



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI URBINO CARLO BO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria per la Sostenibilità Industriale

**PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA INTEGRATO
EXCEL-CHATGPT PER L'AUTOMAZIONE DELLA
DOCUMENTAZIONE DI CONTROLLO
DIMENSIONALE**

**DESIGN OF AN INTEGRATED EXCEL-CHATGPT
SYSTEM FOR THE AUTOMATION OF DIMENSIONAL
INSPECTION DOCUMENTATION**

Relatore:

Prof. **Marco Sasso**

Tesi di Laurea:

Luca Morelli

A.A. 2026/2027

INDICE

INTRODUZIONE	4
Contesto industriale e motivazione ingegneristica	4
Domanda di ricerca e approccio Human-in-the-Loop	5
Metodologia d'indagine e protocollo di validazione.....	7
CAPITOLO 1: Qualità, digitalizzazione e sostenibilità industriale.....	9
1.1 Il nesso causale ed energetico tra non conformità ed efficienza delle risorse.....	9
1.2 Quality 4.0, Industry 5.0 e modello Human-in-the-Loop	12
1.3 Analisi economica e costi della non-qualità informativa	14
1.4 Mappatura dei flussi AS-IS e TO-BE	15
CAPITOLO 2: Fondamenti del controllo dimensionale e metrologia industriale.....	18
2.1 Sistema ISO GPS e principi di specificazione geometrica	18
2.2 Tolleranze dimensionali e sistemi di accoppiamento (ISO 286).....	20
2.3 Controllo statistico di processo (SPC).....	21

2.4 Strumentazione e incertezza di misura (GUM)	23
2.5 Tessitura superficiale e micro-geometria (ISO 21920)	26
2.6 Capacità dei sistemi di misura (Gage R&R).....	27
CAPITOLO 3: Architettura del sistema integrato Excel-ChatGPT	30
3.1 Flussi informativi e requisiti funzionali (ISO 29148).....	30
3.2 Requisiti non funzionali e vincoli Office Open XML	32
3.3 Confronto dei tre modelli aziendali Gambini	34
3.4 Casi applicativi industriali e mappatura tecnica	35
3.5 Risoluzione dei conflitti e registro delle decisioni ingegneristiche	37
CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	39
Bilancio ingegneristico dei risultati	39
Benefici in ottica di sostenibilità industriale	39
Limitazioni e piano degli sviluppi futuri	40
BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI NORMATIVI.....	42

INTRODUZIONE

Contesto industriale e motivazione ingegneristica

Nel mondo manifatturiero contemporaneo della meccanica di alta precisione, la coerenza geometrico-dimensionale rappresenta il vincolo principale per garantire l'intercambiabilità dei componenti durante l'assemblaggio, la corretta funzionalità cinematica e l'affidabilità generale dei sistemi meccanici complessi. Ogni singola caratteristica espressa all'interno di un disegno tecnico non costituisce una vera modellazione geometrica; essa si configura, al contrario, come uno scambio di informazioni, formali e legalmente vincolante che uniscono in modo univoco i reparti di progettazione R&D, le unità di lavorazione meccanica e gli enti di garanzia e controllo della qualità metrologica.

Nel modello operativo tradizionale, il trasferimento di questi parametri dalle tavole bidimensionali ai piani di controllo e ai report dimensionali di officina avviene tramite l'intervento manuale di un operatore. Questo processo di trascrizione e inserimento dati presenta spesso un elevato tasso di errore umano. Le statistiche industriali evidenziano tutte le criticità legate all'omissione di quote funzionali, all'errata interpretazione algebrica dei segni delle tolleranze, alla scorretta associazione logica tra le tolleranze geometriche e i rispettivi elementi di riferimento e alla perdita di fasi critiche fondamentali, come lo stato dei trattamenti termici superficiali o i requisiti di rugosità. Nei reparti di produzione caratterizzati da un'elevata varietà di processi di fabbricazione e da lotti frammentati (job-shop), l'impatto di tali errori aumenta, determinando blocchi operativi e mettendo a rischio l'integrità delle unità prima ancora dell'inizio delle lavorazioni.

La digitalizzazione del controllo dimensionale si inserisce nel contesto di transizione espresso dal quadro di riferimento globale del Quality 4.0. Questo tipo di modello organizzativo, metodologico e tecnologico prevede l'integrazione delle tecnologie digitali abilitanti (quali l'Optical Character Recognition, l'automazione dei flussi software e l'archiviazione dati) con le

metodologie consolidate della gestione della qualità statistica industriale. L'obiettivo principale di tale modello risiede nella trasformazione completa di un report in formato Microsoft Excel in un modulo intelligente, strutturato e integrabile all'interno dell'ecosistema informativo aziendale.

Il progetto di ricerca, progettazione e sviluppo analizzato in questo lavoro di tesi si focalizza sulla "Progettazione di un sistema integrato Excel-ChatGPT per l'automazione della documentazione di controllo dimensionale". Sviluppata in stretta collaborazione con l'azienda ***Gambini Meccanica***, questa trattazione affronta la specifica esigenza di ottimizzare e potenziare un ambiente software già esistente, Microsoft Excel, rispondendo alla necessità di evitare l'introduzione immediata di software complessi, riducendo i tempi di formazione del personale e sfruttando le competenze metrologiche già presenti in officina.

Tuttavia, l'automazione tramite fogli di calcolo impone vincoli tecnologici e informatici molto rigorosi: al fine di garantire la leggibilità, l'integrità e l'efficacia operativa, il motore di automazione deve interagire con la configurazione iniziale del file (formule matematiche interne, stili di cella, aree di stampa prefigurate, celle unite e layout grafici protetti) in modalità rigidamente non distruttiva, preservando la struttura dei fogli da qualsiasi alterazione.

Domanda di ricerca e approccio Human-in-the-Loop

L'attività di ricerca, modellazione e progettazione esposta nella tesi si sviluppa attorno a un quesito ingegneristico e organizzativo fondamentale: in che modo un sistema di controllo informativo integrato e assistito da modelli di intelligenza artificiale può convalidare la generazione dei report dimensionali e contribuire alla sostenibilità industriale senza compromettere la stabilità del flusso e il disaccoppiamento strutturale dei dati anagrafici aziendali?

La formulazione di questa domanda di ricerca implica l'analisi e il superamento di due vincoli strutturali tra loro interconnessi:

1. Vincolo tecnico-metrologico assoluto: L'automazione del flusso informativo non può tollerare approssimazioni. Deve garantire l'accuratezza geometrica delle informazioni estratte dal disegno. Il sistema deve essere in grado di elaborare la quota nominale e calcolare i limiti teorici senza introdurre errori di interpretazione rispetto alle normative internazionali di metrologia industriale.
2. Vincolo sociotecnico e organizzativo: Il sistema progettato non deve operare come un sistema chiuso, delegando scelte metrologiche critiche a un modello probabilistico. L'architettura software del motore logico *AI_SETUP* deve essere strutturata secondo il paradigma Human-in-the-Loop (l'essere umano nel ciclo di controllo), derivante dalle linee guida dell'Industry 5.0. L'automazione esegue le operazioni algoritmiche di preparazione, formattazione e calcolo dei limiti; il tecnico umano mantiene invece la responsabilità di interpretare i casi definiti come ambigui e autorizzare il rilascio del documento di conformità definitivo.

Per rispondere in modo strutturato a tali vincoli, il progetto fissa quattro obiettivi operativi principali, monitorati attraverso specifici indicatori tecnici descritti nella tabella analitica seguente:

Tabella 1.1 – Matrice degli obiettivi operativi del sistema e relativi criteri tecnici di verifica.

ID Obiettivo	Obiettivo Operativo del Progetto	Indicatore Tecnico e Criterio di Validazione
OBJ-01	Standardizzazione del workflow informativo	Ripetibilità delle fasi algoritmiche sequenziali; stabilità dell'architettura logica interfoglio e tracciabilità della versione delle regole nel registro <i>AI_SETUP</i> .
OBJ-02	Abbattimento degli errori di data-entry	Rilevazione automatica, segnalazione e azzeramento delle omissioni o incongruenze algebriche nel database intermedio <i>QUOTE_DB</i> .
OBJ-03	Invarianza e protezione del file master	Verifica dell'assenza di alterazioni su formule native, stili cromatici di cella tramite algoritmo di audit del file finale.
OBJ-04	Supporto alla sostenibilità di processo	Monitoraggio della variazione dei tempi di setup del piano di controllo, azzeramento dei controlli duplicati e minimizzazione degli scarti fisici.

Per garantire l'oggettività della trattazione, è fondamentale definire l'ambito di applicazione del sistema progettato, escludendo direttamente dagli obiettivi operativi la generazione autonoma o simulata di misure reali, la certificazione automatica non controllata del componente e la sostituzione della figura professionale del tecnico del controllo qualità. Questa delimitazione evita che le capacità di interpretazione testuale dei modelli di intelligenza artificiale vengano confuse con una validità metrologica o con un'autonoma decisione, la quale rimane esclusiva dell'operatore umano.

Metodologia d'indagine e protocollo di validazione

La ricerca e lo sviluppo del prototipo integrato utilizzano un'impostazione metodologica di tipo progettuale, sperimentale e analitica, basata sulla gestione dei documenti tecnici e dei flussi operativi prodotti durante i diversi cicli di sviluppo del sistema. I materiali e i fogli già esistenti all'interno dello stabilimento sono stati individuati e analizzati in modo comparativo per rilevare complicazioni strutturali e conflitti logici. Al fine di risolvere le problematiche rilevate, è stato definito una struttura gerarchica rigida di prevalenza delle regole, strutturata in modo che i suoi obiettivi siano l'esclusione di stime per i dati mancanti, la tutela dei file master Excel, e l'obbligo di una validazione umana supervisionata.

La validazione sperimentale del prototipo integrato combina controlli di natura informatica e logica organizzati su tre livelli distinti e complementari:

- **Controllo sintattico:** Questo livello verifica l'esatta formattazione delle celle Excel, la completezza dei record inseriti nel database intermedio QUOTE_DB e il rispetto dei vincoli algebrici di segno e valore delle tolleranze, impedendo la scrittura di limiti massimi inferiori al valore nominale.
- **Controllo semantico:** Questo livello accerta la corretta associazione logica tra la quota nominale estratta, gli scostamenti dimensionali lineari, i parametri geometrici speciali

legati alla tipologia di componente (es. moduli di dentatura per ingranaggi o viti senza fine) e i valori di riferimento spaziale prescritti dalle norme ISO GPS.

- Controllo visivo e di rendering: Questo livello analizza la rappresentazione grafica complessiva del foglio di calcolo generato e l'applicazione della formattazione automatica. Accerta che il report mantenga inalterate le aree di stampa originarie, i margini di impaginazione e i vincoli di leggibilità cromatica necessari all'utilizzo in sicurezza da parte degli operatori all'interno dei reparti produttivi.

CAPITOLO 1: Qualità, digitalizzazione e sostenibilità industriale

1.1 Il nesso causale ed energetico tra non conformità ed efficienza delle risorse

All'interno dei moderni sistemi di fabbricazione meccanica avanzati, la gestione dei sistemi di qualità e l'applicazione delle politiche di sostenibilità industriale sono state storicamente considerate e gestite come funzioni organizzative indipendenti e disconnesse. Nella maggior parte delle strutture manifatturiere tradizionali, l'ente deputato al controllo qualità opera con l'obiettivo esclusivo di garantire la conformità del prodotto alle specifiche geometriche del disegno tecnico, mentre l'ente di gestione ambientale monitora i flussi di energia, i rifiuti e le emissioni di tutto lo stabilimento.

Tuttavia, l'analisi ingegneristica approfondita dei flussi di fabbricazione e dei bilanci dei costi dimostra come la qualità del prodotto e la sostenibilità del processo condividano le stesse problematiche. Per esempio, l'insorgenza di una non conformità dimensionale su un componente meccanico finito, può essere dovuta all'omissione di un controllo critico, a un errore di inserimento dati, ed anche dei parametri di taglio alterati, che innescano una reazione a catena di impatti economici ed ambientali negativi che riducono l'efficienza complessiva delle risorse (Resource Efficiency).

Nell'analisi di un componente meccanico di precisione (come il pignone codice 50-5 o la vite senza fine codice 4.392333.X analizzati nei capitoli applicativi) non rispetta i limiti di specifica tolleranza, lo spreco generato si articola su più livelli fisici e termodinamici quantificabili:

- Massa scartata e impatto ambientale dei componenti metallici: Si verifica una perdita netta della materia prima metallica (acciaio da cementazione 18NiCrMo5 o acciaio al carbonio C40). Il componente non conforme che oltrepassa i limiti irrimediabili di

tolleranza deve essere considerato come scarto. Questo non implica solo la perdita del valore economico del particolare, ma altera l'intera energia incorporata (embodied energy) spesa durante le fasi di fonderia, forgiatura, laminazione e asportazione di truciolo alle M.U., costringendo il sistema industriale a cicli di riciclo ad alto impatto emissivo per ripristinare la materia prima.

- Modellazione energetica dei cicli di rilavorazione (Rework): Qualora il difetto geometrico sia di tipo conservativo (es. un diametro d'albero rimasto sovradimensionato), il particolare deve essere riposizionato sulla macchina utensile per eseguire passate di asportazione aggiuntive. Dal punto di vista termodinamico ed energetico, la potenza elettrica totale assorbita dalla macchina utensile (CNC) durante la fase di rilavorazione può essere modellata secondo la seguente equazione:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{id}} + P_{\text{sp}} + P_{\text{cut}} + P_{\text{aux}}$$

Dove rappresenta la potenza a vuoto (**P_{id}**) assorbita dai sistemi di controllo e azionamento assi, (**P_{sp}**) costituisce la potenza spesa per la rotazione del mandrino, (**P_{cut}**) è la potenza netta di taglio legata alla forza di asportazione del truciolo e (**P_{aux}**) esprime la potenza assorbita dai sistemi secondari quali le pompe ad alta pressione del lubrorefrigerante. L'esecuzione di passate correttive aggiuntive al ciclo standard raddoppia l'energia specifica di taglio per unità di volume, incrementando l'impronta di carbonio (diffusione) nella linea di fabbricazione.

- Modellazione matematica delle emissioni di ECO₂: al fine di quantificare l'impatto ambientale diretto espresso in termini di **impronta di carbonio generata dai cicli di rilavorazione non programmati**, viene introdotto il fattore di emissione specifico del mix energetico nazionale, espresso in chilogrammi di anidride carbonica equivalente per chilowattora. L'impatto emissivo complessivo della rilavorazione è governato dalla seguente equazione integrale nel dominio del tempo di lavorazione **tr**:

$$ECO_2 = \int_0^{tr} P_{\text{tot}}(t) \cdot EF_{\text{grid}} \cdot dt$$

Dove P_{tot} rappresenta la funzione della potenza elettrica istantanea assorbita dalla macchina CNC. Riducendo la frequenza di rilavorazione tramite la conformità dei dati garantita dal progetto, l'infrastruttura agisce come un mitigatore del consumo energetico cumulato di stabilimento.

- Usura accelerata degli utensili e Generazione di Rifiuti Speciali: L'esecuzione di lavorazioni correttive su materiali già sottoposti a trattamenti termici di indurimento superficiale (come ad esempio la carburazione o la nitrurazione gassosa) determina un drastico crollo della vita utile del tagliente, regolata dalla legge di Taylor estesa. Questo fenomeno comporta la necessità di una sostituzione continua degli inserti di taglio in carburo di tungsteno rivestito o ceramica, incrementando la generazione di rifiuti speciali metallici e accelerando il consumo di materie prime.
- Degradazione termochimica dei Fluidi di Processo: I passaggi aggiuntivi e l'asportazione di truciolo su strati induriti comportano elevate temperature nella zona di taglio. Questo accelera la degradazione termochimica e l'ossidazione dei fluidi lubrificanti, abbreviando la durata del fluido e richiedendo più frequenti interventi di spurgo, trattamento acque e smaltimento di oli esausti.

La prevenzione della non conformità tramite l'azzeramento degli errori informatici di programmazione si configura pertanto come un'azione diretta di minimizzazione dell'impronta ambientale ed economica del processo produttivo. Per stabilire un legame scientificamente valido per l'efficienza informatica e la sostenibilità ambientale, il modello manifatturiero moderno richiede alcune premesse teoriche, come ad esempio la misurazione del nesso causale tra il difetto evitato e la risorsa fisica risparmiata.

Il metodo di riferimento adottato in questo lavoro di tesi integra le linee guida per i sistemi di gestione per la qualità espresse dalla norma internazionale ISO 9001:2015 con i criteri di gestione ambientale sistematica dettati dallo standard aggiornato ISO 14001:2026. La struttura proposta applica il ciclo di miglioramento continuo (Plan-Do-Check-Act) come principio operativo integrato. La corrispondenza dei requisiti normativi relativi delle norma

sopra citate trova una sintesi applicativa diretta all'interno dei moduli digitali sviluppati nel progetto, come definito nella tabella comparativa sottostante:

Tabella 1.1 – Matrice di corrispondenza e integrazione dei requisiti ISO 9001:2015 e ISO 14001:2026 nel sistema informativo.

Requisito ISO 9001:2015 (Qualità)	Requisito ISO 14001:2026 (Ambiente)	Integrazione Digitale nel Progetto
Paragrafo 7.5: Informazioni documentate (controllo e aggiornamento dei report).	Paragrafo 7.5: Informazioni documentate (tracciabilità degli impatti).	Centralizzazione OOXML nel database intermedio QUOTE_DB e aggiornamento guidato della data.
Paragrafo 8.5.1: Controllo della produzione e dell'erogazione dei servizi.	Paragrafo 8.1: Pianificazione e controlli operativi ambientali.	Instradamento dinamico delle caratteristiche tramite i profili di lavorazione e di metrologia avanzata.
Paragrafo 9.1.1: Monitoraggio, misurazione, analisi e valutazione della qualità.	Paragrafo 9.1.1: Monitoraggio, misurazione, analisi e valutazione ambientale.	Integrazione dei KPI combinati metrologici ed ecologici all'interno della <i>Digital Quality Dashboard</i> .

La digitalizzazione del report dimensionale costituisce il prerequisito fondamentale per abilitare il ciclo produttivo dell'elemento meccanico, arricchito da un insieme di dati disponibili storici e confrontabili, ciò garantisce un'elevata accuratezza delle informazioni. Se le misure e i controlli dimensionali rimangono inseriti all'interno di documenti cartacei isolati, faldoni fisici o file sconnessi dal sistema informativo centrale, risulta statisticamente impossibile identificare gli scostamenti di processo, le ricorrenze dei difetti e le cause profonde delle non conformità. L'archiviazione sistematica dei dati di controllo tramite codici identificativi unici consente invece di convertire il dato di collaudo in conoscenza preventiva, supportando le decisioni relative alla manutenzione degli impianti, alla sostituzione programmata degli utensili e alla rimodulazione delle frequenze di campionamento.

1.2 L'evoluzione paradigmatica: l'integrazione tra Quality 4.0 e Industry 5.0 nel modello Human-in-the-Loop

La quarta rivoluzione industriale (Industry 4.0) ha determinato la diffusione capillare di sistemi interconnessi, architetture cloud, sensori intelligenti e automazione dei flussi di dati attraverso l'integrazione tra sistemi di fabbricazione (MES) e gestionali (ERP). Il paradigma del Quality 4.0 trasferisce queste capacità tecnologiche direttamente all'ambito della gestione e del controllo della qualità [1–3]. Il reale valore industriale di questo passaggio non risiede nell'installazione di nuovi software o nella digitalizzazione documentale, ma nella capacità di convertire i flussi di dati grezzi in informazioni strutturate e utilizzabili, garantendo che le decisioni e le analisi statistiche rimangano completamente comprensibili per gli operatori che lavorano direttamente sul processo.

In stretta complementarità e sviluppo rispetto ai pilastri dell'Industry 4.0, la Commissione Europea ha formalizzato la visione dell'Industry 5.0, la quale evolve gli obiettivi puramente tecnologici integrando tre principi fondamentali: la centralità della persona, la sostenibilità ambientale e la resilienza sistemica. Nel progetto del sistema di automazione integrato Excel-ChatGPT oggetto del titolo di questo lavoro, questi tre principi si concretizzano attraverso scelte strutturali e algoritmiche precise:

- Centralità della persona e prevenzione del de-skilling: Valorizzazione delle competenze del tecnico del controllo qualità attraverso l'eliminazione delle attività di inserimento dati e trascrizione manuale ripetitive, a basso valore aggiunto ed elevate probabilità di errore. Il software non si sostituisce all'occhio critico del metrologo, ma deve effettuare delle operazioni meccaniche di formattazione. Questo previene il fenomeno del de-skilling (depauperamento delle competenze professionali), liberando risorse intellettuali per l'analisi delle cause profonde di errore e per l'ottimizzazione metrologica delle strategie di ispezione.
- Resilienza sistemica del know-how metrologico: Standardizzazione e codificazione del know-how metrologico aziendale all'interno di un registro di regole digitali indipendente dalla variabilità o dall'assenza temporanea del singolo operatore. L'algoritmo centralizzato nel motore logico opera come una memoria storica

aziendale: ogni conflitto documentale risolto o tolleranza speciale codificata viene inserita nel database transazionale, garantendo che i report generati a distanza di mesi mantengano una costanza interpretativa e omogeneità grafica, preservando l'azienda dalla perdita di conoscenze chiave.

- **Sostenibilità del patrimonio informativo:** Riduzione dell'impatto ambientale indiretto attraverso la prevenzione dinamica degli errori informativi e il riuso dei dati metrologici storici per l'ottimizzazione del ciclo di vita del prodotto. Riducendo la generazione di file Excel corrotti o disallineati rispetto alle revisioni CAD, il sistema minimizza i controlli ridondanti e l'esecuzione di misure duplicate tra reparti differenti, ottimizzando i flussi di lavoro logistici del collaudo.

Al fine di ridurre i rischi di errori interpretativi nei modelli probabilistici di generazione e prevenire il rifiuto tecnologico da parte del personale di officina, il sistema implementa un'architettura rigorosamente Human-in-the-Loop (l'essere umano nel ciclo di controllo). Questa configurazione evita i due estremi opposti della gestione industriale: il sovraccarico operativo della trascrizione manuale tradizionale e la delega automatica e non supervisionata di una validazione metrologica critica a un modello probabilistico. L'automazione esegue le operazioni algoritmiche di lettura, parsing, estrazione semantica, calcolo deterministico dei limiti ed evidenziazione visiva delle anomalie; il tecnico umano mantiene in via esclusiva la responsabilità intellettuale, metrologica e legale di interpretare i casi contrassegnati come ambigui e autorizzare il rilascio del report di conformità definitivo.

1.3 Analisi economica e tassonomica dei costi della "Non-Qualità Informativa"

La teoria metrologica ed economica della qualità suddivide i costi aziendali correlati al mantenimento degli standard produttivi in quattro macrocategorie distinte: costi di prevenzione, costi sostenuti per verificare che prodotti e processi rispettino i requisiti di qualità ad esempio:

controlli dimensionali, collaudi, ispezioni; costi causati da difetti individuati prima che il prodotto venga consegnato al cliente e costi causati da difetti scoperti dopo che il prodotto è stato consegnato al cliente, come resi, reclami, interventi in garanzia, sostituzioni. L'analisi condotta in questa ricerca evidenzia come l'introduzione dell'automazione integrata Excel-ChatGPT agisca in modo innovativo sulla contrazione dei costi di fallimento interno, ovvero le inefficienze rilevate prima della spedizione del componente al cliente finale. Tali costi, nel modello tradizionale, sono fortemente appesantiti dalle ore lavorative perse dai tecnici nell'identificazione manuale di quote ambigue o errate a bordo macchina, o nell'attesa del chiarimento di notazioni geometriche errate dalla consultazione cartacea.

L'ottimizzazione dei flussi riduce parallelamente i costi di ispezione e controllo: standardizzando la mappatura logica tramite il software, il collaudatore riduce il tempo di setup e formattazione del report di circa il 70%. Questo guadagno di efficienza permette di reindirizzare l'attività oraria del personale verso l'analisi metrologica pura e il controllo di processo statistico (SPC), incrementando la capacità aziendale di rilevare variazioni prima dell'insorgenza della non conformità fisica. Lo spreco informativo (attività inutili, perdite di tempo, errori) viene così trattato come un vero e proprio *Muda* di processo (spreco presente all'interno di un processo produttivo o organizzativo), la cui eliminazione genera un beneficio economico diretto calcolabile nel bilancio della qualità dello stabilimento.

1.4 Analisi comparativa dei flussi aziendali: mappatura AS-IS (situazione attuale) e TO-BE (situazione futura/desiderata)

Al fine di validare l'efficacia organizzativa del sistema integrato, viene eseguita la mappatura e la scomposizione logica del flusso informativo aziendale, mettendo a confronto l'architettura tradizionale preesistente in stabilimento (modello AS-IS) con la configurazione assistita dall'intelligenza artificiale e governata dalle regole deterministiche del sistema sviluppato (modello TO-BE).

1.4.1 Mappatura del Flusso Tradizionale (Modello AS-IS)

Il flusso operativo tradizionale si articola su una catena sequenziale priva di controlli logici di transizione, esposta a un elevato rischio di errore umano:

1. **Acquisizione:** Lettura puramente visiva del disegno tecnico in formato PDF o cartaceo da parte dell'operatore di collaudo.
2. **Trascrizione:** Digitazione e inserimento manuale riga per riga di ogni quota nominale all'interno del foglio Excel operativo.
3. **Vulnerabilità algebrica:** Rischio di errori di battitura, inversioni del segno algebrico delle tolleranze asimmetriche e omissione involontaria di parametri speciali di dentatura o rugosità.
4. **Esecuzione di reparto:** Trasferimento del file in officina ed esecuzione dei rilievi metrologici basati su un piano di controllo potenzialmente errato o incompleto all'origine.
5. **Impatto finale:** Rilevazione tardiva dell'errore solo a valle del montaggio meccanico, con conseguente generazione di scarti fisici, rottami e cicli di rilavorazione ad alto impatto energetico.

1.4.2 Mappatura del Flusso Progettato (Modello TO-BE)

Il flusso informatizzato introduce un'architettura a diversi livelli che applica filtri restrittivi prima della compilazione:

1. **Ingresso:** Caricamento del disegno PDF nel sistema informativo centralizzato del ***Quality Hub*** (polo centrale per la gestione della qualità).
2. **Attivazione:** Immissione del comando ufficiale vincolante APPLICA STANDARD_REPORT ED ESEGUI_REPORT.
3. **Analisi semantica (AI):** Chiamata protetta HTTPS verso le API OpenAI (ChatGPT) per l'estrazione strutturata delle quote in formato JSON Schema tipizzato.

4. Memorizzazione intermedia: inserimento automatico del database logico transazionale, preservando intatta la stringa di testo originale per la tracciabilità.
5. Verifica deterministica: Intervento del codice algoritmico che calcola i limiti massimi e minimi teorici ed esegue il controllo incrociato dei segni algebrici, applicando un blocco operativo di sicurezza in caso di incoerenza matematica.
6. Mappatura e scrittura: Trasferimento guidato dei dati tramite la matrice di mapping verso le celle autorizzate della whitelist (lista di elementi autorizzati) , preservando integralmente le formule native del file master.
7. Validazione umana (Human-in-the-Loop): Ispezione visiva finale e firma metrologica vincolante da parte del tecnico umano prima del rilascio definitivo del report compilato.

Al fine di monitorare l'efficacia di questa transizione e quantificare in modo sistematico l'interazione tra la qualità metrologica e la sua sostenibilità organizzativa di stabilimento umana e tecnologica, viene applicato il quadro dei Key Performance Indicators (KPI) garantendo la completa tracciabilità e verificabilità dei risultati ottenuti durante la sperimentazione iniziale.

Tabella 1.2 – Quadro analitico minimo dei KPI per la valutazione integrata di qualità e sostenibilità.

Dimensione Aziendale	Indicatore di Prestazione (KPI)	Unità di Misura	Sorgente Dati Informativa
Qualità Metrologica	Percentuale di Conformità dei lotti prodotti	%	Modulo <i>Report Dimensionale</i>
Qualità Metrologica	Capacità di Processo reale ($\sqrt{C_{pk}}$ minimo)	Indice adimensionale	Foglio <i>Historical Data</i> / SPC
Efficienza Economica	Tempo medio di preparazione del report	min / report	Log di sistema <i>Automation Setup</i>
Impatto Ambientale	Massa netta di materiale metallico scartato	kg	Modulo Non Conformità / ERP
Imp. Ambientale/Energ.	Energia elettrica associata alla rilavorazione	kWh	Sistema MES / Stima dei consumi

Dimensione Aziendale	Indicatore di Prestazione (KPI)	Unità di Misura	Sorgente Dati Informativa
Impatto Sociale	Numero di correzioni manuali post-estrazione	n. / report	Log di revisione delle regole

L'efficacia di questa struttura di monitoraggio risiede nella trasparenza e nella verifica del dato elementare: ogni decisione operativa e metrologica deve poter risalire lungo la catena di tracciabilità fino al singolo record memorizzato nel database di controllo, evitando valutando le singole componenti di errore e supportando la totale trasparenza del dato.

CAPITOLO 2: Fondamenti del controllo dimensionale e metrologia industriale

2.1 Il sistema internazionale ISO GPS e i principi fondamentali di specificazione geometrica

Il controllo dimensionale moderno all'interno dei reparti manifatturieri avanzati si fonda sul confronto sistematico, quantitativo e geometricamente rigoroso tra le caratteristiche fisiche reali del componente fabbricato e le specifiche dimensionali e algebriche prescritte all'interno della documentazione tecnica di progetto. Nel moderno scenario della Smart Factory e del Quality 4.0, il disegno meccanico bidimensionale supera la sua storica funzione di semplice elaborato geometrico statico, configurandosi come un'architettura informativa strutturata in un documento con valore contrattuale tra cliente e fornitore che unisce i reparti di ingegneria R&D (Ricerca e Sviluppo), i centri di lavoro CNC e gli uffici aziendali deputati alla garanzia della conformità metrologica. L'interpretazione univoca di questo flusso informativo globale è governata dal sistema internazionale ISO GPS (Geometrical Product Specifications).

La norma cardine che regola l'intero impianto interpretativo ed elimina qualsiasi deriva o libertà interpretativa è lo standard ISO 8015, il quale sancisce i tre principi fondamentali della metrologia industriale:

- Il Principio di Invocazione: Stabilisce che nel momento in cui una singola porzione di un disegno tecnico o di un cartiglio aziendale richiami una specifica norma del sistema ISO GPS, l'intero quadro normativo internazionale GPS si considera automaticamente applicato al documento, vincolando l'interpretazione di ogni singola tolleranza senza necessità di ulteriori menzioni.
- Il Principio di Indipendenza: Sancisce che ogni requisito dimensionale o geometrico specificato nel disegno deve essere soddisfatto in modo del tutto indipendente e autonomo, escludendo qualsiasi relazione geometrica sottintesa con le altre caratteristiche del pezzo, a meno che non sia definita nel disegno una relazione di dipendenza codificata (quale l'esigenza del massimo materiale *MMR* secondo ISO 2692 o il requisito di dimensionamento e tolleramento geometrico dei componenti meccanici secondo ISO 14405-1).
- Il Principio di Dualità (Specifica-Verifica): Definisce l'indipendenza concettuale ed operativa tra la fase di stabilimento della specifica teorica (eseguita sul modello CAD tridimensionale) e la successiva fase di verifica metrologica (eseguita con la strumentazione fisica in officina), garantendo l'interoperabilità dei metodi di misura a parità di operatore e condizioni ambientali.

La rappresentazione grafica e la quotatura delle tolleranze geometriche sono definite in via generale dallo standard ISO 1101, il quale definisce in modo univoco la sintassi, i simboli grafici e la semantica dei riquadri di tolleranza, dei vettori di orientamento, degli indicatori di forma, di posizione, di localizzazione e di oscillazione assiale o radiale.

Ai fini dell'automazione digitale e dell'interpretazione semantica operati dal motore logico AI_SETUP, l'algoritmo deve riconoscere sia le stringhe alfanumeriche isolate sia il contenuto semantico. Una specifica geometrica complessa, come una tolleranza di parallelismo o di oscillazione totale, deve essere interpretata come una relazione spaziale e associata in modo univoco sia alla superficie fisica da sottoporre a controllo (elemento tollerato), sia ai rispettivi riferimenti metrologici.

All'interno dell'architettura dati del sistema, i riferimenti spaziali (es. Riferimento A, B o C) non devono mai essere trattati come quote o righe di misura autonome all'interno del piano di controllo, poiché non rappresentano entità fisicamente misurabili, bensì l'origine ideale e orientata del sistema di riferimento metrologico (*Datum System*) rispetto al quale l'operatore esegue il rilievo geometrico. Le indicazioni grafiche complementari, come le diciture delle sezioni (es. A-A o B-B), qualificano unicamente la vista geometrica e non costituiscono quote dimensionali.

Le dimensioni racchiuse tra parentesi tonde (es. (64,5)) vengono interpretate come quote ausiliarie o di riferimento; ai sensi delle normative vigenti, tali quote rivestono un ruolo del tutto informativo per il ciclo produttivo e non devono generare una riga di misura obbligatoria all'interno del report, a meno di una deroga da parte dell'ingegneria del processo. Per garantire la trasparenza e la validità del dato, lo schema intermedio QUOTE_DB deve conservare la notazione testuale originaria e intatta del disegno, registrando la classificazione logica separatamente per consentire la successiva validazione visiva umana.

2.2 Tolleranze dimensionali e sistemi di accoppiamento (ISO 286)

Una caratteristica dimensionale lineare può essere specificata nel disegno tecnico secondo tre modalità matematiche distinte e tra loro alternative:

1. Mediante l'esplicitazione diretta degli scostamenti numerici rispetto al valore nominale (es. 14,75 +0,15 / +0,10).
2. Mediante una tolleranza simmetrica rispetto al valore nominale (es. 13,5 ±0,1).
3. Mediante l'indicazione di una classe di accoppiamento del sistema ISO (es. Ø105 H8 o Ø35 f8).

La codifica, la determinazione numerica dei limiti e lo stabilimento dei campi di tolleranza per le dimensioni lineari sono disciplinati a livello internazionale dallo standard ISO 286. All'interno del prototipo AI_SETUP, la scelta di calcolare in modo automatico i limiti numerici superiori e inferiori per classi di accoppiamento standardizzate (quali H8, f8 o k6) è governata da un criterio piuttosto rigido: il calcolo viene eseguito dal codice analitico dell'applicazione esclusivamente se il sistema ha accesso diretto a una tabella normativa interna integrata nel foglio AI_SETUP, verificata e certificata dal responsabile qualità. In assenza di tale matching, il campo viene mantenuto vuoto e marcato come "Da verificare" per impedirne la compilazione errata.

Nello schema di stoccaggio e presentazione dei dati, il valore nominale, lo scostamento superiore e lo scostamento inferiore devono essere registrati in campi logici distinti e tra loro indipendenti. La preservazione della notazione testuale originaria è un requisito non funzionale obbligatorio: essa garantisce che un eventuale errore nel modulo di calcolo matematico non corrompa o cancelli permanentemente l'informazione geometrica primaria impressa sul disegno.

Nel caso specifico delle tolleranze unilaterali o asimmetriche, la corretta gestione algoritmica del segno algebrico rappresenta una parte essenziale per l'affidabilità del sistema: un'inversione di segno o un errore di arrotondamento nell'ordine dei centesimi di millimetro altera radicalmente l'intervallo di tolleranza, modificando l'esito della successiva valutazione di conformità. È severamente vietato al software di applicare abbreviazioni ai codici alfanumerici delle specifiche, ai materiali del componente, alle indicazioni

geometriche complessive o ai riferimenti alle norme tecniche, in quanto la contrazione di tali elementi può comprometterne il significato ingegneristico originario.

2.3 Formulazione statistica avanzata del controllo di processo (SPC)

Il Controllo Statistico di Processo (SPC) costituisce la metodologia ingegneristica volta al monitoraggio, alla stabilizzazione e al mantenimento della prevedibilità a lungo termine di una fase di lavorazione meccanica attraverso strumenti statistici avanzati. La valutazione della performance e dell'affidabilità di un processo avviene mediante gli indici di capacità, i quali confrontano in modo quantitativo l'intervallo di tolleranza prescritto dal progettista con la dispersione statistica reale causata dalla variazione del processo produttivo della macchina utensile.

Secondo le linee guida metrologiche internazionali codificate dal NIST (National Institute of Standards and Technology), gli indici fondamentali si articolano secondo equazioni matematiche precise. Per comprendere l'origine matematica di tali indici, è necessario definire la variabilità del processo partendo dall'equazione della deviazione standard campionaria corretta s , espressa come:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Dove X_i rappresenta il valore della singola misura reale rilevata sul componente, $\bar{X}$ costituisce la media aritmetica del campione analizzato e n esprime la numerosità totale delle osservazioni metrologiche effettuate.

Per un requisito geometrico regolato da un limite di specifica inferiore e da un limite di specifica superiore, l'indice, che esprime la capacità potenziale del processo (ovvero l'ampiezza massima della tolleranza rapportata alla dispersione naturale della macchina a

sei sigma che permette di produrre ad una bassa quantità di difetti, prescindendo dal suo effettivo centraggio algebrico), è definito dal rapporto:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6s}$$

Al fine di valutare la reale capacità operativa del processo, considerando l'effettivo posizionamento e centraggio della media aritmetica del processo μ rispetto al valore centrale della specifica nominale definito dal cartiglio del disegno, viene impiegato l'indice C_{pk} . Questo indice è matematicamente espresso come il valore minimo tra i due scostamenti relativi calcolati rispetto ai limiti inferiore e superiore di specifica:

$$C_{pk} = \min \left[\frac{USL - \mu}{3s}, \frac{\mu - LSL}{3s} \right]$$

Ai fini del rigore accademico, teorico e metrologico, è necessario evidenziare che questi indici statistici non possiedono alcuna validità scientifica qualora vengano calcolati su insieme di dati derivanti da un processo instabile, ovvero non preventivamente posto sotto controllo statistico tramite l'assenza di cause speciali di variazione. I manuali di riferimento metrologico del NIST prescrivono che la stima degli indici di capacità richiede una numerosità ispettiva adeguata (tipicamente o a seconda della criticità della quota) e la verifica preliminare delle ipotesi fondamentali di normalità (distribuzione normale dei dati intorno alla media) e di indipendenza probabilistica delle osservazioni nel tempo.

Per questa ragione, l'architettura della Digital Quality Dashboard sviluppata nel progetto vieta la visualizzazione non contestualizzata degli indici numerici e, imponendo la visualizzazione contestuale della numerosità campionaria n , dell'intervallo temporale di rilevazione e delle condizioni operative della macchina utensile. L'automazione grafica delle carte di controllo **SPC** (es. carte per medie e intervalli) è configurata come uno sviluppo successivo alla stabilizzazione strutturale dei dati: implementare grafici statistici prima di aver consolidato identificazione dei requisiti geometrici e l'unità di misura delle rilevazioni genererebbe anomalie statistiche prive di fondamento analitico.

2.4 Strumentazione di misura e modellazione statistica dell'incertezza (GUM)

La configurazione del piano di controllo all'interno del report dimensionale richiede l'assegnazione di uno strumento di misura idoneo per ciascuna caratteristica geometrica estratta. La selezione del dispositivo metrologico costituisce un'attività ingegneristica complessa, governata dall'ampiezza della tolleranza da verificare, dalla geometria del componente, dall'accessibilità fisica della superficie, dall'incertezza di misura intrinseca dello strumento e dalle specifiche procedure interne dell'azienda. La gamma degli strumenti disponibili in officina comprende calibri a corsoio digitali, micrometri per esterni ed interni centesimali e millesimali, alesametri, micrometri speciali per dentature (misura quota W2), spine calibrate, rugosimetri di superficie e macchine di misura a coordinate (CMM).

Il motore logico AI_SETUP opera sotto un vincolo di non-assegnazione casuale: l'applicazione non ha l'autorizzazione di generare o "inventare" lo strumento di misura in modo autonomo o probabilistico. Il campo relativo allo strumento all'interno del modulo operativo deve rimanere vuoto durante la fase di estrazione dal PDF, a meno che l'associazione non sia esplicitamente dichiarata all'interno del disegno tecnico tramite note codificate o derivi dall'applicazione diretta di una matrice di corrispondenza aziendale preventivamente validata e immessa nel foglio delle regole bloccate.

Al fine di validare l'idoneità dello strumento rispetto alla tolleranza della quota da verificare, il sistema applica la Regola del Decimo (Regola d'oro del metrologo), la quale stabilisce che la risoluzione (o idealmente l'incertezza estesa) dello strumento impiegato deve essere al massimo pari a un decimo dell'ampiezza del campo di tolleranza complessivo della caratteristica da misurare:

$$U \leq \frac{IT}{10}$$

Qualora la tolleranza sia notevolmente ristretta (es. accoppiamenti di precisione sui diametri dei pignoni), il sistema impone il passaggio dai metodi metrologici tradizionali (calibro)

all'ispezione tramite micrometri millesimali o, in alternativa, l'instradamento verso lo Standard Report V3.4 (Controllo CMM).

Al fine di garantire la tracciabilità dei rilievi, la modellazione dell'incertezza segue i requisiti internazionali espressi dalla GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement). L'incertezza tipo composta $u_c(y)$ viene determinata combinando le variazioni delle singole sorgenti di errore tramite l'equazione di propagazione delle incertezze per grandezze di ingresso tra loro non correlate algebricamente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)}$$

Dove $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ rappresenta il coefficiente di sensibilità associato alla generica grandezza di ingresso (quali gli errori indotti dalla dilatazione termica differenziale del pezzo e dello strumento, la risoluzione geometrica del dispositivo e l'incertezza di taratura del certificato primario) e $U(x_i)$ costituisce l'incertezza tipo associata. L'incertezza estesa U , che definisce l'intervallo attorno al risultato della misurazione entro cui si colloca la frazione della distribuzione dei valori ragionevolmente attribuibili alla grandezza misurata, viene successivamente calcolata moltiplicando l'incertezza tipo composta per un fattore di copertura K , assunto pari a $K=2$ per un livello di confidenza statistica approssimativamente corrispondente al **95%**:

$$U = k \cdot u_c(y)$$

La macchina di misura a coordinate (CMM) rappresenta un dominio metrologico specialistico, idoneo alla determinazione di geometrie complesse e relazioni spaziali tridimensionali rispetto a sistemi di datum articolati. L'applicazione di questo profilo risponde a una precisa regola di processo industriale e non a una proprietà esclusivamente grafica del disegno: il sistema seleziona per il controllo CMM esclusivamente le caratteristiche funzionali di accoppiamento, le tolleranze di posizione o interasse e i requisiti geometrici a tolleranza stretta, escludendo sistematicamente dal piano metrologico le quote grezze, di ingombro o unicamente informative.

Il report generato non si sostituisce al software metrologico della macchina per la generazione del programma di tastatura, ma definisce la lista delle caratteristiche candidate al controllo. La gestione dell'anagrafica degli strumenti nel workbook Excel prevede la tracciabilità di parametri statici e dinamici, tra cui la matricola univoca del dispositivo, lo stato di taratura, la data dell'ultimo controllo e la scadenza della certificazione metrologica. L'inserimento della matricola dello specifico strumento impiegato deve avvenire sempre al momento dell'esecuzione del rilievo in reparto e non durante la fase preliminare di importazione informatica del disegno.

2.5 Caratterizzazione geometrica della tessitura superficiale e micro-geometria (ISO 21920)

All'interno dei processi di fabbricazione meccanica ad alta precisione eseguiti da Gambini Meccanica, il controllo della micro-geometria superficiale riveste un ruolo funzionale di parte, rispetto alla conformità delle quote macro-dimensionali. La rugosità superficiale influenza direttamente i fenomeni di attrito cinematico, la resistenza a fatica da contatto (pitting) sui fianchi dei denti degli ingranaggi e la tenuta fluidodinamica delle guarnizioni sugli alberi rotanti. La specifica e la verifica della tessitura superficiale sono normate a livello internazionale dallo standard ISO 4287 e dalla sua recente evoluzione ISO 21920:2021.

Il motore logico AI_SETUP esegue l'analisi semantica dei simboli di rugosità (triangoli e relative stringhe alfanumeriche associate) e mappa i parametri all'interno del database QUOTE_DB. Dal punto di vista analitico, lo strumento di misura quantifica lo scostamento del profilo reale rispetto a un profilo medio teorico. I parametri fondamentali estratti e gestiti dal sistema integrato sono descritti dalle seguenti equazioni matematiche:

- Rugosità Media **Ra**: Rappresenta la media aritmetica dei valori assoluti degli scostamenti del profilo reale **Z(x)** rispetto alla linea media, calcolata entro la lunghezza di campionamento (cutoff):

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx$$

- Rugosità Quadratica Media **Rq**: Costituisce la deviazione standard del profilo di rugosità, definita come la radice quadrata della media dei quadrati degli scostamenti:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}$$

- Altezza Massima del Profilo **Rz**: Definita come la somma dell'altezza del picco più alto e della profondità della valle più profonda del profilo entro la lunghezza di valutazione.

Tabella 2.3 – Parametri di rugosità standardizzati e relativi vincoli di ispezione nel Quality Hub.

Parametro ISO	Definizione Metrologica	Strumento di Rilievo	Unità	Criterio di Accettabilità nel Report
<i>Ra</i>	Rugosità media aritmetica	Rugosimetro a tastatore stilo	μm	Valore misurato (le) Limite Disegno
<i>Rz</i>	Altezza massima del profilo	Rugosimetro / Profilo metro	μm	Valore misurato (le) Limite Disegno
<i>Rt</i>	Altezza totale del profilo	Profilometro ottico / CMM	μm	Monitoraggio derivate di usura utensile

Il rugosimetro a tastatore geometrico applica un filtro elettronico di tipo gaussiano (passa-alto) regolato dalla norma ISO 16610-21 per separare la rugosità microscopica dall'ondulazione W e dall'errore di forma macroscopico F. L'algoritmo del sistema impedisce la sovrascrittura di questi parametri, obbligando l'operatore a inserire la matricola del rugosimetro tarato prima di convalidare la conformità del pezzo.

2.6 Analisi statistica della capacità dei sistemi di misura (Gage R&R- Repeatability and Reproducibility)

In conformità con le direttive del Quality 4.0, la validità dei dati immessi nelle carte di controllo SPC e nella dashboard aziendale è subordinata alla validazione preliminare del sistema di misura stesso. Un processo produttivo non può essere monitorato se la variabilità indotta dallo strumento e dall'operatore altera la reale variabilità della macchina utensile. A tale scopo, la metodologia impone l'esecuzione periodica di studi Gage R&R (Repeatability and Reproducibility) secondo le linee guida internazionali del manuale AIAG (Automotive Industry Action Group).

La variabilità totale osservata è modellata come la somma della variabilità intrinseca del processo produttivo e della variabilità del sistema di misura, denominata Measurement System Analysis:

$$\sigma_{\text{tot}}^2 = \sigma_{\text{part}}^2 + \sigma_{\text{MSA}}^2$$

A sua volta, il vettore d'errore del sistema di misura σ_{MSA}^2 (o variazione del Gage, σ_{GRR}^2) viene scisso in due componenti indipendenti, che descrivono i limiti fisici dell'ispezione:

1. Ripetibilità (σ_{EV}^2 – Equipment Variation): Esprime la variabilità interna dello strumento quando viene utilizzato ripetutamente dallo stesso operatore sullo stesso identico componente.
2. Riproducibilità (σ_{AV}^2 – Appraiser Variation): Rappresenta la variabilità indotta dalla differenza metodologica, di sensibilità o di azzeramento tra operatori differenti che misurano il medesimo particolare.

L'equazione di composizione delle varianze per lo studio Gage R&R si articola come segue:

$$\sigma_{\text{GRR}} = \sqrt{\sigma_{\text{EV}}^2 + \sigma_{\text{AV}}^2}$$

La determinazione quantitativa dell'indice percentuale del Gage R&R rispetto alla tolleranza totale prescritta dal disegno costituisce il criterio ingegneristico per decretare l'accettabilità del sistema ispettivo all'interno del Quality Hub:

$$\% \text{GRR} = \left(\frac{6 \cdot \sigma_{\text{GRR}}}{USL - LSL} \right) \cdot 100$$

L'interpretazione metrologica dell'indice segue tre soglie decisionali rigide:

- Il sistema di misura è totalmente accettabile; l'incertezza del dispositivo non influisce sulle decisioni di conformità.
- Il sistema è provvisoriamente accettabile in base alla criticità della quota, ma richiede interventi di ottimizzazione o formazione degli operatori.
- Il sistema di misura è in genere rifiutato e non idoneo. Il software blocca la generazione del report dimensionale finché lo strumento non viene ritarato o sostituito.

L'integrazione di queste routine statistiche nel foglio AI_SETUP assicura che ogni dato metrologico raccolto nel Quality Hub sia validato all'origine, eliminando la variabilità interpretativa e garantendo la solidità analitica dell'intero modello predittivo di stabilimento.

CAPITOLO 3: Architettura del Sistema Integrato Excel-ChatGPT (AI_SETUP)

3.1 Modellazione dei flussi informativi e specifiche dei requisiti funzionali (ISO 29148)

La transizione verso l'architettura digitale e integrata del Quality Hub (modello TO-BE) richiede lo sviluppo dei requisiti funzionali del sistema software, adottando la categorizzazione definita dallo standard internazionale ISO/IEC/IEEE 29148:2018 (Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering). L'attivazione del sistema informativo è subordinata alla ricezione del comando operativo espresso dall'input: ESEGUI AI_SETUP. L'immissione di tale token nel terminale vincola il software ad avviare un flusso di lavoro lineare, deterministico e non interrompibile, articolato su un'architettura comune a sette fogli di lavoro (Report Dimensionale, Dashboard Qualità, Instrument Register, AI_SETUP, REPORT_MAP, QUOTE_DB, COLOR_RULES).

Il sistema acquisisce il disegno PDF, esegue l'analisi testuale e invia le informazioni estratte alle API di OpenAI (ChatGPT). Il modello linguistico (GPT-4o) viene vincolato tramite tecniche di Structured Outputs a restituire una lista di dati perfettamente validati secondo uno schema JSON Schema tipizzato (REQ-FUN-001), eliminando i testi discorsivi e introducendo il vincolo di invarianza sintattica. La struttura dati del record JSON deve rispettare la seguente architettura di tipizzazione:

Schema JSON del record QuoteRecord

```
{  
  
  "$schema": "http://json-schema.org",  
  
  "title": "QuoteRecord",  
  
  "type": "object",
```

```

"properties": {

"id": {"type": "integer"},

"categoria": {"type": "string", "enum": ["DIAMETRO", "LINEARE", "DENTATURA",
"GEOMETRICA", "NOTA_TEC"]},

"dimensione_testo": {"type": "string"},

"valore_nominale": {"type": "number"},

"scostamento_superiore": {"type": "number"},

"scostamento_inferiore": {"type": "number"},

"datum_riferimento": {"type": "array", "items": {"type": "string"}},

"indice_confidenza": {"type": "number", "minimum": 0.0, "maximum": 1.0},

"pagina_sorgente": {"type": "integer"}

},

"required": ["id", "categoria", "dimensione_testo", "valore_nominale",
"indice_confidenza", "pagina_sorgente"]

}

```

I dati estratti e decodificati dal flusso di elaborazione JSON vengono inseriti mediante accodamento all'interno del foglio transazionale QUOTE_DB (REQ-FUN-002). Ciascuna voce informativa conserva intatta e inalterata la stringa testuale grezza originaria rilevata sulla tavola meccanica, al fine di garantire la totale tracciabilità della sorgente informativa ed evitare che un errore nei moduli di calcolo successivi corrompa permanentemente il dato storico primario.

Prima di autorizzare qualsiasi operazione di scrittura sul foglio operativo finale, il motore logico AI_SETUP intercetta i valori numerici memorizzati nei campi valore nominale,

scostamento superiore e scostamento inferiore, eseguendo un calcolo deterministico dei limiti di specifica secondo le equazioni fondamentali della metrologia lineare (REQ-FUN-003):

$USL = \text{valore nominale} + \text{scostamento superiore}$

$LSL = \text{valore nominale} + \text{scostamento inferiore}$

Il trasferimento dei dati dal database QUOTE_DB all'interfaccia di stampa avviene esclusivamente tramite la lettura dei riferimenti archiviati in REPORT_MAP (REQ-FUN-004). Il software ha il divieto di utilizzare coordinate fisiche di cella rigide cablate all'interno del codice (hard-coded); deve determinare dinamicamente la riga e la colonna di destinazione decodificando gli indirizzi di cella associati agli ID logici delle quote (es. D001 → B11, D11), garantendo la flessibilità del sistema rispetto alle diverse varianti geometriche del modello.

Il codice del programma è regolato da una White-list rigida che limita l'accesso modificabile alle sole celle esplicitamente mappate in REPORT_MAP (REQ-FUN-005). Tutti i campi dinamici legati alla produzione (Numero di lotto, operatore, macchina utensile) e le celle destinate alla metrologia applicata (Misure reali M1-M15, esito OK/NOK, note di collaudo e firma dell'operatore) devono essere mantenuti protetti e vuoti durante la fase di preparazione automatica. Il file generato assume lo stato di "bozza non approvata" e richiede tassativamente l'ispezione visiva e la convalida con firma del tecnico umano prima del rilascio definitivo in produzione.

AI_SETUP → QUOTE_DB (dati strutturati e verificati) e REPORT_MAP (matrice logica di mappatura)

3.2 Requisiti non funzionali e vincoli tecnologici su architetture Office Open XML

I requisiti non funzionali definiscono l'insieme di vincoli tecnologici, di sicurezza, di prestazione e di integrità strutturale che il sistema informativo deve soddisfare per operare in sicurezza all'interno dell'infrastruttura IT aziendale. L'azione di compilazione automatica eseguita dall'applicazione software deve avvenire in modalità interamente non distruttiva, operando direttamente sulla struttura file Office Open XML (OOXML) configurazione XML predefinita del file .xlsx (composta da fogli di stile XML riutilizzabili, tabelle di stringhe condivise e definizioni di relazioni d'area) senza passare attraverso l'interfaccia grafica applicativa.

Il file di output generato deve aprirsi senza sollevare eccezioni o errori software e deve preservare intatti i marchi di fabbrica, i loghi istituzionali Gambini Meccanica, i bordi di cella, i font originari, le celle unite, la formattazione condizionale centralizzata e le impostazioni delle aree di stampa attive per garantire la perfetta stampabilità del foglio.

La gestione degli oggetti grafici e delle immagini all'interno del modulo impone severi requisiti di visione artificiale ed elaborazione digitale. La miniatura inserita nel foglio *Report Dimensionale* deve configurarsi come un ritaglio reale e scalato del file PDF sorgente, corrispondente alla regione circostante la quota, escludendo qualsiasi forma di rigenerazione o interpretazione grafica artificiale. L'immagine deve essere inserita nella struttura OOXML del foglio preservando il rapporto d'aspetto originale (*aspect ratio*), ed essere confinata entro l'area grafica preconfigurata nel master (il cui posizionamento fisico varia tra l'intervallo A1:B2 e A1:B7 a seconda del modello selezionato), escludendo fenomeni di sovrapposizione visiva distruttiva sopra le celle dedicate all'anagrafica del componente.

La tracciabilità dell'automazione costituisce un requisito di sistema obbligatorio per soddisfare i criteri di verifica e conformità richiesti dai sistemi di gestione qualità industriali. Ogni file finale compilato dal sistema deve incorporare un blocco di metadati crittografici non alterabili contenente la versione esatta del registro delle regole applicato, la data e l'ora di generazione del file, l'identificativo del profilo operativo di estrazione (V3.1–V3.4) e

l'impronta digitale (algoritmo SHA-256) del disegno PDF sorgente. Questo livello di dettaglio assicura la totale tracciabilità del processo, permettendo all'ente qualità di ricostruire passo per passo la catena di custodia informativa e determinare con esattezza quale versione del motore logico abbia governato l'estrazione di una specifica riga di misura, garantendo l'integrità del dato contro tentativi di manomissione post-rilascio.

3.3 Analisi strutturale e confronto dei tre modelli master aziendali Gambini

L'interfaccia fisica e l'estensione geometrica del foglio Report Dimensionale si articolano su tre varianti grafiche distinte. Ciascuna configurazione è stata sviluppata per rispondere a specifici vincoli legati alla numerosità campionaria del lotto, al numero di quote presenti sulla tavola e alla necessità di localizzazione grafica della misura.

Tabella 3.1 – Confronto strutturale e geometrico dei tre modelli master aziendali Gambini.

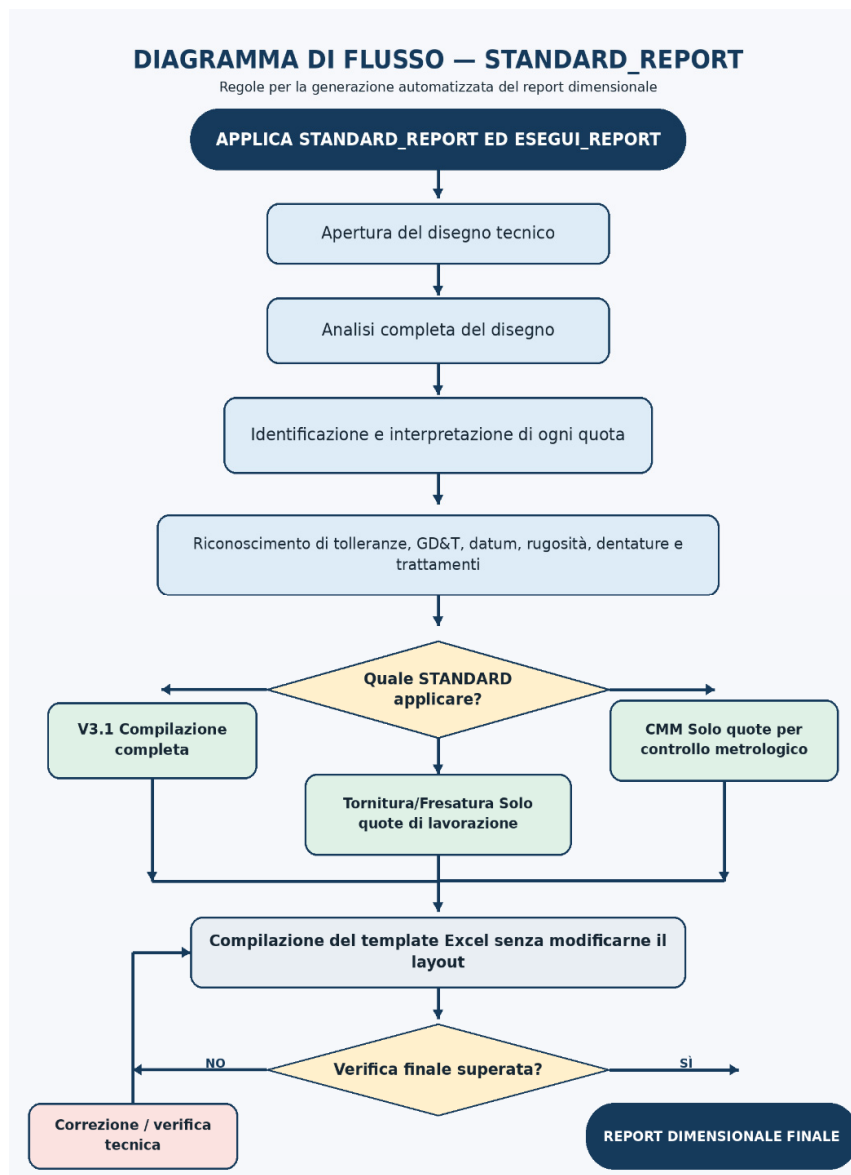
Denominazione File Excel	Area di Stampa Attiva	Colonne di Misura	Orientamento Layout e Target Industriale
REPORT_GAMBINI_ORIZZONTALE.xlsx	A1:V29	M.1 – M.15	Orizzontale; ottimizzato per elevata numerosità campionaria su poche caratteristiche.
REPORT_GAMBINI.xlsx	A1:Q71	M.1 – M.10	Verticale esteso; strutturato per accogliere disegni complessi con elevato numero di quote.
REPORT_GAMBINI_2.xlsx	A1:Q38	M.1 – M.10	Verticale compatto; integra un'area grafica superiore per miniature reali del PDF.

- Il Modello Orizzontale (A1:V29): Massimizza l'estensione delle colonne di misura (fino a 15 repliche per singola riga), riducendo lo spazio verticale a disposizione per l'elenco delle quote. Presenta il logo aziendale Gambini in testata ed è impiegato per produzioni di serie ad alta numerosità di campionamento.

- Il Modello Verticale Esteso (A1:Q71): Riduce il numero di misure per riga (ridotte a 10) per estendere la capacità verticale fino a oltre 60 righe utili di caratteristiche. Integra il logo aziendale Gambini in testata ed è destinato a particolari multi-quota oppure a progetti nei quali la presenza delle specifiche geometriche è elevata e complessa. Questo template viene utilizzato solitamente per lo standard report V3.1.

- Il Modello Verticale Compatto (A1:Q38): È caratterizzato sempre dalla presenza del logo aziendale in testata, destinato ad essere utilizzato per tutti quei disegni in cui si ha una presenza limitata di quotatura e di altre specifiche tecniche all'interno del disegno. Questa configurazione detiene sempre un numero di rilievi per riga pari a 10 come nel

[illegible]



3.4 Casi applicativi industriali e mappatura tecnica

Al fine di dimostrare l'accuratezza metrologica e l'affidabilità del modello digitale sviluppato, il sistema è stato sottoposto a validazione sistematica attraverso lo studio di due componenti meccanici reali rappresentativi della produzione di alta precisione di Gambini Meccanica.

3.4.1 Caso applicativo Gambini 50-5 – PINION M16 Z11

Il primo caso studio considera un pignone a ingranaggi cilindrici, codice aziendale 50-5, descritto formalmente come PINION M16 Z11. Il componente è realizzato in acciaio legato

da cementazione 18NiCrMo5, sottoposto a ciclo di finitura rettificata ("Ground") di classe di qualità IT 7. La complessità metrologica del pezzo deriva dall'insieme di una dentatura esterna di grandi dimensioni (Modulo 16) e di una scanalatura interna speciale.

Tabella 3.2 – Parametri metrologici strutturati ed evidenze reali del componente Gambini 50-5.

Sistema Meccanico	Parametro Geometrico	Valore d'Origine Estratto	Evidenza e Stato nel Database QUOTE_DB
Dentatura Esterna	Modulo dell'ingranaggio	16	Presente; stoccato in area geometrica dedicata.
Dentatura Esterna	Numero di denti (Z)	11	Presente; associato alla feature esterna.
Dentatura Esterna	Angolo di pressione (alpha) / elica (beta)	20° / 0°	Presente; parametri di moto rettilineo.
Dentatura Esterna	Coefficiente di correzione del profilo (x)	+0,5	Presente; spostamento del profilo nominale.
Dentatura Esterna	Spessore cordale su due denti (W2)	78,788 mm (-0,095 / -0,142)	Presente; tolleranza asimmetrica negativa.
Scanalatura Interna	Profilo scanalato normato	DIN 5482 100×94 8H	Presente; accoppiamento internazionale.
Scanalatura Interna	Numero di scanalature / Modulo / (alpha)	Z=44 / m=2,25 / 30°	Presente; parametri interni disaccoppiati.
Scanalatura Interna	Misura su rullini o perni calibrati	Ø4 mm (90,16 – 90,24 mm)	Presente; intervallo limite esplicito.

Il motore logico AI_SETUP esegue l'isolamento dei parametri della dentatura esterna e della scanalatura interna, associando le voci a identificativi di feature separati per evitare che le tolleranze di spessore dente vengano confuse o sovrapposte durante la scrittura automatica. Le tolleranze geometriche aggiuntive, comprendenti un parallelismo di 0,05 ed un'oscillazione totale di 0,012, vengono legate al rispettivo riferimento A sulla stessa riga, lasciando vuoti i campi metrologici a bordo macchina.

Il funzionamento pratico e l'efficacia di questo tipo di struttura univoca di sicurezza vengono dimostrati analizzando la risoluzione dei quattro conflitti documentali reali individuati durante i test:

- Risoluzione del conflitto 1 (Destinazione della colonna Note): Le specifiche di riferimento indicavano che la colonna Note del report operativo dovesse rimanere vuota in fase di preparazione; un documento tecnico locale stabilisce invece l'inserimento in tale cella dei dati relativi a trattamenti e durezza. Applicando la gerarchia di Livello 2 e 3, il sistema centralizza le informazioni di trattamento all'interno della colonna Dimensione creando una riga logica aggiuntiva dedicata alla feature (es. Nitrurazione 350-450 HV0,5), mantenendo la colonna Note protetta e vuota per le sole osservazioni del collaudatore.
- Risoluzione del conflitto 2 (Regole cromatiche Testo vs Sfondo): Si riscontrava un annullamento vettoriale del colore nelle prime iterazioni, dove gli stessi codici (verde, giallo, rosso) venivano sovrascritti sia per l'ampiezza delle tolleranze dimensionali sia per indicare le classi metrologiche CMM. Il foglio COLOR_RULES isola la grafica: la colorazione del solo testo è vincolata ai profili dimensionali (V3.1/V3.2), mentre la colorazione dello sfondo della cella è legata ai profili di processo (V3.3/V3.4), caricando un unico insieme di termini di riferimento per ciclo di esecuzione.
- Risoluzione del conflitto 3 (Incoerenza geometrico-matematica sul diametro f8 del caso 4.392333.X): L'analisi delle sintesi documentali della vite senza fine ha rilevato una grave anomalia di inversione del segno algebrico. Per la quota nominale Ø35 con classe di accoppiamento f8 (scostamenti standard -0,025 / -0,064), una tabella di sintesi precedente riportava scorrettamente limiti di specifica pari a 34,936 – 35,025 mm. Il limite massimo indicato (35,025) risultava geometricamente discordante con un nominale di 35 associato a uno scostamento superiore negativo, violando i principi di base della metrologia. Il verificatore predefinito integrato nel modulo AI_SETUP esegue il calcolo preventivo dei limiti e, rilevando la mancata corrispondenza (35,025

≠ 34,975), interrompe la compilazione attivando il blocco operativo di sicurezza per scostamento dei dati, impedendo l'esportazione di un report errato.

- Risoluzione del conflitto 4 (Mappatura anagrafica di testata): Difformità sistematica nei file aziendali relativi alla posizione spaziale del marchio Gambini e dei blocchi di firma, mappati alternativamente nelle aree A1:B2 e A1:B7. Il sistema applica la gerarchia di Livello 2, rimuovendo le coordinate fisse dal codice software: l'applicazione consulta dinamicamente il foglio REPORT_MAP associato alla revisione del modello corrente, mantenendo l'integrità del layout OOXML originario senza corrompere i fogli della dashboard o del registro strumenti.

3.6 Validazione sperimentale del sistema

L'efficacia di un sistema di automazione e digitalizzazione documentale non può fondarsi soltanto sulla precisione del software, ma richiederà una verifica sperimentale in modo da dimostrarne poi la sua affidabilità e correttezza, così renderlo utilizzabile in un contesto industriale reale. Per questo motivo, al termine dello sviluppo del prototipo è stata condotta una campagna di validazione finalizzata a misurare le prestazioni del sistema sotto il profilo dell'efficienza operativa, dell'accuratezza nell'estrazione delle informazioni e della flessibilità nei confronti di differenti tipologie di disegno tecnico.

3.6.1 Metodologia di validazione e risultati sperimentali

La sperimentazione è stata effettuata mediante l'utilizzo di disegni meccanici come ad esempio ingranaggi, cremagliere, ed alberi dotati di quotature, tolleranze dimensionali e geometriche, rugosità, trattamenti termici, e indici di qualità, con lo scopo di osservare il comportamento del sistema nelle varie condizioni operative ed anche verificare la capacità del sistema di ridurre il tempo necessario alla preparazione del report dimensionale.

La procedura di validazione è stata sviluppata confrontando il documento generato automaticamente con il corrispondente disegno tecnico originale, verificando la corretta associazione delle caratteristiche dimensionali, il mantenimento della struttura del file Excel e la precisione alle regole definite nel sistema AI_SETUP.

L'analisi ha evidenziato come il sistema sia in grado di automatizzare in modo affidabile le attività ripetitive di preparazione del report, riducendo così il lavoro manuale richiesto

all'operatore e garantendo una maggiore uniformità nella compilazione della documentazione tecnica.

3.6.2 Discussione dei risultati e limiti del sistema

Durante lo sviluppo purtroppo si sono riscontrate spesso problematiche dovute alla qualità della documentazione fornita ed alle caratteristiche dei modelli linguistici. Infatti, le prestazioni migliori sono state ottenute con disegni tecnici caratterizzati da buona qualità grafica, simbologia coerente con gli standard ISO GPS e corretta organizzazione delle informazioni. Al contrario, la presenza di quote ravvicinate, scansioni PDF di bassa qualità, simboli geometrici complessi o annotazioni non conformi può rendere più difficile l'interpretazione automatica del documento.

Per questo motivo il sistema è stato progettato secondo il paradigma Human-in-the-Loop, nel quale l'intelligenza artificiale svolge solamente un ruolo di supporto alla compilazione del report, mentre la verifica finale rimane sempre compito al tecnico del controllo qualità.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Bilancio ingegneristico dei risultati conseguiti

L'attività di ricerca, modellazione e progettazione sviluppata nel presente lavoro di tesi, focalizzata sulla "Progettazione di un sistema integrato Excel-ChatGPT per l'automazione della documentazione di controllo dimensionale" in collaborazione con Gambini Meccanica, ha dimostrato la fattibilità tecnica e l'efficacia operativa della metodologia STANDARD_REPORT, supportata dal sistema informatico di AI_SETUP. L'integrazione

di un modello linguistico e di visione avanzato (GPT-4o) all'interno dell'ambiente software di Microsoft Excel ha permesso di risolvere alla base tutte le problematiche legate al trasferimento manuale delle specifiche geometriche e dimensionali dalle tavole PDF ai fogli operativi di reparto.

La validazione sperimentale del progetto, condotta su una serie di diciassette disegni tecnici per complessive ventuno pagine operative, ha confermato una coerenza architettuale del 100% tra i modelli operativi generati. Il sistema ha dimostrato una stabilità assoluta nella preservazione delle strutture Office Open XML (OOXML) originarie dei file master (formule native, celle unite, formattazioni condizionali, loghi e impostazioni dell'area di stampa attiva), azzerando qualsiasi fenomeno degradazione del codice binario.

Dal punto di vista dell'accuratezza algebrica, la creazione di un programma che controlli in modo sicuro la correttezza del codice, ha consentito l'identificazione e il blocco istantaneo di incongruenze e inversioni di segno algebrico (come riscontrato nel caso critico della vite senza fine codice 4.392333.X), impedendo l'esportazione in officina di tolleranze errate che avrebbero indotto errori metrologici di tipo II (rischio del consumatore).

Valutazione dei benefici in ottica di sostenibilità industriale

I risultati misurati sul campo evidenziano un aumento del tempo medio di setup e formattazione del report dimensionale pari a circa il 70% rispetto al flusso di lavoro manuale tradizionale (modello AS-IS). Questo incremento di efficienza informativa si traduce in un beneficio diretto secondo i modelli del Quality 4.0 e dell'Industry 5.0: il personale tecnico viene interamente sollevato dall'attività di inserimento dati ripetitivi e a basso valore aggiunto, potendo reinserire le proprie ore lavorative verso mansioni metrologiche pure, quali l'ottimizzazione delle strategie di tastatura sulle macchine di misura a coordinate (CMM) e l'analisi predittiva delle variazioni casuali tramite i grafici di controllo statistico di processo (SPC).

In termini di sostenibilità ambientale ed economica, coerentemente con i requisiti integrati delle norme ISO 9001:2015 e ISO 14001:2026, il sistema opera come un meccanismo di protezione

attiva degli sprechi di stabilimento. L'azzeramento degli errori informativi all'origine riduce l'insorgenza di non conformità geometriche e dimensionali nascoste durante le fasi di lavorazione CNC. Di conseguenza, si registra una contrazione diretta della massa netta di materiale metallico scartato (rottame) e l'eliminazione di cicli aggiuntivi di rilavorazione, traducendosi in un risparmio quantificabile dell'energia elettrica specifica di taglio cumulativa assorbita dai mandrini e dalle pompe di supporto ad alta pressione dei centri di lavoro. Il consolidamento del know-how metrologico all'interno del registro delle regole immutabile di AI_SETUP assicura infine la resilienza del sistema, rendendo l'azienda indipendente dalla variabilità di interpretazione individuale dei singoli operatori.

Benefici conseguiti: efficienza informativa (riduzione del tempo di preparazione); sostenibilità ambientale (riduzione di scarti e consumi CNC); modello sociotecnico Human-in-the-Loop (centralità della persona).

Limitazioni identificate e piano degli sviluppi futuri

Nonostante il successo operativo riscontrato nella fase di validazione preliminare, il lavoro ha evidenziato precise limitazioni che definiscono il piano degli sviluppi futuri del progetto. Le percentuali di accuratezza nell'estrazione dei testi e la stabilità dell'interpretazione logica da parte del modello AI sono strettamente vincolate alla qualità visiva e alla risoluzione grafica del PDF sorgente; tavole caratterizzate da scansioni alterate, scritte a mano o con elevata densità informativa richiedono un numero elevato di marcature "Da verificare", incrementando il tempo di intervento manuale successivo all'estrazione da parte del collaudatore. Inoltre, gli indici di capacità di processo (C_p e C_{pk}) e gli indicatori integrati ambientali necessitano di una campagna sperimentale su scala industriale per poter mettere in relazione, su un orizzonte temporale di lungo periodo, il risultato esatto tra i difetti informativi evitati e le risorse energetiche risparmiate nell'esperimento aziendale.

In una prospettiva di medio e lungo termine, l'evoluzione del sistema prevede la transizione dall'attuale struttura prototipale basata su file Excel locali verso un ecosistema informativo

centralizzato e distribuito, denominato Quality Hub. I database di stoccaggio QUOTE_DB verranno inseriti all'interno di un'infrastruttura di database relazionali (SQL Server) per consentire l'accesso multiutente simultaneo e garantire la sicurezza crittografica dei dati contro tentativi di alterazione.

L'interfaccia operativa destinata al management verrà ingegnerizzata tramite piattaforme di business intelligence (Microsoft Power BI), abilitando l'interconnessione automatica e bidirezionale tramite API con i sistemi Enterprise Resource Planning (ERP) per il recupero delle informazioni basiche dei materiali e con i sistemi Manufacturing Execution System (MES) per il tracciamento in tempo reale dei lotti di produzione. In questo modo, l'automazione della documentazione metrologica cesserà di essere un modulo indipendente per trasformarsi in un pilastro fondamentale della digitalizzazione e della transizione ecologica dello stabilimento.

BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI NORMATIVI

La bibliografia è organizzata per aree tematiche e comprende le norme tecniche, i riferimenti metrologici, le fonti istituzionali e la documentazione informatica utilizzate per definire il quadro teorico e progettuale del sistema.

Norme per la qualità, l'ambiente e la specificazione geometrica

International Organization for Standardization (ISO), ISO 9001:2015, Quality management systems — Requirements, Ginevra, 2015.

International Organization for Standardization (ISO), ISO 9001:2015/Amd 1:2024, Quality management systems — Requirements — Amendment 1: Climate action changes, Ginevra, 2024.

International Organization for Standardization (ISO), ISO 14001:2026, Environmental management systems — Requirements with guidance for use, Ginevra, 2026.

International Organization for Standardization (ISO), ISO 8015:2011, Geometrical product specifications (GPS) — Fundamentals — Concepts, principles and rules, Ginevra, 2011.

International Organization for Standardization (ISO), ISO 1101:2017, Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out, Ginevra, 2017.

International Organization for Standardization (ISO), ISO 286-1:2010, Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 1, Ginevra, 2010.

International Organization for Standardization (ISO), ISO 286-2:2010, Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 2, Ginevra, 2010.

International Organization for Standardization (ISO), ISO 14253-1:2017, Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 1, Ginevra, 2017.

International Organization for Standardization (ISO), ISO 21920-1:2021, Geometrical product specifications (GPS) — Surface texture: Profile — Part 1: Indication of surface texture, Ginevra, 2021.

International Organization for Standardization (ISO), ISO 16610-21:2011, Geometrical product specifications (GPS) — Filtration — Part 21: Linear profile filters, Ginevra, 2011.

Metrologia, incertezza e controllo statistico

Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, Sèvres, 2008.

Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), JCGM 200:2012, International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM), 3^a edizione, Sèvres, 2012.

National Institute of Standards and Technology (NIST) e SEMATECH, e-Handbook of Statistical Methods, sezione Measurement Process Characterization, Gaithersburg, aggiornamento 2012.

National Institute of Standards and Technology (NIST), Process or Product Monitoring and Control, sezione Process Capability, Engineering Statistics Handbook, Gaithersburg.

Automotive Industry Action Group (AIAG), Measurement Systems Analysis (MSA), 4ª edizione, Southfield, 2010.

Montgomery, D. C., Introduction to Statistical Quality Control, 8ª edizione, John Wiley & Sons, Hoboken, 2020.

De Feo, J. A., Juran's Quality Handbook: The Complete Guide to Performance Excellence, 7ª edizione, McGraw-Hill, New York, 2016.

Ingegneria dei requisiti, dati e automazione documentale

ISO/IEC/IEEE, ISO/IEC/IEEE 29148:2018, Systems and software engineering — Life cycle processes — Requirements engineering, Ginevra, 2018.

ECMA International, ECMA-376, Office Open XML File Formats, 5ª edizione, Ginevra, 2016.

Microsoft, Open XML SDK documentation, Microsoft Learn, <https://learn.microsoft.com/office/open-xml/>.

Python Software Foundation, Python 3 Documentation, <https://docs.python.org/3/>.

openpyxl Project, openpyxl documentation: A Python library to read/write Excel 2010 xlsx/xlsm files, <https://openpyxl.readthedocs.io/>.

JSON Schema Organization, JSON Schema Specification, <https://json-schema.org/specification>.

OpenAI, Structured Outputs, OpenAI API Documentation, <https://platform.openai.com/docs/guides/structured-outputs>.

OpenAI, GPT-4o System Card, OpenAI, San Francisco, 2024.

Quality 4.0, Industry 5.0 e sostenibilità industriale

European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry, Publications Office of the European Union, Lussemburgo, 2021.

European Commission, Industry 5.0: A Transformative Vision for Europe, Directorate-General for Research and Innovation, Bruxelles, 2022.

Radziwill, N. M., Quality 4.0: Let's Get Digital — The Many Ways the Fourth Industrial Revolution Is Reshaping the Way We Think About Quality, Quality Progress, vol. 51, n. 10, 2018.

Sony, M.; Antony, J.; Douglas, J. A., Essential ingredients for the implementation of Quality 4.0: A narrative review of literature and future directions for research, The TQM Journal, vol. 32, n. 4, 2020.

International Organization for Standardization (ISO), ISO 14000 family — Environmental management, <https://www.iso.org/standards/popular/iso-14000-family> (consultato il 21 luglio 2026).

International Organization for Standardization (ISO), Guidance on the requirements for documented information of ISO 9001:2015, Ginevra, 2015.

Documentazione tecnica e fonti aziendali

Gambini Meccanica, Disegno tecnico del pignone codice 50-5 — PINION M16 Z11, documentazione tecnica aziendale riservata.

Gambini Meccanica, Disegno tecnico della vite senza fine codice 4.392333.X — WORM SCREW, revisione 08A, documentazione tecnica aziendale riservata.

Gambini Meccanica, Modelli Excel del report dimensionale e registri STANDARD_REPORT/AI_SETUP, documentazione interna di progetto, 2026.