



POLITECNICO DI BARI

Dipartimento di Meccanica, Matematica e Management - DMMM

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA GESTIONALE

TESI DI LAUREA IN
QUALITÀ E SOSTENIBILITÀ DEI PROCESSI PRODUTTIVI NELL'INDUSTRIA 4.0

SISTEMA SENSORIZZATO PER LA QUALIFICA DI MOTORI ELETTRICI:
IL CASO STUDIO DELLA C&P SERVICE SRL

Relatore:

Prof. Ing. Michele Dassisti

Correlatore:

Prof. Ing. Marco Mazzarisi

Laureando:

Fabrizio Sciacovelli

Anno accademico 2023/2024

Sommario

INTRODUZIONE	4
Capitolo 1: l'Industria 4.0	6
1.1 Introduzione alla Quarta Rivoluzione Industriale	6
1.2 Dalle Rivoluzioni Industriali alla Digitalizzazione	9
1.3 Tecnologie Abilitanti dell'Industria 4.0	11
1.4 Benefici della Digitalizzazione nei Processi Produttivi	19
1.5 Sfide e Rischi della Quarta Rivoluzione Industriale	22
1.6 Il Futuro del Lavoro nell'Era Digitale.....	24
1.7 Le Skills del Lavoratore 4.0: Competenze Essenziali nell'Era Digitale.....	27
Capitolo 2: L'implementazione del banco prova motori elettrici nell'industria 4.0	30
2.1 Introduzione	30
2.2 Motori Elettrici: Principi, Tipologie e Applicazioni	31
2.3 Quando, dove e perché nascono i Banchi Prova per Motori Elettrici	34
2.4 Funzioni e Scopi dei Banchi Prova per Motori Elettrici	42
2.5 Implementazione e Interconnessione con l'Industria 4.0 nei Banchi Prova per Motori Elettrici.....	45
2.6 I Banchi Prova per Motori Elettrici Asincroni	48
2.7 I Banchi Prova per Motori Elettrici Brushless	51
2.8 Vantaggi e svantaggi dei Banchi Prova per Motori Elettrici Brushless	55
2.9 L'utilizzo di banco prova motori elettrici brushless in diversi settori.....	58
2.10 Esempi di Banchi Prova per Motori elettrici Brushless	60
3. Capitolo 3: Gage R&R Analysis	65
3.1.Introduzione	65

3.2. Cosa è il Gage R&R	65
3.3. Terminologia e Concetti di Base	65
3.4. Tipologie di Gage R&R	68
3.5. Pianificazione e scelta dell'approccio	71
3.6. Approccio metodo ANOVA	74
3.7. Fasi di Implementazione	77
3.8 Interpretazione dei Risultati	78
3.9 Miglioramento del Sistema di Misura	80
3.10 Esempio di tabelle e grafici Gage R&R test	81
3.11. Conclusioni	83
Capitolo 4: Caso studio: C&P Service Srl	85
4.1 Presentazione dell'azienda	85
4.2 Realizzazione in economia del banco prova motori elettrici in ottica 4.0	87
4.3 Descrizione del bene	88
4.4 Classificazione del bene	97
4.5 Costo del bene e dei suoi componenti e accessori	98
4.6 Tempistiche investimento	99
4.7 Esame possesso requisiti obbligatori per usufruire dell'agevolazione	99
4.7.1 Interconnessione ai sistemi informatici di fabbrica	100
4.8 Valutazione del banco prova motore attraverso analisi statistica	108
CONCLUSIONI	128
BIBLIOGRAFIA	130

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, il concetto di Industria 4.0 ha rappresentato una rivoluzione nel settore manifatturiero, portando con sé una profonda trasformazione dei processi produttivi attraverso l'integrazione di tecnologie digitali avanzate. L'adozione di sistemi interconnessi, l'automazione intelligente e l'analisi dei dati hanno aperto nuove opportunità per l'efficienza operativa, la qualità del prodotto e la riduzione dei costi. In questo contesto, la presente tesi esplora il ruolo dell'Industria 4.0 nell'implementazione e nell'ottimizzazione dei banchi prova per motori elettrici, con particolare attenzione alle metodologie di analisi statistica per la valutazione delle prestazioni.

Il Capitolo 1 introduce il concetto di Industria 4.0, delineando la sua evoluzione dalla prima rivoluzione industriale fino all'era della digitalizzazione. Viene illustrato il ruolo delle tecnologie abilitanti, come l'Internet of Things (IoT), l'intelligenza artificiale e la robotica collaborativa, nel migliorare la produttività e la competitività delle aziende. Il capitolo affronta inoltre le sfide e i rischi della digitalizzazione, evidenziando la necessità di nuove competenze per i lavoratori del futuro.

Nel Capitolo 2, l'attenzione si sposta sull'implementazione del banco prova motori elettrici nell'Industria 4.0. Dopo un'introduzione sui principi e sulle tipologie di motori elettrici, viene analizzato il ruolo dei banchi prova nel contesto industriale, con particolare riferimento alle loro funzioni, vantaggi e interconnessione con i sistemi digitali. Un approfondimento viene dedicato ai banchi prova per motori elettrici brushless, evidenziando le loro applicazioni in diversi settori e il contributo all'ottimizzazione dei processi di collaudo e manutenzione.

Il Capitolo 3 introduce il Gage R&R Analysis, una metodologia di analisi statistica utilizzata per valutare l'affidabilità e la ripetibilità dei sistemi di misura. Dopo una panoramica sui concetti fondamentali del Gage R&R, vengono esplorate le diverse tipologie di analisi e il loro impatto sulla qualità delle misurazioni. Particolare attenzione è dedicata al metodo ANOVA per l'analisi della varianza e alla sua applicazione nell'ambito dei banchi prova per motori elettrici.

Infine, il Capitolo 4 presenta un caso studio sulla C&P Service SRL, un'azienda specializzata nella progettazione e realizzazione di banchi prova per motori elettrici in ottica Industria 4.0. Dopo una descrizione dell'azienda e del processo di realizzazione del banco prova, il capitolo

approfondisce la valutazione del sistema attraverso un'analisi statistica. In particolare, la sezione dedicata alla valutazione del banco prova motore attraverso analisi statistica evidenzia l'importanza di strumenti quantitativi per garantire l'affidabilità dei test e la qualità del prodotto finale. Questa tesi si propone di dimostrare come l'integrazione di tecnologie avanzate e metodologie statistiche possa migliorare l'efficienza e l'affidabilità dei banchi prova per motori elettrici, contribuendo alla trasformazione digitale del settore manifatturiero e alla competitività delle aziende operanti in questo ambito.

Capitolo 1: l'Industria 4.0

1.1 Introduzione alla Quarta Rivoluzione Industriale

La trasformazione che stiamo osservando, chiamata Industria 4.0, rappresenta un cambiamento completo del mondo manifatturiero verso la modernità sotto l'influenza delle tecnologie digitali che vengono implementate in ogni processo di produzione.¹

Questa nuova era di fabbriche intelligenti è iniziata nel 2011 con un programma settoriale lanciato dal governo tedesco mirato a rivitalizzare l'industria manifatturiera mediante l'implementazione di soluzioni avanzate come IoT, IA, cloud, big data, robotica intelligente e produzione additiva. L'Industria 4.0 punta a migliorare la produttività, l'efficienza e la competitività globale attraverso la costruzione di fabbriche automatizzate e interconnesse.

Nel corso degli anni, l'Industria 4.0 si è affermata come un facilitatore fondamentale per le organizzazioni contemporanee, in quanto sempre più aziende stanno implementando approcci basati su queste tecnologie, migliorando la loro capacità di reagire in modo flessibile al mercato in continua evoluzione. Questi strumenti digitali attivi in vari settori permettono alle aziende di raccogliere, analizzare e utilizzare enormi quantità di dati in tempo reale, producendo decisioni migliori e, conseguentemente, guidando approcci aziendali più mirati.

L'Industria 4.0 è caratterizzata, tra le altre cose, dall'interconnessione di macchine, sistemi e persone che permette la creazione di ambienti produttivi intelligenti e flessibili.

¹ Peter N. Stearns, *The Industrial Revolution in World History*, 5th ed (New York: Routledge, 2021).

La tecnologia IoT consente alle strutture industriali di comunicare tra loro, condividere dati e monitorare le loro prestazioni in tempo reale, mentre l'intelligenza artificiale e l'analisi dei big data possono aiutare a prevedere possibili problemi, ottimizzare i processi e ridurre gli sprechi. Tali approcci basati sui dati non solo aumentano l'efficienza della produzione, ma permettono anche la manutenzione predittiva, supportando una riduzione dei tempi di inattività delle macchine e delle spese di manutenzione.²

L'Industria 4.0 offre enormi benefici nel miglioramento della qualità del lavoro, nella reattività al mercato, nella sostenibilità ambientale. Inoltre, l'automazione avanzata e i sistemi intelligenti riducono il lavoro manuale, aumentano la sicurezza negli ambienti di produzione e rispettano gli standard di qualità nei prodotti finiti. Tuttavia, questo cambiamento ha anche portato a preoccupazioni riguardo allo spostamento dei posti di lavoro che richiederà la riqualificazione della forza lavoro per utilizzare efficacemente le nuove tecnologie.

Per l'Industria 4.0, poter produrre in modo più sostenibile con un minor consumo di risorse e meno sprechi rappresenta un'enorme opportunità dal punto di vista ambientale. Grazie a tecnologie come il cloud computing e la gestione intelligente dell'energia, è possibile ottimizzare l'uso delle risorse, riducendo così l'impatto ambientale. Affrontare i processi produttivi per renderli più efficienti significa che la gestione delle materie prime può essere più razionale e le emissioni di CO2 ridotte.³

L'Industria 4.0 ha trasformato il modo in cui le aziende operano, trasformando i modelli di business così come il ruolo dei dipendenti all'interno delle aziende. Dall'aumento dell'efficienza produttiva allo sviluppo più rapido di nuovi prodotti e servizi e alla risposta più efficace alle esigenze dei clienti, la trasformazione digitale consente alle

² Alberto Cipriani, Alessio Gramolati, e Giovanni Mari, a c. di, *Il lavoro 4.0: la quarta rivoluzione industriale e le trasformazioni delle attività lavorative*, Studi e saggi 180 (Firenze, Italy: Firenze University Press, 2018).

³ Giuseppe Aceto, Valerio Persico, e Antonio Pescapé, «Industry 4.0 and Health: Internet of Things, Big Data, and Cloud Computing for Healthcare 4.0», *Journal of Industrial Information Integration* 18 (giugno 2020): 100129, <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100129>.

aziende di realizzare più che mai in precedenza. Le nuove tecnologie hanno reso molto più semplice personalizzare i prodotti e fare produzione su richiesta, grazie alla flessibilità che forniscono.

Inoltre, con i sistemi intelligenti, la gestione della catena di approvvigionamento è migliorata, permettendo una pianificazione della produzione più accurata e una gestione dell'inventario più efficiente. Man mano che i diversi attori nella catena del valore diventano più interconnessi, c'è una maggiore collaborazione tra le aziende, che promuove l'innovazione e la competitività globale.

Le fabbriche intelligenti non solo ottimizzeranno il processo produttivo, la logistica e il servizio post-vendita, ma ridefiniranno intere strategie aziendali. Con tecnologie come blockchain e sensori IoT, garantendo trasparenza e sicurezza, si creerà anche la capacità di tracciare i prodotti lungo tutta la catena produttiva sia per i produttori che per i consumatori.⁴

C'è una rivoluzione senza precedenti con l'Industria 4.0,(figura1) che sta cambiando significativamente l'industria manifatturiera e l'economia globale. Le aziende che sfruttano queste tecnologie avanzate non solo diventano più efficienti e competitive, ma sviluppano anche modelli di business nuovi e più sostenibili, orientati al futuro. Tuttavia, si rischia di perdere il pieno potenziale offerto dalla Quarta Rivoluzione Industriale, dove investire nella formazione e nella riqualificazione della forza lavoro è critico per garantire che i lavoratori siano equipaggiati con le competenze necessarie per il mercato in evoluzione.

⁴ Bożena Gajdzik e Radosław Wolniak, «Influence of Industry 4.0 Projects on Business Operations: Literature and Empirical Pilot Studies Based on Case Studies in Poland», *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 8, fasc. 1 (marzo 2022): 44, <https://doi.org/10.3390/joitmc8010044>.

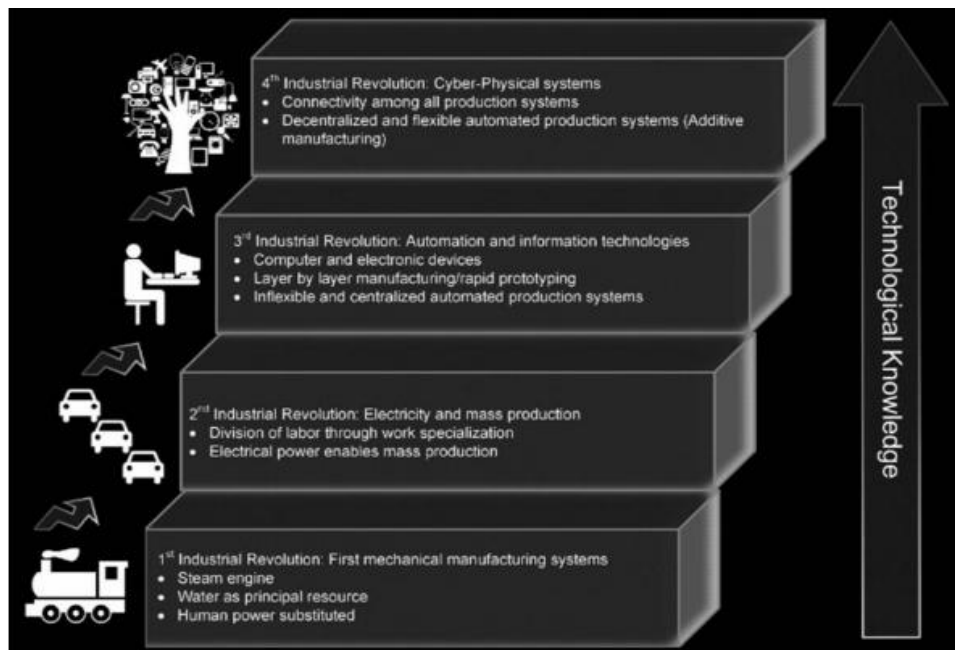


Figura 1: Le 4 rivoluzioni industriali (<https://doi.org/10.3390/met1008106>)

1.2 Dalle Rivoluzioni Industriali alla Digitalizzazione

L'evoluzione dell'Industria 4.0 non può essere compresa appieno senza un'analisi delle precedenti rivoluzioni industriali che hanno segnato profondamente la storia dell'umanità, modificando il modo in cui i beni vengono prodotti e consumati. Ogni rivoluzione ha introdotto innovazioni tecnologiche e organizzative che hanno ridefinito il panorama economico e sociale del tempo.

La Prima Rivoluzione Industriale, sviluppatasi tra la fine del XVIII e l'inizio del XIX secolo, segnò il passaggio da un'economia prevalentemente agricola a un sistema industriale basato sulla meccanizzazione della produzione. L'introduzione della macchina a vapore e dei primi telai meccanici rivoluzionò il settore tessile e manifatturiero, incrementando significativamente la produttività. La nascita delle fabbriche portò alla concentrazione della forza lavoro nelle città, dando avvio a un processo di urbanizzazione su larga scala. Tuttavia, questo periodo fu

caratterizzato anche da condizioni di lavoro estremamente dure e dalla mancanza di regolamentazioni adeguate.⁵

La Seconda Rivoluzione Industriale, avvenuta tra la metà del XIX e l'inizio del XX secolo, vide l'introduzione dell'elettricità, del petrolio e della produzione in serie. Grazie alla diffusione della catena di montaggio e ai progressi nella siderurgia e nella chimica, i tempi di produzione si ridussero notevolmente, permettendo la creazione di beni a costi inferiori. L'industria automobilistica, con Henry Ford che implementò per la prima volta il concetto di produzione di massa, divenne il simbolo di questa fase. Le innovazioni tecnologiche si accompagnarono a miglioramenti nelle condizioni di lavoro, con la nascita dei primi diritti per i lavoratori e l'introduzione della giornata lavorativa regolamentata.

La Terza Rivoluzione Industriale, sviluppatasi a partire dagli anni '50 del XX secolo, introdusse l'elettronica, l'informatica e l'automazione nei processi produttivi. L'invenzione del transistor e dei primi computer consentì di sviluppare macchinari a controllo numerico, robot industriali e sistemi di produzione altamente automatizzati. Questo periodo segnò l'inizio della digitalizzazione dell'industria, con la progressiva sostituzione della manodopera umana in compiti ripetitivi e l'adozione di software avanzati per la gestione delle operazioni aziendali. L'interconnessione globale dei mercati, favorita dalla nascita di Internet, permise alle imprese di espandere il proprio raggio d'azione e ottimizzare la catena di fornitura.

L'Industria 4.0 rappresenta la fase più recente di questa evoluzione e si basa sull'integrazione delle tecnologie digitali avanzate nei sistemi produttivi. A differenza delle precedenti rivoluzioni, questa non si limita a migliorare i processi esistenti, ma li trasforma radicalmente attraverso l'utilizzo di intelligenza artificiale, big data, Internet of Things (IoT) e sistemi di produzione cyber-fisici. Le fabbriche intelligenti, caratterizzate da una forte interconnessione

⁵ Ebru Gökalp, Umut Şener, e P. Erhan Eren, «Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM», in *Software Process Improvement and Capability Determination*, a c. di Antonia Mas et al., vol. 770, Communications in Computer and Information Science (Cham: Springer International Publishing, 2017), 128–42, https://doi.org/10.1007/978-3-319-67383-7_10.

tra macchinari, operatori e sistemi di gestione, consentono di ottimizzare la produzione in tempo reale, ridurre i costi operativi e personalizzare i prodotti su larga scala.⁶

Oltre agli aspetti tecnologici, l'Industria 4.0 sta influenzando anche l'organizzazione del lavoro e le competenze richieste ai lavoratori. La necessità di figure professionali con competenze digitali avanzate, capaci di gestire e analizzare grandi quantità di dati, sta portando a una ridefinizione dei ruoli aziendali. Il tradizionale operaio di linea è progressivamente sostituito da tecnici specializzati in automazione, analisti di dati e ingegneri informatici.

In sintesi, il passaggio dalle prime rivoluzioni industriali all'Industria 4.0 evidenzia come ogni trasformazione tecnologica abbia portato cambiamenti significativi non solo nei processi produttivi, ma anche nella società e nell'economia globale. La digitalizzazione rappresenta oggi la nuova frontiera dell'innovazione industriale, con impatti che continueranno a evolversi nei prossimi decenni, ridefinendo il modo in cui le aziende producono, distribuiscono e interagiscono con i clienti.

1.3 Tecnologie Abilitanti dell'Industria 4.0

L'Industria 4.0 non si basa sulla creazione di nuove tecnologie, ma sull'integrazione di strumenti già esistenti all'interno di un ecosistema produttivo intelligente e connesso.

L'Industria 4.0 rappresenta quindi una svolta epocale per il settore produttivo, portando a una ridefinizione dei modelli organizzativi e delle strategie aziendali. Con la continua evoluzione delle tecnologie(figura2), le imprese devono adattarsi rapidamente per sfruttare al massimo le opportunità offerte dalla digitalizzazione e mantenere un vantaggio competitivo nel mercato globale.⁷

⁶ Guilherme Luz Tortorella et al., «Integration of Industry 4.0 Technologies into Total Productive Maintenance Practices», *International Journal of Production Economics* 240 (ottobre 2021): 108224, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108224>.

⁷ Aceto, Persico, e Pescapé, «Industry 4.0 and Health».

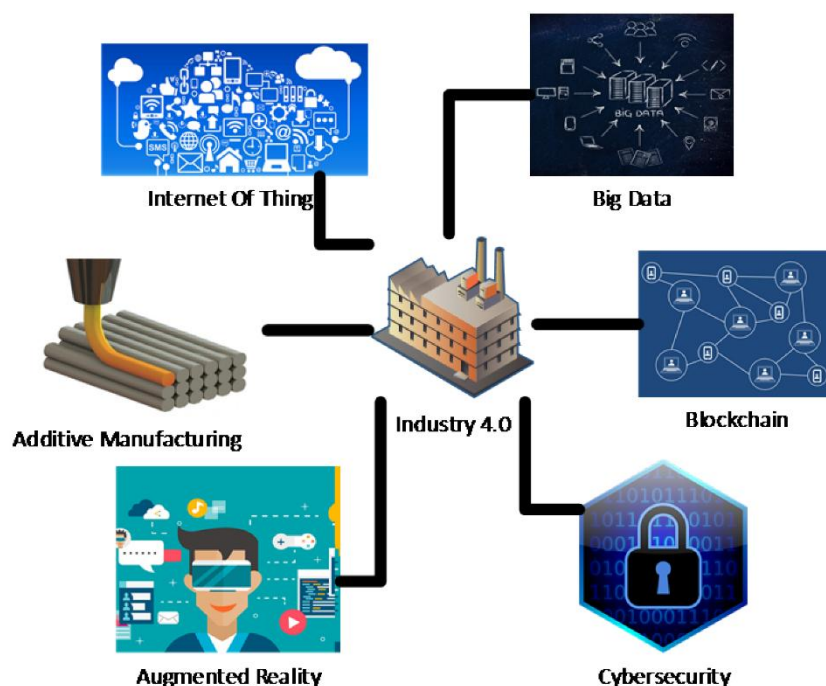


Figura2: tendenze tecnologiche dell'industria 4.0 (Fonte <https://doi.org/10.3390/met10081061>)

Le tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0, note come Key Enabling Technologies (KET), sono essenziali per lo sviluppo e la competitività delle imprese. Le 9 KET individuate dalla Commissione Europea comprendono:

-Manifattura additiva (Additive Manufacturing)

La stampa 3D, nota anche come manifattura additiva, rappresenta una svolta significativa rispetto ai metodi di produzione tradizionali basati sulla rimozione di materiale (lavorazione sottrattiva) o sulla deformazione (stampaggio, forgiatura). Grazie alla costruzione stratificata di un oggetto, la manifattura additiva permette di:

- Realizzare geometrie complesse: Si possono creare forme e strutture interne (come reticoli o canali di raffreddamento integrati) che sarebbero impossibili o estremamente costose con i processi convenzionali.
- Ridurre il consumo di materiale: Poiché si deposita soltanto la quantità di materiale necessaria, gli sprechi risultano notevolmente inferiori.
- Abilitare la produzione on-demand: Le aziende possono produrre parti personalizzate su richiesta, riducendo le scorte a magazzino e i tempi di consegna.

- Migliorare la sostenibilità: Meno rifiuti di lavorazione significano minore impatto ambientale; inoltre, la possibilità di produrre localmente può ridurre i costi di trasporto e le emissioni correlate.
- Applicazioni specialistiche: Nel settore aerospaziale, la possibilità di alleggerire i componenti (e quindi ridurre il consumo di carburante) è un beneficio cruciale. In ambito biomedicale, la stampa 3D consente la creazione di protesi, impianti e dispositivi medici personalizzati. Nel settore automobilistico, permette la produzione di parti di ricambio o prototipi funzionali in tempi rapidi.

La manifattura additiva continuerà a evolversi grazie all'introduzione di nuovi materiali (polimeri avanzati, metalli, ceramiche, compositi) e al miglioramento delle tecnologie di stampa, aprendo ulteriori possibilità di innovazione in campi finora inesplorati.

Realtà Aumentata (Augmented Reality - AR)

La realtà aumentata si basa sull'integrazione di informazioni digitali (testo, immagini, modelli 3D) nell'ambiente fisico che circonda l'utente, visualizzabili tramite dispositivi come smart glasses, visori o smartphone. In ambito industriale, le principali applicazioni includono:

- Formazione del personale: Gli operatori possono imparare a utilizzare macchinari complessi in modo più rapido e sicuro, grazie a istruzioni passo-passo sovrapposte ai componenti fisici.
- Manutenzione predittiva e assistenza tecnica: Gli addetti alla manutenzione possono vedere in tempo reale lo stato dei macchinari e ricevere indicazioni su come intervenire, riducendo errori e tempi di fermo.
- Controllo qualità: La AR può sovrapporre modelli 3D "ideali" a prodotti fisici, evidenziando rapidamente difetti o deviazioni dalle specifiche progettuali.
- Supporto alla progettazione: In fase di sviluppo di nuovi prodotti, è possibile utilizzare la realtà aumentata per eseguire valutazioni preliminari su ergonomia, dimensioni e funzionalità.⁸

⁸ Angelo Bonomi, *Le Tecnologie Di Industria 4.0 e Le PMI* (IT: CNR IRCRES, 2018), <https://doi.org/10.23760/2421-7158.2018.004>.

Grazie alla progressiva miniaturizzazione e al miglioramento

delle tecnologie di visualizzazione, la realtà aumentata è destinata a diventare sempre più pervasiva, trasformando il modo in cui gli operatori interagiscono con macchine e impianti.

-Simulazione (Simulation) e Digital Twin

La simulazione è un elemento chiave nell'Industria 4.0 in quanto consente di analizzare e ottimizzare processi produttivi, logistica e funzionamento di impianti prima di realizzare modifiche nel mondo reale. Il concetto di gemello digitale (Digital Twin) amplifica i vantaggi della simulazione, creando una copia virtuale altamente fedele di un prodotto, di un macchinario o di un intero stabilimento:

- **Previsione delle prestazioni:** Attraverso modelli matematici e simulazioni è possibile testare modifiche di layout, parametri di processo o materiali, valutandone l'impatto su produttività, costi ed efficienza energetica.
- **Riduzione dei tempi di sviluppo:** Con un prototipo virtuale, si possono identificare e correggere errori di progettazione in anticipo, evitando costose revisioni in fase di produzione.
- **Ottimizzazione continua:** Il gemello digitale può essere costantemente aggiornato con dati provenienti dai sensori sul campo, consentendo un miglioramento continuo dei processi.
- **Analisi dei colli di bottiglia:** In logistica e supply chain, la simulazione aiuta a prevedere e risolvere i punti critici nei flussi di lavoro, ottimizzando l'uso delle risorse e riducendo i tempi di consegna.

In futuro, i digital twin diventeranno sempre più intelligenti, grazie all'integrazione con algoritmi di intelligenza artificiale (AI) che permetteranno di prendere decisioni automatizzate e in tempo reale.⁹

⁹ Georgios Lampropoulos, Kerstin Siakas, e Theofylaktos Anastasiadis, «INTERNET OF THINGS IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0: AN OVERVIEW: Lampropoulos, G., Siakas, K., Anastasiadis, T. (2019). Internet of Things in the Context of Industry 4.0: An Overview. *International Journal of Entrepreneurial Knowledge*, 7(1), 4-19. Doi: 10.2478/ijek-2019-0001», *International Journal of Entrepreneurial Knowledge* 7, fasc. 1 (30 giugno 2019), <https://doi.org/10.37335/ijek.v7i1.84>.

-Internet delle cose industriali (Industrial Internet of Things - IIoT)

L'IIoT si basa sull'idea di connettere macchinari, dispositivi, sensori e sistemi informatici in un'unica rete integrata, in modo da monitorare e gestire l'intero ciclo produttivo in tempo reale.

Tra i principali vantaggi:

- **Monitoraggio continuo:** La possibilità di raccogliere dati (temperatura, pressione, vibrazioni, consumi energetici, ecc.) in maniera costante e automatica permette un controllo capillare sulle prestazioni degli impianti.
- **Manutenzione predittiva:** Analizzando i dati forniti dai sensori, è possibile individuare pattern di funzionamento anomali e prevedere quando si verificheranno guasti, intervenendo prima che si verifichino fermi macchina.
- **Ottimizzazione della produzione:** Con il monitoraggio in tempo reale, si possono regolare parametri di processo (come velocità, temperature, potenze) per massimizzare l'efficienza e ridurre gli sprechi.
- **Sicurezza e riduzione dei rischi:** Sensori e algoritmi di rilevazione anomalie possono segnalare situazioni pericolose per gli operatori o per l'ambiente, permettendo interventi tempestivi.

L'evoluzione dell'IIoT è guidata dall'affermarsi di nuovi protocolli di comunicazione (5G, reti mesh, edge computing) che consentiranno una connettività più stabile, veloce e capillare.

-Cloud Computing

Il cloud computing è diventato un abilitatore fondamentale per l'Industria 4.0, in quanto offre infrastrutture e servizi di elaborazione dati flessibili e scalabili:

- **Archiviazione e analisi dei dati:** I grandi volumi di dati generati dai dispositivi IIoT possono essere memorizzati su piattaforme cloud, dove è possibile eseguire analisi avanzate (machine learning, data mining) senza dover investire in costosi server locali.
- **Collaboration in tempo reale:** Squadre geograficamente distribuite possono lavorare simultaneamente su progetti condivisi, avendo sempre accesso alle versioni più aggiornate di documenti e modelli.
- **Riduzione dei costi IT:** Le aziende pagano solo per le risorse effettivamente utilizzate, evitando di dover dimensionare (e quindi acquistare) hardware per picchi di carico sporadici.

- Maggiore sicurezza e affidabilità: I principali provider di servizi cloud investono in infrastrutture ad alta affidabilità e in rigorose misure di sicurezza, spesso superiori a quelle che un singolo stabilimento potrebbe implementare in proprio.¹⁰

La combinazione di cloud computing e edge computing consentirà di bilanciare l'elaborazione dei dati tra periferia (macchinari, sensori) e centri di calcolo remoti, riducendo la latenza e migliorando l'efficienza dei processi.

-Cybersecurity

La crescente digitalizzazione dei processi industriali rende le reti e i sistemi di controllo più vulnerabili agli attacchi informatici. Per questo motivo, la sicurezza informatica (cybersecurity) è diventata una priorità assoluta:

- Protezione degli endpoint: Ogni sensore o dispositivo connesso alla rete rappresenta un potenziale punto d'ingresso per i criminali informatici. È necessario applicare protocolli di autenticazione e crittografia per prevenire accessi non autorizzati.
- Firewall e segmentazione delle reti: Suddividere la rete industriale in segmenti più piccoli permette di limitare la propagazione di eventuali attacchi e di isolare rapidamente le aree compromesse.
- Rilevamento delle anomalie tramite AI: L'impiego di algoritmi di intelligenza artificiale e machine learning consente di individuare in tempo reale comportamenti sospetti (come picchi anomali di traffico dati) e attivare contromisure automatiche.
- Piani di continuità operativa: Oltre a prevenire gli attacchi, è fondamentale predisporre strategie per ripristinare velocemente i sistemi e garantire la continuità della produzione in caso di incidente.¹¹

Con l'aumentare dell'automazione e dell'interconnessione tra fabbriche, la cybersecurity dovrà evolvere costantemente per rimanere al passo con minacce sempre più sofisticate.

¹⁰ Chunguang Bai et al., «Industry 4.0 Technologies Assessment: A Sustainability Perspective», *International Journal of Production Economics* 229 (novembre 2020): 107776, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>.

¹¹ Aceto, Persico, e Pescapé, «Industry 4.0 and Health».

-Big Data e Analytics

Con la crescita esponenziale dei dati prodotti dai sensori, dagli impianti e dai sistemi gestionali, la capacità di estrarre valore da queste informazioni è divenuta cruciale. I principali vantaggi dell'analisi avanzata (analytics) e dei big data sono:

- **Ottimizzazione dei processi:** L'elaborazione di dati storici e in tempo reale consente di individuare correlazioni nascoste e di ottimizzare i parametri di lavorazione, aumentando l'efficienza e riducendo gli scarti.
- **Previsione della domanda:** Attraverso modelli predittivi, le aziende possono anticipare i trend di mercato, adeguare la produzione e ridurre i costi di magazzino.
- **Manutenzione predittiva:** L'analisi dei dati rilevati dai macchinari permette di diagnosticare malfunzionamenti imminenti e intervenire tempestivamente. Questo riduce i tempi di fermo macchina e i costi di manutenzione straordinaria.
- **Personalizzazione di massa:** I dati sui clienti e sui loro comportamenti di acquisto favoriscono la creazione di prodotti e servizi su misura, aumentando la soddisfazione e la fidelizzazione.¹²

L'integrazione tra big data, analytics e intelligenza artificiale darà vita a sistemi di decision-making sempre più automatizzati, in grado di migliorare le performance aziendali e la reattività alle variazioni del mercato.

-Robotica Collaborativa (Collaborative Robotics - Cobots)

I cobot, o robot collaborativi, sono progettati per operare in stretta prossimità con l'uomo in sicurezza, senza la necessità di recinzioni o barriere fisiche. Questa caratteristica offre diversi benefici:

- **Flessibilità produttiva:** I cobot possono essere riprogrammati rapidamente per svolgere compiti diversi, rendendoli ideali in contesti di produzione variabile o di piccole serie.

¹² Lampropoulos, Siakas, e Anastasiadis, «INTERNET OF THINGS IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0».

- **Ergonomia e sicurezza:** Svolgendo compiti ripetitivi o pesanti, i robot collaborativi riducono lo sforzo fisico e il rischio di infortuni per gli operatori umani.
- **Riduzione dei costi di riconfigurazione:** Non essendo necessari investimenti in dispositivi di protezione tradizionali (come recinzioni), l'installazione e la riconfigurazione di un cobot risultano spesso più economiche e rapide.
- **Integrabilità nelle PMI:** Grazie al costo relativamente accessibile e alla facilità di utilizzo, i cobot rappresentano un'opzione vantaggiosa anche per le piccole e medie imprese che vogliono automatizzare alcuni processi senza affrontare progetti di robotica tradizionale più complessi.

Il futuro della robotica collaborativa vedrà l'impiego di sistemi di visione e di intelligenza artificiale sempre più avanzati, in grado di rendere i robot più "consapevoli" dell'ambiente circostante e delle intenzioni degli operatori umani.

-Integrazione Orizzontale e Verticale

Nell'Industria 4.0, le aziende mirano a connettere in modo fluido e trasparente tutti gli anelli della catena del valore, sia all'interno della stessa organizzazione (integrazione verticale) sia tra diverse realtà (integrazione orizzontale):

- **Integrazione verticale:** Comprende il collegamento dei diversi livelli di un'impresa (produzione, logistica, magazzino, amministrazione, ufficio acquisti, vendite), spesso utilizzando piattaforme digitali e sistemi gestionali ¹³(ERP, MES, SCADA). Questo approccio aiuta a:
 - Velocizzare la circolazione delle informazioni.
 - Ridurre gli errori dovuti a ridondanze o comunicazioni inefficienti.
 - Aumentare la visibilità e il controllo sui costi e sui tempi di produzione.

¹³ Mario Enrique Hernandez Korner et al., «Systematic Literature Review: Integration of Additive Manufacturing and Industry 4.0», *Metals* 10, fasc. 8 (6 agosto 2020): 1061, <https://doi.org/10.3390/met10081061>.

- **Integrazione orizzontale:** Si riferisce alla collaborazione e allo scambio di dati lungo l'intera filiera, coinvolgendo fornitori, partner logistici, distributori e clienti. I benefici includono:
 - Maggiore trasparenza e tracciabilità dei prodotti.
 - Possibilità di co-sviluppare nuove soluzioni e prodotti.
 - Ottimizzazione dei processi di approvvigionamento e consegna.¹⁴

L'integrazione orizzontale e verticale consente alle aziende di competere con successo in mercati sempre più dinamici, reagendo rapidamente ai cambiamenti e cogliendo le opportunità di innovazione che nascono dal lavoro di squadra.

L'Industria 4.0 racchiude un insieme di tecnologie e metodologie di gestione integrata che stanno rivoluzionando il modo di produrre e fare impresa. Dalla stampa 3D alla realtà aumentata, dalla robotica collaborativa alla cybersecurity, ogni tassello contribuisce a costruire un ecosistema intelligente, connesso e flessibile. Le aziende che sapranno cogliere appieno il potenziale di queste innovazioni potranno migliorare l'efficienza, la qualità e la sostenibilità delle proprie operazioni, guadagnando un vantaggio competitivo significativo in un panorama globale in continua evoluzione.

1.4 Benefici della Digitalizzazione nei Processi Produttivi

L'Industria 4.0 ha rivoluzionato i processi produttivi, portando a un miglioramento significativo in termini di efficienza, produttività e qualità del lavoro. L'introduzione di tecnologie digitali ha reso possibile un controllo più accurato delle operazioni, riducendo sprechi e tempi morti grazie alla gestione avanzata dei dati e all'automazione. Le aziende che implementano sistemi

¹⁴ Hernandez Korner et al.

digitalizzati possono ottimizzare l'uso delle risorse, migliorare la pianificazione della produzione e adattarsi con maggiore agilità alle richieste del mercato.¹⁵

Uno degli aspetti fondamentali di questa rivoluzione è l'integrazione tra i vari livelli aziendali attraverso la connessione tra macchinari, software gestionali e operatori. La digitalizzazione permette una comunicazione fluida tra i diversi reparti, migliorando la sincronizzazione e riducendo il rischio di errori. Inoltre, l'ottimizzazione delle risorse energetiche e materiali ha consentito una significativa riduzione dell'impatto ambientale, un aspetto sempre più cruciale per le aziende che vogliono operare in modo sostenibile.

L'uso del cloud computing e dell'analisi dei big data permette di monitorare e prevedere guasti nei macchinari, facilitando interventi di manutenzione predittiva. Ciò consente di minimizzare i fermi macchina e migliorare la continuità operativa. Inoltre, le soluzioni di realtà aumentata e intelligenza artificiale stanno migliorando i processi di produzione e logistica, permettendo agli operatori di interagire in modo più efficace con i sistemi automatizzati.

La digitalizzazione favorisce anche la produzione just-in-time, permettendo alle aziende di ridurre le scorte di magazzino e ottimizzare l'approvvigionamento delle materie prime. I sistemi avanzati di tracciabilità garantiscono un controllo in tempo reale dell'intera catena di fornitura, migliorando la trasparenza e l'affidabilità del flusso produttivo. Inoltre, l'adozione di sensori IoT consente di raccogliere dati dettagliati su ogni fase del processo produttivo, facilitando un'analisi approfondita per il miglioramento continuo delle performance aziendali.

Un altro beneficio rilevante è il miglioramento delle condizioni di lavoro. Grazie all'automazione di processi pericolosi o ripetitivi, i lavoratori possono concentrarsi su attività a maggiore valore aggiunto, riducendo il rischio di infortuni e migliorando la qualità del lavoro.

¹⁵ Silesian University of Technology, Organization and Management Department, Economics and Informatics Institute e Radosław Wolniak, «Innovations in Industry 4.0 Conditions», *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series* 2023, fasc. 169 (2023): 725–41, <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.169.43>.

Le interfacce uomo-macchina avanzate, come i cobot (robot collaborativi), permettono una maggiore interazione tra operatori e macchinari, semplificando le operazioni più complesse.¹⁶

La digitalizzazione consente anche una maggiore personalizzazione della produzione. Grazie all'analisi dei dati e alle tecnologie di stampa 3D, le aziende possono rispondere in modo più preciso alle esigenze specifiche dei clienti, riducendo i tempi di produzione e migliorando l'adattabilità alle fluttuazioni del mercato. Questo approccio consente di sviluppare prodotti su misura senza aumentare significativamente i costi.

Un aspetto fondamentale della digitalizzazione è l'incremento della competitività aziendale. Le imprese che adottano modelli produttivi avanzati possono accedere più facilmente a mercati internazionali, offrendo prodotti innovativi e migliorando l'efficienza operativa. Le tecnologie digitali consentono di raccogliere dati su clienti e mercati, permettendo di anticipare le tendenze e adattare le strategie di produzione e marketing in tempo reale.

Infine, la transizione digitale porta con sé vantaggi ambientali significativi. Grazie all'uso di sistemi di gestione energetica avanzati, le aziende possono ridurre il consumo di risorse e abbattere le emissioni di CO₂. La digitalizzazione consente inoltre un migliore utilizzo dei materiali e l'implementazione di processi di economia circolare, in cui i rifiuti vengono ridotti, riciclati e riutilizzati in modo più efficiente. Questo non solo migliora la sostenibilità ambientale, ma contribuisce anche a ridurre i costi operativi nel lungo periodo.

L'Industria 4.0 rappresenta dunque una trasformazione profonda del settore produttivo, capace di migliorare l'efficienza aziendale, incrementare la sostenibilità e creare nuove opportunità di crescita. Le imprese che sapranno integrare queste tecnologie in modo strategico potranno ottenere un vantaggio competitivo significativo e garantire la propria evoluzione nel panorama economico globale.¹⁷

¹⁶ Vule Reljić et al., «Augmented Reality Applications in Industry 4.0 Environment», *Applied Sciences* 11, fasc. 12 (17 giugno 2021): 5592, <https://doi.org/10.3390/app11125592>.

¹⁷ Matteo Russo et al., «A Review of Parallel Kinematic Machine Tools: Design, Modeling, and Applications», *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 196 (marzo 2024): 104118, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104118>.

1.5 Sfide e Rischi della Quarta Rivoluzione Industriale

Nonostante le numerose opportunità offerte dalla digitalizzazione e dall'Industria 4.0, esistono anche sfide e rischi significativi che le aziende devono affrontare. L'adozione di tecnologie avanzate comporta cambiamenti profondi a livello organizzativo, produttivo e sociale, che devono essere gestiti con attenzione per garantire una transizione efficace e sostenibile. Uno dei principali ostacoli è rappresentato dagli elevati costi iniziali di investimento, che includono l'aggiornamento dei macchinari, l'integrazione di software avanzati e la formazione del personale. Per molte piccole e medie imprese, queste spese possono rappresentare un deterrente, limitando la loro capacità di innovare e competere nel mercato globale. Tuttavia, alcuni governi e istituzioni stanno mettendo in atto programmi di supporto economico per facilitare l'adozione delle nuove tecnologie, rendendo cruciale per le aziende sviluppare una strategia a lungo termine per la digitalizzazione.

L'aumento della connettività e dell'uso di dispositivi interconnessi espone le aziende a rischi di cyber-attacchi, violazioni dei dati e furti di proprietà intellettuale. Con l'adozione di sistemi cloud e reti industriali connesse, cresce anche la vulnerabilità alle minacce informatiche. Per proteggere le infrastrutture digitali, le imprese devono adottare soluzioni avanzate di cybersecurity, tra cui crittografia, autenticazione a più fattori e monitoraggio continuo delle reti.¹⁸ È fondamentale anche sensibilizzare e formare i dipendenti sulle best practices di sicurezza informatica, poiché molte violazioni avvengono a causa di errori umani o attacchi di phishing. Inoltre, la conformità alle normative sulla protezione dei dati, come il Regolamento Generale sulla Protezione dei Dati (GDPR), è essenziale per garantire un utilizzo sicuro delle informazioni aziendali.

L'adozione delle nuove tecnologie richiede anche un profondo cambiamento culturale all'interno delle aziende. Molti lavoratori possono percepire l'automazione come una minaccia

¹⁸ Sebastian Saniuk, Sandra Grabowska, e Bożena Gajdzik, «Social Expectations and Market Changes in the Context of Developing the Industry 4.0 Concept», *Sustainability* 12, fasc. 4 (13 febbraio 2020): 1362, <https://doi.org/10.3390/su12041362>.

al proprio posto di lavoro, generando resistenze e timori. Per superare questa sfida, le aziende devono investire nella formazione e riqualificazione del personale, promuovendo una cultura dell'innovazione e aiutando i dipendenti a sviluppare nuove competenze. Implementare programmi di formazione continua e creare percorsi di crescita professionale all'interno dell'azienda può contribuire a ridurre le resistenze e a migliorare l'adattamento ai nuovi modelli produttivi.

Uno dei timori più diffusi riguardo all'Industria 4.0 è la possibile perdita di posti di lavoro a causa dell'automazione. L'integrazione di robot industriali, intelligenza artificiale e macchine autonome potrebbe ridurre la necessità di manodopera in alcune professioni, specialmente nei settori manifatturiero e logistico. Tuttavia, la digitalizzazione crea anche nuove opportunità occupazionali, dando vita a ruoli professionali legati alla gestione, manutenzione e sviluppo delle nuove tecnologie. Figure come esperti di intelligenza artificiale, analisti di big data, ingegneri dell'automazione e specialisti di cybersecurity saranno sempre più richieste. La chiave per affrontare questo cambiamento è la formazione continua e l'acquisizione di competenze digitali avanzate. Per mitigare il rischio di disoccupazione tecnologica, è necessario un impegno congiunto tra aziende, istituzioni educative e governi, che devono investire in programmi di riqualificazione professionale e aggiornare i percorsi di studio.¹⁹

Un'altra sfida dell'Industria 4.0 è la complessità nell'integrazione dei diversi sistemi tecnologici all'interno di un'unica infrastruttura aziendale. Le aziende spesso operano con macchinari e software eterogenei, sviluppati in periodi diversi e non sempre compatibili tra loro. L'implementazione di soluzioni digitali avanzate richiede un'armonizzazione dei sistemi esistenti, un processo che può risultare complesso e costoso. Per superare questa difficoltà, molte imprese stanno adottando architetture basate su standard aperti e interoperabili, che consentano una maggiore flessibilità nell'integrazione delle tecnologie. L'uso di piattaforme cloud, sistemi modulari e interfacce di programmazione delle applicazioni (API) facilita la

¹⁹ Ebru Gökalp, Umut Şener, e P. Erhan Eren, «Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM», in *Software Process Improvement and Capability Determination*, a c. di Antonia Mas et al., vol. 770, Communications in Computer and Information Science (Cham: Springer International Publishing, 2017), 128–42, https://doi.org/10.1007/978-3-319-67383-7_10.

comunicazione tra i diversi strumenti, migliorando la gestione dei dati e la coordinazione delle attività aziendali.

Sebbene l'Industria 4.0 prometta una maggiore efficienza e una riduzione degli sprechi, la produzione di tecnologie avanzate e dispositivi elettronici comporta anche un impatto ambientale. L'estrazione di materiali rari, il consumo energetico dei data center e lo smaltimento di rifiuti elettronici sono problematiche che devono essere affrontate con soluzioni sostenibili. Le aziende devono impegnarsi a implementare pratiche di economia circolare, adottando strategie per il riciclo e il riutilizzo delle risorse. Inoltre, la transizione verso fonti di energia rinnovabile e l'adozione di tecnologie a basso consumo energetico possono contribuire a ridurre l'impronta ecologica dell'Industria 4.0.

L'Industria 4.0 rappresenta una rivoluzione senza precedenti per il mondo produttivo, ma il suo successo dipende dalla capacità di affrontare le sfide e i rischi connessi alla digitalizzazione. L'adozione di strategie mirate, investimenti in sicurezza informatica, formazione continua e soluzioni sostenibili può garantire una transizione efficace verso il nuovo paradigma industriale. Solo attraverso una gestione attenta delle criticità sarà possibile cogliere pienamente i benefici della quarta rivoluzione industriale e costruire un futuro lavorativo più efficiente, sicuro e sostenibile.²⁰

1.6 Il Futuro del Lavoro nell'Era Digitale

La trasformazione digitale sta ridefinendo profondamente il mercato del lavoro. Mentre alcune mansioni tradizionali vengono progressivamente automatizzate, emergono nuove figure professionali in grado di gestire e ottimizzare i sistemi digitali.

Il ruolo umano non viene eliminato, ma si evolve verso una maggiore supervisione, gestione e analisi dei processi produttivi. La sinergia tra uomo e macchina diventa il fulcro della nuova

²⁰ Saniuk, Grabowska, e Gajdzik, «Social Expectations and Market Changes in the Context of Developing the Industry 4.0 Concept».

organizzazione aziendale, con l'intelligenza artificiale e l'automazione a supporto delle decisioni strategiche.

Le nuove tecnologie stanno favorendo un ambiente di lavoro più flessibile, in cui il concetto di presenza fisica viene sostituito da soluzioni di lavoro da remoto e collaborazioni in cloud. Le aziende stanno adottando strumenti digitali avanzati per consentire ai dipendenti di lavorare in modo più efficiente, riducendo i tempi di inattività e migliorando la produttività complessiva. Questa flessibilità consente anche un miglior equilibrio tra vita professionale e personale, aumentando il benessere dei lavoratori.²¹

Oltre alla flessibilità, la digitalizzazione sta portando a una crescente interazione tra esseri umani e tecnologie avanzate. I lavoratori si trovano a dover utilizzare strumenti digitali sofisticati, che permettono loro di prendere decisioni basate su dati analitici in tempo reale. Questo aspetto cambia radicalmente il concetto stesso di lavoro: non si tratta più solo di eseguire compiti ripetitivi, ma di analizzare, interpretare e agire in modo strategico.

Un altro aspetto significativo del futuro del lavoro è la crescente importanza della formazione continua. Con l'evoluzione rapida delle tecnologie, le competenze richieste cambiano costantemente. Le aziende devono quindi investire in programmi di apprendimento permanente per garantire che i dipendenti siano sempre aggiornati sulle ultime innovazioni. Questo non riguarda solo le competenze tecniche, ma anche quelle trasversali, come la capacità di adattarsi rapidamente ai cambiamenti e di lavorare in team interdisciplinari.

L'automazione e l'intelligenza artificiale stanno trasformando il panorama lavorativo anche attraverso la creazione di nuovi ruoli professionali. Mentre alcuni lavori tradizionali scompaiono, ne emergono altri legati alla gestione delle nuove tecnologie. Ad esempio, esperti in cybersecurity, specialisti in analisi dei dati e ingegneri di automazione sono sempre più richiesti dalle aziende. Questo spostamento delle competenze comporta la necessità di una riforma nei sistemi educativi, affinché i giovani possano sviluppare le conoscenze necessarie per affrontare il mondo del lavoro di domani.

²¹ Vincent Delke et al., «Implementing Industry 4.0 Technologies: Future Roles in Purchasing and Supply Management», *Technological Forecasting and Social Change* 196 (novembre 2023): 122847, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122847>.

L'Industria 4.0 porta con sé anche una maggiore personalizzazione dell'esperienza lavorativa. Grazie all'uso di strumenti digitali avanzati, le aziende possono creare percorsi professionali su misura per ciascun dipendente, basandosi sulle sue competenze, interessi e ambizioni. Questo non solo migliora la soddisfazione dei lavoratori, ma aumenta anche la produttività e l'innovazione all'interno dell'azienda.

Infine, un aspetto che non può essere trascurato è l'impatto sociale del cambiamento in atto.

La trasformazione digitale potrebbe accentuare le disuguaglianze tra chi possiede competenze digitali avanzate e chi rischia di rimanere escluso dal mercato del lavoro. Per questo motivo, governi e istituzioni devono promuovere politiche di inclusione e riqualificazione professionale, affinché la digitalizzazione porti benefici a tutta la società e non solo a una parte di essa.

Il futuro del lavoro nell'era digitale sarà dunque caratterizzato da sfide e opportunità.

La chiave del successo per aziende e lavoratori sarà la capacità di adattarsi rapidamente ai cambiamenti, (figura3) investire nella formazione e sfruttare al massimo le potenzialità offerte dalle nuove tecnologie.²²

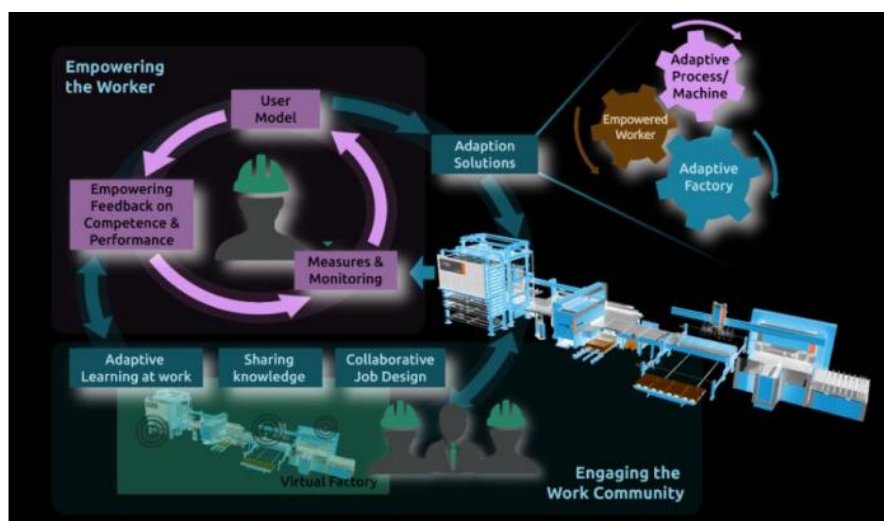


Figura 3: Trasformazione della figura del lavoratore nel corso del tempo (Fonte; <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.052>)

²² Silesian University of Technology, Organization and Management Department, Economics and Informatics Institute e Wolniak, «Innovations in Industry 4.0 Conditions».

1.7 Le Skills del Lavoratore 4.0: Competenze Essenziali nell'Era Digitale

L'industria 4.0 ha trasformato radicalmente il mondo del lavoro, imponendo nuove sfide e opportunità per i lavoratori di ogni settore. L'automazione avanzata, l'intelligenza artificiale, l'Internet of Things (IoT) e l'interconnessione dei sistemi produttivi hanno ridefinito le competenze richieste dal mercato. Il lavoratore 4.0 non è più solo un esecutore di compiti, ma un professionista capace di adattarsi, innovare e interagire con le nuove tecnologie. Le qualità più importanti che un lavoratore 4.0 deve avere sono.

1. Competenze Digitali e Tecnologiche

La padronanza degli strumenti digitali è ormai imprescindibile. Dalla gestione dei dati con software avanzati all'uso delle piattaforme di collaborazione online, il lavoratore 4.0 deve essere in grado di navigare nel mondo digitale con sicurezza. Tra le competenze chiave troviamo:

- **Data literacy:** la capacità di interpretare e analizzare i dati per prendere decisioni informate e migliorare i processi aziendali.
- **Cybersecurity awareness:** la conoscenza delle basi della sicurezza informatica per proteggere dati sensibili e prevenire attacchi informatici.
- **Utilizzo di software avanzati:** competenze in ambiti come il cloud computing, l'intelligenza artificiale, l'analisi predittiva e l'automazione industriale.
- **Conoscenza dei linguaggi di programmazione:** anche per chi non è sviluppatore, avere una conoscenza di base di linguaggi come Python, SQL o JavaScript può essere un vantaggio competitivo.

2. Soft Skills e Adattabilità

Se le competenze tecniche sono fondamentali, le soft skills lo sono altrettanto. Il lavoratore 4.0 deve essere flessibile e pronto a imparare continuamente, data la velocità con cui le tecnologie evolvono. Tra le principali soft skills troviamo:

- Problem solving: la capacità di analizzare situazioni complesse e trovare soluzioni efficaci in tempi rapidi.
- Pensiero critico: un approccio analitico alle informazioni, evitando di accettare tutto passivamente e valutando pro e contro di ogni decisione.
- Creatività e innovazione: la propensione a trovare nuove idee e migliorare processi esistenti, essenziale per affrontare il cambiamento tecnologico.
- Resilienza e gestione dello stress: sapersi adattare a un ambiente di lavoro in continua trasformazione senza perdere efficacia e mantenendo un buon equilibrio tra vita professionale e personale.
- Intelligenza emotiva: la capacità di comprendere e gestire le proprie emozioni e quelle degli altri, migliorando la collaborazione e il benessere aziendale.²³

3. Competenze Comunicative e Collaborazione

Lavorare in un contesto sempre più connesso significa anche saper comunicare efficacemente. La collaborazione tra team multidisciplinari e internazionali richiede capacità comunicative avanzate, sia in presenza che da remoto. Le principali competenze includono:

- Lavoro in team: capacità di operare in gruppi di lavoro eterogenei, spesso virtuali e distribuiti su più fusi orari.
- Gestione della comunicazione a distanza: utilizzo efficace di strumenti come email, videoconferenze, chat aziendali e piattaforme di collaborazione come Slack, Microsoft Teams o Google Workspace.
- Public speaking e scrittura professionale: abilità nel presentare idee in modo chiaro e convincente, sia verbalmente che attraverso documenti scritti.
- Leadership e gestione del cambiamento: capacità di guidare un team, ispirare e motivare i colleghi, e facilitare l'adozione di nuove tecnologie e metodologie.

²³ Eija Kaasinen et al., «Empowering and Engaging Industrial Workers with Operator 4.0 Solutions», *Computers & Industrial Engineering* 139 (gennaio 2020): 105678, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.052>.

4. Cultura dell'Apprendimento Continuo

L'evoluzione costante delle tecnologie impone una formazione continua. Il lavoratore 4.0 deve essere proattivo nel migliorare le proprie competenze, attraverso corsi online, certificazioni e aggiornamenti costanti. L'autoapprendimento e la curiosità diventano quindi fattori chiave per mantenersi competitivi nel mercato del lavoro.

- E-learning e aggiornamenti professionali: piattaforme come Coursera, Udemy e LinkedIn Learning offrono corsi su tecnologie emergenti e competenze trasversali.
- Networking e partecipazione a eventi: conferenze, webinar e fiere del settore sono occasioni preziose per rimanere aggiornati sulle tendenze del mercato.
- Capacità di adattamento a nuove metodologie di lavoro: dallo smart working all'adozione di pratiche Agile, il lavoratore moderno deve essere in grado di adattarsi rapidamente a nuovi paradigmi organizzativi.

5. Competenze Specifiche per Settore

Oltre alle competenze trasversali, il lavoratore 4.0 deve sviluppare abilità specifiche per il proprio settore. Ad esempio:

- **Manifattura e Industria:** conoscenza della robotica collaborativa, gestione dei macchinari interconnessi e utilizzo della realtà aumentata per la manutenzione predittiva.
- **Marketing e Comunicazione:** utilizzo avanzato dei social media, SEO, analisi dei dati di mercato e personalizzazione dell'esperienza utente basata su AI.
- **Sanità:** telemedicina, gestione dei big data sanitari, utilizzo di dispositivi wearable per il monitoraggio remoto.
- **Finance e Fintech:** blockchain, gestione degli algoritmi di trading, strumenti di analisi finanziaria automatizzata.²⁴

²⁴ Francesco Venier, *Trasformazione digitale e capacità organizzativa: le aziende italiane e la sfida del cambiamento* (Trieste: Edizioni Università di Trieste, 2017).

Le skills del lavoratore 4.0 non si limitano alla conoscenza delle tecnologie, ma comprendono anche capacità di adattamento, comunicazione e apprendimento continuo. In un mondo sempre più interconnesso e tecnologicamente avanzato, la chiave del successo risiede nella capacità di combinare competenze tecniche e trasversali, affrontando con dinamismo le sfide del futuro. La formazione continua, la capacità di innovare e un mindset flessibile sono le caratteristiche essenziali del professionista moderno, pronto a cogliere le opportunità della trasformazione digitale.

Capitolo 2: L'implementazione del banco prova motori elettrici nell'industria 4.0

2.1 Introduzione

I banchi prova per motori elettrici rappresentano uno strumento fondamentale per l'analisi, la verifica e l'ottimizzazione delle prestazioni di motori di diversa tipologia, tra cui i motori a corrente continua (DC), i motori a induzione e i motori brushless. Essi svolgono un ruolo cruciale in molteplici settori industriali, garantendo il controllo della qualità, la sicurezza operativa e il rispetto delle normative vigenti. L'impiego di questi dispositivi consente di eseguire test approfonditi in condizioni operative simulate, prevenendo guasti prematuri e ottimizzando l'efficienza energetica.

La necessità di testare i motori elettrici ha origine alla fine del XIX secolo, un periodo di straordinario fermento scientifico e industriale. Con l'espansione dell'elettrificazione e l'introduzione delle macchine elettriche nell'industria, si è reso indispensabile disporre di strumenti capaci di misurare con precisione le prestazioni dei motori prima della loro messa in opera. Le prime aziende impegnate nello sviluppo di banchi prova furono colossi dell'ingegneria come Siemens, General Electric e Westinghouse, i quali implementarono metodi di test sempre più sofisticati per garantire l'affidabilità dei loro prodotti.

Con l'avvento del XX secolo e il progresso dell'automazione industriale, i banchi prova hanno subito un'evoluzione significativa. Dall'utilizzo di semplici strumenti analogici per la

misurazione della tensione e della corrente, si è passati a sistemi digitali con tachimetri elettronici, oscilloscopi e software di analisi avanzati. L'introduzione dell'informatica e delle tecnologie di simulazione ha permesso di migliorare ulteriormente la precisione e la ripetibilità dei test, riducendo i margini di errore e accelerando il processo di validazione dei motori.

Oggi, con l'avvento dell'Industria 4.0, i banchi prova per motori elettrici si sono trasformati in strumenti intelligenti e interconnessi, in grado di raccogliere e analizzare dati in tempo reale grazie all'integrazione con sensori IoT, intelligenza artificiale e big data analytics. L'automazione dei test consente un monitoraggio continuo delle prestazioni dei motori, ottimizzando i processi produttivi e migliorando la manutenzione predittiva. Inoltre, tecnologie come il Digital Twin permettono di creare gemelli digitali dei motori testati, simulando il loro comportamento in diverse condizioni operative e riducendo i costi di sviluppo.

Nel settore della mobilità elettrica, dell'aerospaziale e della robotica, l'impiego di banchi prova avanzati è diventato imprescindibile. Le case automobilistiche, come Tesla e Honda, investono ingenti risorse nello sviluppo di sistemi di test ad alta precisione per i loro motori brushless, garantendo affidabilità e prestazioni elevate. Allo stesso modo, aziende leader nell'automazione industriale, come Siemens e ABB, hanno adottato banchi prova dotati di sistemi di analisi predittiva, capaci di prevenire guasti e migliorare la progettazione dei motori elettrici.

L'evoluzione dei banchi prova per motori elettrici continua a seguire il ritmo delle innovazioni tecnologiche, con lo sviluppo di strumenti sempre più precisi, automatizzati e interconnessi. La crescente domanda di efficienza energetica e sostenibilità spinge le aziende a investire in soluzioni di test avanzate, riducendo gli sprechi e migliorando l'affidabilità dei loro prodotti.

In seguito esploreremo nel dettaglio la storia, le funzionalità e le applicazioni dei banchi prova per motori elettrici, analizzando il loro impatto nell'industria moderna e le prospettive future di questa tecnologia essenziale per l'ingegneria elettrica e l'innovazione industriale.

2.2 Motori Elettrici: Principi, Tipologie e Applicazioni

I motori elettrici sono dispositivi elettromeccanici fondamentali che permettono di trasformare l'energia elettrica in energia meccanica. Grazie alla loro efficienza, affidabilità e ridotta necessità di manutenzione, trovano applicazione in molteplici settori, tra cui l'industria, la

mobilità sostenibile, la domotica e la produzione di energia rinnovabile. Nel corso del tempo, l'evoluzione tecnologica ha permesso di sviluppare soluzioni sempre più performanti, contribuendo alla crescita di un'economia basata su sistemi a basso impatto ambientale.

Il funzionamento di un motore elettrico si basa sull'interazione tra un campo magnetico e una corrente elettrica. Al suo interno troviamo due componenti principali: lo statore, ovvero la parte fissa, che genera il campo magnetico, e il rotore, la parte mobile che, interagendo con il campo magnetico, inizia a ruotare. Questo fenomeno è regolato dalla legge di Lorentz, secondo cui un conduttore attraversato dalla corrente e immerso in un campo magnetico subisce una forza che lo mette in movimento. La conversione dell'energia elettrica in energia meccanica avviene quindi in maniera continua, con un elevato grado di efficienza e senza bisogno di combustibili fossili.

Esistono diverse categorie di motori elettrici, classificate in base alla tipologia di corrente utilizzata.

I motori a corrente continua (CC o DC) sono protetti dalla possibilità di regolare facilmente la velocità e la coppia. Tra questi, i motori a magneti permanenti sono i più semplici e compatti, adatti a dispositivi di piccole dimensioni come ventilatori e giocattoli elettrici. I motori a eccitazione separata o serie, invece, sono più potenti e vengono impiegati in ambito industriale e nei veicoli elettrici. Un'evoluzione particolarmente interessante è rappresentata dai motori brushless, che eliminano le spazzole di contatto per ridurre l'attrito e migliorare l'efficienza. Questi motori sono ormai ampiamente utilizzati nei droni, nei moderni elettrodomestici e nei veicoli elettrici.²⁵

I motori in corrente alternata (CA o AC), invece, sono particolarmente diffusi in ambito industriale e domestico. Tra questi, i motori asincroni o a induzione si distinguono per la loro semplicità costruttiva e la ridotta manutenzione, caratteristiche che li rendono ideali per impianti produttivi, pompe e sistemi di ventilazione. I motori sincroni, invece, funzionano a una velocità costante, sincronizzata con la frequenza della corrente elettrica, e vengono

²⁵ Aníbal T De Almeida, Fernando J T E Ferreira, e João A C Fong, «Standards for Efficiency of Electric Motors», *IEEE Industry Applications Magazine* 17, fasc. 1 (gennaio 2011): 12–19, <https://doi.org/10.1109/MIAS.2010.939427>.

utilizzati in applicazioni che richiedono precisione, come le macchine utensili e le turbine eoliche. Esistono anche i motori universali, capaci di operare sia in corrente continua che alternata, spesso impiegati in elettrodomestici ad alta potenza come trapani e aspirapolveri.²⁶

Uno dei principali motivi per cui i motori elettrici stanno progressivamente sostituendo quelli a combustione interna è la loro elevata efficienza. In molti casi, questi dispositivi riescono a convertire oltre il 90% dell'energia elettrica in energia meccanica, mentre i motori a combustione si fermano a un'efficienza compresa tra il 30% e il 40%. Oltre al rendimento energetico, i motori elettrici presentano numerosi vantaggi, tra cui la ridotta necessità di manutenzione, dovuta all'assenza di componenti soggetti a forte usura, come le spazzole nei motori brushless.

Un altro aspetto fondamentale è l'assenza di emissioni dirette di CO₂, che li rende essenziali nella transizione verso un'economia sostenibile. Inoltre, questi motori offrono una maggiore affidabilità nel tempo, grazie alla loro costruzione semplice e robusta, che li rende ideali per applicazioni industriali e per funzionamenti continuativi. Anche la silenziosità è un elemento da non sottovalutare: non avendo processi di combustione interni, i motori elettrici riducono al minimo il rumore e le vibrazioni, migliorando il comfort in molte applicazioni, dalla mobilità urbana agli elettrodomestici di uso quotidiano.

L'uso dei motori elettrici è estremamente diversificato e spazia in molteplici ambiti. Nell'industria e nell'automazione, sono alla base del funzionamento di macchine utensili, robot industriali e impianti di produzione automatizzati. La mobilità elettrica rappresenta un altro settore in forte espansione, con auto, treni e autobus elettrici che stanno progressivamente sostituendo i mezzi tradizionali alimentati a combustibili fossili. Anche il settore aeronautico sta esplorando soluzioni di propulsione elettrica per ridurre l'impatto ambientale dei voli.

In ambito domestico, i motori elettrici sono presenti in quasi tutti gli elettrodomestici, dai frigoriferi alle lavatrici, dai condizionatori ai sistemi di ventilazione. Un altro settore in cui il loro impiego è cruciale è la produzione di energia, in particolare nelle turbine eoliche e negli impianti idroelettrici. Anche nel campo della medicina, i motori elettrici vengono utilizzati per

²⁶ Pooja Bhatt, Hemant Mehar, e Manish Sahajwani, «Electrical Motors for Electric Vehicle – A Comparative Study», *SSRN Electronic Journal*, 2019, <https://doi.org/10.2139/ssrn.3364887>.

strumenti chirurgici avanzati, protesi robotizzate e dispositivi di assistenza per persone con disabilità.²⁷

Negli ultimi anni, la ricerca ha portato a innovazioni significative nel campo dei motori elettrici, migliorandone l'efficienza e riducendone i costi di produzione. Lo sviluppo di nuovi materiali magnetici sta contribuendo a ridurre il peso e ad aumentare il rendimento, mentre l'integrazione con sensori intelligenti permette di ottimizzare il consumo energetico e migliorare la diagnostica predittiva dei guasti.

I motori elettrici superconduttori, attualmente in fase di sperimentazione, promettono di eliminare del tutto la resistenza elettrica, raggiungendo un'efficienza senza precedenti. Un altro aspetto cruciale riguarda l'evoluzione delle batterie, che consentirà di migliorare l'autonomia dei veicoli elettrici e favorire una transizione più rapida verso la mobilità sostenibile.

Grazie alla crescente diffusione delle energie rinnovabili e ai progressi nel campo della digitalizzazione e dell'automazione, i motori elettrici continueranno ad essere una tecnologia chiave per il futuro. Il loro ruolo sarà sempre più centrale nell'ottimizzazione dei processi industriali, nella riduzione dei consumi energetici e nella trasformazione delle infrastrutture di trasporto.²⁸

L'importanza dei motori elettrici nella società moderna è indiscutibile. La loro elevata efficienza, la ridotta manutenzione e l'assenza di emissioni dirette rendono una soluzione imprescindibile per il futuro dell'industria, della mobilità e della sostenibilità energetica. Con l'evoluzione tecnologica in corso, il loro utilizzo sarà destinato ad ampliarsi ulteriormente, contribuendo a un mondo più efficiente e meno inquinante.

2.3 Quando, dove e perché nascono i Banchi Prova per Motori Elettrici

²⁷ Swaraj Ravindra Jape e Archana Thosar, «COMPARISON OF ELECTRIC MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATION», *International Journal of Research in Engineering and Technology* 06, fasc. 09 (15 settembre 2017): 12–17, <https://doi.org/10.15623/ijret.2017.0609004>.

²⁸ De Almeida, Ferreira, e Fong, «Standards for Efficiency of Electric Motors».

I primi banchi prova per motori elettrici hanno iniziato a svilupparsi alla fine del XIX secolo, un periodo segnato da una straordinaria ondata di innovazione nel campo dell'elettricità e della meccanica. Inizialmente, i motori elettrici erano utilizzati principalmente in applicazioni industriali e commerciali, come nelle fabbriche per azionare macchinari, nelle ferrovie elettrificate e negli impianti di illuminazione pubblica. Tuttavia, con la crescente complessità e varietà di motori elettrici prodotti, si è resa necessaria la creazione di strumenti in grado di testarne l'affidabilità, la durata e l'efficienza prima del loro impiego in ambiti reali.

Durante il XIX secolo, l'elettricità stava emergendo come una delle tecnologie più rivoluzionarie. Personaggi come Michael Faraday, con le sue scoperte sulla legge dell'induzione elettromagnetica, e James Clerk Maxwell, con la formulazione delle equazioni del campo elettromagnetico, avevano posto le basi teoriche per lo sviluppo di macchine elettriche sempre più avanzate.²⁹

Con l'avvento della dinamo e dei primi motori elettrici, figure come Thomas Edison e Nikola Tesla hanno contribuito a diffondere l'uso dell'elettricità in molteplici settori. Edison promosse il sistema a corrente continua (DC), mentre Tesla sviluppò il motore a corrente alternata (AC), fondamentale per la creazione di sistemi di distribuzione elettrica più efficienti. Questa competizione tra corrente continua e corrente alternata, nota come "Guerra delle Correnti", ha accelerato la ricerca su macchine elettriche e sui sistemi di prova per verificarne il funzionamento.

Le prime applicazioni industriali e la nascita dei banchi prova

Con l'aumento della produzione industriale, si rese evidente la necessità di strumenti che permettessero di valutare in modo standardizzato le prestazioni dei motori elettrici. Le fabbriche produttrici di motori e generatori, come la General Electric negli Stati Uniti e la Siemens in Europa, iniziarono a progettare ambienti controllati nei quali i motori venivano sottoposti a test prima della commercializzazione.

I primi banchi prova per motori elettrici erano spesso rudimentali e consistevano in semplici carichi resistivi o meccanici che permettevano di misurare le prestazioni del motore in

²⁹ Piotr Bielaczyc et al., «Methodology of Electric Motor Testing on the Hybrid Engine Test Bench», *Combustion Engines* 174, fasc. 3 (1 agosto 2018): 26–32, <https://doi.org/10.19206/CE-2018-303>.

condizioni simulate. Venivano utilizzati strumenti analogici per rilevare parametri come tensione, corrente, velocità di rotazione e coppia erogata. Questi test erano fondamentali per verificare l'affidabilità dei motori in diversi scenari operativi e ridurre il rischio di guasti prematuri.

Le prime aziende che iniziarono a sviluppare banchi prova strutturati furono quelle impegnate nella produzione di macchine elettriche e impianti industriali. La Siemens & Halske in Germania e la Westinghouse Electric negli Stati Uniti furono tra le prime realtà a implementare metodi avanzati di test per garantire la qualità dei loro prodotti. Parallelamente, anche le università e gli istituti di ricerca, come il Massachusetts Institute of Technology (MIT) e il Politecnico di Milano, iniziarono a sviluppare laboratori specializzati per lo studio delle macchine elettriche.

Con il passare del tempo, i banchi prova sono stati migliorati grazie all'introduzione di nuove tecnologie, come l'uso di dinamo come carico controllato, sistemi di acquisizione dati sempre più precisi e software di analisi in grado di simulare condizioni di funzionamento realistiche.

L'evoluzione nel XX secolo

Nel corso del XX secolo, con l'avvento dell'automazione industriale e della meccanizzazione avanzata, la necessità di testare i motori in maniera più rigorosa è cresciuta esponenzialmente. I motori elettrici hanno trovato applicazione in una vasta gamma di settori, tra cui il trasporto (tram, treni, automobili elettriche), l'industria pesante e l'aerospaziale.

Per rispondere a queste esigenze, i banchi prova sono stati dotati di strumenti sempre più sofisticati, come tachimetri elettronici, oscilloscopi e sistemi di analisi delle vibrazioni. A partire dagli anni '60 e '70, con l'avvento dei primi computer, è stato possibile implementare sistemi di test automatici che riducevano l'intervento umano e garantivano risultati più accurati e ripetibili.³⁰

³⁰ Bielaczyc et al.

Oggi i banchi prova per motori elettrici sono strumenti essenziali per la produzione e la certificazione di motori utilizzati in ogni ambito industriale. I moderni sistemi di test includono controlli digitali, simulazioni avanzate e intelligenza artificiale per ottimizzare le prestazioni dei motori elettrici prima della loro commercializzazione.

Con lo sviluppo della mobilità elettrica, le case automobilistiche investono ingenti risorse nella progettazione di banchi prova specifici per motori di veicoli elettrici, al fine di testare efficienza, durata e comportamento in condizioni estreme. Inoltre, nei settori aerospaziale e navale, i banchi prova sono essenziali per garantire che i motori rispettino i rigorosi standard di sicurezza e prestazioni richiesti dalle normative internazionali.

La nascita dei banchi prova per motori elettrici è avvenuta in risposta all'esigenza di testare e garantire l'affidabilità di una tecnologia in costante evoluzione. Dalle prime installazioni nei laboratori industriali dell'epoca di Tesla ed Edison, fino ai moderni sistemi computerizzati impiegati nell'industria automobilistica e aerospaziale, i banchi prova hanno seguito e accompagnato lo sviluppo dell'ingegneria elettrica. Oggi, questi strumenti rappresentano un punto cardine per l'innovazione, permettendo di migliorare costantemente l'efficienza e la sostenibilità dei motori elettrici in ogni settore.

La diffusione dei motori elettrici nel corso degli ultimi decenni ha rivoluzionato moltissimi settori industriali, dall'automotive all'automazione industriale, dall'elettrodomestico alle macchine utensili. I progressi tecnologici e l'evoluzione delle tecniche di produzione hanno reso i motori elettrici sempre più performanti, compatti e versatili. In questo contesto, i banchi prova rappresentano uno strumento essenziale per garantire la qualità, la sicurezza e l'efficienza di questi motori durante tutto il loro ciclo di vita.

Di seguito, verranno analizzate in modo più approfondito le motivazioni principali che hanno portato allo sviluppo e all'ampia adozione dei banchi prova per motori elettrici:

Controllo della Qualità

Verifica di conformità agli standard.

Ogni settore industriale adotta specifici standard di conformità (es. norme IEC, UL, CE, ecc.) che stabiliscono requisiti minimi in termini di sicurezza, rendimento energetico e caratteristiche elettromeccaniche. I banchi prova consentono di verificare che i motori elettrici soddisfino tali

requisiti, misurandone parametri fondamentali come coppia, velocità, potenza assorbita e resa energetica.

Riduzione dei difetti di produzione in una catena di produzione moderna, anche un singolo difetto può generare costi elevati e compromettere l'affidabilità del marchio.³¹ Testare i motori elettrici in modo sistematico prima che escano dalla fabbrica permette di individuare in anticipo difetti di fabbricazione o di assemblaggio, riducendo così le richieste di assistenza o di sostituzione in garanzia. Inoltre, l'analisi dei dati raccolti in fase di test consente di migliorare continuamente i processi produttivi.

Tracciabilità e registrazione dei dati

I banchi prova moderni sono dotati di sistemi di acquisizione dati digitali, che registrano tutti i parametri di test. In questo modo, si crea uno storico di ogni singolo motore prodotto, utile per analisi successive, interventi di garanzia e ottimizzazione dei futuri progetti. La tracciabilità risulta fondamentale anche per soddisfare le normative vigenti in merito a sicurezza e responsabilità del produttore.

Sicurezza

Prevenzione di guasti catastrofici

Un motore difettoso può provocare danni irreparabili a macchinari e impianti, oltre a mettere a rischio la sicurezza degli operatori. Nei contesti industriali, un guasto può significare il fermo di una linea di produzione con costi elevatissimi. Testare a fondo ogni motore prima del suo impiego riduce drasticamente la probabilità che guasti di natura elettrica o meccanica si verifichino in operatività.

Verifica delle condizioni di stress

Un banco prova può simulare condizioni di carico variabili e persino estreme, come sovraccarichi di coppia, variazioni di tensione elettrica, temperature ambientali elevate o bassissime. Tali test di “stress” sono indispensabili per accertare che il motore mantenga

³¹ Alfredo Díaz Vaquero e Diana Florez, «UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)», s.d.

performance adeguate e resista a condizioni non ottimali o a rapidi cambi di regime, senza compromettere la sicurezza dell'insieme macchina-operatore.

Analisi delle vibrazioni e del rumore

Oltre alle tradizionali misure di coppia e potenza, i banchi prova possono misurare il livello di vibrazione e di rumorosità del motore. Vibrazioni eccessive indicano possibili problemi nell'allineamento meccanico, nei cuscinetti o in altri componenti, potenzialmente pericolosi nel lungo termine. Intervenire prima dell'installazione in campo è cruciale per evitare guasti o condizioni operative rischiose.³²

Ottimizzazione delle Prestazioni

Ricerca e sviluppo (R&D)

Nella progettazione e nello sviluppo di nuovi motori, gli ingegneri devono testare numerose varianti e prototipi. Attraverso prove su banco, si possono identificare configurazioni di avvolgimento, materiali e design meccanici più performanti. L'obiettivo è migliorare il rapporto potenza/peso, l'efficienza energetica, la resistenza al calore e la durabilità.

Caratterizzazione dei parametri del motore

Ogni motore possiede curve caratteristiche di coppia-velocità, efficienza e consumi che variano in base al carico e alle condizioni di funzionamento. I banchi prova permettono di tracciare con precisione tali curve, fornendo dati fondamentali per la scelta del motore più idoneo in un'applicazione specifica. Questa pratica di "caratterizzazione" consente di dimensionare correttamente il motore in un determinato impianto, massimizzando la produttività e minimizzando gli sprechi energetici.

Analisi termica e di raffreddamento

L'innalzamento della temperatura è uno dei principali fattori di degrado dei componenti elettrici. Durante i test su banco, è possibile valutare come il motore gestisce la dissipazione del calore in diverse condizioni di carico e in differenti ambienti. Queste informazioni consentono

³² Vaquero e Florez.

di progettare o selezionare i sistemi di raffreddamento (ad aria, a liquido, ventilazione forzata, ecc.) più adatti a garantire la massima longevità del motore.

Ottimizzazione in tempo reale

Alcuni banchi prova di ultima generazione sono dotati di algoritmi di controllo avanzati e software di simulazione che consentono la regolazione in tempo reale di parametri come la velocità, la coppia o l'iniezione di corrente. In questo modo, gli ingegneri possono studiare la risposta del motore a diverse strategie di controllo (ad esempio nei motori brushless con inverter), arrivando a soluzioni di guida più efficienti e precise.³³

Manutenzione e Riparazione Verifica post-riparazione

Nel caso di guasti o interventi programmati di manutenzione, è fondamentale assicurarsi che il motore riparato abbia recuperato le sue prestazioni originali. Il banco prova diventa quindi lo strumento più affidabile per confermare la bontà dell'intervento, testando il motore secondo parametri standard e confrontando i risultati con quelli originari.

Diagnostica preventiva

I banchi prova non servono soltanto nei processi di produzione, ma trovano applicazione anche nella manutenzione preventiva. Testare periodicamente i motori, simile a un "check-up", permette di identificare eventuali segnali di usura o malfunzionamenti allo stato iniziale (ad esempio anomalie nel comportamento elettrico o vibrazioni inusuali). Ciò previene rotture impreviste in servizio e allunga la vita utile dei motori.

Riduzione dei tempi di fermo macchina

Una manutenzione programmata e ben eseguita, supportata dall'utilizzo dei banchi prova, riduce drasticamente i tempi di fermo macchina in un impianto produttivo. Avere a disposizione dati certi sullo stato di salute del motore consente alle squadre di manutenzione di intervenire in modo mirato, pianificando sostituzioni di componenti e operazioni di riparazione in momenti ottimali.

³³ Vaquero e Florez.

Evoluzione e Importanza dei Banchi Prova nell'Industria

Dal motore a corrente continua al motore brushless

Storicamente, i primi banchi prova si concentravano soprattutto sui motori a corrente continua (DC). Con l'avvento dei motori a corrente alternata (AC) e successivamente dei motori brushless, sono cambiate le metodologie di test e i parametri analizzati. Oggi, i banchi prova sono in grado di gestire una molteplicità di tecnologie, integrando sensori di coppia dinamometri, analizzatori di potenza e sofisticati sistemi di acquisizione.³⁴

Automazione e digitalizzazione

La quarta rivoluzione industriale (Industria 4.0) ha portato a banchi prova altamente automatizzati e collegati in rete. I risultati dei test vengono immediatamente archiviati in database centrali, integrati con sistemi di gestione produzione (MES, ERP) e analizzabili tramite software di Business Intelligence. Questo approccio consente un miglior coordinamento tra i reparti di progettazione, produzione e manutenzione.

Sostenibilità e risparmio energetico

Con la crescente attenzione verso la sostenibilità ambientale, si è posta particolare enfasi sulle prove di efficienza energetica dei motori. Un motore più efficiente comporta un minor consumo di elettricità e, di conseguenza, una riduzione delle emissioni di anidride carbonica associate alla produzione di energia. I banchi prova, monitorando con precisione assorbimenti e rendimenti, permettono di sviluppare e produrre motori sempre più "green".

La nascita e lo sviluppo dei banchi prova per motori elettrici sono intimamente legati alla necessità di garantire standard elevati di qualità, sicurezza e affidabilità in un mercato sempre più competitivo e innovativo. Dall'identificazione di difetti di produzione alla verifica di conformità alle norme, dalla protezione dei lavoratori all'ottimizzazione delle prestazioni, fino alle esigenze di manutenzione periodica e riparazione, il banco prova è diventato un elemento imprescindibile.

³⁴ Bielaczyc et al., «Methodology of Electric Motor Testing on the Hybrid Engine Test Bench».

In un'economia in cui la domanda di motori elettrici è destinata a crescere (si pensi alla transizione verso la mobilità elettrica e all'automazione industriale avanzata), i banchi prova continueranno ad evolversi, integrando soluzioni digitali e intelligenza artificiale per migliorare ulteriormente l'affidabilità e la produttività delle aziende che li utilizzano. Essi rappresentano, oggi più che mai, un ponte tra la teoria della progettazione e la realtà pratica dell'utilizzo quotidiano dei motori elettrici in svariati campi applicativi.

2.4 Funzioni e Scopi dei Banchi Prova per Motori Elettrici

I banchi prova per motori elettrici rappresentano uno strumento fondamentale nella fase di sviluppo, validazione e controllo di qualità di questi dispositivi. Grazie a sofisticati sistemi di misura e acquisizione dati, consentono di testare il motore in condizioni variabili o estreme, simulando i contesti di utilizzo reali e mettendo in evidenza eventuali criticità.³⁵

Le principali funzioni svolte dai banchi prova:

Verifica delle performance:

I banchi prova permettono di analizzare in modo dettagliato i parametri prestazionali del motore, quali la coppia (Nm), la velocità di rotazione (rpm), il rendimento e i consumi energetici. Attraverso sensori di coppia, encoder e sistemi di acquisizione dati, è possibile monitorare in tempo reale il comportamento del motore sotto carichi diversi e a velocità variabili. Questo tipo di analisi è fondamentale per:

Progettazione e ottimizzazione: i dati raccolti consentono di comprendere se il motore risponde alle specifiche di progetto e, se necessario, di intervenire sulle geometrie o sui materiali di avvolgimento per migliorarne la resa.

Confronto tra prototipi: in fase di sviluppo, i banchi prova supportano la selezione della configurazione migliore tra diverse varianti di motori.

³⁵ I.M. Moreno-Garcia et al., «Development and Application of a Smart Grid Test Bench», *Journal of Cleaner Production* 162 (settembre 2017): 45–60, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.001>.

Validazione pre-produzione: prima di avviare la produzione di serie, i test garantiscono che le performance rispettino gli standard richiesti dal committente o dal mercato.

Test di affidabilità e durata:

Un altro obiettivo cruciale dei banchi prova è valutare la robustezza del motore nel lungo periodo, sottoponendolo a cicli di lavoro prolungati e intensivi. In queste sessioni di collaudo si simulano:

Variazioni di carico: il motore è testato con carichi crescenti, decrescenti o pulsanti per verificare la stabilità del sistema e l'assenza di surriscaldamenti anomali o vibrazioni eccessive.

Condizioni ambientali estreme: si possono riprodurre alte o basse temperature, livelli di umidità elevata o ambienti polverosi per osservare eventuali fenomeni di degrado.

Cicli di avviamento/arresto: si verifica la capacità del motore di ripartire in modo ripetuto senza subire deterioramenti significativi.

Questi test di affidabilità aiutano a identificare potenziali punti deboli, prevenire guasti in esercizio e programmare interventi di manutenzione predittiva.³⁶

Calcolo dell'efficienza:

L'efficienza energetica è un indicatore fondamentale, specialmente nell'ambito della sostenibilità e del risparmio energetico. Il banco prova consente di calcolare con precisione l'efficienza del motore, mettendo in relazione:

Energia elettrica assorbita: misurata mediante strumenti come analizzatori di potenza, che tengono conto di tensione, corrente e fattore di potenza.

Energia meccanica in uscita: rilevata tramite sensori di coppia e di velocità, per determinare con accuratezza la potenza erogata all'albero motore.

³⁶ É Ádámkó, A Szántó, e G Á Sziki, «Software Developments for an Electric Motor Test Bench Developed at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1237, fasc. 1 (1 maggio 2022): 012012, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1237/1/012012>.

Il rapporto tra la potenza meccanica resa e la potenza elettrica assorbita fornisce il rendimento. Disporre di un dato oggettivo sull'efficienza è di primaria importanza per contenere i costi operativi e rispettare le normative energetiche in vigore.

Monitoraggio delle condizioni di lavoro:

Un banco prova evoluto permette di riprodurre una vasta gamma di condizioni operative, così da valutare come il motore si comporta in situazioni reali o addirittura peggiorative rispetto a quelle standard. Oltre a variare il carico e la velocità, si possono introdurre:

Fluttuazioni di tensione: per verificare la sensibilità del motore a cali o picchi di alimentazione.

Elevate temperature di esercizio: per comprendere se il sistema di raffreddamento o i materiali isolanti sono adeguati.

Vibrazioni esterne: per accertare la solidità dei fissaggi e l'assenza di risonanze.

Cicli termici ripetuti: per esaminare la reazione dei componenti a espansioni e contrazioni termiche.

Grazie a tali test, i costruttori possono affinare il design del motore o migliorare i sistemi di raffreddamento e ventilazione, assicurando prestazioni costanti anche in condizioni critiche.

Test di conformità alle normative:

Con la crescente attenzione verso l'efficienza energetica e la sostenibilità ambientale, molte tipologie di motori elettrici sono soggette a regolamentazioni specifiche (ad esempio, normative internazionali come IEC o standard nazionali). ³⁷I banchi prova ricoprono un ruolo essenziale per:

Verificare il rispetto delle soglie di efficienza: stabilite da direttive che impongono limiti minimi di rendimento energetico.

³⁷ Ádámkó, Szántó, e Sziki.

Misurare parametri emissivi indiretti: per motori che vengono abbinati a sistemi di azionamento e possono influenzare, per esempio, la qualità della rete elettrica (armoniche, distorsione di corrente).

Certificazioni e omologazioni: la documentazione rilasciata durante i test costituisce la base per l'ottenimento di marchi di qualità, omologazioni o attestati di conformità.

Ciò garantisce ai produttori non solo di immettere sul mercato un prodotto in linea con gli standard richiesti, ma anche di dimostrare la conformità agli enti di controllo preposti.³⁸

I banchi prova per motori elettrici svolgono un ruolo chiave lungo tutto il ciclo di vita del prodotto: dalla fase di ricerca e sviluppo, dove supportano l'innovazione e l'ottimizzazione delle prestazioni, fino al controllo di qualità finale prima dell'immissione sul mercato. L'adozione di sistemi di test avanzati, in grado di fornire dati precisi e replicabili, è un investimento strategico per le aziende produttrici, poiché permette di realizzare motori sempre più efficienti, affidabili e conformi alle normative vigenti.

2.5 Implementazione e Interconnessione con l'Industria 4.0 nei Banchi Prova per Motori Elettrici

L'Industria 4.0 rappresenta un'evoluzione significativa nel panorama industriale, in cui la digitalizzazione e le tecnologie avanzate stanno trasformando i processi produttivi, migliorando efficienza, sicurezza e sostenibilità. I banchi prova per motori elettrici si inseriscono perfettamente in questa rivoluzione, beneficiando di innovazioni in ambiti come l'automazione, l'intelligenza artificiale (AI), l'Internet delle cose (IoT) e il cloud computing. Questi strumenti, essenziali per la verifica delle prestazioni dei motori elettrici, stanno subendo una trasformazione radicale grazie all'integrazione con le tecnologie abilitanti dell'Industria 4.0.

³⁸ Vaquero e Florez, «UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)».

1. Automazione e Controllo Remoto

I moderni banchi prova per motori elettrici sono completamente automatizzati e dotati di sistemi avanzati per il controllo remoto. Attraverso l'integrazione con sistemi IoT, i test possono essere gestiti a distanza, consentendo agli operatori di monitorare e intervenire sui parametri di prova senza la necessità di una presenza fisica costante.

Sensori Intelligenti: Sensori di temperatura, vibrazione, corrente e tensione monitorano in tempo reale il comportamento del motore.

Sistemi SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition): Consentono la supervisione, il controllo e la raccolta dei dati in tempo reale.

Cloud Computing: I dati raccolti vengono archiviati in cloud, permettendo analisi approfondite e storicizzazione delle prestazioni del motore nel tempo.

Integrazione con PLC e MES: I Programmable Logic Controllers (PLC) e i sistemi di Manufacturing Execution System (MES) facilitano l'integrazione tra i banchi prova e l'intero ecosistema produttivo.³⁹

2. Analisi dei Dati e Intelligenza Artificiale

L'analisi avanzata dei dati è una delle chiavi dell'Industria 4.0. I banchi prova generano enormi quantità di dati, che possono essere elaborati attraverso strumenti di big data analytics e machine learning per ottenere informazioni strategiche sulla progettazione e sulle prestazioni dei motori elettrici.

Ottimizzazione del Design: Grazie alla raccolta e all'analisi dei dati provenienti dai test, è possibile migliorare il design dei motori elettrici, riducendo il consumo energetico e aumentando l'efficienza.

Prevenzione dei Guasti: I modelli predittivi basati su machine learning permettono di identificare anomalie e prevedere possibili guasti prima che si verifichino.

³⁹ «Design and Development of a Remote-Control Test Bench for Remote Piloted Aircraft's Brushless Motors», *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette* 30, fasc. 4 (15 agosto 2023), <https://doi.org/10.17559/TV-20221004152801>.

Miglioramento della Qualità: L'analisi in tempo reale consente di identificare eventuali deviazioni dagli standard di qualità e correggerle immediatamente.

3. Simulazioni Avanzate e Digital Twin

La simulazione digitale è diventata uno strumento essenziale nei test sui motori elettrici. Con l'ausilio della tecnologia del Digital Twin, è possibile creare un gemello digitale del motore per testarne virtualmente le prestazioni prima della realizzazione fisica.

Riduzione dei Costi di Sviluppo: La possibilità di testare digitalmente un motore permette di individuare problemi e apportare modifiche prima della produzione, riducendo i costi di prototipazione e collaudo.

Analisi di Scenari Complessi: I software di simulazione avanzati permettono di analizzare il comportamento del motore in condizioni estreme senza rischi per le apparecchiature fisiche.

Test in Tempo Reale: La combinazione tra simulazioni e test fisici consente una validazione più accurata delle prestazioni del motore.

4. Manutenzione Predittiva e Diagnostica Avanzata

Uno degli aspetti più innovativi dell'Industria 4.0 è la manutenzione predittiva, che consente di prevenire i guasti prima che si verifichino, riducendo i tempi di fermo e i costi di manutenzione.

Raccolta Dati tramite IoT: I banchi prova sono dotati di sensori in grado di monitorare continuamente lo stato del motore e del banco stesso.

Algoritmi Predittivi: L'intelligenza artificiale analizza i dati per identificare schemi di degrado e segnali di possibili guasti imminenti.

Pianificazione Ottimizzata degli Interventi: Grazie alle previsioni sui guasti, è possibile programmare la manutenzione solo quando realmente necessaria, evitando interventi superflui e ottimizzando l'uso delle risorse.

5. Banchi Prova Specializzati per Motori Brushless e Applicazioni Avanzate

L'innovazione nell'Industria 4.0 ha portato alla creazione di banchi prova specializzati per motori brushless, che stanno diventando sempre più diffusi in settori come l'automotive elettrico, l'aerospaziale e l'automazione industriale.⁴⁰

Alta Precisione nei Test: Questi banchi prova permettono di eseguire test di efficienza, durabilità e stress con una precisione estremamente elevata.

Integrazione con Sistemi di Controllo Avanzati: L'uso di algoritmi di controllo evoluti consente una gestione più efficace delle prove.

Supporto a Motori ad Alte Prestazioni: I motori brushless sono sempre più utilizzati in applicazioni critiche, dove prestazioni elevate e affidabilità sono fondamentali.

L'integrazione dei banchi prova per motori elettrici con le tecnologie dell'Industria 4.0 sta rivoluzionando il settore, rendendo i test più precisi, efficienti e intelligenti. L'automazione avanzata, l'analisi dei dati, la simulazione digitale e la manutenzione predittiva stanno trasformando il modo in cui i motori elettrici vengono progettati, testati e mantenuti. Grazie a questi sviluppi, le aziende possono migliorare la qualità dei loro prodotti, ridurre i costi operativi e aumentare la competitività in un mercato sempre più tecnologico e interconnesso.

2.6 I Banchi Prova per Motori Elettrici Asincroni

I banchi prova per motori elettrici asincroni sono strumenti fondamentali per valutare le prestazioni, l'affidabilità e l'efficienza di questa tipologia di motori, largamente utilizzati in ambito industriale, nei trasporti e negli impianti di generazione di energia. Questi sistemi di test consentono di simulare condizioni operative reali e di raccogliere dati utili per ottimizzare il funzionamento e la progettazione dei motori asincroni. Di seguito vengono analizzati gli aspetti chiave relativi ai banchi prova per questa categoria di motori.

Per quanto riguarda la strumentazione e la misura dei Parametri dobbiamo tenere conto di:

⁴⁰ Moreno-Garcia et al., «Development and Application of a Smart Grid Test Bench».

-Coppia e Velocità: I banchi prova per motori asincroni sono equipaggiati con dinamometri per la misura della coppia erogata in funzione della velocità. Questi dispositivi permettono di testare il motore in diverse condizioni di carico, valutando le prestazioni dinamiche e statiche.

-Correnti e Tensioni: I motori asincroni operano generalmente con alimentazione trifase. Sensori di corrente e tensione ad alta precisione monitorano i parametri elettrici per studiare il comportamento della macchina e identificare eventuali inefficienze.⁴¹

-Scorrimento: Il fenomeno dello scorrimento, ovvero la differenza tra la velocità del rotore e quella del campo magnetico statorico, è un parametro essenziale da misurare per determinare il rendimento del motore e la stabilità del funzionamento.

-Temperatura: Durante i test, si monitora la temperatura degli avvolgimenti, del nucleo dello statore e dei cuscinetti, utilizzando termocoppie o sensori PT100. Un controllo efficace della temperatura aiuta a prevenire il surriscaldamento e a migliorare l'affidabilità del motore.

-Vibrazioni e Rumorosità: Nei settori industriale e dei trasporti, è cruciale rilevare vibrazioni e rumorosità, per prevenire guasti prematuri e migliorare il comfort operativo. Accelerometri e sensori acustici vengono impiegati per monitorare questi aspetti.

Gestione Elettronica e Software di Controllo

-Interfaccia con l'Inverter: Nei motori asincroni con controllo elettronico della velocità, il banco prova deve essere in grado di interfacciarsi con il variatore di frequenza (VFD) per raccogliere dati diagnostici e modificare i parametri di test in tempo reale.

-Regolazione dei Profili di Carico: Il software di gestione consente di impostare cicli di prova personalizzati, simulando condizioni operative reali (avviamenti, frenate, variazione del carico). Questa flessibilità è fondamentale per valutare l'efficienza del motore in diversi scenari.

-Acquisizione e Analisi dei Dati: Sistemi di acquisizione ad alta frequenza registrano i parametri meccanici ed elettrici del motore, facilitando l'ottimizzazione dei sistemi di controllo e migliorando la predittività della manutenzione.⁴²

⁴¹ Moreno-Garcia et al.

⁴² Bielaczyc et al., «Methodology of Electric Motor Testing on the Hybrid Engine Test Bench».

Efficienza e Consumi Energetici

-Calcolo dell'Efficienza: L'efficienza di un motore asincrono è determinata dal rapporto tra la potenza meccanica all'asse e la potenza elettrica assorbita. I banchi prova generano curve di rendimento e mappe di efficienza per individuare le migliori condizioni operative.

-Analisi delle Perdite: Il test a vuoto e il test a carico consentono di identificare le perdite principali: nel rame (effetto Joule), nel ferro (isteresi e correnti parassite), meccaniche (attriti) e nelle commutazioni dell'inverter. L'analisi delle perdite è fondamentale per il miglioramento dell'efficienza energetica.

Gestione Termica e Sistemi di Raffreddamento

Dissipazione del Calore: Il riscaldamento degli avvolgimenti e del nucleo statorico è un aspetto critico nei motori asincroni. I banchi prova possono integrare sistemi di raffreddamento controllati (aria forzata o liquido) per simulare diverse condizioni ambientali e garantire la stabilità termica.

Termografia e Sensori Multipli: L'uso di telecamere a infrarossi e sensori di temperatura multipli permette di eseguire analisi termografiche in tempo reale, identificando punti critici di surriscaldamento e ottimizzando il design del motore.

Affidabilità, Durabilità e Prove di Vita Accelerate

Test di Ciclo di Vita: I banchi prova consentono di sottoporre i motori asincroni a test di durata e stress, valutando il degrado nel tempo e calcolando il Mean Time Between Failures (MTBF).

Monitoraggio in Continuo: Durante le prove di durata, vengono registrati parametri come temperatura, vibrazioni e variazioni di coppia per rilevare eventuali anomalie e migliorare la robustezza del motore.⁴³

Applicazioni e Settori di Impiego

⁴³ Bielaczyc et al.

Industriale: I motori asincroni sono ampiamente utilizzati in macchinari industriali, pompe e compressori. I banchi prova permettono di testare le prestazioni in condizioni di carico variabile e avviamento frequente.

Automotive: Nei veicoli elettrici e ibridi, i motori asincroni vengono testati per verificare l'efficienza e l'affidabilità in diverse condizioni operative.

Energia e Generazione: Nei sistemi eolici e negli impianti idroelettrici, i banchi prova consentono di validare le caratteristiche dei motori asincroni utilizzati come generatori elettrici.

Integrazione con Sistemi di Simulazione

Hardware-in-the-Loop (HIL): I banchi prova avanzati possono essere integrati con modelli di simulazione, consentendo di testare il motore in scenari virtuali e di ottimizzare le strategie di controllo prima dell'implementazione finale.

Ottimizzazione dei Parametri: L'uso di algoritmi avanzati e modelli matematici nel software di test consente di regolare dinamicamente il controllo del motore, migliorando l'efficienza e riducendo i costi di sperimentazione.

Possiamo evincere che i banchi prova per motori asincroni rappresentano strumenti essenziali per garantire l'ottimizzazione delle prestazioni, la sicurezza e l'affidabilità di questi motori. La capacità di simulare condizioni reali e di raccogliere dati di misura dettagliati permette di migliorare costantemente il design e l'efficienza energetica, supportando l'evoluzione tecnologica in ambiti industriali, automobilistici ed energetici.

2.7 I Banchi Prova per Motori Elettrici Brushless

I banchi prova per motori elettrici brushless rappresentano sistemi di test avanzati, progettati per verificare in modo approfondito le prestazioni, l'affidabilità e la sicurezza di questa tipologia di motori. A differenza dei motori a spazzole, i brushless richiedono una gestione elettronica complessa (con inverter e sensori di posizione) che rende necessarie soluzioni di prova specifiche. Di seguito vengono approfonditi alcuni aspetti chiave relativi a questi banchi prova:

Strumentazione e Misura dei Parametri

Coppia e Velocità: I banchi prova per motori brushless integrano solitamente un dinamometro, ovvero un dispositivo in grado di fornire o assorbire potenza, e una cella di carico per la misura della coppia. Il dinamometro, controllato elettronicamente, simula il carico effettivo che il motore incontrerà in esercizio, consentendo di misurare con precisione la coppia erogata in funzione della velocità.⁴⁴

Correnti e Tensioni: Attraverso sensori di corrente e tensione ad alta precisione (spesso in configurazione trifase), si monitorano i parametri elettrici del motore e del relativo driver (inverter), per studiare l'andamento e la qualità della commutazione elettronica.

Temperatura: Nei motori brushless è fondamentale monitorare costantemente la temperatura del rotore, dello statore e dei componenti elettronici di potenza (come i MOSFET o gli IGBT del driver). Si utilizzano termocoppie, sensori PT100 o sistemi di acquisizione a infrarossi per valutare il comportamento termico e prevenire rischi di surriscaldamento.

Vibrazioni e Rumorosità: In applicazioni critiche (ad esempio nel settore automotive o aerospaziale), si installano accelerometri o sensori acustici per rilevare vibrazioni e rumori indesiderati, correlabili a squilibri o a difetti di montaggio.

Gestione Elettronica e Software di Controllo

Interfaccia con l'Inverter: Il motore brushless richiede un inverter controllato da un microcontrollore o da un DSP (Digital Signal Processor) che regola la sequenza di alimentazione delle fasi in base alla posizione del rotore. Il banco prova deve essere in grado di comunicare con l'inverter per raccogliere dati diagnostici (temperatura dei semiconduttori, tensione di bus DC, corrente di fase) e per modificare in tempo reale i parametri di funzionamento.

Regolazione dei Profili di Carico: Il software di gestione del banco prova consente di impostare profili di test personalizzati (per esempio cicli di accelerazione, decelerazione, carico costante,

⁴⁴ Carlos Moro García e Luis Manuel Mochón Castro, «DESIGN OF A TEST BENCH FOR HIGH EFFICIENCY, LOW POWER ELECTRIC MOTORS OF COMPETITION VEHICLES», s.d.

carico variabile), simulando condizioni operative reali. In questo modo si possono misurare le prestazioni del motore in diversi scenari d'uso.

Acquisizione e Analisi dei Dati: Sistemi di acquisizione ad alta frequenza permettono di registrare i parametri elettrici e meccanici del motore, fornendo dati utili per l'ottimizzazione dell'algoritmo di controllo, per la diagnostica predittiva e per la valutazione dell'efficienza complessiva.

Efficienza e Consumi Energetici

Calcolo dell'Efficienza: Uno degli obiettivi primari delle prove su un motore brushless è determinare il rapporto tra la potenza meccanica erogata all'albero e la potenza elettrica in ingresso. Tale valore, espresso in percentuale, indica l'efficienza del motore. La maggior parte dei banchi prova moderni include software di post-elaborazione dei dati che genera mappe di efficienza (spesso in funzione di coppia e velocità) e confronti tra diversi punti di funzionamento.⁴⁵

Analisi delle Perdite: L'esecuzione di test specifici (come il test a vuoto, il test a carico parziale e il test di pieno carico) consente di individuare e quantificare le principali forme di perdita (perdite nel rame, perdite nel ferro, perdite meccaniche e perdite di commutazione nell'inverter). Questa analisi è cruciale per progettare motori più performanti e limitare gli sprechi energetici.

Gestione Termica e Sistemi di Raffreddamento

Dissipazione del Calore: I motori brushless, specialmente quando operano a regimi elevati o con carichi pesanti, generano calore sia nelle avvolgimenti dello statore sia nei componenti elettronici di potenza. Nei banchi prova avanzati è spesso presente un sistema di raffreddamento (ad aria o a liquido) controllato in maniera automatica per mantenere la temperatura entro limiti di sicurezza.

⁴⁵ George E. Gorospe Jr. et al., «A Study of the Degradation of Electronic Speed Controllers for Brushless DC Motors», *PHM Society Asia-Pacific Conference* 1, fasc. 1 (14 luglio 2017), <https://doi.org/10.36001/phmap.2017.v1i1.1846>.

Termografia e Sensori Multipli: Alcuni banchi prova impiegano telecamere a infrarossi per eseguire un'analisi termografica in tempo reale, evidenziando eventuali punti caldi e garantendo una distribuzione termica omogenea. Una pluralità di sensori (termistori, termocoppie e PT100) fornisce inoltre un monitoraggio continuo e puntuale nelle zone più critiche.

Affidabilità, Durabilità e Prove di Vita Accelerate

Test di Ciclo di Vita: Oltre alle prove di prestazione pura, i banchi prova vengono utilizzati per test di durata (endurance test) e cicli di vita accelerati, sottoponendo il motore a condizioni termiche, meccaniche ed elettriche estreme, al fine di individuare possibili guasti prematuri e calcolare il “Mean Time Between Failures” (MTBF).⁴⁶

Monitoraggio in Continuo: Durante i cicli di stress, si acquisiscono continuamente parametri come vibrazioni, rumorosità e variazioni di coppia, per rilevare l'insorgere di eventuali problemi (ad esempio, disallineamenti o surriscaldamenti localizzati). Questo consente di intervenire precocemente nella progettazione, ottimizzando la robustezza del motore.

Applicazioni e Settori di Impiego

Automotive ed Elettromobilità: Nel settore automobilistico, i banchi prova per motori brushless sono fondamentali per validare le unità di trazione elettrica, verificando prestazioni e sicurezza in diverse condizioni (temperature rigide, cicli di carico intensi, ecc.).

Aerospaziale e Difesa: I motori brushless trovano impiego in sistemi di controllo di attuatori e droni, dove sono richieste elevata precisione di controllo e massima affidabilità. I banchi prova in questo ambito devono rispondere a standard di qualità e sicurezza estremamente rigorosi.

Industriale e Robotica: Molti robot industriali e macchine automatiche utilizzano motori brushless per la loro efficienza e la possibilità di raggiungere velocità elevate con controllo fine della coppia. I test specifici in campo industriale prevedono la simulazione di cicli di lavoro ripetitivi e rapidi cambi di direzione o velocità.

⁴⁶ García e Castro, «DESIGN OF A TEST BENCH FOR HIGH EFFICIENCY, LOW POWER ELECTRIC MOTORS OF COMPETITION VEHICLES».

Integrazione con Sistemi di Simulazione

Hardware-in-the-Loop (HIL): I banchi prova più evoluti possono operare in architetture Hardware-in-the-Loop, dove il motore fisico (sottoposto a test) interagisce con modelli di controllo e di sistema virtuali (ad esempio l'intero veicolo o l'insieme di componenti meccatronici). Questo permette di verificare il comportamento dell'intera catena cinematico-elettronica senza dover disporre di un prototipo completo.

Ottimizzazione dei Parametri: Grazie ai modelli matematici integrati nel software di gestione del banco prova, si possono testare rapidamente diverse configurazioni di controllo (ad esempio, strategie di Field Oriented Control o Sensorless Control), riducendo tempi e costi di sperimentazione.⁴⁷

Possiamo affermare che i banchi prova per motori brushless sono strumenti di importanza strategica per tutti quei settori in cui l'efficienza, la precisione di controllo e l'affidabilità del motore rivestono un ruolo centrale. Essi consentono di valutare in modo completo le prestazioni dei motori senza spazzole, fornendo dati preziosi per l'ottimizzazione dei progetti, la validazione delle strategie di controllo e la definizione di procedure di manutenzione e sicurezza. Sia che si tratti di applicazioni nel settore automotive, aerospaziale, industriale o della robotica, la possibilità di simulare condizioni reali e di raccogliere una grande quantità di dati di misura garantisce una continua evoluzione tecnologica e un miglioramento costante dei prodotti.

2.8 Vantaggi e svantaggi dei Banchi Prova per Motori Elettrici Brushless

I banchi prova per motori brushless presentano una serie di vantaggi sia per quanto riguarda le prestazioni dei motori stessi che per l'accuratezza dei test. Ecco alcuni dei principali benefici:

1. Alta Efficienza

⁴⁷ Ádámkó, Szántó, e Sziki, «Software Developments for an Electric Motor Test Bench Developed at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen».

I motori brushless sono notoriamente più efficienti rispetto ai motori a spazzole. Questo si traduce in minori perdite di energia, maggiore affidabilità e prestazioni superiori. I banchi prova per motori brushless sono in grado di misurare con precisione l'efficienza del motore e ottimizzare le sue prestazioni in tempo reale.

2. Minore Usura e Maggiore Durata

Poiché i motori brushless non utilizzano spazzole, c'è una riduzione significativa dell'usura meccanica, il che aumenta la durata complessiva del motore. I banchi prova permettono di monitorare l'usura e le condizioni operative senza il rischio di danneggiare componenti come le spazzole.

3. Bassa Manutenzione

I motori brushless richiedono meno manutenzione rispetto ai motori tradizionali. Questo è dovuto alla mancanza di componenti soggetti a usura come le spazzole. I banchi prova possono testare le performance dei motori brushless senza la necessità di interventi frequenti per la manutenzione, rendendo i test più semplici e veloci.

4. Controllo Preciso e Affidabile

I banchi prova per motori brushless sono dotati di sistemi elettronici avanzati che consentono di effettuare test più precisi rispetto ai motori con spazzole. Questi banchi permettono di simulare e testare il comportamento dei motori in condizioni specifiche, come velocità variabili, carichi differenti e temperature elevate, con un alto grado di accuratezza.⁴⁸

5. Test di Prestazioni Avanzati

Poiché i motori brushless sono più complessi e richiedono una gestione elettronica della commutazione, i banchi prova moderni sono progettati per eseguire test avanzati come la misurazione del comportamento dinamico, l'analisi della coppia in tempo reale, e la gestione termica. Questi test permettono di ottenere dati fondamentali per ottimizzare la progettazione del motore e prevedere eventuali guasti.

6. Maggiore Precisione nella Simulazione di Condizioni Realistiche

⁴⁸ Bielaczyc et al., «Methodology of Electric Motor Testing on the Hybrid Engine Test Bench».

Grazie alla tecnologia avanzata, i banchi prova per motori brushless consentono di simulare condizioni operative più complesse, come variabilità di carico e accelerazione, che rispecchiano situazioni reali. Ciò consente una valutazione molto precisa delle capacità del motore, particolarmente utile in applicazioni che richiedono alte prestazioni.

Nonostante i numerosi vantaggi, i banchi prova per motori brushless presentano anche alcuni **svantaggi**, soprattutto in relazione ai costi e alla complessità:

1. Alto Costo di Acquisto e Mantenimento

I banchi prova per motori brushless sono generalmente più costosi rispetto ai banchi prova tradizionali, principalmente a causa delle tecnologie avanzate necessarie per testare i motori brushless. La presenza di controlli elettronici sofisticati, sistemi di gestione della commutazione, e sensori ad alta precisione contribuiscono a un prezzo elevato.

2. Complessità Tecnica

I motori brushless e i banchi prova ad essi dedicati sono più complessi da progettare, installare e configurare. La gestione della commutazione elettronica, ad esempio, richiede competenze avanzate in elettronica e programmazione. Inoltre, le configurazioni dei banchi prova devono essere ottimizzate per adattarsi a diversi tipi di motori brushless, il che può richiedere ulteriori investimenti in tempo e risorse.⁴⁹

3. Necessità di Esperti Specializzati

L'utilizzo e la manutenzione di banchi prova per motori brushless richiede personale altamente qualificato e con esperienza. La comprensione delle caratteristiche specifiche dei motori brushless, delle tecnologie di controllo e dei parametri di prova avanzati è fondamentale per eseguire test accurati e interpretare correttamente i dati ottenuti.

4. Sensibilità ai Dati Ambientali

I motori brushless, sebbene più resistenti alla temperatura rispetto ai motori tradizionali, sono comunque sensibili alle variazioni di temperatura e altre condizioni ambientali. I banchi prova

⁴⁹ Bielaczyc et al.

devono essere dotati di sistemi di raffreddamento avanzati e sensori termici per monitorare e gestire adeguatamente la temperatura durante i test, aumentando la complessità dell'intero sistema di prova.

5. Risorse Computazionali e Software Complesso

Il processo di test dei motori brushless su banchi prova richiede una notevole quantità di risorse computazionali e software di analisi avanzati. L'acquisizione e l'analisi dei dati in tempo reale, insieme all'elaborazione delle simulazioni di carico e velocità variabile, richiedono sistemi informatici potenti e software personalizzati, che potrebbero essere costosi e complessi da gestire.

6. Calibrazione Complessa

La calibrazione dei banchi prova per motori brushless può essere più complessa rispetto a quella dei motori tradizionali. Il controllo preciso della commutazione e la gestione del flusso di corrente richiedono una calibrazione accurata dei sensori e dei sistemi elettronici, il che può richiedere tempo e una certa esperienza.

Possiamo quindi affermare che i banchi prova per motori brushless offrono numerosi vantaggi, tra cui alta efficienza, minor usura, bassa manutenzione e la possibilità di eseguire test avanzati su prestazioni, efficienza e comportamento dinamico del motore. Tuttavia, presentano anche alcuni svantaggi, come i costi elevati, la complessità tecnica e la necessità di competenze specializzate per operare e mantenere il sistema di prova. Nonostante questi svantaggi, l'uso di banchi prova per motori brushless è fondamentale in settori che richiedono motori altamente performanti e duraturi, come l'automazione industriale, i veicoli elettrici e l'elettronica di consumo. Con l'avanzamento delle tecnologie, i costi e la complessità di questi strumenti stanno diminuendo, rendendo il loro utilizzo sempre più accessibile e necessario in numerosi ambiti industriali.⁵⁰

2.9 L'utilizzo di banco prova motori elettrici brushless in diversi settori

⁵⁰ Gorospe Jr. et al., «A Study of the Degradation of Electronic Speed Controllers for Brushless DC Motors».

I banchi prova per motori elettrici brushless sono strumenti avanzati utilizzati in diversi settori industriali, dove è essenziale testare e ottimizzare le prestazioni dei motori brushless. Questi motori sono ampiamente utilizzati in applicazioni che richiedono alta efficienza, durata e affidabilità, come nei veicoli elettrici, nelle applicazioni aerospaziali, nella robotica e nell'automazione industriale. Ecco alcuni esempi di banchi prova per motori brushless, con diverse caratteristiche e applicazioni:

1. Banco Prova Motori Brushless per veicoli elettrici (EV)

Caratteristiche: Sistemi di monitoraggio della temperatura per evitare il surriscaldamento, sensori per misurare la dissipazione termica e il controllo preciso della corrente per gestire la commutazione elettronica.⁵¹

Applicazione tipica: Test dei motori elettrici dei veicoli in fase di progettazione, produzione e manutenzione. Ad esempio, Tesla utilizza banchi prova avanzati per testare i motori brushless delle sue auto elettriche.

2. Banco Prova per Motori Brushless in Robotica

Funzione principale: Testare il comportamento dei motori brushless sotto carico variabile, per ottimizzare la risposta dinamica e la precisione dei robot.

Caratteristiche: Sistemi di controllo per simulare il movimento del robot e testare la capacità di risposta a comandi in tempo reale, con un monitoraggio accurato delle prestazioni e dell'efficienza.

Applicazione tipica: Test dei motori per braccia robotiche nei settori della manifattura automatizzata, della saldatura robotizzata o dell'assemblaggio automatico.

3. Banco Prova per Motori Brushless in Aerospaziale

Funzione principale: Testare i motori brushless per verificarne la resistenza alle alte temperature, la durabilità sotto vibrazioni elevate e la stabilità in ambienti con bassi livelli di ossigeno.

⁵¹ Bielaczyc et al., «Methodology of Electric Motor Testing on the Hybrid Engine Test Bench».

Caratteristiche: Banchi prova dotati di camere climatiche per simulare condizioni ambientali estreme, sensori avanzati per la misurazione di coppia, velocità, e monitoraggio termico.

Applicazione tipica: Test dei motori brushless utilizzati in droni aerospaziali, satelliti e piccoli velivoli, come quelli utilizzati da aziende come SpaceX o NASA.

4. Banco Prova per Motori Brushless in Automazione Industriale

Funzione principale: Eseguire prove di precisione sui motori brushless, testando la risposta ai comandi in tempo reale e la capacità di mantenere velocità e coppia costanti durante il ciclo di lavoro.

Caratteristiche: Monitoraggio in tempo reale della velocità di rotazione, analisi della coppia e misurazioni dell'efficienza in condizioni operative simulate.

Applicazione tipica: Test di motori per robot industriali utilizzati per l'assemblaggio di componenti elettronici, o per applicazioni automotive nel montaggio di veicoli.⁵²

5. Banco Prova per Motori Brushless in Settore Elettronico

Funzione principale: Misurare il consumo energetico e la risposta termica dei motori brushless in applicazioni a bassa potenza.

Caratteristiche: Strumenti per la misurazione della frequenza di rotazione, della pressione statica (per le ventole) e del consumo di corrente.

Applicazione tipica: Test dei motori brushless impiegati in sistemi di raffreddamento per computer, dispositivi di climatizzazione portatili, e altre applicazioni elettroniche di consumo.

2.10 Esempi di Banchi Prova per Motori elettrici Brushless

In questo capitolo, vengono esaminati casi di studio in cui le aziende hanno implementato con successo i banchi prova motori elettrici nell'era dell'Industria 4.0

⁵² Ádámkó, Szántó, e Sziki, «Software Developments for an Electric Motor Test Bench Developed at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen».

L'Industria 4.0 ha portato significativi miglioramenti nell'automazione, nella raccolta e nell'analisi dei dati, così come nell'efficienza dei processi produttivi. Diverse aziende leader in vari settori hanno implementato con successo banchi prova per motori elettrici, integrando tecnologie avanzate come l'IoT, l'analisi dei dati in tempo reale, l'intelligenza artificiale e il machine learning per ottimizzare le prestazioni dei motori e ridurre i tempi di sviluppo e manutenzione. Ecco alcuni esempi di aziende che hanno implementato banchi prova per motori elettrici nell'era dell'Industria 4.0:

1. Tesla

Tesla, un leader globale nella produzione di veicoli elettrici e nella tecnologia delle batterie, utilizza banchi prova avanzati per testare i motori elettrici brushless dei suoi veicoli. L'azienda ha implementato una combinazione di test fisici e simulazioni digitali per ottimizzare le prestazioni dei motori e garantire l'affidabilità dei suoi veicoli elettrici in condizioni reali.

Implementazione Industria 4.0: Tesla utilizza tecnologie avanzate di monitoraggio in tempo reale tramite sensori IoT integrati nei motori e nei banchi prova. Questo consente una raccolta di dati dettagliata sulle prestazioni del motore, che vengono analizzati per ottimizzare l'efficienza energetica, le performance e la durata dei motori elettrici.⁵³

Integrazione con l'IoT e l'analisi dei dati: I banchi prova sono collegati a un sistema centralizzato che raccoglie e analizza i dati relativi a coppia, velocità, temperatura e consumi. Grazie a questa rete intelligente, Tesla è in grado di fare ottimizzazioni in tempo reale e rispondere tempestivamente a eventuali anomalie.

2. Siemens

Siemens, un gigante dell'automazione industriale e delle soluzioni per l'industria 4.0, ha sviluppato banchi prova avanzati per motori elettrici utilizzati in applicazioni industriali. I banchi prova Siemens sono dotati di tecnologie che permettono test approfonditi e ottimizzazione dei motori brushless e delle loro applicazioni.

Implementazione Industria 4.0: Siemens integra i suoi banchi prova con sistemi di controllo intelligenti che possono essere monitorati a distanza, raccogliendo dati in tempo reale sulle

⁵³ «Design and Development of a Remote-Control Test Bench for Remote Piloted Aircraft's Brushless Motors».

performance dei motori. Inoltre, Siemens offre sistemi che consentono l'analisi predittiva dei guasti grazie all'utilizzo di algoritmi di machine learning.

Integrazione con l'IoT e l'analisi dei dati: I banchi prova Siemens raccolgono enormi quantità di dati durante i test dei motori e li trasmettono a piattaforme di big data per l'analisi avanzata. L'uso di questi dati consente di prevedere guasti, ottimizzare la produzione e migliorare l'efficienza energetica dei motori.

3. General Electric (GE)

General Electric è una delle aziende che ha adottato con successo la tecnologia di monitoraggio remoto e l'analisi dei dati attraverso i suoi banchi prova per motori elettrici, in particolare nel settore delle turbine elettriche e dei motori industriali.

Implementazione Industria 4.0: GE ha integrato i suoi banchi prova con sistemi di intelligenza artificiale e big data per eseguire analisi predittive sui motori e prevenire guasti. I motori vengono monitorati in tempo reale tramite sensori IoT che inviano dati alla piattaforma Predix di GE, che analizza le prestazioni e fornisce raccomandazioni per la manutenzione predittiva.

Integrazione con l'IoT e l'analisi dei dati: GE utilizza i sistemi di raccolta dati per testare i motori elettrici e monitorare la loro efficienza, riducendo il rischio di malfunzionamenti imprevisti e ottimizzando il ciclo di vita dei motori. La tecnologia di manutenzione predittiva consente di minimizzare i tempi di inattività e migliorare la gestione delle risorse.⁵⁴

4. Bosch

Bosch, azienda leader in tecnologie automobilistiche e industriali, ha adottato banchi prova per motori elettrici come parte delle sue soluzioni per il settore della mobilità elettrica. I banchi prova Bosch sono utilizzati per testare motori elettrici di veicoli elettrici e componenti elettrici in applicazioni industriali.

Implementazione Industria 4.0: Bosch integra i suoi banchi prova con tecnologie di connettività IoT, consentendo il monitoraggio in tempo reale delle performance dei motori elettrici. Questo

⁵⁴ «Design and Development of a Remote-Control Test Bench for Remote Piloted Aircraft's Brushless Motors».

sistema permette una raccolta e un'analisi continua dei dati relativi alla temperatura, velocità, coppia e consumo energetico.

Integrazione con l'IoT e l'analisi dei dati: Utilizzando i sensori intelligenti, Bosch è in grado di raccogliere dati su ogni singolo motore elettrico testato e utilizzare piattaforme di big data per ottimizzare i processi produttivi e ridurre i costi di produzione e manutenzione.

5. ABB

ABB, una delle aziende globali nel campo dell'automazione e delle soluzioni elettriche, ha sviluppato avanzati banchi prova per motori elettrici che integrano tecnologie di Industria 4.0. ABB è particolarmente attiva nell'ambito dei motori brushless per applicazioni industriali e veicoli elettrici.

Implementazione Industria 4.0: ABB ha implementato banchi prova che utilizzano controllo remoto, automazione e analisi predittiva per ottimizzare la prestazione e l'affidabilità dei motori. L'analisi dei dati in tempo reale consente di rilevare eventuali malfunzionamenti prima che si verifichino.

Integrazione con l'IoT e l'analisi dei dati: Utilizzando sensori intelligenti e piattaforme di raccolta dati, ABB monitora continuamente le prestazioni dei motori e applica algoritmi di machine learning per prevedere guasti e migliorare la progettazione dei motori.⁵⁵

6. Honda

Honda, nel settore della mobilità elettrica e dei veicoli a basse emissioni, ha sviluppato un sistema di banchi prova per motori brushless che si integra con il sistema di automazione industriale per ottimizzare le prestazioni dei motori nei suoi veicoli elettrici e ibridi.

Implementazione Industria 4.0: Honda ha creato un ecosistema connesso di banchi prova e sistemi di monitoraggio in tempo reale per testare la durata, l'efficienza e le prestazioni dei

⁵⁵ García e Castro, «DESIGN OF A TEST BENCH FOR HIGH EFFICIENCY, LOW POWER ELECTRIC MOTORS OF COMPETITION VEHICLES».

motori brushless nei suoi veicoli. La manutenzione predittiva e l'analisi dei dati raccolti consentono di migliorare continuamente la qualità e l'affidabilità dei motori.

Integrazione con l'IoT e l'analisi dei dati: Grazie alla tecnologia IoT, i banchi prova Honda sono in grado di raccogliere dati per ogni motore testato e utilizzare algoritmi di intelligenza artificiale per ottimizzare le prestazioni in base alle condizioni operative previste.

In conclusione, le aziende che hanno implementato con successo banchi prova per motori elettrici nell'era dell'Industria 4.0 stanno usufruendo dei vantaggi derivanti dalla connessione intelligente dei loro sistemi di prova, dall'analisi predittiva dei dati e dalla manutenzione basata sui dati. Queste tecnologie avanzate consentono di ottimizzare la produzione, migliorare le prestazioni dei motori e ridurre i costi operativi, aumentando così l'affidabilità dei motori elettrici in settori che vanno dai veicoli elettrici alla robotica industriale e all'automazione.

3. Capitolo 3: Gage R&R Analysis

3.1.Introduzione

In questo capitolo verrà fornita una presentazione accurata e dettagliata su cosa sia un'analisi Gage R&R, vedremo come condurla e interpretarne i risultati.

L'analisi Gage R&R (Gage Repeatability and Reproducibility) è uno strumento statistico comunemente utilizzato nell'ambito del Controllo Qualità e del Lean Six Sigma. Il suo obiettivo principale è valutare l'affidabilità di un sistema di misurazione, tenendo conto sia della variabilità dovuta allo strumento di misura (ripetibilità) sia della variabilità introdotta dall'operatore o dal processo di misurazione (riproducibilità). Se il sistema di misura è inaffidabile, infatti, i dati rilevati potrebbero indurre decisioni errate in merito al miglioramento del processo. Prima di intervenire su una linea di produzione, è essenziale capire quanto di ciò che viene rilevato come "variazione" sia realmente colpa del processo (e delle sue fluttuazioni naturali) e quanto, invece, dipenda da limiti o errori del sistema di misura. In termini più semplici l'analisi Gage R&R risponde alla domanda: quanto possiamo fidarci dei nostri dati di misura?

3.2. Cosa è il Gage R&R

- Definizione: Il Gage R&R è una metodologia statistica che quantifica la percentuale di variabilità totale derivante da fonti di errore legate all'attività di misurazione, anziché alla variabilità intrinseca del prodotto o del processo.⁵⁶
- Contesto di utilizzo: Viene spesso applicato in produzione, in laboratori di controllo qualità o in qualsiasi ambiente in cui sia fondamentale garantire l'accuratezza delle misurazioni.

3.3. Terminologia e Concetti di Base

⁵⁶ «45_atakan_gerger_conducting_a_gage_r__r_study (1)», s.d.

La terminologia e i concetti base utilizzati nel Gage R&R sono i seguenti:

1. Ripetibilità (Ripetibilità)

La ripetibilità rappresenta la variabilità associata allo strumento di misura o all'operatore quando lo stesso individuo utilizza il medesimo strumento per misurare lo stesso pezzo, in condizioni identiche.

È una misura dell'errore casuale generato dal sistema di misurazione.

Se la ripetibilità è scarsa, significa che lo strumento di misura non è affidabile e genera risultati incoerenti anche nelle stesse condizioni operative.

Un'elevata ripetibilità è essenziale per garantire stabilità e affidabilità nelle misurazioni di controllo qualità.

La ripetibilità può essere compromessa da fattori come usura dello strumento, problemi di calibrazione, errori di lettura o condizioni ambientali sfavorevoli (ad esempio, vibrazioni, temperatura e umidità).

2. Riproducibilità (Riproducibilità)

La riproducibilità misura la variabilità nei risultati di misurazione quando il processo viene eseguito da operatori diversi, in momenti diversi o in ambienti diversi.

Indica quanto il sistema di misurazione sia sensibile all'intervento umano o a fattori esterni.

Se la riproducibilità è bassa, significa che operatori diversi ottengono misurazioni molto diverse tra loro, il che può indicare problemi di formazione, metodologia, o sensibilità dello strumento ai cambiamenti ambientali.

Per migliorare la riproducibilità è possibile standardizzare le procedure di misurazione, formare gli operatori e ridurre l'influenza di fattori esterni.

Una scarsa riproducibilità è particolarmente critica nei contesti di produzione in cui più operatori sono coinvolti nel controllo qualità.⁵⁷

3. Variabilità Totale (Variazione Totale)

La variabilità totale è la somma della variabilità del processo produttivo e della variabilità introdotta dal sistema di misura.

Si compone di due elementi principali:

Variabilità del prodotto o del processo : è la variabilità reale del prodotto misurato, causata da variazioni nei materiali, nei macchinari o nelle condizioni di lavorazione.

Variabilità del sistema di misura : include sia la ripetibilità (errore dello strumento) sia la riproducibilità (errore umano o ambientale).

Un sistema di misurazione efficace deve minimizzare il contributo della variabilità del sistema di misura, in modo da riflettere con precisione la reale variabilità del processo.

L'obiettivo di un'analisi Gage R&R è determinare quanto la variabilità introdotta dal sistema di misurazione indica sulla variabilità totale e se il sistema sia adeguato per il controllo qualità.

4. Precisione e Accuratezza

Questi due concetti sono spesso confusi, ma hanno significati distinti:

Precisione : è la capacità di ottenere valori coerenti tra loro nelle misurazioni ripetute, indipendentemente dalla loro vicinanza al valore reale. Un sistema di misurazione preciso riduce la dispersione dei risultati.

Accuratezza : rappresenta quanto la media delle misure sia vicina al valore reale o al valore atteso. Un sistema accurato minimizza l'errore sistematico.

⁵⁷ Mateusz Wrzochal e Stanisław Adamczak, «Application of a Gage R&R Study in Evaluation of Rolling Bearing Measurement System Accuracy», *Transportation Research Procedia* 40 (2019): 934–39, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.131>.

Il Gage R&R si concentra principalmente sulla precisione, poiché un'elevata precisione assicura una minore dispersione delle misure. Tuttavia, un sistema può essere preciso ma non accurato se c'è un errore sistematico (bias) che porta tutte le misure a essere lontane dal valore vero.

L'accuratezza viene migliorata attraverso la calibrazione dello strumento, mentre la precisione è influenzata da fattori come ripetibilità e riproducibilità.

3.4. Tipologie di Gage R&R

-Gage R&R Classico (Crossed)

Il Gage R&R di tipo “crossed” è la forma più comune e tradizionale di studio di ripetibilità e riproducibilità di un sistema di misurazione. In questo approccio, ogni pezzo selezionato viene misurato da ciascun operatore più volte (in genere lo stesso numero di volte per ogni operatore), consentendo di “incrociare” sistematicamente i fattori “operatore” e “pezzo”.

Struttura dello studio: si scelgono tipicamente un numero di pezzi (ad esempio 10), un numero di operatori (di solito 2 o 3, ma possono essere anche di più) e si eseguono più repliche per la stessa combinazione pezzo-operatore (ad esempio 2 o 3 misurazioni).

Finalità: isolare e quantificare la variabilità che deriva dallo strumento di misura (ripetibilità) e quella dovuta alle differenze tra operatori (riproducibilità), al netto della variabilità intrinseca dei pezzi stessi.

Vantaggi: Facilita la comprensione di come si ripartisce la variabilità totale (tra pezzi, tra operatori e dovuta allo strumento).

È relativamente semplice da realizzare se si possono misurare ripetutamente gli stessi pezzi in condizioni non distruttive.

Considerazioni pratiche: È importante che i pezzi selezionati coprano l'intero range di variabilità del processo che si vuole misurare.⁵⁸

È necessario che tutti gli operatori seguano la stessa procedura di misura per evitare differenze metodologiche.

-Nested Gage R&R

Il Gage R&R di tipo “nidificato” (nested) viene utilizzato quando non è possibile, per motivi pratici o tecnici, far misurare lo stesso pezzo a più operatori. Ciò avviene soprattutto in presenza di prove distruttive (in cui il campione si deteriora o non risulta più utilizzabile dopo la prima misurazione) oppure quando i pezzi non sono effettivamente intercambiabili tra operatori.

Struttura dello studio: I pezzi da misurare sono “nidificati” all'interno dell'operatore, nel senso che ogni operatore misura un set di pezzi differenti rispetto a quelli misurati dagli altri operatori. Di conseguenza, la variabilità totale si suddivide tra la variabilità all'interno dello stesso operatore (ripetizioni) e la variabilità tra operatori, ma non si ha una sovrapposizione diretta sullo stesso pezzo per operatori diversi.

Finalità: il focus rimane la valutazione di ripetibilità (varianza dello strumento o del metodo) e di riproducibilità (differenze dovute all'operatore), ma si tiene conto del fatto che i pezzi misurati non sono gli stessi per tutti.

Differenze rispetto al Crossed: L'analisi statistica è leggermente più complessa perché non si può confrontare direttamente la misura dello stesso pezzo tra operatori diversi.

⁵⁸ Tashi P. Erdmann, Ronald J. M. M. Does, e Søren Bisgaard, «Quality Quandaries*: A Gage R&R Study in a Hospital», *Quality Engineering* 22, fasc. 1 (7 dicembre 2009): 46–53, <https://doi.org/10.1080/08982110903412924>.

La stima della componente di variabilità tra i pezzi e quella tra operatori viene calcolata con un modello di analisi “nidificato”, in cui il fattore “pezzo” è inserito all’interno del fattore “operatore”.⁵⁹

2. Expanded Gage R&R

3. L’Expanded Gage R&R amplia il classico studio di ripetibilità e riproducibilità introducendo ulteriori fonti di variabilità potenzialmente significative.

Fattori aggiuntivi: Possono includere la variabilità tra diverse macchine o apparecchiature di misura, l’effetto di più turni di lavoro (es. turni giornalieri, notturni, weekend), la variabilità ambientale (temperatura, umidità), o qualunque altro fattore si sospetti possa influire sui risultati di misura.

Ogni nuovo fattore viene trattato come una variabile indipendente nell’analisi (ad esempio, “macchina 1 vs macchina 2” oppure “turno A vs turno B”).

Obiettivo: Ottenere una visione più completa di tutte le possibili sorgenti di errore, andando oltre il semplice effetto operatore-strumento.

Quantificare e separare le varie componenti di variabilità, così da sapere se, ad esempio, un determinato turno o una certa macchina introduce variazioni maggiori.

Considerazioni: L’aggiunta di fattori aumenta la complessità dell’esperimento e i requisiti di campionamento (più combinazioni da testare, maggiore numero di misurazioni).

Occorre pianificare attentamente lo studio, assicurandosi di avere un disegno sperimentale bilanciato e sufficiente per poter stimare correttamente le componenti di variabilità relative a ogni fattore.

⁵⁹ Qizheng Ren, «The Application of Gage R&R Analysis in s Six Sigma Case of Improving and Optimizing an Automotive Die Casting Product’s Measurement System», s.d.

Possiamo affermare che la scelta tra Gage R&R Classico, Nested o Expanded dipende dalle condizioni operative e dallo scopo dell'analisi:

Se è possibile far misurare gli stessi pezzi a tutti gli operatori, il Crossed Gage R&R resta la scelta più semplice e diffusa.

Quando non è fattibile utilizzare gli stessi pezzi (ad esempio in caso di test distruttivi), si adotta il Nested Gage R&R, che tiene conto della “nidificazione” dei pezzi sotto ciascun operatore.

Se si sospetta che altri fattori (macchine, turni, ambiente) possano influire in modo significativo, si estende lo studio con un Expanded Gage R&R, includendo tali variabili nell'analisi.

3.5. Pianificazione e scelta dell'approccio

La prima tappa di un'analisi Gage R&R (Gage Repeatability and Reproducibility) riguarda la pianificazione. Questa fase è fondamentale perché getta le basi per raccogliere dati di alta qualità, analizzarli in modo corretto e trarre conclusioni attendibili sulla bontà del sistema di misurazione. Di seguito sono illustrate le principali attività da svolgere in questa fase:

-Definizione del metodo di calcolo

Metodo ANOVA (Analisi della Varianza):

Uno degli approcci più affidabili e completi è basato sull'analisi della varianza (ANOVA). Attraverso questo metodo, si suddivide la variabilità complessiva delle misure in componenti attribuibili ai pezzi (variabilità vera e propria del processo/prodotto), agli operatori (differenze tra misuratori) e all'errore intrinseco dello strumento (ripetibilità). L'ANOVA permette di identificare con precisione quale porzione di variabilità deriva da ciascuno di questi fattori, fornendo un quadro dettagliato della performance del sistema di misura.⁶⁰

⁶⁰ Andrew Gelman, «Analysis of Variance—Why It Is More Important than Ever», *The Annals of Statistics* 33, fasc. 1 (1 febbraio 2005), <https://doi.org/10.1214/009053604000001048>.

Metodo Range (basato sulla differenza tra valori misurati):

È un metodo più semplice da calcolare rispetto all'ANOVA e spesso viene preferito quando si richiede un'analisi veloce o quando non si dispone di software specifici per l'analisi statistica. Il concetto alla base è osservare la differenza tra i valori misurati dallo stesso operatore (per la ripetibilità) e tra operatori diversi (per la riproducibilità). L'AIAG (Automotive Industry Action Group) descrive entrambi questi approcci nel Manuale MSA (Measurement Systems Analysis) e li considera metodi standard per la valutazione del sistema di misura.

-Selezione dei campioni da misurare

Copertura dell'intera gamma di variabilità:

È cruciale che i pezzi scelti rappresentino in modo realistico la variabilità attuale del processo. Se, ad esempio, il processo può produrre pezzi con dimensioni che variano all'interno di certi limiti, i campioni dovrebbero coprire il range completo di tali limiti. Se si vogliono testare più caratteristiche, occorre selezionare pezzi che presentino le diverse combinazioni di valori alti, medi e bassi.

Numero di campioni:

La regola di base è selezionare un numero sufficiente di campioni per assicurarsi che la variabilità presente nel processo sia ben rappresentata. L'AIAG, nel suo Manuale MSA, fornisce linee guida che suggeriscono di solito almeno 10 campioni, ma questa quantità può variare a seconda della natura del processo o delle esigenze specifiche dello studio.

-Scelta degli operatori

Rappresentatività dei turni e delle competenze:

Gli operatori che parteciperanno alla prova devono riflettere quanto più possibile la situazione reale in fabbrica. Ciò significa includere tecnici con diversi livelli di esperienza e che lavorano su diversi turni o reparti, in modo da valutare la riproducibilità nelle condizioni più consuete.

Formazione e istruzioni operative:

Prima di iniziare la raccolta dati, è opportuno verificare che ciascun operatore abbia ben compreso la procedura di misurazione, l'utilizzo dello strumento e l'interpretazione delle specifiche tecniche. Eventuali differenze di formazione o di interpretazione delle procedure potrebbero incidere in modo significativo sull'accuratezza delle misure.

-Stabilire il numero di ripetizioni

Ripetibilità:

La ripetibilità indica la coerenza con cui un singolo operatore riesce a misurare più volte lo stesso pezzo. Per valutarla, ciascun operatore effettua diverse misure sullo stesso campione, in condizioni che dovrebbero essere il più possibile identiche (stesso strumento, stessa posizione di misura, ecc.). In genere, si richiedono almeno due o tre misurazioni dello stesso pezzo per ogni operatore, ma in alcuni casi si può arrivare a un numero maggiore di ripetizioni per garantire maggiore affidabilità.

Riproducibilità:

La riproducibilità misura la coerenza tra operatori diversi. Se più operatori ripetono la stessa misura sugli stessi campioni, si può verificare quanto i loro risultati siano fra loro confrontabili. Anche in questo caso, prevedere almeno due o tre misure per ogni operatore aiuta a identificare eventuali differenze legate alle diverse modalità di utilizzo dello strumento, all'interpretazione dei risultati o all'esperienza individuale.

Altri aspetti da considerare in fase di pianificazione:

-Ambiente di misurazione: Verificare che le condizioni ambientali (temperatura, umidità, vibrazioni) non influiscano eccessivamente sulle misure. Se necessario, controllare o standardizzare l'ambiente per limitare la variabilità esterna.

-Etichettatura e rintracciabilità dei campioni: Assicurarsi che i pezzi siano chiaramente identificati per evitare confusione o errori di registrazione.

-Registrazione accurata dei dati: Utilizzare moduli chiari o sistemi digitali che permettano di tracciare facilmente tutti i dati raccolti e di facilitare l'analisi successiva.⁶¹

Una pianificazione curata rende più semplice, nella fase successiva, l'analisi statistica dei dati e l'interpretazione dei risultati. L'obiettivo finale di questo studio è determinare se il sistema di misurazione (strumento, operatore, metodo, ambiente) sia adeguato all'uso previsto, garantendo che la variabilità totale del processo non sia eccessivamente influenzata da errori di misura. Un

⁶¹ Wrzochal e Adamczak, «Application of a Gage R&R Study in Evaluation of Rolling Bearing Measurement System Accuracy».

sistema di misura con scarsa ripetibilità o riproducibilità potrebbe compromettere la capacità di controllo

del processo e la qualità del prodotto finale. Per questo motivo, l'analisi Gage R&R è uno strumento essenziale nell'ambito del Controllo Qualità e del Miglioramento Continuo.

3.6. Approccio metodo ANOVA

Il Gage R&R Test (Measurement System Analysis – MSA) è uno strumento fondamentale per valutare la qualità di un sistema di misura. Attraverso l'analisi Gage R&R, possiamo quantificare la variabilità dovuta allo strumento (ripetibilità) e all'operatore (riproducibilità) in rapporto alla variabilità complessiva del processo o del prodotto misurato. Tra i metodi disponibili per eseguire un Gage R&R, quello basato sull'ANOVA (Analysis of Variance) è uno dei più completi, poiché permette di scomporre la varianza in diverse componenti ed evidenziarne le cause principali.

Perché l'ANOVA è importante nel Gage R&R?

L'analisi ANOVA è molto importante nel Gage R&R Test per le seguenti ragioni principali:

-Scomposizione accurata della varianza

L'ANOVA consente di ripartire la variabilità osservata in diversi fattori (ad esempio, variazioni tra i pezzi, tra gli operatori e nell'interazione tra pezzi e operatori), distinguendo così la parte di incertezza dovuta allo strumento di misura.⁶²

-Analisi di interazioni complesse

Rispetto ad altri metodi di Gage R&R (ad esempio “Average and Range”), l'ANOVA permette di includere interazioni come “operatore × pezzo”, individuando se alcune combinazioni di operatore e pezzo determinano errori di misura più accentuati.

⁶² R.N. Henson, «Analysis of Variance (ANOVA)», in *Brain Mapping* (Elsevier, 2015), 477–81, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397025-1.00319-5>.

-Adattabilità a diverse condizioni sperimentali

L'ANOVA si presta bene anche a set di dati non perfettamente bilanciati, nei quali potrebbe mancare qualche misura o i ripetuti possono essere distribuiti in maniera irregolare. Questo la rende particolarmente flessibile in contesti industriali reali, dove talvolta i dati non seguono schemi “da manuale”.

Struttura tipica di un Gage R&R con ANOVA

Per implementare un Gage R&R basato su ANOVA, si segue generalmente un disegno sperimentale semplice, ma ben organizzato:

- Selezione dei pezzi : si seleziona un certo numero di campioni (ad esempio 10 pezzi) rappresentativi della variabilità del processo/prodotto.
- Scelta degli operatori : un gruppo definito di operatori (tipicamente 2 o 3) esegue le misure.
- Replica delle misure : ciascun operatore misura ogni pezzo più volte (di solito da 2 a 3 volte).

In questo modo si ottiene un set di dati che, una volta analizzato con l'ANOVA, permette di scomporre la varianza nei seguenti componenti principali:

1. Variabilità tra i pezzi (Part-to-Part Variation) : è la parte di varianza che descrive quanto differiscono i pezzi tra loro. Idealmente, dovrebbe essere il componente più grande, perché significa che i pezzi hanno effettive differenze di caratteristiche e che lo strumento è in grado di rilevarle.
2. Variabilità tra gli operatori (Reproducibility) : indica la differenza di risultati tra i vari operatori. Un'elevata variabilità tra operatori segnala un problema di uniformità nella procedura di misura o nella formazione degli addetti.
3. Variabilità dello strumento (Repeatability) : rivela quanto è stabile e preciso lo strumento quando viene utilizzato da uno stesso operatore su uno stesso pezzo in più repliche. Se è troppo grande, vuol dire che lo strumento tende a “fluttuare” nelle sue misure.
4. Interazione Operatore $\times$ Pezzo : rivela se vi sono pattern specifici tra determinati pezzi e determinati operatori che generano un errore sistematico. Ad esempio, un operatore potrebbe rilevare sistematicamente valori più alti rispetto a un altro per un certo tipo di pezzo.

Interpretazione analisi Anova nel GageR&R

Al termine dell'ANOVA, si ottengono tempi di varianza relativi alle diverse componenti. Queste vengono poi convertite in termini di percentuale sulla varianza totale o rispetto a una tolleranza (se disponibile).⁶³ Di solito, si vuole che la percentuale di varianza dovuta a ripetibilità e riproducibilità (variabilità di misura) sia la più bassa possibile. Diversi standard industriali propongono delle linee guida:

- <10% di variabilità dovuta al sistema di misura: accettabile.
- 10-30%: può essere accettabile a seconda dell'applicazione (valutare interventi di miglioramento).
- 30%: sistema di misura inaccettabile o comunque da migliorare sensibilmente.

La comprensione di queste soglie di riferimento aiuta le aziende a determinare se devono intervenire con azioni correttive (formazione, taratura dello strumento, manutenzione, sostituzione del gage o adozione di procedure di misura più rigorose).

Vantaggi e considerazioni pratiche

L'ANOVA in un Gage R&R Test offre diversi vantaggi, ma anche qualche considerazione da tenere a mente:

- Maggiore accuratezza : l'ANOVA fornisce una stima più precisa quando ci sono interazioni o quando i dati sono leggermente sbilanciati.
- Risultati più dettagliati : la suddivisione per fonte di varianza (pezzi, operatori, interazione, errore) dà indicazioni specifiche su cosa migliorare.⁶⁴
- Maggiore complessità analitica : l'analisi ANOVA può risultare più complessa da eseguire manualmente (rispetto ai metodi Average e Range). Oggi, però, molti software

⁶³ Henson.

⁶⁴ Henson.

statistici (ad esempio Minitab, JMP, ecc.) includono procedure guidate che semplificano enormemente i calcoli.

Possiamo affermare che la metodologia ANOVA applicata al Gage R&R Test rappresenta una delle tecniche più sofisticate e informative per valutare la qualità di un sistema di misura. Grazie a questa analisi, è possibile separare con precisione la variabilità dovuta allo strumento e all'operatore da quella intrinseca del processo o del prodotto, individuando aree di miglioramento specifiche.

L'obiettivo finale è garantire che il sistema di misura sia affidabile e che le decisioni basate sui dati di misura (ad esempio, l'accettazione o il rifiuto di un lotto) siano quanto più possibili corrette e oggettive.

In un contesto industriale sempre più orientato al controllo statistico e all'ottimizzazione dei processi, un Gage R&R ben eseguito, supportato dall'analisi ANOVA, diventa un pilastro imprescindibile della strategia di miglioramento continuo e di garanzia della qualità.⁶⁵

3.7. Fasi di Implementazione

1. Pianificazione dell'Esperimento

Selezione dei pezzi da misurare: di solito si scelgono da 5 a 10 pezzi che rappresentino l'intervallo di variabilità tipico del processo.

Selezione degli operatori: tipicamente da 2 a 3 operatori con diversi livelli di esperienza.

Definizione del numero di ripetizioni: spesso si eseguono 2 o 3 misure per ciascuna combinazione pezzo-operatore.

2. Raccolta Dati

Organizzare le schede di registrazione.

Assicurarsi che gli operatori eseguano le misure in ordine casuale per ridurre i bias.

⁶⁵ Gelman, «Analysis of Variance—Why It Is More Important than Ever».

Annotare le misure con cura, evitando influenze esterne (es. evitare di far vedere agli operatori i risultati precedenti).

3. Calcoli Statistici

Calcolo della media e della deviazione standard per ciascuna combinazione.

Stima della varianza dovuta alla ripetibilità e riproducibilità.

Confronto della varianza totale con la varianza del processo per ricavare gli indici di Gage R&R.

4. Analisi dei Risultati

Calcolo delle percentuali di contributo (ad esempio, % Gage R&R, % Repeatability, % Reproducibility).

Interpretazione di tali valori in relazione agli standard aziendali o di settore.

5. Conclusioni e Azioni Correttive

Se l'analisi mostra una variabilità troppo elevata, potrebbero essere necessarie azioni correttive sullo strumento (taratura, manutenzione) o sulla formazione degli operatori.

In casi estremi, si deve considerare un nuovo sistema di misurazione o procedure di controllo.

Un indice molto usato è l' ndc (Number of Distinct Categories), che indica quante categorie diverse riesce a distinguere lo strumento in base alla variazione dei pezzi. Se ndc è inferiore a 5, il sistema di misura non è in grado di “separare” con sufficiente precisione i pezzi con diverse caratteristiche, e anche in tal caso si considera l'analisi non soddisfacente.⁶⁶

3.8 Interpretazione dei Risultati

⁶⁶ Ren, «The Application of Gage R&R Analysis in a Six Sigma Case of Improving and Optimizing an Automotive Die Casting Product's Measurement System».

Se l'esito dell'analisi Gage R&R mostra un'elevata percentuale di variabilità imputabile al sistema di misura, occorre intervenire. Nella pratica, si agisce su questi fronti:

- Manutenzione dello strumento : verifica e calibrazione aggiuntiva, controllando che non ci siano componenti usurati o mal regolati.
- Formazione del personale : a volte gli operatori non seguono una procedura standard (ad esempio nell'inserire il campione nello strumento) o leggono i risultati in modo poco rigoroso.
- Procedura più chiare : definire nel dettaglio come e dove posizionare il pezzo, stabilendo condizioni ambientali (temperatura, umidità) e frequenza dei controlli.
- Riduzione di fattori esterni : garantire che, prima di misurare, il pezzo sia pulito, libero da polveri o bave di lavorazione; mantenere l'area di lavoro ordinata e con illuminazione adeguata.

1. Indice % Gage R&R

Generalmente, viene espresso in percentuale rispetto alla variabilità totale o rispetto alla tolleranza.

Regole comuni (non universali, ma indicative):

- **< 10%**: sistema di misura accettabile.
- **10% - 30%**: può essere accettabile, ma con cautela. È spesso migliorabile.
- **> 30%**: sistema di misura non accettabile, necessarie azioni correttive urgenti.

2. Analisi dei Contributi di Ripetibilità e Riproducibilità

Se la ripetibilità è il fattore principale di errore, si concentra l'azione sullo strumento di misura (taratura, manutenzione, sostituzione).

Se la riproducibilità è troppo elevata, si focalizza sul training degli operatori, sulla standardizzazione delle procedure o sulla riduzione del loro impatto soggettivo.⁶⁷

3. Rappresentazione Grafica

Range Chart e Average Chart (Xbar Chart): aiutano a visualizzare la dispersione e l'eventuale presenza di outlier o pattern di variabilità insoliti.

Componenti di Varianza: un diagramma a barre (bar chart) che mostra graficamente i contributi di strumento, operatore e interazione pezzo-operatore.

3.9 Miglioramento del Sistema di Misura

Per poter migliorare il sistema di misura, quindi garantire che ti fornisca risultati sempre più stabili e qualitativi bisogna attuare le seguenti indicazioni:

1. Taratura Periodica
2. Assicurarsi che lo strumento sia regolarmente calibrato e conforme ai requisiti di accuratezza e precisione.
3. Formazione degli Operatori
4. Standardizzare la procedura di misura, fornire istruzioni chiare e assicurarsi che ogni operatore abbia ricevuto lo stesso training.
5. Standardizzazione del Metodo
6. Ridurre la variabilità dovuta al metodo di misura (posizionamento del pezzo, condizioni ambientali, tempo di misura, ecc.).
7. Utilizzo di Sistemi di Misura più Avanzati
8. Se il sistema attuale non soddisfa i requisiti di precisione, valutare strumenti di misura tecnologicamente più avanzati o procedure automatizzate.

⁶⁷ Erdmann, Does, e Bisgaard, «Quality Quandaries*».

9. Monitoraggio Continuo

10. Ripetere l'analisi Gage R&R periodicamente, specialmente dopo cambiamenti significativi nel processo (nuovi operatori, modifiche alle procedure, cambi di strumento o aggiornamenti software).⁶⁸

3.10 Esempio di tabelle e grafici Gage R&R test

Esempio 1: dove possiamo vedere tabelle e grafici (figura 4) per Gage R&R test nella tabella.

⁶⁸ Ren, «The Application of Gage R&R Analysis in s Six Sigma Case of Improving and Optimizing an Automotive Die Casting Product's Measurement System».

Operator	Part 1	Part 2	Part 3	Part 4	Part 5
A	6.91	7.15	6.99	6.88	6.90
A	6.92	7.19	7.00	6.89	6.91
A	6.92	7.19	7.00	6.89	6.91
B	7.14	7.36	7.18	7.25	7.09
B	7.01	7.31	7.11	7.21	7.01
B	7.09	7.31	7.11	7.21	7.01
C	6.97	7.32	6.83	7.29	6.98
C	6.98	7.39	6.89	7.29	6.99
C	6.98	7.39	6.89	7.29	6.99

Figura4: Gage R&R measurement result

Questa tabella mostra delle misurazioni effettuate per poter condurre un Gage R&R test. Successivamente è stato condotto un Normality test per poter eseguire un'analisi del sistema di misurazione . I risultati dello studio sono mostrati nella Figura 5.

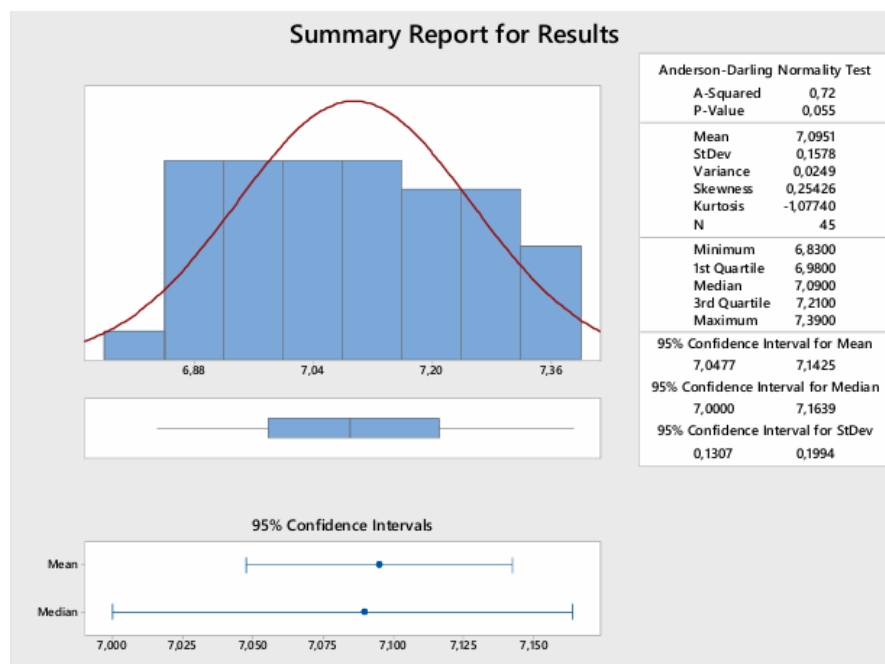


Figure5: Gage R&R data normality test

L'analisi del sistema di misura viene eseguita in conseguenza della distribuzione normale dei dati. L'analisi del sistema di misura è mostrata nella Figura 6.

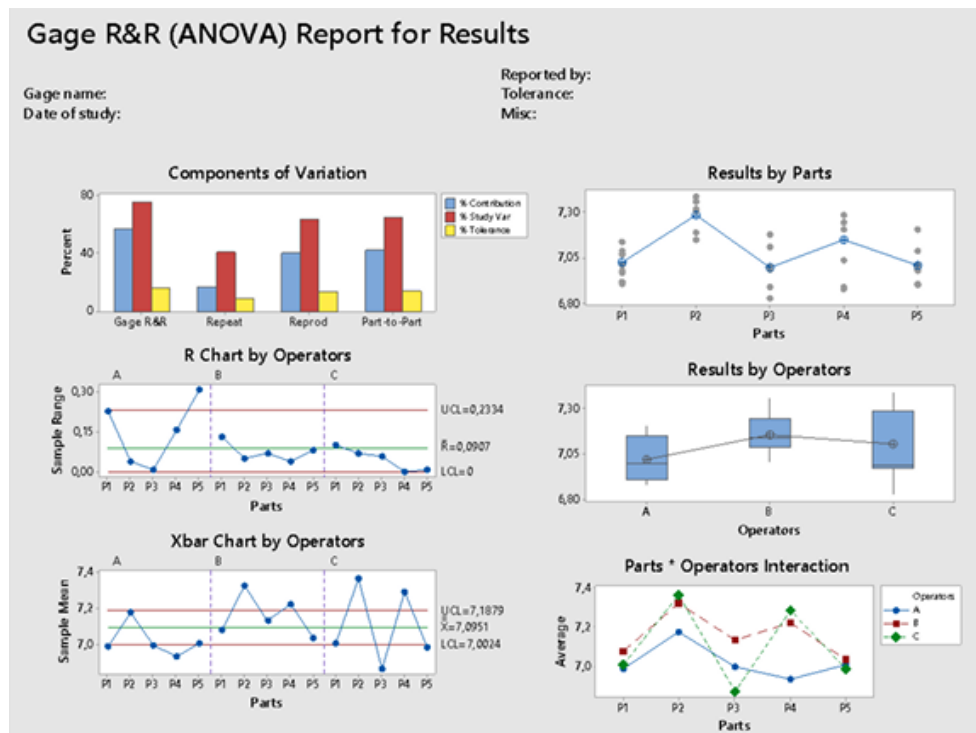


Figura6:Gage R&R analysis results

Attraverso i grafici possiamo notare come vengono rappresentati i risultati del Gage R&R analysis.⁶⁹

3.11. Conclusioni

L'analisi Gage R&R si conferma uno strumento strategico per qualunque organizzazione che desideri garantire l'accuratezza e la ripetibilità delle proprie misurazioni. In contesti industriali caratterizzati da alti volumi produttivi e standard qualitativi sempre più stringenti, la capacità di identificare e quantificare le fonti di variabilità del sistema di misura diventa un fattore critico di successo. Solo attraverso dati di misura affidabili, infatti, si possono prendere decisioni consapevoli e tempestive sull'andamento del processo, sulla necessità di azioni correttive o sulle opportunità di miglioramento continuo.

Implementare correttamente un'analisi Gage R&R significa:

⁶⁹ Ren.

Migliorare la qualità dei dati: identificare errori e distorsioni dovute allo strumento o all'operatore, così da intervenire con azioni correttive mirate (ad esempio formazione del personale, manutenzione o calibrazione degli strumenti, ottimizzazione delle procedure di misura).

Ridurre costi e sprechi: dati di scarsa qualità possono indurre a produrre in eccesso, a scartare prodotti di fatto conformi o, viceversa, a spedire prodotti fuori specifica. Evitare queste situazioni, grazie a un sistema di misura affidabile, porta a significativi risparmi economici.

Potenziare il processo decisionale: l'affidabilità delle misure è essenziale per chi deve prendere decisioni rapide e basate sull'evidenza. Con dati solidi, si riducono le incertezze e si evitano interventi inutili o tardivi.

Supportare il miglioramento continuo: un sistema di misura stabile e accurato permette di rilevare anche variazioni minime nel processo, identificando precocemente le tendenze e offrendo informazioni di valore per un ciclo di miglioramento continuo (PDCA, Six Sigma, Lean, ecc.).

Non va trascurata la dimensione culturale: un programma di analisi Gage R&R ben strutturato favorisce la consapevolezza, a tutti i livelli dell'organizzazione, dell'importanza di un corretto approccio alla metrologia e della necessità di un costante aggiornamento sugli standard e sulle tecnologie di misura. L'attenzione alle competenze degli operatori, alla formazione continua e al confronto su best practice di settore crea un ambiente collaborativo, orientato alla prevenzione degli errori anziché alla semplice correzione ex post.

Possiamo concludere affermando che investire tempo e risorse nell'analisi Gage R&R produce ritorni significativi sia sul piano operativo che strategico. Garantire misure precise e ripetibili rafforza l'immagine dell'azienda come partner affidabile, accresce la soddisfazione dei clienti e sostiene una visione di lungo periodo, fondata sulla competitività e sulla sostenibilità. Ogni processo di miglioramento parte dalla capacità di “vedere” correttamente la realtà: l'analisi Gage R&R fornisce proprio quegli “occhiali” fondamentali per leggere con chiarezza i dati di processo e promuovere l'eccellenza operativa.

Capitolo 4: Caso studio: C&P Service Srl

4.1 Presentazione dell'azienda

C. & P. SERVICE SRL è una società italiana che opera a MOLFETTA (BA) - Via dell'Arte Bianca S.N.C. - Zona Industriale ASI. La C&P Service S.r.l.

Nasce dalla collaborazione e dall'esperienza maturata dai suoi componenti nel settore delle macchine utensili e degli impianti automatici, con l'obiettivo di fornire prodotti tecnologicamente avanzati ed una collaborazione che va oltre il consueto rapporto cliente-fornitore. E' guardando alla realtà produttiva attuale che la C&P Service S.r.l. si propone come partner ideale per il raggiungimento di quei risultati indispensabili a tutte le aziende che oggi intendono confrontarsi con un mercato alla continua ricerca di una sempre maggiore affidabilità e qualità per gli impianti ed i loro prodotti per il settore come il Retrofit e Revamping Macchine Utensili. Nell'ambito dei servizi e soluzioni per l'impresa, il settore della progettazione e realizzazione di macchine e impianti opera in collaborazione con le migliori aziende di distribuzione di componenti meccanici, elettronici, idraulici e pneumatici, in modo da abbinare, a costi ridotti, le necessarie garanzie di funzionalità e/o reperibilità dei prodotti stessi. Il settore della progettazione e sviluppo software si avvale di volta in volta di prodotti diversi a seconda delle esigenze del committente, per rispondere agli obiettivi di un servizio altamente professionale nel campo del retrofit e revamping macchine utensili e automazione industriale per gli impianti, basandosi sull'utilizzo delle più recenti tecnologie hardware e software, ma soprattutto sul diretto contatto e disponibilità dei nostri tecnici con il cliente, per il raggiungimento della "qualità totale". Il settore della manutenzione e revisione macchine e impianti è rivolto a rispondere alle esigenze sia delle installazioni interamente curate dall'azienda, che a quelle realizzate in collaborazione con altre aziende, in ambito nazionale ed internazionale.

Manutenzione di Macchine Utensili e Impianti Automatici:

L'attività di manutenzione ordinaria e straordinaria ha il compito di adeguare e se possibile migliorare costantemente i sistemi alle esigenze espresse dai loro utilizzatori, ricorrendo dove necessario alla loro riprogettazione o alla loro sostituzione, quando i nuovi sistemi si rendono economicamente più vantaggiosi. Si propone ai clienti una manutenzione e un'attività che va

pianificata e progettata con la redazione di un piano di manutenzione preventiva, con l'intento di azzerare gli interventi di manutenzione correttiva dovuta a guasti incidentali e spesso non prevedibili. Per questo è indispensabile che il personale addetto abbia le necessarie competenze e che sia formato costantemente a saper coordinare gli interventi da eseguire al fine di garantire la continuità produttiva e i livelli desiderati. C&P punta molto sulla formazione del personale delle Aziende clienti, elemento fondamentale per una proficua collaborazione.

Retrofit e Revamping Macchine Utensili e Impianti Automatici:

Il retrofit elettrico è finalizzato alla installazione di nuove tecnologie o funzionalità di un sistema vecchio fuori produzione con uno di nuova generazione, così da prolungare la vita utile della macchina o dell'impianto, riducendo i costi di manutenzione e fermo macchina. Il revamping, totale o parziale, è finalizzato alla sostituzione parti meccaniche usurate, ed alle, modifiche strutturali con la sostituzione degli elementi che compongono le parti delle meccaniche idraulica e pneumatica presenti. Tale attività permette di allungare la vita utile del macchinario o impianto, anche se una operazione di manutenzione più costosa del retrofit va valutata in relazione all'acquisto di un macchinario o impianto nuovo. Per questo, quando le tempistiche e soprattutto il budget lo consentono, conviene valutare le due opzioni che l'Azienda può offrire. Obiettivo finale è la ricertificazione CE, con tutto quello che ne consegue: fascicolo tecnico, manuali di uso e manutenzione, dichiarazione di conformità e targa CE.

Adeguamento Normativo Macchine Utensili e Impianti Automatici: L'Azienda, elemento di particolare importanza nella sua gamma di servizi, propone la consulenza per l'adeguamento normativo delle macchine e/o impianti dei Clienti, al fine di garantirne la sicurezza. L'esperienza maturata permette a C. & P. di progettare e/o adeguare i macchinari in ottemperanza, oltre che alla Direttiva 2006/42/CE (Direttiva Macchine), anche alla Direttiva 2014/34/UE (Direttiva Atex) e alla Direttiva 2014/68/UE (Direttiva Ped).

L'Azienda è fortemente incentrata sulla produzione, sviluppo, messa in opera e implementazione attiva di sistemi tecnologici secondo il paradigma di Industria 4.0: si può anzi affermare che il core business dell'impresa riguarda proprio tale ambito.

Oltre al core business (manutenzione di macchine/utensili industriali), l'azienda ha sviluppato progetti legati alla Ricerca e Sviluppo.

Si tratta di progetti innovativi, con nuove tecnologie legate all'industria 4.0 e all'industria 5.0:

* Centralina idraulica con IoT, sensori intelligenti, computer/tablet e software di gestione della produzione per monitorare il magazzino e gli ordini;

* Banco prova motore con IoT, computer/tablet, sensori intelligenti e visore per realtà aumentata (utilizzato per vedere i dati in modo innovativo).

Questi progetti legati alla collaborazione uomo-macchina (attraverso lo scambio di informazioni), consentono la "manutenzione predittiva". In questo modo è possibile impostare e riparare la macchina prima che si verifichi il guasto. Quindi stiamo parlando di risparmio di tempo, costi e risorse, evitando fermi di produzione.

L'azienda ha avuto l'opportunità di mostrare ciò che ha sviluppato alle fiere di settore di Bari e Bologna (Italia), Parma (Italia) dal 2019 in poi.

L'azienda si avvale della collaborazione di una dozzina di dipendenti e ha realizzato nel 2023 un fatturato di circa 1,4 Mln€.

4.2 Realizzazione in economia del banco prova motori elettrici in ottica 4.0

Dopo aver realizzato in economia nel 2022 una stazione di test e collaudo di componenti idraulici, interconnessa in logica 4.0, l'azienda ha proseguito il suo percorso nella Transizione 4.0 con la progettazione e realizzazione in economia di un secondo banco prova per test e collaudo di motori e componenti elettrici.(figura7) Questo secondo banco prova, oltre alla interconnessione in logica 4.0 con il sistema di fabbrica fa uso anche della tecnologia della realtà aumentata, una delle tecnologie abilitanti del Piano Transizione 4.0 Il banco prova è **interconnesso in logica 4.0 ad un MES/gestionale di fabbrica, Odoo Open source ERP** dal quale il banco prova riceve tutte le informazioni per i test da eseguire sullo specifico componente e al quale rende, a fine prova e in moto totalmente automatizzato, l'esito della prova effettuata.



Figura 7: Banco prova elettrico marca C&P Service - Layout stabilimento, con focus sulla localizzazione del bene // complessivo del bene all'interno dello stabilimento produttivo

4.3 Descrizione del bene

Il bene oggetto di valutazione è il Banco prova motori elettrici brushless marca C&P Service SN C004A.23.

Le figure successive inserite nella presente analisi tecnica, (figure gruppo 8 e 23), rappresentano a pieno il bene oggetto di valutazione.

L'acquisto del bene Banco prova motori brushless marca C.&P. Service srl - SN C006.22, è inserito all'interno del processo aziendale. L'impiego del banco prova è quello di eseguire cicli di prova standardizzati sui motori elettrici per effettuare un collaudo finale dopo che il motore elettrico è stato riparato. Si compone di:

- un quadro elettrico di comando e controllo in cui sono alloggiati il CN Siemens 840Dsl che supervisiona l'impianto, la HMI dell'impianto, pulsanti e selettori
- un banco di prova dotato di appositi ripari di sicurezza sul quale viene alloggiato e fissato il motore elettrico da collaudare.

I motori da collaudare devono rientrare in un set definito di motori brushless per i quali è stato approntato un programma di collaudo sul CN dell'impianto. Il sistema è in grado di interrogare il motore brushless montato sul banco per verificare se questo è del tipo corrispondente a quello definito nel piano di test. Questo garantisce che i parametri di riferimento che il motore deve rispettare nel ciclo di collaudo sia effettivamente quelli richiesti per lo specifico tipo di motore.

Ciò avvalora e certifica l'esito del test, in quanto non è possibile testare un motore con un programma diverso da quello definito in precedenza per quello specifico tipo di motore.

Questa caratteristica consente di soddisfare al requisito dell'allegato A della Legge 232/2016 che per questo tipo di bene richiede che il sistema di monitoraggio in process assicuri e tracci la qualità del processo produttivo e consenta di qualificare il processo di produzione, la riparazione di motori difettosi in questo caso, in maniera documentabile. Al momento della scrittura della presente analisi tecnica i programmi previsti e implementati sono prevalentemente di rodaggio dopo la riparazione. Il programma di rodaggio effettua un certo numero di giri a velocità determinate in senso orario ed antiorario. Il CN è in grado di leggere la risposta del motore ai segnali di pilotaggio dello stesso in termini prevalentemente di velocità di rotazione e assorbimenti elettrici conseguenti. Il test si intende superato se il motore esegue per intero il test e risponde con prestazioni che sono all'interno di limiti prefissati dallo specifico programma di test. Il motore da riparare è stato identificato al suo ingresso nel ciclo di riparazione e collaudo con un codice, censito sul gestionale di produzione Odoo che costituisce il Sistema di Fabbrica al quale il banco prova è interconnesso.

Dopo l'esecuzione della riparazione del motore, questo viene avviato alla fase di collaudo, gestita per mezzo del bene in oggetto. Di seguito i passi operativi che vengono eseguiti.

1. L'operatore fissa sul banco prova il motore e lo collega elettricamente alla logica di alimentazione e controllo del banco.
2. L'operatore legge con lo scanner di barcode a bordo impianto il codice ordine di produzione presente sui documenti a sua disposizione codice motore da provare.
3. L'impianto interroga Odoo per l'acquisizione del part-program associato all'ordine di produzione scansionato dall'operatore e:
a. Se il codice corrisponde ad un ordine da collaudare, carica il part-program relativo all'ordine (del motore corretto e altri parametri di funzionamento associati al tipo del motore esempio "encoder o resolver") e predispone il banco per il test di prova e procede con l'avvio del ciclo di test;
b. Se il codice non corrisponde ad un ordine di produzione da produrre segnala errore all'operatore;
4. La macchina esegue l'ordine e si ferma automaticamente al raggiungimento della fine del test impostato da part-program:

- a. Se l'esecuzione dell'ordine viene interrotta prima del completamento, l'impianto consente all'operatore di dichiarare chiusa la produzione dell'ordine, specificando una causale di interruzione della lavorazione (es. mancanza alimentazione elettrica, guasto, motore non funzionante, ecc.). Odoo riceve dal banco prova l'esito di esecuzione non completa del test e lo archivia come risultato dell'operazione
- b. Fine prova: Il CN del banco comunica ad Odoo l'avvenuta esecuzione del test che Odoo provvede a registrare nel suo database, completando la tracciatura logistica del processo di riparazione dei motori.



Figura 8: Quadro elettrico di controllo



Figura 9: Accoppiatore meccanico con motore della coppia resistente



Figura 10: Sensori per la rilevazione delle condizioni operative del motore testato



Figura 11: Simatic IoT 2050

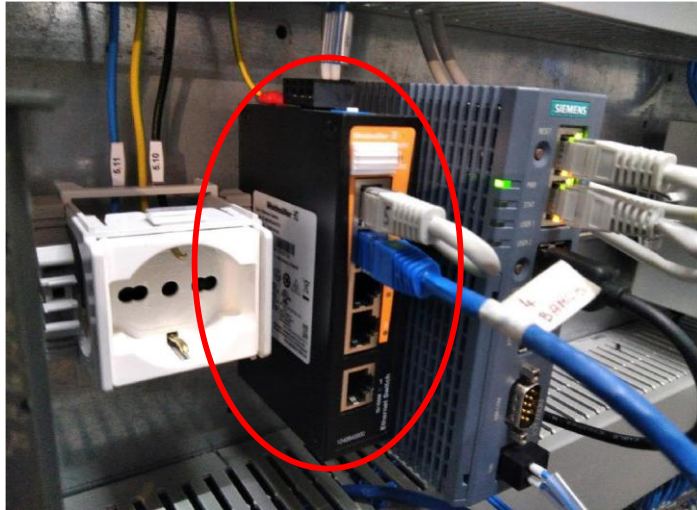


Figura 12: Switch Ethernet



Figura 13: Chiusura della cabina di prova con serratura interbloccata

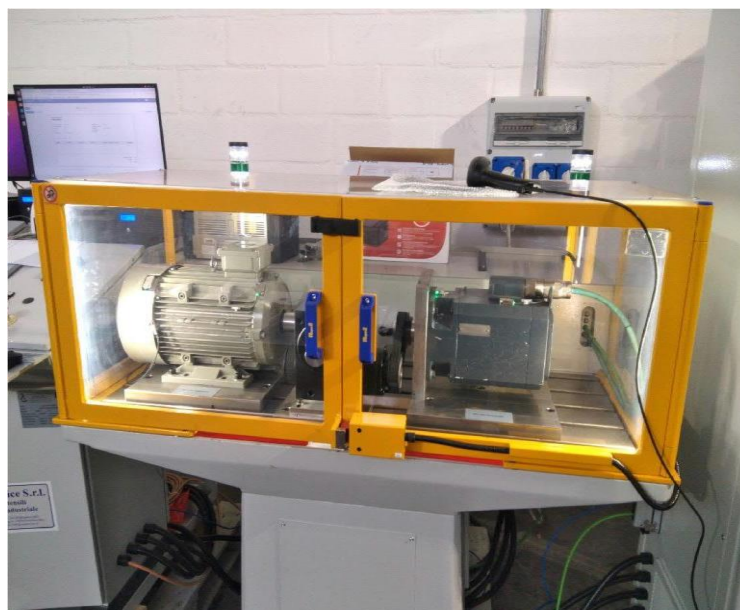


Figura 14: Cabina protetta per l'esecuzione delle prove



Figura 15: Controllo numerico visto dall'interno



Figura 16: Controllo numerico Sinumerik

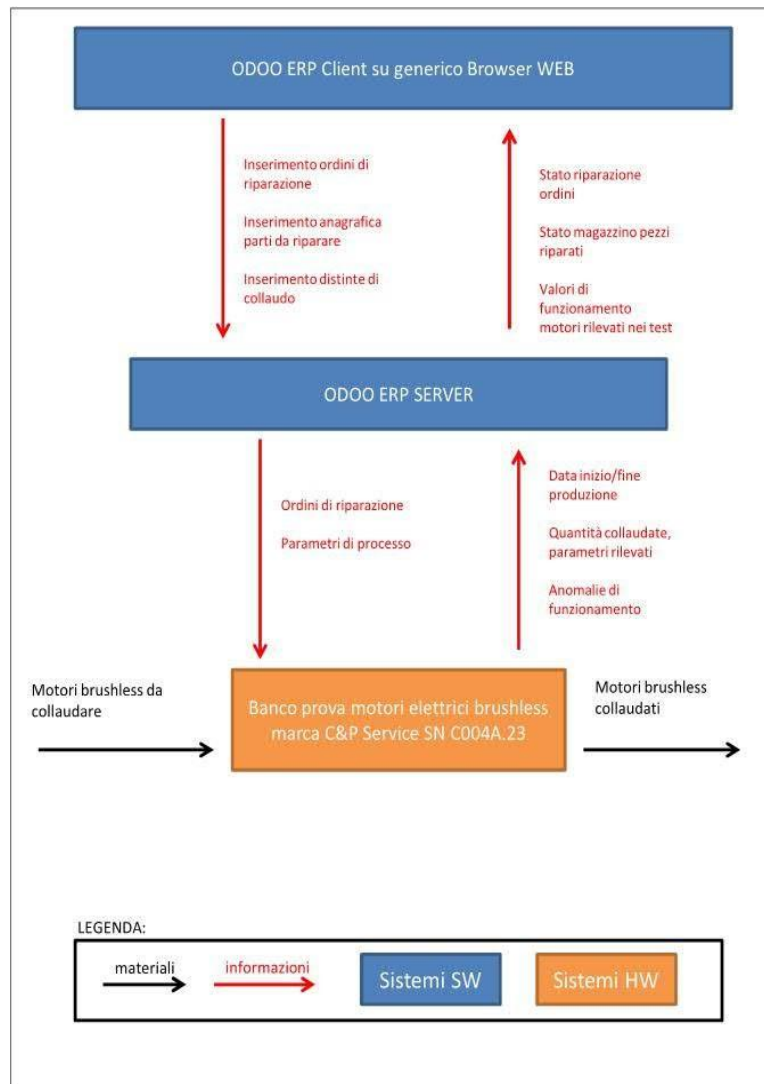


Figura 17: Schema flusso materiali e informazioni

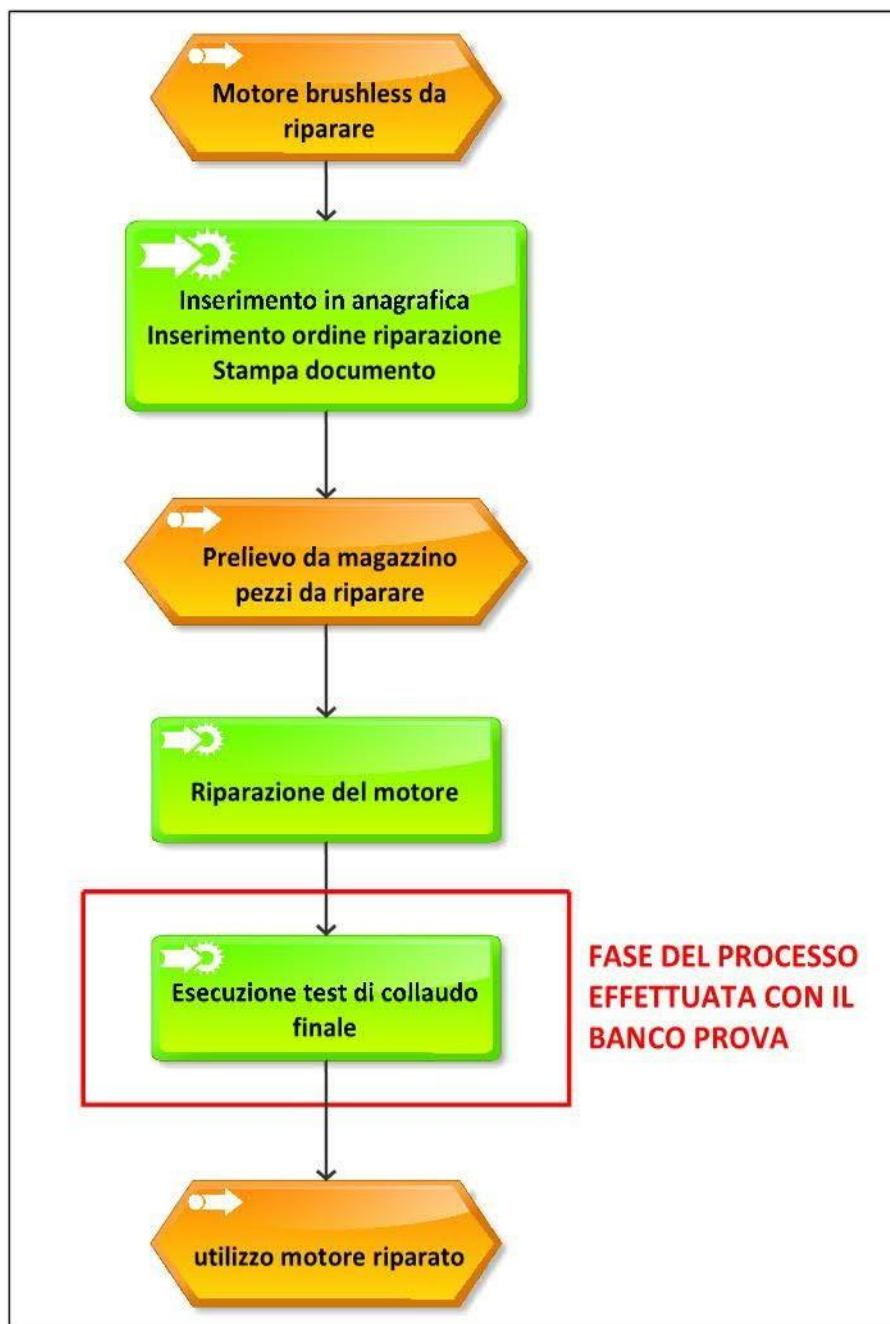


Figura 18: Schema processo di lavorazione

Il Banco prova motori brushless è dotato a bordo quadro di un pannello operatore Siemens con interfaccia standard: Sinumerik HMI Advanced. Questo pannello integra un ampio display a colori con una tastiera integrata. Al di sotto del pannello operatore è collocata una pulsantiera di macchina pulsantiera di macchina MCP483. Tutto quanto presente sulla pulsantiera, eccetto

un riquadro centrale di 12 pulsanti personalizzabili è gestito secondo lo standard Siemens per questo modello di CNC, ovvero Sinumerik 840Dsl. Sotto la pulsantiera macchina sono presenti le spie luminose di segnalazione stato impianto e alcuni comandi relativi all' avviamento della macchina. Per i dettagli si rimanda la manuale di uso e manutenzione del banco prova e al Manuale dell'operatore di Siemens. L'impianto è dotato anche di una pulsantiera manuale remota che viene abilitata dall' apposito pulsante sulla pulsantiera di macchina MCP. L' abilitazione della pulsantiera manuale forza la modalità di lavoro JOG (MANUALE), non permette la selezione delle modalità AUTO o MDA e impedisce l'avvio dei part program. La pulsantiera serve a gestire operazioni sull'unico asse controllato dell'impianto (quello che comanda il motore da collaudare) in modalità manuale, anche a ripari aperti ed è dotata pulsante uomo presente per svolgere le operazioni in sicurezza.



Figura 19: Lettore codice a barre per acquisizione informazioni dal gestionale



Figura 20: Torretta luminosa di segnalazione stato della macchina

4.4 Classificazione del bene

Per poter beneficiare dell'agevolazione fiscale prevista dal Piano nazionale Impresa 4.0 i beni devono appartenere ad una delle categorie definite nell'allegato A della legge 11 dicembre 2016, n. 232.

Si esamina di seguito il soddisfacimento del requisito da parte del Banco prova motori elettrici brushless marca C&P Service SN C004A.23, al fine di verificare che il bene sia incluso in una delle categorie definite nell'allegato A alla legge 11 dicembre 2016, n. 232.

Il banco prova è una stazione di test inserita nel processo produttivo della C&P Service srl, nello specifico al collaudo della dopo la riparazione di un motore brushless. I test effettuati sul banco prova, avvengono in modalità controllata e riproducibile e sono documentati in modo puntuale. Le registrazioni sono tutte riportate nel DB del sistema di fabbrica Odoo.

Come riportato a pagina 89 della circolare AdE n. 4E del 30 marzo 2017, le stazioni di testing fanno parte della categoria **“altri sistemi di monitoraggio in process per assicurare e tracciare la qualità del processo produttivo”**.

Tale tracciatura avviene in modo documentabile e connesso al sistema di fabbrica, in quanto il caricamento del part program e la relativa presa dati che viene utilizzata per verificare lo stato di funzionamento del motore in test avvengono in modo totalmente guidato e asservito dal sistema.

Di conseguenza è possibile concludere che il bene è **interconnesso** con il sistema informativo di fabbrica, pertanto, il bene è quindi incluso nel Secondo gruppo dell'allegato A della legge 11 dicembre 2016, n. 232: **"Sistemi per l'assicurazione della qualità e della sostenibilità "**.

Stabilito che il bene è compreso nel Secondo gruppo, il successivo e conclusivo passaggio della verifica relativa alla classificazione consiste nell'accertare che il bene possa essere incluso in una delle categorie nelle quali il Secondo gruppo è ulteriormente suddiviso.

Alla voce n. 2 del secondo gruppo dei beni elencati nell'Allegato A sono esplicitamente citate gli **“altri sistemi di monitoraggio in process per assicurare e tracciare la qualità del prodotto o del processo produttivo”** e che consentono di qualificare i processi di produzione in maniera documentabile e connessa al sistema informativo di fabbrica”.

Il Banco prova motori brushless marca C.&P. Service srl - SN C004A.23, effettua prove di collaudo di motori brushless in modo specifico e mirato per lo specifico codice parte da trattare e produce informazioni e risultati che sono trasferiti ed utilizzati dal sistema di fabbrica ai fini dell'esecuzione tracciata e controllata dei processi di qualità dell'azienda. Il Banco prova motori elettrici brushless marca C&P Service SN C004A.23, appartiene quindi alla categoria descritta alla voce n. 2 del secondo gruppo di beni dell'Allegato A.

4.5 Costo del bene e dei suoi componenti e accessori

Sulla base della documentazione prodotta e delle dichiarazioni rese da C. & P. SERVICE SRL risulta che: Il bene in oggetto corrisponde al cespite n. 9 del libro cespiti dell'azienda. Il bene è realizzato in economia e ha un costo complessivo rilevato di € 81.367,80. Questo costo include

anche un PC, un notebook, una stampante e un modem per un imponibile complessivo di € 2.660,00:

Bene (descrizione)	Fornitore (descrizione)	Matricola (nr.)	Valore del cespite (€)	Importo agevolabile (€)	Descrizione documento
Banco prova motori elettrici brushless marca C&P Service	C&P Service srl	C004A.23	€ 81.367,80	€ 78.707,80	registro cespiti, fatture di acquisto materiali (vedi allegati)

Dalle informazioni sopra riportate si evince che il valore agevolabile del bene oggetto di investimento è pari a: € 78.707,80.

4.6 Tempistiche investimento

Qui di seguito si riportano i dati riassuntivi con le date cardine dell'investimento

Attività	Nome attività	Descrizione attività	Data	Riferimento / Documento
Attività 1	Costituzione del bene nello stato patrimoniale dell'azienda - Banco prova componenti idraulici - marca C.&P. Service srl - SN C004A.23	Data in cui il bene è stato registrato e preso in carico	31/12/2023	Scheda cespiti del bene
Attività 2	Interconnessione alla rete aziendale	Data di sopralluogo in sito e verifica dell'interconnessione del bene alla rete aziendale.	13/11/2024	Verbale di esecuzione del test di verifica interconnessione

4.7 Esame possesso requisiti obbligatori per usufruire dell'agevolazione

Si esamina di seguito la caratteristica del bene al fine di accertare il rispetto del Requisito Obbligatorio. Ai sensi dell'Allegato A della Legge 11 dicembre 2016, n. 232, tutti i beni strumentali devono essere dotati della seguente caratteristica:

- Interconnessione ai sistemi informatici di fabbrica;

Di seguito viene analizzato il soddisfacimento del requisito da parte del Banco prova motori elettrici brushless marca C&P Service SN C004A.23.

4.7.1 Interconnessione ai sistemi informatici di fabbrica

La Circolare del 30 marzo 2017 n. 4/E chiarisce quanto segue (pag. 84 Par. 11.1.1 punto 2). Caratteristica obbligatoria n. 2 (Circolare N. 4/E del 30 marzo 2017)

“La caratteristica dell’interconnessione ai sistemi informatici di fabbrica è soddisfatta se il bene scambia informazioni con sistemi interni (es.: sistema gestionale, sistemi di pianificazione, sistemi di progettazione e sviluppo del prodotto, monitoraggio, anche in remoto, e controllo, altre macchine dello stabilimento, ecc.) per mezzo di un collegamento basato su specifiche documentate, disponibili pubblicamente e internazionalmente riconosciute (esempi: TCP-IP, HTTP, MQTT, ecc.). Inoltre, il bene deve essere identificato univocamente, al fine di riconoscere l’origine delle informazioni, mediante l’utilizzo di standard di indirizzamento internazionalmente riconosciuti (es.: indirizzo IP)

Il bene è dotato di un controllo numerico Siemens Sinumerik 840Dsl. Il controllo CNC SINUMERIK 840D sl offre modularità, apertura, flessibilità e una struttura omogenea per l'operatività, la programmazione e la visualizzazione. Esso mette a disposizione una piattaforma di sistema con funzioni trendsetting per quasi tutte le tecnologie.

Integrato nel sistema di azionamento SINAMICS S120 e ampliato con il sistema di automazione SIMATIC S7-300, il controllo numerico SINUMERIK 840D sl costituisce un sistema digitale completo, adatto soprattutto per il campo di potenza medio-alto.

Il SINUMERIK 840D sl si contraddistingue anche per grande flessibilità, dinamica e precisione elevatissime, integrazione ottimale in rete. Al CN è deputata l'interazione con l'azionamento e con il motore da collaudare.

Per questa implementazione è stato scelto un CN per poter scrivere ad alto livello il part program di collaudo del motore, con le stesse logiche che un ingegnere dell'automazione utilizza per gestire un motore brushless in un impianto automatizzato.

Il PLC SIMATIC S7-300 è visibile su rete Ethernet con protocollo TCP/IP all'indirizzo IP V4 10.200.0.2

Il CN dialoga con un HMI che è dotato di un PC Windows embedded, per la gestione dell'interfaccia operatore. Questo elemento del sistema è un SINUMERIK 840Dsl HMI Advanced (codice 6FC5210-0da21-2aa1), un embedded PC su cui gira Windows. CN e HMI condividono con il PLC S7-300 un'area di memoria e colloquiano in questo modo con il SW di più alto livello. In questa configurazione non sono indirizzabili direttamente via TCP/IP

Per gestire la comunicazione verso il sistema di fabbrica, il banco prova alloggia nel quadro elettrico un IPC system gateway Siemens Simatic IOT 2050 con le seguenti caratteristiche:

- Processore TI SOC AM6528 GP Dual Core
- RAM DDR4 1 GB
- BIOS SPI flash 16 MB
- slot per micro SD
- slot per scheda nano SIM
- slot di espansione per Arduino shield
- slot di espansione mini PCIe per schede PCIe 30x50,59mm e 30x26,8mm
- interfaccia USB-A (2.0 e 3.0)
- interfaccia DisplayPort
- interfaccia di rete LAN
- porta di comunicazione 9 pin RS 232-422-485

Il gateway Simatic IOT 2050 è di per sé un computer dotato di Sistema Operativo Debian OS e quindi raggiungibile tramite la LAN aziendale e risponde all'indirizzo IP V4 192.168.1.246. IOT 2050 colloquia con il PLC SIMATIC S7-300 attraverso un protocollo aperto documentato da Siemens che utilizza ordinari strumenti di comunicazione socket TCP/IP. Per fare questo IOT2050 è mappato su un secondo indirizzo di rete 10.200.0.180 visibile sulla LAN condivisa con il PLC.

Inoltre il gateway Simatic IOT 2050 è in grado di gestire lo scambio di chiamate API con il sistema di fabbrica Odoo, residente su apposito server visibile nella LAN aziendale, mediante trasmissione TCP/IP e con protocollo XML RPC.

Il sistema Odoo risiede su un PC Linux che risponde all'indirizzo IP V4 192.168.1.197. Le sessioni utente su Odoo avvengono tramite una interfaccia WEB con un browser web aperto sulla stessa macchina e potenzialmente da qualsiasi altro dispositivo connesso ad internet che possa vedere in rete il server di Odoo.

Il bene oggetto di investimento scambia informazioni e dati coinvolgendo gli addetti di linea a livello operativo dello specifico reparto. Attraverso tali risultanze in tempo reale si riesce ad avere un controllo dei parametri del bene utili all'azienda. La comunicazione tra il sistema informativo di fabbrica e il bene avviene in modo bidirezionale.

Il sistema di fabbrica ERP Odoo gestisce il processo con il suo modulo standard delle riparazioni, flusso di lavorazione tipico del processo di qualità aziendale. Odoo censisce un'anagrafica dei tipi di motori riparabili e associa ad ogni codice di questa anagrafica un set di valori tipici della prova da eseguire:

- riferimento al part program residente sul CN da eseguire
- velocità massima da raggiungere nella prova in RPM
- identificativo standard del tipo di motore brushless
- numero di cicli da eseguire
- tempo di esecuzione di ogni ciclo in secondi
- tempo di pausa tra un ciclo e l'altro in secondi

L'operatore carica in magazzino un motore da provare per collaudo finale, dopo l'avvenuta riparazione.

Al caricamento in magazzino del motore da riparare, Odoo genera un codice a barre che identifica il tipo di motore che accompagna da quel momento in poi il pezzo da riparare. Viene stampato un foglio identificativo dell'ordine di riparazione che accompagna il motore in tutte le fasi del processo.

L'operatore a bordo banco prova fissa il motore sul banco, chiude i ripari di sicurezza e legge con un lettore barcode i due codici a barre che identificano il motore e l'ordine di riparazione.

Se Odoo riconosce il codice, trasferisce in modo automatico i dati al CN che si predispose per la prova. Sul CN deve essere precaricato il part program di collaudo dello specifico tipo di motore, i cui parametri operativi vengono invece ricevuti da Odoo e aggiornati per la specifica prova pianificata sullo specifico ordine di riparazione. E' quindi possibile personalizzare sul gestionale Odoo parametri operativi più o meno estensivi e gestire in maniera specifica e personalizzata specifici ordini di riparazione, anche in funzione degli accordi con il cliente finale.

L'operatore avvia la prova e sorveglia che non ci si verifichino problemi. Il CN interroga il motore per verificare che il tipo di motore corrisponda a quello comunicato dal gestionale e avvia la prova solo in caso di perfetta corrispondenza tra le due informazioni.

A fine prova il CN invia ad Odoo l'esito positivo o negativo del test che viene memorizzato nell'ordine di riparazione del motore.

Il trasferimento dei dati in modalità bidirezionale è totalmente automatizzato e guidato dalla lettura dei codici a barre identificativi dei pezzi da riparare e dei programmi di collaudo da eseguire.

Si ribadisce che è stata verificata tramite sopralluogo in sito l'interconnessione del bene con il sistema informativo di fabbrica, il quale scambiano i dati descritti nel paragrafo precedente tramite protocollo di comunicazione e indirizzi IP nelle tabelle sopra presentate.

Si riportano qui di seguito la descrizione dei sistemi informatici coinvolti, la descrizione di come è realizzata l'interconnessione ai sistemi di fabbrica, oltre alle immagini, rilevate durante diverse sessioni di verifica effettuate presso C & P SERVICE SRL il giorno 13/11/2024 come anche evidenziato nell'Allegato 4.

Il Gestionale di Produzione Odoo si interfaccia con i sistemi HW di fabbrica (PLC) generando di fatto lo schema del flusso dati bidirezionale tramite l'interconnessione. Qui di seguito nella figura 150.21 si evidenziano con linea continua il flusso dati da gestionale al/ai PLC; in linea tratteggiata i dati di ritorno dai PLC (bene/beni oggetto di investimento) al software aziendale (MES, ERP, SCADA).

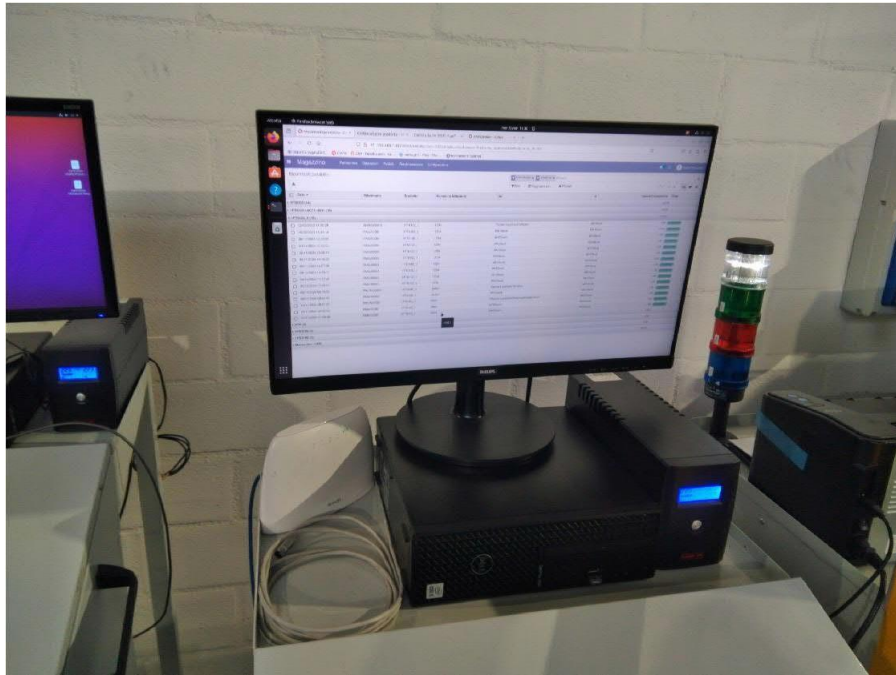


Figura 21: Control room // PC gestionale Odoo

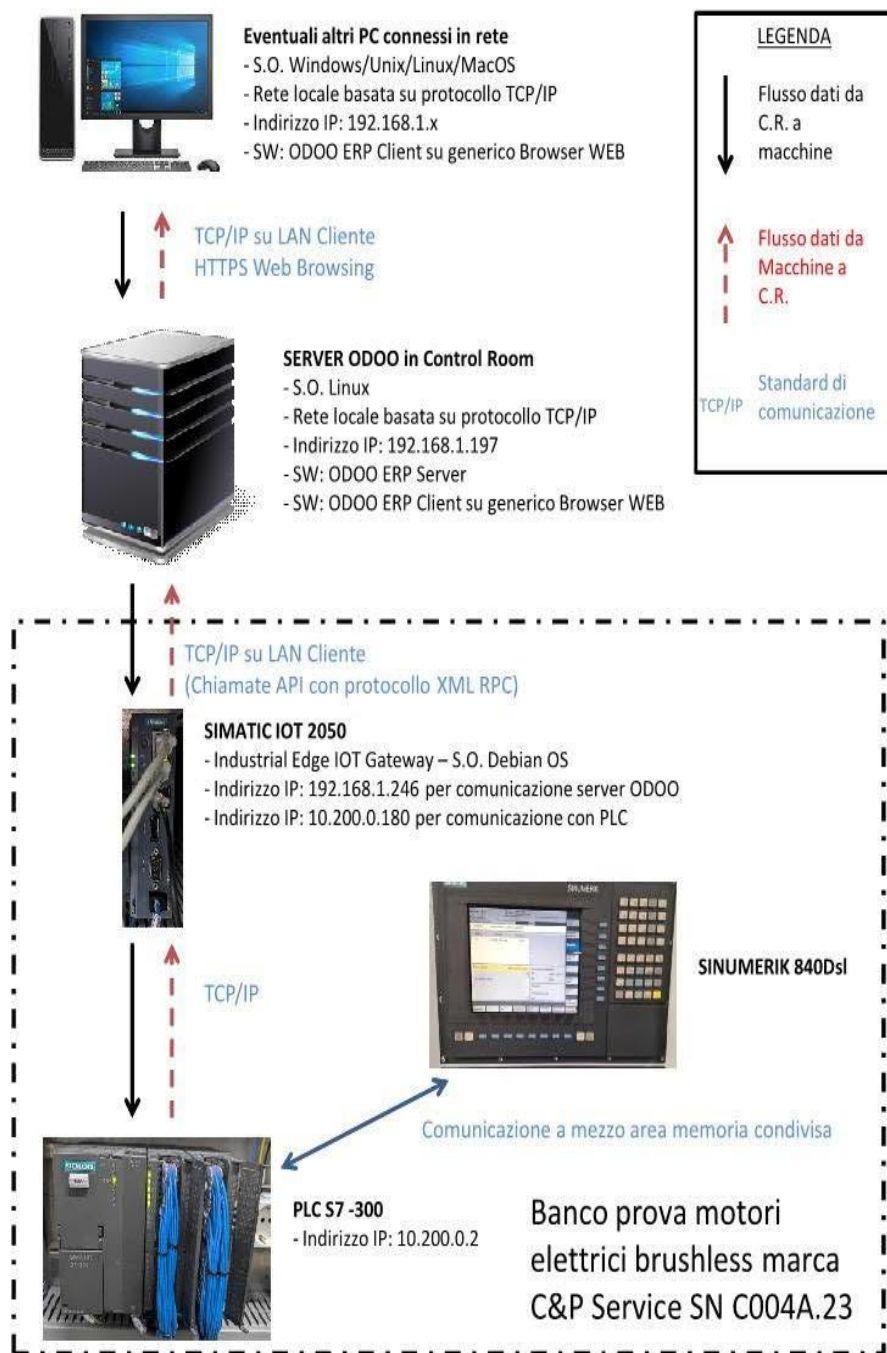


Figura 22: Schema di interconnessione e scambio dati con il sistema di fabbrica

4.8 Strumenti tecnologici avanzati e innovativi utilizzati

Il banco prova per motori brushless è un esempio avanzato di Industria 4.0, integrando analisi vibrazionali e realtà aumentata per il controllo e la manutenzione predittiva.

Grazie all'IoT con Balluff CMTK e Grafana per il controllo da remoto, è possibile monitorare i motori in tempo reale da qualsiasi luogo.

La realtà aumentata consente di visualizzare le operazioni interne del macchinario, garantendo interventi tempestivi. Questa soluzione innovativa offre una gestione più efficiente e predittiva dei motori. Strumenti utilizzati:

Sensori vibrazionali : IO LINK Balluff

IOT CMTK: Condition monitor Balluff

PLC con inverter: Siemens

Visore Hololens 2: Manutenzione predittiva

Grafana: Controllo dati processo

Attraverso la manutenzione predittiva e la realtà aumentata “Made in Puglia”, C&P service sta ridefinendo i processi industriali, potenziando la precisione decisionale e facilita un approccio industriale proattivo.

-Multitasking e multidispositivo

-Link alla macchina

-Real time view Connessione IOT integrata

Per poter potenziare la produzione, ottenere una sicurezza avanzata e raggiungere l'eccellenza industriale si utilizza una filiera produttiva interconnessa in modo tale da trasformare la fabbrica in una fabbrica intelligente.

Strumenti utilizzati:

Sensori e trasduttori

IOT condition monitor

Controllo con tablet

Visore Hololens 2

Software Grafana

Sistema controllo energetico



Figura 23: prodotti avanzati

Viene condotta, tramite la raccolta dati dei sensori attraverso l'IOT condition monitor, un'analisi dati avanzata attraverso la conversione analogico-digitale utilizzando la piattaforma Grafana.

Grafana provvede alla conversione e la visualizzazione dei dati mediante l'elaborazione di grafici dettagliati.

Viene implementata la visualizzazione immersiva dei dati tramite un visore di realtà aumentata, integrando le elaborazioni effettuate da Grafana per garantire un'esperienza informativa e intuitiva.

Il Banco prova elettrico utilizza sensori IO-LINK per monitorare vibrazioni, pressione, temperatura e flusso, oltre ad analizzare corrente, tensione, coppia e potenza. Per la manutenzione predittiva, si utilizza la realtà aumentata tramite visore Microsoft Hololens 2, mentre per il monitoraggio continuo delle condizioni si impiega l'IoT con il sistema di condition monitoring di Balluff.

4.8 Valutazione del banco prova motore attraverso analisi statistica

Nel capitolo precedente ho spiegato la Gage R&R Analysis, ora parti delle nozioni mi serviranno per condurre la mia valutazione sul banco prova motori elettrici marcato C&P Service SRL.

Iniziamo la valutazione del Banco Prova Motori Elettrici: Visualizzazione Motore Asincrono (figura 24) e Motore Brushless(figura25), i due motori coinvolti nel programma di test, inseriti sul banco prova.



Figura 24: motore asincrono

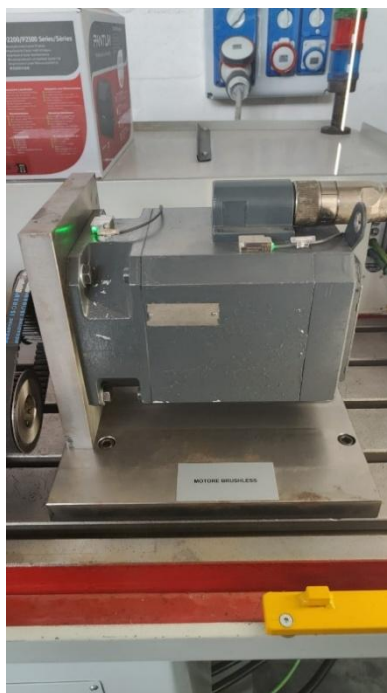


figura 25: motore Brushless

Per compiere una valutazione approfondita delle prestazioni dei motori elettrici, ho condotto un programma di test su un banco prova motori progettato e realizzato in economia dalla C&P Service SRL, in grado di supportare contemporaneamente sia motori asincroni che brushless (Figura 1).

Durante l'esperimento, ho eseguito 3 test, ciascuno della durata di 1 minuto con un intervallo di riposo di 5 minuti tra un test e l'altro.

Sui due motori elettrici sono stati implementati dei sensori aggiuntivi per una misurazione dettagliata delle grandezze fisiche nei test. Ogni motore (sia asincrono che brushless) è equipaggiato con 2 sensori (figura 26-27), uno posizionato sulla parte anteriore e l'altro sulla parte posteriore. Questi sensori sono collegati a 4 porte distinte di acquisizione dati: port1, port2, port3 e port4, ognuna delle quali raccoglie informazioni relative a una specifica sezione del motore, port1 parte anteriore motore asincrono, port2 parte posteriore motore asincrono, port3 parte anteriore motore brushless, port4 parte posteriore motore brushless.

INPUT:

velocità con cui viene fissato il motore: 500giri/min

durata test: 60s

campionamento dati : ogni 1/4s

condizioni ambientali identiche (temperatura, umidità, ecc)

OUTPUT:

Temperatura Assorbita °C: port1,port2,port3,port4

Vibrazioni velocita (asse X,Y,Z) mm/s: port1,port2,port3,port4



Figura 26: sensori Motore BRUSHLESS

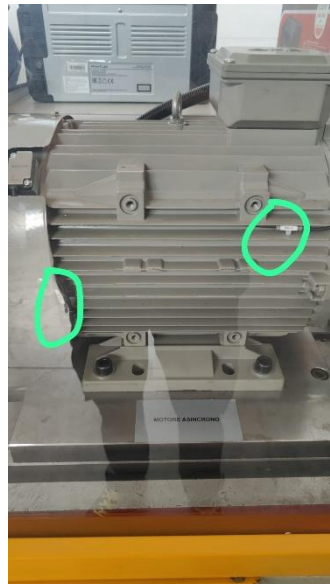


Figura 27: sensori Motore ASINCRONO

In figura possiamo visionare le etichette che corrispondono alle quattro porte e i relativi sensori.

Ogni porta fornisce 4 dati distinti per ciascun sensore: uno per la temperatura, tre per le velocità triassiali. Pertanto, ogni motore ha un totale di 8 misurazioni, con 4 dati per ciascun sensore nella parte anteriore e posteriore del motore, per ciascuna delle 4 porte di acquisizione.

Le condizioni di test sono state mantenute costanti per tutta la durata delle prove, con il motore fissato a una velocità di 500 giri/minuto. I parametri monitorati durante i test includono:

Coppia: Misurazione della coppia erogata dal motore durante il ciclo di lavoro.

Corrente: Rilevamento della corrente assorbita dal motore, un parametro cruciale per valutare l'efficienza e il consumo energetico del sistema.

Temperatura Assorbita: Monitoraggio continuo della temperatura del motore durante le prove per analizzare le variazioni termiche in relazione al comportamento del motore.

Vibrazioni Velocità Triassiale: Analisi della velocità in diverse direzioni per comprendere il comportamento dinamico del motore.

I dati saranno raccolti in 16 colonne separate e analizzati su Excel. Le colonne verranno strutturate come segue:

Temperatura Assorbita: port1,port2,port3,port4

Vibrazioni velocità triassiale(asse X,Y,,Z): port1,port2,port3,port4

Per quanto riguarda la coppia e la corrente, questi parametri non vengono misurati direttamente dai sensori montati sul motore, ma sono calcolati tramite un altro software, in particolare Grafana, che elabora i dati raccolti dai sensori e da altre fonti per fornire informazioni su questi parametri, anche queste grandezze verranno analizzate e rappresentate su Excel.

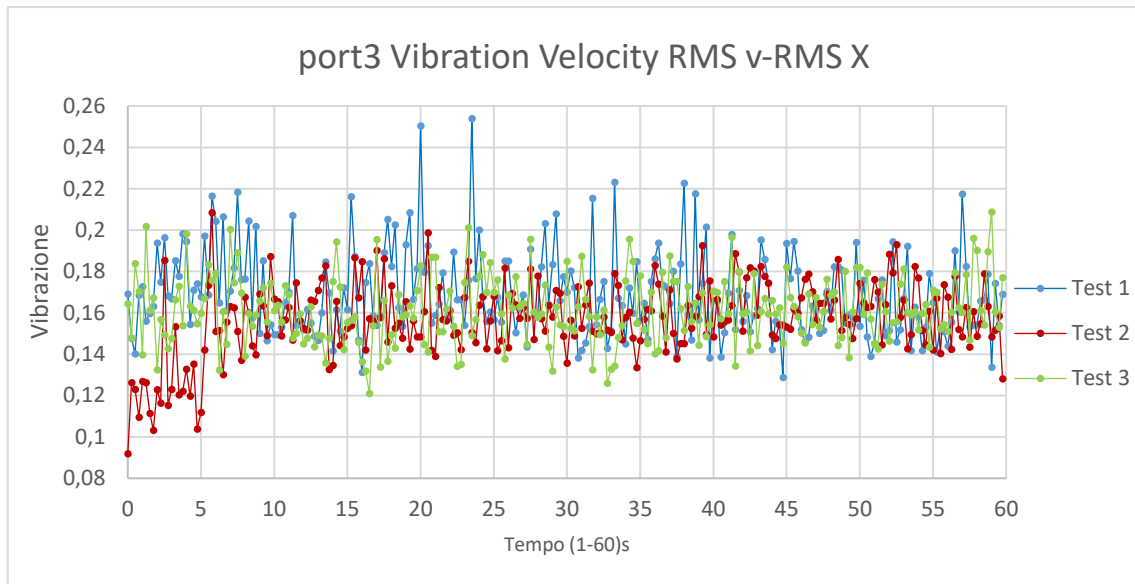
Questa struttura permette di raccogliere informazioni dettagliate sulla distribuzione termica e dinamica del motore, mentre i dati su coppia e corrente vengono calcolati separatamente per fornire una visione completa delle prestazioni del motore

Pertanto, le 16 colonne di dati raccolti saranno:

1 colonna relativa alla temperatura e 3 colonne relative alle velocità triassiali per ciascuna delle 4 porte (due motori, ciascuno con 2 sensori collegati alle porte, anteriore e posteriore).

Invece sulle righe avremo i dati che il banco prova avrà campionato ogni 1/4di secondo per tutta la durata del test(60sec) per tutti e 3 i test. (720 dati per ogni colonna)

Ho proseguito creando un unico grafico per ogni grandezza misurata, in modo tale da poter avere una visione generale dell'andamento dei valori campionati nel tempo. Il grafico esempio(figura 28) di seguito riportato mostra quindi l'evoluzione dei dati registrati in ogni test, consentendo di individuare eventuali trend, variazioni o anomalie.



Figura(28): Grafico esempio andamento vibrazioni velocità(x)(port3) nel tempo

Una volta ottenuti i dati relativi ai vari test bisogna analizzarli attraverso calcoli statistici (Figura 29), ho proceduto nell' identificare valore minimo, valore massimo e valore medio(μ) per ogni colonna. Il passo successivo prevede il calcolo della varianza per ciascuna delle grandezze misurate (temperatura, coppia, velocità triassiale e corrente). La varianza è uno strumento fondamentale per valutare la dispersione dei dati e, quindi, per verificare l'affidabilità dello strumento di misurazione. L'analisi della varianza ci consentirà di stabilire quanto siano stabili i risultati ottenuti e se le fluttuazioni riscontrate siano entro limiti accettabili per il tipo di misurazione e per l'applicazione specifica del motore.

Un valore di varianza più basso è particolarmente desiderabile in contesti ingegneristici, poiché implica una maggiore robustezza del sistema, riducendo l'incertezza e migliorando l'affidabilità delle previsioni. Dobbiamo interpretare la percentuale della varianza nel modo seguente:

Valori bassi (vicini a 0%) → i dati sono poco dispersi e concentrati attorno alla media.

Valori medi (5-15%) → moderata dispersione dei dati.

Valori alti (>15%) → forte variabilità, con dati molto distanti dalla media.

Una volta calcolata la varianza, sono potuto risalire alla deviazione standard, la deviazione standard è una misura della dispersione dei dati rispetto alla loro media. Indica quanto i valori di un dataset tendano a distanziarsi dalla media aritmetica. Essendo espressa nelle stesse unità dei dati originali, è più interpretabile rispetto alla varianza.

Matematicamente, la deviazione standard è la radice quadrata della varianza ed è rappresentata dalla lettera greca sigma (σ). Si può interpretare la percentuale di deviazione standard in questo modo: Valori bassi (<10%): i dati sono molto concentrati attorno alla media, quindi il sistema è stabile.

Valori medi (10-20%): c'è una discreta dispersione dei dati.

Valori alti (>20%): i dati sono molto dispersi e la variabilità è elevata.

VALORI STATISTICI CALCOLATI

VALORE MIN:	17,74243736
VALORE MAX:	19,52206421
VALORE ATTESO:	18,6393651
VARIANZA:	0,367878429
DEVIAZIONE STANDARD	0,606529825
PERCENTUALE VARIANZA	0,105886866
PERC. DEV. STANDARD	3,254026207

Figura 29: Esempio calcoli statistici relativi alla Temperatura Assorbita (port1)

$$\text{Valore atteso} = E(X) = \sum_{io} X_{io} \cdot P_{io}$$

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

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

$$\text{Percentuale di varianza} = \left(\frac{\sigma^2}{\mu^2} \right) \times 100$$

$$\text{Percentuale di Deviazione Standard} = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \times 100$$

Posso affermare che per ogni grandezza misurata, lo strumento è risultato essere molto stabile, avendo riscontrato valori percentuali di varianza e deviazione standard molto bassi. Successivamente ho proseguito la mia valutazione del Banco prova motori elettrici in maniera più approfondita, soffermandomi nell'analizzare in particolare le misure campionate della temperatura assorbita e delle vibrazioni di velocità (X,Y,Z) dai due motori per tutte le porte (1,2,3,4).

Il primo passo è stato quello di calcolare la distribuzione normale, essa viene rappresentata sul piano cartesiano come una curva a campana, detta proprio curva normale o curva gaussiana. Essa ha un picco centrale, che indica il valore medio, e una deviazione standard che misura la variabilità dei dati rispetto al valore medio. Per iniziare ho suddiviso i campioni ottenuti della temperatura assorbita durante l'intera durata del test (60s) in più classi (bin).

Attraverso la creazione del grafico a campana ho notato che a causa della discontinuità nella distribuzione di probabilità, dovuta ai momenti di pausa del motore (i 5 minuti tra un test e l'altro), si verificherà un lieve aumento della temperatura assorbita. Di conseguenza, alcuni valori di temperatura non verranno mai rilevati dai sensori, poiché la misurazione avviene solo durante i test attivi. Riscontrato ciò, posso affermare che le condizioni di input iniziali non vengono rispettate, in quanto la misura della temperatura tra un test e l'altro aumenta. Quindi il motore elettrico al termine del test non riesce a dissipare la temperatura assorbita, piuttosto si verifica un aumento di quest'ultima.

La formula della distribuzione normale è la seguente:
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Dove:

μ : la media della distribuzione (centro della campana).

σ : la deviazione standard (misura della dispersione dei dati).

x : il valore variabile, cioè i punti che vuoi tracciare sull'asse orizzontale del grafico.

e : costante di Eulero

Questa formula descrive la probabilità di un valore x che si verifica in una distribuzione normale, e la forma risultante quando si tracciano i valori di $f(x)$ in funzione di x sarà una curva a campana simmetrica attorno alla media.

Di seguito noteremo attraverso Grafici Istogramma il confronto tra Temperatura Assorbita e Vibrazioni Velocità. (Figura 30-31)

L'istogramma è un tipo di rappresentazione grafica utilizzata per mostrare la distribuzione di un insieme di dati numerici. È composto da barre rettangolari, la cui altezza rappresenta la frequenza o la quantità di dati che rientrano in una specifica intervallo (chiamato bin). Le caratteristiche principali di un istogramma includono:

Asse orizzontale (x): Rappresenta le variabili o gli intervalli (bin) dei dati.

Asse verticale (y): Rappresenta la frequenza o il numero di occorrenze per ogni intervallo.

Barre: Ogni barra corrisponde a un intervallo e la sua altezza rappresenta il numero di dati che rientrano in quel range.

Gli istogrammi sono particolarmente utili per visualizzare la distribuzione di variabili continue o discrete, consentendo di osservare pattern come la simmetria, la skewness (asimmetria) o la presenza di picchi (moda).

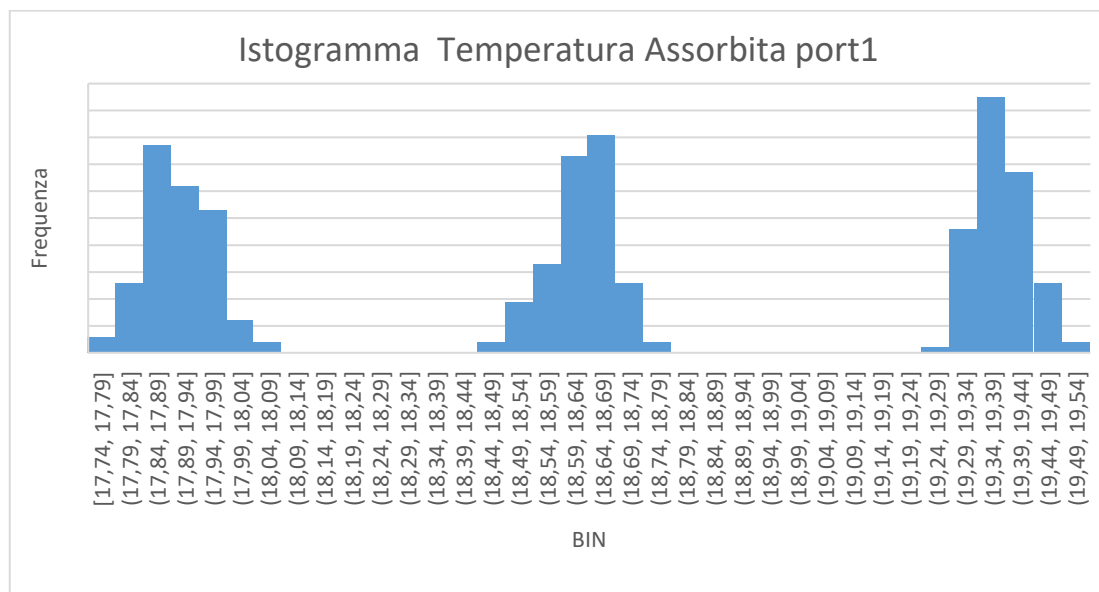


Figura 30: Esempio Grafico istogramma relativo alla Temperatura Assorbita (port1)parte anteriore motore elettrico Asincrono

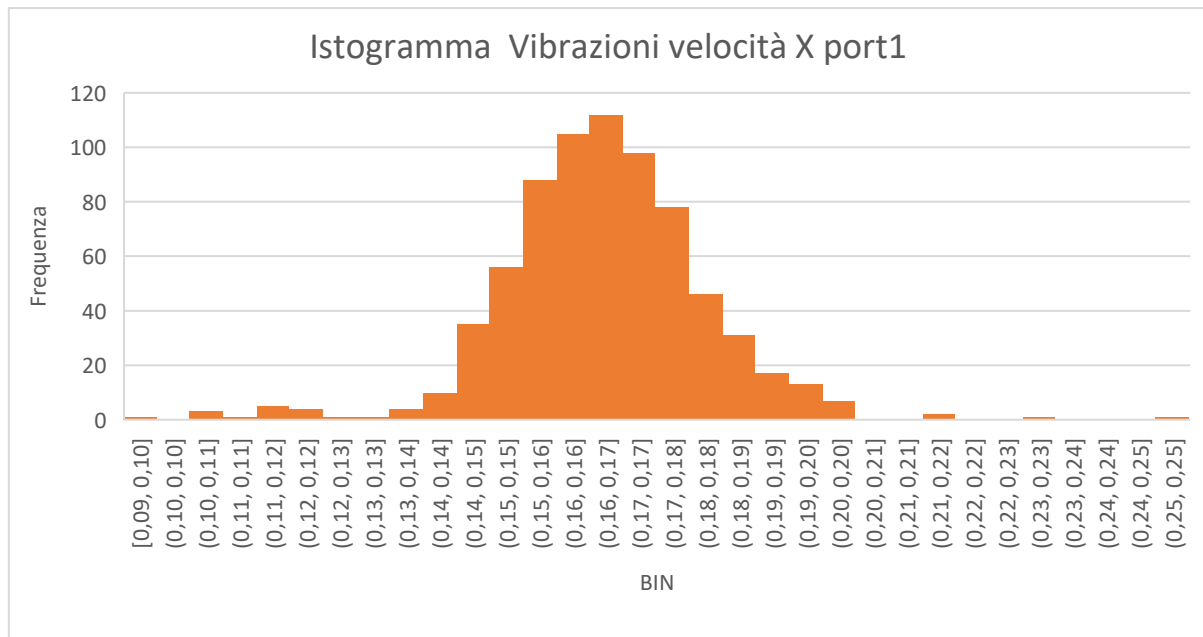


Figura 31: esempio grafico istogramma relativo alle vibrazioni velocità x (parte anteriore motore elettrico Asincrono)

Per compiere una valutazione del banco prova più approfondita, ho condotto un'analisi analizzando e confrontando la misura campionata della Temperatura Assorbita. In particolare per quanto riguarda la Temperatura Assorbita Port1(motore Asincrono) e Port3(motore Brushless) in condizioni identiche a quelle del nostro test (stessi input, motore azionato a 500giri/min per 60sec) ho ottenuto dal tecnico di laboratorio della C&P Service un valore specifico, chiamato “valore indicato”, pari a 18.5°C; Mi aspetterò che la temperatura assorbita per la parte anteriore dei motori, si aggiri intorno a questo valore.

Ho proceduto mettendo a confronto i grafici Istogramma, inserendo il valore indicato. In modo tale da verificare se le misurazioni della Temperatura Assorbita (port1,3) misurata dal Banco prova motore elettrico si aggirino effettivamente intorno al nostro valore indicato; quindi poter giungere alla conclusione e affermare se il Banco prova motori elettrico nella misurazione della Temperatura Assorbita (port1,3) sia stabile o meno. Di seguito riportato il Grafico (figura32)

dove il segmento verde rappresenta la posizione del nostro valore indicato all'interno della nostra suddivisione in classi.

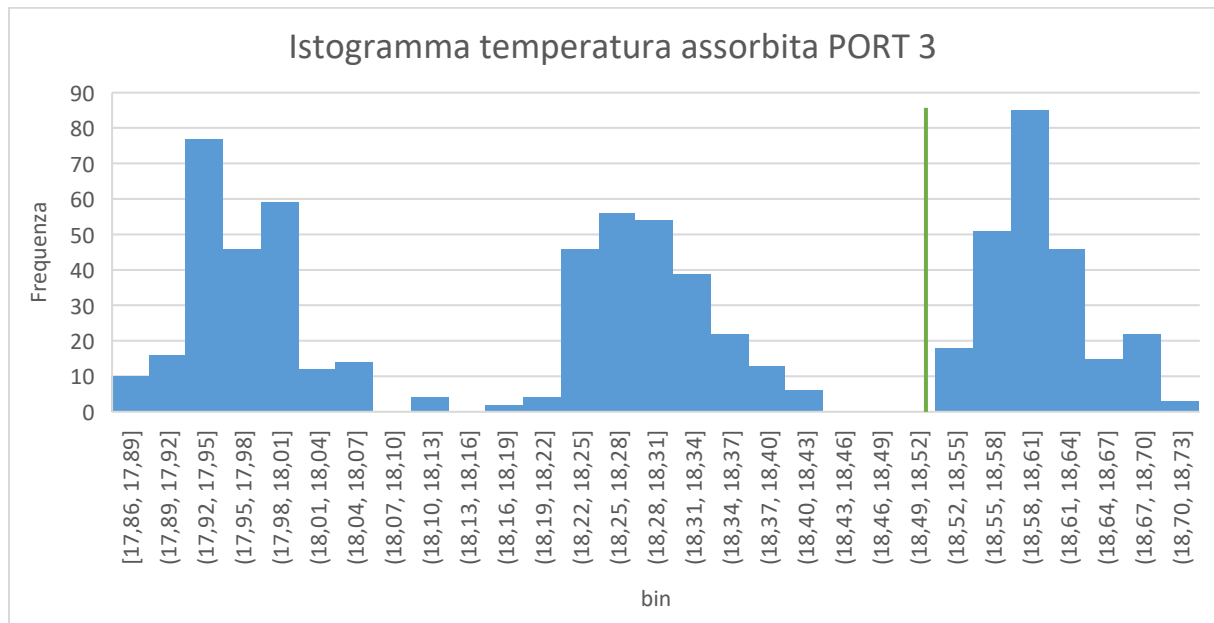


Figura 32: Temperatura Assorbita (port3) in relazione al Valore indicato

Per poter trarre delle conclusioni dobbiamo calcolare la DAM “Deviazione Assoluta Media” (chiamata anche DIGA, “deviazione indicativa globale assoluta”).

$$DAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - X_{\text{atteso}}|$$

Attraverso il calcolo della DAM possiamo capire quanto le osservazioni si discostano in media dal nostro valore indicato.

Valore DAM bassa → Indica che le misurazioni sono molto vicine al valore atteso → Sensori affidabili

Valore DAM alta → Indica che le misurazioni sono molto disperse → Possibili problemi nei sensori o nelle condizioni di misura

Deviazione Assoluta Media Temperatura
port1 = 0,536648041

Deviazione Assoluta Media Temperatura
port3 = 0,550688388

Il valore ottenuto della DAM si può esprimere anche in termini percentuali nel modo riportato di seguito:

$$\text{Percentuale DAM} = \left(\frac{\text{DIGA}}{X_{\text{atteso}}} \right) \times 100$$

PERCENTUALE DAM Temperatura port1	2,900800221
PERCENTUALE DAM Temperatura port3	2,976693989

Possiamo interpretare i risultati ottenuti della Percentuale DAM nel seguente modo:

0 - 5% → Ottima precisione

→ La deviazione è minima, i valori ottenuti nei test sono molto vicini al valore atteso.

5 - 10% → Buona accuratezza

→ Leggera variabilità, ma i risultati sono comunque abbastanza vicini all'atteso.

10 - 20% → Accettabile, ma con deviazioni da indagare

→ La dispersione potrebbe essere dovuta a fattori variabili nei test. Da approfondire.

20 - 50% → Elevata variabilità, potrebbe indicare problemi nei test o nel sistema

→ Necessario rivedere il processo di test o verificare eventuali cause di errore.

> 50% → Deviazione molto elevata, possibile errore sistematico

→ Probabile errore nei test, misurazioni incoerenti, oppure il valore atteso non è realistico.

Possiamo trarre le nostre conclusioni affermando che: nella misurazione della Temperatura Assorbita Media per quanto riguarda la parte anteriore dei nostri due motori (port1,port3) il Banco prova motori elettrici risulta essere molto stabile, avendo ottenuto ottimi valori Percentuali di Deviazione Assoluta Media, quindi molto vicini al valore indicato. In particolare possiamo evincere dal nostro confronto che il motore elettrico, il quale risulta avere una percentuale Deviazione Assoluta Media minore per il campionamento della Temperatura assorbita della parte anteriore, è quello Asincrono (port1).

Confrontando i valori medi relativi alla Temperatura Assorbita per i due motori(port1,2)(port3,4) il motore elettrico che ha riscontrato valori di Temperatura Assorbita maggiori è stato quello Asincrono(port1,2), quindi è risultato essere il motore elettrico che ha assorbito più calore.

Di seguito (figura 33,34) troviamo i Grafici Istogramma relativi alla Temperatura Assorbita nelle parti posteriori dei due motori(port2,4)

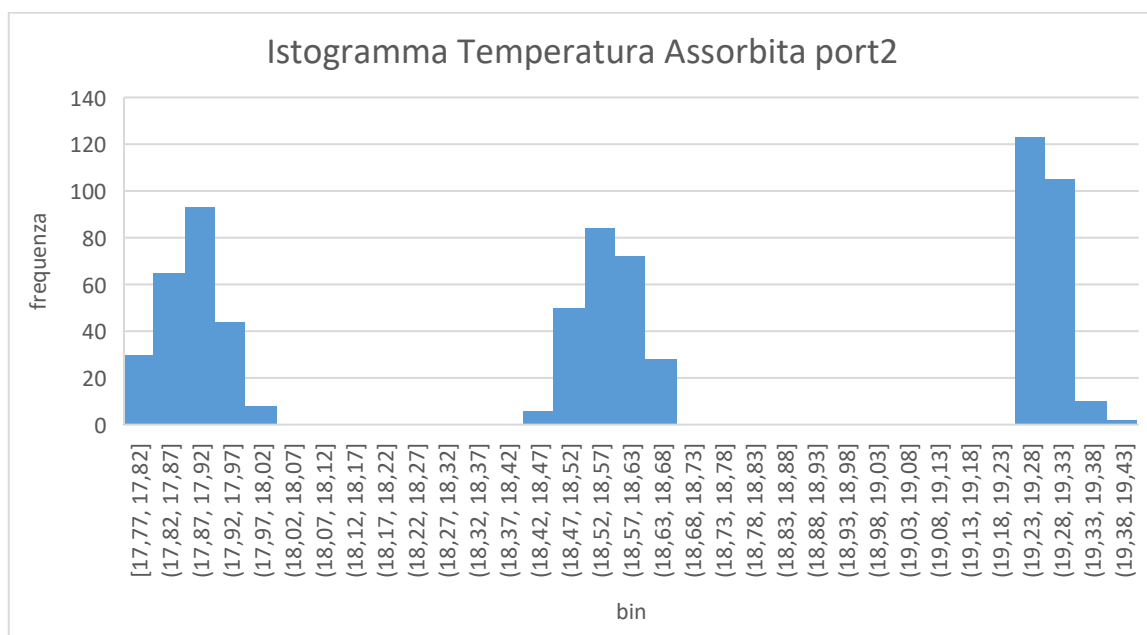


Figura 33: Grafico istogramma port2 parte posteriore motore elettrico Asincrono

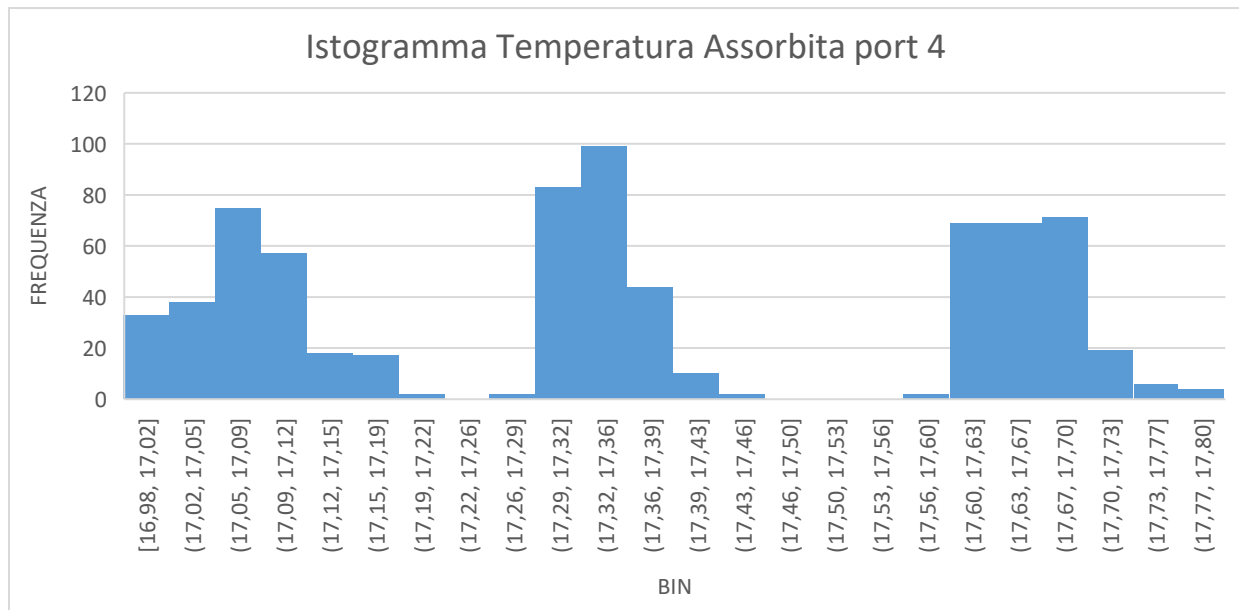


Figura 34: Grafico Istogramma port4 parte posteriore motore elettrico Brushless

Confronto delle varianze

Le ultime analisi riguardano il confronto fra i valori delle varianze relative alla Temperatura Assorbita e alle Vibrazioni di Velocità dei due motori.

Sono andato a confrontare le quattro varianze relative ai valori campionati della Temperatura Assorbita nella parte posteriore e anteriore dei due motori (motore asincrono port1,2 – motore brushless port3,4). Per effettuare questo confronto ho utilizzato il Coefficiente di Variazione.

Il Coefficiente di Variazione (CV) è uno strumento essenziale per confrontare varianze in modo significativo, specialmente quando le medie dei gruppi sono diverse. A differenza della semplice varianza, che fornisce solo una misura di dispersione assoluta, il CV offre una misura relativa della variabilità, che consente confronti più equi e interpretazioni più informative tra gruppi diversi. Il coefficiente di variazione si calcola come il rapporto tra la deviazione standard(σ) (radice quadrata della varianza) e la media(μ): $CV = \frac{\sigma}{\mu}$

Ho calcolato tutti e quattro i Coefficienti di Variazione relativi alla Temperatura Assorbita (port1,2,3,4) (figura34) e successivamente ho creato una tabella per confrontarli. (Figura 35)

	Valori medi	Deviazione Standard	Coefficiente di Variazione
port1	18,6393651	0,606529825	0,032540262
port2	18,57540283	0,57238741	0,030814266
port3	18,28953222	0,264449501	0,014459063
port4	17,35823562	0,242734463	0,013983821

Figura 34: Calcolo Coefficiente di Variazione

	Port1	Port2	Port3	Port4
Port1	-	0,030814	0,014459	0,013984
Port2	0,030814	-	0,014459	0,013984
Port3	0,014459	0,014459	-	0,013984
Port4	0,013984	0,013984	0,013984	-

Figura 35: Confronto Coefficiente di Variazione per ogni parte del motore

In (figura35) è rappresentato il confronto tra parte anteriore e parte posteriore dei motori, all'interno delle celle troviamo indicato il valore minore del CV(per rendere il confronto visivamente più immediato, rendendo quindi più chiaro a quale porta corrisponde il valore indicato, il colore della cella corrisponderà a quello della rispettiva porta con CV minore). Possiamo evincere che sia la parte anteriore che quella posteriore del motore elettrico brushless(port3,4) risulta essere quella con il Coefficiente di Variazione minore.

Per completare il confronto tra i due motori ho calcolato il Coefficiente di Variazione medio per il motore Brushless(port3,4) e per l'Asincrono(port1,2). (figura 36) Il motore Brushless è risultato essere quello con un CV relativo alla temperatura Assorbita minore.

	Medie CV (Temperatura)
MOTORE ASINCRONO(port1,2)	0,031677264
MOTORE BRUSHLESS(port3,4)	0,014221442

Figura 36: Medie Coefficiente di Variazione dei due motori

Di seguito riporto un grafico (figura 37) dove possiamo vedere il confronto tra il Coefficiente di Variazione medio dei due motori.

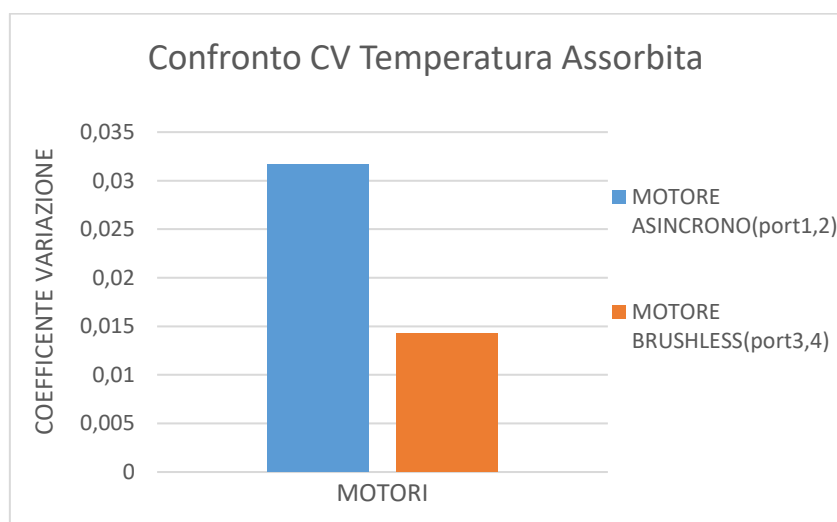


Figura 37: Confronto Coefficienti di Variazione medio relativo alla temperatura Assorbita dei due motori

Da questo grafico possiamo avere una visione chiara in merito al **Coefficiente di Variazione della Temperatura Assorbita** per entrambi i motori elettrici. Il motore Brushless è stato quello che ha riscontrato il valore più basso (port3,4); un CV basso significa che la deviazione standard è piccola rispetto alla media, quindi i valori del nostro test sono più concentrati intorno alla

media, una bassa variabilità indica un processo più affidabile e con meno difetti, motore più stabile.

Di seguito verrà mostrato il confronto relativo alle Varianze per quanto riguarda le Vibrazioni Velocità(X,Y,Z) dei due motori elettrici, utilizzando lo stesso approccio applicato precedentemente per l'analisi della varianza relativa alla Temperatura Assorbita dei due motori.

Calcolo quindi il Coefficiente di Variazione separatamente per ogni asse (X,Y,Z). Esempio riportato di seguito(asse Z).(figura 38) (Ricordo $CV = \frac{\sigma}{\mu}$)

	Valori medi	Deviazione Standard	Coefficiente di Variazione
port1	0,576066722	0,011649732	0,020222886
port2	0,561260121	0,010246448	0,018256148
port3	0,137537651	0,018575372	0,135056634
port4	0,169388888	0,016511512	0,097476949

Figura 38: Calcolo Coefficiente di Variazione Vibrazioni velocità (Z)

Una volta ottenuti i valori del Coefficiente di variazione per ogni porta, calcolo il CV relativo all'asse Z totale(port1,2) per i due motori; calcolando la media tra le rispettive porte (anteriori e posteriori) (Figura 39)

	Medie CV VIBRAZIONE V(Z)
MOTORE ASINCRONO(port1,2)	0,019239517
MOTORE BRUSHLESS(port3,4)	0,116266792

Figura 39: Calcolo media CV (velocitàZ) per i due motori

Infine raffiguro graficamente (figura 40) il confronto tra i CV medi (Vibrazioni velocità asse Z) dei due motori.(port1,2) (port3,4)

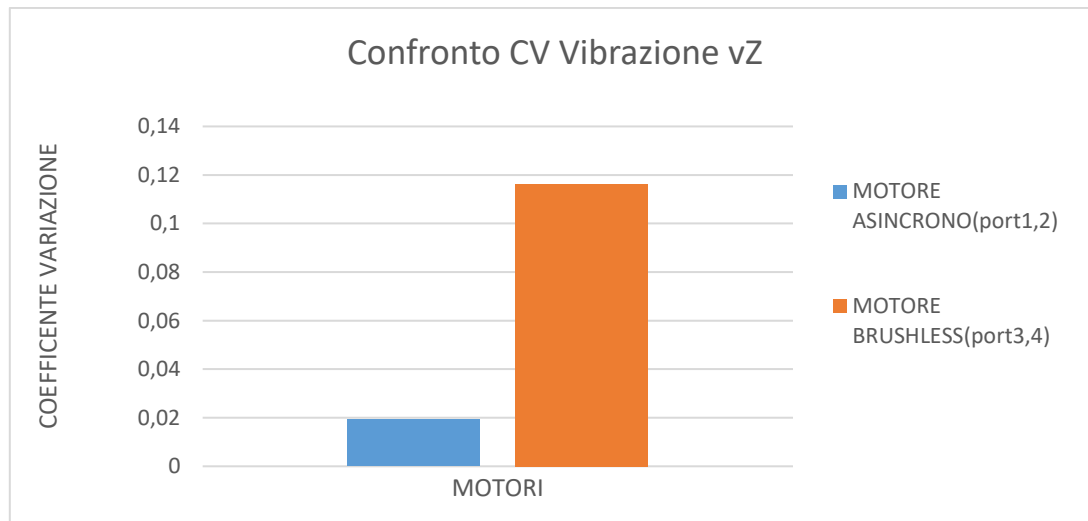


Figura 40: Rappresentazione grafica CV (Vibrazione velocità asse Z)

Da questo grafico possiamo avere una visione chiara in merito al **Coefficiente di Variazione della vibrazione velocità relativo asseZ** per entrambi i motori elettrici. Il motore Asincrono è stato quello che ha riscontrato il valore più basso (port1,2).

Per avere una valutazione della vibrazione complessiva (in termini di magnitudine), procedo a calcolare il **Coefficiente di Variazione della vibrazione totale (X,Y,Z)**. Per farlo calcolo le vibrazioni medie dei due motori(port1,2)(port3,4) rispetto ai tre assi per poi calcolare la Vibrazione Media Totale (figura 41).

$$v_{TOT} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}$$

Essendo direzioni ortogonali(X,Y,Z) sfrutterò il Teorema di Pitagora:

	v VIBRAZIONE MEDIA vX	v VIBRAZIONE MEDIA vY	v VIBRAZIONE MEDIA vZ	v VIBRAZIONE MEDIA TOTALE
MOTORE ASINCRONO(port1,2)	0,625184895	0,896067821	0,568663422	1,231735272
MOTORE BRUSHLESS(port3,4)	0,162485002	0,154143868	0,153463269	0,271500797

Figura 41 : Riportato il valore della v vibrazione media totale

Analogamente andrò a calcolare le Deviazioni Standard MEDIE (Figura42), e la Deviazione Standard Totale.

	Deviazione Standard MEDIA vX	Deviazione Standard MEDIA vY	Deviazione Standard MEDIA vZ	Deviazione Standard MEDIA TOTALE
MOTORE ASINCRONO(port1,2)	0,011318011	0,018860998	0,01094809	0,024570211
MOTORE BRUSHLESS(port3,4)	0,017288164	0,016178975	0,017543442	0,029468835

Figura 42: Riportato il valore della deviazione standard media totale.

A questo punto potrò calcolare il Coefficiente di Variazione della vibrazione totale (x,y,z) (ricordo $CV = \frac{\sigma}{\mu}$) con il rapporto tra Deviazione Standard Media Totale e la Vibrazione Media Totale. (Figura 43)

	VIBRAZIONE MEDIA TOTALE	Deviazione Standard MEDIA TOTALE	CV VIBRAZIONI TOTALI
MOTORE ASINCRONO(port1,2)	1,231735272	0,024570211	0,01994764
MOTORE BRUSHLESS(port3,4)	0,271500797	0,029468835	0,108540509

Figura 43: Riportato il valore del Coefficiente di Variazione della vibrazione totale (x,y,z) relativo ai due motori

Infine raffiguro graficamente (figura 44) il confronto tra i CV della vibrazione media totale (x,y,z) dei due motori.(port1,2) (port3,4)

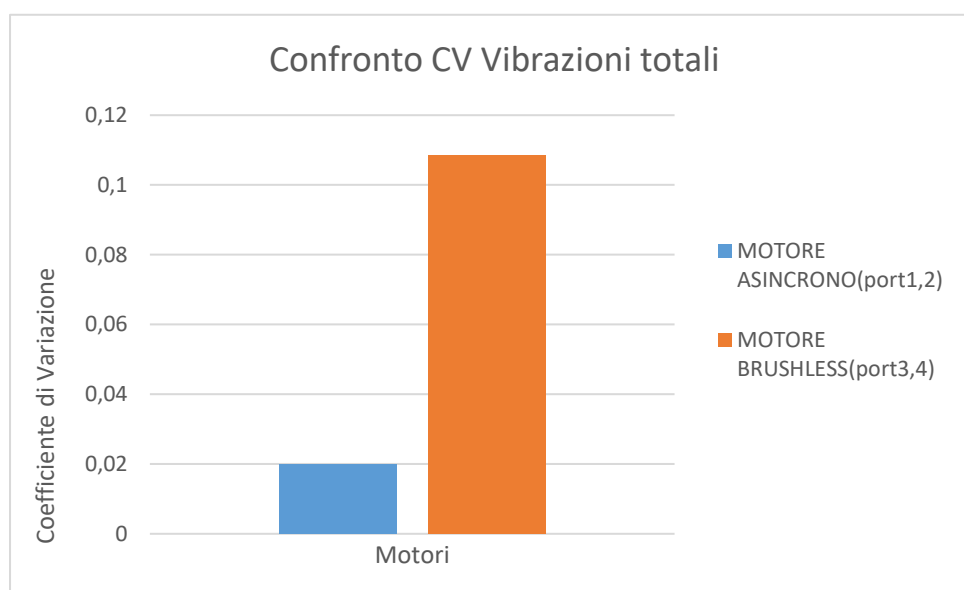


Figura 44: : Confronto Coefficienti di Variazione medio relativo alla Vibrazione media totale dei due motori

Tramite questo grafico possiamo avere una visione chiara in merito al **Coefficiente di Variazione relativo alle vibrazioni di velocità totale** (in termini di magnitudine) per entrambi i motori elettrici. Il motore Asincrono è stato quello che ha riscontrato il valore più basso (port1,2); un CV basso significa che la deviazione standard è piccola rispetto alla media, quindi i valori del nostro test sono più concentrati intorno alla media, una bassa variabilità indica un processo più affidabile e con meno difetti, motore più stabile.

L'obiettivo complessivo di questa valutazione è stato:

- ottenere un confronto delle performance tra i due tipi di motore (asincrono e brushless) in condizioni operative identiche, al fine di evidenziare le differenze in termini di efficienza, stabilità termica e dinamica;

- valutare se il Banco prova motori elettrici marcato C&P Service risulti essere uno strumento di misura stabile, quindi valutare la ripetibilità degli output a parità di input al motore (condizioni operative identiche), in modo da distinguere la variabilità del motore da quella del sistema di misurazione;

Possiamo evincere da quanto emerso che il banco prova motori elettrici marcato C&P Service SRL è uno strumento di misura qualitativo, attendibile e molto stabile.

I dati raccolti, combinati con l'analisi statistica, forniranno informazioni utili per ottimizzare l'impiego di questi motori in applicazioni specifiche, contribuendo a una scelta più consapevole in fase di progettazione e selezione dei componenti per sistemi elettrici ad alte prestazioni.

CONCLUSIONI

L'Industria 4.0 sta rivoluzionando il settore manifatturiero, introducendo un nuovo paradigma produttivo basato sull'integrazione di tecnologie avanzate, sull'automazione intelligente e sulla gestione dei dati in tempo reale. Questa trasformazione non riguarda soltanto l'efficienza dei processi produttivi, ma incide anche sulla qualità del prodotto, sulla sostenibilità operativa e sulla competitività delle aziende. La presente tesi ha approfondito questi aspetti, analizzando il ruolo dell'Industria 4.0 nei processi di collaudo e certificazione dei motori elettrici attraverso l'implementazione di banchi prova avanzati e l'utilizzo di metodologie statistiche per la valutazione delle prestazioni.

Nel primo Capitolo, è stato illustrato il contesto generale dell'Industria 4.0, partendo dalla sua evoluzione storica e analizzando le tecnologie abilitanti che stanno ridisegnando il panorama industriale. L'adozione di sistemi interconnessi e digitalizzati permette alle imprese di ottenere un controllo più accurato sui processi produttivi, garantendo maggiore efficienza e riducendo i margini di errore. Tuttavia, l'implementazione di questi strumenti comporta anche nuove sfide, tra cui la necessità di sviluppare competenze specialistiche e di affrontare i rischi legati alla sicurezza informatica. Il Capitolo 2 ha approfondito il tema dell'implementazione dei banchi prova motori elettrici, analizzandone il ruolo all'interno dell'Industria 4.0. Grazie alla digitalizzazione e all'interconnessione con i sistemi di gestione aziendale, questi strumenti consentono di ottimizzare il collaudo dei motori, migliorandone la tracciabilità e la qualità. La possibilità di integrare sensori avanzati e software di monitoraggio consente di raccogliere dati dettagliati sulle prestazioni dei motori, facilitando interventi di manutenzione predittiva e riducendo i tempi di fermo macchina. In particolare, i banchi prova per motori brushless si rivelano essenziali per garantire elevati standard di affidabilità e sicurezza in diversi settori industriali.

Nel Capitolo 3, è stata analizzata la metodologia Gage R&R Analysis, uno strumento statistico fondamentale per valutare l'affidabilità e la ripetibilità delle misurazioni effettuate nei processi di collaudo. L'accuratezza delle misurazioni è un fattore critico per garantire la qualità del prodotto finale, e l'applicazione di metodologie statistiche avanzate permette di identificare e ridurre le fonti di errore. Il metodo ANOVA si è dimostrato particolarmente efficace per l'analisi della varianza nei test condotti sui banchi prova, contribuendo a migliorare la precisione dei risultati e a ridurre l'incertezza nelle valutazioni.

Infine, il Capitolo 4 ha presentato un caso studio concreto relativo alla C&P Service Srl, un'azienda che ha implementato un banco prova per motori elettrici secondo i principi dell'Industria 4.0. Attraverso l'integrazione di IoT, realtà aumentata e interconnessione con sistemi ERP, il banco prova ha consentito un significativo miglioramento nella gestione del collaudo, aumentando l'efficienza operativa e garantendo una maggiore affidabilità dei risultati. La fase sperimentale, dedicata alla valutazione del banco prova motore attraverso analisi statistica, ha confermato l'importanza di un approccio quantitativo per garantire la qualità e la riproducibilità delle misurazioni, dimostrando come le tecnologie 4.0 possano essere applicate con successo per ottimizzare i processi produttivi.

L'analisi condotta in questa tesi evidenzia come l'Industria 4.0 rappresenti una straordinaria opportunità per il miglioramento dell'efficienza e della qualità nei processi industriali. L'integrazione di tecnologie digitali nei banchi prova per motori elettrici consente non solo di migliorare la gestione del collaudo, ma anche di raccogliere e analizzare dati in modo più preciso e affidabile, favorendo un approccio data-driven alla manutenzione e all'ottimizzazione delle prestazioni. Tuttavia, per sfruttare appieno le potenzialità dell'Industria 4.0, è necessario affrontare alcune sfide, tra cui la formazione di personale qualificato, l'adeguamento delle infrastrutture produttive e l'adozione di strategie di cybersecurity adeguate. Solo attraverso un'adeguata pianificazione e un investimento mirato in nuove competenze e tecnologie, le imprese potranno trarre il massimo vantaggio dalla digitalizzazione, garantendo al contempo elevati standard di qualità e affidabilità.

In conclusione, la ricerca condotta dimostra come la combinazione di innovazione tecnologica e metodologie statistiche avanzate possa migliorare in modo significativo la gestione dei processi industriali, rendendo le aziende più competitive e resilienti nell'attuale scenario produttivo. Il caso studio analizzato rappresenta un esempio concreto di come l'integrazione delle tecnologie 4.0 nei banchi prova per motori elettrici possa tradursi in benefici tangibili per le imprese, ponendo le basi per futuri sviluppi nel settore della digitalizzazione industriale.

BIBLIOGRAFIA

«45_atakan_gerger_conducting_a_gage_r____r_study (1)», s.d.

Aceto, Giuseppe, Valerio Persico, e Antonio Pescapé. «Industry 4.0 and Health: Internet of Things, Big Data, and Cloud Computing for Healthcare 4.0». *Journal of Industrial Information Integration* 18 (giugno 2020): 100129. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100129>.

Ádámkó, É, A Szántó, e G Á Sziki. «Software Developments for an Electric Motor Test Bench Developed at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1237, fasc. 1 (1 maggio 2022): 012012. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1237/1/012012>.

Bai, Chunguang, Patrick Dallasega, Guido Orzes, e Joseph Sarkis. «Industry 4.0 Technologies Assessment: A Sustainability Perspective». *International Journal of Production Economics* 229 (novembre 2020): 107776. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>.

Bhatt, Pooja, Hemant Mehar, e Manish Sahajwani. «Electrical Motors for Electric Vehicle – A Comparative Study». *SSRN Electronic Journal*, 2019. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3364887>.

Bielaczyc, Piotr, Bartosz Hejny, Andrzej Suchecki, Rafał Sala, e Krzysztof Sobieszczański. «Methodology of Electric Motor Testing on the Hybrid Engine Test Bench». *Combustion Engines* 174, fasc. 3 (1 agosto 2018): 26–32. <https://doi.org/10.19206/CE-2018-303>.

Bonomi, Angelo. *Le Tecnologie Di Industria 4.0 e Le PMI*. IT: CNR IRCRES, 2018. <https://doi.org/10.23760/2421-7158.2018.004>.

Cipriani, Alberto, Alessio Gramolati, e Giovanni Mari, a c. di. *Il lavoro 4.0: la quarta rivoluzione industriale e le trasformazioni delle attività lavorative*. Studi e saggi 180. Firenze, Italy: Firenze University Press, 2018.

De Almeida, Aníbal T, Fernando J T E Ferreira, e João A C Fong. «Standards for Efficiency of Electric Motors». *IEEE Industry Applications Magazine* 17, fasc. 1 (gennaio 2011): 12–19. <https://doi.org/10.1109/MIAS.2010.939427>.

Delke, Vincent, Holger Schiele, Wolfgang Buchholz, e Stephen Kelly. «Implementing Industry 4.0 Technologies: Future Roles in Purchasing and Supply Management». *Technological*

Forecasting and Social Change 196 (novembre 2023): 122847.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122847>.

«Design and Development of a Remote-Control Test Bench for Remote Piloted Aircraft's Brushless Motors». *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette* 30, fasc. 4 (15 agosto 2023).
<https://doi.org/10.17559/TV-20221004152801>.

Erdmann, Tashi P., Ronald J. M. M. Does, e Søren Bisgaard. «Quality Quandaries*: A Gage R&R Study in a Hospital». *Quality Engineering* 22, fasc. 1 (7 dicembre 2009): 46–53.
<https://doi.org/10.1080/08982110903412924>.

Gajdzik, Bożena, e Radosław Wolniak. «Influence of Industry 4.0 Projects on Business Operations: Literature and Empirical Pilot Studies Based on Case Studies in Poland». *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity* 8, fasc. 1 (marzo 2022): 44.
<https://doi.org/10.3390/joitmc8010044>.

García, Carlos Moro, e Luis Manuel Mochón Castro. «DESIGN OF A TEST BENCH FOR HIGH EFFICIENCY, LOW POWER ELECTRIC MOTORS OF COMPETITION VEHICLES», s.d.

Gelman, Andrew. «Analysis of Variance—Why It Is More Important than Ever». *The Annals of Statistics* 33, fasc. 1 (1 febbraio 2005). <https://doi.org/10.1214/009053604000001048>.

Gökalp, Ebru, Umut Şener, e P. Erhan Eren. «Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM». In *Software Process Improvement and Capability Determination*, a cura di Antonia Mas, Antoni Mesquida, Rory V. O'Connor, Terry Rout, e Alec Dorling, 770:128–42. Communications in Computer and Information Science. Cham: Springer International Publishing, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67383-7_10.

———. «Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM». In *Software Process Improvement and Capability Determination*, a cura di Antonia Mas, Antoni Mesquida, Rory V. O'Connor, Terry Rout, e Alec Dorling, 770:128–42. Communications in Computer and Information Science. Cham: Springer International Publishing, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67383-7_10.

Gorospe Jr., George E., Chetan S. Kulkarni, Edward Hogge, Andrew Hsu, e Natalie Ownby. «A Study of the Degradation of Electronic Speed Controllers for Brushless DC Motors». *PHM*

Society Asia-Pacific Conference 1, fasc. 1 (14 luglio 2017).
<https://doi.org/10.36001/phmap.2017.v1i1.1846>.

Henson, R.N. «Analysis of Variance (ANOVA)». In *Brain Mapping*, 477–81. Elsevier, 2015.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397025-1.00319-5>.

Hernandez Korner, Mario Enrique, María Pilar Lambán, José Antonio Albajez, Jorge Santolaria, Lisbeth Del Carmen Ng Corrales, e Jesús Royo. «Systematic Literature Review: Integration of Additive Manufacturing and Industry 4.0». *Metals* 10, fasc. 8 (6 agosto 2020): 1061. <https://doi.org/10.3390/met10081061>.

Kaasinen, Eija, Franziska Schmalfuß, Cemalettin Öztürk, Susanna Aromaa, Menouer Boubekour, Juhani Heilala, Päivi Heikkilä, et al. «Empowering and Engaging Industrial Workers with Operator 4.0 Solutions». *Computers & Industrial Engineering* 139 (gennaio 2020): 105678. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.052>.

Lampropoulos, Georgios, Kerstin Siakas, e Theofylaktos Anastasiadis. «INTERNET OF THINGS IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0: AN OVERVIEW: Lampropoulos, G., Siakas, K., Anastasiadis, T. (2019). Internet of Things in the Context of Industry 4.0: An Overview. *International Journal of Entrepreneurial Knowledge*, 7(1), 4-19. Doi: 10.2478/Ijek-2019-0001». *International Journal of Entrepreneurial Knowledge* 7, fasc. 1 (30 giugno 2019). <https://doi.org/10.37335/ijek.v7i1.84>.

Moreno-Garcia, I.M., A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, M.J. Gonzalez-Redondo, Emilio J. Palacios-Garcia, e Carlos D. Moreno-Moreno. «Development and Application of a Smart Grid Test Bench». *Journal of Cleaner Production* 162 (settembre 2017): 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.001>.

Peter N. Stearns. *The Industrial Revolution in World History*. 5th ed. New York: Routledge, 2021.

Ravindra Jape, Swaraj, e Archana Thosar. «COMPARISON OF ELECTRIC MOTORS FOR ELECTRIC VEHICLE APPLICATION». *International Journal of Research in Engineering and Technology* 06, fasc. 09 (15 settembre 2017): 12–17. <https://doi.org/10.15623/ijret.2017.0609004>.

Reljić, Vule, Ivana Milenković, Slobodan Dudić, Jovan Šulc, e Brajan Bajči. «Augmented Reality Applications in Industry 4.0 Environment». *Applied Sciences* 11, fasc. 12 (17 giugno 2021): 5592. <https://doi.org/10.3390/app11125592>.

Ren, Qizheng. «The Application of Gage R&R Analysis in s Six Sigma Case of Improving and Optimizing an Automotive Die Casting Product's Measurement System», s.d.

Russo, Matteo, Dan Zhang, Xin-Jun Liu, e Zenghui Xie. «A Review of Parallel Kinematic Machine Tools: Design, Modeling, and Applications». *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 196 (marzo 2024): 104118. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104118>.

Saniuk, Sebastian, Sandra Grabowska, e Bożena Gajdzik. «Social Expectations and Market Changes in the Context of Developing the Industry 4.0 Concept». *Sustainability* 12, fasc. 4 (13 febbraio 2020): 1362. <https://doi.org/10.3390/su12041362>.

Silesian University of Technology, Organization and Management Department, Economics and Informatics Institute, e Radosław Wolniak. «Innovations in Industry 4.0 Conditions». *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series* 2023, fasc. 169 (2023): 725–41. <https://doi.org/10.29119/1641-3466.2023.169.43>.

Tortorella, Guilherme Luz, Flavio S. Fogliatto, Paulo A. Cauchick-Miguel, Sherah Kurnia, e Daniel Jurgburg. «Integration of Industry 4.0 Technologies into Total Productive Maintenance Practices». *International Journal of Production Economics* 240 (ottobre 2021): 108224. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2021.108224>.

Vaquero, Alfredo Díaz, e Diana Florez. «UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)», s.d.

Venier, Francesco. *Trasformazione digitale e capacità organizzativa: le aziende italiane e la sfida del cambiamento*. Trieste: Edizioni Università di Trieste, 2017.

Wrzochal, Mateusz, e Stanisław Adamczak. «Application of a Gage R&R Study in Evaluation of Rolling Bearing Measurement System Accuracy». *Transportation Research Procedia* 40 (2019): 934–39. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.131>.

