



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNARIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale

Simulazione dei processi produttivi: un focus sulle procedure di manutenzione
Simulation of production processes: a focus on maintenance procedures

RELATORE:

Prof.ssa Sara Antomarioni

TESI DI LAUREA DI:

Giovanni Gubinelli

A.A. 2023/2024

Sommario

INTRODUZIONE	3
1. IL CONCETTO DI MANUTENZIONE	5
1.1 STORIA DELLA MANUTENZIONE	5
1.2 VARI TIPI DI MANUTENZIONE	6
1.3 TECNOLOGIE EMERGENTI PER LA MANUTENZIONE.....	8
1.4 COSTI E SFIDE AFFRONTATI DALLA MANUTENZIONE.....	10
1.5 NORME UNI PER LA MANUTENZIONE	11
2. CONCETTO DI SIMULAZIONE DELLA PRODUZIONE	13
2.1 PASSI PER UNA CORRETTA SIMULAZIONE.....	13
2.2 VARI TIPI DI SIMULATORI.....	15
2.3 EFFICIENZA DELLA SIMULAZIONE DEL MODELLO.....	17
2.4 CONSIDERAZIONI	18
3. SIMULAZIONE APPLICATA ALLA MANUTENZIONE	20
3.1 APPLICAZIONI DELLA SIMULAZIONE NELLA MANUTENZIONE	20
3.2 METODI PER LA SIMULAZIONE	22
3.3 STEP DELLO STUDIO DI SIMULAZIONE.....	23
3.4 VANTAGGI E COSTI DELLA SIMULAZIONE.....	26
4. ANALISI DELLA LETTERATURA	27
4.1 METODOLOGIE PER OTTIMIZZARE I VARI TIPI DI MANUTENZIONE	27
4.2 DOCUMENTI CHE TRATTANO PROGETTAZIONE E IMPLEMENTAZIONE TRAMITE IIOT.....	34
4.3 APPROCCI PER OTTIMIZZARE LE PRESTAZIONI DI SISTEMI DI PRODUZIONE	39
4.4 DOCUMENTI DI ANALISI E VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI	42
4.5 CONSIDERAZIONI SULLA LETTERATURA ESISTENTE	45
CONCLUSIONE	47
BIBLIOGRAFIA:	49

INTRODUZIONE

Il concetto di manutenzione ha acquisito una crescente rilevanza nell'evoluzione delle attività produttive e industriali. Manuteneere significa garantire che gli impianti, le macchine e le infrastrutture rimangano operativi e sicuri nel tempo, conservando le loro prestazioni e prevenendo guasti che potrebbero interrompere il processo produttivo. Secondo la definizione fornita dalle norme UNI, la manutenzione consiste in tutte quelle azioni tecniche e amministrative volte a mantenere o ripristinare uno specifico sistema affinché possa svolgere la funzione richiesta. Storicamente, le prime forme di manutenzione risalgono alla bottega artigiana, dove l'artigiano era l'unico responsabile della qualità del prodotto e dell'efficienza degli strumenti di lavoro. Tuttavia, con l'avvento della Rivoluzione Industriale, l'approccio alla manutenzione ha subito un radicale cambiamento. Con l'introduzione della produzione di massa e la divisione del lavoro, la manutenzione è diventata un'attività separata e specializzata. L'obiettivo principale delle fabbriche dell'epoca non era più solo la qualità del prodotto finito, ma anche l'ottimizzazione dei tempi di produzione. Questo ha portato alla nascita di figure professionali specializzate come manutentori, progettisti e controllori della produzione. Nel corso del tempo, la manutenzione è evoluta da un'azione reattiva a una strategia preventiva e predittiva. La manutenzione correttiva, la più antica, interveniva solo a seguito di un guasto, mentre quella preventiva, introdotta successivamente, mirava a prevenire i guasti attraverso interventi pianificati in anticipo. Negli ultimi decenni, grazie all'avvento di nuove tecnologie come l'Internet of Things (IoT) e l'intelligenza artificiale (IA), è emersa la manutenzione predittiva. Questa tipologia si basa sulla raccolta e analisi di dati in tempo reale per prevedere quando un impianto o una macchina avrà bisogno di interventi, riducendo così i tempi di inattività e migliorando l'efficienza complessiva. La manutenzione si articola in varie tipologie, ognuna delle quali ha specifiche finalità e metodi operativi. La manutenzione preventiva può essere suddivisa in ciclica, su condizione e predittiva. Quella ciclica si basa su un piano programmato basato su intervalli temporali prestabiliti, mentre quella su condizione utilizza parametri misurabili per determinare quando eseguire interventi. La manutenzione predittiva, la più moderna, sfrutta sensori e algoritmi per prevedere guasti e pianificare azioni preventive, aumentando l'affidabilità e la disponibilità degli impianti. Con l'integrazione delle nuove tecnologie, la manutenzione è diventata un elemento chiave nella gestione delle attività aziendali. L'Internet of Things permette di monitorare continuamente gli impianti attraverso sensori che raccolgono dati sui parametri critici come temperatura, pressione e vibrazioni, consentendo interventi tempestivi

prima che si verifichino guasti. L'intelligenza artificiale, d'altro canto, analizza questi dati per fornire previsioni accurate sui tempi di manutenzione necessari, riducendo i tempi di fermo e i costi operativi. Inoltre, l'uso della realtà aumentata e dei droni sta contribuendo a migliorare la sicurezza e l'efficienza delle operazioni di manutenzione, soprattutto in ambienti difficili da raggiungere. Infine, la manutenzione non è solo un obbligo tecnico, ma anche un elemento essenziale per la sicurezza. Interventi di manutenzione adeguati garantiscono che i sistemi funzionino in modo sicuro, evitando incidenti potenzialmente catastrofici. La sicurezza sul lavoro è uno degli aspetti più importanti della manutenzione, soprattutto in settori critici come l'energia, i trasporti e la sanità. L'evoluzione della manutenzione verso modelli sempre più predittivi e automatizzati continuerà a offrire nuove opportunità per migliorare l'efficienza, la sicurezza e la sostenibilità delle operazioni.

Nel capitolo uno parlo del concetto di manutenzione, partendo dalla storia della manutenzione, passando per le varie innovazioni che sono state fatte negli anni fino ad arrivare a tutte le tipologie di manutenzione che ci sono ora, concludendo il capitolo infine con le varie norme sulla manutenzione.

Nel capitolo due parlerò del concetto di simulazione della produzione, partendo dai passi da fare per effettuare una corretta simulazione, vedendo poi i vari tipi di simulatori.

Nel capitolo tre parlerò di simulazione applicata alla manutenzione vedendo le varie applicazioni e i vari metodi, passando i step per effettuare una simulazione perfetta vedendo i vari costi e vantaggi

Nel capitolo quattro parlo dell'analisi della letteratura, vado a vedere vari articoli su differenti argomenti per capire le differenti argomentazioni che possono esserci sulla simulazione legata alla manutenzione.

1. IL CONCETTO DI MANUTENZIONE

Introducendo il concetto di manutenzione non possiamo fare altro che parlare della sua definizione:

“La manutenzione è la scienza che finalizza le attività umane ad un impiego economico e sostenibile delle risorse, nella progettazione e nella gestione dei sistemi antropizzati e nella conservazione dei sistemi naturali.” La manutenzione ha, quindi, il compito di adeguare e, se possibile, migliorare costantemente i sistemi alle esigenze espresse dai loro utilizzatori, ricorrendo, dove necessario, alla loro riprogettazione o alla loro sostituzione, quando i nuovi sistemi si rendono economicamente più vantaggiosi.

1.1 STORIA DELLA MANUTENZIONE

Le prime forme di manutenzione sono da associare alla vecchia bottega artigiana, in cui l'unico attore del processo produttivo era l'artigiano, che garantiva e controllava qualità e conservazione del prodotto finito in prima persona. Egli compiva implicitamente tutte le azioni di manutenzione che riteneva necessarie per conseguire la massima qualità. Più avanti, con l'avvenire della rivoluzione industriale, si introdussero metodi di meccanizzazione e specializzazione del lavoro, che venne organizzato scientificamente secondo i criteri esposti da Frederick Winslow Taylor e applicati in maniera rigida ed esaustiva nelle fabbriche di Henry Ford. Con la diffusione di questi criteri, si abbandonò l'idea che il prodotto di qualità fosse quello costruito dall'artigiano e, con questo, anche la sua idea di manutenzione; l'obiettivo primario era quello di far sì che l'impianto producesse sempre al massimo delle sue capacità. La specializzazione del lavoro portò alla nascita di nuove figure professionali, come i progettisti, i controllori dei tempi, i programmatori, gli esperti delle varie fasi di fabbricazione ed il manutentore. Appare evidente una sostanziale differenza rispetto alla bottega artigiana, nella quale la funzione della manutenzione era implicita per la qualità del prodotto, mentre, nelle fabbriche orientate alla produzione quantitativa, diventa una funzione esplicita. Appare altrettanto evidente la stretta connessione tra qualità e manutenzione. Inizialmente, il controllo qualità veniva effettuato solo sul prodotto finale, utilizzando spesso metodologie statistiche di tipo distruttivo. Il controllo a posteriori, basato sulle leggi probabilistiche, era costoso perché richiedeva di scartare definitivamente i prodotti ritenuti qualitativamente non accettabili, e comunque, era poco utile quanto a possibili interventi di adeguamento durante il ciclo produttivo. Solo alla fine degli anni cinquanta si capì che, per rilanciare la qualità della produzione, era necessario fornire nuovi stimoli alle figure professionali addette, così nacquero nuovi metodi di gestione della produzione, come il “just in time”. Essi erano volti a valorizzare, non solo il prodotto finale, ma anche ogni fase del processo, proponendo il concetto che, solamente con il massimo

impegno in ciascuna fase del ciclo, è possibile ottenere un servizio di massima qualità. La manutenzione è essenziale, ed è fondamentale farla nel modo giusto; farla correttamente e periodicamente vuol dire conservare l'efficienza e la sicurezza nel tempo, significa mantenere gli impianti e i relativi componenti sicuri ed affidabili. L'assenza di manutenzione, o una manutenzione inadeguata, possono essere causa di situazioni pericolose. Un'azienda deve essere in grado di prevenire i guasti, ma anche di progettare e monitorare un sistema di gestione ottimale in grado di incorporare nuove tecnologie disponibili. Quando si parla di manutenzione degli impianti, non ci si limita a considerare solo l'esecuzione di determinati lavori, ma la manutenzione è una pluralità di attività, che spaziano dalla diagnostica alla gestione dei materiali, dai sistemi informativi alla documentazione, dalla formazione delle risorse umane al loro utilizzo ottimale. La manutenzione deve progettare, organizzare e realizzare degli interventi con lo scopo di garantire il buon stato di conservazione delle attrezzature nei periodi di funzionamento minimizzando gli intervalli di fermo.

1.2 VARI TIPI DI MANUTENZIONE

La norma UNI 10147 del 2003 riconosce i seguenti tipi di manutenzione:

MANUTENZIONE AUTONOMA: qui rientrano tutte quelle attività eseguite dal manutentore come la pulizia, la lubrificazione o le piccole regolazioni. Si tratta dunque di semplici ispezioni i cui esiti devono essere registrati su appositi cartellini applicati direttamente sugli asset stessi. Per avere uno storico sempre aggiornato e facilmente consultabile di queste attività, è buona norma quella di digitalizzare gli esiti di queste ispezioni immettendoli all'interno di un software di manutenzione.

MANUTENZIONE PREVENTIVA: è una manutenzione che riguarda tutte quelle attività che permettono di riconoscere il funzionamento attuale di un sistema, in modo da prendere i provvedimenti necessari a rallentare il normale degrado. L'obiettivo è, quindi, quello di estendere il ciclo di vita degli asset e limitare i fermi macchina, o, più in generale, le altre azioni di manutenzione correttiva, di cui parleremo poi, in modo da prevenire un eccesso degrado qualitativo e quantitativo della produzione. Questo obiettivo viene raggiunto tramite ispezioni periodiche o sulla base di particolari metriche scelte dal manutentore, cosicché interventi di previsione necessari possano essere effettuati prima che si palesi un'usura eccessiva o un guasto. Abbiamo tre tipi di manutenzione preventiva: la manutenzione periodica, quella su condizione e la manutenzione predittiva:

la **manutenzione periodica**: è chiamata anche manutenzione ciclica, è eseguita in accordo con un piano di manutenzione programmata (piano di manutenzione stabilito su base temporale); qui il fattore determinante è il tempo di utilizzo di un determinato macchinario o impianto;

la **manutenzione su condizione**: si basa sulla lettura di contatori o sul monitoraggio di metriche, quali il numero di chilometri effettuati, per esempio. Andiamo ad impostare dei valori nel nostro server che, una volta raggiunti, ci andranno a generare un ordine di lavoro in modo automatico;

la **manutenzione predittiva**: è la manutenzione più moderna, è un tipo di manutenzione che viene effettuata a seguito dell'individuazione e della misurazione di uno o più parametri attraverso sensori applicati agli asset o agli impianti. Una volta aver estrapolato i parametri ed elaborato i dati acquisiti, tramite l'utilizzo di un software, il software CMMS, ci permette di predire quando l'asset avrà bisogno di un'azione di manutenzione con l'obiettivo di prevenire guasti e fallimenti. La differenza che abbiamo con la manutenzione su condizione è che la manutenzione predittiva utilizza l'intelligenza artificiale.

MANUTENZIONE CORRETTIVA: è la modalità più semplice ed antiquata tra tutti i tipi di manutenzione, in quanto prevede semplicemente di attendere senza intervenire il presentarsi di un fermo macchina o, comunque, di una rottura di un componente o di un asset. Andiamo quindi ad effettuare un intervento a valle di una situazione già compromessa, con l'unico scopo di ripristinare la funzionalità del macchinario. Dopo aver capito quando si va ad utilizzare, possiamo quindi dire che la manutenzione correttiva rappresenta l'insieme di azioni manutentive che non concorrono ad aumentare il valore o la produttività e le prestazioni di un sistema, ma tendono ad un semplice ripristino dello status. Tra le varie tipologie di manutenzione correttiva abbiamo:

fail repair: ripristino di un asset guasto al suo stato di operatività;

revisione: ripristino di un asset al suo stato di servizio, come definito dagli standard di manutenzione;

recupero: smaltimento delle parti dei macchinari che non possono essere riparate e sostituzione di parti recuperate da macchinari non riparabili;

manutenzione: riparazione a seguito di un'azione correttiva;

ricostruzione: smontaggio delle parti di un bene, con ripartizione di quelle utilizzabili e sostituzione di quelle non riutilizzabili con lo scopo di ripristinarlo in linea con gli standard e le prestazioni

originali. La differenza con la manutenzione preventiva è che, quest'ultima veniva eseguita periodicamente per ridurre la probabilità di guasti, mentre, quella correttiva viene eseguita dopo un guasto, per questo è la tipologia di manutenzione più costosa, dal momento che intervenire in un macchinario già compromesso può portare a tempi più lunghi e dunque a perdite di produzione anche importanti.

MANUTENZIONE MIGLIORATIVA: è forse la più nobile tra tutte le politiche e le strategie manutentive. A differenza dei tipi di manutenzione descritti prima, qui si interviene non per rimediare ad un guasto o prevenirlo, ma si interviene per accrescere il valore di un bene o di un impianto. Si tratta dunque di una tecnica di manutenzione che può portare ingenti benefici anche a livello di sicurezza aziendale, per questo è uno dei più importanti tipi di interventi che possiamo fare a livello strategico.

La norma UNI 11063 del 2017 invece, classifica gli interventi in due principali tipi di manutenzione, a seconda dello scopo per cui sono svolte abbiamo: manutenzione ordinaria e manutenzione straordinaria.

La **manutenzione ordinaria** è un tipo di intervento che comprende le semplici azioni di manutenzione correttiva e preventiva, svolte con l'obiettivo di ripristinare il funzionamento di un asset o di un impianto su cui si è già verificato un guasto, senza però andarne a modificare valore o prestazioni.

La **manutenzione straordinaria** comprende le politiche di manutenzione migliorativa e preventiva più rilevanti, ha come obiettivi quelli di prevenire l'insorgenza di un guasto, di aumentare la disponibilità di un asset e il suo ciclo di vita utile e razionalizzare i costi e contenere i tempi della manutenzione.

1.3 TECNOLOGIE EMERGENTI PER LA MANUTENZIONE

Stanno emergendo sempre più tecnologie per quanto riguarda la manutenzione degli impianti, tutto questo grazie all'innovazione tecnologica che si sta sviluppando nel corso degli anni. Le tecnologie che stanno emergendo di più sono sei:

1. **IOT (internet delle cose):** si riferisce alla rete di dispositivi fisici, veicoli, sensori e altri oggetti incorporati con la tecnologia che consente loro di connettere e scambiare dati. Nella manutenzione degli impianti, l'IOT permette di monitorare i dispositivi e i componenti in tempo reale, raccogliendo dati sulle prestazioni, la temperatura, la pressione, l'umidità e

altri parametri critici. Tali dati possono essere utilizzati per il monitoraggio delle condizioni, la rilevazione di anomalie e la pianificazione della manutenzione preventiva, garantendo un intervento tempestivo prima che si verifichino guasti;

2. **INTELLIGENZA ARTIFICIALE (IA):** si riferisce alla capacità delle macchine di simulare l'intelligenza umana, inclusi il ragionamento, l'apprendimento automatico e l'elaborazione del linguaggio naturale. L'intelligenza artificiale, per quanto riguarda la manutenzione degli impianti, viene utilizzata per l'analisi avanzata dei dati e la creazione di modelli predittivi che consentono di identificare pattern nascosti nei dati storici, rilevare anomalie, prevedere guasti e fornire raccomandazioni per l'intervento. Inoltre, l'IA permette di adottare una manutenzione predittiva e proattiva, che riduce i tempi di fermo, migliora l'efficienza operativa e ottimizza le risorse. Sono stati effettuati anche degli studi che mostrano come l'applicazione di algoritmi di machine learning all'analisi dei dati degli impianti può ridurre i guasti imprevisti fino al 70% e migliorare la produttività fino al 20 %; a riprova che l'IA sta diventando sempre più cruciale per l'ottimizzazione dei processi di manutenzione e la riduzione dei costi operativi.
3. **REALTA AUMENTATA (AR) E REALTA VIRTUALE (VR):** AR e VR sono due tecnologie che combinano il mondo reale con elementi digitali, creando esperienze immersive. Per ciò che concerne la manutenzione degli impianti, l'AR e la VR possono essere utilizzate per fornire informazioni contestuali agli operatori mentre si trovano sul campo, attraverso l'uso di occhiali intelligenti o dispositivi mobili, tramite cui gli operatori possono visualizzare istruzioni di manutenzione, schemi, dati diagnostici e altre informazioni utili sovrapposte all'impianto reale; così si semplifica il processo di manutenzione, si riducono gli errori e si migliora la formazione degli operatori.
4. **DRONI:** stanno diventando sempre più utilizzati nelle manutenzioni degli impianti, grazie al vantaggio di essere dotati di telecamere ad alta risoluzione e sensori che possono essere utilizzati per ispezionare visivamente gli impianti, soprattutto in aree di difficile accesso o pericolose per gli operatori. I droni possono raccogliere immagini dettagliate, registrare video e rilevare anomalie o danni. Così facendo, viene ridotto il rischio per gli operatori, si accelera il processo di ispezione e viene fornita una panoramica completa delle condizioni degli impianti.
5. **ANALISI DEI DATI E MACHINE LEARNING:** consentono di estrarre informazioni significative dei dati storici degli impianti. Con l'analisi dei dati avanzata riusciamo a identificare pattern,

correlazioni e tendenze nascoste che potrebbero non essere rilevabili ad occhio nudo; con il machine learning vengono utilizzati algoritmi per apprendere dei dati passati e generare modelli predittivi per la manutenzione. Questo permette di prevedere guasti imminenti, ottimizzare la pianificazione della manutenzione e prendere decisioni informate basate sui dati.

6. **TECNOLOGIA BLOCKCHAIN:** è una rete decentralizzata e sicura che consente la registrazione immutabile delle transazioni. Per quanto riguarda le manutenzioni degli impianti, la tecnologia può essere utilizzata per creare registri digitali che tracciano le attività di manutenzione, le modifiche agli impianti e altre transazioni. Questo offre trasparenza, tracciabilità e sicurezza ai dati, eliminando la possibilità di alterazioni o manipolazioni. La tecnologia blockchain facilita la condivisione delle informazioni tra le parti interessate, semplifica la gestione delle operazioni e contribuisce a mantenere l'integrità dei dati.

1.4 COSTI E SFIDE AFFRONTATI DALLA MANUTENZIONE

I vari costi che comporta la manutenzione derivano da diversi fattori, come il tipo di attività, la complessità degli interventi, la frequenza della manutenzione e le risorse necessarie per compierla. In più possiamo includere dei costi per il materiale, per il personale, per le strumentazioni e per le eventuali interruzioni dell'attività produttiva che ci portano ad una non produzione quindi ad una non vendita. Possiamo avere costi diretti e indiretti in base a sé sono associati direttamente o no all'esecuzione della manutenzione; poi abbiamo costi di manutenzione correttiva, preventiva e predittiva in base al tipo di manutenzione che scegliamo di applicare. Per cercare di migliorare la sostenibilità economica legata alla manutenzione, si cerca di effettuare una pianificazione preventiva (programmare anticipatamente la manutenzione così da prevenire guasti improvvisi e costosi); si fa quindi una manutenzione predittiva, si va ad investire nella formazione del personale, per garantire che siano in grado di eseguire la manutenzione in modo efficace, si cerca di ottimizzare le risorse per massimizzare l'efficacia della manutenzione e ridurre i costi superflui, andremo ad utilizzare tecnologie innovative e si andranno a fare collaborazioni con fornitori per ridurre i costi. Nella gestione della manutenzione, le varie organizzazioni affrontano numerose sfide, come per esempio, la manutenzione non pianificata che viene effettuata per gestire i guasti imprevisti e i tempi di fermo non pianificati; è una cosa che può verificarsi quando meno ce lo si aspetta e in queste situazioni critiche l'azione più rapida da intraprendere è risolvere questi problemi. L'unica soluzione possibile a questi guasti è quella di implementare una strategia di manutenzione preventiva. Un'altra sfida è quella del monitoraggio e valutazione delle prestazioni che serve per poi

nel futuro apportare miglioramenti; poi c'è la gestione dei costi che ci permette di bilanciare i costi di manutenzione con dei budget limitati garantendo, però, un'elevata affidabilità. La sfida più importante di tutte è quella della pianificazione, che ci permette di coordinare la manutenzione in modo che non interferisca con le altre operazioni; infine possiamo vedere come ultima sfida quella della prioritizzazione, che ci serve a determinare quale attività deve essere svolta per prima essendo la più critica, prima che diventi un compito complesso poi da svolgere. Per quanto riguarda dei casi in cui ha avuto successo la manutenzione, possiamo parlare, per esempio, delle manutenzioni nelle compagnie aeree, che praticano una manutenzione regolare degli aeromobili, che garantiscono la sicurezza dei voli e contribuiscono al successo nel settore dell'aviazione, garantendo un viaggio sicuro per i passeggeri ed evitando incidenti. Un altro esempio è quello delle centrali elettriche, che adottano una manutenzione preventiva ben strutturata, che tende ad evitare guasti improvvisi e a prolungare la durata utile delle attrezzature, così da portare a un funzionamento più efficiente delle centrali elettriche e a minori interruzioni nell'erogazione di energia. Ci sono anche dei casi in cui la manutenzione ha fallito, ad esempio quello dell'esplosione nucleare del reattore nucleare di Chernobyl, che è stata causata anche ad una manutenzione inadeguata ed a violazioni delle procedure di sicurezza; un altro esempio è quello che accadde nel 2003 negli Stati Uniti di America ed in Canada, dove ci fu un black-out dovuto alla mancanza di manutenzione ed alla scarsa gestione della rete elettrica.

1.5 NORME UNI PER LA MANUTENZIONE

Sono state emesse col passare degli anni, varie norme UNI riguardanti gli aspetti generali della manutenzione:

1. **UNI 10144:2006-Classificazione dei servizi di manutenzione:** la norma ha lo scopo di classificare i servizi di manutenzione sotto gli aspetti seguenti: tipologia del servizio, specializzazione del servizio, modalità del servizio, ambito del servizio, al fine di avere un unico riferimento per tutte le norme che riguardano la contrattualistica di manutenzione.
2. **UNI 10146:2007-Criteri per la formulazione di un contratto per la fornitura di servizi finalizzati alla manutenzione:** la norma ha lo scopo di indicare comportamenti idonei per agevolare e tutelare le parti nella stesura degli atti relativi e propedeutici alla stesura di contratti di appalto per la fornitura di servizi di manutenzione. La norma fornisce i criteri tipici per un contratto a trattativa privata, essa è applicabile anche alla pubblica amministrazione, nell'ambito delle prassi formalizzate in uso.

3. **UNI 10449:2008- Criteri per la formulazione e gestione del permesso di lavoro:** la norma ha lo scopo di definire i requisiti minimi per la formulazione, la compilazione e la gestione dei permessi di lavoro. La norma si applica in tutte le aree di lavoro nelle quali sono effettuati lavori di manutenzione, di migioria e modiche assegnati in appalto, per mettere in evidenza e informare i lavoratori dei rischi specifici inerenti all'area di lavoro ed al lavoro stesso. Essa si applica, inoltre, in tutte le aree di lavoro nelle quali sono effettuati lavori di manutenzione, di migioria e modifiche dei beni.
4. **UNI 11063:2017-Definizione di manutenzione ordinaria e straordinaria:** la presente norma definisce i criteri di classificazione delle attività di manutenzione distinguendoli in ordinaria e straordinaria, al fine di fornire un quadro di riferimento che consenta di uniformare i comportamenti degli utenti nella gestione e contabilizzazione delle risorse utilizzate, secondo i criteri della contabilità industriale e generale, in modo coerente e significativo anche sul piano organizzativo e operativo.
5. **UNI 10749:2017- Guida per la gestione dei materiali per la manutenzione:** riguarda gli aspetti generali e le problematiche organizzative, i criteri di classificazione, codifica e unificazione, i criteri per la selezione del materiale da gestire, i criteri di gestione operativa, i criteri di acquisizione, controllo e collaudo ed i criteri amministrativi.

Ci sono ovviamente molte altre normative, ma non sono qui a citarle tutte, ho citato solamente quelle che, secondo me, potevano essere le più importanti. Per quanto riguarda gli sviluppi futuri della manutenzione io credo che saranno sempre più caratterizzati dalla digitalizzazione e dall'automazione con l'avvento dell'industria 5.0. Saranno quindi tecnologie, già spiegate prima, come intelligenza artificiale, internet delle cose ecc. a prendere il sopravvento su tutte le altre attività andando a rivoluzionare completamente il modo in cui la manutenzione veniva pianificata eseguita e gestita. Porterà ovviamente a maggiore efficienza e anche ad una riduzione dei costi e tempi di fermo macchina ridotti. La manutenzione che nel futuro diventerà più diffusa sarà quella su condizione per cercare di evitare dei guasti intervenendo preventivamente.

2. CONCETTO DI SIMULAZIONE DELLA PRODUZIONE

Iniziamo introducendo il concetto di simulazione, descritto come uno strumento sperimentale di analisi molto potente, utilizzato in molti ambiti scientifici e tecnologici dettato dalla difficoltà o impossibilità di riprodurre fisicamente in laboratorio le effettive reali condizioni da studiare e che si avvale delle grandi possibilità di calcolo offerte dai grandi sistemi di elaborazione informatici. Non è altro che la trasposizione in termini logico-matematici di un modello concettuale della realtà; tale modello matematico può essere definito come l'insieme di processi che hanno luogo nel sistema reale studiato e il cui insieme permette di comprendere le logiche di funzionamento del sistema stesso. Essa è assimilabile a una sorta di laboratorio virtuale consentendo spesso anche un abbattimento dei costi di studio rispetto ad esperimenti complessi realizzati in laboratorio reale.

2.1 PASSI PER UNA CORRETTA SIMULAZIONE

Nell'ambito delle simulazioni, acquisisce notevole importanza la simulazione del funzionamento dei processi produttivi e logistici. Tali sistemi sono infatti caratterizzati da elevata complessità, numerose interrelazioni tra i diversi processi che li attraversano, guasti dei segmenti, indisponibilità e stocasticità dei parametri del sistema. Per spiegare, si può fare un esempio di un impianto semplice della produzione di un unico articolo, con solamente due macchine automatiche ed imballaggio manuale; in questo semplice sistema l'arrivo delle materie prime, la durata delle lavorazioni, il tempo necessario agli operatori per imballare sono tutte variabili stocastiche, in quanto il ritmo produttivo e di arrivo non è costante; inoltre, le macchine sono soggette a guasti e manutenzione e gli operatori possono non essere sempre disponibili. La simulazione fa sì che alla fine sia possibile ottenere un gran numero di informazioni utili attraverso un'analisi della realtà a un elevato livello di dettaglio e padroneggiando facilmente la complessità del sistema. Il prezzo da pagare per tale completezza è ovviamente il tempo, le operazioni di programmazione sono molto lunghe, affinché si possano ottenere dei dati sufficientemente sensati e tali da dare la possibilità di ottenere un modello della realtà ad essa aderente. Al fine di poter procedere correttamente per avere un modello di simulazione utile e funzionante è opportuno procedere con una serie di passi:

1. definizione degli obiettivi e delle problematiche da esaminare: un'attenta analisi del problema consente di circoscriverne l'esame riducendo il successivo tempo di analisi;
2. stesura di un modello concettuale: consiste nella comprensione e modellazione del sistema produttivo che si intende simulare; questa fase è particolarmente importante in quanto

definirà il comportamento dei diversi flussi di materiale e di informazioni che attraversano il modello;

3. validazione del modello concettuale: si tratta di un confronto con la direzione dell'impresa e con gli operatori per assicurarsi della capacità che ha il modello di offrire un'immagine consistente della realtà;
4. analisi dei dati in ingresso: la raccolta e l'analisi dei dati che diverranno la base per la definizione dei parametri di funzionamento del sistema (ad esempio: diversi tempi di lavoro di una singola macchina). Attraverso le tecniche del calcolo della probabilità diviene possibile definire una distribuzione di probabilità per ogni parametro, da inserire all'interno del modello;
5. scrittura del modello in termini matematici: dipende ovviamente dalla complessità del sistema, dalle sue specifiche e dagli obiettivi della simulazione; un esempio della scrittura di un modello matematico potrebbe essere: variabili di input (come numero di operai, di macchine, tempo disponibile per la produzione e capacità di produzione per macchina), variabili di output (come numero totale di unità prodotte e tempo totale richiesto per la produzione), vincoli (la somma delle unità prodotte da ogni macchina non può superare la sua capacità, la somma del tempo richiesto per ogni operazione non può superare il tempo totale disponibile e la somma delle unità prodotte da ogni operatore non può superare il tempo totale disponibile) con un finale obiettivo come massimizzare il numero totale di unità prodotte);
6. calibrazione e valutazione: con la calibrazione andiamo a regolare i parametri del modello per riflettere più accuratamente il comportamento del sistema reale. Possiamo utilizzare tecniche di ottimizzazione o confrontare i risultati della simulazione con i dati storici per calibrare il modello. La valutazione invece valuta le capacità del modello di riprodurre il comportamento del sistema reale utilizzando dati separati da quelli utilizzati per la calibrazione; verifica se il modello produce risultati coerenti e affidabili in diverse condizioni operative;
7. analisi dei dati in uscita: dopo aver raccolto i dati relativi a parametri, depurati da eventuali transitori, è possibile creare degli intervalli di confidenza, ovvero stimare il range di valori in cui i parametri che analizzano il problema proposto al primo passaggio possono oscillare.

2.2 VARI TIPI DI SIMULATORI

Esistono alcuni linguaggi specializzati per la simulazione, quali SIMSCRIPT, MODSIM e GPSS, ma la soluzione utilizzata più conveniente nell'industria è quella di ricorrere alle piattaforme di modellazione: applicazioni di tipo interattivo per la simulazione a elementi discreti, che racchiudono l'esperienza di modellazione dei processi operativi maturata negli ultimi anni 50, come AutoMod, Simul8, Arena Simulation, Simio, Anylogic, Witness, Micro Saint Sharp e ANSYS. Queste applicazioni sono dotate di potenti ambienti di sperimentazione, analisi, visualizzazione 2D e 3d, confronto e ottimizzazione di scenari alternativi per correlare con rapidità le informazioni e trasformarle con facilità in decisioni. Sono di utilizzo relativamente semplice e, quindi, molto adatte a costruire rapidamente modelli, anche sofisticati. I modelli di simulazione si possono classificare in base a diversi criteri; una prima distinzione possiamo notarla tra modelli continui, in cui le variabili variano con continuità e i modelli discreti in cui il valore delle variabili cambia in ben definiti istanti di tempo. Un'altra distinzione è quella tra modelli statistici, che rappresentano un sistema in un particolare istante di tempo e i modelli dinamici, che rappresentano un sistema in evoluzione nel tempo. Infine si possono distinguere modelli deterministici che non contengono componenti probabilistici e modelli stocastici che presentano elementi soggetti ad aleatorietà. Ora parleremo dei modelli di simulazioni ad eventi discreti che sono i più utilizzati: nella simulazione ad eventi discreti il sistema è rappresentato con variabili che cambiano istantaneamente il loro valore in ben definiti istanti di tempo, che sono quelli nei quali accadono gli eventi. Essendo questi modelli di natura dinamica, è necessario registrare, ovvero tenere memoria del tempo che procede; in particolare sarà necessario definire un meccanismo di avanzamento del tempo per far procedere il tempo simulato da un valore all'altro. La variabile che in un modello di simulazione fornisce il valore corrente del tempo simulato si chiama "simulation clock", ed esistono due modi per definire il suo avanzamento: avanzamento del tempo al prossimo evento e avanzamento del tempo ad incrementi prefissati; il primo è il più diffuso ed è quello a cui faremo riferimento. In questo caso il simulation clock è inizializzato a zero e viene avanzato al tempo dell'accadimento del primo degli eventi futuri; poi il sistema viene aggiornato tenendo conto dell'evento accaduto, si aggiornano i tempi degli eventi futuri e si itera il procedimento. A differenza dell'avanzamento ad incrementi prefissati, i periodi di inattività non vengono considerati. La simulazione è uno strumento molto flessibile, può essere utilizzata per studiare la maggior parte dei sistemi esistenti. E' impossibile enumerare tutte le aree specifiche in cui la simulazione può essere utilizzata, riporto di seguito solamente le categorie di applicazioni più importanti: progettazione e definizione delle procedure operative di un sistema di servizio, gestione di sistemi di scorte, progetto e definizione delle procedure operative dei sistemi

di produzione, progetto e funzionamento dei sistemi di distribuzione, analisi dei rischi finanziari e gestione dei progetti. L'uso dei simulatori è diventato assai diffuso all'interno di diverse realtà della vita reale in ragione della loro generalità e flessibilità di uso. I simulatori a eventi discreti "general purpose", ovvero non destinati alla creazione di modelli di simulazione specifici, bensì capaci di creare modelli di simulazione di sistemi complessi anche molto diversi tra di loro. Tali simulatori hanno ormai raggiunto un ottimo livello di adattabilità e facilità di uso; sono di solito basati su un'interfaccia grafica che permette di costruire un modello con il semplice "drag and drop" di moduli predefiniti all'interno di appositi riquadri di lavoro, ignorando l'esistenza del linguaggio nel quale il simulatore realizzerà il modello stesso. Inoltre, sono dotati di animazioni grafiche anche tridimensionali che permettono di osservare il funzionamento del sistema implementato nel modello di simulazione; tali animazioni sono molto utili se si vuole mostrare tale funzionamento a persone che sono poco propense ad osservare tabelle spesso molto lunghe e piene di valori numerici poco significativi ad un occhio poco esperto. Parliamo dei due simulatori più usati: SIMIO e ARENA:

1) **SIMIO**: prodotto dalla SIMIO LCC, anch'esso con una efficace interfaccia grafica è basato su oggetti intelligenti che una volta costruiti, possono essere riutilizzati in progetti diversi. SIMIO è un simulatore di più recente generazione e rappresenta un passaggio del paradigma della simulazione "process oriented" a quello della simulazione "objects oriented".

2) **ARENA**: prodotto dalla Rockwell Automation, è un simulatore oggi largamente utilizzato, che attraverso un'interfaccia grafica consente sia di realizzare un modello di simulazione, sia di effettuare i diversi run di una simulazione e di analizzare i risultati ottenuti. ARENA è costituita da diversi moduli: **CREATE**: genera le entità e le immette nel sistema; la generazione può avvenire secondo uno schema fissato o specificando la distribuzione di probabilità dei tempi di arrivo; **PROCESS**: rappresenta qualsiasi tipo di processamento di entità; permette anche di considerare l'utilizzazione di risorse secondo tre schemi, size-delay, size-delay-release e delay-release; **DISPOSE**: espelle le entità dal sistema; permette anche di specificare se registrare le statistiche dell'ingresso delle entità; **DECIDE**: permette di controllare l'istadamento delle entità sulla base di condizioni oppure sulla base di probabilità in corrispondenza per ciascuna uscita; **ASSIGN**: esegue l'assegnazione di variabili e attributi; l'operazione di assegnazione è effettuata quando un'entità attraversa il modulo; **BATCH**: permette di raggruppare entità; la costruzione del batch è controllata dal numero delle entità o da attributi; le entità che entrano nel modulo vengono raggruppate e si avrà una sola entità in uscita dal modulo; **SEPARATE**: ha due funzioni, produrre una o più copie di una entità, oppure separare un gruppo di entità precedentemente raggruppate; entrambi i

simulatori sono dotati di strumenti di animazione e visualizzazione 3D che permettono di osservare bene il funzionamento del sistema reale.

2.3 EFFICIENZA DELLA SIMULAZIONE DEL MODELLO

Vado ora ad analizzare dei casi di studio reali che mostrano l'efficacia della simulazione del modello:

1) Progetto di costruzione: una società di costruzioni ha utilizzato la simulazione del modello per stimare i costi di un progetto infrastrutturale complesso; considerando variabili quali produttività del lavoro, costi dei materiali e condizioni meteorologiche, la simulazione ha generato molteplici scenari di stima dei costi. Il project manager è stato in grado di identificare potenziali rischi, allocare le risorse in modo efficiente e prendere decisioni informate durante l'intero ciclo di vita del progetto. I costi effettivi sono strettamente allineati alle stime, con conseguente completamento del progetto con successo entro il budget.

2) Processo di produzione: un'azienda manifatturiera ha utilizzato la simulazione del modello per stimare i costi di implementazione di un nuovo processo di produzione; simulando diversi volumi di produzione, configurazione delle apparecchiature e costi di produzione, l'azienda è stata in grado di identificare la configurazione più conveniente. La simulazione ha evidenziato potenziali colli di bottiglia, tassi di utilizzo delle apparecchiature e l'impatto del cambiamento delle variabili sui costi complessivi. L'azienda ha implementato con successo il nuovo processo, ottenendo risparmi sui costi che hanno superato le stime iniziali.

Questi due casi di studio dimostrano come la simulazione del modello possa migliorare l'accuratezza della stima dei costi e consentire alle organizzazioni di prendere decisioni più informate. L'avvento delle tecnologie Internet Of Things ha reso la simulazione ancor più indispensabile per progettare i nuovi dispositivi e i nuovi processi industriali. I connected devices stanno proliferando. Nascono continuamente prodotti innovativi e quelli esistenti beneficiano di funzionalità sempre più avanzate e smart. Secondo le stime degli analisti, entro il 2025 ci saranno oltre 70 miliardi di dispositivi connessi in tutto il mondo, con un valore di mercato dell'ordine di 12.000 miliardi di dollari. Automazione industriale, smart city, elettronica di consumo e virtualmente tutti gli aspetti dell'economia globale saranno interessati dall'IoT. Ogni azienda sarà presto chiamata a implementare una strategia IoT per i propri prodotti e dovrà passare da prodotti muti a prodotti smart connessi con nuove tecnologie innovative. Il valore dell'IoT risiede principalmente nei dati trasmessi dagli oggetti e raccolti; per esempio, le vibrazioni di una turbina, la temperatura di un motore o la velocità di un nastro trasportatore possono dare informazioni cruciali per migliorare le

condizioni operative. Molti produttori hanno sviluppato piattaforme in grado di connettersi ai sistemi di simulazione per ottimizzare le performance e guidare le innovazioni future. Gli strumenti più utilizzati sono i digital twin; ogni oggetto fisico ha una copia virtuale, un gemello digitale. L'oggetto fisico e il modello digitale costituiscono un sistema ciberfisico in cui c'è un continuo scambio di dati tra oggetti fisici e modelli digitali contenuti nei simulatori. I dati raccolti dall'oggetto fisico e dall'ambiente tramite i sistemi IoT possono essere comparati e integrati con quelli della copia virtuale per identificare possibili problemi di performance, prevenire fermi per guasti e condizioni anomale. Creare valore dai dati generati dai prodotti connessi è una delle ragioni principali per cui le aziende investono nell' IoT industriale. La tecnologia di simulazione combinata con il machine learning può aiutare i progettisti a identificare e valorizzare i dati necessari per migliorare progetti e prestazioni e sviluppare prodotti di nuova generazione. Con i sistemi simulativi è possibile simulare tutte le fasi di un processo produttivo, ridurre sprechi e tempi di produzione. Grazie all'utilizzo di sensori intelligenti, vengono rilevati in tempo reale i dati necessari per studiare e ottimizzare i processi produttivi, e intervenire preventivamente. Le tecniche di big data analytics permettono alle aziende di gestire questo volume di dati, di elaborarli e analizzarli al fine di renderli utilizzabili. I risultati di queste analisi, in una realtà aziendale permettono l'ottimizzazione dei processi produttivi, la gestione innovativa dei flussi di lavoro e attività di operation intelligence indirizzate ad una maggior capacità di interpretazione dei bisogni delle proprie infrastrutture. Da un punto di vista strategico, permettono di avere una visione più precisa del mercato, della concorrenza e del comportamento dei clienti per adottare strategie mirate di customer experience. Gli stessi dati possono fornire le basi per lo sviluppo delle successive generazioni di prodotti. L'avvento dell'IoT ha reso la simulazione ancora più indispensabile per progettare i nuovi dispositivi, che si tratti di apparecchiature medicali, tecnologie wearable, auto connesse o turbine industriali. La simulazione della produzione offre numerosi vantaggi in termini di efficienza, qualità e innovazione, è importante considerare anche le implicazioni etiche e sociali di questa tecnologia per garantire che venga utilizzata in modo responsabile e sostenibile.

2.4 CONSIDERAZIONI

Di seguito riportiamo alcune delle principali considerazioni da tenere d'occhio:

1. Impatto sull'occupazione: l'implementazione di sistemi di produzione automatizzati e la simulazione dei processi possono portare a una riduzione dell'occupazione in determinati settori; c'è il rischio di disoccupazione e un'elevata richiesta di riqualificazione della forza lavoro dovuta ai macchinari che possono sostituire il lavoro umano in molte attività.

2. **Impatto sull'ambiente:** se non gestiamo correttamente la simulazione della produzione, c'è il rischio che porti ad un aumento del consumo di risorse naturali e all'inquinamento dell'ambiente. Un esempio potrebbe essere quello dell'uso intensivo di energia elettrica per alimentare macchinari automatizzati che potrebbe contribuire al cambiamento climatico, mentre lo smaltimento dei rifiuti generati dalla produzione potrebbe danneggiare gli ecosistemi locali.
3. **Impatto sulla formazione e sull'istruzione:** la simulazione della produzione potrebbe influenzare il modo in cui vengono formati e istruiti i lavoratori; potrebbe essere necessario sviluppare nuovi programmi di formazione e istruzione per preparare la forza lavoro alle competenze richieste nell'ambiente di produzione simulato.
4. **Equità e disparità economica:** con la simulazione c'è il rischio che aumenti la disparità economica, se la stessa simulazione non viene gestita in modo equo; ovviamente le aziende con maggiori risorse finanziarie e con un accesso a tecnologie più avanzate potrebbero beneficiarne maggiormente, lasciando indietro le comunità meno agiate o i paesi in via di sviluppo.
5. **Responsabilità e trasparenza:** le decisioni basate sulla simulazione della produzione possono avere conseguenze significative sulle persone e sull'ambiente; le aziende devono assumersi le responsabilità delle loro azioni e devono essere trasparenti riguardo ai modelli utilizzati, ai dati utilizzati e alle implicazioni delle loro decisioni.
6. **Privacy e sicurezza dei dati:** ci sono delle preoccupazioni riguardanti la privacy e la sicurezza dei dati, perché la simulazione della produzione richiede l'accesso e l'analisi di grandi quantità di dati, inclusi dati sensibili sui processi produttivi e sul personale; queste preoccupazioni sono fondate dal fatto che questi dati vengono condivisi con terze parti o possono essere vulnerabili ad attacchi informatici.

3. SIMULAZIONE APPLICATA ALLA MANUTENZIONE

Per quanto riguarda la simulazione applicata alla manutenzione, andremo a mettere insieme tutte le nozioni che abbiamo visto precedentemente, come per esempio i vari tipi di manutenzione, partendo da quella predittiva ed arrivando a quella programmata, ed i vari tipi di simulatori esistenti. Ricordiamo velocemente cosa sia la manutenzione, cioè una combinazione di tutte le azioni tecniche ed amministrative, incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere, o a riportare una entità in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta.

3.1 APPLICAZIONI DELLA SIMULAZIONE NELLA MANUTENZIONE

Le applicazioni della simulazione nella manutenzione sono varie:

1. **PIANIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI MANUTENTIVI:** la pianificazione degli interventi manutentivi è una delle attività più complesse dell'intera realtà produttiva; qui andiamo a tradurre le strategie manutentive, che vogliamo poi applicare, in una sequenza di attività pratiche, da realizzare concretamente sull'impianto nel corso della settimana. La difficoltà che abbiamo è che, in un impianto moderno, non esiste solamente una strategia manutentiva attiva e, dunque, il piano che andiamo a creare, deve riuscire a far coesistere interventi manutentivi figli di strategie tra loro differenti, se non contrastanti fra loro. Tuttavia, dobbiamo sempre tener conto che la manutenzione a guasto deve sempre godere della priorità più elevata tra le principali strategie viste sopra, proprio perché si tratta della strategia che deve tempestivamente intervenire laddove sorgono necessità di manutenzione non prevista. Mentre, per quanto riguarda le strategie periodiche, si deve sempre tener presente come esse possano migliorare manutenibilità e durata, ma non possono evitare il fisiologico decadimento delle prestazioni delle attrezzature nel tempo dovuto all'usura. L'usura, infatti, lavora costantemente su qualsiasi componente dei macchinari produttivi e, quindi, le strategie, come quella predittiva e preventiva, che intervengono in anticipo rispetto al guasto, devono definire una precisa logica d'intervento, basata su un preciso modello di usura. Abbiamo due tipi di approccio, nel primo andiamo ad adottare il tempo trascorso come misura dell'usura, il numero di cicli fatti da un organo rotante, il numero di pezzi fatti e molte altre grandezze che sono legate a doppio filo con il tempo trascorso. Ovviamente, esistono un numero grandissimo di variabili che incidono sull'usura, ma che non sono correlabili al tempo. Il secondo approccio consiste nell'effettuare controlli sull'attrezzatura a frequenza temporale determinata; a seconda dei

risultati ottenuti da tale controllo, si può scegliere di programmare l'intervento manutentivo, oppure di intensificare/diradare i controlli sull'attrezzatura.

2. OTTIMIZZAZIONE DELLE RISORSE E VALUTAZIONE DEL RISCHIO: prima di mitigare efficacemente i rischi, è fondamentale comprendere prima la natura e la portata di questi rischi; questi possono variare ampiamente a seconda delle dimensioni, della complessità dell'organizzazione e a seconda del settore. Una volta che le organizzazioni hanno una chiara comprensione del panorama dei rischi, la cosa da fare successivamente è quella di identificare i rischi specifici che sono importanti per le operazioni che andiamo a svolgere. Ciò richiede un approccio sistematico e strutturato per garantire che non vengano trascurati i rischi potenziali. Ci sono tre metodi per l'identificazione del rischio, il primo consiste in delle sessioni di brainstorming in cui andremo a facilitare le discussioni con le parti interessate per identificare i rischi in base alle loro conoscenze, esperienza e prospettive; andiamo quindi ad incoraggiare un ambiente aperto e inclusivo, a catturare una vasta gamma di potenziali rischi. Il secondo metodo è quello dell'analisi swot che ci permette di condurre un'analisi completa dei punti di forza, di debolezza, opportunità e minacce dell'organizzazione; ciò può aiutare ad identificare i rischi interni ed esterni che potrebbero ostacolare la capacità dell'organizzazione di raggiungere i suoi obiettivi. Il terzo metodo è l'analisi dei dati storici con cui andiamo a vedere incidenti passati e tendenze per identificare rischi ricorrenti o potenziali. L'analisi dei dati dai rapporti sugli incidenti e i reclami dei clienti può fornire preziose informazioni. Una volta che abbiamo identificato i rischi andiamo a valutarne la gravità e l'impatto che possono avere; questa valutazione consente di dare priorità agli sforzi di gestione del rischio ed ad allocare le risorse in modo efficace. Comprendere le potenziali conseguenze di ciascun rischio aiuta le organizzazioni a prendere decisioni informate ed a sviluppare strategie di mitigazione del rischio adeguate. Quando si valutano i vari rischi dobbiamo utilizzare i seguenti fattori: probabilità di occorrenza (probabilità che un evento a rischio si verifichi in base a dati storici e opinioni di esperti), potenziali conseguenze (valutare il potenziale impatto di ciascun rischio sulle operazioni, sulle attività finanziarie, sulla reputazione e sulle parti interessate dell'organizzazione) e l'interdipendenza del rischio (identificare eventuali dipendenze o relazioni tra rischi diversi). Poi andiamo a sviluppare un piano di gestione del rischio, che andrà a delineare le strategie, le azioni e le risorse necessarie per mitigare i rischi identificati in modo efficace. Questo piano funge da tabella di marcia per le attività di gestione del rischio e garantisce che gli

sforzi siano allineati con gli obiettivi e le priorità organizzative. Dovrà tener conto delle strategie di mitigazione del rischio, dovrà definire chiaramente i ruoli e le responsabilità degli individui e dei dipartimenti chiave coinvolti nel processo di gestione del rischio e dovrà allocare le risorse. Successivamente andremo ad implementare le strategie di mitigazione del rischio, che implica l'acquisizione di azioni concrete per ridurre al minimo la probabilità e l'impatto dei rischi identificati. Ciò richiede un monitoraggio proattivo, un intervento tempestivo e una cultura di miglioramento continuo. Verranno poi effettuati un monitoraggio e una valutazione degli sforzi di mitigazione del rischio, che sono essenziali per garantire che le strategie implementate siano efficaci e allineate con gli obiettivi organizzativi; ciò comporta un monitoraggio continuo, l'analisi dei dati e circuiti di feedback per identificare le aree per il miglioramento. Tutte queste fasi scritte precedentemente sono possibili.

3. PREVISIONE DELLA VITA UTILE DEGLI IMPIANTI: è uno degli aspetti più importanti per la manutenzione, ci consente di pianificare interventi di manutenzione preventiva in modo proattivo, riducendo i tempi di inattività e prolungando la durata operativa degli asset. In questo contesto, la simulazione applicata è un metodo efficace per predire la vita utile degli impianti attraverso modelli che integrano fattori ambientali, dati storici e condizioni operative attuali.

3.2 METODI PER LA SIMULAZIONE

Tra i vari metodi per la simulazione abbiamo la simulazione ad eventi discreti, che è un metodo che modella il comportamento del sistema impiantistico nel tempo, considerando gli eventi discreti che ne influenzano il funzionamento; vengono utilizzati dati storici e informazioni sulle condizioni operative attuali, così da provare a simulare il deterioramento degli impianti nel tempo e ad identificare i punti critici in cui potrebbe essere necessaria una manutenzione preventiva. Un altro metodo è quello della simulazione di Monte Carlo, è una tecnica matematica che viene utilizzata per stimare i risultati possibili di un evento incerto. Fu stilata da John Van Neumann durante la seconda guerra mondiale per migliorare il processo decisionale in condizioni incerte. A differenza di un normale modello di previsione, la simulazione di Monte Carlo prevede un insieme di risultati basati su una gamma stimata di valori rispetto a un insieme di valori di input fissi, quindi, crea un modello di possibili risultati sfruttando una distribuzione di probabilità, come una distribuzione uniforme o normale, per qualsiasi variabile che abbia un'incertezza intrinseca. Ricalcola, quindi, i risultati ancora e ancora utilizzando ogni volta una serie diversa di numeri casuali compresi tra il

valore minimo e quello massimo. La simulazione di Monte Carlo può essere utilizzata anche per le previsioni a lungo termine, grazie alla sua accuratezza, all'aumentare del numero di input cresce anche il numero di previsioni, consentendo di fare previsioni dei risultati che si spingono più avanti nel tempo con maggiore precisione. Una volta completata la simulazione, produce una gamma di possibili risultati con la probabilità del verificarsi di ciascuno di essi. Un ultimo metodo, ma il più importante per quanto riguarda la progettazione, la pianificazione e la misura e il feedback, è quello RAM (analisi di affidabilità, disponibilità e manutenibilità). L'analisi RAM è un metodo che consiste nella valutazione quantitativa della disponibilità di un impianto o di un sistema produttivo, più in generale, tramite la simulazione, ovvero tramite l'utilizzo di un modello numerico che replichi la realtà fisica. L'analisi RAM può servire nel caso di un sistema esistente per valutare gli effetti di possibili modifiche al processo produttivo, che siano di natura progettuale o di natura gestionale, ad esempio, permette di validare la bontà delle modifiche apportate al piano di manutenzione, frutto di varie analisi, dando una stima quantitativa della disponibilità del sistema. Se, invece, consideriamo di essere in fase di progettazione di un sistema produttivo, può servire per la selezione fra alternative progettuali differenti, come la selezione della politica di manutenzione, o per l'acquisto di macchine con parametri di affidabilità e manutenibilità differenti, oppure per valutare l'introduzione di ridondanze; quindi è un metodo che si può applicare alle varie fasi del progetto manutentivo, fra cui la fase di progettazione, pianificazione e di implementazione e revisione dei piani manutentivi, poiché è una tecnica che permette di avere una misura di prestazione delle azioni intraprese. Lo strumento utilizzato è la simulazione, in particolare viene realizzato un modello di simulazione, cioè si costruisce una rappresentazione del sistema sotto analisi in una forma che sia grafica, logica e/o numerica e che sia tale da replicare sotto il punto di vista funzionale il comportamento dinamico del sistema; esistono varie tipologie di modello in funzione di vari fattori, fra cui l'evoluzione temporale. Nell'analisi RAM il modello è a eventi discreti, ovvero un modello tale da avere dei cambiamenti di stato del sistema non in continuo, ma in un insieme discreto di istanti temporali, cioè in occasione di un determinato set di eventi.

3.3 STEP DELLO STUDIO DI SIMULAZIONE

Lo studio di simulazione prevede vari step sequenziali:

1. LA FASE PRELIMINARE: consiste nella definizione del prodotto in cui l'analista che esegue lo studio deve tradurre in obiettivi concreti i requisiti richiesti dal committente dello studio, ciò è importante perché il modello cambia in funzione dell'obiettivo, quindi è indispensabile definire e condividere esattamente con il team di progetto quali sono le risposte che vogliamo

dalla simulazione e soprattutto per quale scopo si esegue lo studio. Fra i possibili scopi di uno studio di simulazione, ci sono: la valutazione delle prestazioni di un sistema in senso assoluto ed in particolare, nella RAM, le prestazioni legate al processo manutentivo; il confronto di più soluzioni alternative, che siano esse soluzioni fisiche o soluzioni a livello gestionale; l'analisi di sensitività, cioè capire quali fattori influenzano maggiormente le prestazioni del sistema, oppure l'analisi dei colli di bottiglia, cioè individuare quali sono gli elementi critici e valutarne i rilassamenti. Oltre alla definizione del problema, si ha la fase di definizione del sistema in cui si identificano i limiti di batteria del sistema sotto analisi; qui è importante cercare di circoscrivere quanto più possibile il sistema ed i suoi limiti, così da poter successivamente elaborare un modello semplice. Si ha poi la formulazione del modello concettuale, in cui tramite costruzioni grafiche, o in forma discorsiva, si elabora una replica funzionale della realtà fisica; solitamente questa fase viene condensata nella fase di modellazione software. Infine si ha il progetto della sperimentazione preliminare, durante la costruzione del modello, e finale, dopo la validazione del modello, in cui si decidono quali modifiche applicare rispetto alla configurazione, per poi valutarne l'impatto sulle prestazioni. Il modello di simulazione può essere quindi definito come un vero e proprio strumento di sperimentazione.

2. **PREPARAZIONE DEI DATI IN INGRESSO:** in questa fase vengono estratte le informazioni di carattere quantitativo da fornire in pasto al modello. In un modello di simulazione RAM i dati di ingresso tipici possono essere dati di affidabilità, come i dati di guasto, dati di manutenibilità, come i tempi di manutenzione, ed informazioni inerenti alla logistica della manutenzione, come ad esempio i tempi di attivazione delle risorse di manutenzione e le informazioni inerenti alla gestione dei materiali e, quindi, le politiche di gestione del magazzino delle parti di ricambio e delle attrezzature di manutenzione. Le fonti da cui ricavare queste informazioni sono i dati storici attraverso cui, ad esempio, si possono ricavare i tassi di guasto dei componenti, i rilievi diretti, che permettono di avere una stima dei tempi effettivi di manutenzione, la documentazione tecnica e le interviste ai responsabili della manutenzione, ai progettisti e al personale di impianto.
3. **MODELLO SOFTWARE:** una volta definiti i dati di input si prosegue con l'elaborazione del modello software, cioè la costruzione della reliability block diagram, che ha particolare rappresentazione affidabilistica, che pone i componenti del sistema in serie o in parallelo in funzione di ciò che succederebbe alla funzionalità del sistema in caso di guasto dei suoi

componenti; in questa fase vengono definite, non solo le entità soggetta al guasto ed alla manutenzione, ma anche le risorse relative al processo manutentivo, come gli operatori di manutenzione ed i materiali. Definito lo schema rbd con entità e risorse, si possono introdurre i dati relativi all'affidabilità ed alla manutenibilità, dopo di che è tutto pronto per lanciare il RAM della simulazione.

4. **VERIFICA E VALIDAZIONE:** una volta costruito il modello software, si passa a questa fase, in cui la verifica consiste nel controllare se il modello costruito dall'analista si comporta come inteso da chi ha costruito il modello; solitamente, già nella fase di costruzione del modello, si procede alla verifica, lanciando dei run di test per vedere se le sotto unità che costituiscono il modello si comportano come desiderato. La validazione, invece, consiste nel controllare se il modello costruito è effettivamente aderente alla realtà fisica che si vuole rappresentare, ciò permette di stabilire il grado di attendibilità del modello e quindi la fiducia che si può avere nel suo utilizzo. La fase di valutazione viene realizzata tramite l'utilizzo di test statistici inferenziali, che mettono a confronto delle indicazioni di prestazione fra quanto si è misurata la realtà fisica e quanto risulta dalla simulazione numerica;
5. **SPERIMENTAZIONE:** in questa fase si apportano delle modifiche al modello software di partenza, che riflettono interventi di modifica lato progettuale, o lato gestionale, dei quali si voglia valutarne l'impatto sulle prestazioni del sistema. Si effettuano modifiche sulle variabili indipendenti, che possono essere le scelte progettuali, come la scelta dei componenti più affidabili, o l'introduzione di ridondanza, le risorse di manutenzione, come la variazione del personale di manutenzione disponibile, la gestione dei materiali, andando ad agire sulle politiche di approvvigionamento, sui livelli di riordino e sui lotti di acquisto, oppure l'organizzazione della manutenzione più in generale. Una volta implementate le modifiche al modello software, per rispecchiare gli interventi desiderati, si lancia la simulazione e si valuta l'impatto sulle variabili dipendenti, ovvero sulle prestazioni del sistema, come ad esempio, la disponibilità, la produttività, i ricavi, i costi di magazzino, e così via.
6. **ANALISI DEI RISULTATI:** consiste nella definizione del transitorio, ovvero quel periodo temporale all'interno della simulazione a partire dal quale si ha una stabilizzazione del valore medio del parametro di prestazione che si vuole indagare; una volta individuato il transitorio si fa ripartire il modello dall'istante di fine transitorio, così da tagliare fuori questa fase che potrebbe sporcare i risultati, a causa di condizioni iniziali che non rispecchiano l'andamento a regime del sistema. Esistono metodi statistici e grafici per definire il transitorio, i più

utilizzati sono i secondi. Altro parametro è la durata del run, ovvero un intervallo temporale di funzionamento del sistema che si vuole simulare; questo concetto è legato alla presenza di un errore di sperimentazione che diminuisce all'aumentare della durata di simulazione, in quanto si permette allo stimatore di generare con maggiore accuratezza la distribuzione di eventi stocastici desiderata; di contro, aumentando la durata della simulazione, si ha un incremento del tempo di calcolo, dunque, va individuato un tempo ottimale che permetta di avere un compromesso tra errore sperimentale e tempo di calcolo, in base alle proprie esigenze. In seguito abbiamo la valutazione della sperimentazione in cui si stima se, effettivamente, con le modifiche implementate, si ottenga un beneficio rispetto alla configurazione di partenza; ciò è fatto tipicamente attraverso metodi di statistica inferenziale oppure per via grafica. L'analisi dei risultati si chiude poi con l'accreditamento e l'implementazione.

3.4 VANTAGGI E COSTI DELLA SIMULAZIONE

I vantaggi di effettuare una simulazione sono moltissimi, soprattutto ora che possiamo integrarla all'intelligenza artificiale, ai Big Data e all'Advanced Analytics, è possibile ottimizzare la performance di un meccanismo, ridurre il time to market, ottenere maggior flessibilità e qualità dei prodotti, ridurre le spese per i progetti e per i test sperimentali e rendersi conto preventivamente di eventuali difetti e malfunzionamenti nella produzione. La simulazione diventa un fattore indispensabile per attenuare eventuali condizioni di pericolo e per garantire maggiore affidabilità sul posto di lavoro. Investire nella simulazione, ovviamente, ha dei costi elevati e potrebbe sembrare un dispendio economico troppo oneroso. Conviene però affidarsi a questa tecnologia perché si deve considerare che la spesa sostenuta inizialmente si ammortizza in poco tempo grazie alla maggiore produttività ed alla successiva diminuzione dei costi operativi. Sempre più aziende infatti sono disposte ad investire nella simulazione, che sta diventando sempre più una realtà nel settore industriale, non solo nelle grandi aziende, ma anche nelle piccole e medie imprese. Per il futuro, ci si aspetta che rispetto alle sessantamila aziende che nel 2021 utilizzavano la simulazione, entro al 2026, almeno altre settantamila aziende inizieranno a investire in software ed altri meccanismi di simulazione.

4. ANALISI DELLA LETTERATURA

4.1 METODOLOGIE PER OTTIMIZZARE I VARI TIPI DI MANUTENZIONE

Il primo documento che vado ad analizzare "Valutazione basata sulla simulazione di modelli imperfetti di manutenzione predittiva nella produzione discreta: un modello di procedura e un caso di studio", presenta un approccio strutturato per valutare l'impatto dei modelli di manutenzione predittiva (PdM) imperfetti sulle prestazioni dei sistemi di produzione discreta. Inizialmente, si discute l'importanza della manutenzione predittiva nella gestione dei guasti imprevisti nei sistemi di produzione e si evidenzia come l'efficacia dei modelli PdM dipenda dalla precisione e dal richiamo dei risultati di previsione. Si esplorano le sfide finanziarie, organizzative e tecniche associate all'implementazione dei modelli PdM, nonché l'importanza della valutazione economica per determinare la redditività degli investimenti. Il documento propone un modello procedurale che si concentra sulle priorità di implementazione del PdM, la modellazione dei guasti e del deterioramento, nonché la valutazione basata sulla simulazione delle prestazioni del PdM imperfetto nei sistemi di produzione discreta. Il modello di procedura presentato comprende fasi chiare e ben definite. Inizialmente, il processo di priorità di implementazione del PdM identifica le macchine e le unità funzionali critiche per l'implementazione del PdM. Successivamente, la modellazione del deterioramento e dei tempi di fermo consente una valutazione dettagliata dell'impatto della prognostica imperfetta sulle prestazioni complessive del sistema di produzione. Infine, la valutazione basata sulla simulazione del modello permette di definire e misurare tutti gli indicatori rilevanti che servono come base per un'ulteriore valutazione economica degli investimenti in sistemi PdM reali sotto il rischio di errori di tipo I e II. Inoltre, viene presentato uno studio di caso che dimostra l'applicazione pratica del modello di procedura. Il sistema di produzione simulato è composto da 15 stazioni operative e 14 buffer, con l'obiettivo di valutare le prestazioni complessive del sistema in funzione di diverse implementazioni perfette di PdM. Vengono raccolte misure di performance del sistema, indicatori relativi agli investimenti e risultati relativi all'implementazione del PdM. Complessivamente, il documento fornisce un quadro dettagliato e ben strutturato per la valutazione dell'efficacia dei modelli di manutenzione predittiva nei sistemi di produzione discreta, offrendo un'analisi approfondita delle sfide e delle considerazioni economiche associate all'implementazione dei modelli PdM imperfetti.

Un altro documento che ho visto per quanto riguarda dei metodi per ottimizzare la manutenzione è: "Estrazione di caratteristiche per la manutenzione predittiva delle apparecchiature di incisione al plasma per semiconduttori ", scrive di un approccio innovativo per la manutenzione predittiva

(PdM) delle apparecchiature di incisione al plasma utilizzate nella produzione di semiconduttori. Il contesto è caratterizzato dall'importanza crescente di migliorare la produttività delle apparecchiature di incisione al plasma, e propone un approccio innovativo per affrontare questa sfida, che supera le limitazioni dei metodi convenzionali di estrazione delle caratteristiche, l'introduzione della PdM, basata sull'utilizzo dei dati dei sensori per prevedere i guasti e suggerire misure preventive. Il metodo proposto si basa sulla separazione dei componenti della forma d'onda del sensore, estrae le caratteristiche dai dati del sensore e costruisce un modello di previsione del tempo al guasto (TTF) utilizzando l'andamento delle caratteristiche calcolate. Inoltre, il documento propone un approccio innovativo che utilizza le curve ROC (Receiver Operating Characteristic Curve) per determinare la validità del modello. La metodologia comprende anche la raccolta dei dati del sensore, l'estrazione delle caratteristiche e la valutazione dei risultati ottenuti attraverso simulazioni basate su dati sperimentali reali. L'obiettivo è migliorare l'efficienza e l'affidabilità della produzione di semiconduttori, in risposta alle sfide legate alla contrazione dei processi e all'espansione del mercato IoT (Internet of Things). La valutazione di simulazione ha dimostrato che il metodo proposto è più accurato dei metodi convenzionali di estrazione delle caratteristiche, come indicato dall'area sotto la curva ROC (AUC). L'articolo fornisce un quadro dettagliato del processo di estrazione delle caratteristiche, dalla raccolta dei dati del sensore alla costruzione del modello di previsione TTF, e presenta risultati di valutazione che dimostrano l'efficacia del metodo proposto. Questo lavoro è significativo poiché offre un contributo innovativo al campo della manutenzione predittiva per le apparecchiature di incisione al plasma, e potrebbe avere implicazioni importanti per migliorare l'efficienza e l'affidabilità della produzione di semiconduttori. In conclusione, il documento fornisce un'analisi approfondita dei metodi di estrazione delle caratteristiche e dei risultati di valutazione, confermando l'efficacia del metodo proposto per la PdM delle apparecchiature di incisione al plasma. I risultati mostrano che l'utilizzo delle caratteristiche fv_offset , $fv_vibration$ e fv_wave trend estratte dal metodo proposto, in combinazione, contribuirà a una maggiore accuratezza nella previsione del tempo al guasto (TTF) in situazioni in cui sono presenti componenti d'onda associate al degrado. La valutazione dell'area sotto la curva ROC (AUC) ha dimostrato che il metodo proposto ha ottenuto i risultati AUC più elevati in tutte le condizioni, confermando l'efficacia del metodo proposto in termini di accuratezza della previsione. Inoltre, il confronto dell'andamento delle caratteristiche per i due metodi ha mostrato buoni risultati in ogni condizione, confermando la superiorità del metodo proposto nella variazione delle caratteristiche. I risultati indicano che il metodo proposto è in grado di rilevare correttamente le fluttuazioni di

tendenza di ciascun componente associato al degrado, dimostrando l'efficacia del metodo di estrazione delle caratteristiche basato sulla separazione dei componenti della forma d'onda del sensore. Nell'articolo "Una metodologia di pianificazione basata sulle competenze per ottimizzare l'allocazione delle risorse umane nella manutenzione industriale" l'obiettivo del lavoro è presentare una nuova metodologia di pianificazione della manutenzione basata sulle competenze (CBMP), che utilizza un grafo della conoscenza abbinato alla programmazione lineare e a un algoritmo genetico. Questa metodologia mira a ottimizzare la pianificazione delle risorse umane integrando i fattori di competenza nella programmazione dei turni e nell'assegnazione dei compiti, con l'obiettivo di ridurre il tempo medio di riparazione (MTTR) e migliorare l'efficienza complessiva della manutenzione industriale. La metodologia proposta si basa sull'utilizzo dell'Intelligenza Artificiale (IA) simbolica, in particolare sul Knowledge Graph (KG), per migliorare la pianificazione della manutenzione integrando i dati e le fonti di informazione pertinenti. L'approccio CBMP è stato applicato con successo nel contesto della produzione di semiconduttori, portando a una riduzione del tempo medio di riparazione (MTTR) del 18% in un'area pilota. L'implementazione della metodologia ha dimostrato chiari vantaggi pratici, migliorando la reattività attraverso l'assegnazione di personale esperto con le competenze più appropriate agli eventi di fermo macchina. La ricerca futura si concentrerà sull'adattamento dell'approccio a nuove imprese e industrie, nonché sull'espansione dell'integrazione verticale della pianificazione della manutenzione nella pianificazione della produzione. La metodologia CBMP si articola in diverse fasi, tra cui la raccolta e il pre processamento dei dati, la creazione del Knowledge Graph (KG) mediante l'utilizzo di ontologie specifiche per il settore industriale, l'assegnazione dei compiti tramite algoritmi genetici (GA) e la fase di aggiornamento continuo del KG in base al feedback raccolto dal sistema MES e ERP. L'applicazione pratica della metodologia ha dimostrato un chiaro impatto positivo sul tempo medio di riparazione (MTTR) nell'ambito della produzione di semiconduttori, con risultati replicabili in diversi siti di implementazione. La metodologia utilizzata è la pianificazione della manutenzione basata sulle competenze (CBMP), che si basa sull'ipotesi che una riduzione del tempo medio di riparazione (MTTR) può essere ottenuta attraverso una corrispondenza ottimale dei compiti con le competenze. La metodologia di pianificazione della manutenzione basata sulle competenze (CBMP) ha ottenuto risultati significativi nell'ottimizzazione dell'allocazione delle risorse umane e nella riduzione del tempo medio di riparazione (MTTR) nell'ambito dell'industria manifatturiera. Durante le iterazioni di addestramento del modello, l'approccio è stato in grado di soddisfare l'allocazione appropriata dei compiti nell'81% dei casi, rispetto ai metodi tradizionali con Knowledge Graph (KG),

e sta gradualmente migliorando con il passare del tempo. Inoltre, l'applicazione dell'approccio CBMP ha portato a un aumento del MTTR del 18% nell'area pilota dell'impianto ionico rispetto all'anno precedente, dimostrando chiaramente i suoi potenziali vantaggi per la pratica industriale. La riproducibilità dell'approccio CBMP è stata esaminata in diversi siti di implementazione dell'azienda partner, ottenendo risultati simili. La metodologia ha dimostrato di ridurre i tempi di reazione attraverso l'assegnazione di esperti/personale disponibile in loco con le competenze più appropriate agli eventi di fermo macchina. In conclusione, l'approccio CBMP si configura come una soluzione efficace per ottimizzare la pianificazione della manutenzione basandosi sulle competenze, portando a una riduzione significativa dei tempi di reazione e all'ottimizzazione dell'allocazione delle risorse umane. La ricerca futura si concentrerà sull'adattamento dell'approccio a nuove realtà industriali e sull'espansione dell'integrazione verticale della pianificazione della manutenzione nella pianificazione della produzione.

Un altro articolo visto è: "Ottimizzazione delle attività di manutenzione attraverso la modellazione dedicata ai sistemi di produzione - distribuzione: discussione su casi di studio selezionati", che si concentra sull'ottimizzazione delle attività di manutenzione attraverso la modellazione dedicata ai sistemi di produzione-distribuzione. Gli autori propongono un approccio generalizzato per la valutazione del rischio basato sulla simulazione, flessibile e adattabile, per risolvere il problema dell'ottimizzazione della manutenzione in sistemi complessi. Il modello è applicato a diversi casi di studio, tra cui sistemi di gru e servizi di trasporto di gas di petrolio liquefatto, dimostrando la sua adattabilità e fattibilità. La metodologia utilizzata per ottimizzare il coordinamento e la programmazione delle attività di manutenzione nei sistemi di produzione e distribuzione è incentrata su un approccio di valutazione del rischio basato sulla simulazione. Questo approccio è stato generalizzato e applicato a diversi casi di studio per dimostrare la sua adattabilità e fattibilità. Di seguito sono elencati i passaggi chiave della metodologia: definizione del problema di ottimizzazione: l'obiettivo è minimizzare il valore atteso condizionale del rischio attraverso la coordinazione e la programmazione ottimale della manutenzione; vengono poi descritte le metodologie per la modellazione del processo di coordinamento-schedulazione, classificate in base all'obiettivo da ottimizzare (costi, rischio, ibridi) e al numero di obiettivi (singolo o multi-obiettivo); gli, poi, autori scelgono l'algoritmo di ottimizzazione a sciame di particelle (PSO) per risolvere il problema di ottimizzazione.

Il modello proposto è relativamente semplice e si basa sulla definizione del problema di ottimizzazione e della funzione ottimizzata, nonché sulla descrizione di tutte le variabili e i parametri

coinvolti. La funzione obiettivo è minimizzare il valore atteso condizionale del rischio, che viene stimato attraverso simulazioni Monte Carlo. Le variabili indipendenti sono i tempi di inizio della manutenzione di ogni componente, mentre le variabili dipendenti includono i tempi di guasto, riparazione e manutenzione. La generalizzazione del modello è discussa attraverso casi di studio selezionati, dove le variabili fisiche cambiano ma il processo di modellazione rimane lo stesso. Viene evidenziato che, modellando la capacità del sistema e i suoi requisiti, è possibile ottenere un modello completo per il coordinamento e la programmazione della manutenzione. Infine, gli autori applicano il modello a un sistema di pompaggio per l'estrazione del petrolio, dimostrando che il modello standardizzato può essere adattato a qualsiasi sistema tecnico con esigenze simili di manutenzione. Il lavoro è supportato finanziariamente dal Ministero polacco dell'Istruzione e della Scienza e include una sezione di riferimenti che riconosce le fonti utilizzate per lo studio. Il documento non fornisce esplicitamente i risultati dettagliati ottenuti dall'applicazione del modello di ottimizzazione della manutenzione ai casi di studio specifici tuttavia, sulla base delle informazioni fornite, è possibile desumere che i risultati avrebbero dimostrato l'efficacia del modello nel coordinare e programmare le attività di manutenzione in modo ottimale. I risultati attesi includerebbero la riduzione del rischio, il miglioramento dell'efficienza, la riduzione dei costi, il miglioramento della pianificazione, l'adattabilità del modello e la validazione del modello.

Il documento "Manutenzione digital twin utilizzando i dati sulle vibrazioni" di Raffaele Abbate, Mario Caterino, Marcello Fera e Francesco Caputo (2022) è un articolo scientifico pubblicato su *Procedia Computer Science*, che descrive una metodologia innovativa per la manutenzione dei sistemi industriali attraverso l'uso di Digital Twin (DT) e l'analisi delle vibrazioni. Gli autori dell'Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli, hanno sviluppato un approccio che integra il DT con il metodo statistico delle carte di controllo per analizzare i dati di vibrazione reali, al fine di ottimizzare la manutenzione e prevedere possibili guasti e a supportare decisioni di manutenzione preventiva, ottimizzando così i processi di manutenzione e riducendo i costi legati alle perdite di produzione. La manutenzione è un processo critico per le aziende, poiché consente di risparmiare sui costi di produzione e prolungare la vita utile degli asset. Il lavoro propone un'analisi dei dati di vibrazione per valutare il comportamento dei sistemi e prevedere eventuali problemi, consentendo così di applicare azioni di manutenzione preventiva. La metodologia si basa sulla raccolta di dati di vibrazione da sensori installati nell'ambiente di lavoro, che vengono poi utilizzati per costruire carte di controllo e prevedere futuri segnali di vibrazione che potrebbero indicare un malfunzionamento. Il DT del sistema reale viene creato per valutare lo stato attuale e prevedere l'andamento

vibrazionale futuro, consentendo di pianificare interventi di manutenzione appropriati. Vengono costruite carte di controllo statistico per analizzare i segnali di vibrazione simulati e identificare potenziali condizioni di guasto. Il caso di studio applicato è relativo al sistema di trasmissione di un motore elettrico utilizzato in un ascensore di una linea di assemblaggio di automobili. I dati di vibrazione sono stati raccolti e analizzati per validare la metodologia. I risultati hanno dimostrato che il metodo è efficace nel prevedere possibili guasti e nel supportare decisioni di manutenzione. La simulazione ha permesso di generare segnali di vibrazione futuri e di utilizzare carte di controllo per identificare condizioni di guasto potenziali. L'articolo conclude che l'adozione della metodologia proposta potrebbe migliorare le politiche di manutenzione riducendo il numero di interventi non necessari e permettendo di posticipare e organizzare meglio gli interventi di manutenzione. Tuttavia, i principali limiti sono rappresentati dalle tecnologie richieste per l'applicazione del modello, che possono essere costose e non facilmente accessibili, soprattutto per le piccole imprese.

Nel documento "Integrazione delle curve di degrado nei modelli basati sulla fisica: Verso la manutenzione predittiva dei robot industriali" l'obiettivo del lavoro è sviluppare una metodologia per l'integrazione di curve di degrado in modelli basati sulla fisica al fine di migliorare la manutenzione predittiva dei robot industriali. Questo approccio mira a massimizzare la disponibilità degli impianti di produzione moderna prevedendo il momento in cui sarà necessario avviare le attività di manutenzione, riducendo così i costi associati ai guasti improvvisi e alle interruzioni non necessarie della produzione. La ricerca si concentra sull'uso di tecniche prognostiche basate su dati e modelli fisici avanzati, arricchiti con dati di degrado, per simulare il comportamento dinamico dei robot e monitorarne lo stato di salute attraverso il concetto di gemello digitale. La metodologia si articola in quattro fasi: creazione del modello digitale, selezione delle curve di degradazione, estrazione dei dati sulla degradazione e stima della RUL (Remaining Useful Life). La creazione del modello digitale include la definizione dei componenti critici, lo sviluppo di modelli autonomi e l'integrazione in un modello completo del robot. La selezione delle curve di degradazione mira a identificare i processi fisici che causano il deterioramento delle prestazioni del robot e a scegliere le curve più adatte per l'aggiornamento del modello di simulazione. L'estrazione dei dati sulla degradazione utilizza il gemello digitale per mappare i valori attuali dei parametri di modellazione su una curva di degrado e prevedere i valori futuri. Infine, la stima della RUL si basa sulla simulazione del comportamento dinamico futuro del robot, considerando il piano di produzione e il processo di degrado. L'implementazione dell'approccio richiede pacchetti software per lo sviluppo e la

simulazione del modello digitale, l'elaborazione dei dati e il calcolo dell'aggiornamento dei parametri di modellazione. Il caso di studio applicato nell'industria degli elettrodomestici ha dimostrato la funzionalità dell'approccio, prevedendo se il robot avrebbe subito un guasto nei 18 mesi successivi. I risultati indicano che la metodologia può stimare il futuro comportamento dinamico di un robot e la sua RUL, supportando così la pianificazione della manutenzione e l'ottimizzazione delle attività di manutenzione. Il lavoro futuro includerà ulteriori indagini sulle curve di degradazione, la modellazione di altri fenomeni come l'attrito e il gioco degli ingranaggi, e la convalida dell'approccio attraverso esperimenti accelerati e dati industriali.

L'ultimo articolo visto per l'ottimizzazione della manutenzione è "Valutazione della plausibilità economica dell'integrazione delle strategie di manutenzione nel controllo autonomo della produzione: Un caso di studio nell'industria automobilistica". Esso esamina l'integrazione delle strategie di manutenzione nel controllo autonomo della produzione (APC) nell'industria automobilistica, valutandone la plausibilità economica. Gli autori, Robert Glawar, Fazel Ansari e Kurt Matyas, propongono un modello concettuale per integrare le strategie di manutenzione negli APC, focalizzandosi sulla valutazione economica attraverso una funzione di costo e utilizzando una simulazione ad agenti per valutare il modello in un caso di studio. L'industria manifatturiera è sotto pressione per aumentare la produttività e ridurre i costi, affrontando sfide come la necessità di tempi di consegna brevi, l'elevato livello di capacità di consegna, i frequenti cambiamenti nella pianificazione e la crescente complessità della pianificazione. L'APC può migliorare l'autonomia dei sistemi di pianificazione della produzione, ma spesso non tiene conto delle strategie di manutenzione, come la manutenzione basata sulle condizioni (CBM) o la manutenzione predittiva (PdM), il che può portare a decisioni di bassa qualità e scarsa accettazione dei sistemi APC. Il modello concettuale proposto include tre sottosistemi: manutenzione, controllo autonomo della produzione e pianificazione della produzione. Il sistema di manutenzione determina i costi di manutenzione e il comportamento in caso di guasto, il sistema APC gestisce la sequenza di produzione e la comunicazione tra le risorse del sistema di produzione, e il sistema di pianificazione della produzione serve da interfaccia tra il controllo gerarchico e la pianificazione gerarchica della produzione. La funzione di costo del modello tiene conto di vari fattori come i costi fissi e variabili di produzione, i costi di trasporto, i rischi di fermo macchina e le penali contrattuali. La simulazione ad agenti, basata su un caso di studio nella produzione di trasmissioni automobilistiche, è stata utilizzata per implementare e validare il modello. I risultati della simulazione mostrano che l'integrazione della manutenzione prescrittiva nell'APC può portare a un aumento della puntualità delle consegne, a

una riduzione dei costi di programmazione e a un aumento della disponibilità tecnica dell'impianto e della produttività. Le condizioni chiave per il successo dell'integrazione includono la flessibilità del parco macchine e del concetto di intralogistica, un layout adeguato del sistema produttivo e le condizioni tecniche per la comunicazione autonoma. In conclusione, il documento sottolinea che l'integrazione della manutenzione nell'APC è un fattore abilitante essenziale per aumentare l'efficienza e la flessibilità della produzione, e che l'approccio proposto può servire da base per ulteriori ricerche e applicazioni in ambienti di produzione reali.

4.2 DOCUMENTI CHE TRATTANO PROGETTAZIONE E IMPLEMENTAZIONE TRAMITE IIOT

Il primo documento che tratta dell'Ilot è la "Progettazione e implementazione di un gemello digitale per una macchina per il taglio della pietra", presenta uno studio comparativo tra due opzioni di collegamento per implementare un gemello digitale della macchina per il taglio della pietra. La prima opzione utilizza dispositivi IIoT e un broker MQTT per lo scambio di dati in tempo reale, garantendo comunicazione efficiente e scalabile. La seconda opzione impiega dispositivi di automazione convenzionali e una connessione VPN per una maggiore sicurezza dei dati durante la trasmissione. Entrambe le opzioni offrono vantaggi e svantaggi in termini di velocità di comunicazione, sicurezza, scalabilità e facilità di implementazione. La scelta tra le due opzioni dipende dalle esigenze specifiche del progetto, considerando fattori quali la comunicazione in tempo reale, la sicurezza dei dati, la scalabilità del sistema e le risorse disponibili. La scelta dell'opzione più appropriata garantirà un'implementazione efficiente ed efficace del gemello digitale, contribuendo al miglioramento del processo di taglio della pietra nell'industria. L'obiettivo del lavoro è quello di confrontare due opzioni di collegamento tra un'azienda e l'Istituto Politecnico di Leiria per l'implementazione del gemello digitale di una macchina per il taglio della pietra StoneCUT LINE. Le due opzioni considerate sono la connessione tramite dispositivi Industrial Internet of Things (IIoT) e broker Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), e la connessione tramite dispositivi di automazione convenzionali e Virtual Private Network (VPN). L'obiettivo è fornire un'analisi completa e informata per aiutare nella scelta della migliore opzione di connessione, considerando criteri come la velocità di comunicazione, la sicurezza, la scalabilità, la facilità di implementazione, i costi associati, complessità e requisiti tecnici. L'obiettivo è stato quello di fornire un'analisi completa e informata per aiutare nella scelta della migliore opzione di connessione tra l'impresa e l'IPL nel contesto del gemello digitale della macchina per il taglio della pietra StoneCUT LINE. I risultati ottenuti dall'analisi comparativa delle due opzioni di collegamento

tra l'azienda e l'IPL per l'implementazione del gemello digitale della macchina per il taglio della pietra sono i seguenti:

1. la prima opzione, che utilizza dispositivi IIoT e Broker MQTT, offre vantaggi come la comunicazione in tempo reale, la scalabilità e l'efficienza del trasferimento dei messaggi; tuttavia, presenta una complessità tecnica ed un costo iniziale più elevato;
2. la seconda opzione, che utilizza dispositivi di automazione convenzionali e VPN, si distingue per la sicurezza fornita dalla connessione VPN e per la minore complessità tecnica di implementazione; tuttavia, la velocità di comunicazione può essere più lenta a causa del processo di crittografia dei dati nella VPN e comporta costi continui.

Inoltre, entrambe le opzioni hanno implicazioni in termini di costi, complessità e requisiti tecnici. La scelta tra le due opzioni dipende dai requisiti specifici del progetto, come la comunicazione in tempo reale, la sicurezza dei dati, la scalabilità del sistema e la disponibilità delle risorse. Ogni opzione presenta vantaggi e svantaggi, e la decisione finale si baserà sulle priorità e sulle esigenze del progetto in questione.

Il documento "Modellazione di simulazione automatizzata: garantire resilienza e flessibilità nei sistemi di produzione Industria 4.0", tratta della modellazione di simulazione automatizzata per garantire resilienza e flessibilità nei sistemi di produzione Industria 4.0. Si tratta di creare un modello di lavoro che sia in grado di supportare la pianificazione della produzione e poi sviluppare un modello di simulazione flessibile e resiliente, in grado di adattarsi autonomamente a set di dati di input dinamici. I dati utilizzati includono informazioni sulle postazioni di lavoro, gli ordini di produzione, la distinta dei processi, le date di scadenza, il consumo energetico, e altri dati relativi alla produzione. Il settore di applicazione è quello della produzione industriale, con particolare attenzione alle tecnologie energetiche. In questo contesto, la simulazione svolge un ruolo cruciale nella pianificazione della produzione, consentendo alle aziende di trovare soluzioni di pianificazione flessibili. Tuttavia, poiché i sistemi produttivi reali sono soggetti a continui cambiamenti, le simulazioni possono facilmente diventare obsolete. La novità della ricerca è lo sviluppo di un modello di simulazione flessibile e resiliente, in grado di adattarsi alla sua controparte fisica. Il documento illustra la metodologia utilizzata, che è quella di sviluppare un modello di simulazione flessibile e resiliente, in grado di adattarsi ai cambiamenti reali del sistema di produzione. Questo modello di simulazione automatizzato è basato su un approccio avanzato alla modellazione, che combina la programmazione orientata agli oggetti e la fusione di due metodologie presenti nella

letteratura esistente: l'approccio modulare e quello data-driven. La metodologia prevede la definizione degli obiettivi che lo strumento di simulazione deve raggiungere, come la traduzione del modello concettuale nel modello di simulazione, la configurazione e definizione dei KPI, l'analisi dei risultati e l'implementazione. I risultati della sperimentazione mostrano che diverse regole di carico possono ottimizzare la produzione industriale, sottolineando l'importanza di adottare lo strumento di simulazione sviluppato in questa ricerca per prendere decisioni più consapevoli. Infine, vengono presentati i risultati della simulazione relativi a uno studio di caso reale, che dimostrano la capacità del modello di simulazione come strumento di supporto alle decisioni. Il modello di simulazione automatizzata rigenera il sistema di produzione a ogni avvio sulla base dei dati aggiornati che riceve in ingresso, consentendo di analizzare diversi scenari di produzione a supporto delle decisioni di pianificazione industriale. La sperimentazione mostra che diverse regole di carico possono ottimizzare la produzione industriale, sottolineando l'importanza di adottare lo strumento di simulazione sviluppato in questa ricerca per prendere decisioni più consapevoli. L'articolo "Studio di fattibilità dell'utilizzo di gemelli digitali per la progettazione concettuale di processi di tempra in aria" riguarda uno studio sulla fattibilità dell'utilizzo di gemelli digitali (DT), dell'uso di strumenti CAE commerciali, come SolidWorks Simulation, per la progettazione concettuale di processi di tempra in aria per le piccole e medie imprese (PMI). Questo permette alle PMI di esplorare nuove opportunità commerciali, ridurre i cicli di progettazione dei sistemi e migliorare i processi di raffreddamento ad aria esistenti. Il lavoro si propone di esplorare la scienza alla base del processo di raffreddamento ad aria e di sviluppare modelli di valutazione per i processi di trasferimento di calore. Inoltre, si prevede di verificare ulteriormente i risultati della simulazione mediante esperimenti fisici, approfondire il ruolo del coefficiente di trasferimento di calore e sviluppare studi parametrici sul numero di parti, orientamenti e velocità di flusso. Viene sottolineato che, nonostante l'ampia adozione dei DT nelle grandi imprese, le PMI possono trarre vantaggio dall'implementazione di questi strumenti. Il documento fornisce dettagli sulle sfide e le variabili coinvolte nel trasferimento di calore coniugato, analizzando anche i principali fattori di progettazione e le variabili termiche in un processo transitorio. Viene esaminato l'impatto dell'orientamento dei pezzi e della velocità del flusso d'aria sul trasferimento di calore, evidenziando le variazioni dell'HTC in relazione all'orientamento e alla velocità del flusso d'aria. Inoltre, viene discussa l'importanza di una simulazione numerica accurata e convalidata per valutare l'HTC in diversi contesti. Infine, viene sottolineato come l'HTC vari in funzione della temperatura e come gli input dei modelli di simulazione debbano essere perfezionati per ottenere risultati validi. Il

documento fornisce un'analisi dettagliata delle variabili coinvolte nel trasferimento di calore coniugato e delle sfide legate alla simulazione numerica di processi di tempra in aria. Viene evidenziata l'importanza di considerare l'orientamento dei pezzi e la velocità del flusso d'aria, nonché l'effetto della temperatura sulle prestazioni di trasferimento di calore. I risultati della simulazione numerica forniscono un'ulteriore comprensione del comportamento del trasferimento di calore coniugato in diversi contesti, confermando l'importanza di una simulazione accurata e convalidata per valutare l'HTC. Infine, il documento sottolinea la necessità di perfezionare gli input dei modelli di simulazione per ottenere risultati validi, evidenziando l'importanza di una simulazione numerica accurata per valutare l'HTC in diversi contesti.

Il documento "Architettura generica e scalabile a più livelli per l'implementazione del Digital Twin nei processi industriali: Caso di studio sulla lavorazione dei minerali", presenta come obiettivo quello di proporre un'architettura multilivello scalabile e orientata ai servizi per lo sviluppo di Digital Twins nella lavorazione dei minerali, che può essere adattata ad altri sistemi di produzione, focalizzandosi sulla flottazione della schiuma nell'industria mineraria. L'implementazione dei gemelli digitali è fondamentale per ottenere la qualità dei prodotti, la riduzione dei costi e la puntualità delle consegne nella produzione nell'ambito dell'Industria 4.0. L'articolo offre un'architettura divisa in cinque livelli: strato fisico, di controllo, di supervisione e monitoraggio digitale, predittivo e di ottimizzazione e di gestione. La validazione di questa architettura è stata eseguita tramite un caso di studio sulla flottazione della schiuma, dimostrando i benefici ottenuti dall'implementazione del Digital Twin nel processo di lavorazione dei minerali. La metodologia si basa sull'utilizzo di modelli predittivi e algoritmi di ottimizzazione per simulare, monitorare e ottimizzare in tempo reale il processo fisico di flottazione della schiuma. Inoltre, vengono impiegati algoritmi avanzati, come le reti neurali, per generare previsioni futuristiche sulle operazioni effettive e ottimizzare gli input di controllo del sistema. La metodologia si concentra sull'efficienza, la scalabilità e l'interoperabilità del Digital Twin, nonché sull'ottimizzazione dei KPI basati su modelli predittivi. Il Digital Twin è stato testato su 30 turni consecutivi, mostrando una maggiore stabilità nei gradi finali di concentrato e una riduzione del grado degli sterili rispetto alle prestazioni effettive. Grazie alla circolazione dei dati in tempo reale a circuito chiuso, alle tecniche di ottimizzazione e all'analisi predittiva, il Digital Twin per la flottazione di schiumatura offre il controllo autonomo del processo, permettendo di raggiungere gli obiettivi prefissati e di operare in modo indipendente. Questo studio rappresenta una significativa innovazione nel settore industriale, offrendo un'architettura scalabile e orientata ai servizi per l'implementazione dei Digital Twins, con un'applicazione pratica e un caso di studio che

dimostrano i benefici ottenuti. I risultati ottenuti includono la stabilizzazione del grado degli sterili e la riduzione del valore medio rispetto ai record dell'impianto. Inoltre, l'implementazione del Digital Twin ha portato a indicatori di prodotto stabili, che sono vantaggiosi nella produzione, e a un grado di sterilizzazione inferiore, riducendo la perdita di metallo e portando a maggiori benefici economici per l'azienda.

Il documento "Proposta e test di un modello digitale di sistema di produzione configurabile per supportare la gestione degli asset basati sull'energia" presenta una proposta e un test di un modello digitale di sistema di produzione configurabile per la gestione degli asset basati sull'energia. L'obiettivo del lavoro è sviluppare un Modello Digitale del sistema di produzione (DM) che funga da controparte virtuale di un sistema di produzione fisico e costituisca il primo passo verso lo sviluppo del suo Gemello Digitale. Il modello si basa su tre elementi principali: monitoraggio, ottimizzazione e previsione, e mirare a promuovere una gestione degli asset basata sull'energia. Il lavoro si propone di colmare le lacune nella modellazione energetica nel settore manifatturiero, integrando prospettive tecniche e manageriali per ottimizzare l'efficienza energetica e supportare una produzione sostenibile e verde. Il modello è testato in un caso di studio nel settore cosmetico e si prefigge di aprire la strada a ulteriori sviluppi, come l'evoluzione in una Digital Shadow e un Digital Twin, nonché l'integrazione degli aspetti di manutenzione; inoltre, dimostra la capacità di modellare alti livelli gerarchici dell'azienda dal punto di vista energetico. Si discute anche dell'integrazione tra moduli come la programmazione della produzione e i sistemi di controllo degli asset, evidenziando il potenziale del modello nell'ottimizzazione energetica e nella gestione degli asset. Il documento fornisce un'analisi sistematica della letteratura, evidenziando l'interesse per i livelli gerarchici elevati e l'approccio di modellazione degli stati degli asset. Si presenta il modello digitale del sistema di produzione, evidenziando la sua configurabilità e la capacità di analizzare l'intero reparto commerciale. Inoltre, viene sottolineata l'importanza dell'integrazione tra moduli e la capacità predittiva del modello. Esso dimostra anche la sua capacità di supportare l'azienda nella definizione di una strategia di miglioramento, attraverso l'analisi delle matrici strategiche e il calcolo delle prestazioni tecniche ed economiche delle macchine. Si discute anche dell'integrazione dei moduli e dell'evoluzione futura del modello in una Digital Shadow e un Digital Twin.

L'ultimo documento che tratta dell'Ilot "Requisiti per la modellazione e la simulazione dell'affidabilità guidata dai dati dei sistemi di produzione intelligenti" è un articolo scientifico che presenta uno studio sui requisiti di dati per la modellazione e la simulazione dell'affidabilità basata sui dati nei sistemi di produzione intelligenti (SMS), nell'ambito dell'Industria 4.0. Gli autori, Jonas Friederich, Sune Chung

Jepsen, Sanja Lazarova-Molnar e Torben Worm, dell'Istituto Mærsk Mc-Kinney Møller presso l'Università della Danimarca meridionale, hanno analizzato i requisiti dei dati necessari per un nuovo middleware che supporti la valutazione dell'affidabilità basata sui dati. L'articolo inizia con un'introduzione allo Smart Manufacturing (SM) e all'importanza dell'affidabilità dei sistemi di produzione per ridurre i costi di manutenzione e ottimizzare i programmi di riparazione. Vengono poi discussi i nuovi metodi di valutazione dell'affidabilità guidati dai dati, che possono affrontare i rischi operativi associati alla complessità crescente degli SMS. I principali contributi dell'articolo includono la specifica dei requisiti di dati per la valutazione dell'affidabilità e la simulazione degli SMS basata sui dati, la presentazione di una nuova architettura middleware per supportare tali requisiti di dati, e un modello di simulazione illustrativo di una linea di produzione che genera dati esemplari sull'affidabilità. L'articolo prosegue con una discussione sul contesto dell'Industria 4.0 e i comuni approcci per la valutazione dell'affidabilità dei sistemi di produzione. Vengono descritti i metodi di valutazione dell'affidabilità, come l'analisi dell'albero dei guasti (FTA), i diagrammi a blocchi dell'affidabilità (RBD), le reti di Petri (PN), i modelli di Markov (MM) e la simulazione a eventi discreti (DES), evidenziando gli aspetti qualitativi e quantitativi di ciascuno. Successivamente, gli autori definiscono i requisiti di dati per la valutazione dell'affidabilità degli SMS, classificandoli in base alla granularità strutturale dei dati rilevanti per l'affidabilità: dati di stato, dati di evento e dati di monitoraggio delle condizioni. Viene fornita una mappatura dei comuni metodi di valutazione dell'affidabilità in relazione a questi tipi di dati. Il caso di studio descrive il laboratorio Industry 4.0 della University of Southern Denmark, la linea di produzione dei droni e gli asset coinvolti nella sequenza di produzione. Viene presentata l'Information Backbone I4.0 (I4.0-IB), un middleware che facilita il flusso di informazioni tra gli asset, e un modello di simulazione del laboratorio Industria 4.0 che genera dati in uscita corrispondenti ai requisiti definiti. In conclusione, l'articolo sintetizza il lavoro svolto e prospetta lo sviluppo di nuovi metodi per la valutazione dell'affidabilità e la simulazione guidata dai dati, utilizzando i dati reali forniti dall'I4.0-IB.

4.3 APPROCCI PER OTTIMIZZARE LE PRESTAZIONI DI SISTEMI DI PRODUZIONE

Il documento "SoftER: un espulsore robotico morbido a spirale per applicazioni di smistamento" descrive l'obiettivo del lavoro, che è quello di progettare e sviluppare un attuatore pneumatico morbido modulare di ispirazione biologica chiamato SoftER, per applicazioni di smistamento. Il lavoro si concentra sull'ottimizzazione dell'attuatore proposto, basata sulla simulazione e sull'analisi agli elementi finiti, nonché sulla caratterizzazione sperimentale di un modulo attuatore. Il testo inizia con un'introduzione sul mercato globale delle macchine di smistamento automatico e

l'importanza di ridurre i prodotti difettosi in un lotto di produzione in modo automatizzato. Successivamente, viene presentato il concetto di SoftER, un attuatore pneumatico morbido ispirato alla natura, che si srotola rapidamente quando pressurizzato, con l'obiettivo di sostituire i sistemi attuali. Viene discusso il processo di progettazione e sviluppo, compresa la fabbricazione mediante stampa 3D e colata di silicone, insieme a una valutazione mediante analisi agli elementi finiti. Viene presentato uno studio di ottimizzazione basato su un disegno fattoriale frazionario, che identifica i parametri ottimali per massimizzare la forza applicata e la frequenza di attuazione. La metodologia utilizzata include la progettazione parametrica CAD, la simulazione e l'analisi agli elementi finiti (FEA), nonché la caratterizzazione sperimentale dell'attuatore. Inoltre, viene descritta una metodologia innovativa per simulare movimenti altamente dinamici utilizzando simulazioni FEA Explicit Dynamic. Infine, vengono presentati i risultati sperimentali che dimostrano la capacità del SoftER di eseguire cicli di attuazione rapidi e di erogare forze di rigetto sufficienti per scartare oggetti di peso fino a 400 g; viene prospettato il potenziale di miglioramento e sviluppo futuro, incluso l'esame di nuovi materiali e l'ottimizzazione dei modelli di prestazioni.

L'articolo "Caratterizzazione e ottimizzazione per sistemi di produzione resilienti con considerazione delle incertezze di processo" si concentra sull'ottimizzazione dei sistemi di produzione in risposta agli eventi perturbativi, come la carenza di forniture e le fluttuazioni imprevedibili della domanda. L'obiettivo del lavoro è sviluppare un approccio di modellazione dinamica discreta per tracciare la dinamica del sistema di produzione, utilizzando una serie di parametri per catturare le incertezze del processo durante la produzione. Si propone inoltre un approccio di ottimizzazione che fornisce una pianificazione strategica istantanea dell'officina e mitiga l'impatto delle perturbazioni, al fine di migliorare la resilienza del sistema produttivo. Il modello presentato fornisce soluzioni ottimali per la programmazione dell'officina, coordinando tutte le postazioni di lavoro all'interno dell'officina per migliorare la resilienza del sistema dagli impatti negativi di eventi perturbatori e fluttuazioni improvvise nei flussi di materiale. Il documento presenta un approccio di modellazione dinamica a eventi discreti (DEDS) basato sul caos polinomiale generalizzato (gPC) per ottimizzare i sistemi di produzione in risposta agli eventi perturbativi. Viene proposto un metodo di ottimizzazione e controllo basato su gPC per realizzare un'officina intelligente e resiliente, fornendo strategie di pianificazione della produzione reattive. L'approccio proposto affronta le incertezze e le perturbazioni intermittenti nei sistemi di produzione, fornendo un'ottimizzazione e un controllo istantanei delle attività di officina per migliorare la resilienza del sistema contro eventi catastrofici imprevisti. I risultati ottenuti includono l'implementazione di un modello di ottimizzazione e

controllo dei processi intelligenti e resilienti basato sul caos polinomiale generalizzato (gPC-SRPOC) per massimizzare il tasso di produzione del sistema e minimizzare i tempi di inattività del sistema. Il modello considera due criteri principali: la produttività del sistema e i tempi di inattività delle postazioni di lavoro. I risultati mostrano che il modello proposto è in grado di adattarsi prontamente agli eventi perturbativi, garantendo una produzione ottimale e riducendo i tempi di inattività del sistema. Inoltre, il confronto con l'approccio convenzionale di ottimizzazione e controllo della produzione basato su Monte Carlo (MCPOC) dimostra che il modello gPC-SRPOC offre prestazioni superiori, mantenendo la produzione del sistema in presenza di perturbazioni e incertezze del sistema.

Il documento "Migliorare le prestazioni di produzione attraverso l'apprendimento incrociato tra più impianti" presenta uno studio sull'apprendimento incrociato multi-impianto (MPCL) come strumento per migliorare le prestazioni di produzione nell'industria manifatturiera. L'MPCL sfrutta l'abbondanza di dati disponibili nel cloud aziendale per confrontare e apprendere da linee di produzione simili in diversi stabilimenti, al fine di identificare le "migliori" pratiche e ottimizzare la gestione delle linee di prodotto. L'articolo, pubblicato online il 6 luglio 2021, è opera di Jing Huang e altri autori affiliati a università e aziende come General Motors. Esso propone un nuovo quadro di miglioramento continuo che utilizza l'apprendimento automatico e i modelli di sistema per analizzare i dati di produzione e trovare correlazioni tra indicatori di prestazione e dati disponibili. Gli obiettivi del lavoro descritto nel documento sono:

- 1) fornire un nuovo strumento di miglioramento continuo (CIP) per migliorare le prestazioni di una linea di produzione attraverso il confronto e l'apprendimento tra linee di produzione identiche o simili;
- 2) creare funzioni a due livelli: relazionare le metriche di prestazione dell'intera linea (ad esempio, il rendimento) con le metriche di prestazione delle singole macchine (ad esempio, i tempi di inattività della macchina) utilizzando il metodo di modellazione basato sui dati; relazionare l'efficienza della singola macchina con le caratteristiche della stessa utilizzando il metodo di apprendimento automatico e offrire una soluzione fattibile per modificare le caratteristiche delle macchine critiche attraverso l'apprendimento dagli impianti di pari livello.

Il caso di studio presentato si concentra su impianti automobilistici simili e prevede un aumento della produttività attraverso l'MPCL. Il processo si articola in quattro fasi principali: identificazione delle macchine critiche, ottenimento della funzione di downrate della macchina attraverso

l'apprendimento automatico, determinazione delle azioni attraverso l'apprendimento dalle linee di pari livello e implementazione, monitoraggio e ripetizione delle azioni di miglioramento. Le macchine critiche sono identificate in base al loro impatto sulle prestazioni del sistema di produzione. L'apprendimento automatico viene utilizzato per creare una relazione tra il tasso di fermo macchina e le caratteristiche delle macchine. Confrontando le macchine critiche con le loro controparti nelle altre linee, si possono apprendere le migliori pratiche e implementare piani d'azione per migliorare l'efficienza. Lo studio del caso dimostra l'efficacia del framework MPCL attraverso un aumento della produttività del 7,18% nella Linea 1, dell'8,81% nella Linea 2 e del 2,02% nella Linea 3. L'MPCL si rivela un complemento utile agli esistenti toolkit di miglioramento continuo, permettendo di sfruttare le somiglianze e le differenze tra le linee di produzione per un apprendimento reciproco e un miglioramento continuo delle prestazioni. In conclusione, l'MPCL è presentato come un nuovo strumento di miglioramento continuo per l'industria manifatturiera, che utilizza l'analisi a livello di sistema per identificare le macchine critiche e migliorare le prestazioni di produzione attraverso l'apprendimento incrociato tra impianti. Il lavoro è supportato dalla National Science Foundation e i dati sono disponibili su richiesta.

4.4 DOCUMENTI DI ANALISI E VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI

Il documento “Un approccio bayesiano per la modellazione e la previsione del ciclo di vita con covariate mancanti condivise da più gruppi”, affronta la questione della gestione delle covariate mancanti condivise tra diverse unità di prodotto all'interno di specifici gruppi. Queste covariate spesso non sono disponibili per vari motivi, ad esempio, limiti di rilevamento, problemi relativi alla privacy dei dati e date insufficienti. Trascurarli può portare a stime distorte e previsioni imprecise sulla durata del prodotto, con conseguenti decisioni di manutenzione non ottimali o progettazioni inefficaci. Al fine di risolvere questi due problemi, gli autori propongono un nuovo modello di durata flessibile con eterogeneità latente multi-tipo condivisa dal gruppo. Il modello adotta specifiche largamente accettate nell'analisi del ciclo di vita del modello log-normale e di Weibull per garantire una robusta flessibilità. Gli autori sviluppano un algoritmo di stima bayesiano con incremento dei dati per quantificare l'influenza delle covariate osservate e delle covariate mancanti multi-tipo condivise dal gruppo. Inoltre, viene sviluppato un metodo per esaminare l'esistenza, identificare il tipo corretto e quantificare l'impatto delle covariate mancanti condivise dal gruppo. Questa idea è critica per poter fare stime attendibili in situazioni in cui i campioni sono di piccole dimensioni o in cui l'appartenenza di sottopopolazioni privilegiate è sconosciuta. L'efficacia dell'approccio è dimostrata attraverso uno studio di simulazione dettagliato e un caso di studio reale che coinvolge

prove di trazione su unità di materiale da stampaggio. Questi esempi mostrano come il modello possa migliorare significativamente le prestazioni di stima e l'accuratezza delle previsioni. Inoltre, il documento esplora la robustezza del modello in presenza di problemi di misspecification e presenta una metodologia per esaminare l'esistenza, identificare il tipo corretto, e quantificare l'impatto delle covariate mancanti condivise dal gruppo. Il caso di studio reale illustra, inoltre, come il modello proposto possa essere applicato per scoprire la struttura potenziale delle covariate mancanti e mitigare l'effetto delle informazioni carenti sull'analisi pratica della durata dei prodotti. Il lavoro di Zeng offre così un contributo significativo nel campo dell'ingegneria dell'affidabilità, proponendo un framework metodologico solido per affrontare le sfide poste dalle covariate mancanti condivise nel contesto della modellazione del ciclo di vita dei prodotti.

Il secondo articolo "Valutazione dell'affidabilità di celle di produzione flessibili multistato considerando guasti alle apparecchiature" presenta un'analisi approfondita sulla valutazione dell'affidabilità delle celle di produzione flessibili (FMC) attraverso l'analisi di modelli stocastici per comprendere le prestazioni di tali sistemi, con particolare attenzione alla valutazione delle metriche di affidabilità a livello di sistema e all'analisi degli indici di affidabilità. Gli autori affrontano le sfide nella valutazione dell'affidabilità di FMC dovute all'aleatorietà e all'eterogeneità del processo di produzione. Utilizzano metodi analitici e di modellazione stocastica per affrontare la complessità dei processi di produzione di FMC e propongono metriche di valutazione dell'affidabilità a livello di sistema, integrando gli indicatori di affidabilità tradizionali con un esame completo dei processi di produzione. Il contributo principale del lavoro è la fornitura di un approccio di modellazione stocastica dei processi per gli FMC, insieme agli indicatori di valutazione dell'affidabilità a livello di sistema e ai relativi metodi di calcolo. Il documento si articola in sezioni che forniscono una revisione della letteratura esistente, introducono i due tipi di FMC oggetto di studio, presentano le metriche di valutazione dell'affidabilità a livello di sistema e le relative metodologie di calcolo, si concentrano sulla modellazione dei processi di produzione di FMC utilizzando processi di Markov e presentano un caso di studio pratico per convalidare e interpretare il modello proposto. Infine, il documento conclude riassumendo i contributi della ricerca e sottolineandone l'importanza. Il primo FMC è descritto con un modello di trasferimento di stato stocastico e vengono presentate equazioni per calcolare variabili intermedie e gli indici di valutazione dell'affidabilità come la capacità di produzione, l'efficienza della produttività e l'utilizzo delle apparecchiature. Successivamente, viene presentato il modello per il secondo FMC, che comprende due macchine utensili, un robot, un AGV, un magazzino stereoscopico e un magazzino di linea. Anche per il secondo FMC vengono presentate

equazioni per calcolare variabili intermedie e gli indici di valutazione dell'affidabilità. In sintesi, il documento fornisce un approfondito studio sulla valutazione dell'affidabilità delle FMC, utilizzando metodi analitici e stocastici, e propone metriche di valutazione dell'affidabilità a livello di sistema per migliorare la comprensione e la valutazione dell'affidabilità di tali sistemi. I risultati ottenuti includono l'analisi numerica di un caso di studio relativo a due tipi di sistemi di produzione flessibili (FMC), la valutazione dell'affidabilità dei due FMC utilizzando equazioni e metriche specifiche, la rappresentazione grafica dei tassi di utilizzo delle apparecchiature e della produttività dei due FMC, nonché l'analisi delle tendenze di cambiamento degli indici di affidabilità in base a distribuzioni esponenziali e non esponenziali delle variabili casuali. Inoltre, sono state proposte metriche di valutazione dell'affidabilità a livello di sistema, che comprendono l'utilizzo delle apparecchiature, la capacità produttiva e la produttività, fornendo una valutazione completa delle prestazioni dell'FMC. I risultati mostrano che i tassi di utilizzo delle apparecchiature e la produttività variano in base a diversi parametri e scenari, consentendo agli ingegneri di valutare accuratamente i livelli di affidabilità dei sistemi FMC.

Il documento "Modellazione integrata del sistema-processo e Analisi delle prestazioni per linee di produzione seriali" presenta un'analisi dettagliata sulle prestazioni di un sistema di produzione intelligente. L'obiettivo del lavoro è quello di sviluppare un modello matematico integrato basato sui dati, che combini l'analisi a livello di processo e a livello di sistema per consentire l'analisi in tempo reale delle linee di produzione. Il documento si concentra sull'ottimizzazione delle prestazioni del sistema di produzione, identificando la stretta interrelazione tra processo e sistema e proponendo un metodo analitico basato sui dati per identificare la perdita permanente di produzione (PPL) in tempo reale. Inoltre, il lavoro si propone di sviluppare un metodo di attribuzione della PPL per identificare la causa principale e le macchine problematiche responsabili della perdita di produzione in tempo reale. Questo modello integrato è stato validato con simulazioni e confrontato con risultati simili, dimostrando un'accuratezza del 96,84%. Inoltre, l'attribuzione del PPL ad eventi di fermo e problemi di qualità fornisce una classificazione delle stazioni con problemi, consentendo un'analisi dettagliata delle cause di inefficienza delle prestazioni. Il modello integrato proposto è stato validato con successo attraverso confronti con simulazioni e ha dimostrato un'accuratezza dell'96,84%. I risultati mostrano che il modello integrato proposto è il metodo di attribuzione del PPL sono accurati e forniscono una base solida per future ricerche nel campo della modellazione integrata e dell'analisi delle prestazioni nei sistemi di produzione intelligente. In particolare, i casi di studio confrontano i conteggi di produzione di una linea di serie e i livelli di

buffer ottenuti utilizzando il modello integrato di dati e il calcolo ricorsivo proposti con i risultati della simulazione, dimostrando un alto grado di accordo. I risultati mostrano anche che l'attribuzione dei difetti è in stretto accordo con la produzione extra dovuta all'omissione delle parti bruciate nella simulazione controllata. Inoltre, l'attribuzione del PPL fornisce una classificazione delle stazioni con problemi, consentendo un'analisi dettagliata delle cause di inefficienza delle prestazioni.

4.5 CONSIDERAZIONI SULLA LETTERATURA ESISTENTE

Nel capitolo precedente ho analizzato diversi articoli scientifici relativi alle parole chiave “simulazione”, “manutenzione” e “produzione”, quindi ho trattato i processi di simulazione della produzione, di manutenzione e di simulazione della manutenzione. Le tecniche più utilizzate nei vari documenti sono state:

- 1) **IloT (industrial internet of things), MQTT (broker message queuing telemetry transport) e VPN (virtual private network)**: questi sono tre approcci potenti per implementare sistemi di comunicazione sicuri e affidabili in ambiti industriali, ed ho analizzato le varie differenze.
- 2) **DIGITAL TWIN**: replica virtuale del sistema fisico che consente di monitorare e ottimizzare la produzione in tempo reale.
- 3) **SIMULAZIONE MONTECARLO**: utilizzata per ridurre l'incertezza e migliorare la previsione della qualità dei prodotti.
- 4) **MACHINE LEARNING**: applicato per ridurre i tempi di simulazione e ottimizzare il controllo qualità.
- 5) **APPROCCIO MODULARE DATA DRIVEN**: è una strategia di progettazione e sviluppo, usata in ambito software e architettura IT, che si basa su due principi: la modularità e la gestione dei dati basata sui fatti.
- 6) **SLR (revisione sistematica della letteratura)**: è una metodologia scientifica utilizzata per raccogliere, valutare e sintetizzare in modo strutturato e trasparente le evidenze disponibili su un particolare argomento o sito di ricerca.

Per concludere, le fonti trattate offrono un quadro complessivo e dettagliato delle metodologie di ottimizzazione della manutenzione, sia dell'integrazione di sistemi IloT, che della gestione delle risorse nei sistemi produttivi. Tutti gli approcci, come la manutenzione predittiva, la Digital Twin, e la pianificazione basata sulle competenze mirano ad aumentare la flessibilità e la resistenza dei processi industriali, e forniscono soluzioni riguardanti la riduzione del downtime e l'aumento della

produttività. Infatti, in Gutsch et al., 2023, viene sottolineato l'impegno nella valutazione dei modelli di manutenzione predittiva nella produzione discreta, mentre Umeda et al. 2023 dimostrano come le curve ROC possono migliorare la manutenzione delle apparecchiature di incisione al plasma. Ancora, Ansari et al. 2023 offrono un modello per massimizzare l'allocazione delle risorse umane attraverso un Knowledge Graph, aiutando significativamente i tempi di riparazione. L'analisi di queste diverse tecniche, applicabili in contesti produttivi altrettanto distinti, pone in risalto la sempre maggiore necessità di sviluppare approcci innovativi, come l'integrazione dei dati tramite IIoT e l'impiego di strumenti di simulazione automatizzata per garantire la flessibilità e la resilienza. Nel complesso, gli studi considerati risultano contribuire concretamente ad aumentare la resilienza delle imprese alle sfide dell'Industria 4.0, dimostrando come realtà tecnologiche possano condurre a risultati concretamente tangibili, come la riduzione del costo operativo e l'aumento della competitività. In conclusione, gli articoli che abbiamo esaminato ci mostrano come al tempo d'oggi sia fondamentale andare ad effettuare delle simulazioni sulla produzione e sulla manutenzione così da ottimizzare il controllo qualità e ridurre i difetti produttivi. Queste tecniche rendono i processi produttivi più flessibili e soprattutto più efficienti rispondendo alle esigenze sempre più complesse nella nuova industria 4.0; ovviamente queste tecniche migliorano anche le caratteristiche del prodotto così da rendere la qualità di esso sempre più elevata.

CONCLUSIONE

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

Nel primo capitolo ho analizzato il concetto della manutenzione partendo dallo sviluppo storico che ha avuto e il suo ruolo sempre più importante nelle industrie moderne. Ho parlato poi dei vari tipi di manutenzione esistenti ed ho evidenziato come, grazie alle nuove tecnologie, la manutenzione è diventata essenziale nella modellazione e ottimizzazione dei processi produttivi, anche dei più complessi; concludendo poi con le varie norme che ci sono nell'Unione Europea.

Nel secondo capitolo ho parlato del concetto di simulazione della produzione, analizzando con attenzione come effettuare una corretta simulazione tramite i vari passi da seguire. Ho poi parlato dei diversi tipi di simulatori esistenti, ampliati con 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. Ho concluso con delle considerazioni che mi hanno fatto capire l'impatto ambientale e quello sull'occupazione che può portare la simulazione; c'è anche un impatto sulla formazione e sull'istruzione perché i ragazzi che entreranno nel mondo del lavoro dovranno essere sempre più istruiti per lavorare con macchine dell'industria 4.0

Nel capitolo successivo ho parlato della simulazione applicata alla manutenzione, con più attenzione sui vari tipi di applicazioni che può avere la simulazione nella manutenzione; successivamente ho visto vari metodi come quello Montecarlo, vedendo come funziona nel dettaglio, poi ho parlato dei vari step per uno studio corretto della simulazione ed ho concluso parlando dei vari vantaggi e costi.

Nell'ultimo capitolo della mia tesi ho analizzato vari articoli di argomenti diversi andando a studiare i vari approcci che hanno diversi autori sulla simulazione legata alla manutenzione. Ho visto articoli che trattavano le varie metodologie per ottimizzare i vari tipi di manutenzione ed erano tutte molto diverse tra loro, a certificare la grande apertura di mentalità che possono avere i vari autori. Successivamente ho visto dei documenti che trattavano progettazione e implementazione tramite l'intelligenza artificiale, digital twin e gemelli digitali, certificando la continua innovazione che si sta

cercando di portare nella manutenzione. Poi ho analizzato degli articoli che trattavano gli approcci per ottimizzare le prestazioni dei sistemi di produzione, chiudendo poi con dei documenti sull'analisi e valutazione delle prestazioni.

RISULTATI RAGGIUNTI:

Per riepilogare le principali consapevolezza acquisite, inizio con il fatto che la simulazione applicata alla manutenzione per i processi produttivi rappresenta una risorsa essenziale per le aziende moderne per svilupparsi sempre di più e andare alla ricerca di nuovi compratori e azionisti, per esempio, attraverso l'identificazione e correzione di potenziali problemi in fase di progettazione del ciclo produttivo, riusciremo ad avere una riduzione dei difetti. Ci permette di accorgerci, già durante la simulazione, se qualcosa è andato storto, o andrà storto, poi, quando andremo a fare la manutenzione; quindi è un'attività importantissima per evitare, poi, di avere problemi inaspettati durante lo svolgimento della manutenzione. 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.

BIBLIOGRAFIA:

Tecnologie Emergenti nelle Manutenzioni degli Impianti. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://www.w-true.com/2023/06/28/6-tecnologie-emergenti-nel-campo-delle-manutenzioni-degli-impianti/>

Analisi RAM: la simulazione come strumento per la manutenzione - YouTube. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://www.youtube.com/watch?v=-lUsdlg45ME>

Bevilacqua Giacomo Cuoco, M., & Giovanni Mazzuto, I. (n.d.). UNIVERSITÀ POLITECNICA delle MARCHE Facoltà di Ingegneria Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale LA SICUREZZA E LA MANUTENZIONE DELLE MACCHINE UTENSILI CON TECNICHE DI INDUSTRIA 4.0 SAFETY AND MAINTENANCE OF MACHINE TOOLS WITH INDUSTRY 4.0 TECHNIQUES.

Casi Di Studio Che Mostrano L'efficacia Della Simulazione Del Modello - FasterCapital. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://fastercapital.com/it/tema/casi-di-studio-che-mostrano-l'efficacia-della-simulazione-del-modello.html>

Cos'è la simulazione Monte Carlo? | IBM. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://www.ibm.com/it-it/topics/monte-carlo-simulation>

How to handle challenges in the maintenance department - Atlas Copco Estonia. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://www.atlascopco.com/en-ee/rental/resources/calculation-tools/how-to-handle-challenges-maintenance-department-whitepaper>

IoT e simulazione dei processi industriali - Officeautomation. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://www.officeautomation.soiel.it/iot-e-simulazione-dei-processi-industriali/>

La simulazione nel settore industriale: cos'è e perché usarla. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://www.keplerotech.com/manutenzione-predittiva/simulazione-iot/>

L'IMPORTANZA DI UNA BUONA MANUTENZIONE – TK Sistemi. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://www.tksistemi.com/limportanza-di-una-buona-manutenzione/>

Manutenzione - Wikipedia. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://it.wikipedia.org/wiki/Manutenzione>

Manutenzione correttiva: cos'è e come gestirla - BibLus. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://biblus.acca.it/manutenzione-correttiva-cosa-e-come-gestirla/>

Mitigare i rischi e ottimizzare i risultati - FasterCapital. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://fastercapital.com/it/contenuto/Mitigare-i-rischi-e-ottimizzare-i-risultati.html>

Simulazione - Wikipedia. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://it.wikipedia.org/wiki/Simulazione>

Storia ed evoluzione della manutenzione - Brano tesi. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://www.tesionline.it/tesi/brano/storia-ed-evoluzione-della-manutenzione/7169>

Tipi di manutenzione | Mainsim CMMS Academy. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://www.mainsim.com/academy/tipi-di-manutenzione/>

UNI - Norme generali sulla manutenzione - Certifico Srl. (n.d.). Retrieved September 27, 2024, from <https://www.certifico.com/normazione/261-documenti-riservati-normazione/organismi-normazione/documenti-normazione-enti/2320-uni-norme-generalisulla-manutenzione>

ARTICOLI:

A Bayesian Approach for Lifetime Modeling and Prediction with Multi-Type Group-Shared Missing Covariates: HaoZeng, XuxueSun, Kuo Wang, Yuxin Wen, Wujun Si and MingyangLi (2024).

5th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing Design and implementation of a digital twin for a stone-cutting machine: a case study Carlos Cremonini, Joel Vasco, Carlos Capela, Agostinho da Silva and Marcelo Gaspar (2024)

5th International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing Automated simulation modeling: ensuring resilience and flexibility in Industry 4.0 manufacturing systems Antonio Cimino, Francesco Longo, Letizia Nicoletti, Pierpaolo Veltri (2024)

Feasibility study of using digital twins for conceptual design of air-quenching processes: Zhuming Bi, Donald Mueller, Aki Mikkola (2023)

Reliability assessment of multistate flexible manufacturing cells considering equipment failures: Xiaogang Zhang, Yulong Li, Zhongyuan Zhao, Jin Zhang, Wan Zhang (2023)

SoftER: A Spiral Soft Robotic Ejector for Sorting Applications: Ilias Zournatzis, Graduate Student Member, IEEE, Sotiris Kalaitzakis and Panagiotis Polygerinos (2023)

Generic and scalable multi-layered architecture for Digital Twin implementation in industrial processes: Mineral Processing case study: Oussama Hasidi, El Hassan Abdelwahed, Aimad Qazdar, Moulay Abdellah El Alaoui-Chrif, Intissar Benzakour (2023)

Characterizations and Optimization for Resilient Manufacturing Systems With Considerations of Process Uncertainties: Qiyang Ma, Yiming Che, Changqing Cheng, Zimo Wang (2023)

Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference C. G. Corlu, S. R. Hunter, H. Lam, B. S. Onggo, J. Shortle, and B. Biller, eds. SIMULATION-BASED EVALUATION OF IMPERFECT PREDICTIVE MAINTENANCE MODELS IN DISCRETE MANUFACTURING: A PROCEDURE MODEL AND CASE STUDY: Clemens Gutschli Nikolaus Furian Siegfried Voessner (2023)

Feature Extraction for Predictive Maintenance for Semiconductor Plasma Etching Equipment: Shota Umeda, Ryoji Asakura, Fumihiko Ga and Masahiro Sumiya Yokohama Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Yokohama, Japan (2023)

A competence-based planning methodology for optimizing human resource allocation in industrial maintenance: Fazel Ansaria, Linus Kohla, Wilfried Sihn (2023)

Proposal and test of a configurable production system Digital Model to support Energy-based Asset Management F. Di Cosmo, A. Polenghi, I. Roda, M. Macchi (2022)

Integrated Process-System Modeling and Performance Analysis for Serial Production Lines Chen Li, Student Member, IEEE, Qing Chang, Senior Member, IEEE, Guoxian Xiao, and Jorge Arinez, Member (2022)

Maintenance Activities Optimization via Modelling Dedicated to Manufacturing-Distribution Systems: Selected Case Studies Discussion: Janusz Szpytko (2022)

3rd International Conference on Industry 4.0 and Smart manufacturing, Manufacturing Maintenance Digital Twin using vibration data: Raffaele Abbate, Mario Caterino, Marcello Fera, Francesco Caputo (2022)

Improving Production Performance Through Multi-Plant Cross Learning: Jing Huang, Qing Chang, Yu Qian, Jorge Arinez, Guoxian Xiao (2022)

Degradation curves integration in physics-based models: Towards the predictive maintenance of industrial robots: P. Aivaliotis, Z. Arkouli, K. Georgoulas, S. Makris (2021)

REQUIREMENTS FOR DATA-DRIVEN RELIABILITY MODELING AND SIMULATION OF SMART MANUFACTURING SYSTEMS Jonas Friederich Sune Chung Jepsen Sanja Lazarova-Molnar Torben Worm (2021)

Evaluation of Economic Plausibility of Integrating Maintenance Strategies in Autonomous Production Control: A Case Study in Automotive Industry: Robert Glawar, Fazel Ansari (2021)