



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNARIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

Simulazione dei processi produttivi: applicazioni ai processi di controllo qualità

Simulation of production processes: applications to quality control procedures

Relatore:

Prof.ssa Sara Antomarioni

Tesi di Laurea di:

Francesco Corradini

A.A. 2023/2024

SOMMARIO

1.	INTRODUZIONE	3
2.	<i>Cos'è la simulazione, a che ambiti si applica e legame con l'industria 4.0</i>	5
	2.1 Storia della simulazione	5
	2.2 Simulazione moderna	7
	2.3 Applicazioni della simulazione	7
	2.4 Simulazione nell'industria 4.0	11
	2.5 Sfide e opportunità della simulazione nell'industria 4.0	12
	2.6 Applicazioni della simulazione nell'industria 4.0	13
	2.7 Tipologie di simulazione.....	14
3.	<i>Controllo qualità in ambiente manifatturiero: cos'è, quando si applica e come si lega al concetto di industria 4.0</i>	17
	3.1 Parentesi storica	17
	3.2 Fondamenti del controllo qualità	17
	3.3 Metodi e tecniche del controllo qualità.....	19
	3.4 ISO 9001	22
	3.5 Controllo qualità e industria 4.0	25
	3.6 Esempi concreti del controllo qualità in un'azienda manifatturiera	26
4.	<i>Software di simulazione</i>	28
	4.1 Procedimento di modellazione.....	28
	4.2 Applicazioni	29
	4.3 Anylogic	30
	4.4 Plant Simulation.....	33
	4.5 Simul8.....	35
	4.6 FlexSim	36
5.	<i>Analisi articoli scientifici</i>	38
	5.1 Simulazioni applicate al controllo qualità, con focus su quello dei prodotti	38
	5.2 Simulazioni applicate al controllo qualità dei processi produttivi	43
	5.3 Recap degli articoli.....	49
	Articoli analizzati:.....	49
6.	<i>Conclusioni</i>	53
7.	<i>BIBLIOGRAFIA</i>	55

1. INTRODUZIONE

Con il passare degli anni, il settore industriale si evolve sempre più velocemente grazie all'avvento di nuove tecnologie avanzate. Quest'ultime stanno permettendo in primis una rivoluzione dei cicli produttivi, ma anche di migliorare tutti i sistemi di gestione e di controllo qualità. Nuove tecnologie che si portano dietro diverse innovazioni moderne come l'automazione, l'intelligenza artificiale, il machine learning e soprattutto la simulazione dei processi produttivi.

Proprio quest'ultima si sta rivelando una risorsa fondamentale per qualunque azienda desideri ottimizzare le proprie operazioni e migliorare l'efficienza produttiva, riducendo inoltre i costi in modo da ottenere una maggior competitività su un mercato globale sempre più in evoluzione e piena di validi competitor.

Simulare un processo produttivo significa dar modo alle imprese di modellare digitalmente i propri cicli di lavorazione, avendo così tra le mani una rappresentazione dettagliata e dinamica di questi processi. In questo modo si possono prevedere con maggior precisione gli effetti della mutazione delle variabili chiave all'interno del ciclo, come ad esempio i parametri di produzione o addirittura di quelle che lo influenzano dall'esterno come la variabilità della domanda di mercato.

Il punto di forza di queste simulazioni è la capacità di testare e valutare diverse configurazioni e scenari, senza dover andare fisicamente a fare modifiche sulla linea produttiva, permettendo così di fare le dovute riflessioni e andare a lavorare nel pratico solamente quando si è sicuri della configurazione ottimale. Questo dà l'opportunità di ridurre al minimo i rischi legati ai costosi errori e inefficienze che potrebbero verificarsi nel corso reale della produzione.

Il principale obiettivo di questa tesi è analizzare in maniera approfondita l'utilizzo delle tecniche di simulazione, e relativi software, all'interno di industrie, per lo più manifatturiere, con un focus sull'applicazione di queste tecnologie per l'ottimizzazione dei processi di controllo qualità.

Controllo qualità che è una delle fasi più critiche all'interno della catena produttiva, poiché deve garantire che il prodotto finale soddisfi al cento per cento gli standard qualitativi predefiniti e quindi, le aspettative dei clienti.

Tradizionalmente, questa procedura veniva implementata come ultimo step della produzione, attraverso una serie di test e verifiche volte a garantire la conformità agli standard di riferimento. In questo modo però eventuali errori o difetti vengono scoperti solamente a fine fabbricazione, con conseguenti costi elevati legati alla rilavorazione o addirittura allo scarto.

A questo punto con l'arrivo della simulazione, è possibile utilizzare un altro approccio al controllo qualità, che permette alle aziende di integrare questo step già nelle prime fasi del processo produttivo. Grazie ad essa si eseguono analisi "what-if" in ambiente del tutto virtuale, che permettono di ricreare i diversi scenari produttivi e tutte le variabili del caso al fine di identificare i potenziali difetti e problemi di non conformità ancor prima che il prodotto venga realizzato.

Questo è un approccio proattivo, attraverso il quale si possono ridurre notevolmente gli errori legati alla produzione migliorando così la qualità finale del prodotto.

La tesi, pertanto, si pone come obiettivo primario quello di esplorare e analizzare dettagliatamente le diverse tecniche di simulazione applicabili ai processi produttivi, nello specifico al controllo qualità.

Allo stesso tempo mette un focus sulla situazione delle piccole e medie imprese (PMI), che rappresentano una componente significativa del tessuto industriale, andando a ricercare come esse possano trarre benefici da queste nuove tecnologie pur avendo dei budget ben più bassi rispetto alle grandi aziende. Spesso, infatti, le PMI affrontano sfide significative sia in termini economici che a livello di competenze tecniche, le quali sono un grande limite per l'implementazione di nuovi strumenti. Nonostante questo, l'utilizzo di strumenti di simulazione è in grado di fornire loro un'opportunità unica per essere più competitive sul mercato, ottimizzando l'uso delle risorse e garantendo una produzione di qualità, pur mantenendo dei costi operativi relativamente bassi.

Attraverso casi di studio con tanto di esempi pratici, la tesi dimostrerà come le PMI possano facilmente trarre beneficio dall'adozione di queste tecnologie.

A mio avviso l'importanza di questo studio non è solo rilevante per le aziende che desiderano essere sempre più competitive, ma anche per il mondo accademico, proprio perché la simulazione dei processi produttivi è un campo in continua evoluzione e offre continuamente nuove prospettive e soluzioni. Questo per dire come la ricerca accademica contribuisce in maniera significativa allo sviluppo di metodologie e strumenti innovativi anche in questo settore.

Come già accennato, lo studio propone spunti pratici e teorici volti a migliorare i processi aziendali in un contesto in rapida evoluzione; Infatti, verranno delineate alcune linee guida pratiche riguardanti l'implementazione di simulazioni nelle PMI, da cui si può fare una valutazione dei costi e dei benefici associati all'adozione di tali tecnologie.

L'obiettivo finale è quindi quello di fornire alle aziende strumenti concreti per ottimizzare la produzione e migliorare la qualità dei prodotti, garantendo al contempo una maggiore sostenibilità e competitività a lungo termine.

Nel capitolo 1 si parla in generale di tutto ciò che riguarda la simulazione e i legami con l'industria 4.0 senza entrare troppo nei dettagli, partendo dalla storia della simulazione fino alle varie applicazioni.

Nel capitolo 2 invece si entra più nello specifico analizzando il ruolo della simulazione nell'industria 4.0, comprese le sfide e opportunità del caso

Nel 3 al centro dell'attenzione c'è il controllo qualità; Si parte da una parentesi storica fino ad analizzare diversi particolari della ISO9001

Il capitolo 4 è dedicato ai vari software di simulazione comprese le loro applicazioni osservate dall'interno grazie a casi di studio concreti.

Nel capitolo 5 infine abbiamo un'attenta analisi di numerosi articoli scientifici che trattano nei particolari, diverse situazioni in cui l'uso della simulazione è stata utile al miglioramento dei processi produttivi, in particolare della fase del controllo qualità.

2. Cos'è la simulazione, a che ambiti si applica e legame con l'industria 4.0

Nel dizionario italiano la parola "simulazione" è indicata come atto, fatto di simulare, che nel linguaggio comune viene percepito come termine negativo, poiché per definizione è l'atto di fingere o imitare un comportamento. Tuttavia, nel linguaggio tecnico-scientifico, significa riprodurre il comportamento di un determinato sistema, processo o fenomeno al fine di studiarne il comportamento, le iterazioni e le conseguenze di determinate azioni o scenari.

È ovviamente uno strumento molto potente, utile all'uomo in moltissimi campi applicativi e quindi esprimibile in tipologie ben diverse tra loro, per via non solo delle circostanze ma anche dei mezzi utilizzati.

2.1 STORIA DELLA SIMULAZIONE

La nascita e lo sviluppo di sistemi di simulazione è strettamente legata al progresso della tecnologia, della scienza e della filosofia umana nel corso dei secoli. Ovviamente il concetto di simulazione moderna è emerso recentemente ma l'idea di rappresentare la realtà in modi artificiali risale a tempi più antichi.

Diversi sono gli esempi, a partire dalla *Macchina di Antikythera*, un meccanismo ad ingranaggi costruito nel I secolo a.C. con lo scopo di prevedere il moto dei pianeti.

Un altro è l'utilizzo dei modelli fisici per rappresentare sistemi astronomici come l'astrolabio, uno strumento nato nel II secolo a.C. attribuito a *Ipparco di Nicea*, uno dei massimi astronomi della storia. Alla base di questo strumento c'era il principio della proiezione stereografica utilizzata da Ipparco per costruire l'orologio anaforico, un dispositivo che indicava l'ora e le posizioni degli astri rispetto a una rete di coordinate. Già allora si era entrati in una mentalità per cui una simulazione della realtà poteva aiutarci a comprendere la realtà stessa e studiarla nelle varie sfaccettature.

Per continuare *Galileo Galilei* usava modelli matematici per la comprensione della realtà; infatti, lui stesso scrisse ne "Il saggiaiore": "Il libro della natura è scritto in lingua matematica".

Fino anche a modellini in miniatura utilizzati da molte civiltà antiche per raffigurare città e edifici a scopo militari in modo da capire più da vicino cosa sarebbe potuto accadere attaccando quest'ultima con diverse strategie.

Proseguendo nel corso della storia la simulazione ha trovato strada come strumento formativo soprattutto in ambito medico, ancor prima di quello riguardante l'aviazione e i simulatori di volo.

Nell'ottobre del 1759 la giovane *Angélique Le Boursier du Coudray* ottenne da *Luigi XV* un brevetto reale che la autorizzava a praticare come sage-femme errante, cioè partì per la Francia ad insegnare a migliaia di levatrici e giovani chirurghi l'arte del far partorire, con lo scopo di ridurre la mortalità di donne e neonati durante il parto. Il suo metodo di insegnamento risultò fin da subito molto efficace poiché messo a punto dalla propria esperienza ottenuta con l'ausilio della *machine*, una sorta di rappresentazione di stoffa e pelle che riproduceva fedelmente l'anatomia femminile. Questa machine permetteva alle allieve di osservare le varie presentazioni fetali, la posizione della placenta con i giri del cordone ombelicale e di esercitarsi nel rivolgimento fetale. Venne appunto

per la prima volta utilizzata una simulazione in ambito medico al fine di rendere meno rischiosa una situazione reale come quella del parto.

La vera pietra miliare però della simulazione sanitaria si fa risalire a *Peter Safar*, un anestesista nato a Vienna ma trasferitosi negli Stati Uniti che nel 1957 scrisse il manuale *ABC of resuscitation* in cui dimostrava l'efficacia della respirazione bocca a bocca nella rianimazione cardio-respiratoria utilizzata principalmente sulle persone annegate. Con lo scopo di istruire i suoi rianimatori esso si rivolse ad un giocattolaio norvegese per farsi costruire un manichino a cui poter praticare il bocca a bocca. Nacque così *ResusciAnne*, con le sembianze di una bellissima ragazza che era annegata nel 1900 nella Senna.

Come già anticipato, un altro dei primi strumenti di simulazione a scopo formativo fu introdotto nell'ambito dell'aviazione, nel 1926 infatti venne realizzato il primo simulatore di volo che permetteva di addestrare i piloti senza rischi e con un costo praticamente nullo, al di fuori del simulatore stesso.

Nel 1957 invece *Guy Orcutt* introdusse il termine "microsimulazione"; I modelli di microsimulazione hanno come oggetto di studio il comportamento di singole unità economiche, come individui o famiglie, le quali sono il risultato di indagini campionarie, basate su un campionamento trasversale condotto in un determinato istante temporale, considerando solo una porzione della popolazione che deve essere rappresentativa della totalità, rispetto a variabili rilevanti come, ad esempio, età, sesso e istruzione.

La tecnica e la metodologia di questa microsimulazione venne poi trasferita, nel decennio successivo, da *Denson e Miller* a ideare il primo paziente informatizzato per la soluzione di casi specifici al fine di acquisire la capacità di prendere decisioni cliniche.

Un altro strumento formativo della simulazione è la realtà virtuale, che ad oggi ha un significato molto ampio ovvero una simulazione della realtà che va da strumenti estremamente semplici per simulare l'esecuzione di procedure elementari, a dispositivi ad alta tecnologia digitale dotati di sensori per l'esecuzione di procedure più complesse o per immergere chi si esercita in ambienti del tutto creati digitalmente; Tuttavia il termine "realtà virtuale" venne utilizzato per la prima volta nel 1989 da *Jaron Lanier* nel suo programma chiamato "virtual programming languages".

È quindi evidente il successo storico della simulazione come strumento di apprendimento e non solo, ma andiamo a vedere nello specifico i motivi della sua efficacia.

Alla base c'è il concetto di apprendere dall'esperienza diretta e quello di apprendere in forma simbolica, attraverso il linguaggio.

La simulazione è, sotto certi aspetti, un terreno intermedio: si apprende dall'esperienza diretta in una realtà astratta, semplificata, in qualche modo simbolizzata.

Come l'apprendimento dall'esperienza diretta, anche la simulazione è un processo lento, perché consente l'errore e ne richiede un'elaborazione profonda e articolata. Al contrario, l'apprendimento simbolico può essere molto veloce.

2.2 SIMULAZIONE MODERNA

La simulazione è una tecnica che nell'ultimo decennio ha riscontrato un enorme interesse coinvolgendo gran parte delle discipline scientifiche. Questo perché le tecniche di simulazione consentono di acquisire, in tempi relativamente rapidi, informazioni (sia qualitative che quantitative) riguardanti un fenomeno osservabile. Per ottenere dati sul sistema, di solito si identificano le sue proprietà fondamentali, le quali vengono successivamente elaborate per creare un modello. Questo consente di rappresentare la realtà studiata attraverso formule e parametri, fornendo così una replica simulata del fenomeno in questione.

Sono quindi numerosi i vantaggi di questa particolare struttura, quali la riproducibilità del modello stesso, in quanto è stato trovato in maniera sperimentale e può essere controllato in modo diretto e aggiustato con l'avanzare dello studio; La riproducibilità delle situazioni che non sono sperimentabili in modo immediato; La rappresentazione dei sistemi complessi che tengono conto delle incertezze; L'estrazione di informazioni dai dati e la costruzione di scenari ipotetici agevolata, in quanto si può intervenire direttamente sui parametri, per modificarli a seconda dello scenario.

È però da sottolineare il fatto che essa fornisce solo indicazioni e non risposte esatte sul comportamento del sistema.

L'ampio utilizzo di questa tecnica è attribuibile alla sua versatilità in un'ampia gamma di contesti e allo sviluppo continuo dei sistemi di elaborazione. Quelli attuali infatti richiedono costi di gestione notevolmente ridotti grazie alla potenza sempre crescente dei calcolatori.

La simulazione risulta essere d'aiuto in diverse attività sperimentali in quanto permette di simulare ogni evento. Nel modello virtuale si riescono a studiare eventi che non si riescono a verificare direttamente nel mondo sperimentale, ma può accadere che quello che viene costruito può portare a delle criticità nei risultati: potrebbero sorgere delle divergenze tra i risultati ottenuti e quelli effettivi.

2.3 APPLICAZIONI DELLA SIMULAZIONE

Al giorno d'oggi le simulazioni trovano applicazioni in una vasta gamma di ambiti, dall'ingegneria alla medicina e oltre. Di seguito alcuni dei principali campi interessati:

- **Scienze naturali e fisiche:** in linea generale la simulazione è utilizzata per modellare e comprendere fenomeni come il clima, i processi geologici e la dinamica dei fluidi, mentre nei campi più che specifici di chimica e biologia è utilizzata per studiare le varie interazioni molecolari e cellulari.

Un esempio sono i modelli climatici che simulano il sistema climatico terrestre aiutando i meteorologi a comprendere al meglio i processi di quest'ultimo, di ricostruirne i cambiamenti avvenuti in passato nella storia della terra e di prevedere inoltre possibili sviluppi futuri.

Questi modelli sono complessi programmi informatici che simulano il sistema climatico terrestre sulla base di leggi scientifiche come la conservazione dell'energia, strettamente

legati ai modelli di previsione numerica del tempo, ma a differenza di questi si pongono domande differenti cercando di riprodurre i processi e le interazioni tra i singoli componenti del sistema climatico terrestre come atmosfera e oceani. Ci aiutano inoltre a quantificare l'influenza umana sul clima.

Nella pratica, per agevolare la modellazione del clima da parte dei climatologi, la terra viene suddivisa in una griglia tridimensionale la cui risoluzione orizzontale di ciascuna cella varia solitamente tra i 50 e i 150 km. Per ogni cella e intervallo di tempo vengono calcolate numerose variabili come temperature, velocità e direzione del vento, pressione atmosferica e umidità. Le leggi fisiche fondamentali vengono tradotte in molte migliaia di righe di codice informatico, ciò rende i modelli climatici tra i più complessi e ad alta intensità di calcolo oggi esistenti. Grazie alle attuali potenze dei computer, questi modelli ci permettono quindi di rappresentare un numero sempre crescente di processi fisici e di simulare ad esempio le interazioni tra i processi negli oceani e l'atmosfera.

- **Medicina e Scienze della Salute:** la simulazione in ambiente sanitario è una metodologia di formazione, come abbiamo visto in precedenza, antica e sempre all'avanguardia poiché viene sempre più utilizzata nell'addestramento chirurgico e altri campi medici. È anche ampiamente coinvolta nello studio di processi biologici e fisiologici, diffusione di malattie e nella valutazione dell'efficacia di trattamenti e farmaci.

Un articolo di Heuer "*Simulation-based Training Within Selected Allied Health Professions: una revisione sistematica delle Evidence-Systematic review (2022)*", ha evidenziato le grandi differenze che ci sono tra una preparazione svolta anche attraverso simulazioni e una senza, sottolineandone così l'importanza di un uso più rapido e diffuso. Questo articolo inquadra la simulazione da una prospettiva storica che secondo l'autore può facilitare la comprensione della sua importanza. Grazie anche a informazioni del genere, l'opposizione che inizialmente la simulazione aveva incontrato in ambito sanitario sta pian piano scomparendo, anche per merito dell'avanzamento tecnologico e metodi formativi avanzati che usufruiscono sempre più della realtà virtuale. La simulazione si sta quindi spostando verso modelli ibridi che integrano tutti questi strumenti con stanze ricostruite ad alta fedeltà grazie a software di realtà virtuale e realtà aumentata.

Oggi in Italia ci sono molteplici centri di simulazione che collaborano con ospedali e università, tra i quali il centro SIMNOVA di UPO a Novare, uno dei più all'avanguardia nel nostro paese che si presta a numerosi scenari di intervento, dai casi di emergenza a casi di gestione ospedaliera e casalinga di pazienti cronici.

- **Economia e finanza:** Utilizzata per modellare e analizzare i mercati finanziari, prevedere l'andamento dei prezzi e degli asset, valutare rischi e strategie di investimento, nonché per studiare l'impatto delle politiche economiche e finanziarie. Andiamo ad analizzare ad esempio una classica simulazione finanziaria, essa ha come scopo quello di migliorare l'attività di gestione del piano finanziario personale e soprattutto quello di minimizzare il rischio da parte degli investitori. Questa avviene attraverso l'utilizzo di appositi software progettati per supportare l'utente durante l'attività decisionale che, nello specifico,

prendono in carico l'attività manageriale prevedendo lo sviluppo di tutte le criticità riscontrate in relazione al capitale investito, attraverso un punto di vista economico/predittivo a lungo termine.

Esistono due tipi principali di simulatori:

- di valutazione: sono dei conti demo digitali che servono per acquisire confidenza con l'attività di trading online; perciò, permettono di utilizzare denaro virtuale per esercitarsi attraverso diverse simulazioni di transazioni finanziarie dimostrative con lo scopo di capirne il funzionamento valutandone il servizio a livello operativo.

- di apprendimento: software didattici per un'esperienza più tecnica e formativa. Questi simulatori svolgono letteralmente la funzione di calcolatori statistico/predittivi attraverso i quali si può sviluppare la gestione, in anteprima, dell'investimento, al fine di formare l'utente.

- **Trasporti e logistica:** utile per ottimizzare il flusso del traffico stradale e delle reti di trasporto, oltre allo studio del trasporto pubblico e sistemi di mobilità urbana.

La simulazione del traffico è un ottimo strumento per indagare su domande come: "come possiamo ridurre le emissioni legate al traffico?" oppure "come si può gestire il traffico in sicurezza?" o più semplicemente "come scelgo tra una rotatoria e un semaforo per garantire un buon flusso?".

Proprio per questo la simulazione, in particolare in questo campo, consente di utilizzare il budget e le risorse nella maniera più efficiente possibile, creando perciò una solida base per decisioni valide ed economiche, al fine di rendere il traffico e la mobilità sicuri e sostenibili.

Per la precisione una simulazione del traffico è una replica virtuale di scenari di traffico reali attraverso la quale i pianificatori possono modellare incroci e qualsiasi altra infrastruttura, dalle strade agli svincoli, così da poter definire più scenari "what if" per analizzare nei minimi dettagli ogni singola possibilità prima di implementarla nel mondo reale.

In questo ambiente è possibile suddividere la simulazione in tre diverse categorie, la prima tiene in considerazione solo i volumi di flusso di traffico aggregati, cioè non le singole autovetture, ovvero la simulazione macroscopica, la simulazione mesoscopica invece è basata sui singoli agenti il cui comportamento è dipendente da attributi del flusso di traffico aggregato (es. velocità, densità). Per ultima abbiamo la simulazione microscopica in cui lo stato complessivo del traffico è la risultante delle singole decisioni degli agenti.

In breve, per riassumere, la simulazione del traffico ha numerosi vantaggi poiché, fornisce una panoramica realistica e dettagliata, rileva gli hotspot di conflitto, anticipa gli effetti delle misure di traffico pianificate, permette di evitare errori costosi e migliora la comunicazione grazie ad una visualizzazione chiara.

- **Formazione e addestramento:** concetto generale che non comprende solo l'ambito medico già trattato ma anche personale militare, di volo e industriale consentendo di fornire esperienze pratiche in ambienti sicuri e controllati.

La simulazione addestrativa militare, ad esempio sta diventando sempre più importante per l'esercito italiano poiché permette di replicare in maniera fedele la realtà dei moderni

scenari operativi e di utilizzare le aree addestrative in forma eco-sostenibile, riducendo l'inquinamento acustico.

I vantaggi anche qui sono considerevoli tra cui quello del munizionamento, infatti la simulazione permette, secondo uno studio, un abbattimento del 25% annuo del munizionamento a fuoco, che oltre al risparmio economico permette anche una considerevole riduzione dell'impatto ambientale.

La simulazione rappresenta quindi un vero e proprio salto culturale di notevole spessore per i comandanti di unità che, grazie ad essa e il massivo impiego di strumenti all'avanguardia, possono testare la capacità operativa della propria unità, programmare, monitorare e valutare i progressi conseguiti, condurre un addestramento creativo e mai ripetitivo, valutare l'iniziativa dei comandanti e quindi l'applicazione del concetto di "mission command", e verificare in tempo reale gli errori commessi per un intervento puntuale ed efficace al fine di colmare con immediatezza eventuali gap capacitivi o conoscitivi.

Ovviamente l'addestramento non è solamente medico o militare, infatti, la simulazione ha numerosi impieghi anche nel mondo dei vigili del fuoco, ad esempio è stata creata una realtà aumentata in cui l'utente invece del joystick, ha tra le mani una lancia antincendio. In questo caso la persona che sta seguendo l'addestramento indossa alcuni dei principali accessori da pompieri, oltre ad un visore che mostra un oggetto virtuale che va in fiamme. Ovviamente non si tratta solo del fatto in sé di spegnere le fiamme ma consiste nell'apprendimento della procedura composta sia da comandi manuali per l'attivazione della lancia che dalle strategie da adottare per domare un incendio. L'operatore non addestra quindi solo la mira, ma regola la portata dell'acqua e capisce la distanza da mantenere dalle fiamme. Tutto ciò, nonostante sia una finzione, può risultare faticoso, e grazie alla fedele riproduzione di una situazione reale, aiuta l'operatore ad allenarsi in situazioni non ottimali e di stress psicofisico.

- **Ingegneria e industria:** La simulazione viene ampiamente utilizzata per progettare, analizzare e ottimizzare processi e sistemi complessi nell'ingegneria meccanica, civile, elettrica e edilizia.

È un campo, ovviamente, in continuo sviluppo, grazie anche ai progressi tecnologici, infatti l'implementazione dell'industria 4.0 ha un impatto significativo sulle qualità e possibilità offerte dalle simulazioni. Le nuove tecnologie e l'installazione di sensori all'interno delle fabbriche forniscono una vasta quantità di dati, notevolmente più precisi rispetto al passato. Ciò consente l'uso della simulazione in molteplici nuove applicazioni, migliorandone allo stesso tempo l'efficienza.

Il concetto dell'industria 4.0 rappresenta la quarta rivoluzione industriale, la prima è avvenuta con l'introduzione di impianti di produzione meccanica a partire dalla seconda metà del XVIII secolo. Dal 1870 in poi l'elettrificazione e la divisione del lavoro di Taylor hanno portato alla seconda, mentre la terza, anche chiamata "rivoluzione digitale", inizia attorno agli anni '70, quando l'elettronica avanzata e l'informatica hanno sviluppato ulteriormente l'automazione dei processi produttivi.

L'industria 4.0 è focalizzata sulla digitalizzazione e l'automazione dei processi produttivi, grazie alla convergenza tra tecnologie digitali e fisiche che porta a una produzione più intelligente, efficiente e personalizzata.

Al centro del suo funzionamento ci sono i dati, raccolti in tempo reale e utilizzati per ottimizzare ogni aspetto produttivo. Per fare ciò la connettività è fondamentale, infatti macchine, dispositivi e sistemi sono interconnessi e comunicano tra loro attraverso l'Internet of Things (IoT), mentre il cloud computing permette di archiviare e processare enormi quantità di dati, rendendone possibile l'analisi avanzata e la gestione in tempo reale. Tutte tecnologie all'avanguardia che permettono il funzionamento perfetto dell'intero ecosistema. Ovviamente anche la robotica avanzata e l'automazione giocano un ruolo fondamentale poiché permettono alle fabbriche di aumentare la produzione pur mantenendo standard di qualità elevati, così come la realtà aumentata e virtuale, le quali offrono infinite, e sempre nuove, modalità per formare il personale e monitorare i processi produttivi.

Allo stesso tempo, altre innovazioni come la cybersecurity consentono di tenere al sicuro i dati aziendali e i sistemi informatizzati utilizzati in questo tipo di industria.

Tutti elementi che aiutano a migliorare ogni aspetto dell'azienda promuovendone la crescita e la competitività sul mercato.

La transizione delle aziende al 4.0 è tutt'ora in atto (anche se molte sono già rivolte al 5.0) e questo è stato possibile anche grazie a dei fondi stanziati dal governo, poiché questo passaggio richiede un investimento importante in termini di risorse, macchinari e formazione del personale.

2.4 SIMULAZIONE NELL'INDUSTRIA 4.0

Per iniziare bisogna specificare che l'accuratezza dei dati è un elemento fondamentale per ottenere risultati affidabili dalla simulazione; pertanto, è importante condurre un'analisi approfondita per garantirne la validità.

La simulazione nell'industria ha le tre seguenti declinazioni:

- **System Dynamics:** ha una visione molto alta, studia aggregati di cose e permette di modellare il comportamento nel tempo di sistemi complessi.
- **Discrete Event:** consente di simulare eventi discreti che segnano un cambiamento di stato in un particolare istante di tempo, può essere mappato un evento di qualsiasi livello di dettaglio a seconda della conoscenza del processo.
- **Agent based:** simula i comportamenti degli agenti in grado di sentire cosa succede ad adattarsi come se fossero esseri umani. Ciascun oggetto segue una certa regola ma ognuno a modo suo con una intelligenza artificiale abbastanza evoluta.

Questi tre simulatori possono essere combinati o selezionati sul software a seconda delle esigenze, al fine di rappresentare le dinamiche che hanno impatto sull'azienda. In particolare, l'esterno è simulato attraverso System Dynamics poiché sono aggregati di cose non conosciute, l'interno

dell'azienda da Discrete Events, dal momento che tratta elementi conosciuti, mentre gli operatori sono simulati attraverso gli Agent based.

La simulazione consente anche di valutare l'impatto delle variazioni dei parametri sul modello, fornendo così un supporto per valutare gli effetti dei potenziali cambiamenti reali sul sistema. Il modello simulato diventa quindi un software personalizzabile che agisce su parametri specifici fino a quando non si verificano cambiamenti significativi nel modello stesso.

I software più avanzati hanno la capacità di ricevere direttamente input dai big data, tuttavia non dispongono dell'intelligenza per manipolarli. Pertanto, è necessario eseguire un'analisi preliminare dei dati per individuare eventuali relazioni funzionali che possano essere utilizzate nel modello. Successivamente, utilizzando questi dati, è possibile eseguire la simulazione per comprendere il comportamento del sistema al variare dei parametri.

2.5 SFIDE E OPPORTUNITÀ DELLA SIMULAZIONE NELL'INDUSTRIA 4.0

La prima sfida riguarda i sistemi produttivi, poiché con l'avvento dell'industria 4.0 stanno diventando sempre più complessi, con un numero crescente di componenti interconnessi, rendendone così più difficile una modellazione accurata nelle simulazioni.

Strettamente legata a questa c'è un'altra difficoltà da dover affrontare, ovvero l'integrazione di tecnologie avanzate sempre più all'avanguardia come l'Internet of Things (IoT), l'intelligenza artificiale e la realtà aumentata. Processo che può appunto risultare ben complesso, fino a richiedere competenze specializzate.

Allo stesso modo la gestione dei Big Data può rappresentare una sfida soprattutto in termini di privacy e sicurezza, infatti, l'industria 4.0 genera un'enorme quantità di dati da dover gestire e analizzare per alimentare i modelli di simulazione.

Infine, l'adattamento ai rapidi cambiamenti è probabilmente la parte più difficile da affrontare poiché essendo questa un'industria in continua e rapida evoluzione, le simulazioni devono essere in grado di adattarsi velocemente all'ambiente produttivo per poter fornire comunque previsioni accurate.

Per quanto riguarda le opportunità, facilmente intuibili anche dalle righe precedenti, iniziamo dalla più importante ovvero quella dell'ottimizzazione dei processi, infatti, indicandone inefficienze e simulando scenari alternativi permette di migliorare l'efficienza produttiva.

Un'altra è la progettazione e lo sviluppo dei nuovi prodotti, che permette di ridurre la necessità di una prototipazione fisica anticipandone così il time to market.

Allo stesso tempo la simulazione offre un ambiente sicuro e controllato per la formazione e l'addestramento, permettendo agli utenti di acquisire esperienze pratiche senza rischi.

Infine, anche la pianificazione della manutenzione è un'opportunità molto significativa perché grazie alla simulazione, è possibile pianificare e ottimizzare tutti gli interventi di manutenzione preventiva e predittiva, riducendo così i tempi di inattività degli impianti.

Come ovvio che sia, strettamente legate alle opportunità che offre la simulazione, abbiamo le sue applicazioni...

2.6 APPLICAZIONI DELLA SIMULAZIONE NELL'INDUSTRIA 4.0

La prima applicazione che vedremo è l'ottimizzazione dei processi produttivi e catene di approvvigionamento: il vantaggio della simulazione in questo ambito è quello di permettere all'azienda di esplorare e valutare diverse strategie di miglioramento senza dover apportare modifiche dirette in fase di studio.

Nello specifico essa permette di cogliere e analizzare diversi aspetti in una catena produttiva come ad esempio identificare le inefficienze, o anche tempi di attesa eccessivi, sovra utilizzo e sottoutilizzo delle risorse o ancora incoerenze nei flussi di lavoro. Allo stesso tempo permette di testare nuove strategie senza dover impegnare risorse significative quali, introduzione di nuove tecnologie o revisioni delle linee di produzione. Offre anche la possibilità di ottimizzare il layout, il che include la determinazione della posizione migliore per ogni macchina e per i materiali con lo scopo di ridurre i tempi di trasporto tra una stazione e l'altra riducendo così i probabili tempi di inutilizzo dei macchinari.

Un'altra applicazione è la gestione dell'inventario, effettuata analizzando diverse strategie, per arrivare a soluzioni ottimali sul livello ottimale di stoccaggio, politiche di rifornimento e sulla riduzione degli sprechi.

O ancora la previsione della domanda, consentendo così alle aziende di pianificare la produzione nella maniera più accurata possibile, così come i riordini di materie prime.

Diversi sono gli ambiti di implementazione della simulazione in questo settore e svariati ne sono gli esempi:

- **Migliorare la qualità nell'additive manufacturing:** grazie a software dedicati si è stati in grado di applicare tecniche avanzate per ottimizzare la definizione della forma, le modalità di taglio, la costruzione di supporti e la minimizzazione dei percorsi. Questo ha permesso di migliorare la qualità delle stampe 3D riducendone contemporaneamente il tempo di realizzazione e gli sprechi di materiale con una significativa riduzione dei costi.
- **Ridurre il consumo di energia in ambito siderurgico:** ciò viene fatto attraverso un'accurata modifica dei parametri di processo grazie alla simulazione, poiché essa permette di definire e controllare le condizioni di funzionamento di più componenti in modo da garantire portata e temperatura ottimali per i materiali semilavorati ottenuti dal processo di colata, riducendo così il consumo di energia e gli scarti.
- **Ottimizzazione delle linee robotizzate:** qui, grazie alla simulazione, si può ottenere un corretto dimensionamento degli impianti in base alle specifiche esigenze produttive. Ciò viene fatto valutando le diverse configurazioni dei componenti di una linea robotizzata per il packaging, al fine di ottimizzarne il funzionamento.

Un'altra branca applicativa è nella formazione di operatori e tecnici per la manutenzione: La simulazione oggi svolge un ruolo fondamentale nelle attività formative e nella gestione della manutenzione a distanza, fornendo un ambiente sicuro e controllato per l'apprendimento attraverso scenari realistici, come già abbiamo potuto apprendere in precedenza. Permette inoltre di individuare e risolvere potenziali problemi senza interrompere le normali attività operative. Ulteriore vantaggio è la sua capacità di adattarsi a una vasta gamma di condizioni, anche quelle

particolarmente difficili o pericolose, consentendo di sperimentare nuove tecnologie in un ambiente privo di rischi, prima di un'effettiva implementazione pratica.

Anche nello sviluppo e nell'innovazione è molto utile utilizzare la simulazione: oggi il percorso della modernizzazione è di tipo "bottom up", ovvero si cerca di migliorare la user experience del consumatore con conseguente spinta all'innovazione. La simulazione è ovviamente alla base di numerosi sforzi per ottenere miglioramenti progettuali ripetibili ed efficienti. La possibilità di condurre rapidamente analisi what-if e valutare alternative di design fornisce agli ingegneri informazioni cruciali sul comportamento del prodotto e facilita l'adozione di decisioni intelligenti. Tale flessibilità permette di esplorare diverse soluzioni a problemi riscontrati su nuovi prodotti o di testare agevolmente la fattibilità di nuove idee. Questi aspetti rivestono un'importanza particolare nelle prime fasi di sviluppo, quando le organizzazioni cercano di integrare le richieste dei clienti nelle specifiche dei prodotti. L'ottimizzazione del design e le analisi di sensitività, condotte attraverso la simulazione, fungono da guida verso soluzioni creative che potrebbero non essere immediate. Tutto ciò può essere realizzato prima ancora di testare il primo prototipo fisico. In molte aziende la simulazione viene eseguita separatamente alla progettazione, poiché gli ingegneri passano il progetto ad un analista numerico nelle fasi finali dello sviluppo del prodotto. Anticipando invece la simulazione alle fasi concettuali dello sviluppo del prodotto, si possono ridurre il time to market e i costi di sviluppo.

In conclusione, abbiamo visto come la simulazione, nell'ambito dell'industria 4.0, stia diventando sempre più importante grazie anche alle sue vastissime applicazioni, ampliate a innumerevoli ambiti, dalla formazione virtuale dei dipendenti, all'ottimizzazione dei processi produttivi. Ovviamente è uno strumento che continuerà a progredire insieme allo sviluppo tecnologico e l'implemento di, sempre più ottimizzati, software di simulazione, permettendo così uno studio più accurato dei dettagli durante la raccolta dati e una rappresentazione della realtà il più realistica possibile.

Ha inoltre numerosissimi vantaggi, oltre all'estrema utilità dell'ambiente industriale, come ad esempio il fatto che possa essere integrata con altre tecnologie digitali come l'internet of things, l'intelligenza artificiale e la realtà aumentata o ancora la sua flessibilità e abilità che permette alle aziende che la sfruttano di valutare rapidamente l'impatto di cambiamenti nell'ecosistema aziendale.

Proprio per questi motivi le prospettive future della simulazione sono più che promettenti, con previsioni di crescita esponenziali e un'adozione diffusa da parte delle aziende di tutti i settori. Così come ci si aspetta che essa diventi sempre più avanzata e accessibile, consentendo alle aziende di trarne ancora più vantaggi.

2.7 TIPOLOGIE DI SIMULAZIONE

Abbiamo diverse tipologie di simulazione, molte delle quali legate a contesti applicativi specifici come, ad esempio, in ambito scientifico la più tradizionale distinzione è quella legata alla logica di gestione del tempo e corrisponde a simulazione continua e simulazione ad eventi discreti. La prima

è caratterizzata da una logica continua del tempo, ancorché elaborata di norma tramite metodi numerici per integrare le equazioni differenziali che regolano le variabili del sistema; invece, nella seconda, il tempo evolve tramite eventi, come dice il nome, e tra questi lo stato delle variabili non ha rilevanza o è direttamente calcolabile. In questo caso, a volte si può anche impiegare una simulazione ibrida, o combinata, in cui le due logiche operano in modo combinato integrando numericamente le equazioni differenziali tra gli eventi per eliminare gran parte delle discontinuità.

Altre due tipologie ben contrastanti sono quelle deterministica e stocastica, differenziate in funzione del fatto che l'evoluzione delle variabili e degli eventi sia legata o meno a fenomeni affetti da stocasticità. Andando ad analizzarle nel particolare, una simulazione deterministica segue regole deterministiche appunto, predefinite, infatti ogni passo della simulazione è calcolato in base a equazioni matematiche o regole fissate, senza il coinvolgimento di elementi casuali. La simulazione stocastica invece incorpora nel modello casualità. Gli eventi futuri, quindi, sono determinati da probabilità o processi casuali; Pertanto, ogni esecuzione della simulazione potrebbe portare risultati leggermente diversi.

Riguardo il loro utilizzo, la simulazione deterministica è utilizzata per prevedere il comportamento del sistema in condizioni specifiche, poiché segue regole precise e i risultati sono determinati e riproducibili; Invece, quella stocastica è più adatta per l'analisi probabilistica dei sistemi, specialmente quando ci sono incertezze o variabilità nel comportamento del sistema, poiché fornisce distribuzioni di probabilità dei risultati invece dei risultati precisi.

Un'altra differenza sostanziale sta nella complessità dei moduli perché l'approccio deterministico richiede modelli semplici o sistemi con comportamenti ben regolamentati mentre in quello stocastico, si modellano sistemi complessi in cui sono presenti molte variabili casuali o incerte.

Allo stesso modo c'è differenza anche nelle risorse di calcolo poiché la simulazione deterministica richiede molte meno risorse computazionali poiché non c'è la necessità di analizzare numeri casuali.

Altri tipi di simulazione sono legati al rapporto tra il tempo reale e quello simulato, difatti abbiamo da una parte la simulazione real time, nella quale un minuto simulato corrisponde a un minuto nella realtà, dall'altra la simulazione fast time o slow time. Nella prima possiamo anche arrivare a simulare mesi o addirittura anni in poco tempo mentre nella seconda, serve più tempo per completare i calcoli di quanto ne trascorra effettivamente nella realtà.

Una simulazione ad agenti invece è un tipo di simulazione computazionale in cui un sistema complesso è rappresentato tramite l'interazione di singoli agenti autonomi. Questi agenti possono essere individui, gruppi o entità virtuali che hanno la capacità di percepire l'ambiente circostante, elaborare informazioni e prendere decisioni in base a regole predefinite o algoritmi.

Il suo utilizzo è per una vasta gamma di campi, tra cui scienze sociali, economia, ecologia, informatica, biologia e ingegneria. Possono essere usate per studiare fenomeni complessi o analizzare sistemi dinamici e per esplorare scenari futuri e testare ipotesi.

La sua implementazione avviene attraverso software specializzati che forniscono ambienti di sviluppo ottimali per la creazione, esecuzione e analisi delle simulazioni.

Abbiamo poi le simulazioni basate su modelli, che offrono un potente strumento per comprendere i sistemi complessi e prevederne il comportamento futuro attraverso l'utilizzo di modelli matematici o computazionali e l'esecuzione di simulazioni virtuali. Questi modelli sono progettati per rappresentare la dinamica di un sistema e le interazioni tra le sue componenti in modo da poter esplorare e comprendere meglio il comportamento complessivo del sistema.

Questa tipologia di simulazione viene impiegata soprattutto per studiare una vasta gamma di fenomeni come il cambiamento climatico, la diffusione di malattie, il traffico stradale e molto altro. I modelli matematici utilizzati possono essere a loro volta di diversi tipi: modelli basati su equazioni differenziali, reti neurali o algoritmi genetici.

3. Controllo qualità in ambiente manifatturiero: cos'è, quando si applica e come si lega al concetto di industria 4.0

Il controllo qualità è un elemento fondamentale in ogni processo manifatturiero.

È essenziale per garantire la conformità dei prodotti alle specifiche richieste del cliente e svolge un ruolo importante nella riduzione degli sprechi, nell'ottimizzazione dei processi e nel mantenimento dell'efficienza operativa.

Per esattezza il controllo qualità è il processo attraverso il quale vengono valutati i prodotti o i servizi al fine di garantire che soddisfino determinati standard di qualità. In ambiente manifatturiero soprattutto è indispensabile per identificare e correggere eventuali difetti o non conformità dei prodotti, permettendo così di avere la soddisfazione del cliente preservando l'integrità del marchio aziendale. È un processo che difatti, risulta determinante ai fini della competitività aziendale in un mercato sempre più ampio. Avere un cliente fedele, soprattutto al giorno d'oggi, è l'obiettivo principale di ogni azienda poiché il consumatore, molto spesso, può facilmente avere accesso a una vasta gamma di alternative.

3.1 PARENTESI STORICA

Il concetto di controllo qualità ha assunto un certo rilievo solo nel secolo scorso nonostante esista praticamente da sempre. A seguito della rivoluzione industriale e della nascita della produzione di massa, ovvero a partire dagli anni Venti del '900, è diventato fondamentale verificare la qualità dei prodotti. È nata così una nuova disciplina di controllo che, data anche la maggior complessità dei processi produttivi, garantiva la qualità dei prodotti.

Intorno al 1950 poi, ha iniziato a diffondersi anche il concetto di garanzia di qualità, in particolar modo nelle industrie per cui la pubblica salute e sicurezza sono fondamentali.

3.2 FONDAMENTI DEL CONTROLLO QUALITÀ

Bisogna, ai fini di garantire una corretta gestione della qualità di progetto, comprendere le differenze tra assicurazione qualità (QA) e controllo qualità (QC)

L'assicurazione qualità ha finalità preventive, infatti il suo scopo è quello di assicurare che i processi di produzione rispettino gli standard qualitativi concordati con il cliente finale.

Il controllo qualità ha invece finalità ispettive, cioè controlla che il prodotto finale sia conforme alle specifiche e requisiti predefiniti.

Il controllo qualità precede inoltre la verifica d'ambito, in modo da creare le condizioni per la soddisfazione del cliente, un processo che consiste nella verifica della conformità delle specifiche dei prodotti svolta con il coinvolgimento del cliente finale.

Proprio per questo motivo è molto importante la gestione di questo ambito di progetto, svolta attraverso cinque processi, al fine di limitare l'insorgere di fenomeni come il "gold planning", ovvero

la tendenza di fare più di quanto stabilito inizialmente con la committenza, e lo “scope creep”, che invece è la tendenza a far slittare l’ambito a fronte di continue richieste di modifica dovute ad un’ambigua definizione del progetto.

I 5 processi pertanto sono: **Raccogliere i requisiti**, ovvero definire e documentare le esigenze degli stakeholder e l’output del progetto; **Definire l’ambito**: definire una descrizione dettagliata dei confini del progetto e delle specifiche del prodotto; **Creare la WBS**: costruire una descrizione strutturata del lavoro da svolgere; **Convalidare l’ambito**: definire e accettare le modalità di accettazione del prodotto e dei processi da parte della committenza interna ed esterna e predisporre la formalizzazione dei documenti di consegna; **Controllare l’ambito**: monitorare, durante lo svolgimento del progetto, lo stato di avanzamento e gestire eventuali richieste di modifica da apportare.

L’assicurazione di qualità invece opera in chiave preventiva predisponendo processi di produzione affidabili. Al project manager è richiesto di conoscere bene sia gli standard interni sia quelli del cliente, per poterli dichiarare nel piano della qualità.

Un efficiente controllo qualità in un’azienda non è assolutamente da sottovalutare perché permette a quest’ultima di avere molti vantaggi.

In primo luogo, garantisce una riduzione dei difetti e quindi degli sprechi. Questo perché trovando dei difetti nelle prime fasi del processo produttivo, si evitano costose rilavorazioni o sprechi di materiale. Secondo l’ASQ (American Society of Quality), le aziende possono arrivare a sostenere costi della qualità pari anche al 15/20% del fatturato ogni anno, mentre una percentuale ideale sarebbe un 10% delle proprie spese.

Il costo della qualità è definito come una metodologia che consente di determinare in che misura le risorse sono utilizzate per attività che impediscono la scarsa qualità, che valutano la qualità dei prodotti o dei servizi dell’azienda, e che derivano da guasti interni o esterni.

Nel dettaglio andiamo a vedere diverse voci di costo:

In primis abbiamo i **costi di stima**, associati alla valutazione da parte dei fornitori e dei clienti dei materiali, processi, prodotti e servizi acquistati per garantire che siano conformi alle specifiche. Questi possono includere il controllo del materiale in entrata, della configurazione del processo e dei prodotti rispetto a determinate specifiche, o ancora un audit di qualità, ovvero la conferma che il sistema di qualità funzioni correttamente e infine una valutazione dei fornitori.

Poi abbiamo i **costi del fallimento interno**, i quali sono sostenuti per rimediare ai difetti scoperti, prima che il prodotto venga consegnato al cliente. Si verificano quando i risultati del lavoro non raggiungono gli standard di qualità stabiliti. Possono includere rifiuti, ad esempio quando c’è stata un’esecuzione di un lavoro non necessario o quando il prodotto o materiale non può essere recuperato, una rilavorazione o una rettifica, quando riesco a recuperare il pezzo attraverso una lavorazione correttiva e infine un’analisi dei guasti per stabilire le cause del fallimento interno.

Al contrario, i **costi del fallimento esterno** entrano in gioco per rimediare ai difetti scoperti dal cliente, difatti si verificano quando prodotti che non raggiungono determinati standard di qualità vengono rilevati dal cliente stesso dopo la consegna. Questi costi sono sostenuti ad esempio per

riparazione e assistenza, non solo di prodotti restituiti ma anche sul campo, oppure richieste di garanzia. Possiamo anche avere costi relativi alla gestione e all'assistenza dei reclami dei clienti o ancora alla gestione e indagine dei prodotti ritirati tramite i resi, compresi i costi di trasporto.

Infine, i **costi della prevenzione** che, come dice il nome, vengono sostenuti per prevenire o evitare problemi di qualità. Sono ovviamente pianificati prima dell'effettiva operatività, infatti, sono associati alla progettazione, implementazione e mantenimento del sistema di gestione della qualità. Questi costi includono la pianificazione e l'assicurazione della qualità ovvero, la creazione di piani per la qualità, affidabilità, produzione e ispezione, e la creazione del sistema qualità, oltre allo sviluppo, preparazione e mantenimento dei programmi.

Tutto ciò per dire che i costi relativi alla qualità del prodotto possono rappresentare una voce importante nella gestione dei costi totali di un'azienda, poiché questi vanno dalla formazione del personale fino all'acquisto di strumenti all'avanguardia, passando per i costi di conformità del prodotto. Proprio per questo è importante saper controllare e dimensionare bene queste spese nell'ecosistema aziendale, al fine di impegnare le risorse in maniera efficiente.

3.3 METODI E TECNICHE DEL CONTROLLO QUALITÀ

Il più antico dei metodi è l'ispezione visiva, che è anche quello più semplice e non richiede alcun tipo di tecnologia avanzata. Esso, infatti, consiste nel rilevare i difetti utilizzando l'occhio nudo, per assicurarsi sia che i macchinari stiano funzionando correttamente, sia che i prodotti realizzati siano conformi alle specifiche. Queste ispezioni visive possono essere fatte di persona o da remoto, utilizzando immagini digitali.

Nonostante sia una tecnica che nasce in antichità, è ancora ampiamente utilizzata poiché è probabilmente il miglior metodo per rilevare difetti a livello superficiale.

Nel corso del tempo c'è stata un'evoluzione grazie soprattutto all'evoluzione tecnologia; Nell'era predigitale, agli ispettori veniva insegnato a identificare i difetti ad occhio nudo, o qualche volta con l'ausilio di semplici apparecchiature come la lente di ingrandimento.

Al giorno d'oggi invece le aziende raccolgono immagini digitali e video dei macchinari, dei prodotti realizzati e di altri aspetti delle operazioni fisiche per condurre ispezioni visive in tempo reale da un'ubicazione remota o in un secondo momento.

È sempre più utilizzata nel frattempo anche l'automazione dell'ispezione visiva, grazie all'ausilio dell'AI. Con questa tecnologia, anche chiamata ispezione visiva intelligente, le aziende possono condurre le ispezioni in maniera ben più rapida, più economica e in alcuni casi anche in maniera più accurata.

Da sottolineare è il fatto che questo metodo è un test non distruttivo (NDT), ovvero permette di valutare un sistema o un prodotto senza modificarlo in modo permanente. Appartengono a questa categoria i test di emissioni radiografici, ai raggi X, infrarossi ed ultrasuoni.

Per quanto riguarda l'implementazione di un processo del genere diciamo che ogni azienda ha le sue peculiarità ma, ci sono caratteristiche comuni nei flussi di lavoro di ispezione, quali

l'identificazione di apparecchiature, infrastrutture, materiali e prodotti che devono essere ispezionati, la definizione delle condizioni che attivano un'ispezione, la creazione di linee guida chiare in merito a cosa costituisce un difetto, lo stabilire la frequenza con cui eseguire tali ispezioni, la creazione di un mezzo per segnalare, documentare e affrontare i difetti e l'integrazione delle ispezioni visive nelle liste di controllo di manutenzione.

Una volta stabilito il processo, l'azienda può decidere di utilizzare diversi metodi ad esempio:

- **Campionamento casuale:** in questo caso si andranno a ispezionare prodotti selezionati in maniera arbitraria, in campo manifatturiero, direttamente sulla linea di produzione.
- **Campionamento manuale completo:** vengono controllati manualmente tutti i prodotti da una persona formata appositamente per svolgere questa funzione. È un lavoro faticoso e ripetitivo, perciò va accompagnato da politiche di sicurezza e una strumentazione appropriata.
- **Ispezione visiva a distanza (RVI):** come già accennato sopra, vengono utilizzate telecamere remote e droni in modo da osservare da lontano. L'ispezione può essere condotta in tempo reale oppure in un secondo momento se ci si trova in una zona in cui la connettività è un problema.
- **Ispezione visiva automatizzata:** i prodotti vengono ispezionati in tempo reale mediante telecamere, metodi di elaborazione delle immagini e algoritmi di machine learning.

I vantaggi dell'ispezione visiva come metodo di controllo sono numerosi, a partire dal risparmio; Prima si identificano i difetti, più le aziende possono ridurre i costi relativi alla rottamazione dei prodotti difettosi e identificare gli eventuali asset che hanno bisogno di una riparazione.

È inoltre una tecnica che permette all'operatore di agire in completa sicurezza e in estrema velocità poiché si tratta solamente di dover ispezionare visivamente il prodotto.

Un altro vantaggio è quello dell'accuratezza, in questo caso le ispezioni automatizzate risultano spesso più precise e ottimali rispetto a quelle a occhio nudo.

Un altro metodo invece è il controllo statistico di qualità, il quale consiste in una collezione di strumenti che sono fondamentali nelle attività finalizzate al miglioramento della qualità di prodotti e servizi, e ciò viene permesso attraverso l'analisi della loro variabilità. I metodi statistici, infatti, sono molto utili per confrontare diverse tipologie di materiali nello sviluppo e progettazione di un prodotto, misurare la capacità di un processo di produzione e ridurre la variabilità, verificarne i perfezionamenti e l'affidabilità.

Tutto ciò parte dal concetto di controllo statistico di un processo, che fundamentalmente è un insieme di strumenti essenziali per il problem solving, come ad esempio istogrammi, diagrammi di Pareto e di causa-effetto, schede di controllo, carte di controllo e test vari.

Per definizione, infatti, il controllo statistico di processo è una metodologia che, in riferimento ad una determinata attività, fa ricorso a tecniche statistiche al fine di definire, analizzare e verificare le condizioni che determinano la variabilità dell'oggetto in analisi.

Abbiamo poi infiniti test di laboratorio, strettamente correlati al controllo statistico di qualità che, nello specifico, ci permettono di verificare in ogni minimo aspetto la conformità del prodotto finale, grazie ad un'attenta analisi delle specifiche, assistito quasi sempre da un operatore sul campo.

Il fattore umano nel controllo qualità, specialmente in ambito manifatturiero è a dir poco fondamentale. Il controllo qualità è il tassello finale delle lavorazioni, e fa così da intermediario tra la creazione del prodotto e la consegna al cliente. Proprio per questo motivo ha un valore immenso, e poter contare su un operatore con esperienza, che conosce il prodotto da anni, è fondamentale. Grazie alla sensibilità maturata negli anni, esso può effettuare un controllo visivo e tattile molto accurato.

Ovviamente, in questo caso entra in gioco il fattore dell'errore umano, che è naturale ed è una cosa con cui ogni azienda deve convivere, proprio per questo è fondamentale una formazione più accurata possibile del personale, affinché si riduca al minimo la possibilità di errore, sia nel valutare personalmente la qualità di un prodotto, sia nel programmare un macchinario che lo faccia per noi.

Il nome con cui generalizziamo questo tipo di mansione è l'addetto al controllo qualità, presente in ogni azienda manifatturiera, che ha il compito di verificare che i prodotti rispettino gli standard qualitativi stabiliti, gestire la documentazione relativa alla qualità dei prodotti e organizzare e gestire i controlli di produzione.

Al responsabile del reparto qualità saranno infatti richieste competenze specifiche come, la conoscenza della gestione di sistemi della qualità, la capacità di definire procedure e strumenti di controllo, la conoscenza degli standard qualitativi e delle norme nazionali ed internazionali, l'analisi dei processi, la padronanza di nozioni riguardo al monitoraggio delle performance, oltre al possedere capacità personali comunicative, di problem solving e di attenzione verso i dettagli.

Le sue mansioni sono quelle di assicurarsi, grazie all'aiuto dei propri collaboratori, che tutte le materie prime, semilavorati e prodotti, all'arrivo in azienda rispettino le caratteristiche e i requisiti stabiliti dal reparto tecnico e dall'ufficio acquisti. A lui spetterà poi, il compito di definire delle procedure di controllo ben chiare, che includano anche le modalità e gli strumenti necessari per il controllo di ogni lotto in ingresso.

Dovrà anche, eseguire un monitoraggio continuativo sia degli indicatori di performance del reparto qualità, sia del livello qualitativo dei fornitori, al fine di poter intervenire tempestivamente con azioni correttive, qualora ci siano degli scostamenti di valori controllati non motivati ed improvvisi.

Sarà importante far collaborare simultaneamente questo reparto con quello di customer care, affinché possano essere allineati i reclami dei clienti con le non conformità o con gli aspetti riguardanti la qualità dei processi, per poter individuare lacune ed aree di miglioramento.

Il responsabile qualità dovrà inoltre, collaborare con il responsabile della produzione per verificare l'attuazione delle pratiche di controllo da parte degli operatori preposti.

Come ultima cosa, un suo compito sarà quello di redigere e revisionare il piano di qualità aziendale, nonché di interfacciarsi con gli ispettori certificatori di società esterne per controllare i processi della qualità aziendale.

Per ricoprire un ruolo del genere è necessario avere competenze specifiche, tra cui conoscere le normative e gli standard da applicare nelle fasi di controllo.

Uno standard è un documento, approvato da un ente riconosciuto, che fornisce regole, linee guida e le specifiche tecniche per lo svolgimento di alcune attività.

La conformità a uno standard si chiama “certificazione” ed assicura che le performance, che di solito sono variabili, diventino ripetibili. Molti di questi standard sono adottati dalle aziende su base volontaria, come la ISO 9001, altri invece sono obbligatori, ad esempio quelli su salute e sicurezza.

C'è differenza tra una norma e uno standard, infatti le norme sono documenti tecnici che stabiliscono linee guida, caratteristiche o criteri per attività o per i loro risultati, elaborati da enti di normazione riconosciuti che possono essere nazionali, regionali o internazionali come l'ISO (international organization for standardization). Queste norme generalmente sono volontarie e vengono adottate attraverso un consenso tra le parti interessate.

Hanno diverse caratteristiche come ad esempio: sono create da comitati di esperti e rappresentanti delle parti interessate; una volta pubblicate, diventano documenti di riferimento ufficiali per industrie e mercati. Infine, l'adozione di una norma è volontaria, a meno che non sia incorporata in un regolamento o legge.

Lo standard invece, è un termine che copre un campo più ampio, che può riferirsi a qualunque criterio adottato e utilizzato costantemente. Mentre una norma può diventare uno standard se ampiamente adottata, non tutti gli standard hanno origine da una norma ufficiale. Inoltre, uno standard può o meno avere un carattere ufficiale, a seconda di come viene adottato e riconosciuto nel settore di riferimento.

Le caratteristiche degli standard sono che spesso emergono dalla pratica comune e dall'accettazione generalizzata, non richiedono l'elaborazione formale attraverso un ente di normazione e possono evolversi più rapidamente in risposta alle dinamiche di mercato, in modo decisamente flessibile.

3.4 ISO 9001

È un riconoscimento globale che attesta l'efficacia dei sistemi di gestione per la qualità di un'organizzazione. Ovviamente pubblicata dalla ISO, stabilisce i requisiti per garantire la qualità dei prodotti o servizi erogati.

La sua origine risale al contesto post-bellico per migliorare le pratiche industriali, e oggi è un must per aziende che mirano all'eccellenza operativa. Essa aiuta a identificare e risolvere problemi di qualità, riducendo i costi e aumentando la soddisfazione del cliente.

Il nome completo della ISO 9001 è “Sistemi di gestione per la qualità – Requisiti” ed è la norma più popolare pubblicata dalla ISO che sviluppa gli standard richiesti dal mercato, attraverso il lavoro di esperti provenienti dai settori industriale, tecnico e commerciale.

Standard come questo sono stati creati per facilitare il commercio internazionale. Le organizzazioni, infatti, usano la ISO 9001 per dimostrare la capacità di lavorare bene, offrendo così ai clienti la garanzia che soddisferanno le loro aspettative e che sono impegnati nel miglioramento continuo.

Alla base della relazione tra cliente e fornitore c'è la fiducia e la sicurezza che garantirà un certo livello di qualità della fornitura, un prezzo e una data concordati. Quando tutto questo non avviene perché l'azienda ha accettato di assumersi un impegno che non aveva la capacità di soddisfare, o più banalmente perché non è stata in grado di gestire in maniera efficace, il danno alla reputazione aziendale è enorme. È proprio per evitare tutto questo che nasce la ISO 9001, poiché essa si compone di un insieme di criteri che, se soddisfatti dall'azienda, le consentiranno di dimostrare le proprie capacità e di dare ai clienti la piena fiducia che riusciranno a soddisfare le loro esigenze e aspettative.

Essa è quindi molto importante soprattutto per quei clienti che non hanno la possibilità di esaminare preventivamente prodotti e servizi in modo da poterne testare la qualità.

Un'altra utilità di questa certificazione è che può essere applicata a tutte le organizzazioni, indifferentemente dalla tipologia, dimensioni e prodotti o servizi forniti.

Come già accennato l'adozione della ISO 9001 è assolutamente volontaria, anche perché la ISO è un'organizzazione non governativa che non ha quindi, il potere di far rispettare l'implementazione degli standard che sviluppa. È più semplicemente una rete di organismi nazionali di normalizzazione che comprende rappresentanti di più di 150 paesi e ha come scopo quello di facilitare il coordinamento e l'unificazione internazionale degli standard industriali.

Gli standard internazionali convenuti sono progettati per essere applicati a specifiche categorie di prodotti e servizi, con l'intento di assicurare l'intercambiabilità, la compatibilità, l'interoperabilità, la sicurezza e l'efficienza. L'accettazione reciproca degli standard tra organizzazioni commerciali e nazioni promuove una maggiore fiducia e riduce la necessità di verificare sistematicamente che i fornitori abbiano consegnato prodotti o servizi conformi.

L'ISO 9001 è parte di una vasta famiglia di standard noti come ISO 9000, che rappresenta solamente un segmento di un vasto repertorio di quasi ventimila documenti normativi emessi dalla ISO per agevolare il commercio internazionale. In particolare, i documenti della famiglia ISO 9000 si concentrano su concetti legati alla gestione della qualità.

Per avere questo tipo di certificazione bisogna soddisfare una serie di requisiti e di seguito ne saranno riportati alcuni, in accordo con l'ultima revisione della ISO 9001 risalente al 2015.

- **Contesto dell'organizzazione:** tratta della comprensione dell'organizzazione e del suo contesto, delle parti interessate e delle loro esigenze, della determinazione del campo di applicazione del sistema di gestione della qualità e della gestione dei processi del sistema.
- **Leadership:** riguarda l'impegno della direzione, la politica della qualità, i ruoli organizzativi, la responsabilità e le autorità.
- **Pianificazione:** tratta delle azioni per affrontare i rischi e le opportunità, degli obiettivi della qualità e della pianificazione volta a raggiungerli, nonché della pianificazione dei cambiamenti.

- **Supporto:** parte della norma che copre le risorse necessarie, la competenza, la consapevolezza, la comunicazione e la gestione delle informazioni documentate.
- **Attività operative:** dettaglia i requisiti per la pianificazione e il controllo dei processi, la determinazione dei requisiti per prodotti e servizi, il controllo dei processi, prodotti e servizi forniti esternamente, la produzione e la fornitura del servizio e il rilascio dei prodotti serviti.
- **Valutazione delle prestazioni:** si concentra sul monitoraggio, misurazione, analisi e valutazione.
- **Miglioramento:** copre la parte relativa alle non conformità e alle azioni correttive oltre che al miglioramento continuo.

Un processo nell'ambito della ISO 9001 è un insieme di attività correlate e interagenti che trasforma gli input in output tramite attività che mirano ad aggiungere valore. È importante che ogni processo abbia obiettivi chiari, sia misurabile e miri al miglioramento continuo.

La gestione dei processi è uno dei principi chiave su cui si basa la certificazione, infatti, la prima fase che la caratterizza è l'identificazione di tutti i processi all'interno dell'organizzazione che influenzano la qualità. Mappare i processi, cioè identificarli e documentarli, aiuta a comprendere come si interconnettono e quali sono critici per la soddisfazione del cliente e per il rispetto degli standard di qualità. Dopo averli identificati, ogni processo deve essere gestito e controllato, ovvero bisogna stabilire obiettivi specifici per ogni processo in modo da focalizzare le risorse sugli aspetti critici che guidano l'efficienza e l'efficacia operativa, misurare le prestazioni tramite indicatori e implementare azioni correttive quando i processi non raggiungono gli obiettivi.

Nell'implementazione della ISO 9001 in un'azienda è fondamentale coinvolgere i dipendenti e i collaboratori perché, come ci spiega anche la norma, e come già ampiamente anticipato prima, le persone sono al centro del processo di gestione della qualità e chi è attivamente coinvolto nel suo processo di implementazione ha maggiori probabilità di accogliere i cambiamenti necessari e di contribuire positivamente al raggiungimento degli obiettivi di qualità dell'organizzazione.

Nonostante i molteplici vantaggi offerti, implementare il controllo qualità non è compito agevole. Come molti processi complessi, richiede un forte impegno da parte della dirigenza, una comunicazione efficace e costante impegno per il miglioramento. Nonostante la normativa offra un quadro strutturato per l'attuazione, non si può trascurare il ruolo fondamentale delle persone nella gestione della qualità. Sono proprio gli individui ad essere il primo baluardo nella garanzia della qualità dei prodotti e dei servizi e, pertanto, devono comprendere appieno l'importanza di mantenere standard elevati poiché, anche la più piccola deviazione potrebbe impattare sulla soddisfazione del cliente e sulla reputazione dell'organizzazione.

3.5 CONTROLLO QUALITÀ E INDUSTRIA 4.0

L'adozione di tecnologie sempre più innovative e l'ottimizzazione dei processi produttivi permettono al controllo qualità di integrarsi con il concetto di industria 4.0. Di seguito verranno riportati diversi modi attraverso i quali questa integrazione avviene in maniera sempre più significativa.

Iniziamo dalla sensoristica avanzata: l'industria 4.0 sfrutta sensori intelligenti per monitorare in tempo reale le condizioni di produzione e raccogliere dati sui prodotti. Attraverso questi dati si possono identificare anomalie e prevenire i difetti prima che si verifichino, migliorando così la qualità del prodotto finale.

Abbiamo poi l'Internet delle cose (IoT): grazie ad esso macchinari, attrezzature (come i sensori di cui si parlava prima) e prodotti possono essere connessi in una rete intelligente. Questo consente il monitoraggio da remoto e la raccolta dati in tempo reale, consentendo un controllo qualità più efficiente.

Per quanto riguarda invece l'analisi dei dati e intelligenza artificiale, esse consentono di estrarre informazioni significative dai dati di produzione e di identificare modelli e tendenze che possono influenzare la qualità del prodotto. Questo aiuta a ottimizzare i sistemi di produzione e a prevenire i difetti. Ad esempio, l'intelligenza artificiale può anche dare la possibilità di prevedere quando le apparecchiature e i macchinari si guasteranno o necessiteranno di manutenzione, in questo modo si possono prevenire problemi di qualità legati al malfunzionamento di una macchina.

Infine, ci sono i sistemi di visione artificiale: utilizzano telecamere e algoritmi per ispezionare i prodotti in maniera molto rapida e accurata, individuando così difetti e variazioni dalle specifiche. Ciò riduce la dipendenza dell'ispezione umana e migliora la coerenza del controllo di qualità.

In linea generale quindi, l'intelligenza artificiale è uno degli elementi più rilevanti nell'interazione tra controllo qualità e industria 4.0. Essa può andare a migliorare l'efficienza del controllo qualità soprattutto in ambito manifatturiero. In primo luogo, come in parte già visto, grazie ad algoritmi di apprendimento automatico, può essere addestrata a rilevare e classificare difetti sui prodotti e servendosi di sistemi di visione artificiale, possono esaminare immagini in tempo reale in modo da identificare anomalie in maniera molto rapida e con una precisione elevata, consentendo così interventi tempestivi per correggere le non conformità. Allo stesso modo, tramite sensori installati su macchinari e impianti di produzione, monitora costantemente le prestazioni dei processi.

L'AI può inoltre supportare il processo di feedback e miglioramento continuo, attraverso i quali, analizzando i dati di produzione, oltre a identificare tempestivamente le aree in cui sono necessari interventi, immagazzina queste informazioni e le utilizza per fornire preziose informazioni per l'ottimizzazione dei processi e la prevenzione di difetti futuri.

In sintesi, l'IA può rivoluzionare il controllo di qualità nell'ambito manifatturiero consentendo un monitoraggio più preciso, una diagnosi rapida dei difetti e una gestione proattiva dei processi di produzione. Questo porta a una riduzione dei difetti, a una maggiore efficienza operativa e, di conseguenza, a una migliore qualità complessiva dei prodotti manifatturieri.

3.6 ESEMPI CONCRETI DEL CONTROLLO QUALITÀ IN UN'AZIENDA MANIFATTURIERA

Un'azienda, famosa in tutto il mondo, a cui viene riconosciuto un ottimo controllo qualità è la Toyota Motor Corporation, grazie alla sua metodologia di produzione nota come Toyota production system (TPS) che incorpora il concetto di controllo di qualità, in ogni singola fase del processo produttivo.

Questo sistema si basa sui principi di eliminazione degli sprechi e miglioramento continuo; infatti, in questo caso ogni lavoratore è pienamente coinvolto nel controllo qualità, poiché continuamente incoraggiato a identificare modi per migliorare l'efficienza e la sicurezza sul posto di lavoro. Ciò racchiude la raccolta di feedback dai dipendenti e l'implementazione di progressive, piccole modifiche che, nel lungo termine, portano a miglioramenti significativi.

Per fare ciò Toyota utilizza il sistema di segnalazione Andon, che consente ai lavoratori di segnalare immediatamente situazioni anomale durante la produzione, in modo da permettere anche un intervento correttivo tempestivo.

Viene anche utilizzato un controllo statistico di processo, attraverso il quale monitorano e controllano la variabilità dei processi di produzione, grazie ad un'ampia raccolta dati sui processi.

Un esempio di un'azienda manifatturiera italiana con un ottimo controllo di qualità è Ferrari S.p.A., celebre produttore di automobili sportive di lusso. Uno dei segreti dietro al successo della Ferrari è l'elevato standard di qualità che impiega nel processo di produzione.

Adotta infatti, un approccio artigianale alla produzione, che permette un controllo di qualità dettagliato in ogni fase della costruzione. Ogni veicolo è assemblato manualmente da artigiani altamente qualificati, i quali possono individuare e correggere eventuali difetti con precisione. Anche qui infatti entra in gioco l'importanza di un personale altamente qualificato e quindi affidabile.

Allo stesso tempo stabilisce rigidi standard di produzione e di qualità per garantire che ogni veicolo soddisfi gli standard più elevati. Ogni componente è soggetto a rigorosi test e ispezioni per garantire la conformità alle specifiche sia tecniche che estetiche.

A supporto del processo artigianale, Ferrari utilizza tecnologie all'avanguardia per garantire la precisione nelle lavorazioni e la qualità dei suoi veicoli. Ciò include l'utilizzo di strumenti di progettazione assistita al computer (CAD) e sistemi di simulazione per sviluppare e testare i componenti, nonché sofisticati dispositivi di misurazione e test per verificare la qualità durante e dopo la produzione.

Una volta ottenuto il prodotto finito, ogni veicolo Ferrari è sottoposto a intensivi test su strada e in pista per verificare le prestazioni, la maneggevolezza e la durata. Questi test consentono di identificare eventuali difetti o problemi di qualità che potrebbero emergere solo in condizioni reali di guida.

Infine, Ferrari presta particolare attenzione al feedback dei clienti e offre un'assistenza post-vendita di alta qualità per garantire la soddisfazione del cliente a lungo termine. Ciò include la risoluzione rapida ed efficace di eventuali problemi di qualità che possano emergere dopo la consegna del veicolo.

Prendendo spunto da questo ultimo esempio, possiamo capire come la ricetta vincente per una produzione ottimale e un controllo qualità che lascia poco spazio agli errori è quella di creare il connubio perfetto tra macchine e uomo, da una parte l'intelligenza artificiale, in continuo sviluppo, e tutte le tecnologie più innovative che permettono di velocizzare molteplici processi rendendoli anche più comodi, mentre dall'altra l'occhio esperto dell'uomo che molte volte aiuta ad evitare errori che possono sfuggire al computer grazie all'esperienza maturata sul campo.

Al giorno d'oggi il tema dell'intelligenza artificiale e dell'IoT preoccupa molto in particolar modo nel campo industriale dove, sicuramente, toglierà migliaia di posti di lavoro, al punto che anche geni del settore come Elon Musk si sono opposti ad uno sviluppo così rapido e incontrollato.

Quest'ultimo ha espressamente dichiarato che bisogna regolamentarne l'utilizzo affinché essa sia vantaggiosa per l'uomo. Ciò a dimostrazione che la preoccupazione è di perdere il controllo e non poter più tornare indietro, incamminandosi così verso un futuro incerto senza la consapevolezza di dove si fermerà questo sviluppo.

Detto ciò, concentrandosi sul presente l'industria 4.0 ormai in via di conversione verso il 5.0 permette alle aziende di implementare benissimo il lavoro dell'uomo assistito da macchinari o in alcuni casi già in sostituzione ad esso. In particolar modo nell'ambito del controllo qualità, tecnologie e forza di lavoro umano coesistono perfettamente portando all'azienda solo vantaggi rispetto al singolo utilizzo di uno o l'altro.

4. Software di simulazione

Un software di simulazione è essenzialmente un programma che consente di riprodurre in modo assolutamente realistico un luogo, un oggetto materiale o una dinamica di eventi che nella vita reale non si sono ancora materializzati.

Il suo compito è aiutare a prevenire qualsiasi eventuale problema o complicazione che si possa ripercuotere sul cliente, ovvero sull'azienda che si è rivolta ai produttori del software.

Ad esempio, prendendo in analisi un'azienda manifatturiera, la necessità principale è quella di evitare che si verifichino guasti nei macchinari che verranno installati nella fabbrica o, in casi disperati, di conoscere esattamente quali mosse fare affinché il contrattempo non paralizzi l'intera produzione.

Il concetto su cui si basano il funzionamento e l'implementazione di un software di simulazione è la realizzazione di un modello 3D del soggetto che verrà sottoposto a simulazione. Questa, essendo la fase iniziale, è anche la più importante poiché è proprio la modellizzazione che garantisce il successo di questo tipo di procedura.

Ovviamente non esiste un procedimento standard di modellizzazione, e ciò è dovuto alla diversità dei soggetti e dei fenomeni da simulare, ma comunque si hanno dei denominatori sempre comuni come la raccolta dei dati input, ovvero tutte le informazioni che è necessario conoscere per realizzare un modello assolutamente perfetto.

4.1 PROCEDIMENTO DI MODELLAZIONE

In poche parole, quindi un software del genere procede alla progettazione del modello 3D elaborando i dati raccolti con algoritmi matematici. Infatti, una delle procedure più utilizzate è quella chiamata algoritmica, perché permette di modificare la progettazione in corso d'opera automatizzando determinati processi in base ai parametri inseriti. Sennò c'è un altro tipo di modellazione 3D, ovvero la scansione 3D, in cui uno scanner, qualunque sia la tecnologia, può essere usato per realizzare una copia digitale perfetta di un ambiente o di un macchinario, volendo anche in associazione con una modellazione algoritmica già esistente.

A seguito della fase di progettazione, il software può procedere con la simulazione vera e propria, che a sua volta può assumere diverse sfaccettature a seconda delle varie esigenze e richieste del cliente.

Generalmente il principio di ogni simulazione parte da una formula, che è rappresentata dall'espressione inglese "what if...", ovvero "e se...". Nel pratico, ci si pone una serie di interrogativi su cosa accadrebbe se si verificassero determinati eventi classificati spesso come contrattempi o complicazioni.

Andando più nel tecnico, quasi tutti i software di simulazione sono modellati sui sistemi a eventi discreti, si fa quindi riferimento al cambiamento di stato di un determinato sistema a causa di eventi discreti e dalle tempistiche non prevedibili. Un evento del genere potrebbe verificarsi in qualsiasi

momento o magari non verificarsi affatto; perciò, è fondamentale che il software tenga in considerazione l'intera casistica di eventualità possibili legate ad un determinato sistema.

Con il passare degli anni, le richieste di questi software di simulazione crescono a dismisura da parte delle aziende che vogliono cogliere l'opportunità di abolire un tradizionale prototipo fisico, sostituendolo con uno virtuale più efficace.

4.2 APPLICAZIONI

Notevole è il contributo dei software in diversi ambiti aziendali, come ad esempio il contributo alla sicurezza della sede lavorativa; esistono software di simulazione e-learning concepiti per simulare l'ambiente di un lavoratore, che in questo modo può ben assimilare i comportamenti da assumere in caso di eventi che lo possano mettere in pericolo come incendi o altre calamità naturali.

Un altro vantaggio è quello di limitare le spese, sia per la realizzazione di prototipi fisici che per il ritiro dal commercio di un prodotto difettoso, oltre a quelle per l'assunzione di un programmatore, poiché la maggior parte dei software sono concepiti appositamente per essere scritti in un linguaggio alla portata di chi non è esattamente un analista informatico.

Ancora, offrono il vantaggio di ridurre il time to market, fondamentale in un mercato così competitivo; non bisognerà più infatti sottostare alle tempistiche derivanti dalla preparazione del prototipo.

Così come danno la possibilità di risolvere problemi anche in condizioni di grave rischio, ad esempio il software Anylogic, che analizzerò in seguito, è specializzato nella simulazione di fenomeni di ordine sanitario come le curve epidemiologiche, che costituiscono una sicurezza in un momento storico che è stato caratterizzato dalla pandemia del Covid-19.

La scelta di un'azienda, verso una tipologia di software o un'altra è strettamente legata alle sue necessità primarie, affinché tragga il miglior vantaggio possibile da esso. Ovviamente un fattore che incide sulla scelta può essere il prezzo, in base al budget che l'azienda mette a disposizione si può optare per un software più efficiente o uno meno che però magari è più adatto alle necessità di quella determinata azienda.

In questa scelta incide anche la qualità del servizio assistenza, aspetto tutt'altro che trascurabile, poiché quasi sempre, in contesti come quelli della progettazione e della simulazione dei modelli, serve trovare una soluzione a un problema in pochi secondi.

Esistono numerosi software di simulazione, capaci di rispondere alle molteplici e varie necessità dei clienti.

4.3 ANYLOGIC

Uno ad esempio è Anylogic, la cui distribuzione è iniziata a partire dal 2000, un software orientato alla simulazione dei processi di business di un'infinità di settori, dalla sanità all'aeronautica.

AnyLogic offre la possibilità di creare modelli di simulazione utilizzando tre principali paradigmi: la simulazione ad eventi discreti o processo-centrico (DE), la Dinamica dei Sistemi (SD) e la simulazione agent based (AB).

La System Dynamics e la simulazione ad eventi discreti sono storici nel campo della simulazione, mentre l'approccio basato sugli agenti è più recente. La System Dynamics si basa su processi continui, mentre la simulazione ad eventi discreti e quella basata sugli agenti, lavorano principalmente con passi temporali discreti, saltando da un evento all'altro.

Questi approcci sono stati storicamente insegnati a categorie diverse di studenti universitari, con economisti che studiavano la System Dynamics e ingegneri che si concentravano sulla simulazione ad eventi discreti. Questo ha portato a due filosofie di pensiero separate e spesso non collaborative.

L'approccio basato sugli agenti è diventato un'opzione di simulazione applicata solo di recente, poiché la crescente complessità dei processi aziendali ha richiesto approcci combinati che affrontassero la complessità e le interdipendenze dei sistemi.

Differenti approcci di modellazione corrispondono a diversi livelli di astrazione dei problemi da affrontare. La System dynamics, lavorando con flussi aggregati e tempi continui, è ovviamente usata al più alto livello di astrazione. La Discrete event è utilizzata ad un livello di astrazione basso e medio basso (processi fisici). La tecnica ad agenti, per sua natura tecnologia, abbraccia tutti i livelli di astrazione, e un agente può rappresentare oggetti di diversa natura e scala: al livello "fisico" un agente può, ad esempio, essere un pedone o un'automobile o un macchinario, al livello intermedio – clienti, al livello più alto – aziende concorrenti.

AnyLogic consente agli utenti di combinare questi approcci nel modo più adatto al problema, senza dover seguire una gerarchia specifica. Ad esempio, è possibile modellare una società di spedizioni con i corrieri come agenti autonomi, mentre il processo di trasporto e le infrastrutture possono essere modellati con la simulazione ad eventi discreti. In un altro modello, i consumatori possono essere agenti, mentre i flussi finanziari possono essere modellati con la System Dynamics. Questo approccio misto è utile per affrontare problemi complessi che richiedono una rappresentazione dettagliata a diversi livelli di astrazione.

Questo software è uno dei migliori in circolazione soprattutto per la sua affidabilità e versatilità poiché può avere applicazioni in moltissimi settori a partire dalle catene di fornitura. Un esempio pratico riguarda Estafeta, una delle prime tre aziende di trasporto pacchi in Messico, con 130 strutture. Si muovono tra i sei e gli otto milioni di pacchi al mese utilizzando una flotta di aerei, camion e veicoli vari.

Volevano capire come gestire al meglio le spese in conto capitale, stanziare per adattarsi alle crescenti richieste sul loro servizio di consegna pacchi in tutto il paese, nonché aumentare la produttività della rete.

Estafeta ha assunto VP Consulting, una società di consulenza messicana che lavora con reti di valore e applica i digital twins per le sfide logistiche. Hanno sviluppato un digital twin logistico per Estafeta per analizzare ciò che stava accadendo nella loro rete di distribuzione, aumentare la produttività ed eseguire l'analisi dei colli di bottiglia.

Questo digital twin è stato creato utilizzando AnyLogic e includeva le funzionalità del software come un database integrato, modellazione basata su agenti, simulazione di eventi discreti e mappatura GIS.

Il database integrato è stato utilizzato per connettere il gemello digitale al mondo reale utilizzando la domanda storica e prevista minuto per minuto, pacco per pacco, per osservare il comportamento dei clienti. La modellazione basata su agenti ha aiutato a organizzare gli orari e a interagire con aerei, camion e hub. Con la simulazione di eventi discreti, l'azienda ha modellato ogni hub considerando le risorse e le capacità durante i processi di smistamento e consegna. Infine, la mappatura GIS ha consentito agli sviluppatori di ridimensionare il modello e simulare il comportamento dei trasporti.

Utilizzando il modello del digital twin, VP Consulting è stata in grado di vedere e analizzare i complessi sistemi dinamici e logistici della rete di distribuzione.

Nel modello, l'interfaccia utente consente di visualizzare tutti i camion e gli aerei e persino l'ora esatta in cui ogni aereo atterra.

Esistono vari grafici in cui è possibile visualizzare diversi output. Ne sono un esempio la domanda totale e la domanda individuale del cliente, entrambe visualizzabili in qualsiasi momento nel modello. Ciò significa che le decisioni possono essere prese tempestivamente su clienti, prodotti e servizi.

In ogni hub di distribuzione nel modello è possibile visualizzare e analizzare statistiche su picchi, valli e operazioni per determinare se sono disponibili risorse sufficienti. Anche lo smistamento e la domanda possono essere osservati e valutati.

Pertanto, tutti i grafici sono visibili e forniscono informazioni dettagliate durante l'esecuzione della simulazione. Possono quindi essere consolidati in un foglio di calcolo Excel per essere successivamente analizzati per trarre conclusioni.

Utilizzando il digital twin logistico, i consulenti hanno scoperto che nell'operazione reale due processi si sovrapponevano, ma non capivano come ciò influenzasse il resto dell'operazione. Utilizzando i grafici disponibili nel gemello digitale, dove l'analisi può essere effettuata minuto per minuto, hanno potuto identificare il momento esatto in cui si è verificata la sovrapposizione e come ha influenzato le operazioni per più di un'ora. Potrebbero quindi sviluppare una soluzione a questo problema riducendo il collo di bottiglia.

Questa è stata una svolta che ha contribuito ad aumentare il throughput della rete del 21%. Inoltre, sono stati individuati gli arretrati e, utilizzando dati storici, si è capito che alcuni di essi facevano parte della vita, mentre altri necessitavano di attenzione.

Attraverso una combinazione di migliori operazioni di sincronizzazione, raccolta, smistamento, connessione e consegna, sono stati identificati e superati i vincoli di capacità sulla rete.

All'inizio, Estafeta voleva sapere come utilizzare al meglio i propri investimenti di capitale per la crescita. Alla fine, attraverso un gemello digitale logistico, hanno capito che non avevano bisogno di investire denaro ma piuttosto di sequenziare i processi in un luogo specifico e sincronizzare meglio le loro operazioni. Pertanto, hanno ritardato di due anni il loro investimento di 25 milioni di dollari, ma hanno continuato a crescere, mantenendo la redditività.

Questo gemello digitale logistico è attualmente utilizzato per specifiche stagioni di punta per determinare il miglior modello di distribuzione da implementare. Viene utilizzato anche da alcuni grandi clienti per simulare il modo migliore per raggiungere gli obiettivi di adempimento degli accordi di servizio che Estafeta ha con loro.

Come per le catene di fornitura, Anylogic può essere applicato ad altri settori, tra cui produzione manifatturiera, operazioni di magazzino, logistica ferroviaria, estrazione di minerali dal sottosuolo, terminal passeggeri, gestione del traffico, assistenza sanitaria e molti altri.

Un altro interessante caso di studio riguarda l'azienda Symbotic, un fornitore di soluzioni di automazione del magazzino. I suoi sistemi si basano su robot mobili che possono viaggiare liberamente attraverso una fitta struttura di stoccaggio, accedendo ai prodotti in tutte le ubicazioni e movimentandoli a una velocità di produzione molto elevata. I principali vantaggi del sistema Symbotic sono la sua capacità di operare in tre dimensioni e gli algoritmi di sequenziamento e pallettizzazione che costruiscono pallet stabili e facili da immagazzinare alla massima produttività.

L'azienda aveva bisogno di uno strumento per aiutare i propri clienti a comprendere l'impatto della riorganizzazione del magazzino e confrontare gli investimenti di capitale con i risparmi operativi previsti prima dell'effettiva introduzione dei sistemi di automazione. Questo strumento doveva essere facilmente adattato al caso di ciascun cliente specifico.

Gli specialisti di Symbotic hanno deciso di utilizzare il software di simulazione AnyLogic a questo scopo perché poteva stimare con precisione i costi e visualizzare i processi all'interno dei magazzini in 3D, oltre a creare modelli che potevano essere facilmente riconfigurati per più progetti.

I modelli che gli ingegneri Symbotic hanno creato per i clienti dell'azienda simulavano l'ambiente e le operazioni nei loro magazzini con un elevato livello di dettaglio. Più specificamente, ciò includeva la pianificazione e assegnazione delle porte della banchina, il flusso di prodotti tra le porte della banchina e diverse ubicazioni del magazzino sia in entrata che in uscita; il tracciamento e la combinazione dei flussi di prodotti specifici dell'ordine provenienti da diversi flussi in uscita; operazioni di manodopera e risorse come caricatori, scaricatori, carrelli elevatori, celle di de pallettizzazione e pallettizzazione, tutte simulate come agenti.

Ogni tipo di agente aveva le proprie proprietà, come velocità, affidabilità, tempi di funzionamento delle apparecchiature, dimensioni, casse per strato e strati per pallet per ogni SKU. I dati di input sono stati presi da informazioni di vita reale.

Era particolarmente importante per i modellatori simulare varie interazioni tra il sistema di automazione e gli operatori umani. Ciò includeva la ricezione delle consegne in entrata, il rifornimento delle scorte, le parti automatizzate e non automatizzate del magazzino che soddisfacevano gli ordini dei clienti in una sequenza ottimizzata e la loro combinazione alle porte di

carico nel modo esatto in cui accadrebbe nel sistema progettato. I modelli hanno inoltre tenuto conto della reazione del sistema in caso di guasti alle apparecchiature, orari dei turni e pause pranzo per gli operatori umani. I modelli prevedevano l'animazione 3D del magazzino e la visualizzazione grafica dei parametri chiave per fornire efficaci strumenti di presentazione ai venditori e consentire ai clienti di vedere in azione i loro futuri magazzini riorganizzati.

I modelli sono stati testati sui dati storici degli ordini di ciascun cliente, solitamente per un periodo di sei mesi. Per confrontare le operazioni di magazzino, con e senza le soluzioni di automazione introdotte, gli ingegneri di Symbotic hanno raccolto diverse statistiche nel modello come la capacità di throughput (casi per ora gestiti), il numero di operatori umani necessari e costi associati oltre al numero di risorse di magazzino necessarie (ad esempio porte di banchina) e al tempo necessario per evadere gli ordini di spedizioni giornaliere in uscita, soprattutto durante i periodi di punta.

Questi risultati sono stati utilizzati dai clienti per valutare alternative di progettazione del magazzino e giustificare gli investimenti di capitale.

AnyLogic ha consentito a Symbotic di progettare i propri modelli di simulazione in modo da poter modificare facilmente il layout del magazzino, le procedure operative, le proprietà degli SKU, ecc., in modo che gli elementi del modello potessero essere riutilizzati in più progetti con uno sforzo relativamente ridotto. Inoltre, l'animazione 3D ha consentito all'azienda di utilizzare queste simulazioni come potente strumento di vendita.

4.4 PLANT SIMULATION

Un altro importante software di simulazione è Plant Simulation che modella, simula, visualizza e analizza sistemi di produzione e i processi logistici per ottimizzare il flusso dei materiali e l'utilizzo delle risorse per tutti i livelli della pianificazione dell'impianto, dalle strutture globali e dagli impianti locali alle linee di produzione specifiche.

Il suo punto di forza è la creazione di modelli 3D gerarchici e strutturati di impianti di produzione affinché si possano modellare in maniera rapida ed efficiente i processi di produzione discreti e continui grazie a un'architettura avanzata orientata agli oggetti e funzionalità di modellazione. Infatti, grazie ai vantaggi architetturali di incapsulamento, ereditarietà e gerarchia, permette di comprendere e gestire al meglio simulazioni complesse e dettagliate molto meglio che con gli strumenti di simulazione convenzionali.

Permette di modellare utilizzando oggetti all'interno di oggetti e modelli all'interno di modelli, a tutti i livelli della gerarchia. Gli elementi archiviati nelle librerie vengono gestiti per tutti gli utenti e le modifiche vengono applicate automaticamente a tutte le istanze di tali elementi, ovunque vengano utilizzati. Inoltre, gli elementi delle librerie possono essere facilmente configurati in base a requisiti specifici all'interno di una particolare simulazione.

Attraverso Plant Simulation si possono sfruttare i vari strumenti integrati e gli output grafici per valutare le prestazioni del sistema di produzione, compreso il rilevamento automatico dei colli di bottiglia, l'analisi della produttività, l'utilizzo delle macchine e l'analisi dei costi.

Un caso di studio questa volta è la Loesch Verpackungstechnik GmbH (LoeschPack), un'azienda internazionale leader nello sviluppo, produzione e assistenza completa di macchine per l'imballaggio e sistemi di imballaggio completi. Le esportazioni rappresentano il 90% del fatturato dell'azienda. Il fulcro dell'offerta di LoeschPack sono i sistemi di imballaggio per prodotti dolciari, tra cui gomme da masticare, cioccolato e prodotti da forno a lunga conservazione.

L'industria dolciaria è uno dei settori alimentari in più rapida crescita. Nuove idee di imballaggio richiedono concetti tecnici innovativi per macchine e sistemi di imballaggio. Affrontare le sfide impegnative di oggi richiede non solo competenza, ma anche l'uso di strumenti software all'avanguardia per supportare la pianificazione di processi di imballaggio complessi.

I sistemi di imballaggio di LoeschPack sono costituiti da macchine per fasi di imballaggio singole o multiple e per la fornitura, lo smistamento e il trasporto di componenti per prodotti e materiali di imballaggio, nonché buffer.

Un obiettivo centrale di LoeschPack è lo sviluppo e la fornitura di soluzioni di imballaggio complete. Oltre agli evidenti vantaggi che i clienti ricevono ottenendo una soluzione globale da un'unica fonte, è anche importante per LoeschPack garantire la crescita futura poiché compete con altri fornitori che offrono solo soluzioni singole.

Il viceresponsabile dell'ingegneria di processo di questa azienda afferma che il loro obiettivo è quello di soddisfare le aspettative dei clienti e per farlo devono verificare l'efficienza dei complessi sistemi di imballaggio nelle prime fasi del processo di pianificazione.

Questo compito richiede non solo di conoscere l'efficienza delle singole macchine o componenti, ma anche di scoprire quante macchine sono necessarie per ogni singola fase di confezionamento, quanto devono essere grandi i buffer e quale influenza avranno brevi malfunzionamenti.

Poiché questi compiti non possono essere risolti in modo sicuro ed efficiente senza una soluzione software adeguata, nel 2012 LoeschPack ha iniziato a cercare una soluzione che meglio si adattasse alle loro esigenze specifiche. Nell'ambito del processo di selezione sono state utilizzate diverse soluzioni su progetti reali con l'aiuto di fornitori di servizi di simulazione e di risorse interne.

La simulazione digitale di un sistema di imballaggio inizia con la definizione di un modello di simulazione. Plant Simulation offre moduli di simulazione che si riferiscono alle diverse macchine e componenti di un sistema di imballaggio. I moduli possono essere aggiunti o modificati, quindi configurati in un sistema di confezionamento completo. Idealmente, i moduli vengono posizionati in un layout dell'impianto fornito dal cliente per mostrare una rappresentazione realistica 2D o 3D del sistema.

Successivamente vengono aggiunti i parametri ai singoli componenti. Questi possono essere le dimensioni del prodotto, le distanze tra le singole attività, la frequenza dei processi di confezionamento, la capacità dei buffer o i dati chiave per possibili guasti e tempi di cambio formato. Plant Simulation consente anche di modificare automaticamente i parametri in passaggi specifici, facilita la simulazione rapida di diversi scenari e fornisce informazioni realistiche sull'influenza delle dimensioni del buffer o dei guasti sull'intero processo e sull'efficienza del sistema completo.

Inoltre, la simulazione dell'impianto può essere utilizzata per confrontare diverse esecuzioni di linea per bilanciare costi ed effetti al fine di aumentare l'efficienza.

LoeschPack si è quindi affidata a questa tipologia di software per merito della sua estrema flessibilità, e prevede di estendere l'uso di Plant Simulation per la messa in servizio virtuale, ovvero il test dei dati di pianificazione e controllo su una "macchina virtuale" e il trasferimento diretto dei dati convalidati nei controller della macchina reale. Un altro aspetto potrebbe essere quello di espandere l'uso del software per ottenere maggiore sicurezza, produttività ed efficienza energetica, che sta diventando sempre più importante.

4.5 SIMUL8

Simul8 è un altro software molto utilizzato per la sua facilità d'applicazione e capacità di modellare processi complessi. È ampiamente impiegato nell'ottimizzazione dei processi e nella gestione della catena di approvvigionamento.

La linea che questo software segue, per assistere i suoi clienti, inizia dal permettere loro di capire e massimizzare il flusso, svelare e ispirare nuovi modi di operare, prevedere e pianificare con fiducia e identificare strategie per affrontare i momenti di incertezza.

Simul8 si basa principalmente sulla simulazione ad eventi discreti e su una rappresentazione visuale dei processi aziendali attraverso un'interfaccia grafica intuitiva.

Gli utenti possono creare modelli trascinando e rilasciando oggetti grafici, come code, stazioni di lavoro, risorse e così via, e collegarli tra loro per definire il flusso dei processi.

Una volta creato il modello, gli utenti possono eseguire la simulazione e osservare come il sistema si comporta nel tempo in risposta agli eventi generati. Possono anche eseguire analisi "what-if" per testare diverse configurazioni e strategie di gestione.

Qui un esempio di studio può essere quello relativo alla Fiat Chrysler Automobiles.

Con sede ad Auburn Hills, Michigan, il Gruppo Fiat Chrysler gestisce 33 stabilimenti produttivi in quattro paesi e impiega oltre 52.000 persone.

Con il rilascio dei nuovi modelli ci si aspettava un sostanziale aumento della domanda da parte dei clienti. Di conseguenza, per far fronte a questo aumento, allo stabilimento è stato assegnato il compito di migliorare la velocità di produzione giornaliera da 930 a 969 unità.

Steve Lin, membro del team di simulazione di Chrysler, ha utilizzato il software di simulazione della produzione Simul8 per studiare la velocità della linea e valutare potenziali modifiche per aumentare il numero di unità prodotte ogni giorno.

Il team di simulazione di Chrysler ha utilizzato una simulazione di base dello stabilimento di assemblaggio di Brampton per comprendere l'impatto delle variazioni di velocità della linea. Poiché ogni impianto di produzione dispone della propria simulazione di base, è possibile apportare facilmente modifiche al miglioramento del processo a qualsiasi aspetto della simulazione per aiutare a visualizzare l'impatto più ampio sull'intero processo di assemblaggio.

Inizialmente, Steve e la sua squadra hanno esaminato le macchine a basse prestazioni. Utilizzando Simul8, è stato rapidamente identificato che due stazioni specifiche stavano causando un collo di bottiglia nella produzione. Poiché si trattava di macchine automatiche senza personale, il team è stato in grado di utilizzare la simulazione per osservare cosa sarebbe accaduto se i tempi di ciclo su queste macchine fossero ridotti.

Il modello di simulazione ha consentito al gruppo di classificare tutte le linee di produzione in base alle loro prestazioni e di identificare facilmente le linee con le prestazioni peggiori, per ottimizzare ed eliminare costosi colli di bottiglia. Dopo la prima prova, queste linee sono state nuovamente classificate e sono stati individuati eventuali nuovi colli di bottiglia. Hanno quindi condotto ulteriori prove per accelerare le nuove linee a collo di bottiglia fino al raggiungimento dell'obiettivo.

Utilizzando Simul8, Chrysler è stata in grado di utilizzare dati reali di fabbrica nella simulazione. Questi dati sono stati raccolti dall'impianto utilizzando il sistema informativo di fabbrica che raccoglie i dati dal PLC, un sistema di registrazione in tempo reale che registra la velocità della linea e il tempo di ciclo.

La simulazione è stata eseguita su un ciclo di un mese e ha utilizzato i dati esistenti importati da Excel, garantendo che i risultati fossero quanto più accurati possibile. Ciò ha consentito inoltre di convalidare la simulazione confrontando i risultati di Simul8 con i numeri di produttività effettivi e di identificare se la riduzione dei tempi di ciclo in queste stazioni avrebbe migliorato la produttività.

Rispettando l'obiettivo di aumento della produttività e producendo 39 unità extra al giorno, l'impianto è stato in grado di aumentare le entrate di 1.000.000 di dollari al giorno.

4.6 FLEXSIM

Un altro software si chiama FlexSim e può essere applicato in ambiti legati alla produzione, movimentazione dei materiali, assistenza sanitaria, ottimizzazione di attività di magazzino e catena di fornitura.

Skarnes Inc., un integratore di sistemi di movimentazione dei materiali con sede a Plymouth, Minnesota, desiderava aumentare la produttività di uno dei processi di magazzinaggio del suo cliente. Il cliente ha utilizzato un sistema di stoccaggio e recupero automatizzato (AS/RS) che si interfacciava con un circuito di trasporto, trasportando i pallet a una stazione di prelievo e quindi di nuovo all'AS/RS. Questo sistema era in grado di prelevare 70 pallet all'ora ed è stato studiato da Skarnes per potenziali miglioramenti. La simulazione ha dimostrato che le modifiche comporterebbero un miglioramento del 43% della produttività. Dopo aver osservato questa operazione, Skarnes ha ipotizzato che il numero di pallet prelevati all'ora sarebbe aumentato se fosse stata ridotta la congestione del trasportatore davanti all'AS/RS. Skarnes ha avuto l'idea di aggiungere un altro trasportatore sulla linea principale per i pallet in uscita; questo nuovo trasportatore sarebbe situato sopra il trasportatore della linea principale esistente. Per dimostrare al cliente la validità di questa opzione, Skarnes ha commissionato una simulazione al computer del sistema. FlexSim ha sviluppato quindi un accurato modello di simulazione 3D per confermare la proposta di Skarnes. Aggiungendo questo trasportatore della linea principale di livello superiore, il

modello di simulazione ha mostrato che il numero di pallet prelevati sarebbe aumentato da 70 a 100 pallet all'ora, con un incremento del 43%. L'animazione 3D del sistema ha confermato anche visivamente che la congestione del trasportatore è stata notevolmente ridotta, aggiungendo un ulteriore livello di convalida per il cliente.

5. Analisi articoli scientifici

5.1 SIMULAZIONI APPLICATE AL CONTROLLO QUALITÀ, CON FOCUS SU QUELLO DEI PRODOTTI

Come già visto in precedenza, grazie alle simulazioni e ai vari software a loro annessi si può intervenire sui processi produttivi, raccogliendo dati e rendendo il tutto più efficiente. Un caso specifico è quello che riguarda il controllo qualità. Attraverso un'analisi di diversi articoli scientifici, vedremo come applicazioni della simulazione al controllo qualità permettono di renderlo più ottimale, al fine di avere un prodotto finale che rispetti alla perfezione tutte le specifiche richieste.

L'era attuale dell'Industria 4.0 ha portato a significativi cambiamenti nel settore manifatturiero, con l'obiettivo di produrre prodotti innovativi e di alta qualità, con tempi di immissione sul mercato più brevi, aumentando la flessibilità dello scambio di istruzioni o conoscenze in tempo reale tra i vari ambiti dello sviluppo del prodotto. I clienti richiedono diverse varianti di prodotto per soddisfare le loro esigenze economiche, il che spinge le industrie manifatturiere a essere più flessibili nel design e nella produzione.

Partiamo con una tipologia di simulazione che sta tutt'ora prendendo piede all'interno di svariate aziende manifatturiere e che è in continuo sviluppo ovvero quello dell'AR (realtà aumentata) e VR (realtà virtuale).

Nell'articolo "Challenges and opportunities on AR/VR technologies for manufacturing systems in the context of industry 4.0: A state of the art review" si parla di come tecnologie come la Realtà Aumentata (AR) e la Realtà Virtuale (VR) hanno ricevuto molta attenzione per raggiungere la produzione di massa e la personalizzazione di massa per diverse varianti di prodotto. I progressi e gli sviluppi di queste tecnologie sono per il design e la valutazione dei prodotti, la riparazione e la manutenzione, l'assemblaggio, la gestione del magazzino, il controllo di qualità, il layout degli impianti e la simulazione CNC.

Parlando nello specifico del controllo qualità, le tecnologie AR consentono di migliorarlo, all'interno delle industrie manifatturiere, sotto numerosi punti di vista, fornendo informazioni utili sui componenti difettosi in tempi ridotti. I lavoratori, utilizzando occhiali AR, possono spostarsi all'interno dello stabilimento e ricevere informazioni in tempo reale sui prodotti da controllare. I sensori IoT integrati sui prodotti possono fornire dettagli sulla conformità qualitativa, visualizzati direttamente sugli schermi AR, eliminando errori e migliorando l'efficienza del controllo qualità.

Questa tecnologia è anche utile per la formazione dei nuovi operatori nel processo di controllo qualità. Le linee guida visualizzate tramite AR aiutano i nuovi lavoratori in ogni fase del processo di ispezione, riducendo errori e migliorando la corrispondenza dei prodotti agli standard qualitativi. Ciò assicura che solo i prodotti conformi proseguano nelle fasi successive della produzione.

Tutto ciò è possibile grazie alle informazioni raccolte attraverso gli strumenti AR, le quali vengono utilizzate per creare rapporti di assicurazione qualità. Questi rapporti aiutano i produttori a identificare i prodotti difettosi e a prendere decisioni correttive in tempo reale.

Ovviamente non sono solo le nuove tecnologie che permettono di ottimizzare il controllo qualità dei prodotti; infatti, come possiamo apprendere dal documento "Simulation-Based Robust

"Scheduling for Smart Factories Considering Improved Test Strategies" sono sempre più in via di sviluppo delle strategie avanzate per l'ottimizzazione del controllo della qualità nelle fabbriche intelligenti, in particolare in scenari di produzione flessibile e adattabile, tipici dell'Industria 4.0. Queste strategie mirano a integrare in modo dinamico le attività di produzione e controllo qualità per migliorare la qualità del prodotto, la resilienza del processo e l'efficienza complessiva.

Nel contesto delle fabbriche intelligenti, dove la produzione deve essere altamente adattabile alle esigenze del mercato, la gestione della qualità diventa una sfida complessa. Le fabbriche devono affrontare la necessità di adattarsi rapidamente a interruzioni della produzione, cambi di ordini prioritari e guasti alle attrezzature, senza compromettere la qualità del prodotto finale. Questo richiede non solo una pianificazione flessibile della produzione, ma anche strategie di controllo qualità che possano essere riallocate e adattate dinamicamente durante il processo produttivo.

L'articolo propone l'uso di moduli di test flessibili che possono essere inseriti in vari punti del processo produttivo per monitorare la qualità del prodotto. La strategia ottimale per il controllo qualità si basa su diversi fattori, tra cui:

- **Punto Ottimale di Ispezione:** Identificazione del momento ideale in cui effettuare i test di qualità durante il ciclo produttivo, minimizzando l'impatto sul flusso produttivo.
- **Tipologia di Test:** Scelta tra test rapidi, meno sensibili e meno costosi, oppure test più precisi e affidabili ma più dispendiosi in termini di tempo e risorse.
- **Politica di Decisione:** Decisione se eseguire un test ogni volta che un modulo di test è disponibile o se utilizzare una politica decisionale che prevede di scartare prodotti difettosi basandosi su test precedenti.

Per ottimizzare queste strategie di test, gli autori utilizzano un modello decisionale basato sull'analisi decisionale statistica e l'inferenza bayesiana. Questo modello viene rappresentato attraverso una rete decisionale, dove ogni passaggio temporale nel processo produttivo viene modellato come una "slice" temporale, permettendo di valutare l'efficacia delle diverse strategie di test in base a parametri di qualità e costi.

L'algoritmo di Cross-Entropy (CE) è utilizzato per risolvere compiti di ottimizzazione complessi, come la determinazione del miglior punto di allocazione dei test e la scelta dei test più appropriati in un processo produttivo realistico con molte variabili e passaggi. L'algoritmo CE permette di adattare la distribuzione dei campioni in modo iterativo, concentrando la massa di probabilità nella regione quasi-ottimale, migliorando così la strategia di test a ogni iterazione.

Il modello decisionale, in combinazione con l'algoritmo CE, offre un sistema auto-apprendente che può aggiornare dinamicamente la strategia di test basandosi sulle informazioni ottenute in tempo reale dai moduli di test. Questo approccio non solo ottimizza la qualità del prodotto, ma migliora anche la resilienza del processo produttivo, consentendo alle fabbriche di adattarsi rapidamente a cambiamenti imprevisti o interruzioni.

In questo modo si dimostra come l'adozione di strategie di controllo qualità ottimizzate e adattabili nelle fabbriche intelligenti possa portare a un miglioramento significativo della qualità del prodotto e dell'efficienza produttiva, grazie soprattutto alla creazione di sistemi di produzione flessibili, resilienti e altamente performanti, in grado di rispondere efficacemente alle sfide dell'industria 4.0.

Lo stesso scopo hanno le carte di controllo statistiche (SPC - Statistical Process Control) che infatti sono strumenti fondamentali per monitorare e mantenere la stabilità del processo produttivo e garantire che i prodotti finali rispettino gli standard di qualità prefissati. Sono utilizzate prevalentemente per gestire il controllo qualità dei prodotti, come spiegato nell'articolo "PRODUCTION COST CALCULATION APPROACH BASED ON DATA COLLECTED DURING MANUFACTURING PROCESS" poiché servono per registrare misurazioni critiche durante la produzione, come diametri, distanze e rugosità. Queste misurazioni sono essenziali per il corretto funzionamento dei prodotti nei quali le componenti prodotte saranno installate. Ad esempio, nel processo di piegatura di tubi, le variazioni del diametro interno possono influenzare il flusso del fluido e compromettere il funzionamento finale del prodotto.

Ogni carta di controllo traccia la variabilità del processo in funzione del tempo, identificando i limiti di specifica superiori e inferiori, oltre alle linee di avviso che segnalano quando il processo si avvicina ai limiti di tolleranza. Se le misurazioni superano questi limiti, il prodotto deve essere scartato o sottoposto a rilavorazione.

L'articolo esamina anche un approccio di calcolo dei costi di produzione basato sui dati raccolti durante il processo di produzione, infatti il controllo qualità, non solamente quello effettuato sul prodotto finale, non è solo un mezzo per garantire prodotti conformi, ma anche un importante fattore economico. Ogni correzione del processo, sia essa una regolazione della macchina o un cambio di utensile, rappresenta un costo aggiuntivo, noto come "costo della qualità". Questi costi possono includere **fermate di produzione** per regolazioni del processo, **rilavorazioni** necessarie a correggere prodotti fuori specifica e **scarti** causati da processi di setup o da misurazioni fuori specifica.

Il documento sottolinea l'importanza di un'accurata raccolta e analisi dei dati di qualità per identificare le principali fonti di perdita nel processo produttivo, come mostrato nell'analisi di Pareto. Questo tipo di analisi aiuta a concentrare gli sforzi di miglioramento sulle aree più critiche, ottimizzando l'efficacia dei controlli di qualità e riducendo i costi.

Vediamo quindi come viene sempre ribadita l'importanza della raccolta dati per l'implementazione di simulazioni che permettano di ricreare al meglio gli ambienti di lavoro reali con tutte le specifiche dei prodotti ben precise, come nel caso dello sviluppo di simulazioni numeriche che prevedano il comportamento meccanico dei componenti stampati in 3D. Ne parla l'articolo "Improvement of 3D printing polymer simulations considering converting G-code to Abaqus" nel quale si discute un approccio innovativo per migliorare le simulazioni di test meccanici per materiali di stampa 3D utilizzando il processo FDM (Fused Deposition Modeling). In particolare, si focalizza sulla conversione dei file G-code, utilizzati nel processo FDM, in script per Abaqus, un software di simulazione ingegneristica.

Il processo descritto consente ai produttori di importare le geometrie reali dei campioni nei loro pacchetti di simulazione numerica, ottimizzando così le procedure di produzione additiva. Questo approccio ha portato a una produzione più veloce e di maggiore qualità.

- **Conversione G-code in Abaqus:** Un nuovo strumento è stato sviluppato per convertire i file G-code in script Abaqus. Questo permette di simulare esattamente le geometrie dei pezzi stampati, migliorando la corrispondenza tra la simulazione e la realtà. La capacità di riprodurre geometrie precise con Abaqus permette una migliore previsione del comportamento meccanico dei materiali sotto test di trazione, contribuendo a un controllo qualità più rigoroso.
- **Simulazioni di Test Meccanici:** Sono stati condotti test di trazione su campioni stampati in 3D con orientamenti multipli (0°, 45°, e 90°). I risultati delle simulazioni hanno mostrato una correlazione superiore al 90% con gli esperimenti reali, dimostrando che le simulazioni sono altamente affidabili. Questo alto grado di corrispondenza aiuta a identificare potenziali difetti e a migliorare il design e la qualità del prodotto finale.
- **Ottimizzazione dei Parametri di Stampa:** Il software consente di simulare diverse impostazioni di stampa come densità di riempimento, orientamento di riempimento e pattern di riempimento. Questi parametri sono fondamentali per la resistenza meccanica e la durata del pezzo stampato. L'ottimizzazione di questi parametri attraverso la simulazione numerica aiuta a ridurre gli scarti e a migliorare l'efficienza della produzione.
- **Previsioni Affidabili del Comportamento Meccanico:** L'uso delle simulazioni FEA (Finite Element Analysis) tramite Abaqus offre una previsione accurata delle proprietà meccaniche delle parti stampate in 3D, consentendo un miglior controllo e qualità del prodotto finale. La capacità di prevedere l'anisotropia basata sulle forze di rendimento anisotropiche del materiale permette di adattare meglio i parametri di produzione per ottenere risultati di qualità superiore.

Tutto ciò a dimostrazione di quanto già detto relativamente all'importanza della raccolta dei dati nell'ottica di migliorare la qualità di prodotti e dell'intero processo produttivo.

Se invece vogliamo analizzare una situazione più specifica in cui il controllo qualità riguardi sì il complesso produttivo ma nel particolare che abbia simulazioni che mi permettano di analizzare la qualità del prodotto possiamo prendere l'articolo "Simulation uncertainty determination of single flank rolling tests using monte carlo simulation and skin model shapes for zero defect manufacturing of micro gears" in cui viene analizzato come attraverso l'utilizzo di simulazioni venga reso più efficiente il controllo qualità nella produzione di microingranaggi, un elemento chiave per la produzione a zero difetti (Zero Defect Manufacturing, ZDM).

Il controllo qualità nella produzione di micro-ingranaggi è ottimizzato attraverso l'integrazione di simulazioni di test di rotolamento a fianco singolo (single flank rolling tests) utilizzando la simulazione Monte Carlo e Skin Model Shapes. Questi strumenti consentono in primo luogo di fare una previsione delle funzioni di produzione, poiché le simulazioni appunto, consentono di integrare l'assicurazione qualità orientata alla funzione, direttamente nei processi produttivi, migliorando la capacità di previsione e controllo dei parametri di produzione per prevenire difetti. Inoltre, permettono la valutazione delle Incertezze di Simulazione, infatti, utilizzando un'analisi dei contatti tra i denti e tecniche di campionamento avanzate (come il Latin Hypercube Sampling ottimizzato), il documento presenta un metodo per valutare le incertezze specifiche delle simulazioni. Questa

valutazione delle incertezze è cruciale per assicurare che i controlli basati su simulazioni siano affidabili, contribuendo a una produzione senza difetti.

Abbiamo inoltre la capacità di generare dati artificiali basati su nuvole di punti per rappresentare le deviazioni geometriche degli ingranaggi. Ciò permette di valutare l'incertezza del modello attraverso la simulazione Monte Carlo, utilizzando un approccio adattivo per garantire un livello di confidenza sufficiente nei risultati delle simulazioni.

Il Monitoraggio e Ottimizzazione del Processo in Tempo Reale è poi un altro vantaggio portato dall'utilizzo di queste innovazioni, le simulazioni rapide e accurate dei test di rotolamento degli ingranaggi, infatti, permettono di monitorare e ottimizzare il processo di produzione in linea, riducendo le deviazioni di fabbricazione e migliorando l'efficacia della produzione. Stesso obiettivo della riduzione degli scarti e miglioramento della qualità: L'approccio di ZDM mira a eliminare i difetti dal processo produttivo, minimizzando la necessità di ispezioni finali e riducendo gli scarti. La determinazione delle incertezze nella simulazione contribuisce a questo obiettivo, fornendo un feedback accurato che può essere utilizzato per migliorare continuamente i processi.

In sintesi, il documento presenta un approccio innovativo per il controllo qualità nella produzione di micro-ingranaggi, utilizzando avanzate tecniche di simulazione e analisi per garantire la precisione e l'affidabilità dei processi produttivi, minimizzando così i difetti e migliorando la qualità complessiva del prodotto finale. Anche qui in parte si ricade sul concetto di controllo qualità delle attività produttive e del processo, ma abbiamo anche un focus chiaro sulla raccolta dati delle specifiche del prodotto e della simulazione della loro applicazione pratica, che permette di andare a correggere tutti quegli eventuali difetti tecnici che possono portare ad un malfunzionamento del prodotto nella realtà.

Troviamo poi un altro caso di studio nell'articolo ["Digital Twin of Experimental Smart Manufacturing Assembly System for Industry 4.0 Concept"](#) nel quale si utilizza la simulazione attraverso i digital twin per migliorare i processi produttivi, permettendo anche di migliorare il controllo qualità sui prodotti durante il processo produttivo.

In breve, la simulazione del sistema di assemblaggio utilizza un digital twin, che replica virtualmente l'intero processo. Ciò consente di monitorare in tempo reale il sistema fisico, identificando rapidamente eventuali problemi legati alla qualità.

C'è inoltre un sistema di visione industriale integrato che è utilizzato per controllare la presenza di parti, misurare dimensioni e verificare la correttezza dell'assemblaggio. Le informazioni raccolte vengono sincronizzate con il digital twin, garantendo che eventuali difetti vengano rilevati tempestivamente.

La simulazione attraverso il digital twin permette quindi un'ottimizzazione continua senza dover interrompere la produzione. Grazie alla sincronizzazione in tempo reale con il sistema fisico, è possibile eseguire simulazioni predittive per evitare errori e migliorare la qualità del prodotto.

In linea generale quando vengono utilizzate queste simulazioni, a trarne sempre beneficio sono i processi produttivi e la loro efficienza, ma in questo capitolo ho voluto racchiudere casi di studio in cui c'è un riscontro diretto anche sul processo di controllo qualità del prodotto che, come abbiamo visto può avvenire o alla fine o durante la fase di produzione. Ci sono simulazioni che aiutano a capire quali specifiche dei prodotti controllare e come farlo, ma nel frattempo ottimizzano il ciclo produttivo suggerendo quando inserire questi controlli.

5.2 SIMULAZIONI APPLICATE AL CONTROLLO QUALITÀ DEI PROCESSI PRODUTTIVI

Come già detto spesso e volentieri le simulazioni utilizzate in ambito manifatturiero, concorrono allo stesso tempo a migliorare i processi produttivi e il controllo qualità dei prodotti, giungendo così ad una qualità superiore del prodotto finale. Ovviamente una non esclude l'altra anzi, viaggiano di pari passo. Questa divisione in due capitoli però vuole evidenziare i casi in cui, come in questo caso (in questo capitolo), quando si parla di controllo qualità e del suo miglioramento si parla di simulazioni che permettono di ricreare tutto il ciclo di lavorazione permettendo così di aggiustare ciò che non va e rendere il tutto più efficiente. In questo capitolo non mi soffermerò sul controllo qualità dei prodotti in sé ma ne parlerò solamente in quanto tramite le simulazioni emergerà che in alcuni momenti del processo produttivo sarebbe opportuno effettuare una verifica sulle specifiche dei prodotti, e lo farò senza analizzare in che modo ciò avviene e quali precise caratteristiche bisogna analizzare, come invece ho fatto nel capitolo precedente.

Il primo articolo che prendiamo in esame è "Digital twin for human-robot collaboration enhancement in manufacturing systems: Literature review and direction for future developments" che esamina il potenziale dei digital twins (DT) per migliorare la collaborazione uomo-robot (HRC) nei sistemi di produzione.

Come già ampiamente spiegato con l'avvento dell'Industria 4.0, le tecnologie avanzate come la robotica, l'intelligenza artificiale e l'Internet delle cose hanno trasformato le fabbriche in ambienti altamente automatizzati e intelligenti. Tuttavia, l'automazione eccessiva può escludere i fattori umani, compromettendo la flessibilità e l'innovazione. La collaborazione uomo-robot (HRC) offre un equilibrio, combinando la precisione dei robot con le competenze umane. I DT rappresentano una replica virtuale dei sistemi fisici e possono simulare e ottimizzare l'interazione tra umani e robot.

Nel contesto della Collaborazione Uomo-Robot (HRC, Human-Robot Collaboration), i Digital Twin (Gemelli Digitali) rappresentano una tecnologia innovativa che permette di creare repliche virtuali di sistemi fisici. Questi modelli virtuali sono aggiornati in tempo reale con dati provenienti dal mondo reale, consentendo simulazioni realistiche, monitoraggio continuo e ottimizzazione delle operazioni.

Principali Applicazioni dei Digital Twin nell'HRC:

La prima applicazione riguarda la simulazione e l'ottimizzazione; I Digital Twin forniscono un ambiente di simulazione realistico per testare e ottimizzare le strategie di collaborazione tra esseri umani e robot nei sistemi di produzione. Questo permette di migliorare la sicurezza, la qualità e la produttività delle operazioni.

Possono anche essere utilizzati per analizzare gli aspetti ergonomici degli ambienti di lavoro, minimizzando lo sforzo fisico e il rischio di infortuni per gli operatori umani. Inoltre, permettono di monitorare e ottimizzare gli spazi collaborativi per migliorare la comunicazione e la coordinazione tra uomini e robot.

Una delle sfide principali nell'implementazione dei Digital Twin è l'integrazione dei dati e l'interoperabilità tra diversi software e sistemi fisici. Questo è essenziale per garantire una comunicazione efficiente tra il mondo virtuale e quello reale, migliorando la produttività e riducendo gli sprechi.

Diversi software sono stati analizzati per la loro capacità di supportare lo sviluppo di Digital Twin per l'HRC, tra cui Unity 3D, Gazebo e CoppeliaSim. Questi strumenti offrono varie funzionalità per la simulazione di robot e operatori umani, l'analisi ergonomica e la misurazione del tempo, anche se spesso manca una soluzione completa che integri tutte le funzionalità necessarie.

Tuttavia, rimangono diverse sfide, come la mancanza di standardizzazione e l'integrazione completa dei software esistenti. La ricerca futura dovrebbe focalizzarsi sullo sviluppo di soluzioni software dedicate che possano soddisfare tutte le esigenze della collaborazione uomo-robot in contesti di produzione. Come abbiamo visto qua si parla di un ambito molto più specifico, sempre all'interno dell'impianto produttivo, proprio per dimostrare gli innumerevoli ambiti di applicazione dei vari tipi di simulazioni (in questo caso dei digital twins).

Un'altra situazione in cui quest'ultimi sono molto utili viene mostrato nell'articolo "Continuous engineering for Industry 4.0 architectures and systems" ovvero nella riprogrammazione delle apparecchiature, come nel caso di guasti imprevisti, per mantenere attiva la produzione senza necessità di intervenire fisicamente sui macchinari. Questo approccio riduce i tempi di inattività e migliora l'efficienza operativa. L'introduzione dei Digital Twins, associata all'adozione di macchine riconfigurabili (RMS), favorisce inoltre la personalizzazione dei prodotti in risposta alla crescente domanda di soluzioni su misura. La capacità di adattamento continuo garantisce una produzione flessibile, riducendo le perdite economiche e ottimizzando le risorse.

L'articolo sottolinea anche l'importanza di metodi di valutazione della qualità continui e automatici, abilitati dai Digital Twins. Gli indicatori di prestazione chiave (KPI) vengono utilizzati per identificare deviazioni di qualità, permettendo un controllo costante senza necessità di fermare le operazioni. Questo approccio risponde perfettamente alle esigenze dell'Industria 4.0, che richiede flessibilità, adattabilità e ottimizzazione dei tempi e delle risorse.

Vediamo ora ad esempio una piattaforma multifunzionale che permette alle piccole e medie imprese (PMI) di migliorare le prestazioni operative e di prodotto attraverso l'analisi quantitativa dei parametri di progettazione e dei KPI (Key Performance Indicators).

Approccio metodologico di riferimento: L'approccio metodologico delineato nell'articolo si sviluppa in diverse fasi chiave:

- **Mappatura dei processi produttivi:** Questa fase mira a valutare lo stato attuale dei processi produttivi e delle caratteristiche del design dei prodotti. Vengono raccolti dati riguardanti il

flusso di produzione, layout, attrezzature, macchinari, numero e caratteristiche dei lavoratori, dimensioni, materiali dei prodotti, ecc.

- **Digitalizzazione dei processi e dei prodotti:** I dati raccolti vengono utilizzati per creare "specchi digitali" dei sistemi reali, che serviranno come base per le successive ottimizzazioni.
- **Definizione degli indicatori chiave di performance (KPI):** Vengono stabiliti i KPI da monitorare e ottimizzare, specifici per ciascun contesto aziendale. Esempi di KPI includono il tempo di flusso, il tasso di utilizzo delle macchine e degli operai, e le caratteristiche fisiche dei prodotti.
- **Definizione dei parametri di progettazione:** Viene condotta un'analisi per identificare i principali parametri di progettazione che potrebbero influenzare i processi produttivi e i KPI dei prodotti. Esempi di parametri di progettazione includono il numero e l'efficienza dei lavoratori, le dimensioni dei lotti di produzione, e i tipi di materiali.
- **Processo decisionale:** Questo è il fulcro dell'approccio, in cui vengono eseguite analisi "what-if" per valutare l'impatto delle variazioni dei parametri di progettazione sui KPI. Il ciclo decisionale prevede la valutazione dello stato attuale, la generazione di configurazioni alternative e la stima dell'impatto di tali configurazioni sui KPI, ripetendosi fino all'ottimizzazione.
- **Implementazione dei risultati:** i parametri di progettazione ottimizzati vengono implementati nei sistemi fisici per migliorare i KPI dei processi e dei prodotti

La piattaforma multifunzionale proposta si basa su un'infrastruttura a strati, combinando diversi moduli che soddisfano requisiti di interoperabilità, accessibilità e usabilità. Gli utenti finali possono accedere alla piattaforma attraverso un'applicazione web per iniziare un processo di analisi "what-if" dedicato all'ottimizzazione dei KPI.

Moduli della piattaforma:

- **Modulo SDT (Simulazione dei Processi Produttivi):** Utilizza Plant Simulation di TECNOMATIX per modellare i processi produttivi delle PMI e valutare quantitativamente gli effetti dei parametri di progettazione sui KPI.
- **Modulo FEA (Analisi agli Elementi Finiti):** Utilizza Autodesk Inventor Nastran per condurre studi FEA e migliorare il design strutturale dei prodotti.
- **Modulo NES (Nesting Studies):** Ottimizza l'efficienza nell'uso delle materie prime attraverso studi di nesting, permettendo alle PMI di valutare vari progetti di prodotti al fine di ottimizzare il tasso di utilizzo delle materie prime.

L'articolo presenta un caso studio di una PMI del settore dell'arredamento che ha utilizzato questa piattaforma per ottimizzare la progettazione e la produzione di una nuova libreria. I risultati hanno mostrato un aumento dell'efficienza, una riduzione dei costi e un miglioramento della redditività.

Viene infine sottolineata la possibilità di espandere ulteriormente la piattaforma con nuovi moduli, come quelli per il controllo qualità e la gestione della catena di fornitura, per offrire ulteriori vantaggi alle PMI.

Un altro mezzo molto interessante già visto in precedenza è quello della DES, ovvero simulazione ad eventi discreti utilizzato come strumento chiave per migliorare il controllo qualità e ottimizzare i processi produttivi. La DES modella i processi produttivi come una sequenza di eventi discreti, consentendo di simulare vari scenari operativi senza interrompere la produzione reale. Questo approccio si è dimostrato particolarmente utile nel caso dell'azienda **Master Italy**, che ha utilizzato la DES per creare un **gemello digitale** del suo impianto produttivo, come spiegato nell'articolo "Discrete Event Simulation for the Analysis and Re-Engineering of Production and Logistics Cycles: The Case of Master Italy Company". Attraverso la simulazione di diversi scenari, Master Italy è stata in grado di identificare colli di bottiglia, inefficienze e opportunità di miglioramento nella gestione dei materiali e delle risorse. L'introduzione di robot mobili autonomi (AMR) e di un magazzino automatico ha ulteriormente ottimizzato il flusso dei materiali e ridotto i tempi di inattività. La DES ha inoltre permesso di monitorare continuamente le prestazioni delle linee di produzione, offrendo una valutazione più precisa della qualità e riducendo al minimo il rischio di errori.

Un aspetto centrale di questo approccio è la capacità di adattarsi rapidamente ai cambiamenti della domanda del mercato. Grazie alla simulazione, l'azienda ha potuto testare diverse configurazioni operative, ottimizzando l'uso delle risorse e garantendo una produzione costante di alta qualità. Questo ha permesso a Master Italy di rispondere efficacemente alle richieste dei clienti, migliorando la competitività aziendale e riducendo gli scarti.

Esistono allo stesso tempo piattaforme di simulazione ad eventi discreti come FlexSim, ampiamente analizzata nell'articolo "Research Advances in the Application of FlexSim: A Perspective on Machine Reliability, Availability, and Maintainability Optimization". Questa piattaforma è utilizzata per ottimizzare l'affidabilità, la disponibilità e la manutenibilità (RAM) delle macchine in contesti produttivi. L'obiettivo principale dell'articolo è migliorare le prestazioni dei sistemi di produzione industriali attraverso l'analisi RAM, che include l'affidabilità delle macchine, misurata attraverso parametri, come il tempo medio tra i guasti (MTBF) e il tempo medio di riparazione (MTTR), consente di ottimizzare la disponibilità delle macchine e migliorare le prestazioni complessive; la disponibilità dei sistemi, poiché ottimizzare i tempi di utilizzo e ridurre i tempi di attesa delle macchine permette di migliorare l'efficienza operativa; la manutenibilità, cioè la pianificazione e ottimizzazione delle attività di manutenzione, minimizzando i tempi di inattività e migliorando la continuità operativa.

FlexSim consente di simulare scenari complessi e di analizzare i processi produttivi, offrendo alle aziende la possibilità di prendere decisioni basate su dati concreti. Questo approccio permette di testare e valutare diverse configurazioni di produzione prima della loro implementazione, riducendo il rischio di errori e migliorando il controllo qualità.

L'articolo sottolinea che, nonostante l'utilizzo di FlexSim stia crescendo, c'è ancora spazio per ulteriori ricerche, soprattutto in relazione all'integrazione completa dei componenti RAM in un'unica simulazione globale. La capacità di FlexSim di gestire scenari complessi lo rende uno strumento importante per ottimizzare l'efficienza e mantenere elevati standard di qualità nelle operazioni produttive.

Abbiamo visto come la DES sia ampiamente utilizzata nelle simulazioni dei processi produttivi, si nota anche nei numerosi articoli che ne parlano. Un altro, infatti, è “Design and simulation of a flexible manufacturing system for manufacturing operations of railcar subassemblies” in cui si esplora l’uso della **Simulazione ad Eventi Discreti (DES)** e del **Flexible Manufacturing System (FMS)** per migliorare l’efficienza e l’adattabilità nei processi produttivi, concentrandosi in particolare sull’industria ferroviaria per la produzione di sottogruppi di vagoni. La simulazione e la flessibilità nel design dei sistemi di produzione sono essenziali per rispondere alle richieste crescenti di personalizzazione dei prodotti e di variabilità nelle linee di produzione.

Il **Flexible Manufacturing System (FMS)** è progettato per essere modulare e riconfigurabile, con l’obiettivo di gestire più tipi di prodotti sulla stessa linea di produzione, modificando rapidamente la configurazione delle macchine. Tra le tecnologie impiegate in questo sistema, sono centrali i **robot mobili autonomi (AMR)** per il trasporto di materiali, i sensori **RFID** per il tracciamento dei componenti e i **sistemi di assemblaggio robotico**. Queste tecnologie contribuiscono a garantire flessibilità operativa e a ottimizzare l’uso delle risorse, riducendo gli sprechi e i tempi di inattività.

Il documento discute anche l’uso della **simulazione ad eventi discreti**, la DES infatti, ha permesso all’azienda ferroviaria di ottimizzare il flusso dei materiali, identificando colli di bottiglia e inefficienze nel sistema di movimentazione, con il risultato di una maggiore efficienza operativa. Inoltre, il sistema di **automazione e robotica** impiegato nelle fasi di assemblaggio e ispezione ha ridotto gli errori umani, migliorando la precisione dei processi e la qualità dei componenti finali.

I risultati ottenuti dalla simulazione hanno dimostrato che il **Flexible Manufacturing System** progettato è in grado di eseguire in modo efficiente le operazioni di produzione e controllo qualità, riducendo significativamente i tempi di produzione e migliorando la sostenibilità energetica e ambientale del processo. Questo approccio garantisce una maggiore competitività sul mercato, offrendo una produzione più rapida, flessibile e a minore impatto ambientale, perfettamente in linea con gli obiettivi dell’Industria 4.0.

Vediamo ora un’applicazione invece del **machine learning**, affidandosi all’articolo “Machine Learning-Based Surrogate Model for Press Hardening Process of 22MnB5 Sheet Steel Simulation in Industry 4.0”. Applicazione utilizzata per ottimizzare il processo di pressa a caldo dell’acciaio 22MnB5, largamente utilizzato nell’industria automobilistica per la produzione di componenti ad alta resistenza. Il processo di pressa a caldo è complesso e richiede un controllo preciso delle variabili chiave, tra cui la temperatura. Tradizionalmente, la simulazione di questi processi richiede un’elevata capacità computazionale e tempi lunghi.

L’articolo presenta lo sviluppo di un **modello surrogato** basato sul machine learning, che riduce significativamente i tempi di simulazione, consentendo di replicare il comportamento del processo con un’accuratezza di circa 3°C di errore. Questo modello è stato addestrato utilizzando simulazioni termomeccaniche condotte con software come ABAQUS. Grazie alla riduzione dei tempi di simulazione di quattro ordini di grandezza, è stato possibile implementare un controllo qualità quasi in tempo reale, ottimizzando i parametri del processo e garantendo una produzione più efficiente.

L'adozione di questo modello ha migliorato la capacità di prevedere le variabili critiche del processo, permettendo una migliore gestione delle risorse e una riduzione degli scarti. L'applicazione di algoritmi di machine learning ha quindi aumentato la flessibilità del processo produttivo, consentendo rapide modifiche ai parametri operativi per adattarsi alle condizioni variabili del processo.

La riduzione degli scarti e il miglioramento in contemporanea della qualità dei prodotti è un obiettivo ricercato da numerose aziende, soprattutto in ambito manifatturiero. Possiamo trovarne un'altra interessante soluzione nell'articolo "SMART-IC: Smart Monitoring and Production Optimization for Zero-waste Semiconductor Manufacturing" il quale si concentra appunto sull'industria dei semiconduttori, presentando il **framework SMART-IC**, un sistema sviluppato per ridurre gli scarti e migliorare la qualità nella produzione di semiconduttori. Questo settore è particolarmente complesso e richiede un monitoraggio costante delle apparecchiature per evitare difetti che potrebbero compromettere la qualità dei prodotti finali.

Il framework SMART-IC utilizza un **Meta Manufacturing Execution System (Meta-MES)** che integra diagnostica e prognostica, permettendo di ottimizzare la pianificazione e l'esecuzione dei processi produttivi. Il sistema è in grado di rilevare anomalie nei dati raccolti dai sensori delle apparecchiature, identificando eventuali difetti e suggerendo interventi correttivi. Questo approccio proattivo migliora il controllo qualità e riduce i tempi di inattività.

Inoltre, il sistema sfrutta la **manutenzione predittiva**, fornendo previsioni accurate sulle condizioni operative delle apparecchiature e suggerendo interventi preventivi per evitare guasti. Il framework SMART-IC rappresenta una soluzione avanzata per rispondere alle sfide dell'Industria 4.0, ottimizzando l'efficienza produttiva e riducendo significativamente gli scarti.

Se invece parliamo di industria metallurgica, non possiamo non parlare di sistemi PLC (Programmable Logic Controller) o IoT, integrati nelle fornaci per lingotti d'acciaio, analizzati nell'articolo "Agent Based Modelling and Simulation of Computer Control Systems for Steel Ingot Furnaces", in cui si esplora come l'automazione possa migliorare l'efficienza produttiva e la qualità dei prodotti. I PLC controllano e monitorano le operazioni dei forni in tempo reale, riducendo gli errori umani e ottimizzando le condizioni operative. I sensori IoT collegati ai PLC raccolgono dati critici, come la temperatura e il flusso di gas, che vengono poi utilizzati per monitorare e regolare il processo in maniera continua.

L'integrazione dei sistemi IoT e PLC ha permesso di ridurre significativamente i tempi di funzionamento dei forni, passando da cicli operativi di 5-8 ore a 3-6 ore. Questo ha comportato un aumento dell'efficienza energetica e un miglioramento della qualità del prodotto finale. L'automazione ha inoltre ridotto il rischio di errori di produzione, garantendo standard qualitativi più elevati e una maggiore sostenibilità operativa.

Un fattore che incide molto per un'azienda sono le condizioni in cui è costretta a lavorare, che spesso possono limitare l'utilizzo di determinate tecnologie. Nell'articolo "A simulation-based

quality variance control system for the environment-sensitive process manufacturing industry” si introduce un sistema di controllo della qualità basato sulla simulazione, sviluppato per industrie manifatturiere che operano in condizioni ambientali sensibili, come la produzione chimica o alimentare. Queste industrie sono particolarmente vulnerabili alle variazioni ambientali, come temperatura e umidità, le quali possono influenzare significativamente la qualità dei prodotti.

Il sistema proposto utilizza tre componenti principali:

- **Modulo di calibrazione dell'ambiente interno:** Questo modulo predice i parametri ambientali futuri (ad esempio, temperatura e umidità) utilizzando dati storici e previsioni meteorologiche esterne, migliorando così la precisione delle impostazioni operative.
- **Modulo di previsione della qualità:** Questo modulo costruisce modelli matematici che quantificano l'impatto dei parametri di processo e ambientali sull'indicatore di qualità del prodotto, garantendo previsioni accurate delle variazioni di qualità.
- **Motore di simulazione:** Il motore valuta diverse combinazioni di parametri di processo per trovare le impostazioni ottimali che consentono di mantenere costante la qualità del prodotto, nonostante le variazioni ambientali.

Il vantaggio di questo sistema risiede nella sua capacità di adattarsi dinamicamente alle condizioni ambientali mutevoli. Questo approccio proattivo alla gestione della qualità permette alle aziende di evitare difetti e scarti che deriverebbero da parametri ambientali non controllati. Il sistema è particolarmente efficace nel garantire una produzione costante e di alta qualità in scenari industriali complessi, dove le condizioni esterne possono variare in modo imprevedibile.

5.3 RECAP DEGLI ARTICOLI

Nel capitolo precedente sono stati analizzati diversi articoli scientifici relativi all'applicazione delle simulazioni nel controllo qualità dei processi produttivi. Di seguito ne viene fornito un riassunto contenente le tecniche più utilizzate e le principali parole chiave emerse.

Articoli analizzati:

- 1- **"Challenges and opportunities on AR/VR technologies for manufacturing systems in the context of industry 4.0":**
 - Tecnologie AR/VR per il controllo qualità e l'ottimizzazione della produzione. I lavoratori possono usare occhiali AR per ispezionare i prodotti in tempo reale, riducendo errori e migliorando la precisione.
- 2- **"Simulation-Based Robust Scheduling for Smart Factories Considering Improved Test Strategies":**
 - Ottimizzazione del controllo qualità attraverso strategie di test dinamiche che integrano la produzione e la qualità. Uso di modelli decisionali e inferenza bayesiana per migliorare la resilienza del processo produttivo.

3- **"PRODUCTION COST CALCULATION APPROACH BASED ON DATA COLLECTED DURING MANUFACTURING PROCESS":**

- L'uso delle carte di controllo statistico (SPC) per il monitoraggio delle variabili di produzione e la riduzione dei costi legati alla qualità.

4- **"Improvement of 3D printing polymer simulations considering converting G-code to Abaqus":**

- Simulazioni meccaniche di prodotti stampati in 3D, con una nuova tecnica di conversione del G-code in script per Abaqus, che migliora la previsione del comportamento meccanico e l'ottimizzazione dei parametri di stampa.

5- **"Simulation uncertainty determination of single flank rolling tests using Monte Carlo simulation and skin model shapes for zero defect manufacturing of micro gears":**

- Simulazione Monte Carlo applicata al controllo qualità nella produzione di microingranaggi, ottimizzando la produzione a zero difetti e riducendo l'incertezza nei test.

6- **"Digital Twin of Experimental Smart Manufacturing Assembly System for Industry 4.0 Concept":**

- Il digital twin per l'ispezione continua e il monitoraggio in tempo reale del processo produttivo. Viene migliorata la qualità del prodotto attraverso la sincronizzazione tra sistema fisico e virtuale.

7- **"Digital twin for human-robot collaboration enhancement in manufacturing systems: Literature review and direction for future developments":**

- Applicazione del digital twin per migliorare la collaborazione uomo-robot nel contesto produttivo, aumentando sicurezza, efficienza e flessibilità nei processi.

8- **"Continuous engineering for Industry 4.0 architectures and systems":**

- Digital twin e macchine riconfigurabili per garantire la flessibilità della produzione e la qualità dei prodotti attraverso il monitoraggio continuo e la riprogrammazione automatica.

9- **"Discrete Event Simulation for the Analysis and Re-Engineering of Production and Logistics Cycles: The Case of Master Italy Company":**

- L'uso della simulazione a eventi discreti (DES) per identificare inefficienze nella produzione e ottimizzare il controllo qualità, riducendo scarti e tempi di inattività.

10- "Research Advances in the Application of FlexSim: A Perspective on Machine Reliability, Availability, and Maintainability Optimization":

- Applicazione di FlexSim per ottimizzare l'affidabilità, disponibilità e manutenibilità delle macchine nei contesti produttivi, migliorando la qualità del prodotto.

11- "Design and simulation of a flexible manufacturing system for manufacturing operations of railcar subassemblies":

- Simulazione ad eventi discreti e Flexible Manufacturing System (FMS) nell'industria ferroviaria per migliorare flessibilità ed efficienza nella produzione di sottogruppi di vagoni.

12- "Machine Learning-Based Surrogate Model for Press Hardening Process of 22MnB5 Sheet Steel Simulation in Industry 4.0":

- Modelli surrogati basati sul machine learning per ridurre i tempi di simulazione e migliorare il controllo qualità nella pressa a caldo di acciaio ad alta resistenza.

13- "SMART-IC: Smart Monitoring and Production Optimization for Zero-waste Semiconductor Manufacturing":

- Framework SMART-IC per ridurre gli scarti e migliorare la qualità nella produzione di semiconduttori tramite diagnosi e prognosi integrate.

14- "Agent Based Modelling and Simulation of Computer Control Systems for Steel Ingot Furnaces":

- L'uso di PLC e IoT per il controllo e monitoraggio in tempo reale delle operazioni nei forni per lingotti d'acciaio, migliorando efficienza e qualità del prodotto.

15- "A simulation-based quality variance control system for the environment-sensitive process manufacturing industry":

- Sistema basato su simulazioni per controllare la qualità in industrie sensibili all'ambiente (es. alimentare, chimica), ottimizzando le condizioni di produzione nonostante le variazioni ambientali.

Tecniche utilizzate

Le principali tecniche emerse dall'analisi degli articoli includono:

- **Realtà Aumentata (AR) e Realtà Virtuale (VR):** Queste tecnologie offrono strumenti avanzati per il controllo qualità, permettendo una gestione più efficiente e accurata dei processi produttivi.
- **Digital Twin:** Replica virtuale del sistema fisico che consente di monitorare e ottimizzare la produzione in tempo reale, migliorando il controllo qualità.
- **Simulazione Monte Carlo:** Utilizzata per ridurre l'incertezza e migliorare la previsione della qualità dei prodotti, soprattutto in contesti come la microproduzione.
- **Algoritmo di Cross-Entropy (CE):** Tecnica utilizzata per ottimizzare le strategie di test nelle fabbriche intelligenti.
- **Carte di controllo statistico (SPC):** Strumento per monitorare costantemente le variabili di processo e garantire la conformità agli standard di qualità.
- **Simulazione ad Eventi Discreti (DES):** Utilizzata per identificare inefficienze nella produzione e ottimizzare i flussi produttivi, con impatti positivi sul controllo qualità.
- **Machine Learning:** Applicato per ridurre i tempi di simulazione e ottimizzare il controllo qualità in tempo reale.

Parole chiave

- Industria 4.0
- Controllo qualità
- Realtà Aumentata (AR)
- Realtà Virtuale (VR)
- Simulazione Monte Carlo
- Digital Twin
- Algoritmo di Cross-Entropy
- Carte di controllo statistico (SPC)
- Simulazione ad Eventi Discreti (DES)
- Manifattura Zero Difetti (ZDM)
- Machine Learning

In conclusione, gli articoli esaminati mostrano come le tecnologie di simulazione stiano svolgendo un ruolo fondamentale nell'ottimizzazione del controllo qualità e nella riduzione dei difetti produttivi. Queste tecniche non solo migliorano la qualità del prodotto finale, ma contribuiscono anche a rendere i processi produttivi più efficienti e flessibili, rispondendo alle esigenze sempre più complesse dell'Industria 4.0.

6. Conclusioni

In questa tesi è stata condotta un'analisi approfondita sulle tecniche di simulazione applicate ai processi produttivi, con un focus particolare sul controllo qualità, tenendo come obiettivo principale quello di comprendere come l'utilizzo di queste simulazioni possa migliorare l'efficienza produttiva, riducendo di conseguenza i difetti sui prodotti finali. Tutto questo mantenendo sempre l'attenzione su come queste tecnologie siano integrate nel contesto dell'industria 4.0.

Nel primo capitolo, ho analizzato lo sviluppo storico della simulazione, a partire addirittura dal I sec. a.C., e il suo ruolo crescente nelle industrie moderne. È stato evidenziato come, grazie alle nuove tecnologie, le simulazioni siano diventate essenziali nella modellazione e ottimizzazione dei processi produttivi, anche dei più complessi, assistendo così le aziende nel decision making, permettendo loro di testare scenari diversi senza dover intervenire fisicamente sulla linea di produzione.

Il secondo invece tratta dell'ormai stretto legame tra simulazione e industria 4.0, con enfasi sull'integrazione di tecnologie digitali come l'Internet of Things (IoT), il machine learning e i digital twin, strumenti che consentono, tra le altre cose, il monitoraggio continuo dei processi produttivi permettendo a chi li utilizza di tenere sempre sotto controllo il ciclo di lavorazione. È evidenziato appunto come il fatto di raccogliere ed elaborare grandi quantità di dati in tempo reale abbia rivoluzionato la gestione e il controllo dei processi, rendendo possibile la prevenzione dei difetti prima che si verifichino.

Il capitolo successivo invece ha più il focus sul controllo qualità in sé, con un excursus sull'evoluzione storica fino alle tecniche più moderne. È messa in prima pagina l'importanza di un controllo qualità integrato e proattivo, assistito da simulazioni che permettono di identificare potenziali problemi sin dalle prime fasi della produzione. Risaltano diverse tecniche, tra le più rilevanti le carte di controllo statistico (SPC), la simulazione Monte Carlo e tecnologie avanzate come l'AR/VR.

Nel capitolo dedicato al software di simulazione, la panoramica riguarda ovviamente varie tipologie di software e le loro applicazioni, con riferimenti a casi di studio reali, in aziende in cui l'utilizzo di questi programmi è stato fondamentale per l'ottimizzazione delle fasi operative nei cicli di produzione.

Attraverso le testimonianze di queste imprese è stato facile osservare e comprendere come l'implementazione di questi software permetta alle aziende di ridurre costi operativi, ottimizzare le risorse e garantire prodotti conformi agli standard qualitativi.

Per finire, l'analisi degli articoli scientifici ci ha permesso quasi di toccare con mano ciò che significa avere all'interno della propria azienda la possibilità di usufruire di queste tecnologie. Ci ha fornito inoltre un quadro generale e dettagliato delle diverse applicazioni della simulazione nel controllo qualità, con particolare attenzione alle PMI. Infatti, si dimostra come anche con risorse limitate, al giorno d'oggi si possano comunque trarre grandi benefici dall'adozione di queste ricostruzioni virtuali, mantenendo un'elevata competitività sul mercato.

Risultati raggiunti:

Per riepilogare le principali consapevolezze acquisite dopo la lettura della tesi abbiamo, come più importante, il fatto che la simulazione per i processi produttivi rappresenta una risorsa essenziale per le aziende moderne. Infatti, essa permette la:

- Riduzione dei difetti di produzione: attraverso l'identificazione e correzione di potenziali problemi in fase di progettazione del ciclo produttivo.
- Ottimizzazione delle risorse: le aziende hanno modo di testare diverse configurazioni produttive e scegliere quella più efficiente
- Integrazione del controllo qualità: permette infatti di integrare il controllo qualità in ogni fase del processo produttivo rendendo così possibile un monitoraggio continuo
- Competitività delle PMI: proprio perché anche le piccole e medie imprese possono avere accesso a questi tipi di innovazione tecnologiche

Per concludere, come già ripetuto e ripetuto, la simulazione dei processi produttivi è fondamentale al giorno d'oggi per le imprese, soprattutto quelle manifatturiere, poiché essenziale per il miglioramento della qualità e dell'efficienza operativa dei cicli di produzione. Il suo impiego continuerà a crescere esponenzialmente con l'avvento di nuove tecnologie, e le aziende che saranno in grado di adottarle fin da subito, saranno anche in grado di essere più competitive e sostenibili nel lungo termine.

7. BIBLIOGRAFIA

7 tipi di simulatori militari visti a Itec 2019 | Wired Italia. (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from <https://www.wired.it/attualita/tech/2019/05/17/simulatori-militari-itec/>.

Storia della simulazione - YouTube. (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from <https://www.youtube.com/watch?v=j-9p1AXNziU>

Assicurazione e controllo qualità: differenze | Project Management Center. (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from <https://www.humanwareonline.com/project-management/center/differenze-assicurazione-controllo-qualita/>.

Baker, Meredith., Wooden, Mark., & Australia. Bureau of Immigration Research. (1992). *Immigrant workers in the communication industry.* Australian Govt. Pub. Service.

Case Study: Finding Increased Throughput | FlexSim. (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from <https://www.flexsim.com/case-studies/increased-throughput-material-handling/>.

castelli_robortapia_tesi. (n.d.).

Chrysler increases revenue by \$1m per day | Simul8 Simulation Software. (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from <https://www.simul8.com/case-studies/line-balancing-chrysler-brampton>.

Come funzionano i modelli di previsione del clima? - MeteoSvizzera. (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from <https://www.meteosvizzera.admin.ch/chi-siamo/meteosvizzera-blog/it/2023/10/come-funzionano-i-modelli-di-previsione-del-clima.html>.

Controllo Qualità – Tintoria Finissaggio 2000. (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from <https://www.tf2000.it/lavorazioni/controllo-qualita/>.

Cos'è la simulazione Monte Carlo? | IBM. (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from <https://www.ibm.com/it-it/topics/monte-carlo-simulation>.

Cos'è uno standard? (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from <https://www.qualitiamo.com/norme/cose%20standard.html>.

Evaluating Introduction of Warehouse Automation Systems – AnyLogic Simulation Software. (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from <https://www.anylogic.com/resources/case-studies/evaluating-introduction-of-warehouse-automation-systems/>.

Hermann, M., Otto, B., & Pentek, T. *. (209 C.E.). *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29269.22248>.

industria 4.0 - Cerca con Google. (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from https://www.google.com/search?q=industria+4.0&oq=industria+4.0&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUyBggAEEUYOTIGCAEQRRhAMgwiAhAAGAoYsQMYgAQyDAgDEAAyChixAxiABDIJCAQQABgKGIAEMgkIBRAAGAoYgAQyCQgGEAAyChiABDIJCAcQABgKGIAE0gEINTEwMmowajeoAgCwAgA&sourceid=chrome&ie=UTF-8#fpstate=ive&vld=cid:435e4254,vid:HdJXtFQ1oI4,st:0

UiLCJ1cmwiOiJodHRwczovL3BsbS5zdy5zaWVtZW5zLmNvbS9lbi1VUy90ZWNUb21hdGl4LyIsImNvbnRleHQiOmZhbnHNlSwibG9jYWxljoiZW4tVVMifQ==
Verifica e controllo della qualità nella produzione | PTC (IT). (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from <https://www.ptc.com/it/blogs/ar/inspection-and-quality-control-in-manufacturing>.

What is Cost of Quality (COQ)? | ASQ. (n.d.). Retrieved May 3, 2024, from <https://asq.org/quality-resources/cost-of-quality>.

Articoli:

Challenges and opportunities on AR/VR technologies for manufacturing systems in the context of industry 4.0: A state of the art review, Eswaran, M., Bahubalendruni, M.V.A.R., 2022.

Simulation-based robust scheduling for smart factories considering improved test strategies, Hipp, U., Zeh, T., Klein, W., ...Rothbauer, S., Zeller, M., 2020.

PRODUCTION COST CALCULATION APPROACH BASED ON DATA COLLECTED DURING MANUFACTURING PROCESS, Krzesniak, G., 2022.

Improvement of 3D printing polymer simulations considering converting G-code to Abaqus, Hachimi, T., Majid, F., Zekriti, N., Rhanim, R., Rhanim, H., 2024

Simulation uncertainty determination of single flank rolling tests using monte carlo simulation and skin model shapes for zero defect manufacturing of micro gears, Gauder, D., Bott, A., Gözl, J., Lanza, G., 2023.

Digital twin of experimental smart manufacturing assembly system for industry 4.0 concept, Židek, K., Pitel', J., Adámek, M., Lazorík, P., Hošovský, A., 2020

Digital twin for human-robot collaboration enhancement in manufacturing systems: Literature review and direction for future developments, Baratta, A. , Cimino, A. , Longo, F. , Nicoletti, L., 2024

Integrating multiple industry 4.0 approaches and tools in an interoperable platform for manufacturing SMEs, Cimino, A., Grazia Gnoni, M., Longo, F., Solina, V., 2023.

Continuous engineering for Industry 4.0 architectures and systems, Antonino, P.O., Capilla, R., Kazman, R., ...Müller-Zhang, Z., Salamanca, V., 2022.

Discrete Event Simulation for the Analysis and Re-Engineering of Production and Logistics Cycles: The Case of Master Italy Company, Intini, F., Merla, P., Pagliara, R., ...Stigliano, G., Veneto, D., 2024.

Design and simulation of a flexible manufacturing system for manufacturing operations of railcar subassemblies, Daniyan, I., Mpofo, K., Ramatsetse, B., ...Monzambe, G., Sekano, E., 2020.

Machine Learning-Based Surrogate Model for Press Hardening Process of 22MnB5 Sheet Steel Simulation in Industry 4.0, Abio, A., Bonada, F., Pujante, J., ...Lange, D., Pujol, O., 2022.

SMART-IC: Smart Monitoring and Production Optimization for Zero-waste Semiconductor Manufacturing, Sidahmed Alamin, K.S., Chen, Y., Gaiardelli, S., ...Macli, E., Vinco, S., 2022.

Agent Based Modelling and Simulation of Computer Control Systems for Steel Ingot Furnaces, Somo, G.N., Daniyan, I.A., Swanepoel, J., 2023.

A simulation-based quality variance control system for the environment-sensitive process manufacturing industry, Tang, L., He, M., Zhang, X., Ba, Y., Ren, C., 2017

Research Advances in the Application of FlexSim: A Perspective on Machine Reliability, Availability, and Maintainability Optimization, Ruwaida Aliyu, Ainul Akmar Mokhtar, 2021.