

# Capitolo 4

## Analisi dei Sistemi di Produzione

Jack C Chaplin e Giovanna Martinez-Arellano

### 4.1 Introduzione

L'attività decisionale efficace si rivela essere critica per le imprese manifatturiere, in quanto la selezione del corretto percorso di azioni può fare la differenza tra una impresa competitiva e di successo ed una che resta indietro rispetto alla concorrenza. L'attività decisionale è il processo di selezione rispetto a delle situazioni che, data una serie di opzioni ed informazioni disponibili, meglio consente il raggiungimento degli obiettivi. Prendere decisioni raramente è semplice e colui che le prende, il decisore, deve operare la scelta migliore, che sia in grado di massimizzare uno o più criteri; inoltre, spesso, ci si trova a dovere intraprendere tale scelta in base ad informazioni incomplete.

In ambito manifatturiero, un'attività decisionale efficace è cruciale per far sì che le imprese restino competitive. Ad esempio, le decisioni che prevedono ingenti investimenti comportano di certo rischi significativi, ma anche ritorni economici significativo, e ciò si rivela particolarmente veritiero nel caso delle piccole medie imprese (PMIs).

Un processo decisionale efficace si ottiene al meglio con l'accesso a dati accurati e di alta qualità che vengono poi convertiti e presentati in forme più fruibili. I dati possono essere convertiti in forme più utilizzabili per estrarre da essi il massimo valore informativo. Questo aspetto è spesso descritto come la differenza tra dati e informazioni, con il primo che rappresenta i numeri o le misurazioni grezze mentre il secondo la visione utile del processo di produzione.

---

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*

Una rappresentazione comune di questo passaggio è la *piramide Dati, Informazioni, Conoscenza, Saggezza (DIKW)*, mostrata in Figura 4.1-1. Da ogni scalino nella piramide si può salire al successivo analizzando e comprimendo i dati, riducendo lentamente il volume grezzo di informazioni e aumentando la visione e il valore. All'interno di questo quadro, i passaggi considerano le seguenti grandezze:

- *Dati*: segnali o numeri riportati dai sensori e che rappresentano fenomeni fisici, ma senza il contesto o metadati.
- *Informazioni*: dedotte dati contestualizzati, hanno significato e contesto, e possono essere utilizzate per rispondere alle domande.
- *Conoscenza*: le informazioni elaborate e confrontate con le esperienze precedenti consentono all'utente di determinare il motivo per cui sono accadute le cose.
- *Saggezza*: a volte omessa da questo modello o combinata alla conoscenza, la saggezza usa la conoscenza per comprendere intuitivamente un processo e per determinare le migliori azioni future.



**Figura 4.1-1** La piramide DIKW mostra come i dati, le informazioni, la conoscenza e la saggezza siano elementi tra loro correlati e come siano connessi in termini di volume di informazioni e valore intrinseco.

Esistono molte fonti di dati nelle imprese manifatturiere, ma una delle più importanti riguarda i dati generati dalle linee e dai sistemi di produzione. La modellazione e la simulazione dei sistemi di produzione costituiscono i metodi che consentono di comprendere meglio i processi e le linee di produzione. Conoscendo la situazione attuale e testando le potenziali modifiche è possibile assicurare la massimizzazione delle opportunità di successo prima di apportare cambiamenti potenzialmente costosi (in termini di attrezzature o tempi di fermo della linea) all'interno dell'impresa.

In più, tali metodi consentiranno di tenere traccia delle prestazioni dei sistemi di produzione nel corso del tempo, permettendo di rilevare i miglioramenti man mano che vengono implementati o di identificare problematiche prima che divengano

critiche. Le tecniche possono in questo caso essere applicate a partire dalle linee di produzione più piccole (che potrebbero consistere semplicemente in un centro di lavoro con un operaio che carica e scarica componenti) fino a linee di produzione più grandi e complesse.

Tuttavia, la simulazione e la modellazione spesso possono risultare eccessive per molti sistemi di produzione. La valutazione matematica standard è in grado di rivelare aspetti dei sistemi di produzione che non sono immediatamente ovvi. Conoscere l'utilizzo, l'affidabilità, la produttività e tanti altri fattori è un primo passo fondamentale per massimizzare la produttività identificando aree che necessitano di miglioramento. Tali conoscenze consentiranno di compiere interventi mirati nelle aree che potranno poi fornire il massimo rendimento.

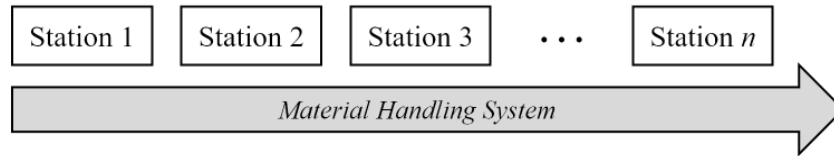
Il presente capitolo discuterà i prerequisiti per l'analisi delle linee di produzione e comprendere il tipo di sistema da valutare per meglio gestire la domanda. In particolare, si descriveranno due metodi matematici chiave di valutazione: l'analisi convenzionale e la teoria delle code.

#### **4.1.1 Le morfologie dei Sistemi di Produzione**

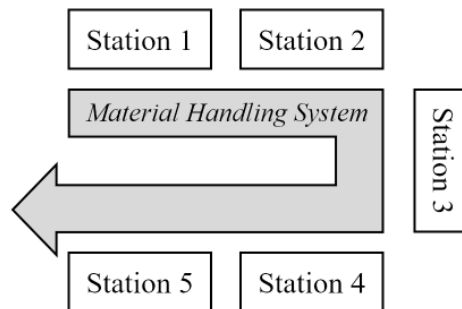
Per capire come analizzare un sistema di produzione, è innanzitutto importante comprendere la forma e il metodo di funzionamento del sistema stesso, poiché ciò influenzerà i metodi e le formule utilizzate. Conoscere il sistema di produzione semplifica inoltre la ricerca di risorse e le attività. Un riepilogo schematico di queste morfologie di sistemi di produzione è riportato nelle Figura 4.1-2 a Figura 4.1-5.

I cosiddetti *Dedicated Manufacturing Systems* (DMS, sistemi di produzione dedicati) utilizzano l'automazione fissa per produrre prodotti chiave in volumi elevati con la massima efficacia in termini di costi. Quando sussiste la probabilità che nel prossimo futuro venga fabbricato un unico prodotto in grandi quantità senza notevoli variazioni, un sistema DMS rappresenta quasi sempre la scelta migliore e allo stesso tempo più semplice da implementare. Le attrezzature sono tipicamente disposte in modo lineare e collegate a un sistema di movimentazione dei materiali.

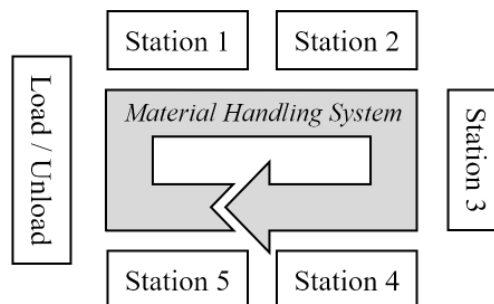
Qualora si debbano produrre volumi inferiori e molteplici componenti, la *Batch Manufacturing (produzione in lotti)* è una delle strategie di produzione più utilizzate, dal momento che permette la produzione di volumi medi raggruppando la produzione in lotti. Il tempo necessario per modificare una linea di produzione commutando tra tipi di prodotto è di notevole entità, per cui il raggruppamento in lotti assicura che tali tempi di conversione si verifichino con la minore frequenza possibile.



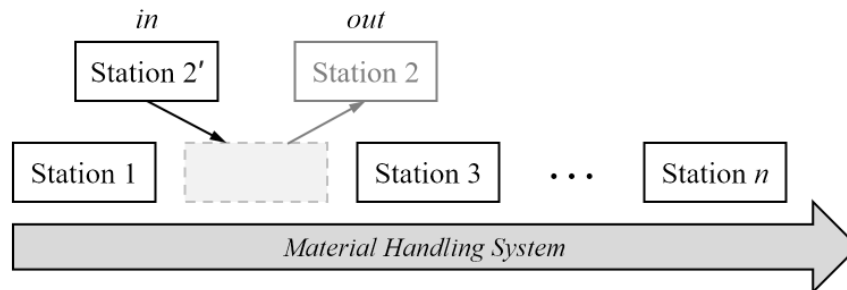
**Figura 4.1-2** Esempio di sistema di produzione dedicato che mostra la morfologia tipica di una linea di produzione. Un unico sistema di movimentazione dei materiali trasferisce parti o prodotti in sequenza tra i processi. Essi possono essere singole attrezzature, stazioni di processo manuali o gruppi di attrezzature simili per formare una stazione di elaborazione con capacità parallela.



**Figura 4.1-3** Un esempio di layout con cella di produzione. La freccia rappresenta il flusso più comune delle parti attraverso la cella. La produzione cellulare può alterare il percorso per realizzare una più ampia varietà di prodotti senza interruzioni significative.



**Figura 4.1-4** Esempio di layout di sistema di produzione flessibile. Le parti possono essere instradate tra qualsiasi stazione in qualsiasi ordine utilizzando il sistema di movimentazione dei materiali.



**Figura 4.1-5** I sistemi di produzione riconfigurabili consentono rapidi cambiamenti strutturali della cella per modificarne la funzionalità.

La *Group Technology* è la strategia che consiste nell'ottenere efficienza quando occorre produrre tanti prodotti simili, raggruppando i prodotti in famiglie di componenti con funzionalità e processi di produzione analoghi.

Ad esempio, un'azienda che produce cuscinetti potrebbe realizzare lo stesso cuscinetto in più dimensioni differenti, con molteplici finiture e con più metodi di lubrificazione differenti. Sebbene sussista un numero molto elevato di potenziali varianti di componenti, le caratteristiche che li accomunano ne consentono la produzione con lo stesso macchinario (anche se con impostazioni e utensili differenti), creando in tal modo una famiglia di componenti. In confronto, sebbene aventi funzioni analoghe, un cuscinetto a sfere e un cuscinetto a rulli cilindrici richiedono processi sufficientemente divergenti da non costituire un'unica famiglia di componenti.

L'utilizzo della tecnologia di gruppo consente di impostare e configurare una linea di produzione in modo tale da produrre qualsiasi membro della stessa famiglia di componenti in tempi rapidi. Ciò rende molto più veloce e semplice la conversione da un prodotto all'altro all'interno della stessa famiglia, riducendo in tal modo i tempi di cambio lotto e rendendo più efficaci in termini di costi anche le dimensioni di lotto più piccole.

La *Cellular Manufacturing* raggruppa i macchinari in cellule, ciascuna delle quali è specializzata nel realizzare una fase o un gruppo di fasi strettamente correlate per produrre un prodotto o una famiglia di prodotti. I tempi di produzione vengono ridotti collocando i macchinari in stretta prossimità; la caratteristica forma a U illustrata nella Figura 4.1-3 è una comune planimetria a cellula e consente a un unico operatore, specializzato nella mansione svolta da una cellula, di supervisionare tutte le macchine, mentre la sequenza in cui le macchine vengono utilizzate all'interno della cellula può essere modificata senza considerevoli interruzioni. La produzione cellulare è una scelta ottimale per volumi ridotti di prodotti altamente variabili. Più unità dello stesso macchinario all'interno di una cellula potrebbero essere raggruppate in stazioni co-ubicate per sfruttarne il parallelismo e anche le macchine

che vengono quasi sempre utilizzate insieme potrebbero essere raggruppate in stazioni.

I *Flexible Manufacturing Systems* (FMS, sistemi di produzione flessibili) sono cellule di produzione altamente automatizzate, in grado di instradare componenti tra i macchinari costitutivi (o le postazioni, si veda la definizione indicata in precedenza), consentendo flessibilità in termini di componenti e famiglie di componenti fabbricati. Come illustrato nella Figura 4.1-4 una delle differenze più ovvie rispetto a un sistema cellulare è l'utilizzo di un sistema di movimentazione dei materiali automatizzato per instradare prodotti attorno al sistema. Le stazioni all'interno di un sistema FMS sono di per sé generali e flessibili, prevalentemente a controllo numerico computerizzato (CNC), spesso con cambia-utensili automatici. Ciò consente di sfruttare le stazioni per una gamma di mansioni più vasta. I sistemi FMS sono ideali per volumi ridotti di prodotti altamente variabili, analogamente alla produzione cellulare, ma i livelli elevati di automazione aumentano la produttività della manodopera e consentono la produzione non presidiata da personale.

I *Riconfigurabile Manufacturing Systems* (RMS, sistemi di produzione riconfigurabili) utilizzano un sistema di progettazione strutturale e di controllo digitale che consente di modificare facilmente le stazioni costituenti in modo che la funzione e la capacità del sistema siano convertibili in tempi rapidi. Le stazioni possono essere collegate o scollegate dal sistema per modificare la funzione della cellula. È possibile aggiungere o eliminare ulteriori moduli funzionali dalla macchina e/o dalle stazioni per modificarne la funzionalità o aumentarne la capacità. Il sistema può aumentare o ridurre la capacità aggiungendo o eliminando moduli, macchinari o stazioni. Le singole stazioni sono spesso meno flessibili rispetto a quelle che verrebbero utilizzate in un sistema FMS – la flessibilità del sistema è data dalla struttura del sistema, non dalla flessibilità individuale.

Le tradizionali tecniche di analisi matematica si concentrano generalmente su linee di produzione dedicate e morfologie di produzione cellulare, con alcune varianti quando la produzione in batch è implementata su entrambe. FMS e RMS sono sviluppi relativamente recenti e la loro natura in evoluzione e mutevole li rende meno adatti alle tipologie di analisi considerate. In questo caso, l'utilizzo di strumenti digitali e in particolare dei digital twins può essere più appropriato per gestire i cambiamenti. I digital twins saranno discussi nel Capitolo 6.

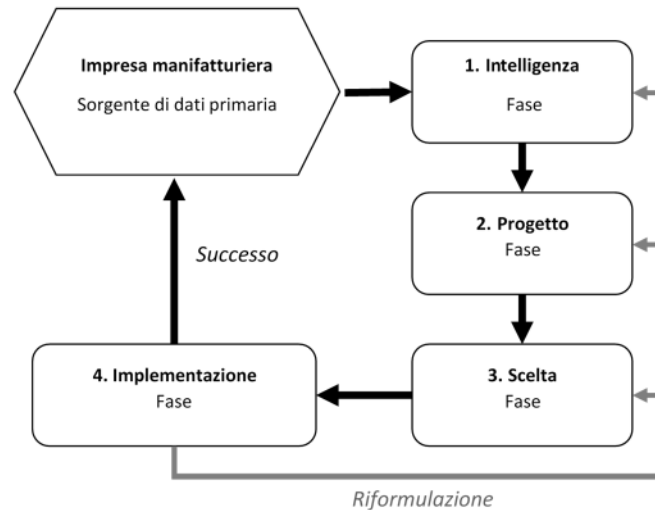
#### **4.1.2 Il processo Decisionale**

Prima di iniziare l'analisi di un sistema di produzione, è importante capire a quale domanda si sta effettivamente cercando di rispondere. L'analisi di solito serve a informare i decisori misurando gli indicatori chiave di prestazione (KPI). Analizzando i valori dei KPI è possibile comprendere meglio i punti di forza e di debolezza del sistema attuale e prendere decisioni su come migliorarlo.

Prendere una decisione in ambito manifatturiero significa selezionare scelte precise tra una grande varietà di opzioni: tuttavia, a questo proposito, Hayes e

Wheelwright [1] sono riusciti ad individuare dieci categorie di opzioni su cui poter effettuare decisioni. Le categorie sono dettagliate di seguito seppur non in maniera esaustiva:

- *Capienza*: si riferisce al margine di flessibilità in termini di capienza che si avrebbe a disposizione, fa riferimento alla tipologia di modelli di spostamento che si potrebbero utilizzare, alle strategie disponibili per subappalti in presenza di situazioni limite temporanee, ad esempio eccedenze o scarsa capienza.
- *Strutture*: fa riferimento alla dimensione, alla capienza massima, alla locazione fisica e alla destinazione d'uso delle strutture fisiche manifatturiere.
- *Risorse Umane*: si riferisce alle politiche riguardanti il reclutamento di nuovo personale, alla formazione e allo sviluppo degli impiegati, riguarda la filosofia e la gestione di impresa.
- *Introduzione di Nuovo Prodotto*: riguarda le modalità con cui nuovi prodotti sono selezionati e sviluppati, ma anche le procedure utilizzate per la loro progettazione (ivi incluso il progetto di produzione) e le modalità con cui i prodotti sono successivamente introdotti e lanciati su piattaforme commerciali.
- *Organizzazione*: si riferisce alla struttura di imprese del manifatturiero, ivi compresi gli obblighi di impresa, i ruoli aziendali e le responsabilità.
- *Misura della Prestazioni*: riguarda la modalità di valutazione dei processi e delle persone facenti parte dell'impresa manifatturiera, di monitoraggio della loro produttività e della misura di prestazione, si riferisce agli schemi di identificazione di premialità per gli impiegati.
- *Attrezzatura per la Produzione*: riguarda le attrezzature e le tecnologie scelte per la manifattura dei prodotti, la planimetria riguardante la sistemazione di tali attrezzature all'interno di celle o linee di produzione, il grado di automatizzazione esistente all'interno delle linee. Questo comprende anche politiche e metodologie di manutenzione, e il grado di sviluppo e di aggiornamento che sarebbe possibile effettuare direttamente in loco.
- *Piano di Produzione e Controllo*: riguarda la modalità di controllo della produzione (ivi compresi i sistemi automatizzati o i processi manuali), la modalità di assegnazione e programmazione degli ordini, di stoccaggio e spostamento dei materiali durante le operazioni di manifattura.
- *Qualità*: si riferisce agli obiettivi di qualità adottati dall'azienda, compresi anche metodi e politiche di garanzia e controllo di qualità usati per raggiungere gli obiettivi stessi.
- *Integrazione Verticale*: riguarda le decisioni strategiche di alto livello, come ad esempio "make or buy" (ovvero costruire all'interno dell'azienda, make, oppure acquistare all'esterno, buy), politiche per la selezione dei fornitori e rapporti continuativi, assegnazioni a singolo fornitore o fornitori multipli che consentano di disperdere il rischio.



**Figura 4.1-6** Le fasi del processo decisionale. Non è mai troppo tardi per rivedere una decisione, specialmente quando nuove informazioni vengono rese disponibili.

Per poter prendere decisioni efficaci, è importante innanzitutto comprendere cosa sia esattamente il processo di attività decisionale. Il processo di attività decisionale [2] è composto da una serie di fasi ed è illustrato in Figura 4.1-6:

1. *Intelligenza (Intelligence) – presentazione del problema:* prima di tutto, è necessario identificare un problema e determinare chi sono i decisori e gli investitori all'interno del processo di attività decisionale. Una volta identificato il problema, esso deve essere definito in modo più formale, stabilendo quindi le necessità degli investitori ed ottenendo quindi una lista di considerazioni e di obiettivi. In questa fase, è importante impiegare tutto il tempo necessario: infatti, può succedere che il gruppo di investitori ritenga inizialmente che ogni parte dello stesso abbia una visione comunitaria della problematica, tuttavia, possono emergere successivamente dettagli che rivelano che i presupposti iniziali non erano, in realtà, condivisi da tutti allo stesso modo.
2. *Progettazione (Design) – presentazione della soluzione:* consiste nel trovare alternative possibili che si possano implementare, stabilendo anche il loro specifico contributo alla risoluzione del problema. Questa fase può essere semplice e quindi avvenire tramite un confronto di idee tra gli investitori (brainstorming), tuttavia, per effettuare decisioni critiche, si consiglia altamente di seguire un processo più rigoroso. Seppur comunemente non considerata come opzione, si raccomanda di tenere presente anche il “non fare niente” come una delle possibili opzioni a disposizione. Una raccomandazione comune concerne il modellamento del problema, che consentirà di attuare potenziali soluzioni da testare durante il processo di selezione che si svolgerà però nella fase successiva.



Questa, infatti, è la fase dove va solo creato il modello del problema. I modelli numerici possono essere sviluppati con fogli di lavoro, con simulazioni delle linee di produzione o con metodi che prevedano entrambi gli approcci. I possibili approcci per il modellamento dipendono dalla natura delle decisioni che si intendono prendere.

3. *Scelta (Choice) – selezione della soluzione*: le possibili opzioni sviluppate devono essere quindi valutate in base al loro contributo al problema. In relazione all'approccio utilizzato nella fase di Progetto, questa fase può tradursi in una continuazione del confronto, in cui si raccolgono i dati necessari a formare la decisione, oppure si possono eseguire le varie opzioni sul modello, il che consentirebbe di valutare i loro impatti sugli obiettivi finali e definiti. Tuttavia, anche con un modello altamente sviluppato, raramente la scelta della soluzione si rivela semplice. È necessario, infatti, valutare molti criteri differenti, includendo il tempo ed il costo richiesto per l'implementazione della soluzione, il rischio ed il tornaconto nel fare questa valutazione, la possibile interruzione che può verificarsi durante l'implementazione della soluzione, le abilità a disposizione che siano necessarie a renderla esecutiva. Si ricorda ancora una volta di valutare anche l'opzione del "non fare niente", nel caso in cui interruzione e costo di implementazione di una soluzione possano rivelarsi troppo elevati.
4. *Implementazione (Implementation) – rilascio della soluzione e test*: Infine, la soluzione dovrà essere rilasciata e testata. La soluzione richiede di rispondere ad obiettivi definiti nella prima parte del processo, e, dato che molte opzioni non saranno istantaneamente implementate e che i loro effetti non saranno istantaneamente valutabili, è importante che si continui a monitorarle e testarle. Se la soluzione non soddisferà le aspettative o gli obiettivi, l'intero processo di attività decisionale andrà ripetuto, data la sua natura iterativa. Sarà quindi sempre possibile ri-effettuare le valutazioni, e ri-programmare le scelte fatte. È molto comune per le imprese cadere nella trappola di continuare a procedere con una decisione fallimentare quando tutte le evidenze dimostrano che non ci sono miglioramenti (si parla di fallacia dei costi sommersi - "sunk-cost" fallacy). Tuttavia, un processo di attività decisionale eseguito in maniera appropriata in genere riduce di molto le possibilità che questo scenario possa verificarsi.

Un aspetto chiave di questo processo è la capacità di monitorare e verificare il successo di una decisione e se le modifiche ai processi di produzione o aziendali stanno producendo i risultati attesi e previsti. Gli indicatori chiave di prestazione (KPI) sono lo strumento con cui misurare il successo di una decisione.

#### **4.1.3 Gli Indicatori Chiave di Prestazione (KPI)**

Per ottenere un processo di produzione ottimale è necessario anzitutto definire cosa si intende per ottimale. Nessun processo di produzione è in grado di massimizzare contemporaneamente la resa, la produttività, il tempo di attività ecc.,

riducendo al tempo stesso al minimo gli scarti di materiale, l'utilizzo dell'energia e i tempi di inattività. L'accurata selezione dei KPI è necessaria per comprendere cosa è importante e cosa si sta cercando di ottenere. Gli indicatori con cui vengono caratterizzate le prestazioni di un processo di fabbricazione si sono evoluti e diversificati. I KPI tradizionali includono:

- *Produttività*: l'efficienza della produzione o il rapporto tra uscita ed entrata. La produttività è un KPI da massimizzare ed esistono numerosi modi per calcolarlo, tra cui l'Overall Equipment Effectiveness (OEE), uno strumento comune e utile per gli impianti di produzione.

$$OEE = AU Y r_{os} \quad (4.1.1)$$

Dove:

- *A: Availability (disponibilità)*. L'operatività del macchinario, che viene ridotta da interventi di manutenzione, guasti ecc.
- *U: Utilisation (utilizzo)*. La percentuale di possibile tempo utilizzabile che viene effettivamente utilizzata. Viene ridotta in caso di scarsa programmazione o mancanza di componenti disponibili a monte (detta anche esaurimento).
- *Y: Yield (rendimento)*. La percentuale di rendimento di primo passaggio del processo, riferita alla qualità dei componenti prodotti.
- *r<sub>os</sub>: Operating Capability (capacità operativa)*. La percentuale di produttività massima a cui funziona il macchinario.

Un processo ottimale non presenta mai guasti né richiede manutenzione, sarà attivo per il 100% del tempo, produrrà in modo coerente componenti di alta qualità e funzionerà alla velocità massima di lavorazione, fornendo un'efficacia totale dell'impianto (OEE) del 100%. Sebbene un'efficacia totale dell'impianto (OEE) del 100% sia poco realistica, rimane uno strumento utile per identificare aree problematiche. La percentuale di rendimento di primo passaggio di un processo viene spesso trascurata ed è una componente importante della produzione snella.

- *Costo*: la riduzione dei costi di lavorazione è un altro obiettivo comune e può essere un KPI efficace. Il costo di un processo si ottiene in genere combinando le spese generali e le tariffe salariali con i costi dei materiali, i costi di lavorazione, i costi energetici e i costi dei rifiuti.
- *Qualità*: la massimizzazione della qualità e della resa dei processi è un altro obiettivo molto comune. Il modo in cui viene misurato dipenderà dal processo e dall'applicazione, ma il miglioramento della qualità riduce la necessità di rilavorazioni o resi dei clienti.

Tuttavia, questi non sono affatto gli unici KPI disponibili per le imprese manifatturiere. Nell'ambito della più recente indagine sulle metriche condotta dalla

MESA (Manufacturing Enterprise Solutions Association), sono state identificate le 28 metriche di produzione più utilizzate nella produzione discreta, di processo e ibrida/in lotti [3]. Esse sono organizzate in categorie in base alla tipologia dell'azienda e sono utilizzate come punto di partenza per la creazione dei KPI.

L'efficacia complessiva degli impianti può essere una metrica comune per misurare la produttività, ma non è l'unica. La produttività e l'efficienza sono fondamentali per la redditività e la capacità di competere di un'azienda. Alcuni KPI di produttività includono:

- *Produttività*: quantità di prodotto che viene realizzata su una macchina, una linea, un'unità o un impianto in un determinato periodo. Le formule e i metodi per il calcolo sono illustrati nella Sessione 4.2 "Analisi dei sistemi di produzione".
- *Sfruttamento delle capacità*: quantità della capacità di produzione totale che viene attualmente utilizzata su un determinato periodo. Anche in questo caso, è possibile fare riferimento alla Sessione 4.2 per maggiori dettagli.
- *Efficacia totale di un impianto*: esaminata in precedenza nella presente capitolo equazione (4.1.1) si tratta di una misura comune dell'efficacia totale di un macchinario in base alla disponibilità, alle prestazioni e alla qualità.
- *Raggiungimento della produzione*: percentuale di tempo in cui viene ottenuto un livello target di produzione, consentendo di rispettare il programma concordato con i propri clienti.

Il miglioramento della *qualità dei prodotti* è un altro obiettivo comune delle aziende, con una migliore qualità che si traduce in meno sprechi e rilavorazioni e in una maggiore soddisfazione del cliente. La qualità e il suo miglioramento sono un argomento vasto a sé stante, ma alcuni KPI comuni sono:

- *Rendimento*: percentuale di prodotti fabbricati correttamente senza la necessità di rilavorazione o scarto.
- *Prodotti respinti/resi dal cliente*: quante volte il cliente rifiuta un prodotto. Le corrette politiche di assicurazione della qualità dovrebbero ridurre tale dato numerico.
- *Qualità del fornitore in entrata*: la percentuale di materiali di buona qualità provenienti dai fornitori non è incontrollabile come si potrebbe pensare. Lavorando a stretto contatto con i fornitori è possibile migliorare la qualità di fornitura ma si potrebbero anche prendere in considerazione fornitori alternativi.

Migliorare la *soddisfazione e la reattività del cliente* è un obiettivo comune per le aziende, ma misurarla può essere un compito complicato. Tre KPI comuni in questo ambito sono:

- *Puntualità di consegna alla data concordata*: la percentuale di tempo in cui un prodotto completo viene consegnato al cliente in base al programma concordato.

- *Tempo di esecuzione della produzione*: il tempo necessario per fabbricare un prodotto, dal momento in cui viene accettato l'ordine al momento in cui il prodotto o i prodotti finiti vengono spediti.
- *Tempo necessario per le conversioni*: il tempo necessario per modificare una linea di produzione, dalla fabbricazione di un prodotto a un altro, per rispondere alle esigenze del cliente in un mercato in continua evoluzione.

La *conformità alle normative* riguarda l'adeguamento alle policies, alle leggi e agli standard pertinenti in settori quali salute e sicurezza, protezione ambientale e sicurezza dei dati. Questa è un'area chiaramente importante con la non conformità che porta a multe e sanzioni, insieme alla possibile ricorrenza in rischi per cui le normative sono progettate per proteggerti. Alcuni KPI in quest'area includono:

- *Incidenti di salute e sicurezza segnalabili*: misura del numero di incidenti di salute e sicurezza segnalati per un periodo di tempo, inclusi sia gli infortuni che i quasi-incidenti che richiedono azioni per impedire che si verifichino di nuovo.
- *Incidenti ambientali segnalabili*: numero di incidenti segnalati per un periodo di tempo, incluse perdite chimiche, problemi di rifiuti, sostanze inquinanti dell'aria ecc.
- *Numero di eventi di non conformità*: numero di volte in cui l'impianto ha funzionato in condizioni non conformi per un periodo di tempo.

La *redditività* e la riduzione dei costi sono un ampio insieme di KPI che possono includere aspetti che vanno oltre il processo di produzione, rientrando in un'accezione più ampia del business aziendale. I KPI di seguito elencati sono generalmente quelli che riguardano i processi di produzione piuttosto che dell'azienda nel suo insieme:

- *Costo di produzione totale per unità*: tipicamente rappresentato ad esclusione dei materiali, indica quanto costa il solo processo di produzione per produrre un singolo prodotto.
- *Costi di produzione come percentuale di ricavi*: in relazione al precedente KPI, qual è il rapporto dei costi di produzione rispetto ai ricavi complessivi dell'impresa?
- *Profitto operativo netto*: una delle misure più pure dell'efficacia in termini di costi – qual è la redditività dell'impresa?
- *Ricavi generati per dipendente*: tipicamente un confronto tra più stabilimenti di produzione – quali sono i ricavi divisi per il numero di dipendenti?
- *Margine di contribuzione unitario medio*: profitto ottenuto per ogni prodotto fabbricato.
- *Redditività delle attività*: profitto ottenuto, diviso per il valore delle attività e dei beni strumentali impiegati, necessari per generare tale profitto.
- *Costo energetico unitario*: i costi dell'energia sostenuti per unità prodotta o volume prodotto.

- *Durata dei cicli di cassa*: tempo trascorso tra l'acquisto di un prodotto da parte del cliente e l'incasso dei pagamenti dalla vendita del prodotto.
- *EBITDA*: margine operativo lordo – una metrica comune per la redditività di un'azienda.

Altri KPI da considerare che non rientrano in categorie più ampie includono:

- *Giacenze di magazzino di semilavorati (work in progress o WIP)*: misurazione dell'utilizzo efficiente dei materiali in giacenza. Il semilavorato (WIP) è un valore non raggiunto e rappresenta spesso un rischio per l'impresa se non può essere convertito rapidamente in prodotto.
- *Manutenzione pianificata, contrapposta alla manutenzione d'emergenza*: rapporto tra la frequenza degli interventi di manutenzione programmata e la necessità di manutenzione distruttiva e non pianificata.
- Tempo di inattività, contrapposta alla durata operativa: disponibilità e affidabilità dei macchinari.
- *Tasso di introduzione di un nuovo prodotto*: rapidità con cui è possibile introdurre nuovi prodotti sul mercato, ivi inclusi la progettazione del prodotto, la pianificazione dei processi, l'incremento della produzione in vista dell'aumento della domanda e la produzione.
- *Tempo di ciclo dell'ordine di modifica tecnica*: rapidità con cui è possibile elaborare e implementare modifiche a prodotti e piani di processo esistenti.

Fondamentalmente, i KPI sono un concetto relativamente semplice: sono gli obiettivi misurabili in base ai quali un processo di produzione o le modifiche a tale processo possono essere monitorati e valutati. Tuttavia, ci sono alcune considerazioni da fare quando si implementano i KPI per massimizzarne l'utilità.

#### 4.1.4 Implementare gli Indicatori Chiave di Produzione

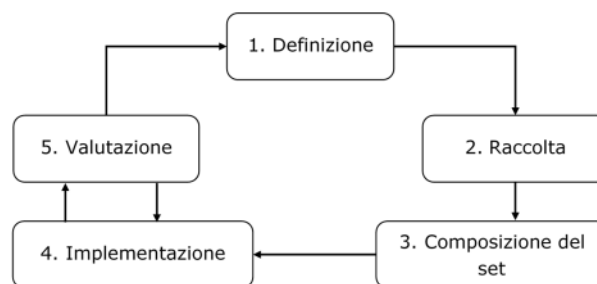
Misurare, analizzare e migliorare in modo efficace i KPI non è semplice come potrebbe sembrare. Sebbene alcune metriche funzionino perfettamente per specifici processi, spesso succede che siano necessarie molteplici combinazioni di indicatori per assicurare il raggiungimento di un obiettivo aziendale. L'implementazione dei KPI segue uno schema ciclico costituito da cinque stadi:

1. *Definizione*: la prima fase del ciclo di vita consiste nella definizione dei KPI da utilizzare. Sebbene vi siano migliaia di KPI già definiti e utilizzati nelle aziende manifatturiere, i KPI potrebbero talvolta necessitare di essere ridefiniti, ad esempio focalizzandoli meglio, a seconda degli obiettivi aziendali precisi.
2. *Raccolta*: la seconda fase del ciclo di vita dei KPI consiste nel raggruppare i KPI candidati da prendere in considerazione. È di particolare importanza escludere eventuali KPI ovviamente irrilevanti, dato che spesso si finisce per creare troppi KPI.

3. *Composizione del set di indicatori*: la terza fase del ciclo di vita dei KPI consiste nello scegliere, dalla raccolta di KPI, il set specifico da implementare. La norma ISO 22400-1:2014 Parte 1 [4] può essere utile con questo processo, ma il focus principale è assicurare che i KPI selezionati costituiscano un set completo per misurare gli obiettivi aziendali senza essere troppo onerosi da implementare e monitorare.
4. *Implementazione*: in questa fase, i portatori di interessi definiscono il processo per la valutazione, esaminando periodicamente i valori dei KPI e le tendenze e descrivendo piani d'azione volti a migliorare il controllo del processo a partire da valori dei KPI.
5. *Valutazione*: i portatori di interessi valutano la rilevanza dei KPI, ovvero in quale misura si allineano agli obiettivi di prestazioni correnti del processo e sono stati implementati correttamente. Se necessario, l'implementazione può essere adeguata per migliorare il processo.

Il processo descritto è un ciclo. I KPI dovrebbero essere periodicamente riesaminati per assicurare che rispondano ancora alle esigenze e ai requisiti dell'azienda. Man mano che un KPI viene scelto, è necessario raccogliere i dati affinché esso venga misurato. Tali dati devono essere visibili e trasparenti.

La visibilità e la trasparenza sono prerequisiti chiave per l'ottimizzazione dei processi produttivi. Più sono disponibili informazioni riguardo a un processo di produzione, più le prestazioni possono essere misurate in modo migliore tramite i KPI ed è possibile prendere decisioni migliori riguardo a come reagire a eventi e problematiche.



**Figura 4.1-7** Il ciclo di vita dei KPI.

- *Dati visibili*: dati che sono facilmente accessibili mediante processi ben definiti a tal fine.

- *Dati trasparenti*: dati facili da capire e che consentono di prendere decisioni sulla loro base.

Malgrado l'importanza della visibilità e della trasparenza dei processi, gli schemi di segnalazione in tempo reale con KPI standardizzati sono ancora assenti in molte imprese. Anche quando la raccolta dei KPI viene implementata, questi richiedono spesso un processo di input manuale attraverso moduli cartacei. I dati segnalati si basano spesso su quantità, ovvero unità prodotte per turno, anziché su metriche più approfondite. Spesso mancano dati importanti per l'ottimizzazione dei processi, quali tempi di configurazione, tempi di conversione, tempi di lavorazione e tempi di inattività, e non possono pertanto essere riportati. È in questo ambito che la sensorizzazione dei beni di produzione sta iniziando a fornire un altro livello di visibilità del processo di produzione.

## 4.2 Analisi dei Sistemi di Produzione

Le tecnologie di produzione digitale stanno cambiando l'implementazione dei sistemi di produzione e la loro analisi, con la simulazione e la modellazione che ormai sono diventate pratiche comuni in un'ampia gamma di settori e dimensioni aziendali. Un'area chiave in cui queste tecnologie possono migliorare le prestazioni di un sistema è attraverso l'analisi del sistema e l'identificazione delle aree di miglioramento. Tuttavia, i metodi utilizzati per analizzare i sistemi con strumenti digitali sono costruiti su una solida struttura di analisi dei sistemi di produzione più convenzionali. La loro comprensione aiuterà a capire dove e perché dovrebbero essere utilizzate tecniche più complesse.

### 4.2.1 Analisi della Produzione

Tra tutti i KPI da monitorare, la produttività di un sistema di produzione manifatturiero è uno dei più comunemente utilizzati, ma anche uno dei più fraintesi a causa della sua natura spesso astratta. Vogliamo tutti migliorare la produttività, ma cosa significa veramente?

La produttività è il rapporto tra output e input di un processo. Più formalmente:

$$\text{Produttività} = \frac{\text{Unità in Uscita}}{\text{Unità in Ingresso}} \quad (4.2.1)$$

Le unità di output sono i prodotti che il processo di produzione sta creando, ma le unità di input possono essere di diversi tipi, tra cui:

- *Capitale*: la produzione prodotta per unità di capitale, ovvero i prodotti fabbricati per Euro / Sterlina / Dollaro speso. Ciò può includere il valore non ricorrente di attività quali strumenti, impianti e attrezzature, nonché costi ricorrenti come costi di manutenzione o di utilità.

- *Lavoro*: la produzione per persona, o più specificamente per persona-ora. Laddove i processi manuali sono fondamentali, il miglioramento della produttività del lavoro può avere effetti significativi. Ciò potrebbe comportare una migliore ergonomia della stazione di elaborazione, l'implementazione di tecnologie assistive o semplice morale e motivazione.
- *Materiali*: la produzione per unità di materiale, come materie prime o parti utilizzate nel processo di produzione. Migliorare la qualità e ridurre gli sprechi migliorerà la produttività dei materiali.

La produttività è un obiettivo di primo livello e identificare come aumentarla richiede l'identificazione delle aree di miglioramento in un sistema di produzione. La produttività è un indicatore chiave delle prestazioni: una misura delle prestazioni del processo di produzione, un risultato desiderabile. Tuttavia, un concetto di livello inferiore è quello di una metrica. Una metrica è un valore misurato che non è necessariamente desiderabile da solo, ma contribuisce a un KPI. L'analisi della produzione tradizionale misura in genere le metriche, che a loro volta identificano le aree di attenzione che, se migliorate, potrebbero influenzare il KPI che è l'obiettivo effettivo del processo di miglioramento.

I metodi e le metriche di misurazione consentono di tenere traccia delle prestazioni dei sistemi di produzione nel corso del tempo, permettendo di rilevare i miglioramenti man mano che vengono implementati o di identificare problematiche prima che divengano critiche. Le tecniche possono in questo caso essere applicate a partire dalle linee di produzione più piccole (che potrebbero consistere semplicemente in un centro di lavoro con un lavoratore che carica e scarica componenti) fino a linee di produzione più grandi e più complesse.

Tale analisi richiedono l'applicazione di formule matematiche e anche il possesso di dati relativi alla produzione. Se non si dispone di tali dati, si raccomanda vivamente di iniziare ad acquisirli. Sebbene sia possibile analizzare i sistemi di produzione tramite i metodi descritti nella presente sessione o con strumenti di simulazione e modellazione utilizzando solo valori stimati, i risultati saranno più precisi se si utilizzano dati reali e misurati. Senza l'accesso a dati reali relativi alle prestazioni, l'identificazione di metodi di miglioramento risulterà più ipotetica che strategica, aggiungendo il rischio che l'investimento in migliorie vada sprecato (in termini di tempo o di denaro). Tuttavia, anche i risultati dei calcoli eseguiti sulla base di stime informate delle cifre relative alla performance potrebbero offrire una visione più ampia e l'identificazione di problemi di notevole entità.

Va ricordato che i metodi esaminati riguardano in genere sistemi di produzione discreti anziché continui. Esistono metodi alternativi per analizzare processi continui (es. l'industria chimica o quella dei materiali).

#### **4.2.2 Il Tasso di Produzione**

Il *production rate* (tasso di produzione) è il numero di pezzi da lavorare che un processo di produzione specifico è in grado di produrre all'ora. Una volta calcolata,



è possibile sapere quanto tempo è necessario per produrre un ordine, quali sono i livelli di utilizzo del sistema e quali sono i punti in cui potrebbero crearsi colli di bottiglia. La capacità produttiva dell'intera linea di produzione sarà esaminata nella sezione 4.2.3.

Il *production rate* di un processo può essere calcolato tramite pochi brevi passaggi, partendo col determinare il tempo di ciclo, quindi calcolando il tasso di produzione in base alla strategia di raggruppamento in lotti. I calcoli dovrebbero basarsi su dati misurati reali per poter ottenere risultati migliori ma è anche possibile utilizzare misurazioni approssimative come prima stima.

Il primo passo per calcolare il *production rate* consiste nel conoscere i tempi di ciclo. Tuttavia, per calcolare il tempo di ciclo è necessario chiarire anzitutto in cosa consistono i pezzi da lavorare oggetto del processo di produzione.

- *Pezzo da lavorare*: il singolo componente o prodotto che viene fabbricato dal sistema di produzione.

Essi possono essere prodotti completi oppure componenti, a seconda del contesto. Ad esempio, una linea di produzione potrebbe fabbricare orologi interi, per cui, in questo caso, ogni orologio costituisce un pezzo da lavorare. In alternativa, il sistema di produzione dell'azienda potrebbe produrre solo la cassa dell'orologio in quanto fornitore di un'azienda orologiaia, per cui, in questo caso, i pezzi da lavorare sono le casse. Il pezzo o i pezzi da lavorare sono tipicamente abbreviati in *pz* (pezzi).

- *Tempo di ciclo*: il tempo che un pezzo da lavorare impiega per essere sottoposto a una singola operazione.

*Ad esempio, il tempo necessario per laminare la cassa dell'orologio in un centro di lavoro è un tempo di ciclo. Il tempo necessario per lucidare la cassa dopo la laminazione costituirà anch'esso un tempo di ciclo.*

Tali intervalli sono espressi sotto forma di tempo, tipicamente in minuti (*m*). Per calcolare il tempo di ciclo sono necessarie tre informazioni:

1. *Tempo di funzionamento* ( $T_o$ ): il tempo impiegato effettivamente da un pezzo da lavorare per essere lavorato.
2. *Tempo di movimentazione* ( $T_h$ ): il tempo impiegato da un pezzo da lavorare durante il carico e lo scarico dal processo di produzione.
3. *Tempo di attrezzaggio* ( $T_i$ ): il tempo *medio* necessario per configurare gli utensili per il funzionamento, ivi inclusa la sostituzione degli utensili usurati. Non occorre sostituire un utensile per ogni singolo componente lavorato, per cui il tempo necessario per tale operazione va conteggiato in media.

Il tempo di ciclo è la somma di questi tre tempi.

*Tempo di Ciclo = Tempo di Funzionamento + Tempo di Movimentazione  
+ Tempo di Attrezzaggio*

$$T_c = T_o + T_h + T_t \quad (4.2.2)$$

*Ad esempio, la cassa di un orologio che impiega 5 minuti per la laminazione, 1 minuto per il caricamento nella macchina, 30 secondi per lo scaricamento dalla macchina e richiede 10 minuti per sostituire la testa porta-fresa ogni 50 casse avrà un tempo di ciclo di 402 secondi o 6,7 minuti.*

Una volta calcolato il tempo di ciclo per un processo che concorre alla realizzazione del pezzo da lavorare, è possibile calcolare il tasso di produzione.

- *Tasso di produzione:* il numero di pezzi da lavorare prodotti da un processo di produzione in un'ora (pz/ora).

Una volta calcolato il tempo di ciclo di un processo di produzione, si potrebbe dedurre che il tasso di produzione sia semplicemente il numero di cicli che è possibile eseguire in un'ora. Ma questa è un'approssimazione ingenua che non tiene conto di alcuni aspetti, come ad esempio il modo in cui l'azienda raggruppa gli ordini in lotti, che potrebbero incidere in modo significativo sul tasso di produzione. A questo punto si possono prendere in considerazione quattro strategie di produzione, ovvero:

- *Lotto di una sola unità:* ogni prodotto che viene fabbricato è un pezzo unico e ogni volta è necessaria una specifica configurazione del processo di produzione per ogni singolo prodotto. Si tratta del limite estremo della personalizzazione e in questo caso il costo e il tempo di allestimento aumenteranno notevolmente il costo di fabbricazione del prodotto.
- *Lavorazione sequenziale dei lotti:* raggruppamento di prodotti simili in lotti ma ogni prodotto deve comunque essere lavorato singolarmente. Questa è la strategia di produzione più comune e contribuisce a ridurre i costi di impianto.
- *Lavorazione simultanea dei lotti:* una specializzazione della lavorazione sequenziale dei lotti, la lavorazione simultanea dei lotti utilizza processi che possono consentire la lavorazione contemporanea di più pezzi da lavorare, ad esempio il trattamento termico.
- *Produzione di massa:* quando un'azienda produce componenti in volumi molto elevati, i costi dei tempi di allestimento potrebbero essere talmente ridotti da risultare effettivamente trascurabili. Deve trattarsi di un prodotto che non cambia quasi mai e per il quale sussista una forte domanda.

Ogni metodo di produzione prevede un metodo di calcolo del tasso di produzione leggermente differente, illustrato in dettaglio nei seguenti capitoli.

#### 4.2.2.1 Lotto a Singola Unità

Al limite estremo della personalizzazione, il tasso di produzione di un lotto di una sola unità è dominato dai tempi di conversione e di allestimento tra i diversi prodotti che vengono fabbricati. Un'azienda specializzata nella produzione su commessa potrebbe trovarsi a dover produrre ridotte quantità di un prodotto e le produzioni una-tantum potrebbero rientrare nel ventaglio delle possibilità. Il tempo di produzione di un unico articolo è dato dalla somma di due fattori:

1. *Tempo di Allestimento ( $T_{su}$ )*: il tempo impiegato per allestire il processo di produzione per il pezzo unico da lavorare. Ad esempio, caricare il programma CNC richiesto e regolare le pinze per prelevare i pezzi da lavorare in una laminatrice.
2. *Tempo di Ciclo ( $T_c$ )*: è possibile fare riferimento, definita nell'Equazione 4.2.2 capitolo precedente. È il tempo necessario per lavorare un unico pezzo da lavorare.

$$\begin{aligned} \text{Tempo di Produzione di un Articolo} \\ = \text{Tempo di Allestimento} + \text{Tempo di Ciclo} \end{aligned}$$

$$T_p = T_{su} + T_c \quad (4.2.3)$$

Il *production rate ( $R_p$ )* è dato dal numero di prodotti che possono essere realizzati in un'ora. Queste equazioni presumono che tutti i tempi siano espressi in minuti.

$$\text{Tasso di Produzione} = \frac{60}{\text{Tempo di Produzione di un Articolo}}$$

$$R_p = \frac{60}{T_p} \quad (4.2.4)$$

*Ad esempio, una piccola azienda realizza casse per orologi su misura. Ogni cassa impiega in media 10 minuti per la laminazione ma sono necessari anche 20 minuti per allestire la laminatrice per ogni singola cassa. Utilizzando l'Equazione 4.2.3 il tempo di produzione per l'equazione 2 è pertanto di 30 minuti per cassa e il tasso di produzione della laminatrice per casse su misura è in media di 2 pz/ora.*

#### 4.2.2.2 Produzione per Lotti

La *lavorazione a lotti* è un approccio di produzione estremamente comune, in cui un'azienda realizza una quantità fissa di prodotti identici prima di commutare i processi di produzione su un nuovo tipo di prodotto. Ciò riduce al minimo l'impatto dei tempi di conversione, permettendo ancora di apportare modifiche ai prodotti.

Nella maggior parte dei casi la *lavorazione dei lotti è sequenziale* - i prodotti vengono raggruppati in lotti ma vengono comunque lavorati ancora individualmente. Per calcolare il tempo necessario per lavorare un intero lotto su una macchina di produzione ( $T_b$ ), sono necessarie tre informazioni:

1. *Tempo di Allestimento* ( $T_{su}$ ): il tempo necessario per allestire il processo di produzione in modo da lavorare i prodotti appartenenti al lotto. Ad esempio, caricare il programma CNC richiesto e regolare le pinze per prelevare i pezzi da lavorare in una laminatrice.
2. *Tempo di Ciclo* ( $T_c$ ): equazione 4.2.2, definita nel capitolo precedente. Il tempo necessario per lavorare un unico pezzo da lavorare.
3. *Quantità del Lotto* ( $Q$ ): il numero di articoli che compongono il lotto, dopo il quale il processo verrà modificato per il lotto successivo.

*Tempo di Lavorazione del Lotto = Tempo di Allestimento + (Tempo di Ciclo × Quantità del Lotto)*

$$T_b = T_{su} + (T_c Q) \quad (4.2.5)$$

Il tempo medio per pezzo da lavorare ( $T_p$ ) viene calcolato dividendo il tempo di lavorazione del lotto ( $T_b$ ) per la quantità del lotto ( $Q$ ):

$$\text{Tempo di Produzione per Articolo} = \frac{\text{Tempo di Lavorazione del Lotto}}{\text{Quantità del Lotto}}$$

$$T_p = \frac{T_b}{Q} \quad (4.2.6)$$

L'applicazione dell'Equazione 4.2.2 consente di calcolare il tasso di produzione all'ora.

Si può notare che più il lotto è grande, minore è l'impatto del tempo di allestimento, essendo quest'ultimo ripartito su un numero di prodotti superiore. L'ottimizzazione della strategia di raggruppamento in lotti è importante per ridurre al minimo il costo di ogni singolo pezzo da lavorare.

*Ad esempio, ipotizziamo che un'azienda che produce un numero di casse di orologi in qualità di fornitore di un'altra azienda desideri fabbricare 100 casse. Il tempo di ciclo è di 10 minuti e il tempo di allestimento di 120 minuti. L'azienda vuole suddividere l'ordine in due lotti per consentire di produrre altri articoli tra questi due lotti in modo da rispettare le scadenze di altri ordini. Ogni lotto da 50 avrebbe perciò un tempo di lavorazione del lotto di 620 minuti e un tasso di produzione di 4,84 pz/ora.*

*In alternativa, se l'azienda organizzasse la propria programmazione in modo da inserire tutte e 100 le casse in un unico lotto, il tasso di produzione sarebbe di 5,35*

*pz/ora, ovvero un miglioramento del 10,5% rispetto alla strategia a 2 lotti. Sta all'azienda determinare come raggruppare al meglio i propri prodotti in lotti continuando a garantire la consegna degli ordini in modo puntuale.*

#### 4.2.2.3 Produzione Simultanea per Lotti

Non tutte le lavorazioni in lotti devono avvenire necessariamente in modo *sequenziale*. Alcuni raggruppamenti in lotti possono avvenire in modo simultaneo come, ad esempio, il trattamento termico o l'elettroplaccatura di componenti. Il calcolo del tasso di produzione di un processo che consente la lavorazione simultanea viene pertanto eseguito in modo diverso rispetto alla lavorazione sequenziale. In tale senso è utilizzato lo stesso metodo usato per la lavorazione sequenziale dei lotti ma sostituendo l'equation 4.2.5 con la seguente equazione:

$$\begin{aligned} \text{Tempo di Lavorazione del Lotto} \\ = \text{Tempo di Allestimento} + \text{Tempo di Ciclo} \\ T_b = T_{su} + T_c \end{aligned} \quad (4.2.7)$$

Come si può constatare, il tempo di lavorazione non dipende più dalle dimensioni del lotto, ipotizzando che l'intero lotto possa essere lavorato in un solo ciclo. La quantità del lotto è tuttavia sempre necessaria per l'equazione 4.2.6.

*Consideriamo il caso dell'azienda che realizza lotti di casse per orologi. Le casse vengono elettroplaccate in argento in lotti di fino a 50 pezzi. L'elettroplaccatura ha un tempo di ciclo di 60 minuti. Il tempo di allestimento è di 20 minuti. Il tempo di lavorazione del lotto sarebbe di 80 minuti. E se il processo venisse fatto funzionare alla massima dimensione del lotto pari a 50, il tempo di produzione per unità di lavoro sarebbe di soli 1,6 minuti, raggiungendo un tasso di produzione di 37,5 pz/ora. L'azienda potrebbe non essere in grado di laminare casse abbastanza velocemente da raggiungere un grado elevato di utilizzazione per il proprio processo di elettroplaccatura, a meno che acquisti più laminatrici.*

#### 4.2.2.4 La produzione di Massa

La produzione di massa è la situazione in cui un'azienda produce in continuazione un unico prodotto, poiché la domanda per tale prodotto è sufficientemente elevata da giustificare a livello finanziario un processo di produzione dedicato. In questa circostanza, l'impatto del tempo di allestimento è trascurabile. Il tasso di produzione di massa ( $R_{mp}$ ) è quindi semplicemente il numero di pezzi da lavorare che un processo è in grado di produrre all'ora:

$$\text{Tasso di Produzione di Massa} = \frac{60}{\text{Tempo di Ciclo}}$$

$$R_{mp} = \frac{60}{T_c} \quad (4.2.8)$$

*Un grande produttore di orologi fabbrica casse per il proprio prodotto più popolare in modo continuativo, ivi incluso un processo di laminazione. Sebbene il processo di laminazione abbia originariamente richiesto tempo per l'allestimento, tale tempo impiegato, diviso per le decine di migliaia di componenti prodotti a partire da quel momento, costituisce una minuscola frazione di un secondo e può pertanto essere ignorato.*

Va notato che, sebbene il tempo di allestimento possa essere trascurato, i tempi di movimentazione e i tempi di attrezzaggio di cui all'equazione 4.2.2 non possono essere ignorati e influiranno sul tempo di ciclo del processo.

### 4.2.3 Capacità Produttiva

Mentre il paragrafo 4.2.2 verteva sul tasso di produzione previsionale all'ora dei singoli processi e macchinari, la presente sezione prende in esame la capacità produttiva complessiva che i macchinari consentono all'azienda di raggiungere. Ciò corrisponde al numero massimo di pezzi da lavorare che possono essere fabbricati in un determinato intervallo di tempo, ad esempio il numero di pezzi al giorno, alla settimana o all'anno.

Conoscere il tasso di produzione massima che è possibile raggiungere con una linea di produzione o con un'altra serie di processi in sequenza è importante per parecchi motivi. Assicura che a uno stabilimento produttivo non vengano assegnati ordini di lavoro eccessivi, poiché questo causerebbe il mancato rispetto delle scadenze e ritardi. Inoltre, aiuta anche a comprendere il grado di utilizzazione dei processi di produzione e a identificare le aree sottoutilizzate, nelle quali si potrebbe ottenere una maggiore creazione di valore.

#### 4.2.3.1 Le Ore Operative di Produzione

Nel paragrafo 4.2.2 abbiamo visto come calcolare il numero di pezzi da lavorare che possono essere prodotti dai singoli macchinari all'ora. Il passaggio successivo per conoscere la capacità produttiva è stabilire per quante ore al giorno è operativo il processo di produzione. Alcune aziende eseguono un unico turno di lavoro nei giorni feriali. Altre possono essere operative 24 ore al giorno, 7 giorni alla settimana. Conoscere questo fattore è il primo passo per calcolare la capacità produttiva.

Le ore operative di produzione all'anno (presumendo che tutti i turni siano della stessa durata) vengono calcolate nel seguente modo:

$$\text{Ore di Produzione} = \text{Numero di Turni} \times \text{Durata del Turno} \times \text{Giorni della Settimana} \times \text{Settimane dell'Anno} \quad (4.2.9)$$

*Ad esempio, un'azienda che effettua un unico turno di lavoro di 8 ore nei giorni feriali e lavora 50 settimane all'anno raggiunge 2000 ore di produzione all'anno. Un'altra azienda che svolge invece due turni di 8 ore, 7 giorni alla settimana, per 50 settimane all'anno, raggiungerà 5600 ore di produzione all'anno.*

Per approssimare le ore di produzione al giorno o alla settimana, occorre dividere la produzione all'anno per 365 giorni o per 52 rispettivamente. Tali cifre possono richiedere un aggiustamento se si effettua il calcolo per un periodo che comprende un'interruzione per le festività natalizie, ad esempio.

#### 4.2.3.2 La Capacità di Produzione Semplice

In molti casi un'azienda possiede una determinata quantità di macchinari e questi producono componenti a una velocità all'incirca analoga. Ad esempio, un'azienda possiede cinque laminatrici che producono casse di orologi e ciascuna macchina produce a un tasso di produzione simile. In questo caso, il calcolo della capacità produttiva dello stabilimento può essere effettuato tramite le seguenti informazioni:

1. *Numero di macchine (n)*: il numero di macchine simili all'interno dell'azienda che producono componenti all'incirca alla stessa velocità.
2. *Ore di produzione ( $H_{pc}$ )*: il numero di ore sulle quali calcolare la capacità produttiva, calcolata mediante l'equazione 4.2.9. Le ore alla settimana o al mese possono essere utilizzate in questo caso per calcolare la capacità produttiva per periodi di tempo inferiori a un anno.
3. *Tasso di produzione ( $R_p$ )*: il numero di pezzi da lavorare che ogni macchina produce all'ora. Viene calcolato utilizzando i metodi nella sezione 4.2.2, più precisamente l'equazione 4.2.4.

*Capacità Produttiva = Numero di Macchine × Ore di Produzione ×  
Tasso di Produzione*

$$PC = nH_{pc}R_p \quad (4.2.10)$$

*Ad esempio, l'azienda con cinque laminatrici simili svolge un unico turno di lavoro di otto ore, operando cinque giorni alla settimana, 50 settimane all'anno. Le laminatrici hanno un tasso di produzione di 4,84 pz/ora. Tale azienda lavora perciò 2000 ore all'anno e ha una capacità produttiva annua massima di 48.000 pz/anno.*

#### 4.2.3.3 Avanzo di Capacità Produttiva

Nelle situazioni in cui più macchinari funzionano a tasso di produzione differenti (PR), occorre apportare una modifica all'equazione 4.2.10. Infatti, il tasso di produzione di ogni singola macchina deve invece essere considerato separatamente:

- *Tasso di produzione della macchina i ( $R_{pi}$ ):* per una serie di  $n$  macchine, il tasso di produzione di una macchina specifica. Viene calcolata utilizzando i metodi descritti nella sezione 4.2.2, più precisamente l'equazione 4.2.4.

*Capacità Produttiva*

*= Ore di Produzione*

*× (PR della Macchina 1 + PR della Macchina 2 etc)*

$$PC = H_{pc} \sum_{i=1}^n R_{pi} \quad (4.2.11)$$

*Consideriamo un'azienda con tre laminatrici. Tutte producono casse per orologi ma funzionano a velocità differenti poiché realizzano modelli diversi di produttori differenti. Le macchine sono numerate, il loro tasso di produzione viene calcolato individualmente, come descritto al capitolo 1, e i risultati vengono inseriti nella seguente tabella:*

Numero della macchina	Nome della macchina	Tasso di produzione
1	Fedele muletto	4 pz/ora
2	Economica e simpatica	3 pz/ora
3	Stato dell'arte	6 pz/ora

**Tabella 4.2-1** Le fresatrici a disposizione per la produzione delle casse degli orologi.

*L'azienda lavora 2000 ore all'anno. La capacità produttiva settimanale è pertanto:*

*Capacità di Produzione Settimanale*

$$= \frac{\text{Ore di Produzione Annue}}{\text{Settimane dell'Anno}} \times (R_{p1} + R_{p2} + R_{p3})$$

$$PC \text{ Settimanale} = \frac{2000}{52} \times (4 + 3 + 6)$$

$$PC \text{ Settimanale} = 38.46 \times 13$$

$$PC \text{ Settimanale} = 500 \text{ pc/week}$$

#### 4.2.4 La Capacità Interna

L'acquisizione dei dati e l'esecuzione dei calcoli costituiscono semplicemente il primo passo nell'analisi dei processi di produzione. È importante esaminare i risultati e capire cosa suggeriscono. Ciò consente a un ingegnere di produzione di



prendere decisioni più oculate riguardo alla propria azienda, migliorando la produttività e la redditività. Un obiettivo importante è far corrispondere la capacità produttiva alla capacità richiesta. Infatti, il mancato raggiungimento della capacità produttiva richiesta causerà arretrati. Disporre di una capacità produttiva disponibile significa avere macchinari inutilizzati che altrimenti produrrebbero valore per l'azienda.

Un'azienda non può realizzare un numero di pezzi per intervallo di tempo superiore alla capacità produttiva calcolata. Se la schedulazione degli ordini richiede velocità superiori alla capacità produttiva, l'azienda deve aumentare la capacità produttiva, altrimenti rischia di subire ritardi nei tempi di consegna. Analogamente, realizzare un numero di pezzi inferiore rispetto alla capacità produttiva implica che l'azienda potrebbe generare più valore. Se i macchinari restano fermi, non generano i ricavi che consentirebbero di ottenere.

Esistono molti modi per adattare la capacità produttiva aumentandola o riducendola a seconda della necessità, alcuni dei quali possono essere considerazioni a breve termine, altri considerazioni a lungo termine. È importante tener conto delle tempistiche coinvolte. Nel presente capitolo descriveremo alcune opzioni per incrementare la capacità o contenere la sovracapacità a breve, medio e lungo termine.

#### 4.2.4.1 Incremento di Capacità Produttiva

Quando un'impresa deve produrre più pezzi da lavorare rispetto alla capacità di consegna, ha a disposizione varie opzioni. La scelta dipenderà dalla durata del periodo per il quale l'impresa prevede di essere in sovracapacità.

- *Aumentare le ore di lavoro svolte per turno [a breve termine]:* in caso di problemi di capacità a breve termine, uno dei modi più semplici consiste nell'aumentare la capacità produttiva chiedendo ai lavoratori preesistenti di svolgere ore di lavoro straordinario nei giorni di lavoro già prestabiliti. Ciò aumenterà i costi di manodopera, soprattutto se l'azienda ha la necessità di offrire una paga oraria superiore per incentivare le ore di lavoro straordinario, ma è una soluzione semplice e rapida da attuare.
- *Riconvertire i macchinari preesistenti [a breve termine]:* qualora un'impresa possieda più linee di produzione e realizzi più prodotti, convertire alcuni macchinari da un processo a un altro è un modo per incrementare la capacità produttiva. La disponibilità di attrezzature per eseguire questa soluzione o il tempo necessario per riconfigurare e/o riprogrammare i macchinari determineranno la velocità di questo approccio, ma questo prevede spesso tempi brevi rispetto ad altri approcci. Può anche essere previsto lo spostamento di lavoratori da una linea all'altra.
- *Lasciare in arretrato alcuni ordini [a breve termine]:* a seconda della natura degli ordini e del rapporto dell'impresa con il cliente, ritardare volutamente alcuni ordini per brevi periodi di sovracapacità potrebbe risultare meno dannoso

a livello finanziario rispetto all'aggiunta di lavoratori o macchinari. Occorre tuttavia tenere in considerazione gli effetti sulla reputazione dell'azienda.

- *Subappaltare lavoro all'esterno [a breve termine]*: se si prevede che il periodo di sovracapacità sia breve e ritardare la consegna dei prodotti non rappresenta un'opzione fattibile, una soluzione può essere subappaltare parte del lavoro ad altre aziende. Ciò può essere utile per porre rimedio a colli di bottiglia nel processo di produzione e migliorare la capacità produttiva complessiva ma occorre fare attenzione all'aumento dei costi e delle spese generali in relazione all'organizzazione del subappalto.
- *Aumentare il numero di turni al giorno/alla settimana [a medio termine]*: se si prevede che i problemi di sovracapacità si protraggano per periodi prolungati, non a breve termine, un'opzione può essere introdurre un turno supplementare per massimizzare i tempi di lavorazione dei macchinari. Ciò può richiedere personale aggiuntivo per coprire i turni notturni supplementari o per lavorare nel fine settimana. Laddove opportuno, è anche possibile far svolgere turni di lavoro supplementari al personale preesistente.
- *Aumentare il tasso di produzione dei processi soggetti a strozzatura [a medio termine]*: Il processo limitante di una linea di produzione è rappresentata dai colli di bottiglia. Migliorare il tasso di produzione di tale processo consentirà di migliorare il tasso di produzione dell'intera linea di produzione. Ciò potrebbe comportare la riqualificazione degli operatori, l'ottimizzazione dei programmi CNC, il miglioramento delle attrezzature o altre migliori tecniche.
- *Acquistare macchinari aggiuntivi [a lungo termine]*: se esiste un'effettiva opportunità di aumentare i ricavi incrementando la capacità produttiva, l'acquisto di altri macchinari (o l'assunzione di più lavoratori manuali) potrebbe essere la scelta ideale. Occorre tuttavia fare attenzione ai tempi di esecuzione potenzialmente lunghi sui macchinari e al fatto che potrebbe essere difficile ottenere una produttività ottimizzata a partire da attrezzature nuove finché i dipendenti non avranno acquisito dimestichezza con il loro utilizzo. Occorre concentrare l'acquisizione di macchinari sui processi soggetti a strozzature, dato che saranno questi a consentire capacità produttive superiori.
- *Riprogettare il processo di produzione [a lungo termine]*: se una linea di prodotti è stata fabbricata per un lungo periodo di tempo senza modificarne la modalità di produzione, potrebbe essere possibile apportare modifiche al processo di produzione e trarre beneficio dalle nuove esperienze compiute e dalle nuove attrezzature. Occorre inoltre considerare se un certo grado di riprogettazione del prodotto possa migliorare il tasso di produzione.

#### **4.2.5 Mitigare la Capacità Produttiva non Utilizzata**

Nel caso in cui la capacità produttiva sia superiore a quella che viene utilizzata, è possibile risparmiare sui costi riducendo la capacità produttiva di uno stabilimento o di una linea di produzione. In alternativa, si potrebbero adottare strategie per

sfruttare la capacità inutilizzata, creando valore a partire dalle risorse di cui si dispone.

- *Riconvertire i macchinari preesistenti [a breve termine]:* laddove un'impresa possieda più linee di produzione e realizzi più prodotti, se la domanda di un prodotto è bassa, si può prendere in considerazione la possibilità di riutilizzare i macchinari per altri prodotti per i quali la domanda è più elevata. Può anche essere previsto lo spostamento di lavoratori da una linea all'altra.
- *Stoccare scorte [a breve termine]:* se la sotto capacità è temporanea e l'impresa realizza prodotti che sa di continuare a vendere in futuro, è possibile utilizzare la capacità inutilizzata per stoccare scorte a magazzino che serviranno a far fronte a futuri periodi di sovracapacità. Ciò rappresenta in effetti una scommessa rispetto alla domanda per i prodotti, dato che le scorte stoccate non hanno alcun valore finché non verranno vendute.
- *Ridurre il numero di turni alla settimana [a breve termine]:* uno dei modi più semplici (e meno popolari) per affrontare la capacità di manodopera inutilizzata è ridurre la forza lavoro. Potrebbe trattarsi di attuare il licenziamento di lavoratori ma un'alternativa è ridurre il numero di turni. I lavoratori potrebbero accettare di passare da una settimana lavorativa di cinque giorni a una settimana lavorativa di quattro giorni se ciò significa superare un periodo di breve termine con un numero ridotto di ordini senza licenziare nessuno in modo permanente.
- *Accettare lavoro aggiuntivo [a medio termine]:* se la capacità produttiva è inutilizzata, si può prendere in considerazione la possibilità di offrirla come capacità subappaltata ad altre aziende. La capacità al riguardo risiede nel rapporto con altri produttori e nella natura della capacità di riserva, ma accettare ulteriore lavoro offre l'opportunità di creare valore a partire da macchinari che altrimenti rimarrebbero inutilizzati.
- *Vendere macchinari [a lungo termine]:* se si prevede che i macchinari debbano rimanere inutilizzati a medio e lungo termine, potrebbe valere la pena recuperare parte del valore dei macchinari vendendoli, ottenendo spesso in tal modo un considerevole ritorno. La capacità di vendere macchinari e il relativo prezzo di vendita dipendono dalla richiesta di tali macchinari. Occorre considerare attentamente i requisiti futuri previsti e il valore dei macchinari prima di impegnarsi a venderli.

#### 4.2.5.1 Colli di Bottiglia

Molti stabilimenti di produzione non realizzano prodotti in un'unica fase, come invece avveniva nel caso della cassa per orologi esaminata nei capitoli precedenti che venivano sottoposte a un solo e unico processo. La produzione avviene di norma attraverso più operazioni in sequenza che concorrono a realizzare il componente in questione, formando in tal modo una linea di produzione. È importante sottolineare come una linea di produzione potrebbe non costituire un'entità fisica presente nello stabilimento produttivo, bensì un processo eseguito utilizzando più componenti hardware distribuiti; in ogni caso l'approccio è identico.

Il calcolo della capacità produttiva di una linea di produzione il più delle volte risulta semplificato come conseguenza di un unico problema: in quasi tutte le linee di produzione si verificano infatti dei colli di bottiglia. La strozzatura - o collo di bottiglia - è il processo che limita la capacità produttiva producendo a velocità più lenta rispetto a qualsiasi altro processo. Calcolando il tasso di produzione di ogni processo è possibile identificare la strozzatura come la macchina (o l'insieme di macchine) che presenta la somma del *tasso di produzione* più basso. Ne consegue, come il calcolo della capacità produttiva dell'intera linea di produzione sia semplicemente la capacità produttiva del collo di bottiglia.

*Ad esempio, il produttore di orologi lamina le casse per orologi mediante 2 laminatrici a una velocità di 5 pz/ora per macchina, elettroplacca lotti di casse a una velocità di 20 pz/ora e lucida le casse a una velocità di 6 pz/ora. Le due laminatrici insieme producono 10 casse all'ora, il processo di elettroplaccatura è in grado di elettroplaccare 20 unità all'ora ma la strozzatura è data dal processo di lucidatura. È possibile aumentare il tasso di produzione delle operazioni di laminazione ed elettroplaccatura, ma finiranno per formarsi pile più grandi di casse non lucidate.*

A livello informale, i colli di bottiglia spesso vengono facilmente identificati osservando quali macchinari sono costantemente in funzione e constatando di fronte a quali macchinari, invece, si formano tipicamente lunghe code di lavoro in attesa. Tuttavia, la comprensione formale di code e buffer in un sistema di produzione può fornire informazioni su come organizzare al meglio i processi di produzione e a quale velocità eseguirli. La sezione successiva discuterà la teoria delle code e sarà altamente applicabile all'ottimizzazione del sistema di produzione. Essi rappresentano una serie di sistemi collegati, sia come processi di produzione connessi per formare una linea di produzione sia come fornitori collegati in una catena di fornitura per produrre un prodotto grande o complesso. Capire come i prodotti attraversano e "attendono" in questi sistemi aiuterà l'analisi in cui è possibile effettuare ottimizzazioni per migliorare il flusso di materiali nel sistema.

## **4.3 Analisi delle Code**

### **4.3.1 Introduzione alla Teoria delle Code**

Nelle aziende manifatturiere, la produzione consiste di norma in più fasi che si susseguono man mano che i pezzi scorrono tra stazioni di lavorazione meccanica e processi di montaggio all'interno dello stabilimento produttivo. A meno che si stia utilizzando una linea di produzione a flusso/ad impulsi, in cui tutto si muove tra le stazioni in sincrono, è inevitabile che alcuni pezzi arrivino alle stazioni prima che la stazione sia pronta oppure che le stazioni siano pronte prima ancora che siano

disponibili pezzi. Utilizzare e comprendere le code e il flusso dei pezzi aiuta a conoscere e a ottimizzare la linea di produzione.

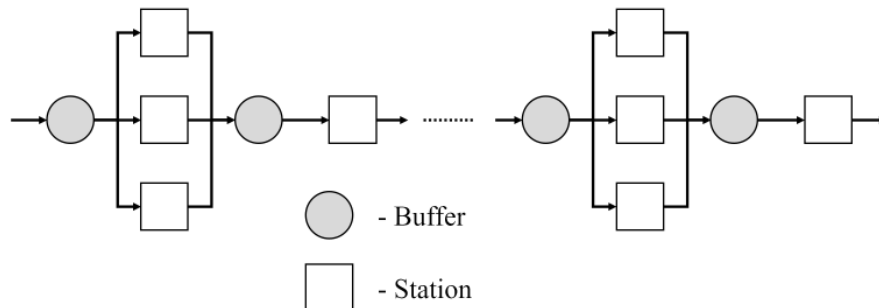
Il processo di produzione consta di più fasi operative, nel corso delle quali le materie prime vengono trasformate in prodotti finiti. Per rendere il processo efficiente (ad esempio massimizzando il tasso di produzione di una linea) ed efficace in termini di costi, sono stati ampiamente utilizzati strumenti analitici come la *teoria delle code*. Tali strumenti rivestono un ruolo importante nell'analisi delle prestazioni, nella progettazione, nella pianificazione e nel controllo dei processi di produzione, dato che i pezzi e i prodotti in coda non generano valore. La teoria delle code è una branca della matematica che studia e modella l'azione di attesa nelle linee e trae la propria origine dall'analisi degli scambi di comunicazione nella gestione delle telefonate. La teoria delle code è stata applicata con successo alla modellazione delle linee di produzione per studiare le prestazioni.

Essa richiede la semplificazione dei processi nel sistema di produzione e la loro modellazione in modo da poter applicare le formule per calcolare le metriche opportune delle prestazioni. Comprendendo ciò che influisce sulle prestazioni delle code, è possibile iniziare a registrare tali dati e iniziare a raccogliere informazioni su come le modifiche al sistema di produzione potrebbero influire sulle prestazioni dell'accodamento e quindi sulle prestazioni complessive del sistema.

Per comprendere il funzionamento di questa teoria, occorre definire alcuni componenti e caratteristiche fondamentali di una linea di produzione per poterle relazionare con la formazione delle code. Infatti, i sistemi di produzione presentano layout del flusso dei prodotti differenti, che vengono classificati a seconda del metodo di trasferimento dei pezzi e del numero di tipologie di pezzi prodotte dal sistema. Nel dettaglio, il trasferimento dei pezzi può essere eseguito in tre diverse modalità:

1. *Sincrono* (noto anche come linee di trasferimento): in cui i pezzi vengono trasportati contemporaneamente da una postazione di lavoro all'altra.
2. *Asincrono* (noto anche come linee di produzione): in cui ogni pezzo si muove indipendentemente dagli altri pezzi.
3. *Continuo*: in cui i pezzi si muovono in modo ininterrotto a velocità costante.

Questo flusso del prodotto è una linea di attesa o una coda, in cui una sequenza di oggetti (in questo caso pezzi fabbricati) è in attesa di essere lavorata. Dato che la teoria delle code trae origine dall'analisi delle code formate dall'uomo, questi oggetti sono in genere chiamati *clienti* e il processo a cui sono sottoposti è denominato *servizio*. Il termine *buffer* è spesso utilizzato nel contesto della produzione. Una coda include sia un buffer (l'area di attesa) nonchè il servizio che viene alimentato dal buffer stesso, che in un contesto di produzione significherebbe il processo o la stazione di produzione. In pratica, i termini sono spesso usati in maniera intercambiabile. La Figura 4.3-1 mostra un layout generale a flusso di prodotto riferito ai sistemi di produzione di massa.



**Figura 4.3-1** Layout del flusso di prodotto nei sistemi di produzione di massa [5]. Si può vedere che nel caso di stazioni parallele, esse possono prendere le parti da un singolo buffer condiviso.

Le linee di produzione vengono utilizzate per produrre pezzi che hanno un giro d'affari di volume elevato e sono caratterizzate da layout a flusso di prodotto, bassa flessibilità (la linea è limitata alla produzione di una ridotta varietà di tipologie di pezzi) e trasferimento asincrono dei pezzi. Gli stati di *blocking* (blocco) e di *starving* (esaurimento) dei pezzi sono le principali cause di inefficienza delle linee di produzione. Essi si definiscono come:

- *Blocking*: un pezzo è in attesa di essere lavorato ma non può procedere perché la macchina in questione è al momento utilizzata da un altro pezzo.
- *Starving*: una macchina funziona a vuoto e non ha pezzi in ingresso per avviare la lavorazione.

I fenomeni descritti sono causati principalmente da tempi di lavorazione variabili e da interruzioni della linea causate dall'inaffidabilità delle stazioni. Per aumentare l'efficienza delle linee, tra le stazioni vengono posizionati buffer o code.

#### 4.3.2 L'analisi delle Code

L'impatto degli stati di *blocking* e *starving* sulla produttività di una linea con un volume di produzione elevato è significativo. Comprendere il fenomeno delle code nel sistema aiuterà anche a identificare i colli di bottiglia e le inefficienze, come obiettivi per processi specifici da migliorare. In molti casi, il semplice fatto di essere consapevoli che questi problemi esistono può aiutare una semplice risoluzione. Tuttavia, un'analisi più dettagliata può consentire l'identificazione di problemi più sottili e l'implementazione di approcci di ottimizzazione più ampi. Per fare ciò, è necessario creare un modello del sistema di produzione.

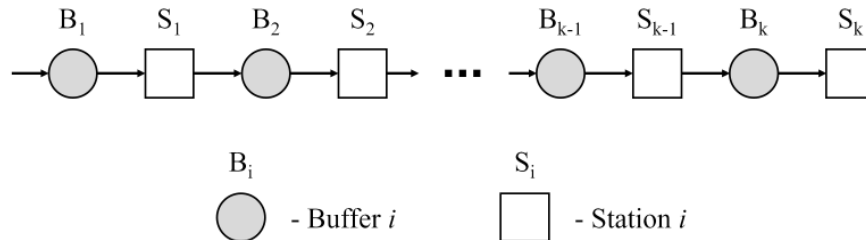
#### 4.3.2.1 Modellare il Problema

Per comprendere il comportamento di un sistema di produzione, è possibile analizzarlo come un processo stocastico (un processo con elementi casuali). La parte principale è la distribuzione del numero di “job” nel sistema in un punto arbitrario nel tempo. A partire da questa distribuzione, è possibile definire in che modo essi variano consentendo di individuare caratteristiche prestazionali importanti come il numero medio di job nel sistema. La prima fase per modellare una linea di produzione consiste nel caratterizzare il sistema. Il sistema presenta caratteristiche differenti:

- Anzitutto viene caratterizzato il processo di *arrivo* dei pezzi, che definisce il modo in cui i pezzi giungono all'interno del sistema.
- Quindi viene caratterizzata la durata del *servizio*, ovvero il tempo in cui il pezzo si trova presso la stazione in cui vengono eseguite alcune operazioni sul pezzo stesso.
- È anche necessario specificare il *numero di stazioni*, nelle quali diversi pezzi potrebbero essere lavorati in parallelo.
- I pezzi attendono nel *buffer* se tutte le stazioni sono impegnate, per cui viene stimato il numero totale di pezzi nel sistema, inclusi i pezzi che sono in corso di servizio e quelli che sono in attesa.
- Infine, deve essere specificata una *accurata schedulazione*. Quest'ultima determina l'ordine in cui i pezzi nel buffer vengono rilasciati per la lavorazione.

I metodi più comuni di schedulazione sono:

- *First in first out (FIFO)*: il primo che arriva è il primo ad essere servito; questo è il tipo di coda con cui abbiamo intuitivamente maggiore familiarità. Come accade per una coda di clienti in un negozio, nel campo della produzione il pezzo che è rimasto in attesa più a lungo viene servito per primo.
- *Last in first out (LIFO)*: immaginiamo una pila di vassoi in una mensa. Il vassoio riconsegnato più di recente viene posizionato in cima alla pila ed è anche il prossimo vassoio che verrà preso. Questo principio viene utilizzato nella produzione, laddove i pezzi vengano accumulati in una pila.
- *Priorità*: nel caso in cui non tutti i pezzi siano identici, è possibile assegnare priorità a determinati pezzi. È possibile attribuire una priorità più alta ai prodotti che devono essere spediti con maggiore urgenza e il prossimo pezzo da lavorare sarà perciò il pezzo con la massima priorità assegnata.



**Figura 4.3-2** Il modello base di coda in una linea di produzione [5].

- *Tempo di lavorazione più breve*: il pezzo che impiega meno tempo ad essere lavorato viene utilizzato per primo. Questo principio viene utilizzato talvolta quando i buffer raggiungono il proprio limite e hanno bisogno di liberare spazio.

La **Figura 4.3-2** mostra un comune modello di base di una linea di produzione. La linea di produzione è costituita da  $k$  stazioni disposte in serie. Ogni stazione ( $S_i$ ) è preceduta da un buffer ( $B_i$ ). Il buffer a monte della prima stazione può essere finito o infinito, mentre tutti i buffer inter-stazione sono finiti. I pezzi entrano nel sistema in corrispondenza della stazione 1 e passano in sequenza attraverso tutte le stazioni. Presso ogni stazione viene eseguita un'operazione su ciascuno dei pezzi da parte di una singola macchina. I pezzi escono dalla stazione finale ( $S_k$ ) in forma finita.

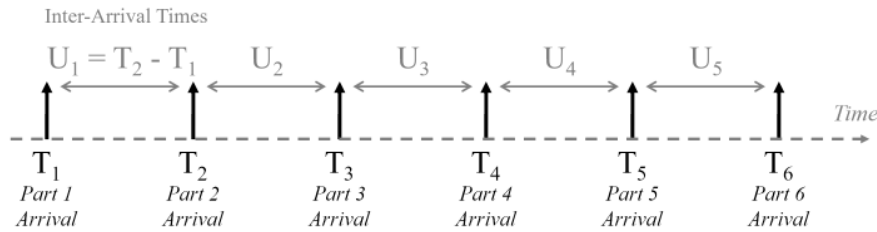
Le ipotesi comuni quando si modella una linea di produzione come un network di code sono:

- La linea è opera in condizioni stabili, ovvero di “steady state” (le condizioni rimangono sempre costanti attraverso l'intera produzione).
- Tutte le variabili casuali sono indipendenti.
- Tutti i tempi di trasporto tra stazioni sono pari a zero.
- Tutti i guasti sono guasti di una singola macchina e dipendono dal funzionamento (un macchinario può entrare in guasto solo quando è in funzione).
- Nessun pezzo viene scartato.
- Viene modellato un singolo tipo di pezzo.
- Tutti i buffer adottano il principio FIFO.
- È disponibile sufficiente personale addetto alla riparazione.

#### 4.3.2.2 Arrivo delle Parti

Per modellare la linea di produzione, occorre definire l'arrivo continuo dei pezzi in una determinata postazione di lavoro. Nei modelli semplici si ipotizza che gli tempi di arrivo successivi,  $U_1, U_2, U_3 \dots U_i$  tra pezzi siano reciprocamente indipendenti e seguano la stessa distribuzione della probabilità





**Figura 4.3-3** Arrivo delle parti.  $T_i$  è il tempo di arrivo della parte  $i$ .  $U_i$  è il tempo intercorso tra l'arrivo di due parti  $U_i = T_{i+1} - T_i$

Il processo di arrivo viene spesso modellato come un processo di Poisson. In particolare, i tempi di arrivo  $U_1, U_2, U_3, \dots$  di ogni pezzo sono indipendenti e arrivano secondo una distribuzione esponenziale con media  $\lambda$ .

Se paragonato con le normali distribuzioni o “curve a campana”, un processo di Poisson è simile ma discreto (cioè non puoi avere frazioni di oggetti in arrivo). Esso è descritto con una singola variabile: il numero medio di eventi per unità di tempo, in questo caso il numero di arrivi delle parti.

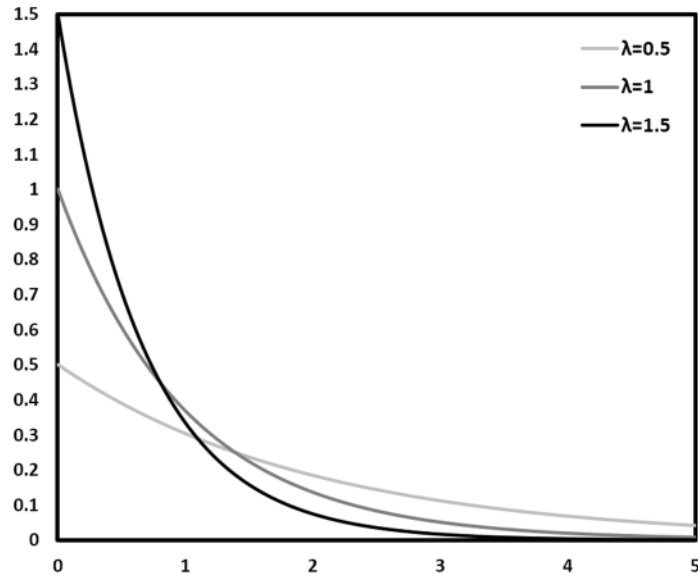
Se la varianza è importante, la probabilità che l'intertempo di arrivo  $U_i$  sia superiore a un determinato valore  $u$  è pari a  $\exp(-\lambda u)$ . In questo caso, quando gli intertempi di arrivo sono indipendenti e distribuiti in modo identico secondo una distribuzione esponenziale con il parametro  $\lambda$ , il processo di arrivo è detto processo di Poisson della velocità  $\lambda$ , in cui la velocità di arrivo  $\lambda$  è il numero medio di arrivi per unità di tempo.

*Ad esempio,  $\lambda$  è tipicamente espresso come il numero medio di arrivi per unità di tempo. Laddove in una coda arrivano 12 pezzi all'ora,  $\lambda = 12/h$ . Quando si calcola il comportamento della coda occorre accertarsi che tutte le quantità di tempo siano espresse nella stessa unità di misura, ad esempio all'ora.*

#### 4.3.2.3 La durata del Servizio

Per caratterizzare il sistema, è anche necessario definire opportunamente la durata del servizio, che indica il tempo necessario per eseguire un'operazione sul pezzo all'interno della stazione. Il *tempo di servizio* è il tempo trascorso tra l'inizio della lavorazione e la partenza, indipendentemente dall'eventuale tempo di attesa nella coda. In generale, si presume che:

- I tempi di servizio siano indipendenti e distribuiti in modo identico.
- I tempi di servizio siano caratterizzati dalla propria distribuzione della probabilità.



**Figura 4.3-4** Tre esempio di distribuzione esponenziale con media diversa. In tutti i casi, si può vedere che tempi di arrivo più brevi sono molto più probabili di quelli più lunghi, ma a volte si verificheranno tempi di arrivo lunghi: una parte è arrivata in ritardo a una stazione. Questi eventi più rari sono in genere quelli che causano problemi con i sistemi di accodamento.

Come i tempi di arrivo dei pezzi, la distribuzione esponenziale è un modello applicabile anche alla durata del servizio. È espressa come il numero di pezzi lavorati per unità di tempo. In questo caso si ipotizza che, se  $S_i$  denota la durata di servizio per un pezzo  $i$ , allora la probabilità che  $S_i$  sia superiore a un determinato valore  $s$  è pari a  $\exp(-\mu s)$ , dove  $\mu$  è la media della distribuzione esponenziale ed  $s$  la durata.

Sulla base di queste informazioni è possibile calcolare alcune metriche. Il *service rate* è pari a  $\mu$  ed è il numero medio di pezzi lavorati per unità di tempo se la macchina è sempre occupata, vale a dire i pezzi al minuto.

*Ad esempio, se una macchina è in grado di lavorare un pezzo ogni 4 minuti,  $\mu = 15/h$  (ovvero 15 pezzi lavorati all'ora). Si ricorda che, quando si calcola il comportamento della coda, occorre accertarsi che tutte le quantità di tempo siano espresse nella stessa unità di misura.*

Il *carico offerto* (talvolta chiamato intensità del traffico) è un altro dato metrico importante, indicante l'entità di traffico prevista in una stazione. Il carico offerto  $\rho$  è definito come:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (4.3.1)$$

dove  $\lambda$  è il numero medio di arrivi per unità di tempo e  $\mu$  è il numero medio di pezzi che una stazione è in grado di gestire se è sempre occupata. Il carico offerto è la proporzione media di tempo in cui una macchina sarà occupata ed è un valore importante nel calcolo delle metriche. Il carico offerto deve essere inferiore a uno. Se è superiore a uno, la stazione non è in grado di lavorare pezzi abbastanza velocemente e la coda continuerà a crescere.

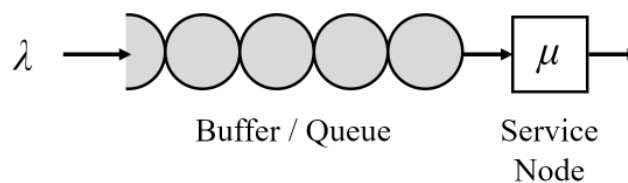
*Nel nostro esempio,  $\lambda = 12/h$  e  $\mu = 15/h$ , per cui il carico offerto è di 0,8.*

#### 4.3.2.4 La coda M/M/1 Queue

Esistono tuttavia principali tipologie di code, descritte nella notazione di Kendall. Una coda viene descritta tramite 5 diversi parametri A/B/c/K/Z, in cui il significato di ogni parametro è il seguente:

- *A* è la distribuzione degli intertempi di arrivo. M sta per markoviano (ovvero esponenziale discusso precedentemente), D per Deterministico (costante) e G per distribuzione generica (ovvero una distribuzione sconosciuta). Esistono altri valori per distribuzioni meno comuni.
- *B* è la distribuzione del tempo di servizio e in genere può avere gli stessi valori della distribuzione degli intertempi di arrivo.
- *c* è il numero di serventi che possono prelevare pezzi da una coda.
- *K* è la capacità del sistema, ovvero la lunghezza massima della coda + il numero di serventi. Per questo motivo viene talvolta scritto come *K+c*. Se il valore viene omissso, la coda è infinita.
- *Z* è la tipologia del processo, ovvero se la priorità è FIFO, LIFO come descritto in precedenza. Se tale valore viene lasciato in bianco, si presume che la tipologia sia FIFO.

Il tipo di coda più semplice e quello discusso in questa sezione è la coda M/M/1, che è una coda con inter-arrivi markoviani e durate di servizio, un singolo server per elaborare le parti e una coda senza lunghezza massima. Una coda M/M/1 potrebbe essere scritta più completamente come M/M/1/∞/FIFO.



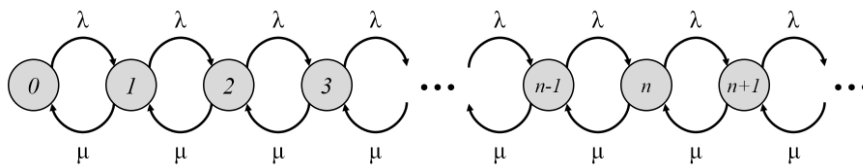
**Figura 4.3-5** Un esempio di coda M/M/1.

Sebbene in realtà un sistema di produzione non sia mai così semplice, questo modello contiene la maggior parte delle caratteristiche essenziali di un sistema di produzione e illustra le idee e i metodi di base della teoria delle code. Semplificando il modello, è possibile arrivare a delle conclusioni “abbastanza buone” senza terminare il processo che porterebbe a conclusioni così complesse da non essere più utili.

L’analisi del sistema consiste nello studiare l’evoluzione del valore  $N(t)$ , che si riferisce al numero di pezzi nel sistema  $N$  nel momento  $t$ . Per “pezzo nel sistema” si intende il numero di pezzi presenti nella coda, più i pezzi che sono in corso di lavorazione. Il valore di  $N(t)$  può cambiare in due diversi modi durante un intervallo di tempo rappresentando una transizione da  $N(t)$  a  $N(t+\Delta t)$ . Se vi sono  $n$  pezzi nel sistema, possono verificarsi i seguenti cambiamenti:

- Se si verifica un arrivo, lo stato del sistema aumenta da  $n$  a  $n+1$ . Il tasso di aumento è rappresentato da  $\lambda$ , la velocità di arrivo.
- Se un processo è completato, lo stato del sistema diminuisce da  $n$  a  $n-1$ . Il tasso di diminuzione è rappresentato da  $\mu$ , la velocità di servizio.

La previsione del valore di  $N(t)$  consente di prevedere la lunghezza media della coda modellata, nonché la proporzione del tempo in cui essa è su una lunghezza specifica. Sebbene una coda M/M/1 abbia una coda “infinita” per semplificare i calcoli il sistema reale che si sta modellando avrà un limite che non si desidera superare. La transizione da uno stato all’altro può avvenire come indicato nella Figura 4.3-6.



**Figura 4.3-6** Stati di una coda M/M/1

### 4.3.3 Eventi Probabilistici e Misurazione delle Prestazioni

Dopo aver modellato la coda, è possibile iniziare a calcolare le probabilità che gli eventi si verifichino, come il numero medio di parti nella coda e il tempo medio che una parte trascorre nella coda. Ciò consentirà di identificare i problemi con il sistema di accodamento esistente, dove i buffer potrebbero essere troppo grandi o troppo piccoli o dove un buffer rischia di superare la sua capacità. Le ipotesi effettuate riguardo al sistema (ad esempio gli arrivi di Poisson, i tempi di lavorazione esponenziali, FIFO) consentono di descrivere lo stato del sistema in un

punto arbitrario nel tempo specificando semplicemente il numero di pezzi presenti all'interno di esso. Senza queste ipotesi, la descrizione dello stato sarebbe molto complicata e dovrebbe comprendere non solo il numero di pezzi presenti nel sistema ma anche, ad esempio, il tempo di lavorazione residua del pezzo.

In un dato punto, se il sistema è nello stato  $n$ , che è il numero di parti nel sistema di accodamento (inclusi i nodi di servizio stessi):

- Lo stato del sistema si muove da  $n-1$  a  $n$  al tasso di  $(P_{n-1})(\lambda)$
- Lo stato del sistema si muove da  $n$  to  $n-1$  al tasso di  $(P_n)(\mu)$

Dove  $P_{n-1}$  e  $P_n$  sono le probabilità di essere negli stati  $n-1$  e  $n$  rispettivamente. Assumendo che il sistema si trovi in stato di steady-state:

$$(P_n) = (\rho)(P_{n-1}) \quad (4.3.2)$$

Dove  $\rho$  è il carico offerto discusso in sezione 4.3.2.3. Sebbene le code siano sistemi dinamici e mutevoli, calcolando le probabilità di trovarsi in ogni stato è possibile calcolare un numero di misurazioni delle prestazioni per fornire informazioni sulla coda e sul suo comportamento previsto.

#### 4.3.3.1 Numero di parti un Sistema Probabilistico

Per calcolare le misure prestazionali del modello M/M/1, viene definita anzitutto la probabilità che siano presenti  $n$  pezzi nel sistema. Se conosciamo il carico offerto come riportato paragrafo 4.3.2.3, le probabilità che il sistema sia vuoto e inutilizzato sono:

$$P_0 = 1 - \rho \quad (4.3.3)$$

Dall'equazione 4.3.2, la probabilità di avere una parte nel sistema è:

$$P_1 = \rho P_0 \quad (4.3.4)$$

Ciò significa che le probabilità che sia presente un pezzo nel sistema sono pari alle probabilità che siano presenti zero pezzi, moltiplicate per il carico offerto. Quindi, analogamente, le probabilità che siano presenti due pezzi nel sistema sono le probabilità che sia presente un pezzo, moltiplicate per il carico offerto:

$$P_2 = \rho P_1 \quad (4.3.5)$$

E, per estensione, le probabilità che siano presenti  $n$  pezzi nel sistema vengono calcolate nel seguente modo:

$$P_n = \rho^n P_0 \quad (4.3.6)$$

Dato che una coda M/M/1 può lavorare un solo pezzo per volta, la lunghezza della coda è  $n-1$  (fino un minimo di zero). Sebbene si presupponga che una coda M/M/1 sia infinita, in realtà sussiste la probabilità che vi sia un limite pratico al di sopra del quale si verificano notevoli inconvenienti o costi supplementari. Le probabilità che il sistema abbia al proprio interno  $n$  o più pezzi sono pari a:

$$P_{n \text{ o più}} = \rho^n \quad (4.3.7)$$

Il risultato sarà la proporzione di tempo che il sistema impiega con una coda pari o in eccesso rispetto alla lunghezza  $n-1$  (dato che un pezzo si troverà nella stazione che viene lavorata).

#### 4.3.3.2 La misurazione delle Prestazioni

Con l'ausilio delle formule tratte dal precedente sottocapitolo, è possibile calcolare le seguenti misure prestazionali:

- Numero medio di pezzi nella coda ( $L_q$ ).
- Numero medio di pezzi nel sistema, ad esempio la coda e la stazione ( $L_s$ ).
- Tempo medio di permanenza di un pezzo nella coda ( $W_q$ ).
- Tempo medio di permanenza di un pezzo nel sistema, ad esempio tempo di coda + tempo di lavorazione ( $W_s$ ).

Il numero medio di pezzi presenti nell'intero sistema (ad esempio sia la coda che la stazione di lavorazione)  $L_s$  viene calcolato a partire dal carico offerto  $\rho$ , dato che il carico offerto rappresenta la quantità di 'traffico' nel sistema:

$$L_s = \frac{\rho}{1-\rho} \quad (4.3.8)$$

Il numero medio di pezzi nella coda  $L_q$  viene calcolato moltiplicando il numero medio di pezzi nel sistema  $L_s$  tramite il carico offerto  $\rho$ :

$$L_q = \rho L_s \quad (4.3.9)$$

Che equivale a:

$$L_q = \frac{\rho^2}{1-\rho} \quad (4.3.10)$$

Una legge importante nella teoria delle code è la Legge di Little, che afferma che il numero di pezzi nel sistema  $L_s$  è pari alla velocità di arrivo  $\lambda$  moltiplicata per il tempo di permanenza del pezzo nel sistema  $W_s$ :

$$L_s = \lambda W_s \quad (4.3.11)$$

Dato che conosciamo  $L_s$  e  $\lambda$ , possiamo riformularla nel seguente modo:

$$W_s = \frac{L_s}{\lambda} \quad (4.3.12)$$

Dato che  $L_s$  viene calcolato a partire dal carico offerto  $\rho$  e che  $\rho$  dipende dalla velocità di arrivo  $\lambda$  e dalla velocità di servizio  $\mu$ , ciò può essere ulteriormente semplificato come segue:

$$W_s = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (4.3.13)$$

Si tenga presente che l'unità di tempo di  $W_s$  è identica all'unità di tempo di  $\lambda$  e  $\mu$ . Se  $\lambda = 12/h$  e  $\mu = 15/h$ , allora  $W_s = 0,333$  ore o 20 minuti.

Infine, il tempo che un pezzo trascorre in attesa nella coda  $W_q$  è il tempo totale nel sistema, meno il tempo di lavorazione. Il tempo medio di lavorazione è pari a  $1/\mu$  e pertanto il tempo medio di attesa è semplicemente:

$$W_q = W_s - \frac{1}{\mu} \quad (4.3.14)$$

$$W_q = \frac{1}{\mu - \lambda} - \frac{1}{\mu} \quad (4.3.15)$$

#### 4.3.3.3 La misura delle Prestazioni nelle Code: Esempio

La teoria delle code è uno strumento estremamente efficace per comprendere il network dei processi di produzione tra loro connessi. Questa sezione mostra un esempio pratico di una teoria delle code applicata a un processo esemplificativo per chiarire come applicare le formule.

*Per una stazione dedicata alla lavorazione di casse per orologio, la velocità media di arrivo dei pezzi è di 10 all'ora. In media, la stazione può lavorare pezzi con una velocità pari a un pezzo ogni cinque minuti. Supponiamo che l'arrivo dei pezzi segua una distribuzione di Poisson e la lavorazione dei pezzi presso la stazione segue una distribuzione esponenziale. Ricaviamo il numero medio di pezzi in attesa nella coda e il numero medio di pezzi nel sistema. Ricaviamo il tempo medio di attesa nella coda e il tempo totale di un pezzo nel sistema. Ricaviamo le probabilità che la lunghezza della coda sia superiore a dieci pezzi.*

Le distribuzioni di Poisson ed esponenziali possono sembrare complesse, ma se i tempi tra i diversi processi seguono una curva a campana (quindi il tempo medio è comune e tempi molto più alti o più bassi sono rari) e puoi calcolare un tempo medio, allora probabilmente cadono in questa categoria. È la variabilità di questi due valori che rende importante la teoria delle code. Se i tempi di arrivo delle parti e i tempi di servizio fossero costanti, le code sarebbero del tutto prevedibili. Tuttavia,

l'elaborazione è raramente del tutto prevedibile e anche un breve periodo tempi di arrivo delle parti combinato con lunghi tempi di servizio potrebbe rendere un sistema di buffering non efficiente.

Arrivi di Poisson, servizio esponenziale e singola stazione significano che questo esempio segue un modello M/M/1 e possiamo utilizzare le formule che abbiamo visto in precedenza. Prima di poter calcolare le metriche prestazionali, dobbiamo calcolare le velocità di arrivo e di servizio e il carico offerto.

- Tasso di arrivo delle parti  $\lambda = 10/h$

*La velocità di arrivo dei pezzi è la frequenza media con cui i pezzi arrivano alla stazione di elaborazione. È improbabile che le parti arrivino esattamente ogni 6 minuti, alcune parti arriveranno leggermente più velocemente mentre altre più lentamente. Più raramente potrebbero esserci variazioni anche più significative. Tuttavia, consideriamo un valore medio di dieci parti all'ora.*

- Il part service rate è  $\mu = 1$  in 5 minuti = 12/h

*Il part service rate è la velocità con cui la stazione di elaborazione può elaborare le parti. Esso è anche chiamata tempo di ciclo. Come il tasso di arrivo delle parti, prendiamo in considerazione la media ma il tempo di elaborazione specifico può variare. Esso è qualcosa che dovrà essere misurato considerando la stazione di elaborazione stessa, ricordando di includere fattori come il carico e lo scarico delle parti e qualsiasi tempo di attrezzaggio (è possibile fare riferimento alla sezione 4.2.2). Se la tua stazione di lavorazione è in grado di elaborare le parti in un tempo costante, cioè esattamente cinque minuti per ogni parte, le formule saranno leggermente diverse. È possibile fare riferimento alla sezione successiva per informazioni sulle code M/D/1.*

- Il carico offerto  $\rho$  è pertanto:

$$\rho = \lambda/\mu = 10/12 = \mathbf{0.833}$$

*Il carico offerto è il tasso di arrivo delle parti rispetto al tasso di servizio ed è una misura di quanto è "occupata" la stazione di elaborazione. È un valore importante per i calcoli rimanenti. Si noti che il carico offerto deve essere inferiore a 1 altrimenti la stazione di elaborazione non sarà in grado di tenere il passo con la domanda.*

- Il numero medio di parti nel sistema  $L_s$  è:

$$L_s = \rho/1 - \rho = 0.833/1 - 0.8333 = \mathbf{5}$$



Il “sistema di accodamento” a cui si fa riferimento include la stazione di elaborazione e il buffer precedente. Una singola parte nel sistema implica che la parte è in fase di elaborazione e il buffer è vuoto. Ad esempio, 5 parti implicano che in media c'è una parte in elaborazione e 4 parti nel buffer.

- Il numero medio di parti in attesa nella coda  $L_q$  è:

$$L_q = \rho^2 / (1 - \rho) = 0.8333^2 / (1 - 0.8333) = 0.694 / 0.167 = \mathbf{4.156}$$

Può sembrare contro intuitivo che il numero medio di pezzi in attesa non sia solo il numero medio di pezzi nel sistema meno uno, ma ciò è dovuto al fatto che i pezzi arrivano in tempi variabili durante l'operazione di lavorazione del pezzo (chiamato “tempo residuo”), combinato con la coda a volte vuota.

- Il tempo medio delle parti nel sistema  $W_s$  è:

$$W_s = \frac{1}{\mu - \lambda} = \frac{1}{12 - 10} = \mathbf{0.5 \text{ ore (30 minuti)}}$$

Il tempo totale che una parte trascorre in coda è la combinazione del tempo di attesa e del tempo di elaborazione. Questo ovviamente varierà considerevolmente in base alle fluttuazioni della lunghezza della coda.

- Il tempo medio delle parti nella coda  $W_q$  è:

$$W_q = \frac{1}{\mu - \lambda} - \frac{1}{\mu} = \frac{1}{12 - 10} - \frac{1}{12} = \mathbf{0.416 \text{ ore (25 minuti)}}$$

Come affermato in precedenza, il tempo che una parte trascorre nel sistema è il tempo di attesa più il tempo di elaborazione. Quindi il tempo che la parte trascorre in attesa è solo il tempo totale del sistema meno il tempo medio di elaborazione.

- La probabilità che la coda sia uguale o superiore a 10 parti è:

$$P_{11 \text{ o più}} = \rho^{11} = 0.8333^{11} = \mathbf{0.135}$$

Si presume che la coda M/M/1 abbia un buffer di lunghezza infinita in quanto ciò semplifica notevolmente la matematica sottostante. Questo ovviamente non è un presupposto realistico per i sistemi reali, quindi un'applicazione comune della teoria delle code è calcolare la frequenza con cui viene superata la lunghezza massima della coda. Ricorda che  $P_n$  è il numero di parti nell'intero sistema (inclusa

*l'elaborazione) non solo la coda. Quindi la probabilità che la coda superi 10 è la probabilità che il numero di parti nel sistema superi 11.*

*Le conseguenze di una coda che supera il suo limite massimo possono variare in modo significativo, ma un problema comune sarebbe che la precedente stazione di produzione nella linea di produzione è "bloccata", ovvero non può produrre le sue parti perché non possono andare da nessuna parte. Ciò può influire negativamente sulla produttività, quindi è importante capire se questo sarà un evento normale o molto raro. Al contrario, un buffer di grandi dimensioni può essere costoso o occupare molto spazio, in particolare per parti e prodotti più grandi. Se i calcoli mostrano che il sistema non richiederà mai un buffer così grande, il buffer può essere ridotto di dimensioni o mai acquistato in primo luogo.*

#### 4.3.4 La teoria delle Code: Conclusione

Come suggerisce la notazione di Kendall, le code M/M/1 sono un unico tipo in una vasta gamma di possibilità, tuttavia sono spesso discusse poiché sono entrambe semplici da calcolare e perché rappresentano un gran numero di sistemi di accodamento del mondo reale con solo poche ipotesi semplificatrici. Tuttavia, non coprono tutti i tipi di coda; ad esempio, dove la durata del servizio è una costante nota (ad esempio, un'operazione di fresatura CNC automatizzata con un programma fisso) si avrebbe una coda M/D/1. Un buffer che alimenta tre stazioni di elaborazione simili potrebbe essere una coda M/M/3.

Per ciascuno di questi tipi di code esistono formule per misurare le prestazioni. Ad esempio, il numero medio di parti nel sistema per una coda M/M/1 è dato dall'equazione 4.3.8:

$$L_s = \frac{\rho}{1-\rho} \quad (4.3.8)$$

In confronto, il numero medio di parti in attesa in una coda M/M/c (cioè una coda M/M con server  $c$ ) è dato da:

$$L_s = \frac{\rho}{1-\rho} C(c, \lambda/\mu) + c\rho \quad (4.3.16)$$

dove  $C(c, \lambda/\mu)$  è uguale a:

$$C(c, \lambda/\mu) = \frac{1}{1 - (1-\rho) \left( \frac{c!}{(c\rho)^c} \sum_{k=0}^{c-1} \frac{(c\rho)^k}{k!} \right)} \quad (4.3.17)$$

che è chiaramente una situazione molto più complessa!

È qui che i pacchetti di simulazione e modellazione basati su computer diventano importanti, nascondendo e risolvendo la complessità per gli utenti e consentendo il calcolo di situazioni molto più complesse con un minor rischio di errore e un minore investimento di tempo per conto dell'utente.

## 4.4 Conclusioni

L'analisi della produzione è una combinazione di diversi aspetti: comprendere come affrontare formalmente il processo decisionale, qual è realmente la domanda che viene posta in termini di KPI, raccogliere dati per informare il processo di analisi e infine eseguire calcoli e modelli per trovare una risposta alla domanda. Comprendere il processo è importante quanto le formule e i modelli stessi, poiché una volta compreso il processo, è possibile cercare e implementare le formule pertinenti.

Tuttavia, come mostrato alla fine della sezione dedicata alla teoria delle code, i calcoli apparentemente semplici per l'analisi della produzione possono diventare rapidamente più complessi man mano che la situazione analizzata si espande oltre i piccoli esempi. Allo stesso modo per la capacità di produzione e l'analisi del tasso di produzione, più facile è la situazione più facile è la matematica richiesta. Tuttavia, i sistemi di produzione reali sono raramente così semplici e i calcoli richiesti possono diventare rapidamente complessi, richiedere tempo e soggetti a errori.

Sebbene sia importante comprendere le basi matematiche, esiste una gamma sostanziale di strumenti informatici che possono aiutare nell'analisi e nel processo decisionale, rimuovendo o nascondendo gran parte della complessità e consentendo all'utente di essere più preciso, produttivo e più in grado di rispondere al cambiamento. Il processo decisionale, la comprensione e l'applicazione corretta degli indicatori chiave di prestazione e la comprensione del motivo per cui uno strumento è adatto e dei suoi limiti sono tutti elementi importanti.

Il prossimo capitolo (Capitolo 5) si concentrerà sulla modellazione e simulazione di strumenti digitali basati offline, cioè non collegati in tempo reale a un sistema di produzione. Il Capitolo 6 illustrerà l'area di sviluppo dei gemelli digitali, che sono strumenti di modellazione collegati direttamente a sistemi fisici e si aggiornano in tempo reale. Inoltre, saranno presentati anche alcuni sistemi di supporto decisionale.

**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 riprodurre 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.

## 4.5 Bibliografia

- [1] R. H. Hayes and S. C. Wheelwright, Restoring our competitive edge: competing through manufacturing (Vol. 8), New York: Wiley, 1984.
- [2] H. A. Simon, The new science of management decision, Harper & Brothers, 1960.
- [3] M. Davidson, “28 Manufacturing Metrics that Actually Matter (The Ones We Rely On),” LNS Research, 9th October 2013. [Online]. Available: <https://blog.lnsresearch.com/blog/bid/188295/28-manufacturing-metrics-that-actually-matter-the-ones-we-rely-on>.
- [4] International Organization for Standardization (ISO), *ISO 22400-1:2014 Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management — Part 1: Overview, concepts and terminology*, 2014.
- [5] H. T. Papadopolous, C. Heavey and J. Browne, Queueing theory in manufacturing systems analysis and design., Springer Science & Business Media, 1992.



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