raccolta di dati distorti e contribuirebbe alla manifestazione di errori di prima specie (rifiutare parti in realtà buone) e di seconda specie (accettare parti in realtà non conformi), alterando gli interventi correttivi da attuare per migliorare il processo.

4.2.8. STUDIO INIZIALE DELLA CAPACITÀ DEL PROCESSO

Durante il primo avvio di produzione al tasso produttivo concordato con il cliente, viene effettuato il primo studio effettivo relativo alla capacità del processo a regime.

Lo studio consiste nell'analisi dei risultati ottenuti nelle attività svolte nel piano di controllo, relativi sia all'aspetto dimensionale del prodotto sia alle *Key Characteristics* del processo individuate.

Attraverso questa analisi è possibile determinare se l'insieme delle metodologie, macchine, risorse, materiali e strumenti di misura utilizzati, ha il potenziale di fornire un prodotto che soddisfa costantemente i requisiti di progetto.

Per dare una valutazione oggettiva sul comportamento del processo viene utilizzato l'indice di capacità del processo definito come segue (*Douglas C. Montgomery, 6th Edition*):

$$C_{pk} = \min(C_{pi} ; C_{ps})$$

Esplicitando i termini fra parentesi:

$$C_{pi} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}$$

$$C_{ps} = \frac{USL - \mu}{3\sigma}$$

Con μ media del processo, LSL e USL limiti di specifica inferiore e superiore, σ deviazione standard del processo.

C_{pi} e C_{ps} rappresentano dunque una misura degli indici di capacità del processo relativi rispettivamente al limite di specifica inferiore e superiore.

A denominatore compare 3σ poiché si assume che il processo segue una distribuzione normale $N \sim (\mu, \sigma)$ e presenta una tolleranza naturale $TN = \pm 3\sigma$ in cui sono contenuti il 99,73% dei valori.

Attraverso l'indice C_{pk} , applicato ad ogni caratteristica qualitativa da valutare, è possibile fare delle considerazioni sulla centratura del processo in quanto tiene conto della posizione effettiva di μ rispetto ai limiti di specifica. Più l'indice restituisce un

valore elevato, più il processo si comporta bene, riducendo la probabilità di produrre dei pezzi fuori specifica.

Il valore di riferimento che soddisfa il criterio di accettazione risulta essere in generale $C_{pk} \geq 1,33$ ma questo valore potrebbe variare a seconda delle esigenze del cliente.

4.2.9. APPROVAZIONE IMBALLAGGIO, CONSERVAZIONE ED IDENTIFICAZIONE

Tra gli elementi contenuti nel PPAP viene presa in considerazione anche la validazione del processo di consegna, attraverso la richiesta di approvazione delle attività ad esso inerenti.

Lo scopo è quello di assicurare sia che il prodotto o il materiale da consegnare non presenti danni strutturali scaturiti da una scorretta conservazione, sia che l'attività di imballaggio ed impacchettamento sia stata eseguita correttamente e manterrà le stesse prestazioni durante il trasporto, la consegna e lo stoccaggio.

4.2.10. FIRST ARTICLE INSPECTION REPORT (FAIR)

Il FAI, come discusso nel capitolo §2 relativo alle normative, è un processo di ispezione completa ed indipendente volto a verificare che il processo produttivo ha realizzato un pezzo conforme alle specifiche ingegneristiche, ai disegni, all'ordine di acquisto e ad ogni altro documento di progetto.

Lo scopo del FAI è di fornire un'evidenza pragmatica, basata sulla valutazione del primo articolo prodotto durante l'avvio della produzione, che tutti i requisiti sono stati compresi in maniera chiara dall'organizzazione, verificati e documentati.

È bene ricordare che il FAI è un elemento del PPAP ma potrebbe essere approvato prima della consegna del suddetto. Inoltre, è opportuno specificare che il FAI è un documento che attesta la conformità ai requisiti di progetto del primo pezzo prodotto, mentre tramite il PPAP si ha una validazione del processo produttivo anche in termini di capacità e ripetibilità del processo, garantendo il corretto avvio di una produzione futura.

4.2.11. REQUISITI SPECIFICI DEL CLIENTE

Potrebbe accadere che, nel commissionare un determinato lavoro, il cliente abbia la necessità di specificare altri elementi non inclusi in quelli richiesti dallo standard aeronautico AS 9145. In queste circostanze è opportuno identificare i requisiti aggiuntivi durante la fase di *project-planning*, definendo le tempistiche e le appropriate funzioni organizzative coinvolte.

Il documento “requisiti specifici del cliente” è parte integrante del pacchetto PPAP e certifica il rispetto dei requisiti aggiuntivi richiesti secondo le modalità definite dal cliente.

4.2.12. PPAP APPROVAL FORM

Una volta completati gli elementi del PPAP, le informazioni vengono sintetizzate in un unico documento ed inviato, insieme al pacchetto PPAP, al cliente. Il *PPAP Approval Form* contiene, oltre alle informazioni identificative di prodotto, disegno e ordine di produzione, una checklist dei punti sviluppati dall’organizzazione sui quali il cliente effettuerà le proprie valutazioni e stabilirà il proprio grado di soddisfazione, con relativi commenti, accettando o meno i singoli elementi.

Fatte le dovute considerazioni, il cliente ha la facoltà di scegliere tra 3 stati di approvazione:

- Approvazione completa
- Approvazione provvisoria
- Rifiutato

Approvazione completa

Il prodotto e la relativa documentazione soddisfano tutti i requisiti ed il fornitore ha l’autorizzazione per fornire il prodotto.

Approvazione provvisoria

Lo stato di approvazione provvisoria si verifica nel caso in cui:

- Non tutti i requisiti del cliente risultano soddisfatti
- Le cause principali di non conformità ai requisiti è stata individuata dal fornitore, il quale ha predisposto un piano d'azione provvisorio a sua volta approvato dal cliente
- Il cliente potrebbe accettare la fornitura per uno specifico lasso di tempo o in quantità diversa da quella concordata
- È richiesta un'integrazione degli elementi che risultano essere incompleti

Rifiutato

Lo stato di rifiuto implica che il prodotto e la relativa documentazione non soddisfano le aspettative del cliente, per cui il fornitore non è autorizzato a spedire il prodotto e deve inviare un nuovo PPAP al cliente, contenente gli elementi mancanti o incongruenti.

4.3. ADVANCED PRODUCT QUALITY PLANNING (APQP)

Spiegati gli elementi caratterizzanti della documentazione PPAP, di seguito viene analizzato nel dettaglio il processo APQP relativo allo standard AS/EN 9145.

4.3.1. I PILASTRI DELL'APQP

Il processo APQP non è semplice da implementare, richiede impegno, organizzazione e capacità di adattamento da parte di tutti gli attori coinvolti. Esso si fonda su dei concetti base in assenza dei quali sarebbe impossibile raggiungere i risultati sperati.

Questi concetti assumono infatti la denominazione di “pilastri”, per meglio rendere l’idea che, la mancanza di anche solo uno di essi, farebbe collassare l’intera struttura.

I pilastri del processo APQP sono:

- Impegno organizzativo e supporto del Management
- Team cross-funzionale
- Pianificazione efficace

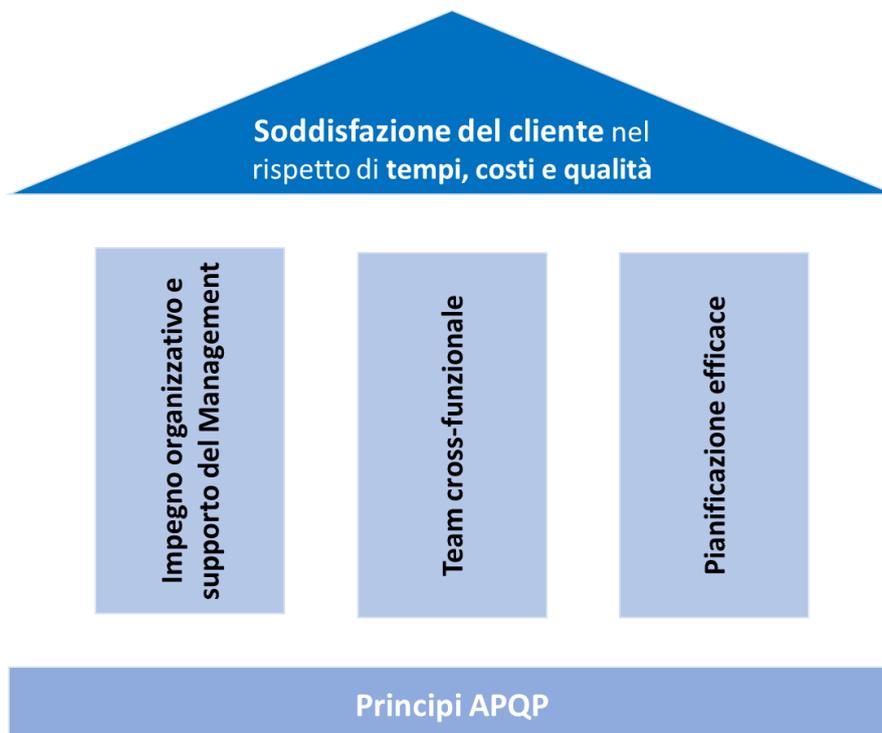


Figura 4.1 Pilastri dell'APQP (fonte: ASQ, Quality Progress).

IMPEGNO ORGANIZZATIVO E SUPPORTO DEL MANAGEMENT

Per implementare un buon processo APQP è indispensabile l'impegno del top management, il quale ha il compito di assicurarsi che:

- Tutti gli attori coinvolti predispongano di una formazione adeguata
- Le risorse siano correttamente allocate
- Il programma venga rispettato

Il supporto del management guida l'organizzazione al raggiungimento degli obiettivi nel rispetto di: tempi, budget e livello qualitativo.

TEAM CROSS FUNZIONALE

La costituzione di un team cross-funzionale funge da mezzo di comunicazione tra le diverse funzioni organizzative ed incentiva la predisposizione ad impegnarsi per un obiettivo comune, consentendo un più rapido sviluppo del prodotto.

PIANIFICAZIONE DI PROGETTO EFFICACE

Compresi i bisogni del cliente è importante sviluppare un *project plan* efficace a cui fare riferimento. Bisogna programmare le attività, assegnare le responsabilità ed effettuare un monitoraggio continuo al fine di completare in tempo il progetto.

4.3.2. LE FASI DELL' APQP

Come accennato precedentemente, l'APQP è composto da 5 fasi interconnesse che coprono l'intero ciclo di vita del prodotto, dalla sua concezione ai servizi post consegna.

La parola "fase" non deve essere interpretata come un susseguirsi di attività che iniziano e finiscono seguendo una sequenza temporale predefinita, bensì come identificativo di una determinata parte del processo APQP, in quanto attività appartenenti a fasi diverse hanno la necessità di essere sviluppate in concomitanza, scambiando informazioni e cercando di essere quanto più integrate possibili.

Durante lo sviluppo dell'APQP vengono generate una serie di attività che forniranno *deliverables* ed *outputs*, guidando l'organizzazione al raggiungimento delle *milestones* e dell'obiettivo finale.

Prima di spiegare come sono strutturate le varie fasi del processo APQP, è opportuno specificare le differenze tra *deliverables*, *outputs* e *milestones*.

Deliverable: Prodotto o servizio tangibile, misurabile e specifico che viene fornito al cliente. Il cliente può essere sia esterno che interno all'organizzazione. I *deliverables* rientrano nel campo di applicazione del progetto ed hanno un ruolo preciso nel realizzare l'obiettivo del progetto. Un deliverable può essere sia massiccio come ad esempio un palazzo, sia piccolo come un documento di una pagina.

Output: Risultato derivante da una serie di attività svolte. Rappresenta per lo più un elemento immateriale.

Milestones: Rappresentano dei punti di controllo e servono per tenere traccia dell'avanzamento del progetto. Esse contrassegnano il completamento di un'attività importante e sono pensate per il team interno di progetto.

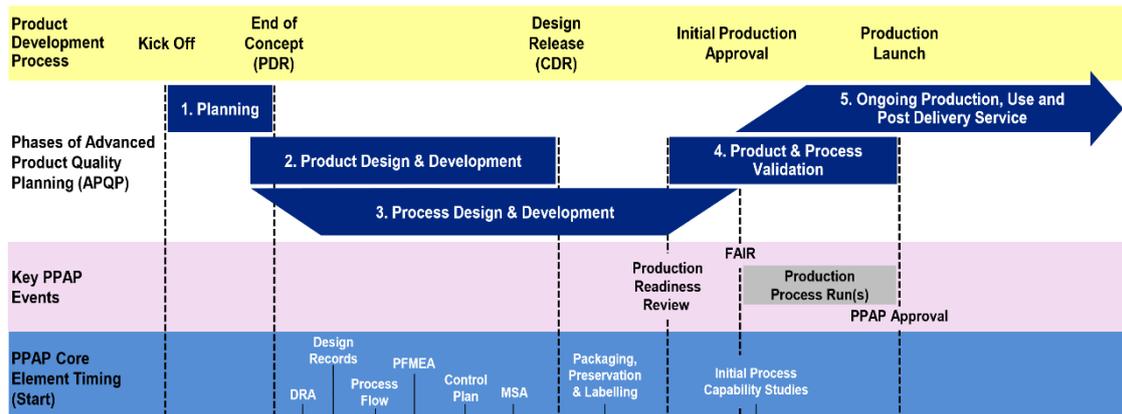


Figura 4.2. Fasi del processo APQP (fonte: IAQG).

FASE I: Pianificazione

La fase della pianificazione è quella più importante, poiché ha delle ripercussioni sull'intero processo APQP, dunque è opportuno attribuirle il giusto peso onde evitare spiacevoli inconvenienti futuri.

Il processo inizia con lo studio del mercato di riferimento e l'analisi delle esperienze pregresse. L'aspetto più importante consiste nel comprendere in maniera esaustiva la "voce del cliente" (VoC), accertandosi che i suoi bisogni siano chiaramente identificati, riconosciuti e colti dall'organizzazione. Successivamente, raccolte tutte le informazioni relative alle caratteristiche tecniche, agli input associati al prodotto e ai requisiti richiesti, è necessario sviluppare un project plan a cui faranno riferimento tutti gli stakeholder per assicurare un corretto coordinamento.

DELIVERABLES:

- Requisiti di progettazione del prodotto
- Target di progetto (sicurezza, qualità, affidabilità, manutenibilità, durata, costo)
- Elenco preliminare dei Critical Items (CI's) e delle Key Characteristics (KC's)
- Distinta base preliminare (BOM)²⁵
- Diagramma di flusso preliminare del processo
- Review dello Statement of Work (SoW)²⁶
- Piano preliminare di approvvigionamento
- Project plan

²⁵ Documento contenente tutti gli item che concorrono alla realizzazione del prodotto.

²⁶ Documento in cui viene esposto il progetto, le attività ad esso connesse, i risultati attesi e i tempi di consegna stabiliti.

OUTPUT:

- Viene finalizzato il concetto del prodotto ed è disponibile una pre-progettazione

FASE 2: Progettazione e sviluppo del prodotto

Durante la fase 2, le caratteristiche e le specifiche individuate nella fase di pianificazione assumono una forma più robusta e vengono assimilate in una progettazione del prodotto controllata, verificata e validata. Molto spesso, è opportuno sviluppare un ambiente di test attraverso cui poter individuare le fasi produttive previste ed i potenziali fornitori per realizzare il prodotto nel rispetto dei requisiti. Inoltre, bisogna identificare gli input della progettazione del processo produttivo che includono:

- Documentazione del prodotto progettato
- Target di produttività, capacità del processo, qualità e costi
- Requisiti del cliente e dell'ente governativo, compreso il tasso di domanda richiesto dal cliente

Infine, viene condotto uno studio di fattibilità per garantire che la produzione sia supportata da un corretto piano di approvvigionamento.

DERIVERABLES:

I risultati attesi di questa fase sono:

- Identificazione di requisiti speciali, oltre alla lista delle KC's e CI's del prodotto
- Analisi preliminare dei rischi inerenti al piano di approvvigionamento
- Fornire le specifiche di imballaggio
- Rapporto di revisione del progetto
- Piano di sviluppo del prodotto
- Piani di verifica e validazione del progetto e risultati associati
- Rilascio dello studio di fattibilità

OUTPUT:

- Rilascio dei documenti di progettazione e BOM
- Completamento del piano di verifica e validazione del progetto

- Completamento dei test specifici di prototipazione, come simulazioni e test funzionali
- Iniziazione dell'analisi dei rischi del piano di approvvigionamento

ELEMENTI PPAP APPLICABILI – FASE 2

Durante la fase di progettazione e sviluppo del prodotto prendono forma i seguenti elementi del PPAP, descritti nello specifico nel paragrafo precedente §4.2.:

- Documenti di progettazione
- Analisi dei rischi di progettazione e relativa DFMEA

Fase 3: Progettazione e sviluppo del processo

La fase 3 dell'APQP è incentrata sullo sviluppo di un consistente processo produttivo che garantisca il soddisfacimento dei bisogni e delle aspettative del cliente.

Per la progettazione completa del sistema di produzione è importante interagire con la fase precedente. In particolare, risulta necessario assumere come input le informazioni generate dalla fase 2 e processarle in maniera adeguata.

Sviluppato il processo, avendo tenuto conto di:

- Requisiti da soddisfare
- Key Characteristics (KC's) di processo
- Rischi associati al processo ed incorporati nella PFMEA
- Piano di gestione dei rischi relativi alla catena di fornitura

viene stilata la relativa documentazione, con annesse istruzioni operative e valutato lo stato di preparazione alla produzione.

DELIVERABLES:

Le attività svolte nella terza fase producono i seguenti risultati:

- Layout di stabilimento
- Piano di preparazione alla produzione
- Piano di formazione ed indottrinamento delle risorse
- KCs del processo
- Valutazione preliminare della capacità produttiva

- Documentazione delle stazioni di lavoro
- Piano preliminare MSA
- Piano di gestione dei rischi relativi alla catena di fornitura
- Risultati delle revisioni effettuate sulla prontezza del processo alla produzione

OUTPUT:

- Viene definito e verificato il processo, pronto per essere validato
- Completamento di attività per rendere il processo pronto alla produzione

ELEMENTI PPAP APPLICABILI – FASE 3

Durante la terza fase vengono generati i seguenti punti del PPAP:

- Diagramma di flusso del processo
- Process Failure Mode & Effect Analysis (PFMEA)
- Piano di controllo
- Approvazione imballaggio, conservazione ed identificazione

Fase 4: Validazione del prodotto e del processo

Dopo aver sviluppato il processo inerente al prodotto, è necessario validare il suo corretto funzionamento. Lo strumento attraverso cui è possibile effettuare tutte le opportune verifiche è rappresentato dal primo avvio significativo della produzione (definito come *production run*).

Durante la prima *production run*, viene determinato se sono stati rispettati: il piano di controllo, il diagramma di flusso del processo e la conformità dei pezzi prodotti. La minima quantità di pezzi da produrre durante questo avvio di produzione viene definita dal cliente, tuttavia non è esclusa la possibilità di eccedere la quantità stabilita per effettuare valutazioni più approfondite richieste dal team qualità dell'organizzazione.

DERIVERABLES:

Gli elementi risultanti dalla quarta fase sono:

- Prodotto derivante dalla *production run*
- Verifica della capacità produttiva
- Risultati relativi al processo di validazione del prodotto

OUTPUT:

- Validazione del processo produttivo, il quale è in grado di fornire prodotti conformi ai requisiti
- Completamento e approvazione del FAI
- Completamento e approvazione del PPAP

ELEMENTI DEL PPAP APPLICABILI – FASE 4

Con la fase 4 si ha il completamento del pacchetto PPAP, che successivamente verrà inviato al cliente per permettergli di effettuare le verifiche che ritiene opportuno.

I punti sviluppati in questa fase:

- Measurement System Analysis (MSA)
- Studi iniziali della capacità del processo (grazie ai dati registrati durante la *production run*)
- Piano di controllo
- First Article Inspection Report (FAIR)
- Requisiti specifici del cliente
- PPAP approval form

Fase 5: Produzione di serie, Utilizzo e Servizio post-consegna

Il processo APQP non termina con la validazione del processo produttivo e l'approvazione da parte del cliente. La metodologia ha come obiettivo generale il miglioramento continuo della qualità, per cui l'organizzazione è impegnata nel perseguire questo scopo anche una volta partita la produzione di serie.

Durante la quinta fase, infatti, assume fondamentale importanza l'attività di monitoraggio sia del processo sia del prodotto fornito, confrontando i risultati ottenuti con quelli target, definiti in fase di pianificazione. L'attenzione si riversa sulle caratteristiche di affidabilità e qualità che concorrono alla soddisfazione del cliente, sulla performance del servizio post-consegna, e sulle operazioni di manutenzione, riparazione e revisione (MRO).

Inoltre, per incentivare il miglioramento continuo vengono utilizzati strumenti statistici, come ad esempio le carte di controllo, per cercare di ridurre la variabilità del prodotto e del processo.

L'esperienza acquisita nello sviluppo di un prodotto tramite l'APQP può essere utile in altre attività di progettazione, seppur integrando in maniera appropriata il processo.

In conclusione, è opportuno specificare che tutti i documenti contenenti informazioni modificabili devono essere continuamente aggiornati. Rientrano in questa tipologia di documenti soprattutto la DFMEA, PFMEA e i piani di controllo.

4.3.3. ASPETTI SALIENTI E RIFLESSIONI SU APQP-PPAP

L'impiego di risorse dedicate e l'elevato impegno richiesto per lo sviluppo di un buon APQP potrebbe essere inteso come un fattore di costo aggiuntivo e scoraggiare le organizzazioni all'adozione del metodo. Tuttavia, l'esperienza insegna che vi è un'effettiva riduzione di costo che scaturisce da un minor numero di ispezioni da effettuare ed una ridotta probabilità di fallimento dovuta non solo a fattori interni ma anche esterni l'organizzazione.

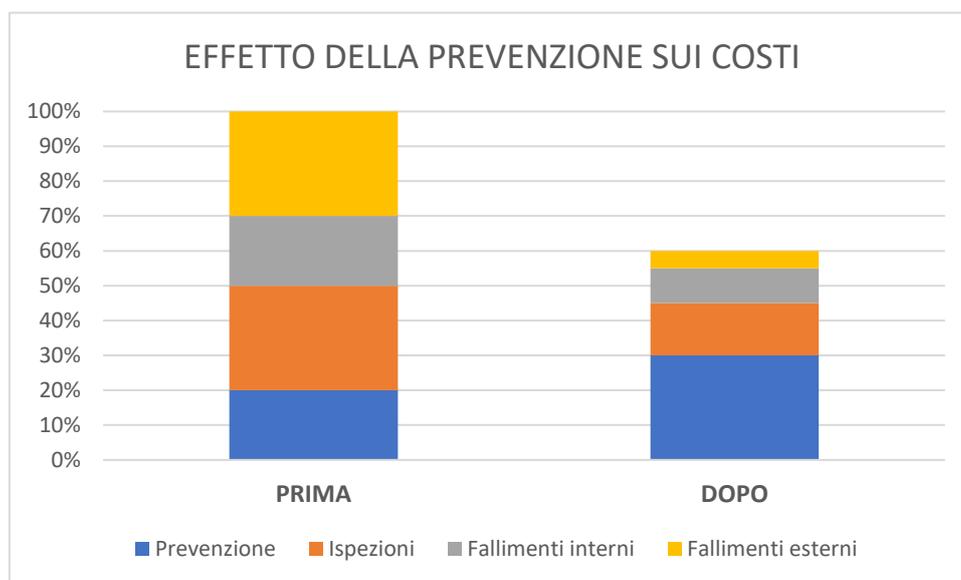


Figura 4.3. Effetto della prevenzione sui fattori di costo (fonte: ASQ, Quality Progress).

Dal grafico è possibile osservare che l'aumento di costo generato da una maggiore attività di prevenzione ha un'influenza positiva sulla riduzione degli altri fattori di costo.

Facendo riferimento all'intero ciclo di vita del prodotto, possiamo avere un'idea di come varia l'andamento dei costi della qualità (CoQ) nel caso di sviluppo di un prodotto con e senza APQP-PPAP.

Il confronto dei due casi è rappresentato nella seguente figura:

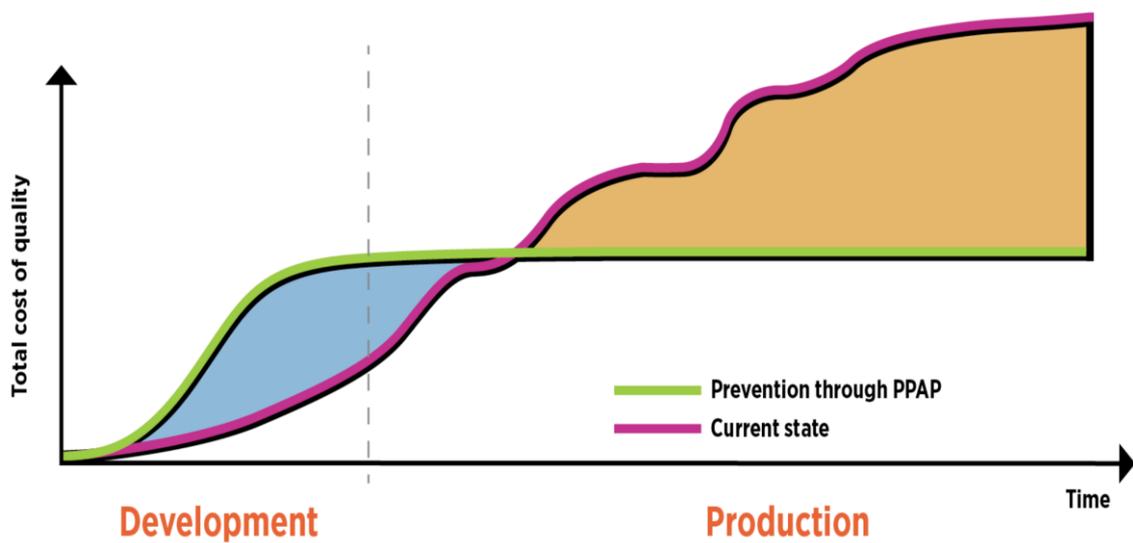


Figura 4.4 Confronto del CoQ nello sviluppo di un prodotto con e senza APQP-PPAP (fonte: ASQ, Quality Progress).

Se vengono comprese subito le aspettative del cliente e viene sviluppato un piano dettagliato per soddisfare i requisiti individuati, è possibile gestire in maniera opportuna e proattiva i potenziali rischi associati. Questo comporta una spesa maggiore durante la fase di sviluppo, che viene compensata durante la fase di produzione. Dunque, applicando la metodologia APQP si ha un più rapido raggiungimento della maturità del prodotto, evitando modifiche tardive che risultano sempre più incisive sui costi con l'avanzare del tempo.

CAPITOLO 5: L'APQP IN UMBRAGROUP

5.1. CASO UMBRAGROUP S.p.A. “AS IS”

Nel seguente capitolo viene analizzata l'implementazione del processo APQP nel sistema di gestione della qualità di UmbraGroup S.p.A.

Il primo programma in cui viene richiesto un modello di sviluppo di prodotto secondo la metodologia APQP è stato commissionato dalla compagnia Airbus.

L'azienda ha colto al volo questa sfida, tramutandola in opportunità. Trovarsi nella condizione di riprogettare e riprogrammare i propri processi cercando di attenersi a quanto richiesto dallo standard AS/EN 9145, nel contesto di un settore ancora molto lontano dall'applicazione sistematica della metodologia, pone le basi per essere sempre più competitiva e all'avanguardia.

Lo svolgimento del lavoro è stato effettuato coinvolgendo le varie funzioni aziendali tra cui: Design Engineering, Manufacturing Engineering, Quality, Procurement, Operations.

5.1.1. MODALITÀ DI SVOLGIMENTO

Per analizzare il grado di maturità ed esperienza raggiunto dall'azienda nell'implementazione del processo APQP, sono state condotte delle interviste rivolte ai principali attori coinvolti. Durante i colloqui sono stati considerati dei documenti stilati dall' IAQG e confrontati con la procedura sviluppata internamente dall'organizzazione, in modo tale da valutare l'adeguatezza della procedura interna allo standard AS/EN 9145.

I documenti del gruppo IAQG presi in considerazione per svolgere questa attività sono:

1. Checklist delle 5 fasi APQP
2. Assessment Matrix

Come accennato nell'introduzione di questo capitolo, l'attività di *assessment* viene condotta sul programma Airbus. Tuttavia, è importante sottolineare che tale programma ha preso il via circa tre anni fa e inizialmente la normativa non era ancora entrata in vigore (in Europa infatti la EN9145 è stata rilasciata nel 2018). Il cliente ha quindi modellato i termini contrattuali e le attività da svolgere secondo le proprie esigenze, prendendo spunto dall'APQP utilizzato nel settore *automotive*. Con l'avanzamento del progetto e la formalizzazione dello standard, sono stati successivamente aggiornati i termini tra cui il riferimento esplicito alla AS/EN9145, seppure in parte.

In queste circostanze, la UmbraGroup ha iniziato a sviluppare delle procedure per allineare i propri processi con quanto richiesto dalla normativa. Quanto sviluppato fin' ora non è ancora in versione definitiva, necessita di revisioni e alcune modifiche. Lo scopo della presente attività, dunque, è anche quello di dare un'evidenza concreta di ciò che è stato svolto ed implementato sul programma Airbus, circoscrivendo i punti su cui non si ha piena consapevolezza e per i quali le competenze attuali non risultano essere adeguate. Questo approccio fungerà da guida nella determinazione ed attuazione delle modifiche da apportare, in modo tale da avere un processo più robusto da poter implementare nella sua totalità su un programma futuro, in cui il cliente ha imposto come requisito contrattuale l'applicazione completa dell'APQP secondo la AS/EN9145.

I primi colloqui effettuati sono serviti perlopiù a trasferire in maniera chiara i concetti dell'APQP a tutto il team che concorre al processo di sviluppo del prodotto, nonché ad illustrare la procedura interna sviluppata a livello teorico. In questo modo, è stato

possibile condurre l'*assessment* utilizzando un linguaggio comune e procedere in maniera sincrona.

5.1.2. INCONVENIENTI CORONAVIRUS

Dopo i primi incontri effettuati in azienda, in cui è stato esposto il progetto e sono state programmate le attività da svolgere, si è presentata l'emergenza da coronavirus.

In questa particolare circostanza l'azienda ha attivato tutte le procedure necessarie per una corretta gestione dell'imprevisto, cercando di mitigare il più possibile l'impatto sulla produzione e sulla sicurezza dei propri dipendenti. Tutte le attività non direttamente coinvolte nella realizzazione dei prodotti sono state affidate in smart-working e coordinate tramite Microsoft Teams²⁷, mentre gli addetti alla produzione sono stati attrezzati con adeguati dispositivi di protezione individuali e formati in maniera consona alle misure precauzionali da adottare.

Parte dell'attività del presente lavoro di tesi è stata, dunque, eseguita da remoto, interagendo con i vari stakeholder tramite Microsoft Teams. La particolarità di Teams consiste nella possibilità di partecipare a delle riunioni virtuali con un numero elevato di utenti, condividendo schermate e documenti. Inoltre, tramite Teams è possibile permettere agli utenti in contatto di poter controllare il dispositivo degli altri partecipanti e il sistema è in grado di sincronizzare in tempo reale le modifiche e gli aggiornamenti apportati.

²⁷ Piattaforma di comunicazione e collaborazione unificata per teleconferenze, condivisione di contenuti e integrazione delle applicazioni.

5.2. CHECKLIST DELLE 5 FASI APQP

L'ingente lavoro svolto dall'IAQG permette di fare un'analisi approfondita delle attività e *deliverables* da sviluppare nel processo APQP, guidando l'organizzazione nel considerare tutti gli aspetti, senza tralasciarne alcuno.

A questo scopo sono stati redatti dei documenti contenenti una Checklist per ognuna delle 5 fasi dell'APQP.

Le Checklist sono sostanzialmente dei file Excel in cui vengono presi in considerazione tutti gli aspetti del processo.

Ciascun file fa riferimento ad una delle fasi dell'APQP e presenta tanti fogli di calcolo quanti sono i *deliverables* associati a quella determinata fase. Per ogni *deliverables* (quindi per ogni foglio di calcolo) compare un elenco di domande riferite a:

- Aspetti qualitativi
- Disponibilità degli input necessari alla realizzazione del deliverable
- Utilizzo di un approccio cross-funzionale nell'esecuzione delle attività
- Conformità agli standard, se applicabili o, nel caso non lo siano, se è stata seguita la migliore prassi
- Controllo del risultato del deliverable

Le domande sono appositamente studiate per far riflettere sulle modalità con cui sono state condotte e gestite le attività, guidando l'organizzazione all'individuazione degli aspetti più carenti.

Per ciascuna domanda è possibile dare 4 risposte:

- (Y) se quanto espresso nella domanda è possibile confermarlo
- (N) se non sono state eseguite le attività richieste
- (IP) se l'attività è in corso come programmato
- (N/A) se è stato concordato con il cliente la non applicabilità dei concetti espressi nella domanda

Oltre a fornire una risposta immediata, viene anche richiesto di indicare lo "stato" di ciascuna domanda tramite l'indicatore RYG (Red, Yellow, Green).

Alle risposte negative (N) è possibile associare due stati (Red, Yellow), in base alla presenza o meno di un piano d'azione in grado di mitigare l'impatto su tempistica e qualità. Nel caso non sia possibile implementare un piano d'azione efficace, molto probabilmente vi sarà un impatto sui tempi e la domanda sarà contrassegnata con "Red". Se invece è previsto un piano d'azione robusto in grado di ripristinare la situazione e fare in modo che non ci siano ripercussioni sui tempi, allora la domanda sarà contrassegnata con "Yellow".

Tutte le risposte positive (Y) vengono contrassegnate con "Green" e seguono il normale svolgimento del programma.

Nella colonna successiva ("Evidence") del foglio Excel, adiacente alla colonna dell'indicatore RYG, bisogna giustificare la risposta alle domande, fornendo un'evidenza oggettiva come, ad esempio, un riferimento ai documenti disponibili. Per le risposte negative (N) è importante descrivere il problema ed includere la causa radice da cui esso scaturisce.

Le restanti colonne del foglio di calcolo fanno riferimento alle attività di Program Management. In corrispondenza delle domande contrassegnate con "Red" o "Yellow" bisogna descrivere i provvedimenti da prendere basandosi sulla causa radice individuata nella colonna precedente ("Evidence"), associare un responsabile, la data di inizio del provvedimento, la data di fine prevista e lo stato di avanzamento dell'azione intrapresa.

Per una maggiore comprensione di come è strutturata la Checklist, di seguito ne viene riportato un esempio:

#	Question	Y	N	NA	RTG	Evidence
1	Does the manufacturing process flow diagram created by a cross functional team including Manufacturing Engineering, Production, Procurement and Quality including others as necessary information available to create the process flow diagram?					
2	All input data to the process flow diagram are available and are a preliminary design concept, preliminary bill of material, process specifications/requirements, preliminary Key Characteristics and Critical Items, and/or preliminary subassembly parts.					
3	Is the process flow diagram applicable to the product in question? If not, what process diagram can be used?					
4	Does the process flow diagram include manufacturing, inspection and test phases for subassemblies and finished product? The process flow diagram is not limited to final assembly, it contains final assembly and construction of all the subassemblies required to make the product.					
5	Does the process flow diagram include subcontracted activities? The process flow diagram requirement is applicable to them.					
6	Does the process flow diagram include critical process steps (i.e. long lead time equipment processes requiring operators to be certified by external parties)?					
7	Does the process flow diagram include preliminary Critical Items and Key Characteristics and their justification?					
8	Does the process flow diagram include means (machines, equipment) & tools used? If so, are they available?					
9	Is the process flow diagram kept up to date and maintained regularly?					
10	Have all external risks affecting the Process Flow Diagram been identified? If no, describe those risks.					

Figura 5.1. Checklist fasi APQP (fonte: IAQG)

5.3. ASSESSMENT MATRIX

L'assessment matrix è stata utilizzata per avere una visione generale del modo in cui l'azienda percepisce ed ha internalizzato l'APQP.

Essa prende in considerazione:

- La filosofia aziendale relativa ad aspetti organizzativi e manageriali
- L'esperienza nella gestione dei progetti e dei rischi ad essi associati
- La conoscenza e l'utilizzo adeguato dei tool dell'APQP (come ad esempio: FMEA, piani di controllo, diagramma di flusso del processo, analisi del sistema di misura, ecc..)
- Il grado di conoscenza dell'APQP di terze parti che interagiscono con l'azienda e come essa incentiva i propri fornitori ad adeguarsi allo standard

Ad ognuna di queste categorie vengono associati 5 livelli di "maturità". Il primo livello corrisponde ad una conoscenza scarsa o addirittura nulla dell'aspetto considerato, mentre il quinto livello è sinonimo di una comprensione dettagliata e completa. Nella determinazione del livello di appartenenza, è fondamentale che l'organizzazione certifichi la conformità a tutto ciò che è specificato in quel determinato livello, fornendo un'evidenza oggettiva in grado di giustificare tale scelta. Dopo aver completato la matrice, viene stabilito un punteggio basato sulla media ponderata ottenuta nelle varie categorie. Il punteggio risultante indica il posizionamento dell'azienda, la sua maturità in riferimento agli elementi chiave dell'APQP.

L'assessment matrix è utile non solo ad analizzare lo stato attuale, ma anche a comprendere quale direzione intraprendere per migliorare gli aspetti più carenti.

Di seguito viene riportata a scopo esemplificativo una parte della matrice.

2.0 Philosophy: Organizational Alignment and Effective Communication									
Item	Content	Level 1 [1 pt]	Level 2 [2 pt]	Level 3 [3 pt]	Level 4 [4 pt]	Level 5 [5 pt]	Weight	Score	Comment / Evidence
2.1	Ownership of APQP process	Ownership is not defined. Functions are operating in silos and are task driven.	Multiple owners. Philosophy driven by multiple functions. Direction not assigned. There are pockets of tools being used.	Executive owner is established and organizational structure to support APQP process is defined.	Multi-discipline structure established and decision making process in place.	Resources are optimized and there is a process in place to re-allocate as needed.	40%		
2.2	Communication of Product Development Activities	Product development progress is not communicated.	Product development reviews and communication occurs within isolated sectors. Not multi-disciplined. No frequency is established.	Multi-discipline project review process is defined. Review frequency is established and the organization is starting to conduct reviews.	Reviews are stable, multi-disciplined and effectively managed to communicate project outputs and escalation of issues. Gated executive and periodic customer reviews are conducted.	Central repository established for managing product development process and ensuring access of information. Reviews are consistently communicated (e.g. project status, newsletters, etc.).	20%		
2.3	Human Resource Planning	No plan for human resources needed to support the APQP process. Resources are added as the need arises.	Human resource needs are determined in some areas and evaluated for capability with plans to close skill gaps.	Human resource needs are identified for all functional areas and training plans are completed.	Qualified personnel are in place and there is a process defined to sustain APQP.	APQP roles are embedded into the organizational structure. Capabilities of APQP resources are maintained systematically & optimized for on-going process effectiveness.	40%		
								Raw Score	Overall Weighted Category Score 0.0%

Figura 5.2. Assessment Matrix (Fonte: IAQG).

5.4. RISULTATI

Una delle principali lacune riscontrate dal team durante i colloqui è riferita all'analisi del sistema di misura. La documentazione relativa al sistema di misura e ad una sua completa analisi, come richiesto dalla normativa AS9145, risulta essere incompleta. In particolare, i prodotti realizzati dall'azienda per il cliente Airbus sono degli attuatori elettromeccanici. Le caratteristiche degli attuatori vengono verificate attraverso la loro misurazione su dei banchi prova automatici, i quali sono collaudati e calibrati da una società terza. Le misure sono molto attendibili in quanto i banchi possiedono una certificazione che attesta il loro corretto funzionamento, ma non è stato effettuato uno studio approfondito sulla determinazione della variabilità del sistema di misura e di quanto questa variabilità incide sulla variabilità totale osservata in uscita dal processo.

Con il team, è stato allora deciso di effettuare una completa analisi del sistema di misura degli attuatori elettromeccanici, in modo tale da avere un'evidenza oggettiva sulla determinazione della variabilità e fornire al cliente un'ulteriore conferma della massima attenzione dell'azienda all'aspetto qualitativo.

CAPITOLO 6: ANALISI DEL SISTEMA DI MISURA (MSA)

6.1. INTRODUZIONE MSA

L'attività di misurazione ricopre un aspetto fondamentale nella valutazione delle caratteristiche qualitative del prodotto. È attraverso i dati raccolti durante il processo di misurazione che viene stabilita la conformità del prodotto ai requisiti di progetto. Inoltre, sulla base di questi dati, è possibile individuare eventuali inefficienze del processo produttivo e risalire alla fonte che ha generato il problema, in modo tale da stabilire un adeguato piano d'azione finalizzato ad apportare miglioramenti.

Da questo presupposto, è intuitivo trarre la conclusione che il processo di misurazione deve essere in grado di fornire dati estremamente affidabili e attendibili, i quali saranno utilizzati per effettuare analisi più approfondite sul processo di produzione.

Tuttavia, è ampiamente condivisa l'idea che il sistema di misura influenza in qualche modo la variabilità totale in uscita osservata.

In particolare, la variabilità totale del processo è condizionata dalla somma di due contributi:

- La variabilità effettiva del prodotto, sul quale agiscono diversi fattori
- La variabilità risultante dal sistema di misura impiegato

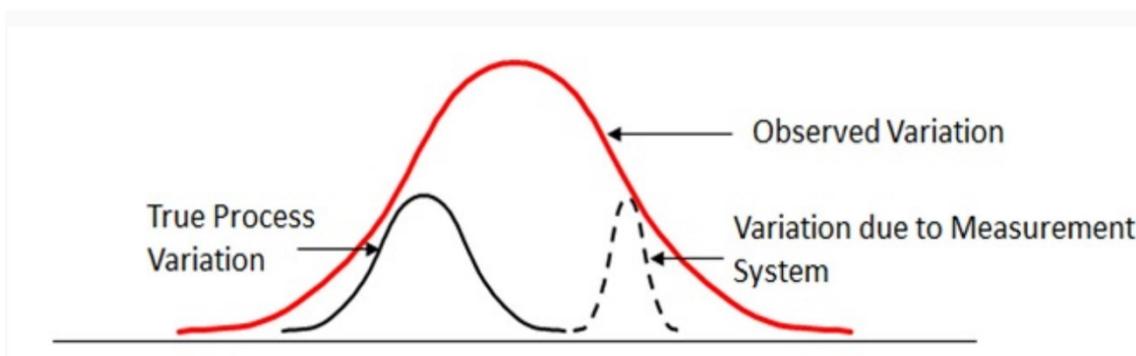


Figura 6.1. Contributo del sistema di misura alla variabilità totale osservata (fonte: Six Sigma Institute).

L'obiettivo dell'analisi del sistema di misura consiste, dunque, nella valutazione della bontà e dell'adeguatezza del sistema di misura. I dati raccolti durante questa attività vengono processati utilizzando un approccio statistico-matematico per la

determinazione della variabilità del processo di misurazione e stabilire il suo impatto sulla variabilità totale. Qualora i risultati ottenuti non fossero soddisfacenti, è fondamentale individuare, circoscrivere e successivamente eliminare le fonti di eccessiva variabilità poiché fornirebbero dei risultati fuorvianti, che renderebbero inapplicabili e spesso controproducenti le azioni di miglioramento.

Il sistema di misura è un insieme articolato di elementi che va ben oltre il solo strumento utilizzato per effettuare la misura.

Esso è composto da:

- Strumento di misura
- Ambiente in cui esso opera
- Operatori che eseguono le misurazioni
- Metodi e procedure definite per l'esecuzione della misurazione
- Materiale del componente
- Supporto hardware e software

L'interazione di tutti questi elementi contribuisce alla determinazione della variabilità del sistema.

6.1.1. TERMINOLOGIA UTILIZZATA NELL'ANALISI DEL SISTEMA DI MISURA

La capacità del sistema di misura viene valutata analizzando alcune proprietà che incidono ognuna in maniera differente nella determinazione della variabilità.

Le proprietà²⁸ che vengono prese in considerazione nell'analisi sono:

Ripetibilità: fa riferimento alla variabilità risultante dalla misurazione ripetuta di un singolo componente, sulla stessa caratteristica in esame, dallo stesso operatore, alle stesse condizioni. Il concetto di ripetibilità è strettamente legato allo strumento di misura utilizzato.

Riproducibilità: rappresenta la variabilità dovuta al valore medio registrato dai diversi operatori che effettuano la misura su un gruppo omogeneo di oggetti, utilizzando il medesimo sistema di misura, sotto le stesse condizioni. Talvolta, la riproducibilità è valutata anche rispetto ad una diversa strumentazione, diversi set-up del sistema, diversi momenti temporali o condizioni di misurazione.

Errore: evidenzia la differenza tra il valore medio rilevato dalle varie misurazioni effettuate sotto le stesse condizioni, ed il valore target di riferimento, definito “*master value*”. Attraverso l'errore, si percepisce la precisione della misura.

Linearità: valuta l'evoluzione dell'errore sull'intero range operativo del sistema di misura. In altre parole, si cerca di capire se la correlazione tra la risposta dello strumento e la caratteristica misurata è di tipo lineare. Se, ad esempio, l'errore di misura rilevato su una determinata caratteristica varia in funzione della dimensione dell'oggetto misurato, allora il sistema risulta essere non lineare.

Stabilità & Consistenza: definiscono l'impatto del tempo sul sistema. Il tempo riveste un ruolo importante nell'analisi, poiché molto spesso incide sulle cause di instabilità ed inconsistenza come ad esempio: il deterioramento della componentistica elettrica e meccanica, l'affaticamento degli operatori, l'aggiornamento delle procedure, il cambiamento delle condizioni ambientali. Nello specifico, la stabilità osserva il mutamento nel tempo della variabilità relativa all'*errore*, mentre la consistenza può essere vista come l'evoluzione nel tempo della *ripetibilità*. Un sistema stabile e

²⁸ Per informazioni aggiuntive, consultare la normativa ASTM E2782-17, *Standard Guide for Measurement System Analysis (MSA)*.

consistente risulta essere sotto controllo statistico, quindi è possibile prevedere il suo comportamento entro un determinato lasso di tempo.

Risoluzione: determina il potere discriminatorio del sistema di misura, cioè la sua capacità di distinguere elementi diversi. Tanto più alta sarà la risoluzione, più il sistema sarà sensibile a variazioni impercettibili dei componenti misurati. Il grado di risoluzione del sistema è strettamente legato alla *riproducibilità*, poiché una risoluzione adeguata permette di ricavare dati di misurazione affidabili per poter effettuare un corretto studio di riproducibilità del sistema.

6.2. SCOMPOSIZIONE DELLA VARIANZA

Lo scopo ultimo dello studio MSA può essere racchiuso in 3 concetti chiave:

1. Determinare quanto della variabilità totale è imputabile allo strumento
2. Isolare le componenti di variabilità del sistema di misura
3. Valutare l'adeguatezza dello strumento nello svolgere il compito assegnato

I risultati derivanti dalla procedura di misurazione sono affetti da una variabilità che in parte è dovuta all'effettiva differenza dei componenti prodotti ed in parte è associabile al sistema di misura impiegato. Dunque, è possibile esprimere le componenti di variabilità secondo la seguente equazione (*Douglas C. Montgomery, 6th Edition*):

$$\sigma_{Totale}^2 = \sigma_{Prodotto}^2 + \sigma_{Sistema\ di\ misura}^2 \quad (6.1)$$

dove σ_{Totale}^2 rappresenta la varianza complessiva osservata in uscita, $\sigma_{Prodotto}^2$ è la quota di varianza totale imputabile al componente, mentre $\sigma_{Sistema\ di\ misura}^2$ si riferisce alla varianza derivante dal sistema di misura.

In una condizione ipotetica, ideale, si vorrebbe una varianza del sistema di misura nulla, in modo tale che esso non abbia alcuna influenza nella determinazione della variabilità dei prodotti provenienti dal processo produttivo. Tuttavia, è una situazione alquanto irrealistica. Vi sarà sempre una componente di variabilità, seppur piccola, associata al sistema di misura, per cui è importante assicurare un'adeguata capacità del sistema al fine di limitare il più possibile il suo impatto nella determinazione della variabilità totale osservata.

6.3. STUDIO GAGE R&R

La validazione del sistema di misura viene effettuato utilizzando degli strumenti di analisi statistica. Uno degli strumenti più utilizzati è lo studio Gage R&R.

Lo studio Gage R&R consiste in un esperimento programmato utile a determinare la precisione del sistema di misura attraverso l'analisi di due proprietà, ovvero la *Ripetibilità* e la *Riproducibilità*. In questo modo viene considerata, rispettivamente, la variabilità prettamente imputabile allo strumento (*Ripetibilità*) e quella derivante dall'interazione di altri fattori come, ad esempio, l'esecuzione della misura da parte di diversi operatori o stazioni di misura (*Riproducibilità*).

La variabilità totale osservata può essere, quindi, ulteriormente scomposta come segue (Douglas C. Montgomery, 6th Edition):

$$\sigma_{Totale}^2 = \sigma_{Prodotto}^2 + \sigma_{Ripetibilità}^2 + \sigma_{Riproducibilità}^2 \quad (6.2)$$

Una rappresentazione grafica della scomposizione della variabilità totale osservata in uscita è illustrata dalla seguente figura.

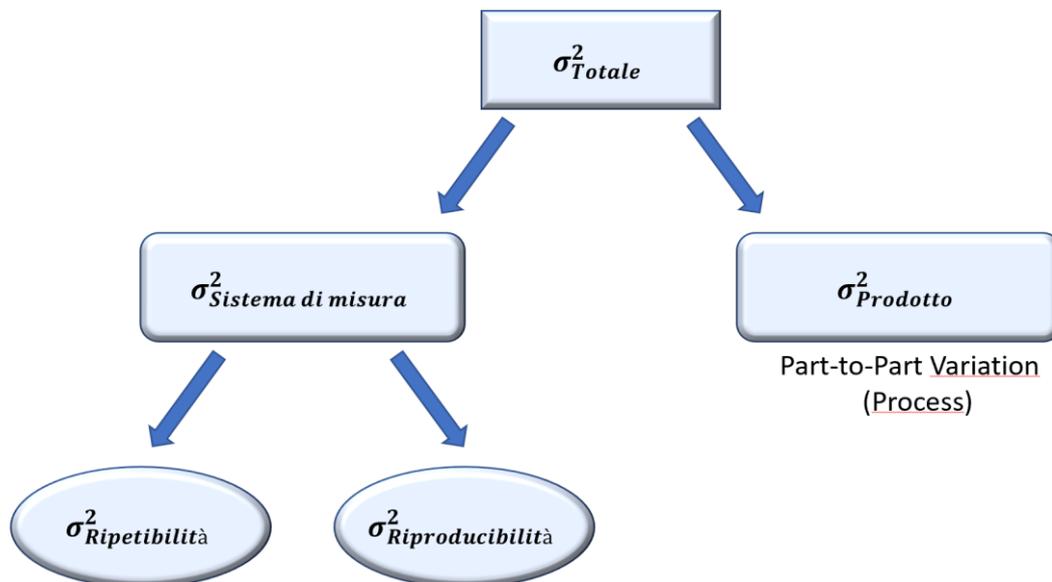


Figura 6.2. Scomposizione della varianza totale.

6.3.1. PROGRAMMAZIONE DELL'ESPERIMENTO

Nella maggior parte delle analisi dei sistemi di misura, l'incremento della variabilità totale osservata in uscita è imputabile all'operatore che esegue la misurazione, oltre a quella intrinseca al sistema di misura impiegato.

Tuttavia, come vedremo nel paragrafo §6.4. , relativo all'applicazione sperimentale del metodo, in cui l'analisi viene condotta su banchi ATE (Automatic Test Equipment), ci sono casi in cui l'incidenza dell'operatore è pressoché irrilevante e, in queste circostanze, la riproducibilità viene analizzata considerando altri fattori.

Nel presente capitolo, a scopo illustrativo e teorico, è stato considerato l'operatore come causa di variabilità aggiuntiva, ma le stesse considerazioni possono essere fatte per altre cause.

Essendo un esperimento programmato, è buona prassi seguire alcune indicazioni per una corretta pianificazione dello studio Gage R&R. A tal proposito è stata presa come riferimento la normativa ASTM E 2782²⁹.

Il primo passo da effettuare prima di eseguire le misurazioni consiste nel determinare la dimensione dell'esperimento come segue:

- Decidere il numero di oggetti da misurare (n), selezionati in maniera casuale dalla popolazione di oggetti a cui appartengono
- Individuare il numero di operatori (p) che dovranno effettuare le misure, selezionati anch'essi in modo casuale dalla popolazione degli addetti alle misurazioni. Nel caso il numero di operatori sia esiguo (2 o al massimo 3 operatori) allora è opportuno sceglierli tutti, in modo tale da rappresentare l'intera popolazione
- Scegliere il numero di misurazioni che ogni operatore deve effettuare su ogni oggetto di studio (m)

La dimensione dell'esperimento sarà data dal prodotto dei 3 parametri ($n \times p \times m$).

Durante l'esecuzione delle misure, per evitare distorsione dei dati, è necessario che ciascun operatore esegua la misurazione senza conoscere i risultati ottenuti dagli altri

²⁹ ASTM E2782-17, *Standard Guide for Measurement System Analysis (MSA)*.

operatori, per non esserne condizionato. Inoltre, durante tutta la durata dell'esperimento bisogna preservare le condizioni del sistema di misura, evitando ricalibrazioni, cambiamenti nel settaggio, revisioni delle procedure, o modifiche software e hardware.

6.3.2. MODELLO ANOVA (Analysis Of Variance)

Dopo aver determinato la dimensione dell'esperimento e aver eseguito le misurazioni è necessario analizzare i dati raccolti. Il metodo statistico utilizzato per valutare la *Ripetibilità* e la *Riproducibilità* del sistema di misura è il Two Ways ANOVA.

Questo metodo statistico permette di considerare più fattori di variabilità e, oltre a valutare gli effetti dei singoli fattori nella determinazione della variabilità totale, viene analizzata anche l'incidenza dell'interazione tra essi.

Nel caso in esame, i fattori di interesse sono rappresentati da: "componente" e "operatore".

Di seguito viene riportato il modello descrittivo dell'analisi (*Douglas C. Montgomery, 6th Edition*):

$$y_{ijk} = \mu + \text{Componente}_i + \text{Operatore}_j + (\text{Componente} \times \text{Operatore})_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (6.3)$$

Con:

$i = 1, 2, \dots, n \longrightarrow$ indice relativo al componente misurato

$j = 1, 2, \dots, p \longrightarrow$ indice relativo all'operatore che sta eseguendo la misura

$k = 1, 2, \dots, m \longrightarrow$ indice relativo alla misurazione effettuata sul componente

ASSUNZIONI DEL MODELLO:

- Le variabili sono indipendenti ed identicamente distribuite (*casualità e indipendenza*);
- Le varianze delle sottopopolazioni da cui sono tratti i gruppi devono essere omogenee (*omoschedasticità*);
- La popolazione da cui sono estratti i campioni deve essere distribuita normalmente (*normalità*).

I parametri del modello sono tutti delle variabili aleatorie indipendenti che rappresentano rispettivamente l'effetto del componente, dell'operatore, dell'interazione tra essi, e dell'errore casuale. Si assume che le variabili aleatorie siano distribuite normalmente con media nulla e varianza rispettivamente:

- $V(\text{Componente}_i) = \sigma_c^2$

- $V(\text{Operatore}_j) = \sigma_{Op}^2$
- $V[(\text{Componente} \times \text{Operatore})_{ij}] = \sigma_{C \times Op}^2$
- $V(\varepsilon_{ijk}) = \sigma_{\varepsilon}^2$

Dunque, la varianza del modello (6.3), relativa ad ogni singola osservazione, risulta essere:

$$V(y_{ijk}) = \sigma_C^2 + \sigma_{Op}^2 + \sigma_{C \times Op}^2 + \sigma_{\varepsilon}^2 \quad (6.4)$$

Raggruppando in maniera opportuna gli elementi della (6.4) è possibile distinguere la variabilità introdotta dal sistema di misura da quella scaturita dalle effettive differenze dei componenti misurati:

$$\sigma_C^2 = \text{Part-to-Part Variation} \quad (6.5)$$

$$\sigma_{Op}^2 + \sigma_{C \times Op}^2 = \sigma_{\text{Riproducibilità}}^2 \quad (6.6)$$

$$\sigma_{\varepsilon}^2 = \sigma_{\text{Ripetibilità}}^2 \quad (6.7)$$

Per cui:

$$\sigma_{\text{Sistema di misura}}^2 = \sigma_{Op}^2 + \sigma_{C \times Op}^2 + \sigma_{\varepsilon}^2 \quad (6.8)$$

Attraverso il metodo ANOVA, è possibile ottenere una stima delle componenti della varianza totale. A tal proposito, per l'analisi delle varianze a due fattori vengono calcolate le somme dei quadrati degli scarti dalle medie (o "devianze") di ogni fattore coinvolto nell'analisi. Successivamente, bisogna depurare le somme per i relativi gradi di libertà in modo tale da ottenere le medie quadratiche per la costruzione delle statistiche F, adoperate per verificare le ipotesi di significatività dell'effetto dei singoli fattori, nonché della loro interazione.

Infine, dal calcolo del valore atteso delle medie quadratiche, sarà possibile ottenere una stima delle varianze delle varie componenti dello studio.

Nel modello ANOVA a due fattori con replicazione, la devianza totale può essere scomposta in 4 componenti:

$$SS_{totale} = SS_C + SS_{Op} + SS_{C \times Op} + SS_{\varepsilon} \quad (6.9)$$

Le formule per il calcolo delle somme dei quadrati degli scarti dalle medie (devianze) e delle medie quadratiche sono presentate di seguito (ASTM E 2782-17):

Con:

n = Numero degli oggetti selezionati per lo studio;

p = Numero di operatori coinvolti;

m = Numero di misurazioni effettuate per ciascun oggetto.

- Somma dei quadrati degli scarti totale. Viene considerata ogni singola osservazione e valutata rispetto alla media complessiva:

$$SS_{totale} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^m (x_{ijk} - \bar{x}_{...})^2 \quad (6.10)$$

Dove $\bar{x}_{...}$ rappresenta la media calcolata rispetto a tutte le osservazioni, in tutti i gruppi:

$$\bar{x}_{...} = \frac{1}{npm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^m x_{ijk} \quad (6.11)$$

Il numero di gradi di libertà (GDL) della devianza totale è pari al numero totale di osservazioni meno uno: $GDL(SS_{totale}) = npm - 1$

- Somma dei quadrati degli scarti delle medie del fattore “componente” dalla media complessiva:

$$SS_C = pm \sum_{i=1}^n (\bar{x}_{i..} - \bar{x}_{...})^2 \quad (6.12)$$

Dove $\bar{x}_{i..}$ rappresenta la media aritmetica delle misurazioni effettuate sull' i -esimo componente:

$$\bar{x}_{i..} = \frac{1}{pm} \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^m x_{ijk} \quad (6.13)$$

Il numero di gradi di libertà della devianza del fattore “componente” è pari al numero di componenti considerati (n) meno uno: $GDL(SS_C) = n - 1$

- Somma dei quadrati degli scarti delle medie del fattore “operatore” dalla media complessiva:

$$SS_{Op} = nm \sum_{i=1}^p (\bar{x}_{.j} - \bar{\bar{x}})^2 \quad (6.14)$$

Dove $\bar{x}_{.j}$ rappresenta la media aritmetica delle misurazioni effettuate dal j -esimo operatore:

$$\bar{x}_{.j} = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} \quad (6.15)$$

Il numero di gradi di libertà della devianza del fattore “operatore” è pari al numero di operatori coinvolti (p) meno uno: $GDL(SS_C) = p - 1$

- Somma dei quadrati degli scarti di ogni singola osservazione dalla sua media “di casella”. Fa riferimento alla misura ripetuta dallo stesso operatore sul medesimo componente, dunque alla *ripetibilità*:

$$SS_{\varepsilon} = SS_{Ripetibilità} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^m (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})^2 \quad (6.16)$$

Dove \bar{x}_{ij} . Rappresenta la media aritmetica delle osservazioni che il j -esimo operatore fa sull’ i -esimo componente:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{ijk} \quad (6.17)$$

Il numero di gradi di libertà della devianza dell’errore è pari al prodotto del numero di componenti e operatori coinvolti (np) per il numero di ripetizioni della misura sul singolo componente meno uno ($m - 1$): $GDL(SS_{\varepsilon}) = np(m - 1)$

Per una maggiore comprensione del metodo, di seguito viene riportata la tabella incrociata dei due fattori “componente” ed “operatore”:

		OPERATORE									TOTALE RIGHE	MEDIA RIGHE	
		1			2			...	p				
COMPONENTE	1	x_{111}	x_{112}	x_{11m}	x_{121}	x_{122}	x_{12m}	x_{1jk}	x_{1p1}	x_{1p2}	x_{1pm}	$x_{1..}$	$\bar{x}_{1..}$
	2	x_{211}	...	...	...	...	...	x_{2jk}	...	...	x_{2pm}	$x_{2..}$	$\bar{x}_{2..}$
	...	x_{i11}	...	...	...	...	...	x_{ijk}	...	...	x_{ipm}	$x_{i..}$	$\bar{x}_{i..}$
	n	x_{n11}	x_{n12}	x_{n1m}	x_{n21}	x_{n22}	x_{n2m}	x_{njk}	x_{np1}	x_{np2}	x_{npm}	$x_{n..}$	$\bar{x}_{n..}$
TOTALE COLONNE		$x_{.1}$			$x_{.2}$			$x_{.j}$	$x_{.p}$			$x_{...}$	
MEDIA COLONNE		$\bar{x}_{.1}$			$\bar{x}_{.2}$			$\bar{x}_{.j}$	$\bar{x}_{.p}$				$\bar{\bar{x}}_{...}$

Tabella 6.1. Tabella incrociata metodo ANOVA.

Come accennato precedentemente nella (6.6), la *riproducibilità* del sistema di misura viene valutata considerando sia la variabilità dell'operatore che l'interazione tra componente e operatore che esegue la misura:

$$\sigma_{Op}^2 + \sigma_{C \times Op}^2 = \sigma_{Riproducibilità}^2$$

Passando alle somme dei quadrati degli scarti dalle medie, possiamo scrivere la precedente equazione come:

$$SS_{Riproducibilità} = SS_{Op} + SS_{C \times Op} \quad (6.18)$$

Tale quantità rappresenta la variazione risultante dalle misurazioni effettuate dai diversi operatori sul medesimo componente, utilizzando lo stesso strumento di misura.

Tuttavia, per il calcolo della *riproducibilità* è possibile notare che abbiamo ancora un termine ignoto e cioè la devianza dell'interazione tra "componente" e "operatore" ($SS_{C \times Op}$).

Attraverso il metodo ANOVA, in cui le devianze godono della proprietà additiva, è possibile ricavare l'ultima devianza incognita, relativa all'interazione tra i due fattori, a partire dai restanti 4 elementi.

Riprendendo la (6.9), è possibile esplicitarla secondo la devianza $SS_{C \times Op}$ come segue:

$$SS_{totale} = SS_C + SS_{Op} + SS_{C \times Op} + SS_\epsilon$$

da cui:

$$SS_{C \times Op} = SS_{totale} - SS_C - SS_{Op} - SS_\epsilon \quad (3.19)$$

Il numero di gradi di libertà inerenti all'interazione dei due fattori è dato dal prodotto del numero di operatori coinvolti (p) meno uno, per il numero dei componenti considerati (n) meno uno: $GDL(SS_{C \times Op}) = (p - 1)(n - 1)$

A questo punto, abbiamo tutti gli elementi per il calcolo delle medie quadratiche, dividendo semplicemente le singole somme dei quadrati degli scarti per i rispettivi GDL:

- $MS_C = \frac{SS_C}{n-1}$ (6.20)

- $MS_{Op} = \frac{SS_{Op}}{p-1}$ (6.21)

- $MS_{C \times Op} = \frac{SS_{C \times Op}}{(p-1)(n-1)}$ (6.22)

- $MS_\varepsilon \equiv MS_{Ripetibilità} = \frac{SS_\varepsilon}{np(m-1)}$ (6.23)

L'ANOVA a due fattori permette di testare la significatività dei fattori sulle misure rilevate tramite la statistica F. Il test può essere effettuato sia rispetto ai singoli fattori, che all'effetto combinato di entrambi.

I tre test per la verifica delle ipotesi sono spiegati di seguito:

1. Si verifica l'ipotesi nulla di “**nessuna differenza tra le medie del fattore ‘componente’**” contro l'ipotesi alternativa in cui non tutte le medie sono uguali.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n$$

$$H_1: \text{almeno una } \mu \text{ è diversa dalle altre}$$

La verifica dell'ipotesi viene effettuata tramite la statistica F così costruita:

$$F_{Componente} = \frac{MS_C}{MS_\varepsilon} \quad (6.24)$$

e confrontata con $F_{(n-1), np(m-1)}$, dove i pedici rappresentano appunto i gradi di libertà rispettivamente del numeratore e del denominatore della statistica test.

L'ipotesi nulla viene respinta se il rapporto supera il valore critico alla significatività α scelta.

2. Si verifica l'ipotesi nulla di **“nessuna differenza tra le medie del fattore ‘operatore’ ”** contro l'ipotesi alternativa in cui non tutte le medie sono uguali.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_p$$

$$H_1: \text{almeno una } \mu \text{ è diversa dalle altre}$$

La verifica dell'ipotesi viene effettuata tramite la statistica F così costruita:

$$F_{\text{Operatore}} = \frac{MS_{Op}}{MS_{\varepsilon}} \quad (6.25)$$

e confrontata con $F_{(p-1), np(m-1)}$.

L'ipotesi nulla viene respinta se il rapporto supera il valore critico alla significatività α scelta.

3. Si verifica l'ipotesi nulla di **“nessuna interazione tra i fattori ‘componente’ e ‘operatore’ ”** ai vari livelli, contro l'ipotesi alternativa in cui vi è interazione in almeno un livello.

$$H_0: (Componente \times Operatore)_{ij} = 0 \quad \forall i, j$$

$$H_1: (Componente \times Operatore)_{ij} \neq 0 \quad \text{per almeno un } ij$$

La verifica dell'ipotesi viene effettuata tramite la statistica F così costruita:

$$F_{\text{Componente} \times \text{Operatore}} = \frac{MS_{C \times Op}}{MS_{\varepsilon}} \quad (6.26)$$

e confrontata con $F_{(n-1)(p-1), np(m-1)}$.

L'ipotesi nulla viene respinta se il rapporto supera il valore critico alla significatività α scelta.

I risultati dell'ANOVA forniscono le basi per la stima delle varianze di ogni singola componente del modello (6.3). Le stime delle varianze vengono ottenute dal calcolo dei valori attesi delle medie quadratiche come segue (*Douglas C. Montgomery, 6th Edition*):

- $E(MS_C) = \sigma_{\varepsilon}^2 + m\sigma_{C \times Op}^2 + p m \sigma_C^2 \quad (6.27)$

- $E(MS_{Op}) = \sigma_{\varepsilon}^2 + m\sigma_{C \times Op}^2 + n m \sigma_{Op}^2 \quad (6.28)$

- $E(MS_{C \times Op}) = \sigma_{\varepsilon}^2 + m\sigma_{C \times Op}^2$ (6.29)

- $E(MS_{\varepsilon}) = \sigma_{\varepsilon}^2$ (6.30)

Da cui, procedendo per sostituzione, si ha:

- $\hat{\sigma}_{\varepsilon}^2 = MS_{\varepsilon}$ (6.31)

- $\hat{\sigma}_{C \times Op}^2 = \frac{MS_{C \times Op} - MS_{\varepsilon}}{m}$ (6.32)

- $\hat{\sigma}_{Op}^2 = \frac{MS_{Op} - MS_{C \times Op}}{nm}$ (6.33)

- $\hat{\sigma}_C^2 = \frac{MS_C - MS_{C \times Op}}{pm}$ (6.34)

A questo punto, è possibile stimare la percentuale di incidenza dei singoli elementi rispetto alla varianza totale, che è proprio lo scopo dello studio GAGE R&R.

Di seguito vengono elencate le percentuali di composizione della varianza totale.

- % di variazione dovuta allo STRUMENTO:

$$\frac{\hat{\sigma}_{Ripetibilità}^2}{\hat{\sigma}_{Totale}^2} \quad (6.35)$$

Con $\hat{\sigma}_{Ripetibilità}^2 \equiv \hat{\sigma}_{\varepsilon}^2$

- % di variazione dovuta all'OPERATORE

$$\frac{\hat{\sigma}_{Riproducibilità}^2}{\hat{\sigma}_{Totale}^2} \quad (6.36)$$

Con $\hat{\sigma}_{Riproducibilità}^2 = \hat{\sigma}_{Op}^2 + \hat{\sigma}_{C \times Op}^2$

- % di variazione complessiva del SISTEMA DI MISURA (Gage R&R):

$$\frac{\hat{\sigma}_{Ripetibilità}^2 + \hat{\sigma}_{Riproducibilità}^2}{\hat{\sigma}_{Totale}^2} \quad (6.37)$$

- % di variazione dovuta al COMPONENTE:

$$\frac{\hat{\sigma}_C^2}{\hat{\sigma}_{Totale}^2} \quad (6.38)$$

Tramite il metodo ANOVA a due vie è stato dunque possibile risalire all'incidenza del sistema di misura sulla variabilità totale osservata.

6.4. CASO STUDIO MSA IN UMBRAGROUP S.p.A

Dopo aver appurato con il team Qualità dell'azienda la necessità di effettuare uno studio del sistema di misura, poiché richiesto come deliverable dell'APQP relativo al programma Airbus, è stato costituito un team dedicato per svolgere le inerenti attività.

Le responsabilità del sottoscritto nello studio sono state relative al processamento dei dati ottenuti dalle misurazioni, all'offrire supporto per le attività di coordinazione del team, nonché a fornire, insieme agli specialisti, una valutazione del sistema di misura e all'individuazione di azioni correttive.

Il contesto di questa sezione della tesi è focalizzato sullo studio GAGE R&R eseguito su dei banchi prova automatici per uno specifico tipo di attuatore elettromeccanico prodotto dall'azienda.

6.4.1. PROGRAMMAZIONE DEGLI ESPERIMENTI

Lo svolgimento del progetto è stato portato avanti in smart-working a causa dell'emergenza COVID-19, per cui non mi è stato possibile essere fisicamente presente in azienda ed eseguire personalmente le misurazioni. In queste circostanze è stato fondamentale l'utilizzo del software Microsoft Teams il quale ha permesso il corretto coordinamento degli attori coinvolti.

Il primo passo effettuato è stato quello di creare un'apposita sezione di MS Teams dedicata esclusivamente al progetto, in cui sono stati caricati i documenti e aggiunti i membri del team. Nella sezione dedicata, tutti gli utenti che ne fanno parte, hanno la possibilità di leggere, caricare, modificare ed aggiornare i file.

Il team è composto dal personale dei reparti Qualità e Sala Prove (direttamente a contatto con i banchi di collaudo), nonché dal responsabile Montaggio & Collaudo degli attuatori.

Durante il primo colloquio con il team sono stati analizzati i banchi prova su cui eseguire lo studio. Trattandosi di banchi di collaudo automatici, utilizzati per testare e raccogliere dati inerenti al corretto funzionamento degli attuatori elettromeccanici, è stata ampiamente condivisa da tutto il team l'idea che l'impatto dell'operatore è pressoché inesistente nella rilevazione delle misure. L'attuatore, infatti, viene caricato

sul banco, fissato ai supporti dedicati, successivamente vengono collegati i cavi di alimentazione dell'attuatore e infine il banco esegue automaticamente tutti i test necessari, sotto la guida del programma del software di test. I risultati del test vengono visualizzati sul display e l'operatore provvede alla compilazione della documentazione digitale.

Data la poca rilevanza dell'operatore, l'analisi del sistema di misura ed in particolare lo studio GAGE R&R è stato condotto prendendo come riferimento i due banchi prova disponibili. La proprietà della *riproducibilità* del sistema è stata dunque valutata rispetto ai due banchi prova piuttosto che rispetto ai diversi operatori che eseguono le misurazioni.

Dopo aver asodato che lo studio GAGE R&R sarà condotto considerando i seguenti fattori:

- Attuatori elettromeccanici (componenti)
- Banchi prova (prendono il posto degli operatori nella procedura standard)

sono state analizzate le caratteristiche degli attuatori elettromeccanici che risultano essere più critiche. In sostanza è stato esaminato il documento "Acceptance Test Procedure" (ATP), il quale contiene l'elenco di tutte le misurazioni da effettuare, con le relative tolleranze, utili alla validazione del prodotto. La scelta è ricaduta sulle caratteristiche che presentano un range di tolleranza ristretto e per le quali un'eventuale 'fuori specifica' potrebbe compromettere seriamente la funzionalità dell'attuatore.

Le caratteristiche di studio selezionate sono:

1. Lunghezza *Pin to Pin* – RETRATTO
2. Lunghezza *Pin to Pin* – ESTESO
3. Gioco Antirrotazione
4. Gioco Radiale

I due banchi utilizzati per effettuare i test degli attuatori permettono di simulare le condizioni applicative reali, dunque, viene rigorosamente effettuata una calibrazione periodica della strumentazione.

Ciascun banco è suddiviso a sua volta in due sezioni:

- la prima sezione è stata progettata per la valutazione di caratteristiche relative all'attuazione dell'attuatore, come ad esempio: la lunghezza raggiunta dal braccio dell'attuatore, il tempo di attuazione, i valori di corrente e tensione, la corretta segnalazione di malfunzionamenti dell'attuatore quando esso viene sottoposto a condizioni di lavoro improprie, e molto altro.
- la seconda sezione è dedicata alla valutazione dei giochi.

Le caratteristiche Pin-To-Pin sia in posizione retratta sia estesa, vengono misurate sulla prima sezione dei banchi. Per lunghezza Pin-To-Pin si intende la distanza che intercorre tra i due attacchi estremi dell'attuatore, uno alla base di esso e l'altro in testa al braccio scorrevole. Per effettuare questo test, il componente viene montato sull'apposito supporto e fissato in maniera univoca, dunque, non vi è la possibilità che l'operatore abbia una qualche influenza sul posizionamento del componente. Successivamente, vengono collegati i cavi di alimentazione dell'attuatore e grazie ad una cella di carico è possibile settare la forza necessaria per la chiusura dei giochi. Tale forza viene impostata su 500N rispettivamente in compressione, nel caso della valutazione della distanza Pin-To-Pin retratto e, in trazione, per valutare la lunghezza tra i due pin in estensione. La misura viene rilevata tramite un encoder lineare assoluto³⁰ e stampata sul display.

Le caratteristiche dei giochi, come detto, vengono invece rilevate sulla seconda sezione dei banchi in cui è presente tutta la strumentazione necessaria per la valutazione sia del gioco antirotazione che del gioco radiale. Anche in questo caso è presente un apposito supporto su cui viene fissato il componente. Nel caso del gioco antirotazione, la strumentazione è composta da un mandrino oscillante che applica una coppia di 12,4 Nm al pin esterno dell'attuatore, prima in senso orario e successivamente in senso antiorario. La posizione angolare viene rilevata da un encoder rotativo monogiro³¹ posizionato sul pin dell'attuatore. Il gioco radiale viene invece misurato tramite due stantuffi posizionati rispettivamente sopra e sotto il pin dell'attuatore, i quali applicano una forza di circa 20 N prima in un verso e poi in quello opposto. L'entità del gioco,

³⁰ Trasduttore di posizione lineare opportunamente collegato all'oggetto di cui si vuole conoscere suddetta informazione. I dati vengono raccolti, sotto forma di impulsi elettrici, durante il moto traslatorio dell'oggetto e, una volta elaborati, ne determinano la posizione.

³¹ Trasduttore di posizione angolare che converte la posizione angolare del proprio albero di rotazione in impulsi elettrici i quali, appositamente elaborati, forniscono informazioni su posizione, velocità ed accelerazione angolare.

data dalla differenza tra gli spostamenti ottenuti nelle due direzioni, viene rilevato da un sensore a contatto con il pin stesso e visualizzato sul display.

La dimensione dell'esperimento è data da:

- $n=5$ (numero di attuatori utilizzati per lo studio);
- $p=2$ (numero di stazioni su cui effettuare le misure ripetute);
- $m=5$ (numero di ripetizioni della misurazione su ogni attutatore);

per un totale di $(npm) = (5 \times 2 \times 5) = 50$ misurazioni per ogni caratteristica selezionata.

Il numero di attuatori disponibili è esiguo, poiché derivano da una prima fase produttiva preliminare. Il programma Airbus relativo alla fornitura di attuatori elettromeccanici è stato sviluppato seguendo il processo APQP e attualmente si è giunti a cavallo tra la fase 3 e la fase 4 della metodologia, in cui bisogna validare il prodotto e il processo produttivo. Prima di procedere con la *first production run*, uno degli aspetti da tenere in considerazione in questa fase è proprio lo sviluppo di un'analisi del sistema di misura. Questa attività è di fondamentale importanza per poter effettuare una corretta analisi della capacità del processo quando si procederà con la prima produzione a regime. Infatti, grazie ad una corretta analisi del sistema di misura, sarà possibile tenere sotto controllo la variabilità del prodotto in uscita con dei dati più attendibili ed affidabili.

6.4.2. ESECUZIONE DELL'ESPERIMENTO

Definito il team, le variabili di studio e la dimensione del test, si è deciso di procedere con l'esperimento. I successivi incontri con il team sono serviti a:

- Monitorare le attività
- Ricevere aggiornamenti continui sullo stato di avanzamento delle misurazioni
- Esporre le eventuali problematiche riscontrate
- Essere certi del corretto adempimento delle procedure

- Avere la conferma da parte degli operatori che le condizioni del sistema di misura sono rimaste invariate durante tutto il periodo dell'esperimento

La prima problematica riscontrata è stata la diversa configurazione dei banchi prova. Essendo uno dei due banchi molto più recente, non era ancora stata effettuata un'adeguata calibrazione. Si è subito provveduto alla risoluzione del problema mediante il coinvolgimento di una società terza specializzata nella calibrazione e messa a punto di banchi prova automatici complessi. Tuttavia, per abbattere i tempi di durata dell'esperimento, è stato comunque richiesto agli addetti della sala prove di iniziare l'attività di misurazione sul banco "maturo", nell'attesa che il secondo banco venisse configurato.

Per comodità di trattamento dati è stato generato un foglio di calcolo Excel, appositamente studiato, sul quale gli operatori registrano solo i risultati inerenti alle caratteristiche in esame. La motivazione di questa scelta risiede nella maggior facilità di estrarre i risultati per inserirli successivamente nel software MINITAB, utilizzato per il processamento dati.

MINITAB è un software di analisi statistica molto completo, tramite cui è possibile effettuare studi complessi di controllo qualità e, nel caso specifico, rientra anche l'analisi del sistema di misura. L'output che fornisce il software per lo studio GAGE R&R è quello descritto nel paragrafo §6.3.2., in cui viene dimostrato il metodo ANOVA. Oltre ai risultati numerici, MINITAB genera automaticamente una serie di grafici che permettono di avere un'analisi più completa e trarre ulteriori conclusioni.

Gli operatori del reparto sala prove hanno eseguito 5 misurazioni ripetute per ognuno dei 5 attuatori su entrambi i banchi prova. Essendo una procedura automatica, una volta avviato il banco prova vengono effettuati tutti i test necessari. Gli operatori hanno dunque selezionato le misure relative alle caratteristiche individuate per lo studio e hanno provveduto alla compilazione dell'apposito file Excel.

I report delle misurazioni effettuate sono stati condivisi su Microsoft Teams in modo tale da poter essere accessibili da tutto il team.

6.5. RISULTATI

Come anticipato, il processamento dei dati pervenuti è stato effettuato con MINITAB. Il primo step per eseguire lo studio GAGE R&R consiste nell'impostazione del workspace del programma. Vengono selezionati: il numero di componenti da misurare ($n=5$), il numero di stazioni di misura ($p=2$) e il numero di misure ripetute su ogni componente ($m=5$). A questo punto, è possibile inserire le misure effettuate nelle apposite caselle, generate in modo automatico dal software.

Tramite il comando “*gage run chart*” il software genera l'omonimo grafico, il quale mostra tutte le osservazioni in funzione del componente e della stazione. Il grafico permette di fare una rapida valutazione su eventuali differenze nelle misure tra i diversi attuatori o tra le stazioni di misura utilizzate. Le varie osservazioni sono suddivise in riquadri che rappresentano i singoli componenti misurati. All'interno di ogni riquadro sono riportate le 5 misure effettuate dai due banchi prova per quel determinato componente, contrassegnate da: cerchio nero per la stazione 1 e quadrato rosso per la stazione 2. La media di tutte le osservazioni è raffigurata dalla linea centrale tratteggiata.

Dopo una prima analisi generale, è possibile entrare nel dettaglio. Lo studio delle componenti di variabilità che agiscono sulla variabilità totale osservata è sintetizzato dalle tre tabelle a doppia entrata che il comando *Gage R&R Study (Crossed)* di MINITAB restituisce come output.

Esse sono:

- *Two-way ANOVA Table With Interaction:*

la tabella espone i risultati relativi alla significatività dei fattori caratterizzanti lo studio: “Componente”, “Banco” e la loro interazione. Il procedimento analitico dello studio è spiegato nel paragrafo §6.3.

La tabella presenta sulle righe le varie componenti di variabilità del modello:

“Componente”, “Banco”, “Componente*Banco”, “Repeatability”, “Total”. Sulle colonne è invece indicato:

- “DF” rappresenta i gradi di libertà di ogni componente di variabilità
- “SS” fa riferimento alla somma dei quadrati degli scarti dalle medie
- “MS” sono le medie quadratiche
- “F” è il valore della statistica F
- “P” è il p-value

- Gage R&R per le componenti di variazione:
in questa tabella sono riportate le stime delle componenti di variazione che formano la varianza complessiva (VarComp), ottenute analiticamente applicando le relazioni da (6.31) a (6.34). MINITAB suddivide la varianza totale nelle diverse cause di variabilità, ed in particolare in:
 - *Total Gage R&R*, il quale si riferisce allo strumento di misura, che a sua volta viene ulteriormente scomposto in *Repeatability* e *Reproducibility*
 - *Part-To-Part*, che rappresenta la stima della variabilità tra i componenti
 L'ultima colonna della tabella, contrassegnata con *%Contribution*, contiene inoltre le percentuali di incidenza di ogni fattore come indicato nelle relazioni da (6.35) a (6.38).

- Gage R&R per le deviazioni standard:
la tabella restituisce, per ogni componente di variabilità di cui sopra, i seguenti output:
 - *StdDev (SD)*: deviazioni standard delle varie componenti
 - *Study Var (6*SD)*: 6 volte il valore delle deviazioni standard utile a coprire il 99,73% del totale delle osservazioni
 - *% Study Var (%SV)*: rapporto percentuale tra la deviazione standard di ogni singolo elemento e la deviazione standard totale

Il vantaggio nell'utilizzare la deviazione standard è dovuto al fatto che i risultati dello studio presentano la stessa unità di misura della caratteristica analizzata, permettendo un confronto diretto.

Oltre alle tabelle, MINITAB fornisce anche un supporto grafico dei risultati, tali da completare l'analisi.

I grafici generati dal software sono (dall'alto verso il basso e da sinistra a destra):

- Components of Variation:
è la rappresentazione grafica della tabella *Gage R&R*. Il grafico permette di confrontare la *%Contribution* con la *%Study Var (%SV)* per i quattro elementi:
 - *Repeatability*: percentuale di variabilità dovuta allo strumento di misura
 - *Reproducibility*: percentuale di variabilità dovuta alla stazione su cui vengono effettuate le misure

- *Gage R&R*: rappresenta la somma dei due contributi *Repeatability* e *Reproducibility*
- *Part-to-Part*: percentuale di variabilità dovuta all'effettiva diversità dei componenti misurati

Gli istogrammi offrono un supporto visivo della distribuzione della varianza complessiva evidenziata dalle tabelle Gage R&R.

- *R Chart by Banco:*

mostra il grado di *ripetibilità* del sistema attraverso la valutazione della coerenza delle misure effettuate dalla singola stazione sui vari attuatori. Questo grafico è proprio la carta di controllo dei *Range*, i cui punti sono ottenuti come differenza tra il valore massimo ed il valore minimo del gruppo di misure effettuate sul determinato componente. La carta dei *Range* è suddivisa in due gruppi, ognuno dei quali corrisponde ai valori ottenuti dalle misurazioni sul primo e sul secondo banco prova. Per la determinazione dei limiti di controllo viene utilizzata la varianza *within group* e se tutti i punti sono compresi tra i limiti di controllo, il sistema di misura può essere considerato *ripetibile*, dunque le due stazioni non presentano problemi nell'effettuare le misure dei componenti.

- *Xbar chart by Banco:*

è la carta di controllo delle medie e mostra le misurazioni in relazione alla media complessiva. La carta di controllo delle medie nello studio *Gage R&R* assume un significato diverso rispetto al suo consueto utilizzo. I limiti di controllo della carta sono infatti calcolati sulla base della varianza dello strumento di misura, e quindi fanno riferimento alla *ripetibilità*. Ciò significa che la presenza di punti fuori controllo implica che il sistema di misura è in grado di discriminare correttamente le parti. In altre parole, se almeno il 50% dei punti cade fuori i limiti di controllo è possibile affermare che la varianza introdotta dallo strumento di misura è inferiore alla variabilità dovuta all'effettiva differenza tra le parti misurate.

- *“Caratteristica” by Componente:*

il grafico raccoglie tutte le misurazioni effettuate sui componenti senza considerare la distinzione delle misure effettuate su un banco prova piuttosto che

l'altro. Viene valutata la dispersione delle misure rilevate su ogni componente, escludendo la stazione che ha effettivamente eseguito la misura. In questo modo è possibile fare delle considerazioni sull'influenza delle stazioni di misura, in quanto una concentrazione dei dati in prossimità del valor medio implica che le due stazioni misurano allo stesso modo.

- “Caratteristica” by Banco:
situazione opposta rispetto al grafico precedente. In questo caso vengono considerate le misure effettuate sulle due stazioni, escludendo la distinzione tra i componenti misurati. È una rappresentazione del modo in cui misurano le due stazioni. Quanto più la linea che unisce i valori medi dei due gruppi di misure è approssimabile ad un segmento orizzontale, tanto più le due stazioni misurano in ugual modo.
- Componente*Banco Interaction:
in questo grafico viene rappresentata l'interazione tra le stazioni di misura ed i componenti misurati. I punti del grafico si riferiscono alle medie delle misure ottenute su ogni stazione, per ognuno dei componenti misurati. Le stazioni di misura sono rappresentate dalle due linee spezzate e contrassegnate con cerchio nero e quadrato rosso rispettivamente per la stazione 1 e la stazione 2. Se le due linee che congiungono la media delle misure seguono lo stesso andamento, allora le due stazioni misurano allo stesso modo. Viceversa, nel caso in cui le due linee si intersecano o divergono, significa che vi è una qualche dipendenza tra le misure che una data stazione rileva su un determinato componente.

Di seguito vengono riportati i risultati dell'analisi suddivisi per caratteristica. Vengono analizzate prima le caratteristiche misurate sulla sezione 1 dei banchi e successivamente quelle rilevate sulla sezione 2.

La descrizione delle due sezioni dei banchi prova e del loro funzionamento è riportata nel paragrafo §6.4.1.

6.5.1. PIN TO PIN – RETRATTO

Il grafico GAGE RUN CHART permette di effettuare delle considerazioni su eventuali trend delle misure effettuate dalle stazioni sui diversi componenti. Nel caso in esame è possibile notare una bassa variazione tra le misure rilevate dalle due stazioni sui singoli

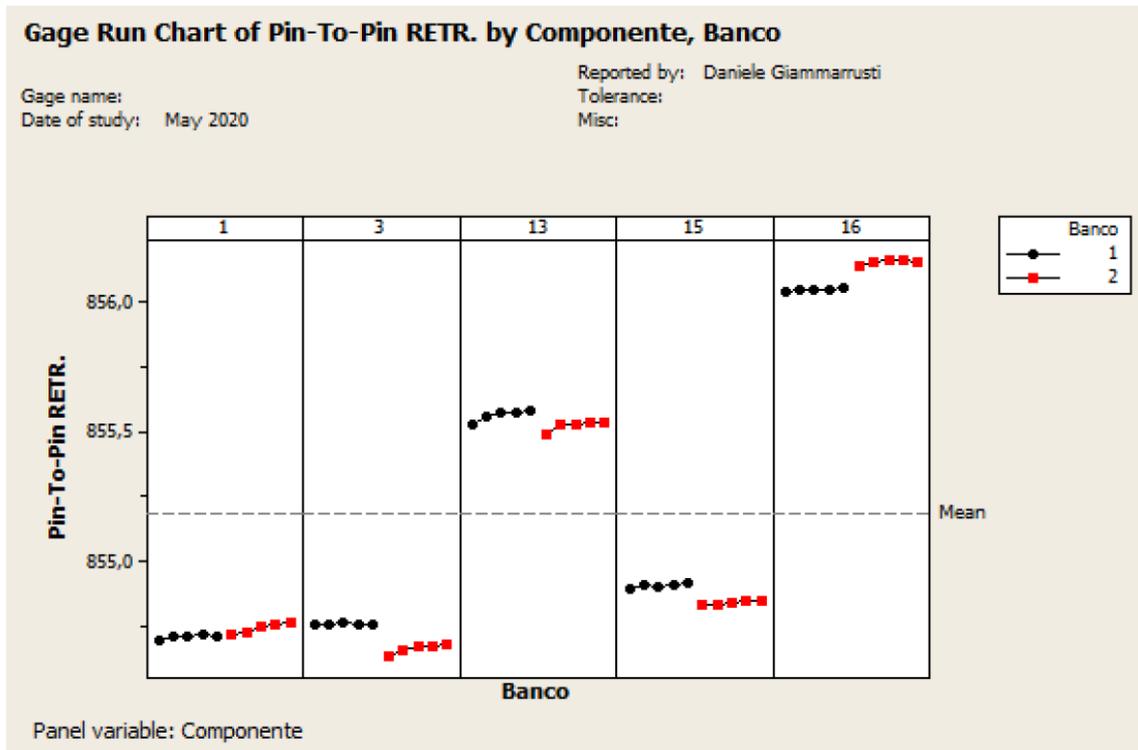


Figura 6.3. Gage Run Chart per Pin-To-Pin Retratto.

componenti, che suggerisce una buona *ripetibilità*. Tuttavia, entrambe le stazioni tendono a sovrastimare di poco le misure con l'avanzare delle ripetizioni, infatti dal grafico si evidenzia un leggero trend crescente delle misure rilevate sullo stesso componente. La variazione “between groups” che mette in relazione le misure effettuate dalle due stazioni sui medesimi componenti sembra essere poco rilevante, ma è possibile notare un valore delle misure rilevate dal secondo banco sui componenti 3 e 15 leggermente inferiori rispetto a quelle rilevate sul primo banco, e viceversa leggermente maggiori sui componenti 1 e 16.

Dalla tabella ANOVA with interaction notiamo un valore del P-value relativo al termine di interazione tra Banco e Componente prossimo a zero, il che lascia intendere che potrebbe esserci una qualche dipendenza tra la misura rilevata da una determinata stazione di misura su un dato componente.

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Componente	4	15,0559	3,76397	223,467	0,000
Banco	1	0,0018	0,00176	0,105	0,762
Componente * Banco	4	0,0674	0,01684	94,030	0,000
Repeatability	40	0,0072	0,00018		
Total	49	15,1322			

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0,003512	0,93
Repeatability	0,000179	0,05
Reproducibility	0,003333	0,88
Banco	0,000000	0,00
Banco*Componente	0,003333	0,88
Part-To-Part	0,374712	99,07
Total Variation	0,378224	100,00

Tabella 6.2. Tabella ANOVA (sopra) e Gage R&R della varianza stimata per Pin-To-Pin retratto (sotto).

La tabella GAGE R&R relativa alla varianza complessiva stimata mostra un'incidenza della variabilità dovuta allo strumento molto bassa, dell'ordine dello 0,93%. Questo dato è molto confortante in quanto la maggior parte della variabilità risultante dall'analisi è imputabile all'effettiva differenza dei pezzi misurati, per una quota del 99,07%.

Nella tabella GAGE R&R delle deviazioni standard, il risultato è confermato, anche se di poco superiore rispetto alla tabella precedente. Infatti, la percentuale della Study Var riferita al sistema di misura è pari al 9,64%. Il risultato è anche in questo caso ottimo.

La metrica di valutazione per affermare che lo strumento è adatto alla rilevazione delle misure, come suggerisce l'IAQG, è la seguente:

- %Contribution della voce Total Gage R&R \leq 10%
- %Study Var della voce Total Gage R&R \leq 30%

Se ciò si verifica, allora non è indispensabile approfondire lo studio in quanto il sistema di misura si comporta in maniera ottimale.

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0,059262	0,35557	9,64
Repeatability	0,013384	0,08030	2,18
Reproducibility	0,057731	0,34639	9,39
Banco	0,000000	0,00000	0,00
Banco*Componente	0,057731	0,34639	9,39
Part-To-Part	0,612137	3,67282	99,53
Total Variation	0,614999	3,69000	100,00

Number of Distinct Categories = 14

Tabella 6.3. Tabella Gage R&R delle deviazioni standard per Pin-To-Pin retratto

Un'informazione utile a completare la valutazione del sistema di misura è il “number of distinct categories” che rappresenta il potere discriminatorio del sistema di misura. In pratica è una stima di quanti gruppi separati di parti il sistema saprebbe distinguere. Un buon sistema di misura dovrebbe saper distinguere almeno 5 gruppi separati. Nel caso in esame tale numero è pari a 14, quindi è possibile concludere che il sistema di misura ha un buon potere discriminatorio.

Per completezza si riportano anche i risultati forniti dai grafici generati da MINITAB.

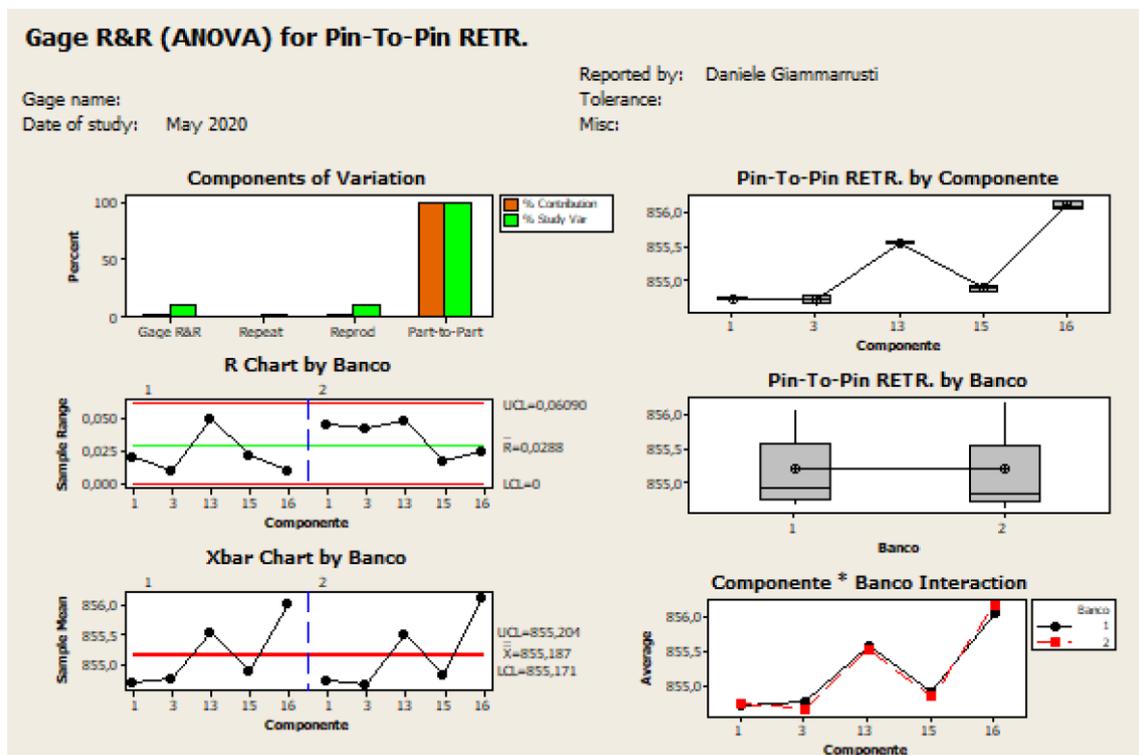


Figura 6.4. Grafici MINITAB per Pin-To-Pin retratto.

Il primo grafico intitolato “Componentns of Variation” evidenzia un contributo della variabilità part-to-part molto più accentuata rispetto a quella Gage R&R, a conferma di quanto espresso numericamente nella tabella Gage R&R in riferimento alla %Contribution e %Study Var.

La carta R presenta tutti i punti all'interno dei limiti, il che è positivo, però si nota una differenza di variabilità tra le misure effettuate dai due banchi sui componenti identificati dai serial number 1, 3 e 16. In particolare, le misure dei tre componenti rilevate sul banco 2 presentano una variabilità maggiore. Tuttavia, essendo tutti i punti all'interno dei limiti di controllo, si può dedurre che la *ripetibilità* del sistema di misura è molto buona.

La carta Xbar ha tutti i punti fuori dai limiti di controllo. È opportuno ricordare che la carta mette a confronto la reale differenza tra le parti misurate, con la *ripetibilità* del sistema. In pratica i limiti di controllo della carta Xbar rappresentano la variabilità dello strumento di misura calcolata sulla base della carta R. La variabilità tra le parti è sensibilmente maggiore della variabilità dello strumento, confermato dalla totalità dei punti al di fuori dei limiti di controllo, dunque, la *riproducibilità* del sistema di misura risulta essere affidabile.

Il grafico “Pin-To-Pin RETR. by Componente”, il quale mostra le misure rilevate da entrambe le stazioni su ogni singolo componente, evidenzia una piccola dispersione dei punti attorno al valore medio delle misure. Ciò implica che il sistema di misura si comporta molto bene e possono essere escluse cause di variabilità imputabili alla stazione di misura.

Il grafico “Pin-To-Pin RETR. by Banco” mette in relazione la totalità delle misure rilevate dalle due stazioni di misura. Essendo la linea che congiunge le medie delle misure rilevate sui due banchi parallela all'asse x, e quindi orizzontale, è possibile affermare che le due stazioni misurano in modo omogeneo.

Il grafico che rappresenta l'interazione tra “Componente” e “Banco” non presenta significative differenze tra le medie delle misure rilevate dai due banchi su ogni componente, a patto una leggera discordanza per i componenti identificati con il serial number 3 e 16. Questa considerazione è visibile anche dal grafico “Pin-To-Pin RETR. by Componente”, in cui i due serial number presentano una dispersione dei valori

attorno alla media leggermente maggiore degli altri. Tuttavia, non è tale da suggerire ulteriori approfondimenti del caso.

6.5.2. PIN TO PIN – ESTESO

La lunghezza rilevata sulla corsa massima raggiunta dall'attuatore presenta dei valori che si comportano in maniera più o meno simile a quelli rilevati sull'attuatore completamente retratto, ma si possono fare delle considerazioni aggiuntive.

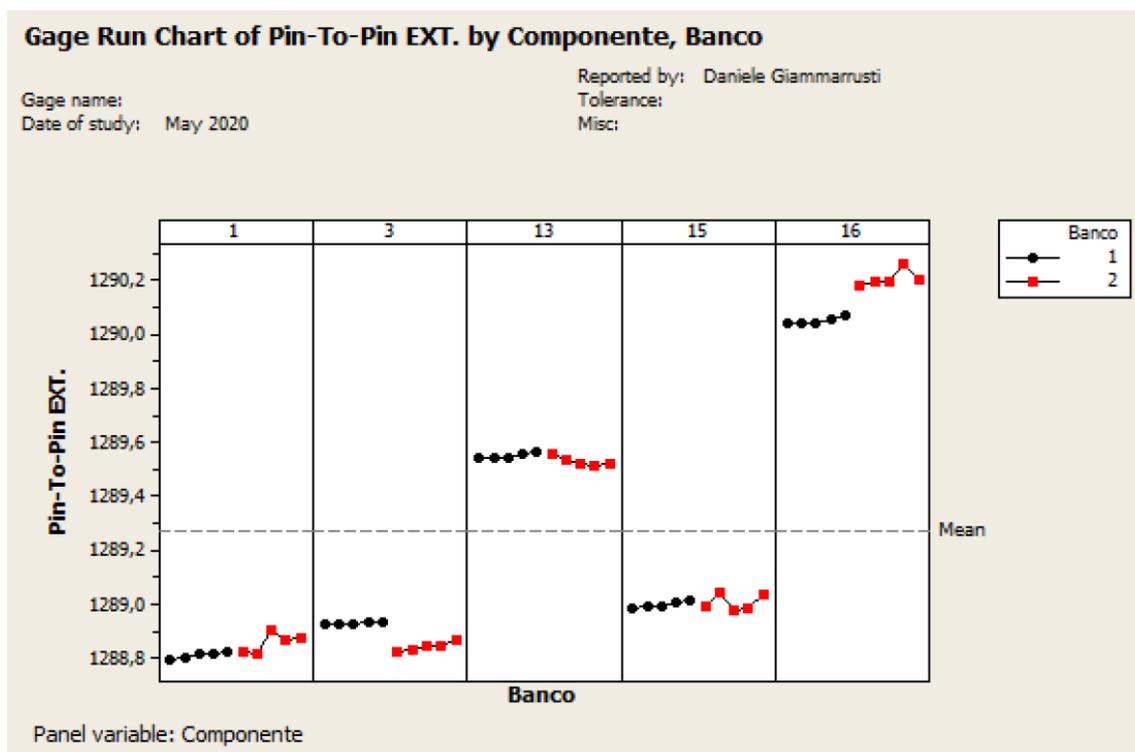


Figura 6.5. Gage Run Chart per Pin-To-Pin esteso.

Esaminando il GAGE RUN CHART, si nota che le misure rilevate sul banco 2 presentano delle oscillazioni per i componenti 1, 15 e 16. Questa situazione potrebbe essere dovuta al fatto che le misure sono state rilevate in momenti temporali diversi, oppure potrebbe essere una caratteristica intrinseca degli elementi selezionati, i quali durante l'estensione potrebbero aver presentato dei piccoli problemi. Quest'ultima considerazione è plausibile poiché tutti gli attuatori considerati sono in fase di test. Un'ultima causa potrebbe essere dovuta al banco prova, anche se sarebbe da escludere

poiché sia le misure rilevate sugli altri componenti (3 e 13), sia quelle effettuate per la caratteristica “Pin-To-Pin retratto”, non presentano tale andamento.

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Componente	4	12,2320	3,05800	152,192	0,000
Banco	1	0,0054	0,00541	0,269	0,631
Componente * Banco	4	0,0804	0,02009	46,085	0,000
Repeatability	40	0,0174	0,00044		
Total	49	12,3352			

Alpha to remove interaction term = 0,25

Tabella 6.4. Tabella ANOVA per Pin-To-Pin esteso.

La tabella ANOVA suggerisce che anche per questa caratteristica vi è una possibile interazione tra “Componente” misurato e “Banco”, poiché il P-value è prossimo a zero. Inoltre, il P-value del fattore “Banco” è di molto superiore alla significatività alpha scelta di 0.05, dunque possiamo dedurre che non vi è sostanziale differenza tra le medie delle misure rilevate dai banchi, le quali sono statisticamente simili.

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0,004367	1,42
Repeatability	0,000436	0,14
Reproducibility	0,003931	1,28
Banco	0,000000	0,00
Banco*Componente	0,003931	1,28
Part-To-Part	0,303790	98,58
Total Variation	0,308158	100,00

Tabella 6.5. Tabella Gage R&R della varianza stimata per Pin-To-Pin esteso.

Analizzando la tabella Gage R&R della varianza complessiva, la variazione dovuta allo strumento di misura risulta essere molto bassa, ed il contributo maggiore di tale variazione è rappresentato dalla *riproducibilità* del sistema. La componente di variabilità dovuta alle effettive differenze tra le parti è del 98,58%, quindi questo dato presuppone una buona capacità del sistema di misura.

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0,066086	0,39652	11,90
Repeatability	0,020881	0,12528	3,76
Reproducibility	0,062701	0,37621	11,30
Banco	0,000000	0,00000	0,00
Banco*Componente	0,062701	0,37621	11,30
Part-To-Part	0,551172	3,30703	99,29
Total Variation	0,555119	3,33072	100,00

Number of Distinct Categories = 11

Tabella 6.6. Tabella Gage R&R delle deviazioni standard per Pin-To-Pin esteso.

Passando alla sezione della tabella GAGE R&R relativa alle deviazioni standard, la %Study Var relativa allo strumento risulta essere dell'11,90%. Anche in questo caso il risultato è molto al di sotto della soglia limite del 30%, per cui è confermato il corretto funzionamento del sistema di misura nello svolgere il compito assegnatogli.

Il potere discriminatorio del sistema di misura, per questa caratteristica, risulta essere ancora molto buona, poiché il sistema è in grado di distinguere 11 gruppi distinti di parti.

L'output grafico di MINITAB restituisce i seguenti risultati.

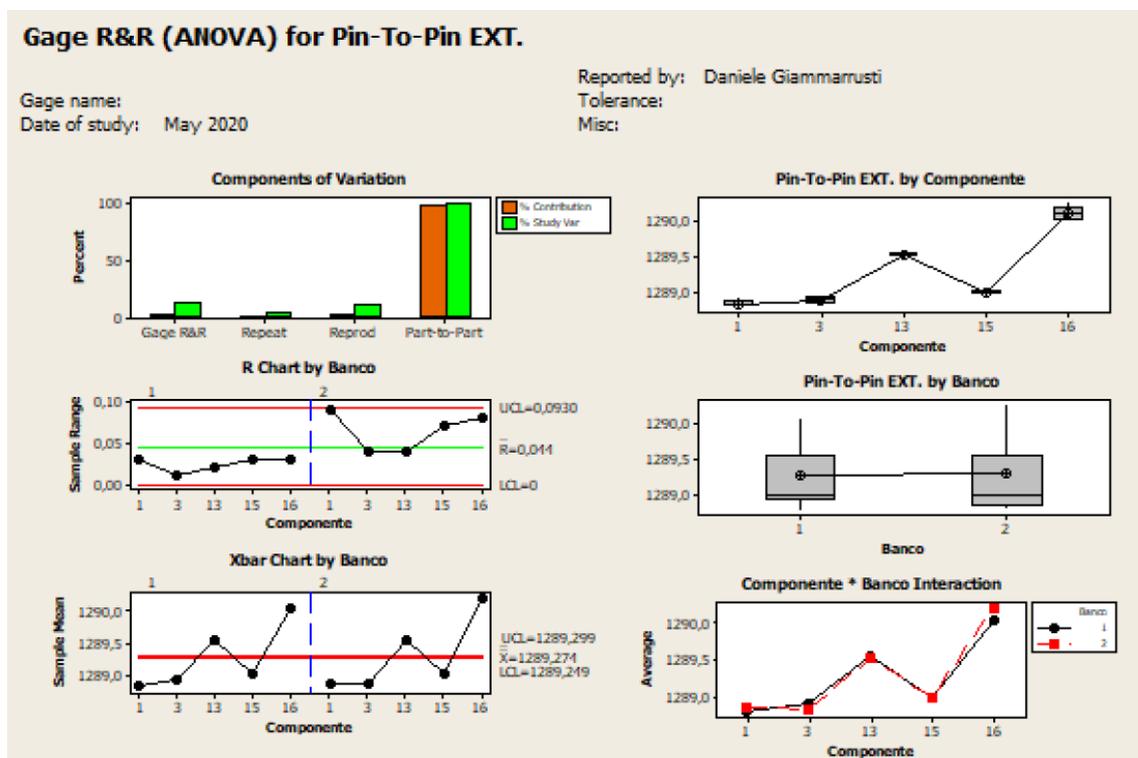


Figura 6.6. Grafici MINITAB per Pin-To-Pin esteso.

Dal grafico “Components of Variation” si può osservare che il contributo maggiore della variabilità totale è dovuta alle effettive differenze tra i componenti, e la proprietà del sistema di misura che incide di più nella determinazione della sua variabilità è la *riproducibilità*.

La carta R presenta tutti i punti all'interno dei limiti di controllo tranne il punto relativo al componente 1 misurato dal banco 2, il quale giace proprio sul limite. Questo comportamento del banco 2 è evidenziato anche dal grafico “Gage Run Chart” esaminato precedentemente, in cui si era notata una variazione maggiore per i componenti 1, 15 e 16. D'altronde, si può concludere che la *ripetibilità* dello strumento di misura è tutto sommato buona vista l'assenza di punti al di fuori dei limiti di controllo.

La carta Xbar ha tutti i punti al di fuori dei limiti di controllo, perciò, la variabilità tra le parti è molto maggiore di quella del sistema di misura, il che auspica una buona *riproducibilità* del sistema.

Il grafico “Pin-To-Pin EXT. by Componente” non lascia presagire alcun comportamento anomalo dei due banchi prova, poiché non vi è elevata dispersione dei punti attorno al loro valor medio tranne che per il componente 16, le cui misure rilevate da entrambi i banchi risultano essere leggermente più disperse.

Per quanto riguarda il modo in cui misurano i due banchi, il grafico “Pin-To-Pin EXT. by Banco” evidenzia una leggera sovrastima della media delle misure rilevate dal banco 2, che molto probabilmente è dovuta ai componenti 1, 15 e 16. Ad ogni modo, il segmento che congiunge le due medie, è alquanto parallelo all'asse x, dunque, non c'è motivo di escludere che i due banchi misurano in maniera simile la caratteristica in esame.

Il grafico dell'interazione tra “Componente” e “Banco” evidenzia lo stesso andamento delle due linee spezzate che congiungono i valori medi delle misure rilevate dai due banchi, tranne che un leggero scostamento per il componente 3 ed il componente 16. Questa situazione è analoga alla caratteristica “Pin-To-Pin retratto”, il che fa presagire che in realtà vi è una qualche dipendenza tra le misure che la stazione 2 rileva sui componenti 3 e 16.

Il comportamento della sezione 1 dei banchi, dalle analisi effettuate, non presenta problemi nel rilevare le misure. La variabilità imputabile al sistema di misura è molto

bassa rispetto a quella dovuta alle effettive differenze dei componenti, per cui è possibile validare il sistema di misura ed utilizzarlo senza problemi per determinare successivamente la capacità del processo produttivo in relazione alle due caratteristiche analizzate.

A questo punto si passa alla valutazione della sezione 2 dei banchi prova, sui quali vengono rilevati i giochi degli attuatori.

6.5.3. GIOCO ANTIROTAZIONE

I risultati dell'analisi riferita alla valutazione del gioco antirotazione non sono molto soddisfacenti.

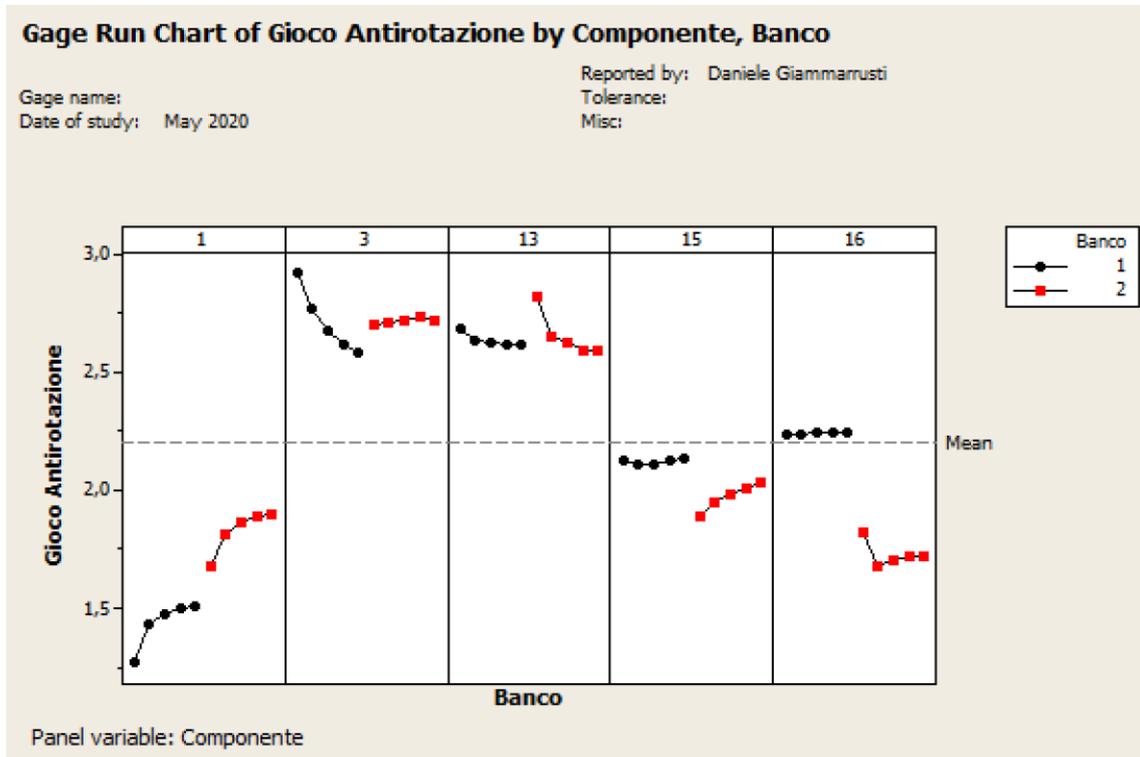


Figura 6.7. Gage Run Chart per Gioco Antirotazione.

Dal grafico “Gage Run Chart” è possibile osservare un comportamento anomalo dei due banchi nella rilevazione delle misure, infatti sono presenti dei trend alquanto strani. In particolare, il set di misure rilevate dal banco 1 sul componente 3, presenta un evidente trend decrescente mentre il banco 2, sul medesimo componente, rileva misure molto simili tra loro. Per gli altri componenti, invece, sembra esserci un problema nella rilevazione della prima misura soprattutto per il banco 2, la quale risulta essere sempre molto diversa rispetto alle restanti 4 misurazioni.

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Componente	4	8,59590	2,14898	8,0706	0,034
Banco	1	0,03100	0,03100	0,1164	0,750
Componente * Banco	4	1,06509	0,26627	50,0776	0,000
Repeatability	40	0,21269	0,00532		
Total	49	9,90469			

Alpha to remove interaction term = 0,25

Tabella 6.7. Tabella ANOVA per Gioco Antirotazione.

Analizzando la tabella ANOVA, i P-value relativi al componente e all'interazione Componente*Banco risultano essere molto bassi e quindi significativi, mentre il P-value del fattore banco è molto maggiore di 0,05.

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0,057508	23,40
Repeatability	0,005317	2,16
Reproducibility	0,052191	21,24
Banco	0,000000	0,00
Banco*Componente	0,052191	21,24
Part-To-Part	0,188270	76,60
Total Variation	0,245779	100,00

Tabella 6.8. Tabella Gage R&R della varianza stimata per Gioco Antirotazione.

La tabella GAGE R&R relativa alla scomposizione della varianza totale stimata restituisce un valore della percentuale di incidenza del sistema di misura molto superiore alla soglia fissata del 10%. Infatti, la %Contribution della voce "Total Gage R&R" è del 23,40%, il cui 21,24% è imputato alla *riproducibilità*.

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0,239809	1,43886	48,37
Repeatability	0,072919	0,43752	14,71
Reproducibility	0,228454	1,37072	46,08
Banco	0,000000	0,00000	0,00
Banco*Componente	0,228454	1,37072	46,08
Part-To-Part	0,433901	2,60341	87,52
Total Variation	0,495761	2,97456	100,00

Number of Distinct Categories = 2

Tabella 6.9. Tabella Gage R&R delle deviazioni standard per Gioco Antirotazione.

Tale risultato viene ampiamente confermato nella seconda sezione della tabella Gage R&R, relativa alle percentuali di incidenza delle deviazioni standard. La %Study Var della voce “Total Gage R&R” è del 48,37%; percentuale molto al di sopra del limite di accettabilità del 30%. Anche in questo caso, come ovvio che sia, è la *riproducibilità* ad avere maggior incidenza (46,08%). Il numero di gruppi distinti di parti che lo strumento di misura è in grado di distinguere è esiguo, per cui il suo potere discriminatorio non è accettabile. Questa prima analisi suggerisce che lo strumento di misura adottato non svolge bene la sua mansione nella rilevazione dei giochi degli attuatori.

A tal proposito, analizzando i grafici generati dal software, si cerca di risalire ad eventuali cause che hanno portato a risultati insoddisfacenti.

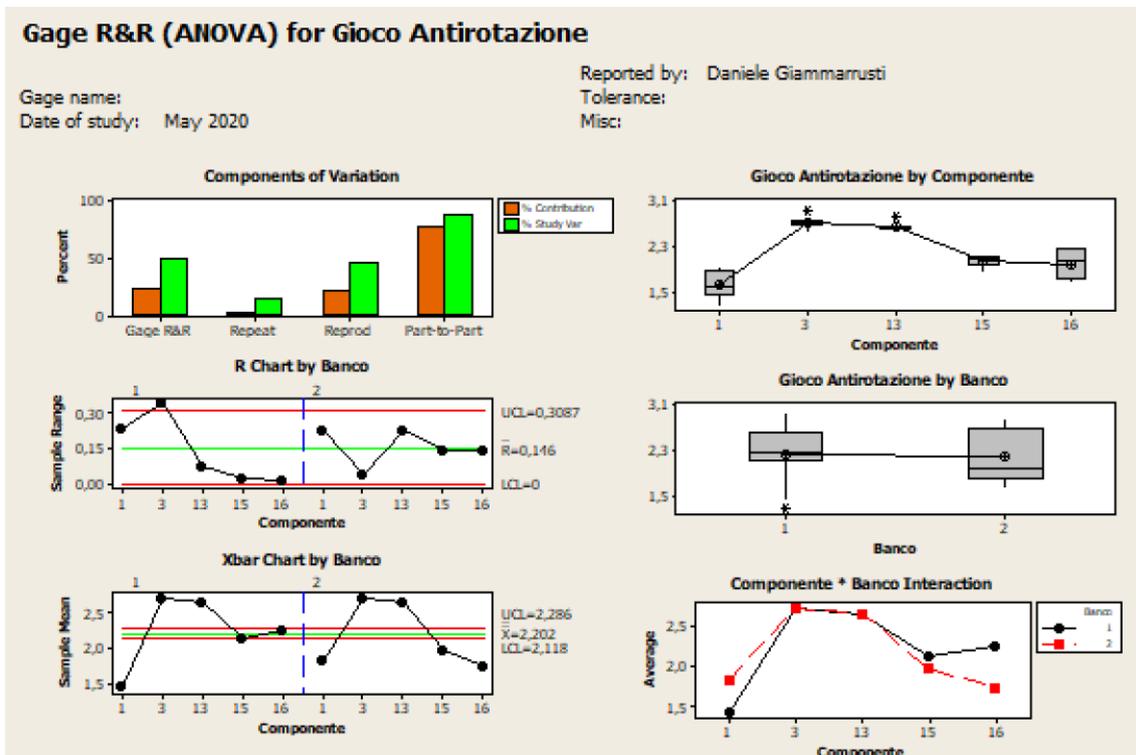


Figura 6.8. Grafici MINITAB per Gioco Antirotazione.

I grafici confermano quanto riportato nelle tabelle. Dal grafico “Components of Variation”, la quota di variabilità totale dovuta allo strumento di misura è molto rilevante.

La carta R non risulta essere in controllo poiché il componente 3 misurato dal banco 1 presenta un valore del range molto elevato, tale da posizionarlo fuori dai limiti di controllo. Il comportamento anomalo nella rilevazione delle misure del componente 3 sul banco 1 è stato osservato anche nel grafico “Gage Run Chart”, in cui si nota un significativo trend decrescente delle misure. Questa situazione impatta sulla *ripetibilità* dello strumento.

Nella carta Xbar, nonostante la maggior parte dei punti sia al di fuori dei limiti di controllo, le due linee spezzate non seguono lo stesso andamento. In particolare, vi sono 3 punti su 5 che differiscono tra loro (1, 15, 16), dunque lo strumento non gode di una buona *riproducibilità* delle misure.

Il grafico “Gioco Antirrotazione by Componente” evidenzia una maggiore dispersione delle misure rilevate dai 2 banchi sui componenti 1 e 16, per cui potrebbero esserci dei problemi relativi a questi 2 elementi specifici del campione. Inoltre, è possibile osservare i due punti isolati sul componente 3 e 13, che fanno riferimento alla prima misura rilevata rispettivamente sul banco 1 e sul banco 2, come mostrato dal grafico “Gage Run Chart”.

Il modo in cui la caratteristica in esame viene misurata dai due banchi non è totalmente speculare in quanto il segmento che collega le due medie non è perfettamente orizzontale. Inoltre, è presente un punto isolato sul banco 1 che suggerisce una qualche difficoltà del banco nel rilevare la misura su qualche componente, probabilmente fa riferimento al componente contrassegnato dal serial number 1.

Per la valutazione dell'interazione, raffigurata nell'ultimo grafico, si nota che le due linee spezzate non seguono lo stesso andamento e divergono in corrispondenza dei componenti 1, 15 e 16. Questa situazione fa presagire che ci sia una qualche dipendenza tra le misure rilevate da uno specifico banco sui componenti appena citati.

Da quanto analizzato, l'eccessiva incidenza della variabilità dello strumento di misura lascia intendere che esso non sia propriamente adatto alla corretta determinazione del

gioco antirotazione. La scarsa *riproducibilità* del sistema di misura potrebbe tuttavia essere dovuta anche ad un fattore intrinseco agli attuatori. In particolare, si è cercato di circoscrivere le cause di tale variabilità coinvolgendo i tecnici del montaggio attuatori. Dal brainstorming è emerso che una possibile spiegazione al fatto che le misure rilevate siano visibilmente differenti tra loro, risiede nel tipo di materiale con cui è stata realizzata la boccola ellittica antirotazione degli attuatori. Essa è composta di materiale plastico, per cui ogni attuatore potrebbe essere stato sottoposto a un numero diverso di cicli di attuazione, il che potrebbe aver inciso in maniera differente sul degradamento delle singole boccole. Di conseguenza, boccole più o meno usurate, portano ad una rilevazione del valore gioco più o meno accentuato. Lo studio di questa caratteristica richiede maggiori approfondimenti per poter validare lo strumento di misura utilizzato. Una possibile strada da intraprendere consiste nel ripetere l'esperimento dopo aver fissato un numero univoco di cicli di attuazione per tutti gli attuatori, in modo tale che essi siano rodati alla stessa maniera. L'alternativa, leggermente più dispendiosa ma che sembra essere maggiormente condivisa, consiste nella sostituzione dell'attuale boccola ellittica in plastica con una realizzata in materiale metallico. Anche in questo caso, tuttavia, converrebbe effettuare un rodaggio comune prima di ripetere l'esperimento.

Per avere una valutazione più completa si procede anche con l'analisi del gioco radiale, in modo tale da capire come si comporta complessivamente l'intera sezione dei banchi prova destina alla determinazione dei giochi.

6.5.4. GIOCO RADIALE

Quanto emerso dall'analisi del gioco antirotazione si ripropone in maniera più accentuata per il gioco radiale.

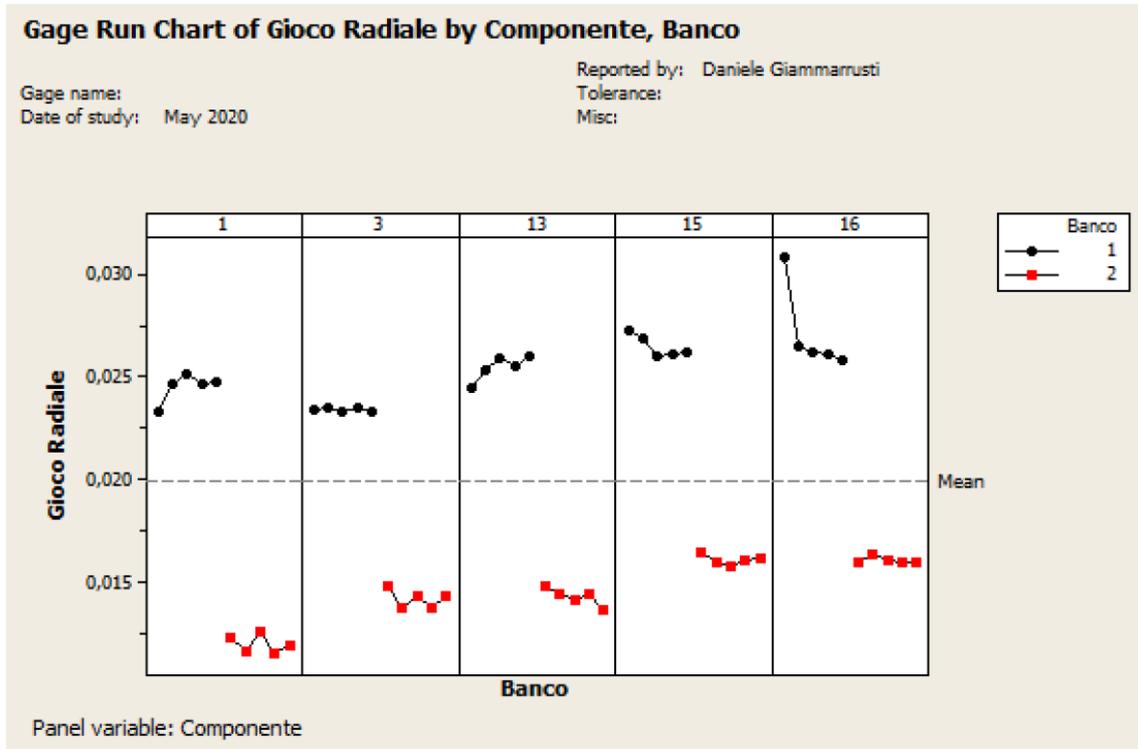


Figura 6.9. Gage Run Chart per Gioco Radiale.

Dal “Gage Run Chart” è evidente che i due banchi rilevano misure totalmente differenti sui singoli componenti. In particolare, le misure effettuate dal banco 1 giacciono tutte al di sopra della linea media, mentre quelle del banco 2 tutte al di sotto.

Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Componente	4	0,0000853	0,0000213	6,144	0,053
Banco	1	0,0014786	0,0014786	425,960	0,000
Componente * Banco	4	0,0000139	0,0000035	5,513	0,001
Repeatability	40	0,0000252	0,0000006		
Total	49	0,0016030			

Alpha to remove interaction term = 0,25

Tabella 6.10. Tabella ANOVA per Gioco Radiale.

Dalla tabella ANOVA risulta che i fattori “Componente”, “Banco”, nonché la loro interazione, presentano un P-value prossimo a zero, dunque sono tutti statisticamente significativi. A differenza delle precedenti analisi, in questo caso è presente anche la significatività del fattore “Banco”, per cui si ha la conferma che le medie delle misure rilevate dai due banchi sono statisticamente differenti.

Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0,0000602	97,12
Repeatability	0,0000006	1,02
Reproducibility	0,0000596	96,10
Banco	0,0000590	95,19
Banco*Componente	0,0000006	0,92
Part-To-Part	0,0000018	2,88
Total Variation	0,0000620	100,00

Tabella 6.11. Tabella Gage R&R della varianza stimata per Gioco Radiale.

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0,0077590	0,0465543	98,55
Repeatability	0,0007935	0,0047608	10,08
Reproducibility	0,0077184	0,0463102	98,03
Banco	0,0076815	0,0460888	97,56
Banco*Componente	0,0007539	0,0045232	9,58
Part-To-Part	0,0013362	0,0080174	16,97
Total Variation	0,0078733	0,0472396	100,00

Number of Distinct Categories = 1

Tabella 6.12. Tabella Gage R&R delle deviazioni standard per Gioco Radiale.

La tabella “Gage R&R” del gioco radiale restituisce un risultato molto allarmante. La %Contribution della varianza complessiva inerente allo strumento di misura è del 97,12%, mentre %Study Var, sempre relativo alla voce Total Gage R&R risulta essere

del 98,55%. In entrambi i casi, la fonte maggiore di variabilità, è associata alla *riproducibilità* del sistema. Questi valori sono estremamente elevati, per cui è necessario approfondire lo studio in quanto lo strumento non è per niente in grado di svolgere il proprio compito.

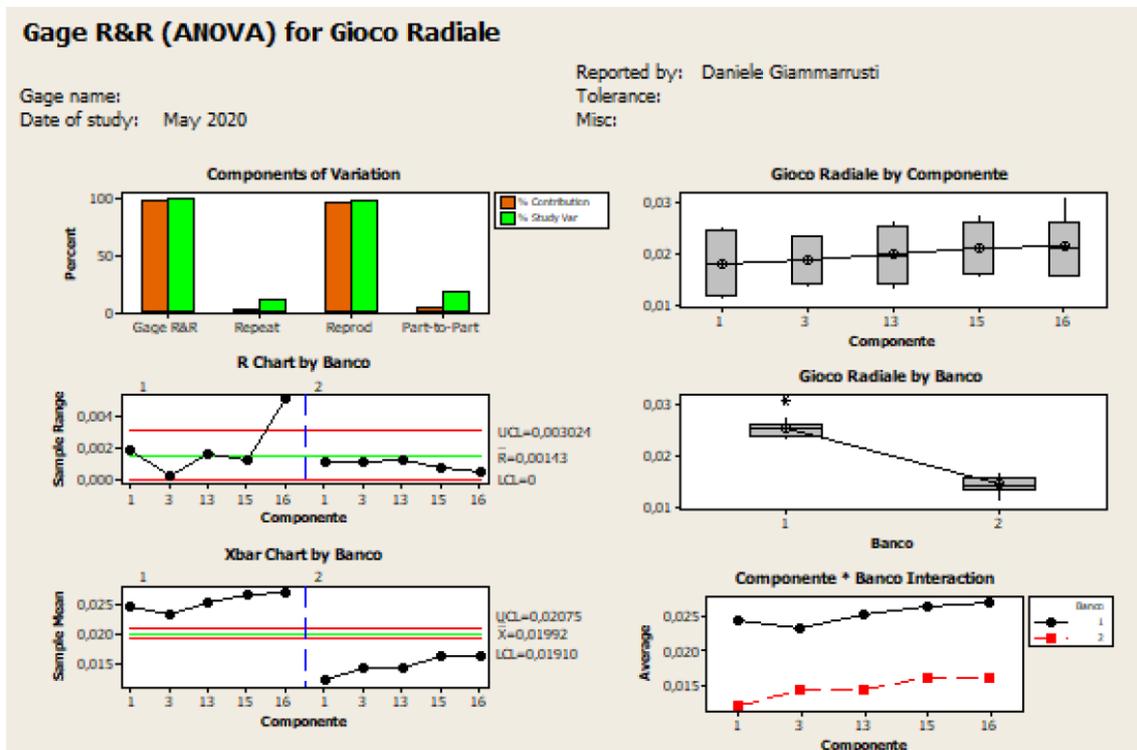


Figura 6.10. Grafici MINITAB per Gioco Radiale.

La carta R mostra una *ripetibilità* del banco 1 tale da sembrare più scadente di quella del banco 2. Da questa considerazione si potrebbe pensare che il banco 2 sia quello più affidabile e che potrebbe fungere da “golden unit”. Tuttavia, non è da escludere che vi sia stato un problema nella rilevazione delle misure su entrambi i banchi.

La carta Xbar conferma la pessima *riproducibilità* del sistema poiché nonostante tutti i punti della carta giacciono al di fuori dei limiti di controllo, le linee spezzate che congiungono i punti non sono per niente comparabili tra i due banchi. A causa del modo diverso di misurare dei due banchi, ampiamente confermato dal grafico “Gioco Radiale by Banco”, anche la dispersione dei punti attorno al valor medio nel grafico “Gioco Radiale by Componente” è eccessiva.

Per quanto riguarda l’interazione tra banco e componente, è superfluo cercare di capire se vi è una qualche dipendenza tra le misure rilevate da uno specifico banco su un

determinato componente, poiché è abbastanza visibile una differenza sostanziale nel modo in cui misurano i due banchi.

La strumentazione impiegata per la valutazione dei giochi presenta delle problematiche soprattutto per quanto riguarda il gioco radiale. È opportuno ripetere l'esperimento in quanto ci potrebbe essere stato anche un problema nella trascrizione dei dati, oppure potrebbe esserci un problema hardware o software su uno dei due banchi, o addirittura su entrambi. Infine, non è da escludere che anche sulla valutazione del gioco radiale, come in quello antirotazione, incida la boccola ellittica in materiale plastico. Prima di dare conclusioni affrettate è utile ripetere l'esperimento dopo aver sostituito la boccola ellittica in plastica con quella in metallo, ed aver rodato in maniera opportuna gli attuatori.

In conclusione, non è possibile validare la seconda sezione dei banchi prova nelle condizioni di funzionamento attuali. Per quanto possa essere influente la composizione della boccola ellittica degli attuatori, i risultati derivanti dall'analisi del gioco radiale evidenziano delle misure rilevate dai due banchi troppo discordanti tra loro. È necessario approfondire lo studio per risalire ad eventuali cause ed agire in maniera adeguata per cercare di ridurre la variabilità imputabile al sistema di misura.

CONCLUSIONI & SVILUPPI FUTURI

L'APQP è un processo articolato che presuppone grande impegno da parte dell'organizzazione. La sua implementazione può richiedere addirittura anni di lavoro come nel caso esaminato in azienda, il cui programma ha alle spalle 3 anni di sviluppo. Nonostante l'elevato impiego di risorse per ottenere dei risultati soddisfacenti, la metodologia APQP rende lo sviluppo di un nuovo prodotto/processo meno incerto, evitando cambiamenti tardivi e promuovendo un approccio proattivo nella risoluzione dei problemi.

I clienti del settore aeronautico, in particolare i produttori di velivoli, stanno diventando sempre più esigenti nel voler ricevere, dai propri fornitori, prodotti innovativi ad alto contenuto tecnologico in tempi sempre più ristretti e che non necessitano modifiche aggiuntive già dal primo lotto di fornitura.

Per questo motivo, dopo la consolidazione nel settore automotive, anche nel settore aeronautico negli ultimi anni si sta diffondendo la mentalità APQP nel processo di sviluppo di un nuovo prodotto/processo.

Durante il tirocinio svolto in azienda, è stata riscontrata l'assenza di una piena e completa consapevolezza della metodologia quindi, il presente lavoro, è servito anche a divulgare e ad incentivare una mentalità *APQP oriented*. A questo scopo sono state coinvolte le varie funzioni aziendali e sono stati condotti dei meeting, sulla base di una checklist, per rafforzare la comprensione della metodologia ed individuare i punti in cui il processo presenta delle lacune.

Durante gli incontri è stato preso in considerazione quanto sviluppato internamente dall'azienda in termini di procedure e la loro corrispondenza alla normativa AS/EN 9145. È stata analizzata la procedura interna "P11", la quale spiega come dovrebbe essere implementato il processo APQP in UmbraGroup. Per la valutazione è stato preso come riferimento il programma Airbus che rappresenta il pioniere dell'implementazione dell'APQP in azienda. Come accennato nell'introduzione, ci si è voluti focalizzare su una parte del processo ed in particolare sull'analisi del sistema di misura (MSA), in quanto contrassegnato come aspetto carente. Suddetta scelta ha anche una valenza operativa, poiché l'avanzamento del programma Airbus, al tempo di stesura del presente elaborato di tesi, è giunto a cavallo tra la fase 3 e la fase 4 del processo APQP e l'MSA è uno dei deliverables da sviluppare in questa parte del processo. Lo studio MSA

permette di validare i banchi prova degli attuatori e di procedere con la prima *production run*, nonché con la successiva produzione di serie definitiva.

In letteratura non vi è molta chiarezza riguardo le modalità con cui eseguire l'analisi del sistema di misura su una tipologia di banco prova automatico. L'idea è stata quella di condurre uno studio Gage R&R utilizzando come fattore di variabilità, per la determinazione della *riproducibilità* del sistema, i due banchi prova disponibili in azienda piuttosto che i diversi operatori che eseguono le misure.

Analizzando la *Ripetibilità* e la *Riproducibilità* del sistema di misura è stato possibile quantificare la variabilità ad esso associata e quanto essa incida sulla variabilità totale osservata in uscita dal processo.

Nel presente lavoro sono state considerate in totale quattro caratteristiche degli attuatori. La scelta è ricaduta sulle caratteristiche più critiche e tali per cui una loro analisi permette di avere una prima valutazione generale dell'intero sistema di misura. Ciò deriva dal fatto che le rilevazioni dei giochi degli attuatori vengono effettuate su una sezione differente del banco prova rispetto a quella utilizzata per effettuare tutti gli altri test.

Lo studio ha prodotto risultati abbastanza soddisfacenti per la determinazione delle lunghezze Pin-To-Pin dell'attuatore effettuate sulla sezione 1 dei banchi. La strumentazione gode di una bassa variabilità rispetto a quella derivante dall'effettiva differenza dei componenti. Il risultato è incoraggiante, tuttavia, per avere un'evidenza oggettiva e validare il sistema di misura correttamente, è opportuno condurre l'analisi sulla totalità delle caratteristiche degli attuatori presenti nel documento ATP (Acceptance Test Procedure).

Per quanto riguarda la sezione 2 dei banchi prova, dedicata alla misurazione dei giochi degli attuatori, l'analisi ha evidenziato una variabilità eccessiva imputabile allo strumento di misura. Nelle condizioni di lavoro attuali non è possibile validare la strumentazione ed è necessario approfondire lo studio per cercare di ridurre drasticamente la variabilità risultante dall'esperimento. Una delle possibili cause che si pensa abbia contribuito a fornire questi risultati insoddisfacenti, è attribuibile ad un componente strutturale degli attuatori. In particolare, il componente che ha la funzione di contrastare i giochi, è la boccola ellittica. Essa è stata realizzata in materiale plastico e, in quanto tale, è soggetta a deformazioni più o meno accentuate in base al numero di attuazioni effettuate dall'attuatore. Non essendo rodati tutti allo stesso modo, ogni

attuatore potrebbe aver effettuato cicli diversi di attuazione, dunque, i risultati dell'analisi potrebbero essere influenzati da questo fattore. Si propone di ripetere l'esperimento sostituendo il componente in questione con uno in materiale metallico, tenendo comunque traccia delle attuazioni, in modo tale che ogni componente venga sottoposto allo stesso rodaggio.

Una critica costruttiva riguarda la gestione della documentazione inerente alle attività svolte nel processo APQP. Durante gli incontri con i vari responsabili delle diverse funzioni aziendali, nel compilare la checklist stilata dall'International Aerospace Quality Group (IAQG), sono state riscontrate delle difficoltà nel reperire la documentazione utile a fornire l'evidenza oggettiva di quanto sviluppato nelle varie fasi del processo. Questa problematica ha reso l'attività di assessment poco efficiente, con incontri che spesso duravano più del dovuto.

La soluzione proposta per efficientare la gestione del processo e della relativa documentazione consiste nell'adozione di un software che integra tutti gli elementi da sviluppare nel processo APQP.

Il software consigliato è "VISUAL PPAP", sviluppato da "IPI Solutions", il quale presenta un'interfaccia grafica molto semplice ed intuitiva.

Visual PPAP permette di creare, gestire e monitorare tutti gli elementi del PPAP riferiti ad ogni singola commessa dell'azienda. La sua versatilità permette di personalizzare facilmente gli elementi in base alle diverse esigenze dei clienti. Essendo una soluzione integrata, le varie funzioni aziendali hanno la possibilità di avere una comprensione globale e completa di quanto sviluppato, agevolando il flusso informativo e promuovendo la comunicazione cross-funzionale.

Il business aziendale si sta indirizzando sempre più verso la realizzazione di attuatori elettromeccanici, considerati uno dei "core product" dell'insieme di parti complesse che compongono i velivoli. Si auspica che il procedimento utilizzato per la validazione dei banchi prova automatici, esposto nel presente lavoro di tesi, fungerà da base solida per successive analisi finalizzate a ridurre continuamente la variabilità introdotta dal sistema di misura, nonché a garantire una soddisfazione del cliente sempre maggiore.

Bibliografia

Enzo Belluco (2013), *Guida allo Statistical Process Control per Minitab*, FrancoAngeli.

Douglas C. Montgomery (2009), *Introduction to Statistical Quality Control*, 6th Edition, John Wiley & Sons, Inc.

Normative consultate:

AS/EN 9100:2016, *Aerospace Quality Management*, SAE International.

AS/EN 9102:2015, *First Article Inspection*, SAE International.

AS/EN 9145:2016/2018, *Advanced Product Quality Planning and Production Part Approval Process*, SAE International.

ASTM E2782-17, *Standard Guide for Measurement System Analysis (MSA)*, American Society for Testing and Materials.

SAE AS 13003:2015, *Measurement System Analysis Requirements for the Aero Engine Supply Chain*, SAI Global.

Sitografia

<https://www.sae.org/iaqg/>

<https://asq.org/>

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

<https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html>

<http://www.gmsl.it/getting-started-with-minitab-17/>

<https://www.minitab.com/en-us/>

RINGRAZIAMENTI

Sono tante le persone che hanno contribuito a rendere speciale questo breve ma intenso percorso di vita e che vorrei ringraziare.

Ringrazio innanzitutto il prof. Maurizio Galetto per avermi proposto di svolgere il lavoro di tesi presso la UmbraGroup S.p.A., e per essersi dimostrato sempre gentile e disponibile nel fornirmi le indicazioni necessarie nel momento del bisogno.

Un sentito grazie al mio tutor aziendale, l'Ing. Marco Ceccarelli, per avermi dato la possibilità di intraprendere un'esperienza formativa in una grande Azienda, trovando costantemente il modo di seguirmi nello svolgimento del progetto nonostante le difficoltà riscontrate, dovute all'emergenza COVID-19. Il supporto fornitomi è stato fondamentale per il compimento del lavoro.

Desidero ringraziare tutti i ragazzi del reparto Dimensionale e l'intero team Qualità, in particolare Andrea Ceccarelli, Fabrizio D'Andrea e Jacopo Bracco, con i quali ho trascorso la maggior parte del tempo instaurando, oltre che un buon rapporto professionale, anche un bel rapporto di amicizia. Sono stato accolto nel migliore dei modi, ricevendo consigli validi sul lavoro e non solo. Ringrazio per la disponibilità mostratami, per avermi insegnato con entusiasmo molte cose nuove e per avermi fatto sentire parte di un team.

Ringrazio anche tutte le stupende persone che ho avuto modo di conoscere in Azienda e che hanno contribuito ad introdurmi nel mondo lavorativo, trasferendomi le loro conoscenze e consigliandomi dall'alto della loro esperienza.

Un ringraziamento speciale e inestimabile va alla mia famiglia. Dedico questo traguardo ai miei genitori che, con il loro supporto, mi hanno dato la forza necessaria per non arrendermi mai. Sono stati un punto di riferimento cui poter fare affidamento in qualsiasi momento, soprattutto in quelli più difficili. Sono grato per tutti i sacrifici fatti, per essermi stati vicini anche se fisicamente lontani, per aver costantemente creduto in me e per avermi dato la possibilità di frequentare gli studi universitari. Se non fosse per loro non avrei potuto vivere questa magnifica esperienza formativa. Grazie, vi voglio un bene immenso.

Un grazie di cuore ai coinquilini di Foligno, nonché seconda famiglia, Laura e Valerio. Insieme abbiamo affrontato una delle esperienze più brutte di questo 2020. Con il loro calore, l'umanità e la saggezza hanno contribuito a rendere meno traumatico il periodo di quarantena obbligatoria. Grazie per il sostegno offertomi, per le risate, i consigli di vita e le mangiate improvvisate, ma soprattutto grazie per aver fatto parte della mia vita.

A questo punto, è giunto il momento di ringraziare gli amici hanno avuto un ruolo fondamentale durante il percorso di studi al Politecnico.

Parto col ringraziare Graziano per avermi scelto come coinquilino e con cui si è subito instaurato un bellissimo rapporto di amicizia fraterna. Abbiamo condiviso tanto, gioie e dolori, divertimento e notti intere di studio, rendendo indimenticabile il mio primo anno nella città di Torino. L'apice è stato raggiunto con l'arrivo di Mercurio, che reputo come un fratello e con cui ho avuto la fortuna di condividere l'appartamento fino all'ultimo giorno della mia permanenza a Torino. Il trio così composto era un qualcosa di stupendo. Mi fermo qui altrimenti non mi basterebbe lo spazio.

Ringrazio Michele per la sua sincera amicizia, le suonate al parco del Valentino, le risate a crepa pelle, le serate alternative e le lunghe chiacchierate filosofiche e riflessive. Grazie per aver influenzato positivamente questo mio periodo di vita.

Un grazie allo "zaparone" Pietro che, con il suo modo di fare stravagante, rallegra le giornate e rende l'animo più leggero. Grazie per avermi dimostrato che siamo noi a decidere da quale tipo di emozioni farci condizionare.

Ringrazio il mio amico e fratello acquisito Pasquale che, insieme alla ragazza Teresa, mi ha sempre ascoltato ed accolto a braccia aperte. Grazie per le giornate passate al lago, le mangiate rustiche, le serate gradevoli e spensierate. Nonostante parecchi chilometri ci abbiano diviso per circa una decade, il tempo sembra non aver avuto alcuna influenza sul nostro rapporto.

A proposito di rapporti che permangono nel tempo e nello spazio, vorrei dedicare un pensiero ed esprimere la mia gratitudine a tutti gli amici conosciuti durante la laurea triennale a Salerno e che continuano ad avere un "posto fisso" (Cit. Checco) nel mio cuore. È bello sapere che, nonostante il trascorrere del tempo e l'aver intrapreso strade diverse, si trova sempre il modo e l'occasione giusta per rincontrarsi, mantenendo quello stesso rapporto di amicizia sincera di un tempo. Grazie di cuore a tutti voi, specialmente a chi mi è stato vicino in quest'ultimo periodo.

Un grazie ai colleghi di studio del Politecnico che ho avuto il piacere di conoscere e con cui ho affrontato nel migliore dei modi progetti ed esami universitari.

Colgo l'occasione per ringraziare anche gli amici del mio paese d'origine con i quali, a distanza di anni, continua ad esserci un bel rapporto e ci si ritrova costantemente durante le celebrazioni festive.

Infine, ringrazio gli intramontabili Lucia, Gerry e Monte. I veri amici si vedono nel momento del bisogno, e voi, in tutti questi anni, ci siete sempre stati. Grazie davvero.

Mi auguro che questo sia solo uno dei tanti traguardi che, con impegno e dedizione, sacrificio e costanza, la vita futura sarà in grado di regalarmi.