

# Chapter 5

## Modellazione e Simulazione Digitali di Sistemi di Produzione

Jack C Chaplin e Giovanna Martinez-Arellano

### 5.1 Introduzione

Nel capitolo precedente, sono stati introdotti i concetti di analisi e modellazione dei sistemi di produzione, concentrandosi sulla produttività e analisi delle capacità, seguiti dalla modellazione delle code. Entrambe queste tecniche richiedono l'uso della matematica per valutare i dati raccolti dal sistema reale. Tuttavia, l'elaborazione matematica manuale può rapidamente diventare estremamente complessa per qualsiasi cosa diversa dagli esempi più semplici di sistemi di produzione. Fortunatamente, la modellazione e la simulazione digitali basate sull'informatica permettono di raccogliere le informazioni necessarie, semplificando al contempo il processo in modo significativo.

Gli strumenti di modellazione e il software aiutano gli ingegneri a essere più produttivi nel processo di concepimento, progettazione, modellazione, valutazione e pianificazione dell'implementazione dei sistemi di produzione. La modellazione e la simulazione dei processi di produzione e delle linee di produzione consentono di utilizzare l'esperienza passata per prevederne le prestazioni, per rilevare possibili problematiche e migliorarne la produttività. Il tutto avviene in un ambiente virtuale prima che il processo di produzione sia realizzato consentendo di ridurre i rischi di sviluppo e di investimento.

---

J.C. Chaplin (✉), G. Martinez-Arellano

Institute for Advanced Manufacturing, Università di Nottingham, Nottingham, Regno Unito  
email: jack.chaplin@nottingham.ac.uk, giovanna.martinez@nottingham.ac.uk

© Gli Autori 2020

J.C. Chaplin et al (ed), *Produzione Digitale per PMI*

Gli strumenti di modellazione e simulazione consentono alle aziende manifatturiere di testare le modifiche e i miglioramenti dei propri sistemi di produzione prima dell'implementazione fisica. In molti casi le decisioni riguardanti le modifiche del sistema di produzione sono spesso basate sull'esperienza e l'intuizione piuttosto che sulla previsione quantitativa. Anche se questo può spesso funzionare, si basa sulla disponibilità di competenze umane ed è soggetto a errori.

La creazione di strumenti di modellazione e di simulazione è un campo altamente specializzato, che richiede competenze in analisi delle probabilità, analisi statistiche e calcolo scientifico. Fortunatamente, l'ampia gamma di soluzioni commerciali consente alle aziende di sfruttare questi strumenti pronti all'uso. Nonostante ciò, è importante comprendere le tecniche sottostanti utilizzate dalle simulazioni e dai modelli, in quanto ne influenzerà la scelta in base all'ambito di applicazione. Spesso, possono essere necessari più pacchetti di simulazione per fornire la copertura di più ambiti, come ad esempio l'analisi delle prestazioni della macchina che necessita di un livello di dettaglio spinto, o l'analisi strategica della gestione dei livelli delle scorte a magazzino.

Facendo un passo indietro, tuttavia, discuteremo prima l'acquisizione dei dati nella sezione nella sezione 5.2 Acquisizione e Analisi dei Dati. Come discusso nella sezione 4.1, lo scopo dell'analisi è quello di trasformare i dati in conoscenza. Modellazione e simulazione sono semplicemente strumenti aggiuntivi per l'analisi, quindi esistono anche per trasformare i dati in conoscenza. Tuttavia, la capacità di modellare con precisione i sistemi di produzione si basa sull'accesso a dati accurati. Senza dati accurati, anche le informazioni generate dai modelli e dalle simulazioni non saranno accurate.

La sezione 5.2 Acquisizione e Analisi dei Dati tratta l'intero ciclo di elaborazione dei dati dalla raccolta, all'analisi e al processo decisionale. Di seguito, la sezione 5.3 Approcci di Modellizzazione e Simulazione tratta la gamma di strumenti computerizzati disponibili per la modellazione e la simulazione dei sistemi di produzione, i principi e le ipotesi e esempi di applicazioni del loro utilizzo.

## **5.2 Acquisizione e Analisi dei Dati**

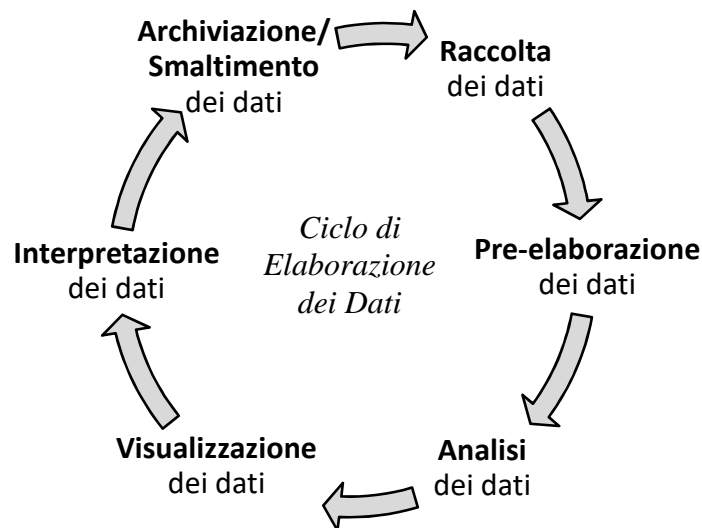
### **5.2.1 Ciclo di elaborazione dei dati**

Si presume spesso che l'analisi dei dati consista nell'acquisizione dei dati dati in pasto ad una formula o un modello matematico per trovare un risultato che aiuti a comprendere meglio l'oggetto dell'analisi. In prima battuta questo è vero, tuttavia, l'analisi dei dati per sistemi più grandi è più complessa, i sistemi si modificano e producono volumi di dati molto più grandi che necessitano di passaggi aggiuntivi che devono essere considerati per garantire che l'analisi sia accurata e proficua.

Il ciclo di elaborazione dei dati consiste in una serie di passaggi che permettono di estrarre informazioni dai dati in modo strutturato e organizzato; va dalla raccolta all'eliminazione dei dati. Tuttavia, le informazioni raccolte nel ciclo possono

indicare quali nuovi dati sono necessari, trasformandoli da un processo in un ciclo. Ci sono diversi modelli di ciclo di vita disponibili nella letteratura, a seconda dell'applicazione. Tuttavia, come illustrato in Figura 5.2-1 i passaggi generali sono:

1. *Raccolta dati*: Raccolta dei dati da sensori o processi di produzione.
2. *Pre-elaborazione dei dati*: Pulizia iniziale e perfezionamento dei dati per risolvere problemi che potrebbero ostacolare il processo di analisi.
3. *Analisi dei dati*: Utilizzo di una varietà di tecniche e metodi per estrarre modelli e informazioni dai dati e per trovare informazioni nascoste.
4. *Visualizzazione dei dati*: Presentazione dei dati e delle informazioni ai responsabili delle decisioni per consentire un processo decisionale efficace.
5. *Interpretazione dei dati*: Comprensione corretta delle informazioni presentate e presa di decisioni efficaci.
6. *Archiviazione/smaltimento dei dati*: Memorizzazione dei dati o delle informazioni che possono essere utili in futuro, o smaltimento in modo sicuro se si determina che non siano più utili.



**Figura 5.2-1** Il ciclo di elaborazione dei dati.

Discuteremo le fasi del ciclo di elaborazione dei dati nelle prossime sei sezioni.

### 5.2.2 Raccolta dei Dati

La raccolta dei dati è il primo passo del ciclo di elaborazione ed è uno dei più critici per il successo del processo. La qualità dei dati acquisiti influirà sulla qualità dell'analisi e del processo decisionale. Questo ha dato origine alla frase comune

“spazzatura dentro, spazzatura fuori” – un sistema di elaborazione dati di alta qualità darà cattivi output se si hanno cattivi input.

I metodi di raccolta dei dati sono spesso controllati in modo non uniforme, con la conseguenza di raccogliere valori non compresi nell'intervallo utile (ad esempio, Volume = -100), combinazioni di dati impossibili (ad esempio Fine prodotto = Acciaio non verniciato, Colore vernice = Verde), valori mancanti e così via. L'analisi dei dati che non sono stati attentamente filtrati per tali problemi può produrre risultati fuorvianti. In genere, i dati raccolti rientrano in uno dei seguenti tipi:

- *Dati strutturati*: dati organizzati in un repository formattato, in genere un database relazionale, solitamente organizzato in tabella con righe e colonne e i relativi elementi mappati nei campi specifici; è il modo in cui i database archiviano i dati. I campi hanno restrizioni rigorose sui formati accettati, ad esempio numeri all'interno di un determinato intervallo, una scelta da un elenco di opzioni o un valore booleano semplice (sì/no). I dati strutturati sono generalmente i più facili da utilizzare, in quanto il significato dei campi e dei numeri è ben definito e organizzato.
- *Dati semi-strutturati*: dati che non risiedono in una tabella strutturata, ma hanno alcuni campi organizzati. Un messaggio di posta elettronica, ad esempio, ha elementi strutturati come il destinatario, il mittente, l'orario e così via, ma anche elementi non strutturati, ad esempio il corpo del testo o il contenuto dell'allegato. XML è un altro esempio di formato semi-strutturato con tag che contrassegnano il contenuto, ma il contenuto dei tag non è strutturato.
- *Dati non strutturati*: dati non organizzati in modo predefinito. Anche se il tipo di file può avere alcuni elementi strutturati, la maggior parte dei dati non è conforme ad alcuna struttura standardizzata. I file audio, i file video, la maggior parte dei formati di testo e questa sessione di formazione sono tutti esempi di dati non strutturati. I dati non strutturati sono più difficili da utilizzare, ma l'80% dei dati raccolti non è strutturato.
- *Metadati*: diversi dalle classificazioni di cui sopra, i metadati significano “dati sui dati”. Una delle tre forme di dati precedenti può includere metadati. Ad esempio, un documento di Word contiene metadati su chi ha modificato il documento, quando è stato modificato l'ultima volta, le dimensioni del file e molto altro ancora. Questi metadati possono essere utilizzati per aiutare a capire a cosa sono correlati i dati e come elaborarli al meglio.

L'origine dei dati influenzerà il livello di struttura dei dati. In generale esistono tre tipi di origine dei dati considerati nei sistemi di produzione:

- *Fonte primaria*: Le fonti primarie sono sensori, che trasformano i fenomeni fisici in segnali elettrici binari, digitali o analogici. Temperatura, umidità, pressione, forza, movimento, accelerazione, presenza di oggetti, luce e molti altri sono esempi di grandezze che possono essere rilevate e misurate con i sensori. I

sensori possono essere integrati nei sistemi di produzione, montati a posteriori su sistemi esistenti o possono essere autonomi. Nella maggior parte dei casi, un database di produzione potrebbe non ricevere i dati direttamente dai sensori; i dati, infatti, vengono prima ricevuti ed elaborati da un controllore industriale, da un PC industriale o da un altro dispositivo di acquisizione dati. Questi dispositivi sono *fonti secondarie* di dati.

- *Fonte secondaria*: I dispositivi che ricevono dati dalle fonti primarie sono fonti secondarie di dati. Questi dispositivi possono includere PLC<sup>†</sup>, controllori di robot industriali, controllori di macchine CNC, computer integrati, dispositivi di interfaccia uomo-macchina e sensori intelligenti con memoria incorporata e capacità di elaborazione. Il vantaggio di acquisire i dati da fonti secondarie anziché da quelle primarie, è che le fonti secondarie hanno capacità di calcolo e memoria di archiviazione. Ciò consente di convertire i dati del sensore da segnali elettrici grezzi in standard di più facile interpretazione. I segnali possono anche essere compressi e pre-processati, richiedendo meno spazio di memorizzazione nel data warehouse. I dati provenienti da più sensori collegati alla stessa sorgente secondaria possono anche essere combinati e confrontati per ottenere ulteriori dettagli che un singolo sensore potrebbe non essere in grado di offrire.
- *Fonte esterna*: Non tutti i dati relativi a un prodotto, alla sua fabbricazione e alla sua vita utile possono avere origine all'interno di una singola azienda. I dati di processo dei fornitori che realizzano i componenti del prodotto possono essere centralizzati man mano che i componenti vengono riuniti nel prodotto completo, fornendo così un aiuto per comprendere come la qualità della fornitura possa influenzare la qualità della produzione. L'uso moderno di fonti di dati esterne rimane fortemente dipendente da soluzioni basate su supporti cartacei, con la documentazione che arriva assieme a componenti e materiali. I sistemi di dati di produzione altamente frammentati e variabili lungo tutta la catena di fornitura fanno sì che automatizzare l'acquisizione dei dati da fonti esterne sia una sfida.

La raccolta di dati da fonti primarie, come i sensori, sarà probabilmente non strutturata o semi-strutturata, mentre la potenza di calcolo di fonti secondarie come PLC o embedded computer consente un approccio più strutturato ai dati raccolti. Spesso è più facile strutturare i dati più vicino a dove vengono raccolti che inviare tutto ad un singolo server per la strutturazione e l'aggiunta a un database.

I metodi di raccolta dei dati dipenderanno dal processo di produzione in esame e dall'origine dei dati (fonti primarie o secondarie). La raccolta dei dati non deve essere automatica o in tempo reale, è utile anche la raccolta periodica dei dati, eventualmente anche eseguita manualmente. La raccolta automatica dei dati in tempo reale presenta notevoli vantaggi, che saranno discussi nel capitolo 6.

---

<sup>†</sup> Un PLC (*Programmable Logic Controller*) è un dispositivo digitale industriale programmabile, specializzato nella gestione dei processi industriali. Esso esegue un programma ed elabora i segnali digitali ed analogici provenienti da sensori e diretti agli attuatori presenti in un impianto industriale.

### 5.2.3 Pre-elaborazione dei dati

La conversione dei dati in informazioni è più difficile quando i dati sono rumorosi o inaffidabili. È anche ostacolato da informazioni irrilevanti e ridondanti. Per questo motivo è necessario effettuare una pre-elaborazione per garantire la qualità dei dati e l'efficienza del processo di analisi. La pre-elaborazione dei dati include molti passaggi secondari a seconda del tipo di dati incluso, che saranno discussi nelle successive sette sezioni.

#### 5.2.3.1 Pulizia dei Dati (Dati Mancanti)

I dati possono essere incompleti, il che potrebbe significare la mancanza di alcuni valori che avrebbero dovuto essere registrati o la mancanza di determinati attributi di interesse durante alcuni periodi di misurazione.

Ciò potrebbe essere dovuto a dati non sempre disponibili, ad esempio malfunzionamento dell'apparecchiatura, l'apparecchiatura non viene impostata correttamente per alcuni periodi di misurazione, o semplicemente perché l'attributo che ora è considerato importante non era ritenuto degno di essere misurato prima.

*Ad esempio, un sensore sorgente primario registra la vibrazione in una macchina CNC. Queste letture vengono raccolte da un PLC di origine secondaria, che aggiunge il l'orario della registrazione e la velocità del mandrino che la macchina CNC stava utilizzando. Ogni misurazione ha quindi tre attributi: vibrazione, orario e velocità del mandrino. Questi dati vengono quindi utilizzati per l'analisi della relazione tra velocità del mandrino e vibrazione.*

*Se per esempio nel sensore una connessione saldata era allentata e per alcuni periodi di alta vibrazione, il sensore non registrava dati, la misurazione occasionale nel set di dati non ha alcun valore per la vibrazione.*

*Il CNC è stato riparato e il PLC è stato erroneamente ripristinato a una configurazione precedente in cui la velocità del mandrino non era inclusa nei dati misurati. Di conseguenza, un'ora intera di misurazioni non ha alcun attributo di velocità del mandrino prima che l'errore fosse in visto e risolto.*

Molti metodi di analisi richiedono dati omogenei, ovvero dati in cui tutti i valori da analizzare hanno lo stesso formato e gli stessi attributi. Se gli attributi sono stati omessi a causa di un errore è possibile utilizzare diversi metodi:

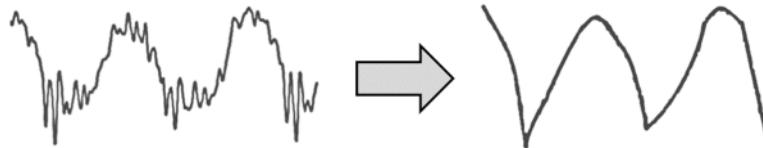
- *Ignorare l'intera misurazione:* Ideale solo come ultima risorsa quando sono stati persi più attributi o non è possibile ricostruire i dati.
- *Compilare manualmente l'attributo mancante:* Utilizzabile solo se il lavoratore è in grado di prevedere rapidamente e facilmente quale sarebbe stato il valore mancante, ad esempio un l'orario in cui le misurazioni vengono eseguite periodicamente.

- *Utilizzare una costante globale:* Definire un valore “predefinito” per tutti gli attributi mancanti in modo da compilarli automaticamente. Utilizzabile solo per alcuni tipi di dati con un singolo valore la maggior parte del tempo e.
- *Utilizzare un valore medio:* Utilizzare un calcolo medio per inserire il valore, ovvero la media delle misurazioni adiacenti, la media sull’intero set di dati o un altro calcolo appropriato ai dati utilizzati.

### 5.2.3.2 Pulizia dei Dati (Rumore)

I dati possono essere rumorosi a causa di strumenti di raccolta difettosi o di errori nella raccolta dei dati. Tuttavia, la stragrande maggioranza dei segnali rumorosi sono inevitabili e sono una realtà coerente anche nelle migliori apparecchiature elettroniche.

Il rumore è un errore casuale indesiderato o la varianza in un valore misurato e nasconde il valore reale.



**Figura 5.2-2** Un esempio di un segnale di misurazione di un sensore in presenza di rumore (a sinistra) e gli stessi dati dopo la rimozione del rumore (a destra).

Quasi tutti i dispositivi elettromagnetici e circuiti saranno soggetti a un certo grado di rumore, e lo studio e la caratterizzazione del rumore è un argomento di studio di per sé. Il rumore può derivare dall’alimentazione dei sensori, erranei circuiti sotterranei o proprietà fondamentali degli elettroni, solo per citarne alcuni. Esistono numerose tecniche per rimuovere l’errore, come:

- *Binning dei dati:* Questi metodi comportano la sostituzione di valori con intervalli (“bins”) in base ai valori vicini.
- *Raggruppamento:* Queste tecniche vengono utilizzate per rilevare valori insoliti o “outlier” e rimuoverli.
- *Regressione:* Arrotondamento dei dati adattandoli a una funzione individuata automaticamente.
- *Filtro:* Si usa una varietà di funzioni per rimuovere determinate frequenze o altri componenti dal segnale. Ad esempio, la potenza della rete britannica ha un segnale AC da 50 Hz e questo spesso causa rumore nelle misurazioni dei sensori. Questo componente del segnale può essere rimosso con un filtro.

### 5.2.3.3 Pulizia dei Dati (Incoerenza)

Ci possono essere delle incoerenze nei dati registrati, in particolare quando i dati vengono registrati manualmente. Per esempio quando si registrano le informazioni manualmente, diversi operatori possono avere convenzioni nella denominazione incoerenti per i tipi di errore. Anche la raccolta automatica dei dati può essere incoerente quando viene configurata con nomi di file o formati di dati incoerenti. I dati possono anche essere erroneamente duplicati, a causa di un errore manuale o di un problema di rete.

Questi problemi devono in genere essere corretti all'origine, definendo e applicando le convenzioni e i formati di denominazione. Esistono alcuni strumenti automatizzati per l'ingegneria della conoscenza che possono essere utilizzati per rilevare la violazione dei vincoli conosciuti sulla base delle conoscenze precedenti e evidenziare automaticamente le incoerenze riscontrate.

### 5.2.3.4 Integrazione dei Dati

I dati possono provenire da più fonti tra cui database, fogli di calcolo, file XML ecc. e non sempre si può essere in grado di definire il formato e gli standard di rappresentazione dei dati utilizzati se sono impostati dall'apparecchiatura che si sta utilizzando o provengono da fonti esterne. La combinazione di questi dati può essere difficile se i dati sono etichettati o rappresentati in modo diverso. La ridondanza è un altro problema. Un attributo può essere ridondante se può essere derivato da un altro.

Anche se la soluzione più comune a questo problema è l'integrazione manuale, l'utilizzo di un data warehouse e il metodo ETL (Extract, Transform, Load – Estrazione, Trasformazione, Caricamento) possono semplificare questo processo, trasformando tutti i dati in un unico formato omogeneo.

Un *data warehouse* (letteralmente, magazzino di dati) riunisce molte fonti di dati differenti e fornisce un'unica interfaccia comune, consentendo alle query di effettuare ricerche all'interno delle numerose fonti di dati senza alcuno sforzo supplementare da parte dell'utente. I database sono un esempio di una fonte di dati in un data warehouse.

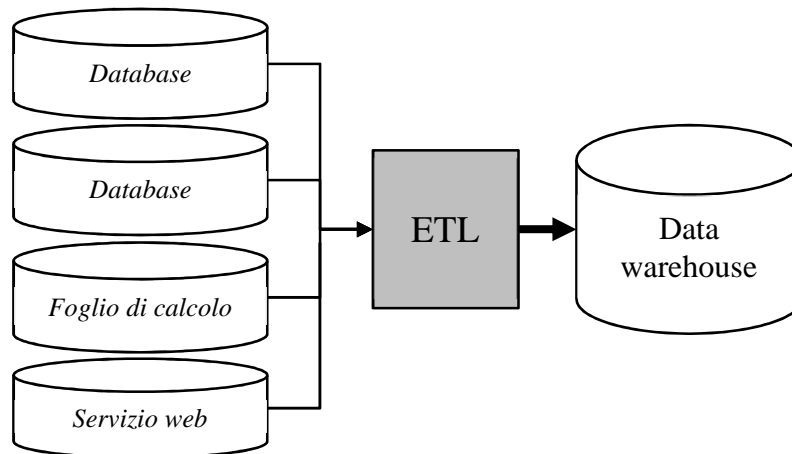
I data warehouse devono unificare e integrare più fonti di dati per consentire di effettuarvi ricerche e confronti. Questo processo è chiamato ETL (Extract, Transform, Load).

Un database viene tipicamente aggiornato in tempo reale con i valori più recenti dei dati per consentire di prendere rapidamente le decisioni. Invece, un data warehouse conserva tutti i valori storici dei dati, quindi è più lento nell'accesso e nell'analisi, ma consente una visione più approfondita dei dati rispetto ad un database.

*Data lake* (letteralmente, lago di dati) è un altro termine usato occasionalmente. Mentre un data warehouse utilizza l'ETL per armonizzare tutti i dati in formati compatibili, un data lake mantiene i dati nella loro forma originale e li trasforma in



altri formati solo su richiesta. Questo processo è talvolta chiamato Extract, Load, Transform o ELT.



**Figura 5.2-3** : I data warehouse combinano informazioni attuali e storiche provenienti da una grande varietà di fonti di dati utilizzando un metodo chiamato ETL. L'ETL è un processo spesso complesso per estrarre regolarmente i dati, convertirli in un formato comune e caricarli nel magazzino. Sebbene complicato, permette di risparmiare tempo se si immagazzinano grandi quantità di dati.

#### 5.2.3.5 Trasformazione dei Dati

Mentre l'integrazione dei dati converte un intero set di dati da un formato all'altro per poterli utilizzare con programmi diversi senza modificare i valori effettivi dei dati, la trasformazione dei dati trasforma i valori nei dati stessi in un modulo più adatto per l'analisi. Le trasformazioni richieste dipenderanno dal tipo di analisi, ma possono includere:

- *Normalizzazione*: modifica della scala dei valori dei dati per garantire la compatibilità. Questo spesso significa utilizzare un intervallo specificato, ad esempio da -1.0 a 1.0 o da 0 a 1.0.
- *Aggregazione*: si riferisce alla creazione di operazioni di riepilogo o di aggregazione agli attributi, ad esempio calcolando gli importi mensili o annuali delle vendite giornaliere anziché l'utilizzo di valori giornalieri.
- *Generalizzazione dei dati*: i dati grezzi o "di bassi livello" sono sostituiti da concetti di livello superiore. Ad esempio, gli attributi categorici come le strade possono essere generalizzati con concetti di livello superiore come città o contea. Allo stesso modo, valori numerici come l'età possono essere mappati a categorie

come giovani, di mezza età e anziani per spostare l'attenzione da età specifiche a categorie.

*Ad esempio, un'azienda desidera confrontare la qualità dei pezzi fabbricati con diversi centri macchina in officina, per vedere quali macchine potrebbero aver bisogno di manutenzione o regolazione. Ci sono una varietà di centri di lavoro di diverse dimensioni ed età da analizzare. I lavoratori hanno notato che il più recente centro di lavoro produce più parti che non riescono a superare i controlli di qualità rispetto a qualsiasi altro e sono preoccupati per il loro investimento.*

*IL punto nevralgico è che gli unici dati che i lavoratori stanno esaminando sono il numero assoluto di parti di cui non riescono a controllare la qualità, ma la nuova macchina produce in generale più parti rispetto agli altri centri di lavoro. Se i dati per ogni centro di lavoro possono essere normalizzati calcolando la percentuale di parti difettose piuttosto che il numero assoluto, diventa chiaro che la nuova macchina ha una percentuale inferiore di parti difettose rispetto a qualsiasi altra, anche se il numero assoluto è più alto.*

Si noti che un altro processo chiamato normalizzazione è un aspetto importante della progettazione di database, ma questo processo è distinto dalla normalizzazione dei dati discussa qui.

#### **5.2.3.6 Riduzione dei Dati**

Consiste nella riduzione del volume o delle dimensioni (ovvero il numero di attributi) dei dati. Questa tecnica è utile quando l'analisi non è fattibile o praticabile sui dati completi. Le tecniche di riduzione dei dati devono garantire che l'integrità dei dati originali non sia compromessa e la creazione di un set ridotto che possa ancora garantire l'estrazione di conoscenze di qualità. Alcune strategie includono:

- *Riduzione della dimensione:* gli attributi ridondanti possono essere rimossi, manualmente o dopo un periodo iniziale di analisi.
- *Compressione dei dati:* i meccanismi di codifica vengono utilizzati per ridurre le dimensioni del set di dati. Le dimensioni possono essere un problema importante in alcune applicazioni, rendendo difficile o impossibile l'elaborazione a causa della potenza di calcolo disponibile.
- *Riduzione della numerosità:* i dati vengono sostituiti o stimati da rappresentazioni di dati alternative più piccole, ad esempio utilizzando modelli di regressione tecniche di clustering.
- *Discretizzazione e generazione della gerarchia concettuale:* i valori dei dati grezzi degli attributi vengono sostituiti da intervalli o livelli concettuali superiori. Ad esempio, la sostituzione di valori numerici con concetti quali basso, medio e alto. Si tratta di un concetto simile alla generalizzazione per la trasformazione dei dati.

*Ad esempio, si consideri il monitoraggio dei disturbi della qualità dell'alimentazione. Per identificare efficacemente il problema bisogna campionare nella gamma di MHz [1]. Rispetto ad altre applicazioni in cui i dati vengono raccolti a frequenze inferiori a 25Hz, questo rappresenta 40.000 volte più dati. In questo caso possono essere applicate tecniche come Transformata Wavelet (ondicelle) e Analisi delle componenti principali (Principal Component Analysis - PCA) per ottenere un rapporto di riduzione elevato, in alcuni casi superiore al 90%, a seconda della tecnica utilizzata [2].*

### 5.2.3.7 Commenti sul Pre-Processamento dei Dati

Una volta che i dati sono stati pre-elaborati, il risultato di questo processo deve essere salvato. Spesso un semplice formato CSV (Comma Separated Value) è più che sufficiente e può essere letto da tutte le applicazioni di analisi e foglio di calcolo. Se si tratta di un formato di output complicato, database, file XML o file JSON (e molti altri formati) può essere utilizzato. Questi formati sono definiti standard e quasi tutte le tecnologie che sono disponibili oggi possono facilmente utilizzarli.

Come si può vedere dalle dimensioni della sezione di pre-elaborazione dei dati, è un'area complessa e spesso trascurata da coloro che hanno meno familiarità con l'analisi dei dati. Tuttavia, come mostrato dalla tabella sottostante, la pre-elaborazione dei dati occupa la maggior parte del tempo degli analisti professionisti, mostrando quanto sia un compito importante ma anche difficile.

Nome dell'Attività	Percentuale di Tempo
Raccolta dei Dati	19%
Pre-Processamento dei Dati	60%
Analisi dei Dati	9%
Analisi di Affinamento degli Algoritmi	4%
Creazione dei Training Set	3%
Altro	5%

**Tabella 5.2-1** La percentuale di tempo che gli scienziati dedicano alle diverse attività [3]. La percentuale maggiore è di gran lunga la pre-elaborazione dei dati.

Lo stesso studio che ha raccolto questi dati ha anche mostrato che la pre-elaborazione dei dati è l'aspetto meno piacevole di essere un analista.

### 5.2.4 Analisi dei Dati

Dopo essersi assicurati che i dati siano puliti e nel formato e nella struttura appropriati, essi sono pronti per l'*analisi*. L'analisi dei dati moderna combina l'analisi statistica tradizionale con metodi computazionali nuovi ed emergenti. L'analisi utilizza un numero enorme di tecniche e molte sono specifiche per il tipo di dati in elaborazione. Alcune delle categorie più grandi sono discusse in seguito, a partire dall'analisi numerica e passando ad analisi più testuali:

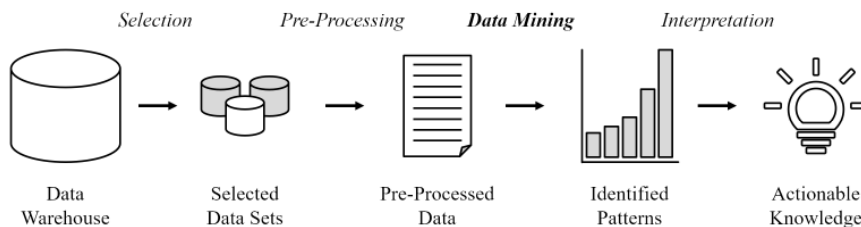
- *Analisi statistica*: Il processo di generazione di statistiche da dati memorizzati e l'analisi dei risultati per dedurre il significato dei set di dati sottostante o la realtà che tenta di descrivere. Alcune di queste statistiche includono l'analisi Bayesiana, la probabilità condizionale, la classificazione dei dati, la regressione lineare, il ricampionamento, la riduzione, l'analisi ad albero, per citarne solo alcuni [4]. Anche se i metodi avanzati di analisi dei dati come l'apprendimento automatico possono essere molto efficaci, in molti casi l'analisi statistica classica ben eseguita può essere altrettanto e addirittura più efficace. L'analisi statistica potrebbe non essere il metodo più moderno o alla moda di analisi di dati numerici, ma le tecniche sono ben comprese e raffinate, e i risultati sono spesso estremamente buoni per tutte le circostanze più difficili.
- *Analisi quantitativa*: Le tecniche che cercano di comprendere gli andamenti utilizzando la modellazione e la misurazione matematica e statistica, per creare un modello del processo misurato. Questo modello consente agli analisti di esaminare e testare il passato e il presente e prevedere gli eventi futuri.
- *Analisi qualitativa*: Questa utilizza il giudizio soggettivo basato su informazioni non quantificabili, come le competenze gestionali. Mentre l'analisi quantitativa utilizza input esatti, l'analisi qualitativa si occupa di preoccupazioni intangibili e inesatte che appartengono al regno sociale ed esperienziale piuttosto che a quello matematico. Le analisi quantitative e qualitative vengono spesso utilizzate insieme per esaminare le operazioni di un'azienda e valutare i potenziali investimenti.
- *Analisi semantica*: questa prevede l'uso di ontologie per analizzare il contenuto di fonti basate su testo. Le ontologie sono modelli di dati della denominazione formale e della definizione di categorie, proprietà e relazione tra concetti, che consentono i sistemi automatizzati di comprendere il significato approssimativo del testo. Viene utilizzata l'analisi del testo per valutare la relazione tra diversi concetti ontologici. Può essere utilizzato per l'elaborazione del linguaggio naturale, cioè la comprensione automatica del linguaggio umano. Un esempio comune di utilizzo è la comprensione di un tweet o le recensioni dei prodotti utilizzando un linguaggio positivo o negativo.

Negli ultimi anni sono emerse due tecniche aggiuntive, utilizzate da sole o in combinazione con le tecniche di cui sopra.

- *Data mining (estrazione dei dati)*: Questo è il processo di individuazione di modelli in set di dati di grandi dimensioni (denominati anche "big data"). Questi modelli possono quindi essere visti come un riepilogo dei dati di input e utilizzati in ulteriori analisi e previsioni.
- *Machine learning (apprendimento automatico)*: sfrutta i modelli presenti nella cronologia per identificare rischi e opportunità. Il machine learning si riferisce all'uso di algoritmi per imparare automaticamente dai dati, senza utilizzare istruzioni esplicite o basarsi su modelli.

### 5.2.4.1 Data Mining

La conoscenza è un bene molto prezioso ai fini della produzione, poiché consente a un'azienda di differenziarsi dalla concorrenza e di competere in modo efficiente ed efficace al meglio della propria capacità. I progressi compiuti in campo informatico (IT), i sistemi di acquisizione di dati e la tecnologia di archiviazione, nonché gli sviluppi degli strumenti di apprendimento automatico (ML) hanno portato nuovi modi di scoprire conoscenze nei processi di fabbricazione. I dati provenienti da quasi tutti i processi di un'azienda manifatturiera come progettazione del prodotto e del processo, pianificazione e controllo dei materiali, assemblaggio, programmazione, manutenzione, riciclaggio ecc. vengono registrati. Tali archivi di dati offrono un enorme potenziale come fonti di nuove conoscenze. Tuttavia, i dati devono essere analizzati e convertiti in conoscenze azionabili per essere utili. Inoltre, il volume di dati raccolti sta diventando un problema, dato che informazioni importanti sono “seppellite” all'interno di grandi volumi di altri dati.



**Figura 5.2-4** Tali archivi di dati offrono un enorme potenziale come fonti di nuove conoscenze. Tuttavia, i dati devono essere analizzati e convertiti in conoscenze azionabili per essere utili. Inoltre, il volume di dati raccolti sta diventando un problema, dato che informazioni importanti sono “seppellite” all'interno di grandi volumi di altri dati.

L'*estrazione dei dati* è un'area dell'intelligenza computazionale che si concentra sulla fornitura di nuovi sistemi, tecniche e teorie per la scoperta di conoscenze nascoste in grandi volumi di dati. Si tratta di un mix di concetti e algoritmi tratti da apprendimento automatico, statistica, intelligenza artificiale e gestione dei dati. Il termine *big data* è anche comunemente usato per riferirsi a quest'area di analisi dei dati.

L'utilizzo dell'estrazione dei dati nella produzione è iniziato negli anni '90 e sta prendendo piede in vari aspetti del processo di produzione, come la manutenzione predittiva, il rilevamento di difetti, la progettazione, la produzione, l'assicurazione della qualità, la programmazione e i sistemi di supporto decisionale. Un tipico processo di estrazione di dati è illustrato nella Figura 5.2-4.

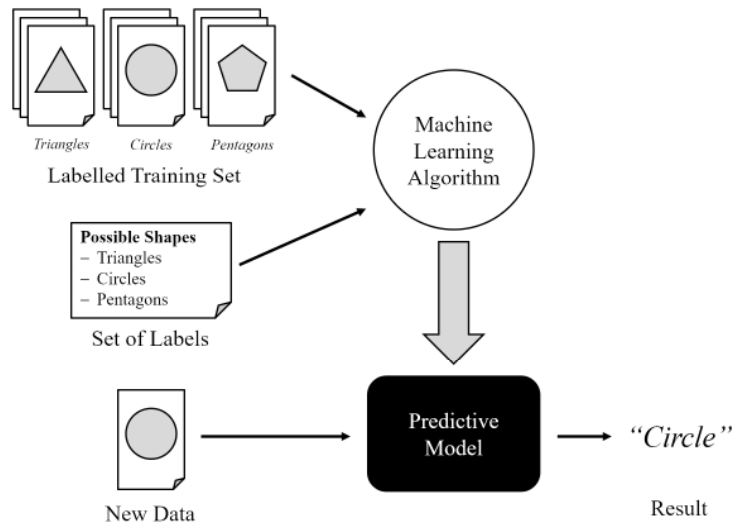
Le metodologie di estrazione dei dati sono state introdotte per fornire una visione più olistica del processo di scoperta di conoscenze, al di là dell'applicazione di algoritmi statistici o di apprendimento automatico. Il data mining esamina un

singolo set di dati per individuare modelli precedentemente sconosciuti senza informazioni pregresse, mentre l'apprendimento automatico utilizza l'esperienza passata per trovare esempi di modelli noti in nuovi set di dati. I due domini si incrociano frequentemente, quindi la distinzione è spesso sfocata.

#### 5.2.4.2 Machine Learning

L'*apprendimento automatico* è un argomento ampio, ma in genere si riferisce ad algoritmi che imparano nel tempo a dare risultati migliori. Il termine e il concetto risalgono al 1959, ma sono i recenti miglioramenti della potenza computazionale l'hanno portato al mainstream. Gli algoritmi di machine learning utilizzano un *training set* di dati che viene etichettato e utilizzato per generare automaticamente un modello predittivo. Questo modello viene quindi utilizzato su un nuovo set di dati a cui viene assegnato automaticamente un'etichetta.

L'apprendimento automatico è ora comunemente usato con applicazioni tra cui la previsione della congestione nelle app di navigazione satellitare, il filtraggio dello spam e-mail, il rilevamento delle frodi nelle transazioni bancarie e i sistemi di riconoscimento facciale. Qualsiasi punto della produzione in cui è necessario assegnare una classe o un tipo a un dato è una potenziale applicazione del machine learning.



**Figura 5.2-5** Una panoramica del processo di machine learning. L'algoritmo utilizza un training set di immagini di forme etichettate (e un insieme di tutte le possibili etichette) per generare un modello predittivo. Le nuove immagini non etichettate delle forme verranno quindi classificate automaticamente, come ad esempio il cerchio raffigurato.

*Ad esempio, un'azienda ha utilizzato un sistema di visione per identificare i difetti nella finitura della vernice dei propri prodotti. Il sistema può identificare qualcosa al di fuori dell'ordinario, ma non può indicare il tipo di guasto senza il contributo del lavoratore, che guardando l'immagine del difetto può assegnargli un'etichetta. L'etichetta descrive il tipo di imperfezioni e potrebbe essere chip, abrasione, ammaccatura, graffio, gorgogliamento o altro ancora. Conoscere il tipo è importante in quanto aiuta a identificare la causa del problema e impedire che si ripeta. L'azienda desidera automatizzare il processo di etichettatura in quanto si tratta di un processo che richiede molto tempo e i loro lavoratori potrebbero trascorrere il loro tempo meglio altrove. Qui, il set di immagini di imperfezioni etichettate manualmente diventa il training set per l'algoritmo di machine learning. L'algoritmo crea un modello predittivo da questo set di training. Eventuali imperfezioni future identificate verranno vagliate attraverso l'algoritmo che le classificherà automaticamente.*

L'apprendimento automatico, però, non è privo di inconvenienti; richiede un ampio training set e l'accesso a un set di dati etichettato è spesso il più grande ostacolo nell'implementazione di una soluzione di machine learning. La qualità dei risultati dipende anche in larga misura dalla qualità del training set. Considerando per esempio la Figura 5.2-5 - cosa succede se il nuovo dato è l'immagine di un ottagono? Il modello predittivo probabilmente lo classificherebbe come un cerchio poiché non ha esempi di ottagoni e il cerchio sarebbe l'etichetta più adatta tra quelle disponibili. Gli algoritmi possono, però, indicare un livello di certezza nella loro classificazione e per segnalare problemi come questo. Un altro problema è che il modello predittivo è una "scatola nera" - viene generato automaticamente e il funzionamento di un modello specifico è estremamente complesso e quasi sempre incomprensibile per un essere umano. Ciò significa che un modello che presenta problemi diventa molto difficile da risolvere.

Sia il data mining che il machine learning sono possibili grazie ad algoritmi estremamente complessi, ma non è necessario sapere con precisione come funzionano per iniziare a implementarli, poiché esistono molti pacchetti software che gestiscono la complessità. La scelta principale sarebbe tra pacchetti open source gratuiti come TensorFlow di Google, PyTorch, Keras e Weka di Facebook; o utilizzando soluzioni integrate proprietarie come quelle disponibili in Amazon Web Services, Microsoft Azure o Google Cloud.

#### **5.2.4.3    Analitica dei Dati**

Da segnalare anche il campo di *Data analytics (analitica dei dati)*. Mentre l'analisi si concentra principalmente su dati del passato per capire perché si verificano gli eventi, la data analytics si concentra su ciò che è probabile che si verifichi in futuro e su come reagire. La data analytics è talvolta detta *Business analytics* quando applicata ad aspetti più generali delle prestazioni aziendali. L'analitica è in genere definita come di tre tipi:

- *Analitica descrittiva*: cosa è successo? Questa è un'analisi efficace e si concentra su ciò che è accaduto in passato.
- *Analitica predittiva*: cosa accadrà? Utilizzando la modellazione predittiva come l'apprendimento automatico e alcune tecniche statistiche per prevedere cosa è probabile che si verifichi in futuro sulla base di eventi precedenti.
- *Analitica prescrittiva*: come possiamo far accadere le cose? Comprendendo quali eventi o parametri hanno contribuito agli eventi passati, vengono automaticamente consigliate delle modifiche ai parametri da apportare per influenzare gli eventi futuri.

Esistono molti pacchetti software o linguaggi di programmazione per l'analisi e l'analisi dei dati, con esempi open source gratuiti tra cui KNIME (Konstanz Information Miner) per l'analisi dei dati, R che è un linguaggio di programmazione dedicato per l'analisi dei dati, e SciPy che è una libreria di analisi dei dati per Python. Esistono anche molti pacchetti software commerciali, spesso descritti come software di *Business Intelligence*.

### 5.2.5 Visualizzazione dei Dati

L'analisi dei dati viene spesso eseguita in parallelo con la visualizzazione e molti strumenti di analisi e analitica dei dati includeranno la funzionalità di visualizzazione dei dati. Il loro scopo è quello di mostrare in modo grafico e facilmente comprensibile, le tendenze e la struttura delle informazioni scoperte attraverso il processo di analisi. È possibile far emergere ampie relazioni e modelli, così come tendenze emergenti. La visualizzazione contribuisce anche a restringere rapidamente la ricerca di informazioni di interesse. Può essere statico, sotto forma di grafici e diagrammi nei report in tempo reale, ad esempio i dashboard di produzione che riportano i dati in tempo reale dall'area di produzione.

Esempi comuni di software di visualizzazione includono Microsoft Power BI, Dundas BI e Tableau, ma molte aziende sviluppano anche dashboard personalizzati con librerie di visualizzazione come Shiny o Grafana di R Studio. Anche le funzionalità di creazione di report e grafici del software per fogli di calcolo possono raggiungere questi obiettivi.

La visualizzazione dei dati è un esempio di sistema di supporto decisionale basato sui dati. I sistemi di supporto alle decisioni saranno discussi maggiormente nel capitolo 6.

### 5.2.6 Interpretazione dei Dati

Sebbene esistano strumenti automatizzati per aiutare a prendere decisioni l'interpretazione finale e la responsabilità del processo decisionale in genere ricade sugli esseri umani. Il ciclo di trattamento dei dati esiste per facilitare il processo decisionale, ma la decisione stessa dovrebbe essere in linea con le procedure aziendali consolidate.



In fase decisionale è importante comprendere il tipo di problema che viene effettivamente risolto, in quanto ciò influenzerà la quantità e il tipo di dati necessari per prendere una buona decisione.

- I *problemi non strutturati* sono quelli che possiedono soluzioni multiple e per cui non esistono algoritmi e formule che possano portare ad una decisione ottimale, a causa di incertezze derivanti dal problema stesso; inoltre, esistono pochi parametri che possono esserne direttamente influenzati. I problemi non strutturati sono spesso quelli rari e dovuti all'innovazione, e come tale non esistono responsi pre-stabiliti. Un esempio di questo tipo di problema è rappresentato dal voler prendere una decisione circa gli schemi di ricompensa degli impiegati; in questo caso, i risultati della decisione riguarderebbero più la soddisfazione personale dell'impiegato e la percezione della società, piuttosto che l'esatto valore materiale della ricompensa stessa. I problemi non strutturati sono tipicamente risolti tramite decisioni intuitive informali basate sull'esperienza.
- I *problemi strutturati* al contrario hanno parametri ed obiettivi molto chiari, e i risultati di una decisione possono essere modellati e previsti. Spesso si trova un numero ridotto di criteri che deve essere massimizzato ed è possibile ricorrere ad algoritmi per modellare la decisione. I problemi strutturati sono quelli di routine e quelli ben noti. Un esempio di questo tipo di problema riguarda il responso ad un requisito di manutenzione ordinaria di un pezzo di attrezzatura o di una macchina utensile. Il problema è comune ed è ben noto, e l'esperienza indica quale sia la soluzione migliore da adottare. I costi di sostituzione e di inattività sono infatti dati ben conosciuti.
- I *problemi semi-strutturati* sono quelli in cui solo una parte del problema può essere risolto in modo ottimale, e di solito richiede la compartecipazione di una soluzione standard e di una basata su giudizio individuale. Costituiscono la zona di grigio tra i problemi strutturati e non strutturati. Un esempio potrebbe riguardare il creare un piano di manutenzione per un nuovo pezzo delle attrezzature. Si conoscono i costi di inattività e delle parti in sostituzione, ma non si ha una comprensione intuitiva della frequenza di intervento che si dovrà effettuare sulla macchina, almeno finché non la si utilizzi per un tempo considerevole. Infatti, le modalità di guasto ed avaria non sono completamente note.

Più un problema è strutturato, più facile è applicare i dati e trovare una soluzione ottimale. Finora, i metodi di cui abbiamo discusso si applicano meglio a problemi strutturati e semi-strutturati. I problemi non strutturati sono più difficili da affrontare con un approccio basato sui dati (data-driven), ma ciò non significa che sia impossibile. Molti problemi non strutturati possono essere ridotti a semi-strutturati dopo un'analisi più approfondita e degli strumenti come i modelli di analisi delle decisioni (DAM) possono iniziare a scomporre il problema in componenti più piccoli e gestibili. I DAM sono strumenti e metodi statistici, come ad esempio i

processi analitici gerarchici (analytical hierarchy processes - AHP), le analisi dell'albero decisionale (decision tree analysis), l'analisi decisionale multi criterio, le previsioni probabilistiche per il supporto decisionale, ove siano da considerare criteri multipli e non vi sia una singola risposta ottimale.

Ci sono due problemi comuni quando si tratta di prendere decisioni assistite con i dati analizzati:

- I decisori prendono decisioni sbagliate perché non hanno accesso a dati di alta qualità e quindi o sono disinformati da dati errati o usano invece l'intuizione.
- Gli analisti dei dati cercano di prendere decisioni basate sui dati, quando non hanno una comprensione dettagliata del mondo reale in cui i dati hanno origine.

La soluzione semplice consiste nell'assicurare che gli analisti e quelli con conoscenze di dominio collaborino al processo decisionale. L'esecuzione di tutti i passaggi del ciclo di analisi dei dati fornirà un insieme solido e affidabile di dati analizzati e visualizzati su cui basare le decisioni, ma questo deve anche essere combinato con l'esperienza del mondo reale.

### **5.2.7 Archiviazione Dati / Smaltimento**

Per i dati raccolti, elaborati e analizzati questa fase del ciclo rappresenta un bivio. I dati possono essere memorizzati e reinseriti nella fase di raccolta dei dati del ciclo per un utilizzo e un'analisi futuri man mano che vengono acquisiti nuovi dati. In alternativa, i dati possono essere considerati utilizzati e da smaltiti. I dati possono occupare un grande volume di spazio di archiviazione e l'immagazzinamento permanente è un'operazione costosa. Anche se i costi di immagazzinamento stanno diminuendo, anche i volumi di dati raccolti dalle aziende sono in aumento.

Un'alternativa consiste nello smaltire i dati grezzi raccolti, pur mantenendo i dati analizzati. I dati analizzati richiedono in genere una quantità minore di spazio di archiviazione, pertanto è possibile mantenere le informazioni dettagliate anche se si elimina l'origine delle informazioni dettagliate.

Quando si smaltiscono i dati, bisogna considerare la modalità di cancellazione dei dati. L'eliminazione semplice dei file potrebbe non rimuovere i dati dal supporto di archiviazione. Questo può non essere una grande preoccupazione per i dati di processo raccolti, ma i dati che sono commercialmente o personalmente sensibili dovrebbero essere eliminati in modo sicuro o potrebbero essere recuperati da un individuo pericoloso come un rivale aziendale o un ex dipendente insoddisfatto. Bisogna considerare anche le responsabilità ai sensi del regolamento generale sulla protezione dei dati (GDPR) nell'UE o alle normative locali equivalenti: i dati personali devono essere raccolti solo quando necessario, utilizzati per uno scopo chiaro e specificato e smaltiti in modo sicuro quando non sono più necessari.

## 5.3 Approcci di Modellizzazione e Simulazione

### 5.3.1 Introduzione alla Modellazione e Simulazione

Un modello è una rappresentazione matematica (e spesso una semplificazione) di un sistema. Una simulazione utilizza il modello per prevedere il comportamento del sistema nelle condizioni specificate, immettendo degli input nel modello e registrando i risultati. Gli strumenti di modellazione e simulazione consentono alle aziende manifatturiere di testare modifiche e miglioramenti ai propri sistemi di produzione prima dell'implementazione fisica. In molti casi le decisioni riguardanti i cambiamenti del sistema di produzione sono basate sull'esperienza e sull'intuizione piuttosto che su una previsione quantitativa. Sebbene questo spesso funzioni, si basa sulla disponibilità di competenze umane ed è soggetto a errori.

La creazione di un pacchetto di modellazione o simulazione richiede conoscenze e competenze estremamente specializzate. Sebbene questi strumenti nascondano molti dettagli della loro implementazione dall'utente, comprendere il tipo di modello sottostante aiuterà a capire quale pacchetto è più adatto alle esigenze. Gli strumenti di modellazione tendono a essere molto specifici e spesso sarà necessaria una combinazione di pacchetti per ottenere una buona copertura dei problemi che si desidera risolvere.

Per la produzione, queste aree specialistiche possono essere ampiamente raggruppate in tre domini e spesso è necessario un pacchetto o una soluzione separata al minimo per ogni dominio:

- Il *dominio di prodotto* è correlato al prodotto che deve essere realizzato e può essere classificato in modellazione della struttura, della geometria, della funzionalità o della conoscenza.
- Il *dominio di processo* è costituito dalle relazioni tra eventi e attività in un sistema di produzione, descrivendo come dovrebbe agire un sistema di produzione nel suo complesso, senza entrare nei dettagli specifici di ogni macchina o risorsa di produzione.
- Il *dominio di risorse* è costituito dalle istruzioni operative per una determinata risorsa di produzione, ad esempio un centro di lavorazione o un robot. Queste istruzioni sono in genere specifiche della risorsa modellata, ad esempio il G-code di una macchina CNC.

Nella sezione seguente viene fornita una panoramica degli approcci di modellazione più comuni utilizzati dai pacchetti software e l'applicabilità per essere in grado di selezionare un pacchetto in base alle proprie esigenze.

## 5.3.2 Tipi di Approcci di Modellazione

### 5.3.2.1 Simulazione ad Eventi Discreti

La *simulazione ad eventi discreti (DES - Discrete Event Simulation)* è una metodologia di simulazione ampiamente adottata all'interno dei settori industriali che devono testare virtualmente i cambiamenti del sistema di produzione prima di essere implementati. Permette un'analisi di alto livello delle prestazioni del sistema, riproducendo statisticamente e probabilisticamente le interazioni dei suoi componenti e delle sue risorse.

L'intero impianto di produzione può essere modellato come una sequenza di operazioni eseguite su entità passive (ad esempio componenti), mentre passano attraverso le fasi del processo di produzione. Sebbene i componenti siano passivi, hanno attributi che influiscono sul modo in cui vengono gestiti e alcuni di questi attributi cambiano man mano che il componente avanza nel processo. La simulazione consente di testare le modifiche alla linea di produzione e risponde a domande quali:

- Quanto durerà il ciclo per questo nuovo prodotto?
- Qual è l'utilizzo delle attrezzature, devo investire in più risorse o ottimizzare l'utilizzo di altre?
- È possibile che i buffer si riempiano e si formino delle code durante processo?
- Qual è il tasso di errore previsto per questo processo, il processo è efficiente in termini di costi?

You may notice many of the questions above are similar to those answered in Chapter 4, and that's not a coincidence. La DES è una simulazione statistica piuttosto che fisica. Consente il trattamento dei differenti dati riguardanti le risorse disponibili (ad esempio, qual è il tempo di ciclo di un processo, quanto spesso una macchina richiede manutenzione e con quale frequenza va in fermo-macchina) per prevedere le prestazioni future in circostanze diverse. È spesso semplice da implementare all'interno di una società, a condizione di disporre di dati cronologici su cui basare le stime.

### 5.3.2.2 Modellazione Basata sugli Agenti

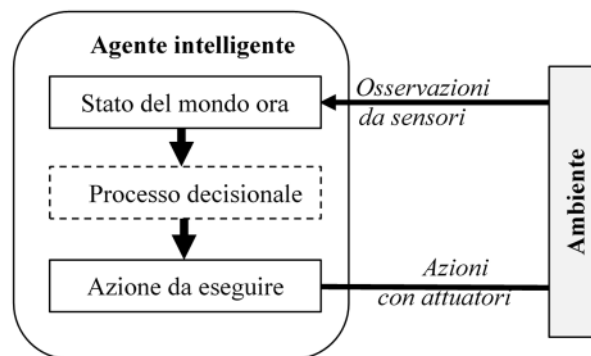
La *modellazione basata su agenti* è uno strumento che consente la modellazione e la simulazione di sistemi complessi suddividendo il problema in unità più semplici e modellando quelli che utilizzano agenti intelligenti. In questo modo, il modellatore deve solo comprendere il comportamento dei componenti semplici per creare il modello, mentre tecniche come la dinamica dei sistemi richiedono una migliore comprensione del sistema nel suo complesso.

Un *agente intelligente* (tipicamente chiamato semplicemente *agente*) è una parte di software indipendente in grado di mostrare un comportamento autonomo e intelligente [5]. Un agente è un singolo risolutore di problemi con una certa capacità

di percepire e agire sul suo ambito/ambiente. Possono essere utilizzati sia per il controllo dei sistemi (dove l'ambiente è il sistema fisico), sia per i sistemi di modellazione (dove l'ambiente è un modello). Ci concentriamo qui sulla loro applicazione nella di modellazione dei sistemi.

Esistono molti tipi di agenti, ma hanno alcune proprietà di base:

- Un agente può osservare il suo ambiente con dei sensori.
- Un agente prende una decisione in base alle osservazioni.
- Un agente avvia ed esegue azioni utilizzando degli attuatori per modificare l'ambiente.



**Figura 5.3-1** La funzione di base di un agente. Il processo decisionale può variare da semplici regole di condizione-azione, a processi di apprendimento intelligente e artificiale altamente complessi.

La modellazione basata su agenti scompone problemi complessi concentrandosi su componenti più semplici, con ogni agente che rappresenta il comportamento di una risorsa o di un lavoratore nel sistema. La complessità emerge quindi dalle interazioni di questi componenti, ciascuno rappresentato da un agente. Per la modellazione e la simulazione l'ambiente, i sensori e gli attuatori sono tutti virtuali. Tuttavia, gli agenti sono sempre più utilizzati come metodo di controllo per i sistemi fisici reali, quindi la definizione di base omette "virtuale".

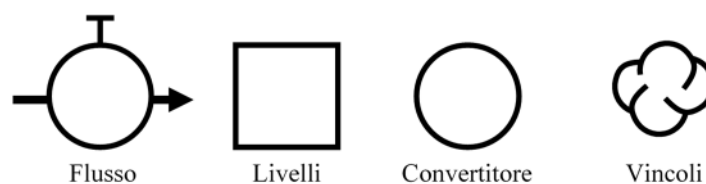
Nella produzione, questo strumento è stato in genere utilizzato per la modellazione della pianificazione della produzione e dell'allocazione delle risorse, la programmazione e il controllo della produzione, il monitoraggio e la diagnosi, la produzione in reti e l'assemblaggio e la gestione del ciclo di vita. Grazie alla loro natura distribuita, i sistemi basati su agenti forniscono modularità, robustezza e autonomia, e offrono un modo alternativo per progettare e controllare i sistemi rispetto agli approcci convenzionali. Un esempio di ambiente esistente per la simulazione di sistemi multi-agente nel settore manifatturiero è MAST (Manufacturing Agent Simulation Tool) [6], sviluppato da Rockwell Automation. Questo strumento è particolarmente focalizzato sul routing dinamico del prodotto.

### 5.3.2.3 Dinamica dei Sistemi

La *dinamica dei sistemi* (*System Dynamics - SD*) è una tecnica per la costruzione di modelli incentrati su interdipendenze, effetti di feedback, dipendenze temporali e causalità nell'oggetto rappresentato. Permette una modellazione più complessa del DES e viene applicata, oltre che nella produzione, in settori quali la finanza, la crescita della popolazione, l'agricoltura e il comportamento di sistemi ecologici. Gli anelli di retroazione sono una delle considerazioni chiave in SD e causano alcuni dei comportamenti meno attesi in sistemi complessi, come le linee di produzione e macchinari, e possono causare seri problemi se non compresi [7].

La SD è ideale per l'analisi delle dinamiche di produzione future e può includere aspetti operativi e organizzativi oltre a quelli dell'officina. Permette di studiare come il flusso di informazioni influisce sul comportamento dei sistemi produttivi, un aspetto spesso non coperto da altre simulazioni, che considerano solo il flusso di oggetti fisici. Un tipico modello SD viene creato utilizzando i seguenti elementi:

- I *livelli* (mostrati come rettangoli) rappresentano la quantità di alcuni elementi del sistema in un certo istante di tempo, ad esempio i livelli delle scorte.
- *Ratei* o *variabili di flusso* (mostrati come valvole) rappresentano la velocità di cambiamento dei livelli nel sistema in un intervallo di tempo, come ad esempio l'utilizzo del refrigerante.
- I *convertitori* (mostrato come cerchi) sono equazioni o calcoli aggiuntivi che incidono sul sistema.
- I *connettori* (mostrati come frecce) sono i collegamenti informativi nel sistema che collegano i componenti tra loro. Le frecce spesso hanno evidenza diversa per mostrare la differenza tra le informazioni (frecce sottili) e la modifica delle quantità fisiche (frecce spesse).
- Le *condizioni al contorno* del sistema (mostrati come nuvole) sono i vincoli del sistema modellato.

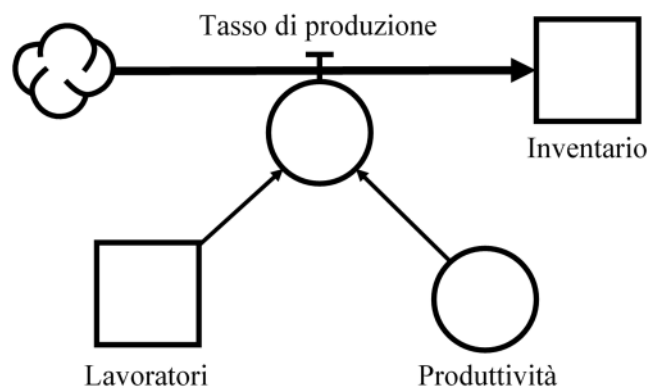


**Figura 5.3-2** Componenti del diagramma di Systems Dynamics. Adattato. Diritti d'immagine: Autori, adattato da [8].

A seconda del problema modellato, la SD può essere implementata in due fasi:

1. *Dinamica dei sistemi qualitativa*: questa fase comporta la creazione di diagrammi causa-effetto o mappe di sistema.
2. *Dinamica dei sistemi quantitativa*: questa fase comporta la derivazione della forma delle relazioni tra tutte le variabili all'interno dei diagrammi, la calibrazione dei parametri e la costruzione di equazioni per la simulazione ed l'esecuzione di esperimenti.

Uno dei diagrammi più comuni in SD è il diagramma dei livelli e dei ratei (noto anche come diagramma stock and flow). La Figura 5.3-3 ne mostra un esempio.



**Figura 5.3-3** Esempio di diagramma dei livelli e dei ratei, che modella il tasso di produzione di una linea come dipendente dalla quantità di lavoratori disponibili e dalla produttività del sistema, con conseguente aggiunta di prodotti finiti all'inventario. Diritti di immagine: gli autori, basato su [8].

Una volta che il sistema è modellato con SD, viene fatta una valutazione dettagliata per trovare la soluzione ideale. In questa fase sono necessarie grandi quantità di dati, il che rende questa valutazione una sfida per alcune aziende manifatturiere. In generale, la SD è anche una simulazione più complessa da creare rispetto a DES, ma offre molte più possibilità per comprendere i sistemi molto complessi.

#### 5.3.2.4 Reti di Petri

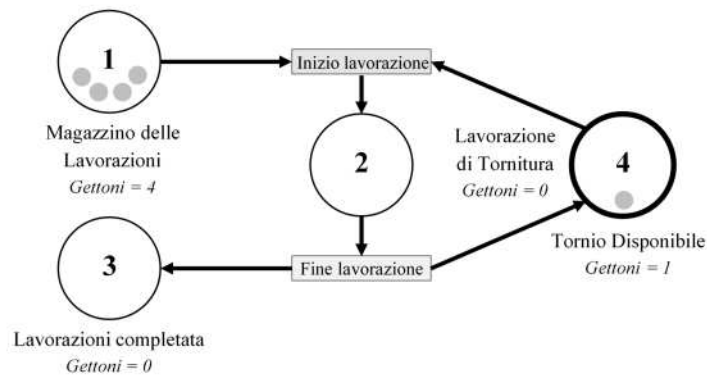
Le *reti di Petri* sono uno strumento di modellazione grafica e matematica applicabile a diversi sistemi. Come strumento grafico, le reti di Petri sono state utilizzate come un aiuto di comunicazione visiva simile ai diagrammi di flusso o ai diagrammi di rete. La rete di Petri classica è un grafico diretto con due tipi di nodi denominati *luoghi* e *transizioni*. I luoghi sono rappresentati da cerchi e le transizioni da rettangoli. Una rete di Petri ha degli stati, rappresentati da *gettoni*. I luoghi

possono contenere zero o più token, rappresentati da punti neri. Una transizione viene attivata solo se tutte le posizioni input per le transizioni hanno gettoni e una transizione consumerà i gettoni di input e sposterà i gettoni nei luoghi di output.

La Figura 5.3-4 mostra una rete di Petri in cui si modella una macchina il cui processo di lavorazione può avere due stati: libero e occupato. Sono presenti quattro luoghi, *Magazzino* (1), *Disponibile* (4), *Processing* (2) e *Completato* (3), e si hanno due transizioni, inizio e fine processo. Sono presenti cinque gettoni, 4 sul posto *magazzino* e 1 sul posto *disponibile*. I gettoni nell'archiviazione rappresentano parti da elaborare e il gettone in *disponibile* rappresenta la disponibilità del tornio per l'elaborazione. Il sistema procede in passaggi di tempo discreti.

La transizione rappresentante il processo possono attivare solo se sono disponibili sia un gettone nel *magazzino* (che rappresenta la parte da elaborare) sia un gettone in *disponibile* (che indica che il processo non è occupato). La transizione consumerà questi gettoni e posizionerà un gettone nell'*elaborazione*. Il processo non può ricominciare in quanto, sebbene ci siano parti disponibili nel magazzino, il tornio non è disponibile.

La transizione che rappresenta la finitura del processo consumerà un gettone disponibile nell'*elaborazione* e posizionerà un gettone in *completo* (che rappresenta un processo finito) e in *disponibile* (rappresentando che il tornio è di nuovo disponibile). La rete di Petri è quindi pronta per iniziare un nuovo lavoro prendendo un gettone dal *magazzino* e si ripeterà fino a quando tutte le parti non verranno elaborate.



**Figura 5.3-4** Modellazione secondo la Rete di Petri di una macchina con due stati: in lavorazione e disponibile.

Le reti Petri sono un metodo di modellazione potente ma difficile e dettagliato. Spesso il modello viene suddiviso in sotto modelli per una modellazione più



semplice, mettendo a disposizione degli strumenti di modellazione per gestire i modelli a livello inferiore.

#### 5.3.2.5 Simulazione Monte Carlo

La *simulazione Monte Carlo* (*Monte Carlo Simulation – MCS*) è un processo analitico computerizzato che viene utilizzato per valutare e misurare il rischio associato a qualsiasi impresa o progetto. Consente agli utenti di comprendere una determinata situazione, ma anche l'impatto di altri possibili scenari. Anziché utilizzare valori assoluti per una simulazione (ad esempio, un tempo medio di esecuzione per un processo di fresatura) utilizza una distribuzione di probabilità dei valori.

Un esempio di questa distribuzione di probabilità è la distribuzione normale. Durante la simulazione, i campioni vengono prelevati in modo casuale dagli intervalli di input e i risultati vengono ricalcolati più e più volte. Il risultato è un intervallo, o distribuzione, di possibili valori di risultato e delle loro probabilità associate di occorrenza. Rispetto ai metodi deterministici, MCS offre i seguenti vantaggi s:

- Fornisce *stime probabilistiche di risultati potenziali*, anziché valori singoli. Ad esempio, una simulazione convenzionale potrebbe informare l'utente di un tempo di processo stimato accettabile per l'utente. In confronto, un MCS fornisce la probabilità che la durata di un processo cada al di fuori di bande accettabili.
- Fornisce informazioni sui *quali input hanno contribuito maggiormente a un determinato risultato*. Alcune deviazioni di un processo possono avere un impatto minimo o nullo sulle prestazioni complessive del sistema, ma altri processi possono avere un effetto enorme con anche piccole deviazioni.
- Consente all'utente di comprendere il *comportamento degli input* relativi a un particolare scenario. Quale potenziale combinazione di variabili può causare problemi al sistema? Come puoi proteggerti da tutto questo??

Un esempio dell'uso di MCS nelle aziende manifatturiere è quello di ridurre al minimo il numero di interruzioni causate dalla catena di approvvigionamento. Utilizzando questo tipo di simulazione, è possibile modellare variabili quali le richieste di vendita, i costi dei materiali, gli esborsi degli investimenti, i tempi di consegna e di elaborazione, l'incertezza delle scorte e il rischio di catastrofi. Le variabili, inoltre, possono essere sia indipendenti sia interconnesse. Attraverso l'MCS, l'utente può prendere in considerazione migliaia di scenari e determinare diversi risultati, ad esempio quali fattori hanno maggiori probabilità di influire sulla supply chain; il costo dei materiali, il meteo, le spese generali, il fluttuare dei prezzi, per citarne solo alcuni.

### 5.3.2.6 Simulazione Virtuale

Molti metodi di modellazione ora hanno la capacità di rendering tridimensionale, consentendo all'utente di vedere i risultati di una simulazione in modo realistico e intuitivamente comprensibile. I progressi della realtà virtuale e delle tecnologie di realtà aumentata possono anche presentare all'utente il sistema in modo immersivo e interattivo.

Tuttavia, in alcuni casi, la creazione di un modello 3D per avere un'idea intuitiva di un design o di un sistema è sufficiente per raggiungere gli obiettivi del processo di modellazione. Per esempio modelli di prodotti CAD (Computer-Aided Design) per testare l'usabilità (anche se il CAD offre molto di più) e la creazione di modelli di stazioni di assemblaggio o aree di lavoro che permettono ai lavoratori di vedere l'ergonomia e verificare la presenza di problemi prima della costruzione del posto di lavoro.

### 5.3.2.7 Gioco di Simulazione

Un modello è un'astrazione matematica di un sistema e l'approccio usuale è quello di utilizzare il modello per simulare il risultato di parametri specifici o per ottimizzare i parametri al fine di ottenere i risultati desiderati. A volte, tuttavia, il modello viene utilizzato per testare la reazione degli esseri umani alla situazione. Questo è chiamato gioco di simulazione e consente di testare le risposte umane a situazioni impreviste o stressanti come la gestione degli incidenti o di testare l'usabilità di interfacce e workstation.

### 5.3.2.8 Simulazione Intelligente

La modellazione e le simulazioni possono essere estremamente complesse. Questi sistemi hanno spesso molti parametri e per esplorare tutte le possibilità possono richiedere tempi di esecuzione incredibilmente lunghi, fornendo risposte troppo tardi per essere utili. La *simulazione intelligente* si basa su tecniche di intelligenza artificiale (IA) e in genere supporta altri tipi di tecniche di simulazione. Ad esempio, il *machine learning* e l'*intelligent sampling* possono essere utilizzati per le attività di ottimizzazione e calibrazione di un sistema basato su agente, creando meta-modelli in grado di aumentare notevolmente la velocità per i modelli di grandi dimensioni. Per i sistemi *digital twin* e le analisi *what-if*, i componenti AI possono essere incorporati direttamente nel modello di simulazione per consentire il test e la previsione.

Un'altra applicazione della simulazione intelligente è l'uso del *deep learning* per la sostituzione dei sistemi *ruled-based*. PricewaterhouseCoopers, ad esempio, attualmente supporta una grande casa automobilistica per introdurre veicoli autonomi per il pubblico. Parte di questo lavoro prevede l'utilizzo di un *deep reinforcement learning* per determinare le regole decisionali ottimali che consentono ai veicoli di massimizzare l'efficienza soddisfacendo anche le richieste di viaggio del cliente. Approcci simili possono essere utilizzati per le linee di produzione automatizzate.

### 5.3.2.9 Simulazione Distribuita

Se un modello è molto complesso, l'esecuzione di una simulazione richiederebbe un tempo estremamente lungo e può essere utilizzata una simulazione distribuita. Molti metodi di modellazione possono essere utilizzati, la sfida consiste nel rendere il modello scomponibile in unità più piccole che possono quindi essere distribuite a più risorse di calcolo per eseguire la simulazione in parallelo.

Un altro caso d'uso per la simulazione distribuita è quando più entità (come le aziende) desiderano creare un modello ed eseguire una simulazione insieme, ma desiderano anche creare i loro modelli utilizzando diversi pacchetti di modellazione o desiderano mantenere segreti elementi del loro modello. Molti degli standard della simulazione distribuita come IEEE 1278 [9] hanno le loro origini nel wargaming (gioco di guerra) militare per la segretezza di alcuni elementi nella simulazione distribuita.

### 5.3.3 Applicazioni della Modellazione

Le applicazioni della modellazione sulla produzione sono molto numerose. CAD - Computer Aided Design (progettazione assistita dal computer) è forse lo strumento usato più comunemente. Il CAD consente di costruire un modello da testare virtualmente prima che i prototipi siano realizzati. Consente l'analisi dimensionale e la convalida, nonché l'analisi ingegneristica come:

- *Analisi delle proprietà di massa*, ad esempio il volume del prodotto, le aree delle superfici, il peso e il centro di gravità.
- *Controllo d'interferenza* nei progetti multicomponenti
- *Analisi delle tolleranze* per determinare automaticamente quali tolleranze sono necessarie per il corretto funzionamento del prodotto
- *Analisi agli elementi finiti* che fornisce soluzioni approssimative a diversi test come ad esempio sforzo-deformazione, trasferimento di calore o dinamica dei fluidi che altrimenti richiederebbero prototipi fisici.
- *Analisi cinematica e dinamica* per testare il movimento dei componenti interconnessi e analizzarne le proprietà di moto.

Inoltre, sono in genere integrati nei programmi CAD informazioni sulla qualità della vita come revisioni della progettazione automatizzate, redazione automatizzata e controllo della versione.

Nel contesto dell'analisi dei sistemi di produzione, la modellazione ha un gran numero di applicazioni, alcune elencate di seguito insieme ai tipi di modellazione tipicamente utilizzati per queste applicazioni [10].

- *Bilanciamento della catena di assemblaggio*: la progettazione delle linee di assemblaggio e il loro bilanciamento. Il bilanciamento garantisce che una linea abbia risorse sufficienti (ad esempio lavoratori o attrezzature) per soddisfare il tasso di produzione richiesto, senza sovraccapacità inutilizzata.

*Metodi di modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti.*

- *Pianificazione della capacità:* modellazione di elementi esterni imprevedibili di un ambiente aziendale per garantire che l'azienda abbia una capacità sufficiente per affrontare le fluttuazioni. Per la produzione ciò includerà fluttuazioni dell'offerta e della domanda e la garanzia che l'azienda abbia uno stoccaggio, buffer e capacità di produzione sufficienti per far fronte o identificare le aree che potrebbero essere modificate o perfezionate per soddisfare la capacità richiesta.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Dinamica dei Sistemi, Simulazione Monte Carlo, Simulazione Reti di Petri.*

- *Produzione cellulare:* ottimizzazione del layout di un set-up di produzione cellulare per una maggiore capacità produttiva e una migliore ergonomia dell'operatore. Controlla anche nuovi schemi di pianificazione o piani di processo per potenziali problemi operativi.

*Metodi di Modellazione: Simulazione Virtuale*

- *Gestione dei Trasporti.* Modellazione della catena di approvvigionamento per valutare l'efficacia del percorso dei veicoli, del carico dei camion, dell'utilizzo dei centri di distribuzione e degli approcci di gestione degli incidenti.

*Metodi di modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Simulazione Basata su Agenti, Simulazione Reti di Petri, altro (Simulazione del Traffico, un insieme specializzato di metodi di modellazione per il trasporto)*

- *Previsione.* Prevedere i modelli futuri e l'analisi delle tendenze. In un contesto manifatturiero ciò consisterà generalmente in previsioni di mercato sulla domanda di prodotti di un'azienda in situazioni globali mutevoli.

*Metodi di modellazione: Dinamica dei Sistemi*

- *Gestione dell'inventario.* Valutazione dei costi e dei benefici della tenuta dell'inventario, sia per risparmiare spazio che per assicurarsi contro l'interruzione dell'approvvigionamento. Può anche includere elementi della politica di utilizzo dell'inventario (cioè quando ricostituire le scorte o quale stock utilizzare per primo) e capire a quale livello di magazzino deve essere effettuato un ordine di rifornimento.

*Metodi di modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Simulazione Monte Carlo.*

- *Appena in tempo.* Progettazione di sistemi di produzione just-in-time (JIT), che sono sistemi in cui la ricezione di parti da parte dei fornitori si allinea molto strettamente con quando le parti devono essere utilizzate (cioè le parti arrivano "appena in tempo"), con conseguente bassi livelli di inventario richiesti e tempi di ciclo più rapidi. Ciò richiede una linea di produzione molto attentamente

bilanciata, poiché anche piccole interruzioni dell'approvvigionamento o del processo possono causare ritardi significativi a livello di sistema.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Simulazione Intelligente.*

- *Ingegneria di processo - produzione.* Progettazione dei processi di produzione, inclusi elementi di progettazione del processo, ottimizzazione di ramp-up e misurazione e ottimizzazione delle prestazioni. Può essere utilizzato anche per pianificare intere nuove strutture o per valutare il potenziale impatto delle nuove acquisizioni di attrezzature.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Dinamica dei Sistemi, Simulazione Basata su Agenti, Simulazione Monte Carlo, Simulazione Reti di Petri, Simulazione Virtuale, Simulazione Intelligente.*

- *Ingegneria di processo - servizio.* Progettazione di processi di assistenza come logistica e distribuzione, gestione dei rifiuti, vendita al dettaglio, servizi e servizi finanziari. I processi di assistenza condividono molte preoccupazioni simili con il processo di produzione, tra cui la pianificazione, la capacità, l'analisi del collo di bottiglia e la misurazione e l'ottimizzazione delle prestazioni.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Dinamica dei Sistemi, Simulazione Distribuita.*

- *Pianificazione della produzione e controllo dell'inventario.* Una specializzazione dell'ingegneria di processo - produzione, pianificazione della produzione e controllo dell'inventario si concentra specificamente sull'ottimizzazione delle dimensioni dei lotti, sull'analisi del collo di bottiglia, sulla previsione e sulla pianificazione.

*Metodi di modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Simulazione Basata su Agenti, Simulazione Distribuita.*

- *Acquisto.* Ottimizzazione delle strategie di acquisto per parti e forniture, incluso quando rifornire le scorte e comprensione delle dimensioni minime di acquisto e degli sconti all'ingrosso per mantenere scorte sufficienti con il prezzo minimo e senza scorte in eccesso.

*Metodi di modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti.*

- *Allocazione delle risorse.* Assegnazione di attrezzature, lavoratori e tempo/straordinari alle attività per migliorare i flussi di processo e la produttività in circostanze diverse. Può anche includere l'assegnazione di materie prime, utensili e stoccaggio ai processi.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Simulazione Basata su Agenti, Simulazione Monte Carlo, Simulazione Distribuita, Simulazione Intelligente.*

- *Pianificazione.* Modellazione di un processo di produzione per testare il potenziale sequenziamento del lavoro, ottimizzare la produttività e garantire che gli ordini vengano consegnati in tempo. Si tratta di un'ampia area tematica, che comprende elementi di analisi della produttività e capacità produttiva, allocazione delle risorse, pianificazione della forza lavoro e analisi dei trade-off tra obiettivi contrastanti come l'affidabilità della consegna e i costi di produzione.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Simulazione Basata su Agenti, Simulazione Monte Carlo, Simulazione Rete di Petri, Simulazione Intelligente.*

- *Strategia.* Modellazione di un'azienda o di un sistema per simulare l'effetto del cambiamento dei criteri di alto livello e delle strategie aziendali proposte.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Dinamica dei Sistemi, Simulazione Basata su Agenti, Simulazione Monte Carlo, Gioco di Simulazione.*

- *Gestione della filiera.* Modellazione di sistemi di supply chain complessi e interconnessi per comprendere gli anelli deboli, come la distribuzione dell'inventario, la pianificazione delle consegne e la valutazione dell'instabilità e robustezza in una rete di approvvigionamento.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Dinamica dei Sistemi, Simulazione Basata su Agenti, Simulazione Rete di Petri, Simulazione Di Distribuzione, Gioco di Simulazione.*

- *Pianificazione della forza lavoro.* Modellizzazione dell'impatto dei diversi schemi dei turni e livelli del personale, dell'impatto della formazione e della formazione incrociata (formazione dei dipendenti in più lavori o processi in modo che possano essere riassegnati più facilmente) e dell'impatto dell'aumento della forza lavoro rispetto agli investimenti in nuove attrezzature.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti*

- *Gestione della manutenzione.* Modellazione degli schemi e dei programmi di manutenzione proposti rispetto ai guasti previsti delle apparecchiature per valutare il compromesso tra tempo e costo dell'approccio alla manutenzione rispetto alla probabilità e all'impatto di un guasto.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Simulazione Monte Carlo, Simulazione Virtuale.*

- *Gestione della conoscenza.* Modellazione dell'introduzione e della progettazione di nuovi prodotti, delle curve di apprendimento di nuovi processi o politiche interne, nonché comprensione dell'impatto della formazione a livello di organizzazione.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Dinamica dei Sistemi.*

- *Gestione di progetto.* Modellazione di potenziali scenari relativi alla consegna dei progetti e comprensione dell'approccio di gestione dei progetti più appropriato e cognizione dell'impatto propagato di ritardi o interruzioni.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Dinamica dei Sistemi, Simulazione Monte Carlo, Simulazione Rete di Petri, Simulazione Intelligente.*

- *Progettazione organizzativa.* Modellizzazione dei cambiamenti nella struttura organizzativa e nel comportamento e analisi degli effetti sui risultati aziendali.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Dinamica dei Sistemi, Simulazione Basata su Agenti, Gioco di Simulazione.*

- *Formazione manageriale e istruzione.* Modellizzazione dei risultati della formazione e educazione della direzione di un'organizzazione.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Dinamica dei Sistemi, Gioco di Simulazione, Simulazione Distribuita, Simulazione Virtuale.*

- *Gestione finanziaria.* Stima dei costi, dei rischi e dei risultati delle modifiche finanziarie o delle acquisizioni di capitale.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Simulazione Monte Carlo.*

- *Gestione della qualità.* Un dominio ad ampio raggio che modella i risultati di diversi paradigmi di qualità su risultati misurabili in un'azienda manifatturiera. I paradigmi di qualità includono il miglioramento continuo, sei sigma, la gestione della qualità totale e molti altri.

*Metodi di Modellazione: Simulazione ad Eventi Discreti, Dinamica dei Sistemi*

### 5.3.4 Valutazione degli Strumenti di Modellazione

Si può vedere che esistono molti settori in cui la modellazione e la simulazione possono essere applicate in un'impresa manifatturiera. Molti pacchetti software coprono più domini in un singolo pacchetto o potrebbero essere destinati a un settore specifico. La gamma di strumenti di modellazione è in continua evoluzione e, sebbene alcuni esempi siano elencati di seguito, è importante valutare un pacchetto in base alle proprie esigenze e capire quanto si adatta bene all'attività specifica. Alcuni criteri di valutazione includono [8]:

- La gestione di informazioni eterogenee relative alla progettazione di prodotti, ai processi, alle risorse e al loro funzionamento durante il processo di produzione. Se un modello non è in grado di interpretare la varietà di informazioni fornite, il modello non può funzionare.
- L'Integrazione delle conoscenze e informazioni dei diversi strumenti e delle differenti tecniche che lavorano a diversi livelli di dettaglio. I modelli e le simulazioni operano a diversi livelli di precisione e dettaglio in base alle loro

esigenze e ai loro requisiti. Per trarre conclusioni significative è necessario combinare informazioni provenienti da più fonti e modelli.

- Il continuo Aggiornamento della rappresentazione virtuale del sistema di produzione in modo che possa essere costantemente sincronizzato con la controparte fisica. Un modello è utile solo se modella accuratamente il mondo fisico, quindi è fondamentale che uno strumento faciliti l'aggiornamento e la modifica del modello man mano che l'equivalente fisico cambia.
- Consentire agli ingegneri e ai tecnici del reparto di officina di trarre conclusioni utili senza la necessità di specialisti di modellazione e simulazione, per garantire che le informazioni siano disponibili per coloro che ne hanno bisogno.
- La Diminuzione dei costi di investimento e operativi, poiché l'azienda risparmia sfruttando il modello virtuale invece di adottare un approccio "prova e vedi" per la pianificazione e la progettazione dei processi.

La modellazione e le simulazioni sono strumenti altamente efficaci per prevedere il risultato di un processo di produzione, di una linea di produzione o di una catena di fornitura. Tuttavia, la maggior parte delle tecniche e dei pacchetti sono più adatti ad aree specifiche e hanno i propri punti di forza e di debolezza. Le simulazioni e i modelli migliori sono costituiti da più simulazioni più piccole e modelli che condividono le informazioni per fornire un livello di previsione più accurato. Per consentire questo approccio, esistono delle piattaforme efficaci che supportano l'interoperabilità tra gli strumenti per la digital factory. Tuttavia non tutte le piattaforme lo consentono, e si dovrebbe essere cauti se si adotta o sviluppa uno strumento che non supporta quanto segue [8]:

- Un *modello di dati comune* e standard per la rappresentazione di entità correlate a sistemi di produzione, alle risorse, ai processi e prodotti. L'uso di standard semplifica notevolmente la condivisione dei dati o la traduzione dei dati tra formati diversi.
- Un *archivio dati condiviso* accessibile da diversi strumenti di digital factory per recuperare e condividere i dati. I modelli di dati standard sono importanti, ma i dati devono essere archiviati in un percorso facilmente accessibile. Per questo l'archiviazione dei dati in un cloud è sempre più comune, consentendo così un accesso ai dati semplice da qualsiasi luogo.
- Un *software middleware* in grado di accedere ai dati condivisi e interpretarli/convertirli correttamente in base al modello di dati impiegato. È meno comune che i modelli di simulazione comunichino direttamente. Invece, il software middleware funge da intermediario.

Il software di simulazione per la produzione deve trovare un equilibrio tra tre attributi chiave:

- *Efficacia*: quanto sono accurati i risultati della simulazione e quanto bene il software raggiunge gli obiettivi dell'utente?



- *Efficienza*: quanto tempo ci vuole all'utente per impostare la simulazione?
- *Facilità d'uso*: quanto è facile utilizzare il software? Quanto è ripida la curva di apprendimento?

Un software di simulazione ideale avrà risultati eccellenti in tutti e tre gli aspetti, ma in pratica diversi pacchetti software daranno la priorità a diversi attributi. Inoltre, il software di simulazione di solito è specializzato in diverse aree, come il bilanciamento delle linee, la pianificazione, la modellazione della catena di approvvigionamento, la modellazione dell'inventario, ecc. La scelta di un pacchetto riguarda la comprensione di ciò che si sta tentando di modellare e la scelta degli attributi a cui si desidera dare la priorità. Altre caratteristiche che è possibile prendere in considerazione quando si seleziona un pacchetto di simulazione includono:

- *Fiducia* – ci sono esempi di implementazioni di successo di questo pacchetto software?
- *Costo* – quanto costa il pacchetto? Il supporto è incluso nel pacchetto o ha un costo extra? Si tratta di un costo una tantum o di un abbonamento?
- *Runtime del modello*: quanto tempo richiede il software per produrre una risposta?
- *Reporting*: come vengono riportati i risultati della simulazione ed è un formato utile per la tua azienda?
- *Supporto*: c'è un help desk a cui poter chiedere aiuto? La formazione è disponibile?

### 5.3.5 Esempi di Strumenti di Modellazione e Simulazione nel Manifatturiero

Di seguito non è riportato un elenco esaustivo di strumenti di modellazione e simulazione, ma serve come esempio della gamma di strumenti disponibili. La maggior parte dei pacchetti riguarderà diversi domini correlati descritti nella sezione 5.3.3 in modo che un singolo software possa risolvere più sfide in un'area comune. È importante notare che il campo è in continua evoluzione e, prima di impegnare tempo e denaro in una soluzione, un'azienda dovrebbe cercare gli strumenti attualmente disponibili e valutarli con le domande e i criteri descritti nella sezione 5.3.4.

- *ARENA* è un software di simulazione che fornisce un modo veloce, facile e intuitivo di costruire un processo di produzione. Si basa su elementi e strutture drag-and-drop con visualizzazioni 2D e 3D. Fornisce inoltre un dashboard per l'ottimizzazione della produzione, l'identificazione dei colli di bottiglia dei processi, il miglioramento della logistica e la valutazione delle potenziali modifiche dei processi.

- *AutoMod* è un simulatore 3D in grado di modellare, analizzare ed emulare sistemi di produzione complessi e di grandi dimensioni, sistemi di distribuzione e movimentazione di materiali, fornendo un linguaggio di simulazione. È stato in gran parte impiegato nel settore dell'automazione relativo alle industrie del settore automobilistico, aeroportuale, delle linee postali, della gestione magazzino e della movimentazione dei materiali.
- *Dassault Systèmes DELMIA* è un pacchetto software completo per la produzione e simulazione digitale, che consente agli utenti di analizzare le prestazioni della produzione, sia simulata sia dal vivo, e di documentare i risultati per il processo decisionale. È dotato di un ambiente di fabbrica digitale 3D collaborativo per la simulazione e l'analisi dei flussi di processo, la stima dell'accuratezza e della redditività. DELMIA offre un ambiente di simulazione di flessibile a oggetti, basato su eventi-discreti combinato con la visualizzazione e una ampia gamma di caratteristiche e opzioni.
- *Freppe* (Free Production Planning) è un software open source per la progettazione della supply chain. Si concentra sulla pianificazione della produzione vincolata dalle capacità della macchina/operatore, dalla disponibilità dei materiali e dai tempi di consegna. Fornisce inoltre la pianificazione dell'inventario e la previsione della domanda.
- *Predator* offre soluzioni di produzione stand alone o completamente integrate per la produzione snella e l'automazione. Nella suite sono inclusi diversi strumenti di modellazione e simulazione incentrati principalmente sulla lavorazione CNC. Predator Virtual CNC è un esempio di simulazione del dominio di risorse che consente la verifica e l'ottimizzazione offline del G-code CNC prima di iniziare la lavorazione.
- *FlexSim 3D* è un software di simulazione progettato per la modellazione dei processi, tra cui la produzione, il packaging, lo stoccaggio, la movimentazione dei materiali, ecc. Importa gli oggetti dei processi più rilevanti prodotti con layout fisici basati su CAD. FlexSim consente agli utenti finali di testare tutte le opzioni per trovare le migliori combinazioni di caratteristiche operative per ottimizzare le prestazioni e ridurre i costi. Inoltre, fornisce supporto attraverso un'accurata animazione 3D e report statistici per analizzare scenari "what-if" e prendere decisioni con consapevolezza.
- *Simio* fornisce un sistema composto da oggetti intelligenti che rappresentano componenti fisici come carrelli elevatori e trasportatori. Questa soluzione di produzione comprende una serie di settori come la produzione discreta, l'automotive, i beni di consumo confezionati, i metalli e la plastica. Le aree di applicazione sono la progettazione di nuovi impianti di produzione, il miglioramento dei processi utilizzando i concetti di Six Sigma e Lean Manufacturing, la pianificazione e la programmazione della produzione.
- *Tecnomatix* è la suite Siemens di tecnologie di simulazione della produzione. Si unisce strettamente con i loro prodotti di automazione, consentendo l'applicazione diretta dei risultati delle simulazioni ai (ad esempio) controller PLC, un processo chiamato "commissione virtuale".

- *Lanner Witness* è un pacchetto di simulazione di processo che utilizza la modellazione ad eventi sia discreta che continua, rendendolo applicabile a una vasta gamma di attività di modellazione. Dispone inoltre di un'ampia libreria di modelli 2D e 3D di risorse di produzione, consentendo sia la simulazione che la visualizzazione delle linee di produzione proposte.

## 5.4 Conclusioni

Gli strumenti di modellazione sono estremamente preziosi nel settore della produzione. I sistemi di produzione sono estremamente complessi ed estremamente preziosi, quindi comprendere come funzionano, quali saranno gli effetti delle modifiche proposte e mitigare il rischio e l'incertezza sono a lungo termine attività preziose. L'uso di questi strumenti consente di eseguire calcoli e simulazioni più complessi rispetto all'esecuzione dell'analisi a mano con formule matematiche.

Tuttavia, un sistema di produzione è una cosa dinamica, in evoluzione, mutevole, e qualsiasi modello di un sistema deve essere accurato per dare risultati utili. Anche con gli strumenti di modellazione, la creazione di un modello utile e accurato richiede molto tempo, è complessa e c'è il rischio che il modello finale non rifletta più adeguatamente accuratamente il sistema di produzione. C'è anche la difficoltà di ottenere i dati necessari per rendere il modello accurato in primo luogo.

Un *Digital Twin (Gemello digitale)* è un modello *live* di un sistema di produzione che si aggiorna automaticamente e è in grado di eseguire simulazioni. Invece di essere creato offline da un lavoratore, è collegato direttamente al gemello fisico e utilizza i dati raccolti dal sistema del mondo reale in tempo reale per mantenere il modello accurato e aggiornato. La creazione di un digital twin è più impegnativa di un modello offline, ma il costo per mantenerlo aggiornato è significativamente ridotto. Il prossimo capitolo discuterà i gemelli digitali e come possono essere implementati.

[Accesso Aperto](#) L'autore(i) ed il detentore(i) dei diritti relativi ai contributi di tale capitolo garantiscono a tutti gli utilizzatori il diritto d'accesso gratuito, irrevocabile ed universale e l'autorizzazione a riprodurlo, utilizzarlo, distribuirlo, trasmetterlo e mostrarlo pubblicamente e a produrre e distribuire lavori da esso derivati in ogni formato digitale per ogni scopo responsabile, soggetto all'attribuzione autentica della paternità, nonché il diritto di riprodurne una quantità limitata di copie stampate per il proprio uso personale.

Se non diversamente indicato le immagini e il materiale di terze persone inclusi in questo capitolo sono sotto la licenza Creative Common. Il materiale con diritti riservati necessita la richiesta di un permesso per poter essere riprodotto, utilizzato o distribuito.

## 5.5 Bibliografia

- [1] S. Santoso, E. J. Powers and W. M. Grady, "Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no. 3, pp. 1250-1257, 1997.
- [2] M. K. Jeong, J. C. Lu, X. Huo, B. Vidakovic and D. Chen, "Wavelet-based data reduction techniques for process fault detection.," *Technometrics*, vol. 48, no. 1, pp. 26-40, 2006.
- [3] G. Press, "Cleaning Big Data: Most Time-Consuming, Least Enjoyable Data Science Task, Survey Says," *Forbes*, 23 March 2016. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/gilpress/2016/03/23/data-preparation-most-time-consuming-least-enjoyable-data-science-task-survey-says/>.
- [4] NIST/SEMATECH, "Engineering Statistics Handbook," 30 October 2013. [Online]. Available: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>. [Accessed 21 11 2020].
- [5] L. Monostori, J. Váncza and S. R. Kumara, "Agent-based systems for manufacturing," *CIRP annals*, vol. 55, no. 2, pp. 697-720, 2006.
- [6] P. Vrba and V. Marcík, "Simulation in agent-based control systems: MAST case study.," *IFAC Proceedings*, vol. 38, no. 1, pp. 145-152, 2005.
- [7] A. Oyarbide, T. S. Baines, J. M. Kay and J. Ladbrook, "Manufacturing systems modelling using system dynamics: forming a dedicated modelling tool.," *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 71-87, 2003.
- [8] T. Tolio, M. Sacco, W. Terkaj and M. Urgo, "Virtual factory: An integrated framework for manufacturing systems design and analysis.," *Procedia CIRP*, vol. 7, pp. 25-30, 2013.
- [9] Institute of Electrical and Electronics Engineers Standards Association (IEEE SA), *IEEE 1278.1-2012 - IEEE Standard for Distributed Interactive Simulation--Application Protocols*, 2012.
- [10] M. Jahangirian, T. Eldabi, A. Naseer, L. K. Stergioulas and T. Young, "Simulation in manufacturing and business: A review," *European Journal of Operational Research*, vol. 203, no. 1, pp. 1-13, 2010.



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



“Il supporto della Commissione europea per la produzione di questa pubblicazione non costituisce un'approvazione dei contenuti che riflettono solo le opinioni degli autori e la Commissione non può essere ritenuta responsabile per l'uso che può essere fatto delle informazioni in essa contenute”

Digital Manufacturing Training System for SMEs (Digit-T)  
Project ref: 2017-1-UK01-KA202-036807